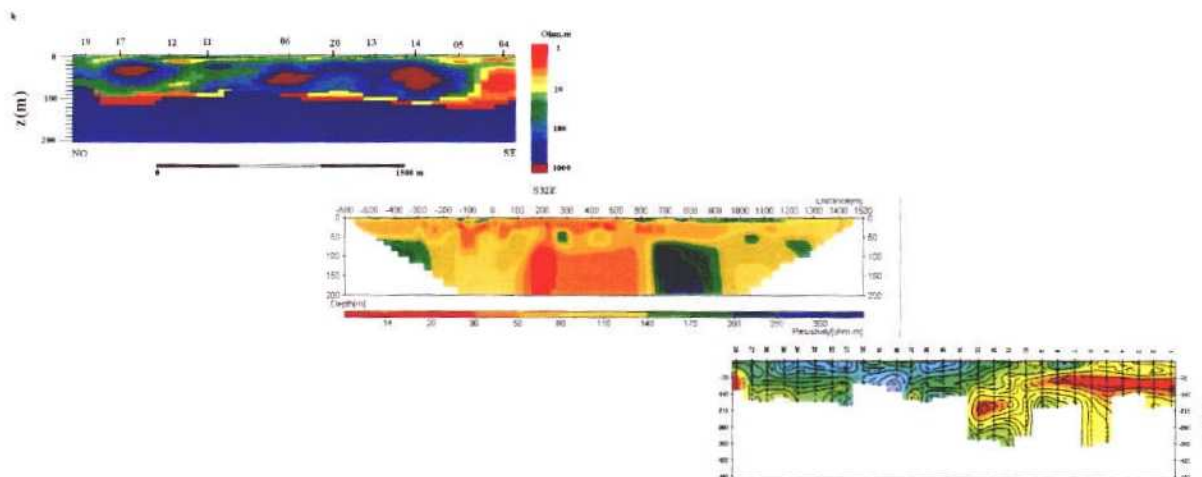


63/14
I



INFORME FINAL DEL PROYECTO

TOMOGRAFIA GEOELECTRICA:DESARROLLO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS



PROGRAMAS NACIONALES DE I+D
REN2002-04538-C02-01
REN2002-04538-C02-02



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

PROGRAMAS NACIONALES DE I+D ORIENTADA: RECURSOS NATURALES
TIPO DE PROYECTO: INVESTIGACIÓN BÁSICA
ÁREA CIENTÍFICO-TÉCNICA: CIENCIAS DE LA TIERRA

INFORME FINAL

TOMOGRAFIA GEOELECTRICA:DESARROLLO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS

PROYECTO COORDINADO

Referencia: **REN2002-04538-C02-01**

Referencia: **REN2002-04538-C02-02**

Octubre 2002 – Diciembre 2005

UNIVERSIDAD DE BARCELONA INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
DICIEMBRE 2005

Este documento recoge la labor realizada en el Proyecto referenciado. La información aquí suministrada se complementa con las presentaciones efectuadas en diversos Congresos y las publicaciones tanto ya realizadas como en curso de preparación. Todos los datos quedan a disposición pública en el Centro de Documentación del IGME, y los ficheros de registros instrumentales serán incorporados en la base de Datos Geofísicos SIGEOF. Las conclusiones de los trabajos realizados serán objeto de un informe posterior.

GRUPO DE TRABAJO

Universidad de Barcelona:

Investigador Principal, Coordinador: Alejandro Marcuello Pascual

Investigadores:

Juan José Ledo Fernández, U.B.

Pilar Queralt Capdevilla, U.B.

Ana Martí Castells, U.B.

Ana Gabás Gasa (hasta enero de 2004), U.B.

Ester Falgás Parra (desde mayo de 2003), U.B.

Teresa Teixidó Ullod, Intituto Cartográfico de Cataluña

José Antonio Peña Ruano, Unv. Granada

Fidel Ribera Urenda, Fundación C.I. Hidrología Subterránea

Instituto Geológico y Minero de España:

Investigador Principal: Juan Luis Plata Torres

Investigadores:

Felix Manuel Rubio Sánchez-Aguililla, IGME

Juan Antonio López Geta, IGME

Juan Grima Olmedo (hasta diciembre de 2003), IGME

Julio Cesar López Gutierrez (desde enero de 2004), IGME



INFORME	Identificación:
	Fecha:
TITULO	
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: DESARROLLO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS (GEOELEC)	
PROYECTO	
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA: DESARROLLO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS (GEOELEC) [Proyecto Programa Nacional de I+D REN2002-04538-C02; IGME 2003/17]	
RESUMEN	
<p>Se han desarrollado nuevas técnicas de interpretación, mediante optimización de la malla y aceleración en el cálculo de la respuesta de los algoritmos de modelización. Así mismo, se han modificado algoritmos para obtener como respuesta la resistividad aparente y la fase del determinante de impedancias, invariante del tensor de lecturas magnetotelélicas. En cuanto a la inversión se ha puesto a punto un algoritmo para tomografía eléctrica que permite controlar los parámetros, buscando la solución por un esquema iterativo basado en la linealización del problema según el método de Marquardt; para los datos magnetotelélicos se ha desarrollado una técnica para valorar la importancia del tipper, y realizar la inversión conjunta de datos de corriente continua y magnetotelélicos.</p> <p>Tras seleccionar tres áreas para las fases de mejora del proceso de adquisición de datos y validación experimental, se ha desarrollado la metodología de optimización de parámetros de medida con varias técnicas geoelectricas tomográficas, para la investigación de la geometría de acuíferos en tres tipos de condiciones geológicas: geología compleja, a profundidad media (delta del río Tordera); resolución de estructuras tectónicas a mayor profundidad (Fosa de Bechí, Castellón); y casos de alta resolución muy superficial (Bahía de Cádiz).</p> <p>Se han medido perfiles de tomografía, Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo y Sondeos Magnetotelélicos. Los parámetros de adquisición de los perfiles de resistividad, diseñados en función de los objetivos, han sido de 15 m de espaciado interelectrónico, con dispositivos tipo Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo a lo largo de la totalidad, o en parte, de los mismos perfiles. La instrumentación utilizada ha sido el equipo Lund de ABEM, Terrámeter SAS 4000/1000, propiedad del IGME. En las campañas efectuadas se ha puesto de manifiesto uno de los posibles casos de indefinición en la resolución y penetración de la tomografía eléctrica por corriente continua. Por esta razón se ha considerado necesario efectuar mediciones con métodos electromagnéticos, utilizando instrumentación de la marca Zonge, con receptor GDP-32, transmisor ZT-30 y antena receptora TEM-3, por asistencia técnica; la distancia entre mediciones ha sido del orden de los 100 m. Para las estaciones magnetotelélicas, efectuadas por la Universidad de Barcelona, se han utilizado el equipo ADU06 de Metronix, de fuente natural, y el Stratagem del Geometrics, de fuente controlada, utilizando distancias del orden de 300 m entre mediciones. La utilización conjunta de estos datos permite complementar los grados de penetración y resolución de cada técnica, obteniéndose imágenes del subsuelo que definen con gran precisión las características de los acuíferos involucrados. Hojas 1/50.000: 366 (39-14), 365 (38-14), 640 (29-25), 641 (30-25), 1068 (11-46), 1069 (12-46), 1062 (12-45)</p>	
Revisión Nombre: Juan Luís Plata Torres Unidad: Geología y Geofísica Fecha: marzo 2006	Autores: Juan L. Plata Torres (IGME) Félix M. Rubio Sánchez-Aguililla (IGME) Juan A. López Geta (IGME) Julio C. López Gutiérrez (IGME) Alejandro Marcuello Pascual (UB) Juan L. Ledo Fernández (UB) Pilar Queralt Capdevilla (UB) Teixidó Ullod (ICC) José A. Peña Ruano (UG) Fidel Ribera Urenda (CIHS) Responsable: Juan Luís Plata Torres

INDICE

0. RESUMEN Y CONCLUSIONES
1. DEFINICIÓN Y ENCUADRE DEL PROYECTO
2. OBJETIVOS
3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO
4. DESARROLLO DE NUEVAS TÉCNICAS DE INTERPRETACIÓN
 - 4.1 MODELIZACIÓN
 - 4.1.1 Tomografía eléctrica
 - 4.1.1.1.La cuestión de la malla
 - 4.1.1.2.Aceleración en el cálculo de la respuesta
 - 4.1.2 Magnetotelúrica
 - 4.2 INVERSIÓN
 - 4.2.1 Tomografía eléctrica
 - 4.2.2 Magnetotelúrica
 - 4.2.3 Inversión conjunta de datos eléctricos y magnetotelúricos
5. DESARROLLO DE SISTEMAS DE PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS MAGNETOTELÚRICOS
 - 5.1 PROCESADO MEDIANTE LA TRANSFORMADA ONDICULAR
 - 5.2 LAS RELACIONES DE DISPERSIÓN PARA EL *TIPPER*
 - 5.3 ESTUDIO DE LOS INVARIANTES DEL TENSOR DE IMPEDANCIAS
6. MEJORA DE LA INSTRUMENTACIÓN
7. CAMPAÑAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA EN EL RÍO TORDERA
 - 7.1 DATOS PREVIOS. CRITERIOS SEGUIDOS PARA LA SELECCIÓN
 - 7.2 ADQUISICIÓN DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO
 - 7.2.1 Aspectos metodológicos e instrumentales
 - 7.2.2 Diseño y ejecución de las campañas de campo
 - 7.2.3 Proceso e interpretación de datos
 - Campaña de reconocimiento
 - Perfil paralelo al río Tordera PS4
 - Perfil paralelo al perfil sísmico PS1
 - Perfil M1 perpendicular a la línea de costa

7.3 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO PERFILES DE RESISTIVIDAD

- 7.3.1 Aspectos metodológicos e instrumentales**
- 7.3.2 Diseño y ejecución de las campañas de campo**
- 7.3.3 Proceso e interpretación de datos**
 - Perfil PS4 paralelo al río Tordera**
 - Perfil PS1**
 - Perfil de la Playa**

7.4 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO DE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS

- 7.4.1 Aspectos metodológicos e instrumentales**
- 7.4.2 Diseño y ejecución de las campañas de campo**
 - Determinación de los parámetros de medición**
 - Medición a lo largo de los perfiles**
- 7.4.3 Proceso, Análisis e Interpretación de los datos**
 - Análisis de los datos del perfil PS1**
 - Análisis de los datos del perfil PS4**

8. CAMPAÑAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA EN EL HORST DE BECHI (CASTELLÓN)

8.1 DATOS PREVIOS

8.2 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO PERFILES DE RESISTIVIDAD

- 8.2.1 Diseño y ejecución de las campañas de campo**
- 8.2.2 Proceso e interpretación de datos**

8.3 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

- 8.3.1 Diseño y ejecución de las campañas de campo**
- 8.3.2 Proceso e interpretación de datos**

9. CAMPAÑAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA EN LA ZONA COSTERA DE LA MARISMA DE CÁDIZ

9.1 DATOS PREVIOS

9.2. TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO PERFILES DE RESISTIVIDAD

- 9.2.1 Diseño y ejecución de las campañas de campo**

ANEXOS:

- A. Informe hidrogeológico de la zona del río Tordera**
- B. Informe hidrogeológico de la zona de Castellón**
- C. Informe geológico de la zona de Cádiz**
- D. Datos iniciales de la zona del río Tordera**
- E. Datos de campo de las mediciones de tomografía del Tordera**
- F. Datos de campo de las mediciones de SEDT del Tordera**
- G. Datos de campo de las mediciones MT del Tordera**
- H. Datos de campo de las mediciones de tomografía en Bechí**
- I. Datos de campo de las mediciones MT en Bechí**
- J. Datos de campo de las mediciones de tomografía en Cádiz**
- K. Datos para la base SIGEOF**

Los Anexos D a K se entregan exclusivamente en soporte informático, excepto en el ejemplar del Centro de Documentación del IGME, donde se adjuntan copias en papel de los informes presentados por Geognosia, que forman parte del Anexo F. Además de los datos, estos Anexos contienen los archivos correspondientes al material gráfico generado para la realización del Informe. Los ficheros de datos de campo quedan también archivados en las bases de datos del IGME y de la Universidad de Barcelona. La base de datos SIGEOF del IGME es de acceso público a través de Internet en www.igme.es

Disco GEOELEC-1: Informe; Anexos A, B, C y D1

Disco GEOELEC-2: Anexo D2

Disco GEOELEC-3: Anexos E, F, H, I, J y K

Disco GEOELEC-4: Anexo G

0. RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. Encuadre y alcance del Proyecto

Este Proyecto se enmarca dentro del bloque temático de *aplicación de nuevas tecnologías para el control de la cantidad y calidad del agua* (punto 3.5 en el Plan Nacional de Recursos Naturales).

La resistividad de las rocas está relacionada con la porosidad y contenido en agua, por lo que es un parámetro de gran utilidad para la determinación de la geometría de los acuíferos, y para la evaluación de la calidad de las aguas. Existen muchas formas de explorar geoelectricamente el subsuelo, siendo las de mayor resolución las denominadas técnicas tomográficas, en las que los dispositivos de medición y el proceso de datos facilita la obtención de una imagen o sección de la variación de la resistividad con gran continuidad vertical y lateral. Esta metodología precisa aun de desarrollo a fin de optimizar la toma de datos en campo, su tratamiento e interpretación.

Por otra parte, la utilización de métodos de corriente continua, o de métodos electromagnéticos y magnetotelúricos para la obtención de las imágenes de resistividad del subsuelo, hacen necesario llevar a cabo trabajos de investigación para optimizar la definición de los límites de aplicación de cada tipo de excitación eléctrica del terreno, así como para su mejor integración en la resolución de temas hidrogeofísicos en los que sea necesario resolver cuestiones tanto superficiales como a mayor profundidad.

Para la ejecución de este trabajo se ha contado con el apoyo de los siguientes proyectos:

- Proyecto de Investigación **REN2002-04538-C02-01**, del PLAN NACIONAL DE I+D+I 2000-2003, del Grupo de Geofísica de la Universidad de Barcelona, destinado al desarrollo de los aspectos numéricos del Proyecto.
- Proyecto de Investigación **REN2002-04538-C02-02**, del PLAN NACIONAL DE I+D+I 2000-2003, del Grupo de Geofísica del IGME, para comprobación experimental de la metodología y de los algoritmos implementados en zonas elegidas como laboratorios de campo.
- Proyecto **IGME-2003/17**

El presente Informe se refiere a las actividades llevadas a cabo dentro del Proyecto **REN2002-04538-C02-02**, con el apoyo del Proyecto **IGME-2003/17**.

2. Objetivos específicos

A) Mejorar la utilización de la instrumentación y del proceso de adquisición de datos en campo, para conseguir una mejor resolución de las estructuras.

B) Validar experimentalmente la metodología de inversión desarrollada, mediante la realización de trabajos en zonas de ensayo.

Como zonas de ensayo se han seleccionado tres áreas, cubriendo diversas problemáticas de la tomografía geoelectrica:

- Zona del delta del río Tordera (Gerona), para determinación de parámetros en casos de situación geológica compleja, a profundidad media.
- Zona del Horst de Bechí (Castellón), para resolución de estructuras tectónicas a mayor profundidad.
- Zona Costera de la Marisma de Cádiz, para verificación de la metodología en casos de alta resolución muy superficial.

3. Campañas de validación experimental de la metodología en el río Tordera con el método Perfiles de Resistividad

Esta zona fue seleccionada por la gran cantidad de datos geofísicos previos disponibles, lo que permitía presuponer un buen conocimiento de la distribución de la resistividad en el subsuelo: dos perfiles de sísmica de reflexión (PS4 a lo largo del curso del río, y PS1 transversal), Sondeos Eléctricos Verticales, y sondeos mecánicos. En síntesis, se trata de una secuencia de materiales detríticos deltaicos, que reposan sobre un basamento granítico, cuya tectónica da la morfología de la base impermeable del acuífero.

En función de los datos conocidos se determinó la realización de dos paralelos a los sísmicos, medidos de tomografía eléctrica y por Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo. Estas mediciones, de carácter lineal, fueron complementadas con estaciones Magnetotelúricas distribuidas espacialmente.

Los parámetros de adquisición de los perfiles de resistividad, diseñados en función de los objetivos, han sido de 15 m de espaciado interelectrónico, con dispositivos tipo Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo a lo largo de la totalidad, o en parte, de los mismos perfiles. La instrumentación utilizada ha sido el equipo Lund de ABEM, Terrámeter SAS 4000/1000, propiedad del IGME.

La toma de datos en campo se llevó a cabo en dos campañas, noviembre de 2003 y de 2004, fechas condicionadas a periodos secos del río Tordera, de manera que fuera posible la toma de datos en su cauce y minimizar así la contaminación por ruidos electromagnéticos. Por razones logísticas, el perfil PS4 fue necesario dividirlo en tres tramos: uno de 2100 m, medido en la margen izquierda, continuado con otros 1200 m en la orilla derecha del río, unidos al año siguiente con un perfil de 1800 m atravesando el río, y solapándose con los anteriores. Como consecuencia de esta unión se dispone de un único perfil de unos 3000 m de longitud, paralelo al río Tordera. El perfil de resistividad PS1, de 1500 m, coincide con el perfil sísmico transversal. Por último, y para comprobar la aplicación de esta metodología en un ambiente conductor, se midió un perfil de 600 m en la playa, paralelo a la línea de costa y a la batería de sondeos mecánicos realizados para la desaladora instalada en la zona, con el objetivo de estudiar la posibilidad de obtener información de los niveles acuíferos que controlan los sondeos mecánicos, en un ambiente, a priori, no apropiado para la utilización del método.

La inversión del perfil PS1 ha incluido el desarrollo de una técnica para la unión de perfiles, teniendo en cuenta que las medidas más someras son las más afectadas por las heterogeneidades superficiales, mientras que en los niveles más profundos, los valores de resistividad tienden a igualarse, mostrando una buena continuidad en las lecturas para los solapes entre perfiles. De esta forma se ha formado un perfil único que mantiene las características de los parciales, consiguiendo una unión de medidas tomadas un año después con buenos resultados. Los perfiles medidos con configuración

Schlumberger y Dipolo-Dipolo, muestran un aspecto más irregular que el medido con la configuración Wenner, aunque cualitativamente mantienen la misma información. El perfil Dipolo-Dipolo es el más ruidoso de todos; su error de ajuste ha sido 3 veces superior.

En el PS4, los perfiles obtenidos con ambos dispositivos proporcionan también una información muy similar, un poco más ruidosa con la configuración Schlumberger. Llama la atención el sustrato conductor existente bajo la cobertera resistiva, similar al encontrado en el perfil PS1, así como el sustrato más resistivo que aparece con la configuración Schlumberger, y que no se observa en el perfil Wenner, por lo que es posible que pueda ser debido a una elevación del sustrato, no alcanzado con el perfil Wenner y si con el Schlumberger, de mayor penetración.

4. Campañas de validación experimental de la metodología en el río Tordera con el método Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo SEDT

En las campañas efectuadas en el río Tordera se ha puesto de manifiesto uno de los posibles casos de indefinición en la resolución y penetración de la tomografía eléctrica por corriente continua a que hicimos mención en la definición y encuadre del presente Proyecto: los perfiles de resistividad obtenidos no llegan a detectar la existencia del granito a la profundidad esperada, por lo que habría que utilizar métodos más penetrativos. Por esta razón se ha considerado necesario efectuar mediciones con métodos electromagnéticos.

La toma de datos se ha llevado a cabo también en dos periodos: diciembre de 2004 y junio de 2005, y han sido efectuadas por la compañía de servicios geofísicos GEOGNOSIA S.L., bajo la dirección técnica del IGME y con la colaboración y participación de la Universidad de Castilla La Mancha, utilizando parte de los recursos del Proyecto IGME-2003/17. Se ha seleccionado para efectuar las mediciones las alineaciones utilizadas por los Perfiles de Resistividad, en coincidencia con los perfiles Sísmicos de reflexión PS1 y PS4.

La instrumentación utilizada ha sido de la marca Zonge, con receptor **GDP-32**, transmisor **ZT-30** y antena receptora **TEM-3**.

El trabajo desarrollado ha constado de las siguientes fases:

1.- Determinación de los parámetros de medición: definición del tamaño del bucle, intensidad de corriente y frecuencia, para conseguir una penetración suficiente para llegar al basamento granítico sin alteración situado, según estudios previos, entre 100 y 150 metros en la zona del perfil PS1, y más somero en la del PS4. A esta fase se han destinado 25 mediciones, efectuando diversas pruebas con diferentes frecuencias, tamaños de bucle y número de vueltas de cable.

2.- Medición de los perfiles: se han efectuado de tal forma que las posiciones de los centros de los sucesivos bucles de emisión estén a una distancia del orden del lado del bucle empleado. Las mediciones se han hecho en dos posiciones respecto al bucle emisor: en el centro y a 50 ó 100 metros en la dirección del perfil, lo que permite discriminar entre la situación de capas horizontales o sub-horizontales, ya que en este último caso, dentro del bucle puede darse un mal acoplamiento, por lo que el campo

secundario medido será de muy baja intensidad, y no ocurriría lo mismo fuera de bucle. Se han efectuado un total de 45 medidas en los centros de los bucles y 39 fuera, para control de las estructuras.

Para el perfil PS1, de 1500 metros de longitud, se han utilizado los siguientes parámetros: frecuencia de emisión de 8Hz; bucle de 100mx100m, con una vuelta de cable. En el perfil PS4, de 1960 metros, se han utilizado frecuencia de emisión de 8Hz y 16Hz; bucle de 70mx70m, con una vuelta de cable.

3.- Proceso, análisis e inversión de los datos. Una vez medidos los perfiles se ha procedido a su inversión, para convertir los datos medidos en perfiles de variación de la resistividad con la profundidad. Al igual que en la determinación de los parámetros de adquisición, se han llevado a cabo numerosos análisis y ensayos con los principales parámetros que afectan a la inversión: el peso que se le asigna al modelo inicial, y el peso que se le asigna al modelo final, a fin de crear modelos con errores bajos pero con significado geológicamente adecuado a la investigación. El proceso del perfil PS4 ha resultado especialmente complejo, debido a la mayor contaminación por ruido existente en gran parte del mismo. Tras varios ensayos, se decidió efectuar una limpieza de los datos, estableciendo criterios objetivos para aceptar o rechazar estaciones completas o ventanas de tiempo de estas estaciones.

Respecto del perfil PS1, los resultados obtenidos no son compatibles con los datos de los sondeos mecánicos próximos, por lo que respecta a la profundidad del granito, al menos si se trata de granito sin alterar. En el PS4, básicamente, todos los modelos obtenidos aportan la misma información. Las medidas fuera del bucle son muy similares a las tomadas dentro, lo que implica una geología muy horizontal. La profundidad de investigación llega en casi todo el estudio hasta 150 metros de profundidad. Se determina la existencia de un cambio lateral entre las estaciones 11 y 12 que separa dos zonas distintas, una más conductora cerca del mar de otra más resistiva.

5. Campañas de validación experimental en la zona del Horst de Bechí (Castellón), por el método de Perfiles de Resistividad

Esta zona se encuentra en el sistema acuífero 56.01 de La Plana de Castellón, seleccionándose el Sector occidental de Villarreal, donde el acuífero pliocuaternario tiene más de 150 m de potencia. Se dispone de información de sondeos mecánicos y SEV. El objetivo es estudiar la capacidad de los métodos geoelectrónicos tomográficos para definir la geometría del basamento mesozoico, donde destaca la presencia de un horst de dirección NE-SO, limitado por fallas con un salto vertical superior a los 150 m.

Los perfiles de resistividad se midieron en junio de 2004, utilizando el sistema LUND, propiedad del IGME.

El perfil transversal a la estructura no atraviesa el horst completamente, ya que debió ser interrumpido a los 1500 m, por la existencia de una autovía en construcción. Por ello, se midió un segundo perfil situado al suroeste del anterior, con 3000 m, y dirección sureste-noreste, que atraviesa el horst de una manera oblicua. Dadas las características del objetivo se ha seleccionado un dispositivo Wenner, con distancia entre electrodos de 15 m. Además, en el primer perfil el último dispositivo fue medido también con una configuración dipolo-dipolo.

En los resultados de la inversión del primer perfil se aprecia la existencia de materiales cuaternarios con un espesor de unos 35 a 40 m, bajo los que se encuentra un conductor, arcillas y margas miocenas, que rellenan la cuenca. En la parte final del perfil se observa un sustrato resistivo, que se ha correlacionado con una elevación del techo mesozoico, el horst objetivo del ensayo, y que aparece hacia los 100-120 m de profundidad, tal y como se esperaba. El resultado del perfil dipolo-dipolo es igual al obtenido con el dispositivo Wenner, confirmando la existencia a la misma profundidad del tramo resistivo, asociado al horst, y por lo tanto puede deducirse que en este tipo de estructuras tiene el mismo poder resolutivo el empleo de uno u otro tipo de dispositivo de medición.

En el segundo perfil se observa cómo la cobertera cuaternaria se va estrechando a medida que se progresa hacia el Norte, llegando a casi desaparecer. No se observa un sustrato resistivo tan claro como en el perfil anterior, lo que parece estar indicando que el horst en esta zona se encuentra más profundo, por lo que en este caso no ha sido claramente alcanzado.

6. Campañas de validación experimental en la zona costera de la Marisma de Cádiz, por el método de Perfiles de Resistividad

En esta zona se dispone exclusivamente de la información geológica procedente de varios sondeos mecánicos, realizados por el Área de Investigación y Estudios Geológicos del IGME dentro del proyecto: "Evaluación histórica de la sedimentación en las marismas de la Bahía de Cadiz y bajo Guadalquivir". Dada la importancia que tiene para el proyecto anterior el conocer la evolución y el espesor de los depósitos de estuarios y fluviales (del orden de los 5 metros de potencia) por encima de la ostionera, se consideró de interés evaluar la posibilidad del método de la tomografía eléctrica para tal fin, y estudiar su respuesta dentro de un ambiente tan conductor. Dada la profundidad de investigación requerida en este caso, solamente se ha considerado la toma de datos con el método de imágenes eléctricas, único de los contemplados en este Proyecto con la capacidad de resolución requerida en función de los objetivos y su profundidad.

Se seleccionaron tres sondeos mecánicos (12, 17 y 30), junto a los que se midieron los perfiles eléctricos. A fin de controlar lo mejor posible la resolución tanto vertical como horizontal, en todos los casos se han utilizado dos configuraciones diferentes: Wenner y Wenner-Schlumberger, variando la separación interelectródica en función de las circunstancias de cada zona en concreto. Los datos se han tomado en octubre de 2004, utilizando el sistema LUND, propiedad del IGME.

En la zona del sondeo 17 se realizó un perfil de 80 m, con un espaciado entre electrodos de 1 m. Junto al sondeo 12 se realizó un perfil de 700 m con espaciado de 5 m. En el sondeo 30 se efectuó un perfil de 700 m con espaciado entre electrodos de 5 m. El resultado de la inversión, y su correlación con las columnas de los sondeos mecánicos, ha demostrado la perfecta localización del paso de la fácies de estuario a la ostionera, determinando perfectamente el espesor y la morfología del sustrato, tanto con el dispositivo Wenner, como con el Wenner Schlumberger, si bien el alguno de los perfiles la morfología de la fácies estuario es más irregular, y con un mayor espesor en el perfil Wenner.

1. DEFINICIÓN Y ENCUADRE DEL PROYECTO

Este Proyecto se enmarca dentro del bloque temático de *aplicación de nuevas tecnologías para el control de la cantidad y calidad del agua* (punto 3.5 en el Plan Nacional de Recursos Naturales).

Los métodos de prospección geoelectrica permiten obtener información de la distribución de la resistividad de los materiales del subsuelo. Esta propiedad está intrínsecamente relacionada con la litología, porosidad y contenido en agua de las rocas, por lo que su utilización es fundamental para la determinación de la geometría de los acuíferos, así como para la evaluación de la calidad de las aguas. Bajo determinadas condiciones, su uso permite así mismo la obtención de los valores de algunos parámetros hidráulicos (porosidad, permeabilidad) necesarios para la creación de modelos útiles en la gestión de los acuíferos.

Existen muchas formas de explorar geoelectricamente el subsuelo, siendo las de mayor resolución las denominadas técnicas tomográficas, que suponen la utilización de unos dispositivos de medición tales que facilitan la obtención de una imagen o sección de la variación de la resistividad con gran continuidad tanto en vertical y como en sentido lateral. Esta metodología precisa aun de bastante trabajo de desarrollo a fin de optimizar la toma de datos en campo, su tratamiento e interpretación. Por otra parte, la utilización de métodos de corriente continua, o de métodos electromagnéticos y magnetotelúricos para la obtención de las imágenes de la resistividad del subsuelo, hacen necesario llevar a cabo trabajos de investigación para conseguir una mejor definición de los límites de aplicación de cada tipo de excitación eléctrica del terreno, así como su mejor integración para la resolución de temas hidrogeofísicos en los que sea necesario resolver cuestiones tanto de índole superficial como a mayor profundidad.

Algunos de los principales problemas metodológicos que no han sido todavía plenamente resueltos son:

- El diseño óptimo de los dispositivos de medida, de acuerdo con las profundidades y resolución requeridas en cada caso, lo que va unido a las características y prestaciones de cada tipo de instrumentación disponible.
- La obtención de imágenes geoelectricas que ofrezcan una distribución de resistividades con cambios netos, como ocurre en la naturaleza (salvo casos muy especiales), en vez de con amplios gradientes de transición, lo que dificulta la correcta interpretación de la geometría de los acuíferos o de las zonas salinizadas.
- Una manera satisfactoria de tener en cuenta los efectos de la topografía y de las pequeñas estructuras superficiales, en especial del denominado *static shift* en las mediciones magnetotelúricas.
- La identificación de direcciones estructurales y, en general, la forma de tener en cuenta la anisotropía que ofrece la geología.

Entre estos tipos de problemas existe cierta interdependencia, de tal forma que la metrología y el proceso de datos son temas que deben considerarse conjuntamente, siendo por lo tanto deseable que en un proyecto para su estudio participen especialistas en estas dos grandes líneas de la geofísica aplicada, razón fundamental por la que este Proyecto se ha llevado a cabo mediante el trabajo coordinado de dos grupos: el Grupo de Geofísica del IGME, y el Grupo de Geofísica del Departamento de Geodinámica y Geofísica de la Universidad de Barcelona.

Para la ejecución de este trabajo se ha contado con el apoyo de los siguientes proyectos:

- Proyecto de Investigación **REN2002-04538-C02-01**, del PLAN NACIONAL DE I+D+I 2000-2003, del Grupo de Geofísica de la Universidad de Barcelona
- Proyecto de Investigación **REN2002-04538-C02-02**, del PLAN NACIONAL DE I+D+I 2000-2003, del Grupo de Geofísica del IGME
- Proyecto **IGME-2003/17**

2. OBJETIVOS

El objetivo global del Proyecto es desarrollar la capacidad de las imágenes de la distribución de resistividad del subsuelo (tomografía geoelectrica) para la investigación de acuíferos. Los objetivos concretos son:

1/ Desarrollo de nuevas herramientas de interpretación y de sistemas para efectuar la corrección de las distorsiones sobre los datos electromagnéticos:

- Revisión de los algoritmos habituales de modelización y desarrollo de nuevos, con el objeto de optimizar la técnica de modelización, estudiando la situación en que exista un gran contraste de resistividad entre las estructuras del modelo, que es un aspecto que no está satisfactoriamente resuelto en la actualidad.
- Elaboración de algoritmos de inversión que integren diferentes tipos de datos geoelectricos (tanto de corriente continua como los magnetotelúricos), que permita abordar diferentes escalas de exploración.
- Empleo de la simulación numérica para analizar el efecto de las distorsiones locales ("static shift") sobre los datos y poder evaluar las hipótesis metodológicas que se realicen a partir del estudio de los campos electromagnéticos.

2/ Mejorar la disponibilidad y utilización de la instrumentación y del proceso de adquisición de datos:

- Diseño de nuevos dispositivos a partir de la simulación numérica y evaluación experimental con instrumentación propia, de cara a mejorar la capacidad para detectar y distinguir diferentes estructuras.

3/ Validar experimentalmente la metodología desarrollada en zonas de ensayo, obteniendo unas conclusiones finales de carácter aplicado, que sirvan como guía para caracterizar y realizar seguimientos en acuíferos, y por tanto, colaborar en la resolución de problemas reales y concretos que están surgiendo en la investigación hidrogeológica.

3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

El PLAN DE TRABAJO del Proyecto se ha estructurado en dos áreas de actividades autónomas, pero dependientes entre sí, para poder adaptar los recursos y la duración a los objetivos perseguidos. Estas áreas se corresponden a cada uno de los dos Subproyectos y son:

- A) Desarrollo de los aspectos numéricos del Proyecto (Subproyecto 1).
- B) Aplicación a las zonas elegidas como laboratorios de campo y la comprobación experimental de los algoritmos implementados (Subproyecto 2).

Como consecuencia de la metodología de trabajo propuesta, se han efectuado las siguientes tareas:

- T1. Modelización numérica 2D y 3D** (Centro ejecutor: Universidad de Barcelona UBAR).
- T2. Inversión** (Centro ejecutor: UBAR).
- T3. Planificación de las campañas de validación** (Centro ejecutor: Instituto Geológico y Minero de España, IGME).
- T4. Campañas de adquisición de datos de campo** (Centro ejecutor: IGME, mediante instrumentación propia y asistencias técnicas; y UBAR, empleando tanto el equipo propio actual, como las mejoras de los instrumentos solicitados en el Proyecto).
- T5. Proceso de datos experimentales** (Centro ejecutor: UBAR, apoyado por IGME).
- T6. Interpretación hidrogeológica de los resultados** (Centro ejecutor: IGME, apoyado por UBAR).
- T7. Difusión de los resultados** (Centros ejecutores: UBAR e IGME).

En los capítulos 4 y 5 de este Informe se describen los trabajos realizados en las tareas T1 y T2. Las tareas T3, T4, T5 y T6 serán descritas en los capítulos 7, 8 y 9, desglosados por áreas donde se han efectuado los trabajos.

4. DESARROLLO DE NUEVAS TÉCNICAS DE INTERPRETACIÓN

En el marco del presente proyecto se realizó una revisión de los algoritmos de interpretación más comunes para la interpretación de datos geoelectricos, como son los de tomografía eléctrica y los de magnetotelúrica. Se constató que las aplicaciones habituales para la tomografía eléctrica son comerciales (ej., RES2DINV), mientras que las de magnetotelúrica son académicas. Ello tiene implicaciones importantes al nivel de acceso a los códigos de los programas para su mejora, ya que en el primer caso ello no es posible, mientras que en el segundo no suele haber problemas siempre que no haya intereses comerciales.

Los aspectos metodológicos desarrollados en este capítulo y el siguiente recogen parte del trabajo desarrollado en las tesis de A. Gabàs, C. Arango, A. Martí y E. Falgàs.

En este capítulo se presentan las aportaciones desarrolladas a la modelización, y a la inversión.

4.1 MODELIZACIÓN

En primer lugar se describen los aspectos relacionados con la tomografía eléctrica y después con la magnetotelúrica.

4.1.1. Tomografía eléctrica

En este apartado se presentan dos aspectos de mejora en el ámbito de la modelización para la tomografía eléctrica en medio bidimensionales:

- Por un lado se observa que las imágenes de los modelos obtenidos por los programas de interpretación de ERT presentan una distribución suavizada de la resistividad eléctrica, que en algunos casos no se ajusta con la información geológica disponible que indican cambios abruptos de las propiedades.
- Por otro, y debido a que la fuente (electrodo de corriente) está asociado a un punto de la superficie, el problema directo para el potencial eléctrico es un problema tridimensional aunque la estructura geoelectrica sea bidimensional. Esta situación se reduce a un problema bidimensional cuando se aplica la transformada del coseno a las ecuaciones, y se trabaja con el potencial transformado. Para recuperar el potencial hay que efectuar la transformada inversa del potencial transformado, y es necesario disponer de valores de ese potencial transformado para diferentes números de onda (k_y). El inconveniente estriba en que para ubicación del electrodo de corriente y cada número de onda se debe calcular un sistema de ecuaciones diferente, como consecuencia del método de los elementos finitos, y este proceso tiene un coste importante de computación.

Ambas aportaciones van encaminadas a su inclusión posterior en el algoritmo de inversión bidimensional y son: 1) la cuestión de la malla, y 2) la aceleración en el cálculo de la respuesta, que se describen a continuación.

1) La cuestión de la malla

La resolución numérica de las ecuaciones que describen la prospección eléctrica en corriente continua se basa en técnicas numéricas como la de los elementos finitos, y requiere una malla de discretización del subsuelo suficientemente fina para obtener una solución con una precisión satisfactoria. Este refinamiento de la malla puede tener unos elevados costes de computación (memoria).

En este proyecto se ha abordado este problema con la estrategia de dos mallas, una malla denominada “malla dispositivo” que controla la calidad de la solución numérica, y otra malla denominada “malla modelo” que describe las características geoelectricas del subsuelo. La malla dispositivo ha de ser mucho más fina que la malla modelo. Este esquema de utilización de dos mallas es importante de cara a la elaboración del algoritmo de inversión que se presentará más adelante, porque permite reducir el número de parámetros del modelo.

La malla dispositivo se diseña en función del dispositivo electródico utilizado en la tomografía. La malla modelo describe el subsuelo con un número reducido de parámetros y, como se ha señalado, su dimensión es sensiblemente inferior a las de la malla dispositivo. En este contexto se ha desarrollado la estrategia de superponer ambas mallas para obtener la malla adecuadamente refinada para la resolución numérica, y que además contiene la información del modelo simplificado, de una manera sencilla. Ello se ilustra en la Figura 4.1.

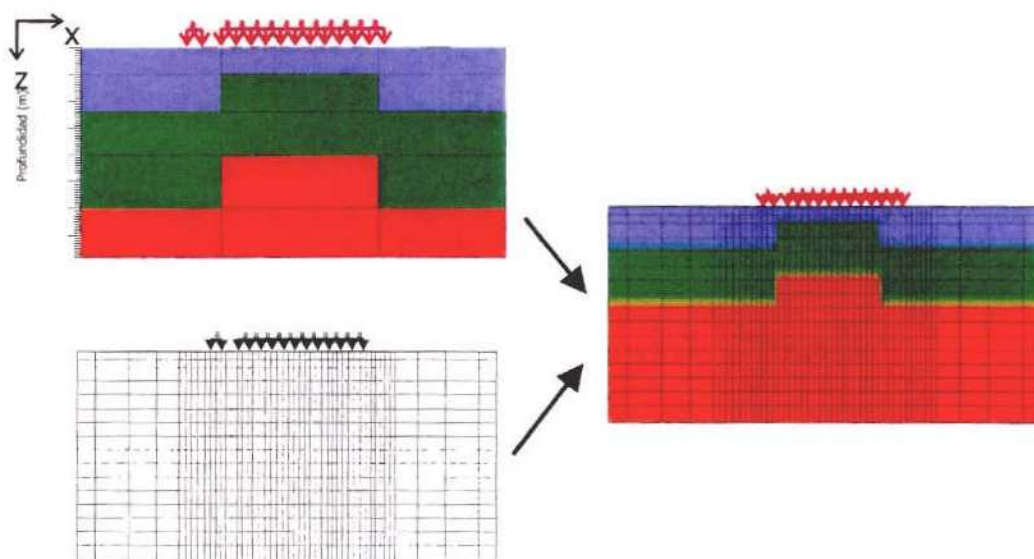


Figura 4.1 A la izquierda se muestran las mallas modelo (parte superior) y dispositivo (parte inferior), y a la derecha, la malla empleada en la modelización.

2) Aceleración en el cálculo de la respuesta

Para reducir el tiempo de cálculo de la modelización numérica (problema directo), se ha desarrollado un nuevo método para calcular el potencial a partir del potencial transformado, empleando un número reducido de valores del número de onda, k_y . Ello ha permitido una

disminución importante en el tiempo de ejecución, sin que aumente de forma significativa el error en el cálculo de la resistividad aparente.

El método se basa en considerar que el potencial eléctrico transformado se comporta como la función de Bessel modificada de segunda especie y orden cero, K_0 . Con ello se persigue simplificar el cálculo de la integral asociada al cálculo de la transformada inversa utilizando solo tres valores de k_y . La 4.2 ilustra el potencial eléctrico transformado en función de la variable $t=k_y \cdot r$, donde r indica la distancia a cualquier punto de la malla.

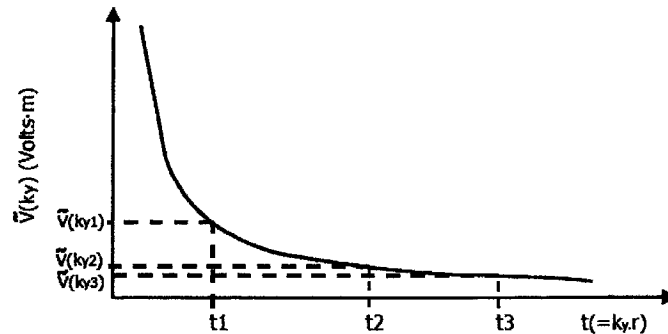


Figura 4.2 Representación del potencial eléctrico transformado, $V(k_y)$, en función de la variable $t=k_y \cdot r$.

A partir de los puntos t_1 , t_2 y t_3 , se construye cuatro intervalos dentro de los que se efectúa una aproximación del potencial transformado:

$$\tilde{V}(k_y) = C_1 \cdot K_0(t) \text{ entre } [0, t_1]$$

$$\tilde{V}(k_y) = C_1 \cdot K_0(t) + (C_2 - C_1) \cdot \left(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right) \cdot K_0(t) \text{ entre } [t_1, t_2]$$

$$\tilde{V}(k_y) = C_2 \cdot K_0(t) + (C_3 - C_2) \cdot \left(\frac{t - t_2}{t_3 - t_2} \right) \cdot K_0(t) \text{ entre } [t_2, t_3]$$

$$\tilde{V}(k_y) = C_3 \cdot K_0(t) \text{ entre } [t_3, \infty]$$

Los valores de C_1 , C_2 i C_3 se pueden determinar a partir de los siguientes cocientes:

$$C_1 = \frac{\tilde{V}(k_{y1})}{K_0(t_1)}, \quad C_2 = \frac{\tilde{V}(k_{y2})}{K_0(t_2)} \quad i \quad C_3 = \frac{\tilde{V}(k_{y3})}{K_0(t_3)}$$

El potencial se calcula realizando la transformación coseno inversa de la función anterior, y se obtiene:

$$V(\bar{r}) = \frac{2}{\pi} \cdot r \cdot \left[\left(C_3 \cdot \frac{\pi}{2} \right) + \left(\frac{t_1}{t_2 - t_1} \cdot (C_2 - C_1) \cdot (I(t_1) + K_1(t_1)) \right) + \left(\frac{t_3}{t_3 - t_2} \cdot (C_2 - C_3) \cdot (I(t_3) + K_1(t_3)) \right) + \left(\frac{t_2}{t_2 - t_1} \cdot (C_1 - C_2) + \frac{t_2}{t_3 - t_2} \cdot (C_3 - C_2) \right) \cdot (I(t_2) + K_1(t_2)) \right]$$

Una cuestión delicada es la selección de las tres k_y , que son las que definen los cuatro intervalos. Este proceso se ha efectuado empíricamente, y para los dispositivos Wenner-Schlumberger y dipolo-dipolo empleados los valores contemplados han sido:

$$5.4 \cdot 10^{-6}, 5.4 \cdot 10^{-4}, 5.4 \cdot 10^{-2}.$$

4.1.2 Magnetotelúrica

Las aportaciones en este método han consistido en la modificación de los algoritmos para calcular otras respuestas magnetotelúricas, en particular se han modificado los algoritmos de modelización para obtener como respuesta la resistividad aparente y fase del determinante del tensor de impedancias, que es uno de los invariantes de este tensor, y que tiene interés en el momento de realizar la interpretación tridimensional.

4.2 INVERSIÓN

En este apartado se describen tres aspectos, en primer lugar el relacionado con la tomografía eléctrica, a continuación los de la magnetotelúrica, y finalmente uno que invierte simultáneamente datos de eléctrica y de magnetotelúrica.

4.2.1 Tomografía eléctrica

Se construyó un programa de inversión de datos tomográficos con el objetivo de que no sólo incorporase los aspectos anteriormente indicados en el apartado de modelización, sino que permitiese un control sobre los aspectos de computación del mismo (para que no fuera una caja negra para el interpretador y que se pudiera adaptar a sus necesidades). El programa de inversión está basado en el proceso de minimización de la diferencia entre los datos observados y las respuestas del modelo. Como el problema es no lineal se empleó para la búsqueda de la solución un esquema iterativo basado en la linealización del problema según el método de Marquardt.

Las respuestas del modelo se calcularon numéricamente a partir de un algoritmo de modelización bidimensional desarrollado por Queralt (1991), adaptándolo a las características del proceso de inversión, y al que se incorporaron las mejoras enunciadas en el apartado anterior: el uso de tres k_y para la determinación del potencial eléctrico y el esquema de las dos mallas, que permite la caracterización de los modelos mediante un número menor de parámetros.

Este algoritmo requiere el cálculo de la matriz de sensibilidad del modelo en cada iteración, y este proceso es el que tiene un coste de computación más alto; para ello se emplearon

diferentes estrategias. Esta matriz se construyó también numéricamente a partir del sistema de ecuaciones empleado para la obtención del potencial transformado; en iteraciones sucesivas del algoritmo de inversión se empleó la aproximación quasi-Newton.

Un ejemplo del tipo de modelo obtenido se muestra en la 4.3

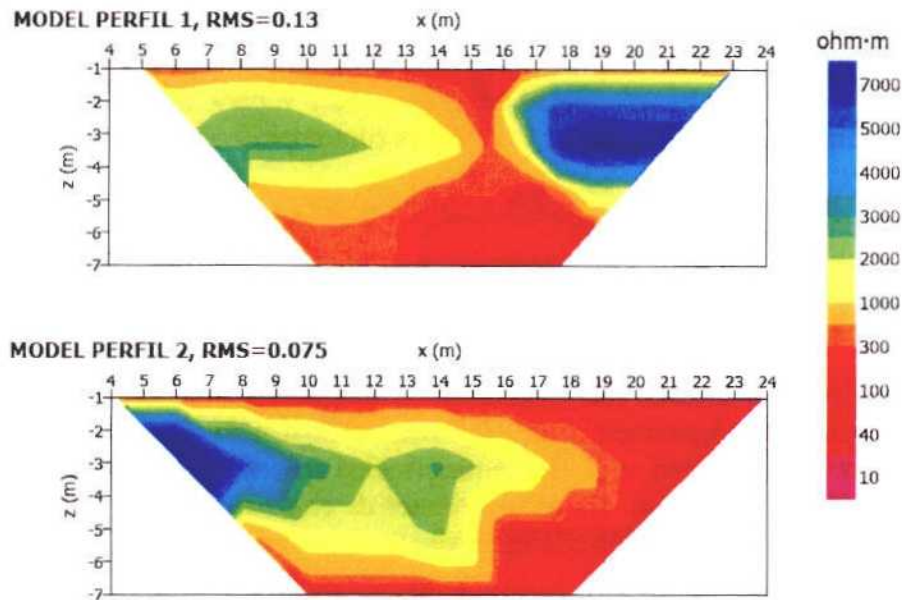


Figura 4.3 Modelos obtenidos con el algoritmo de inversión desarrollado en el marco del proyecto.

Este algoritmo se ha estado optimizando para reducir el tiempo de ejecución y con unos archivos de entrada y salida más amigables. Ya circula una versión del programa que hemos llamado RIMAGE2D, y que esperamos mejorarla a partir de los comentarios de los usuarios.

4.2.2 Magnetotelúrica

En el método magnetotelúrico, aunque la inversión mediante el uso de modelos bidimensionales es una herramienta habitual, todavía quedan algunos aspectos poco estudiados.

Uno de los problemas que se presenta al resolver el problema inverso es que la solución no sea única porque el problema esté mal condicionado. Una manera de reducir este efecto es incluir en el mismo proceso de inversión más datos para restringir el número de soluciones. La magnetotelúrica registra diferentes tipos de datos, como son la resistividad aparente y la fase de los elementos del tensor de impedancia o el *tipper*, que se calcula comparando la componente vertical del campo magnético con las componentes horizontales, y es una magnitud compleja (véase el apartado 7.2.1 para mayor información sobre los fundamentos del método magnetotelúrico).

Normalmente se invierten los datos de resistividad aparente (en la práctica, su logaritmo) y de fase, y nuestra experiencia indicaba que cuando se incluía el *tipper*, no se obtenía un modelo diferente al que se obtenía cuando no se incluía como dato. Parecía que la solución era

insensible a la incorporación de este tipo de datos. Nuestra aportación se ha centrado en describir una técnica para valorar la importancia del *tipper* en los algoritmos de inversión estándar. Se ha procedido de dos maneras, una justificación teórica y un procedimiento empírico (o más propiamente, de simulación) que se describen a continuación.

Procedimiento teórico

Es bien conocido que en los algoritmos de inversión el peso o importancia (ε) de la resistividad aparente es el doble que la de la fase:

$$\frac{\varepsilon(\varphi)}{\varepsilon(\ln(\rho_a))} = \frac{1}{2},$$

que se puede justificar a partir de la propagación de errores de la impedancia. Para el caso de la componente real del *tipper* (T_R) se puede obtener una expresión análoga para modelos bidimensionales y polarización TE:

$$\frac{\varepsilon(T_R)}{\varepsilon(\ln(\rho_a))} \geq \frac{\max|T|}{2}$$

La obtención de esta expresión se basa en el desarrollo de la ley de Faraday del electromagnetismo. Como $|T|$ es menor que la unidad, el peso del *tipper* es claramente inferior que el de la fase, por lo que se confirma que la resistividad aparente es la que “controla” el proceso de inversión.

Procedimiento basado en la simulación

De forma paralela se consideró un procedimiento alternativo de carácter más cualitativo que pudiera aplicarse cuando no fuera posible encontrar relaciones teóricas, y que puede generalizarse a inversiones que incluyan datos de origen variado.

El procedimiento se basa en la utilización de modelos muy sencillos. Se generan las respuestas de interés para el modelo sencillo elegido. A partir de estas respuestas se construye dos conjuntos de datos tal como si correspondiesen a dos modelos diferentes, tal como se ilustra en la 4.4. A partir de estos datos se construye un conjunto de datos a invertir de la siguiente manera, por ejemplo se considera la resistividad aparente del modelo de la izquierda y el *tipper* del de la derecha, y se invierte simultáneamente.

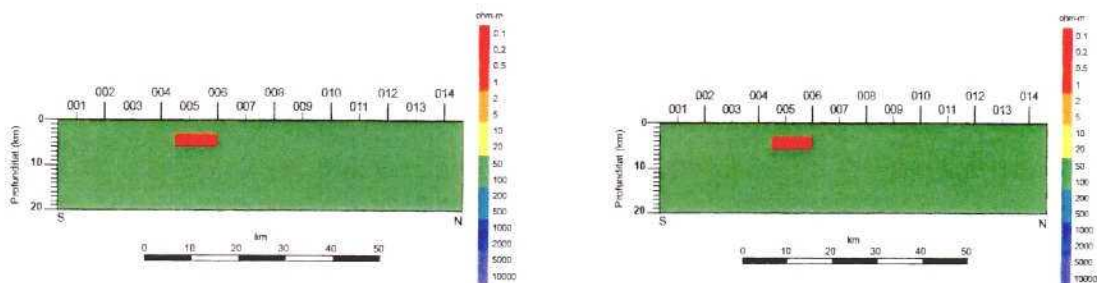


Figura 4.4 Tipo de modelos empleados en el proceso de simulación. Los dos modelos son en realidad el mismo, pero en orientaciones opuestas (imagen espejular).

El proceso está pensado de manera que si en el procedimiento de inversión domina la resistividad aparente, el modelo final debe parecerse al modelo de la izquierda, pero si domina el *tipper*, aparecerá como modelo final una imagen del de la derecha. En el caso que tengan la misma importancia o peso, es posible que salgan una imagen simultánea de los dos modelos, y con este modelo es sencillo de identificar.

Este procedimiento tiene un cierto coste de computación ya que requiere un cálculo intensivo, y los resultados tienen que tomarse como cualitativos porque es difícil precisar cuando los dos conjuntos de datos tienen el mismo peso, pero tiene como ventaja que puede extenderse a cualquier tipo de datos, siempre que se disponga del algoritmo de inversión.

4.2.3 Inversión conjunta de datos eléctricos y magnetotelúricos

La propiedad que caracteriza el subsuelo en ambos métodos es la misma: la resistividad eléctrica, lo que permite que el mismo modelo pueda servir para describir los datos eléctricos y magnetotelúricos. Se ha desarrollado un algoritmo de inversión que ajusta simultáneamente las repuestas para un sondeo eléctrico vertical y un sondeo magnetotelúrico a un modelo geoelectrico unidimensional. En la 4.5 se muestra como ejemplo un resultado obtenido utilizando este algoritmo.

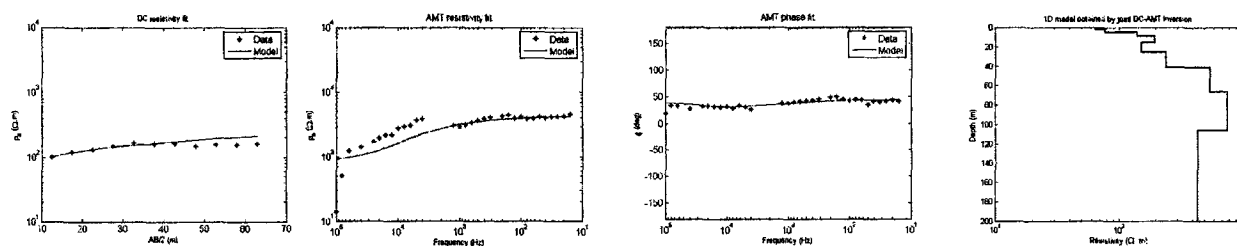


Figura 4.5 Ajuste de los datos eléctricos (panel izdo.) y magnetotelúricos: resistividad aparente y fase (paneles centrales), para el modelo obtenido (panel dcho).

Como cada tipo de datos tiene una profundidad de investigación diferente, en este proceso se contempla que cada tipo de datos tenga una ponderación diferente en el proceso de inversión.

5. DESARROLLO DE SISTEMAS DE PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS MAGNETOTELÚRICOS

El objetivo de este desarrollo se planteó inicialmente para efectuar sistemas para la reducción de *static shift* (efecto de las distorsiones galvánicas), pero en el transcurso de los trabajos del Proyecto, como consecuencia de las cuestiones planteadas en el trabajo de Ledo *et al.* (2002), se decidió situarlo en un contexto más amplio, como es el procesado y el análisis de los datos. Este capítulo se ha estructurado en tres partes, una relativa al procesado y dos al análisis de datos: el procesado de datos mediante la transformada ondicular, las relaciones de dispersión para el *tipper*, y el estudio de los invariantes del tensor de impedancias, que se pasan a describir.

5.1 PROCESADO MEDIANTE LA TRANSFORMADA ONDICULAR

Este apartado es consecuencia los problemas aparecidos al emplear señales de audiomagnetotelúrica en el rango de 10 Hz a 100 kHz, en donde aparecen no sólo los efectos de los armónicos de la frecuencia de distribución eléctrica (50 Hz), sino también un intervalo espectral de baja intensidad en la región entorno a 1 kHz (banda muerta de AMT). La técnica habitual para superar este problema es el uso de una fuente artificial para compensar la baja intensidad de la señal natural. La aportación que hemos realizado en este Proyecto ha sido la de considerar otro punto de vista, y incidir directamente en el procesado de la señal, porque no siempre es posible disponer de la fuente artificial. Por ello se ha desarrollado un algoritmo de procesado mediante la transformada ondicular (*wavelet*) que permite identificar el tramo del registro temporal que contiene la señal de interés.

Este tipo de transformación tiene una ventaja frente a la transformada de Fourier habitual, y es la multirresolución. La FFT tiene una buena resolución en el dominio espectral, pero no tiene resolución en el dominio temporal, por el contrario la transformada ondicular (WT) establece un compromiso entre la resolución temporal y la resolución espectral sin penalizar a ninguna de las dos. Este compromiso entre resoluciones es más efectivo cuando las componentes de alta frecuencia de la señal son de corta duración y las de baja frecuencia son de larga duración, como en el caso de las señales magnetotelúricas.

La ondícula seleccionada ha sido la de Morlet que tiene la expresión

$$w(t) = e^{i\beta t} e^{-t^2/2},$$

que al tener una expresión analítica permite realizar el procesado de manera cómoda, su espectro está bien localizado, tiene la propiedad de que la relación entre la escala y la frecuencia de Fourier es sencilla, y se puede comparar con el procesado tradicional.

Para ilustrar la idea de multirresolución se presenta la 5.1 donde se ha considerado esta ondícula de Morlet.

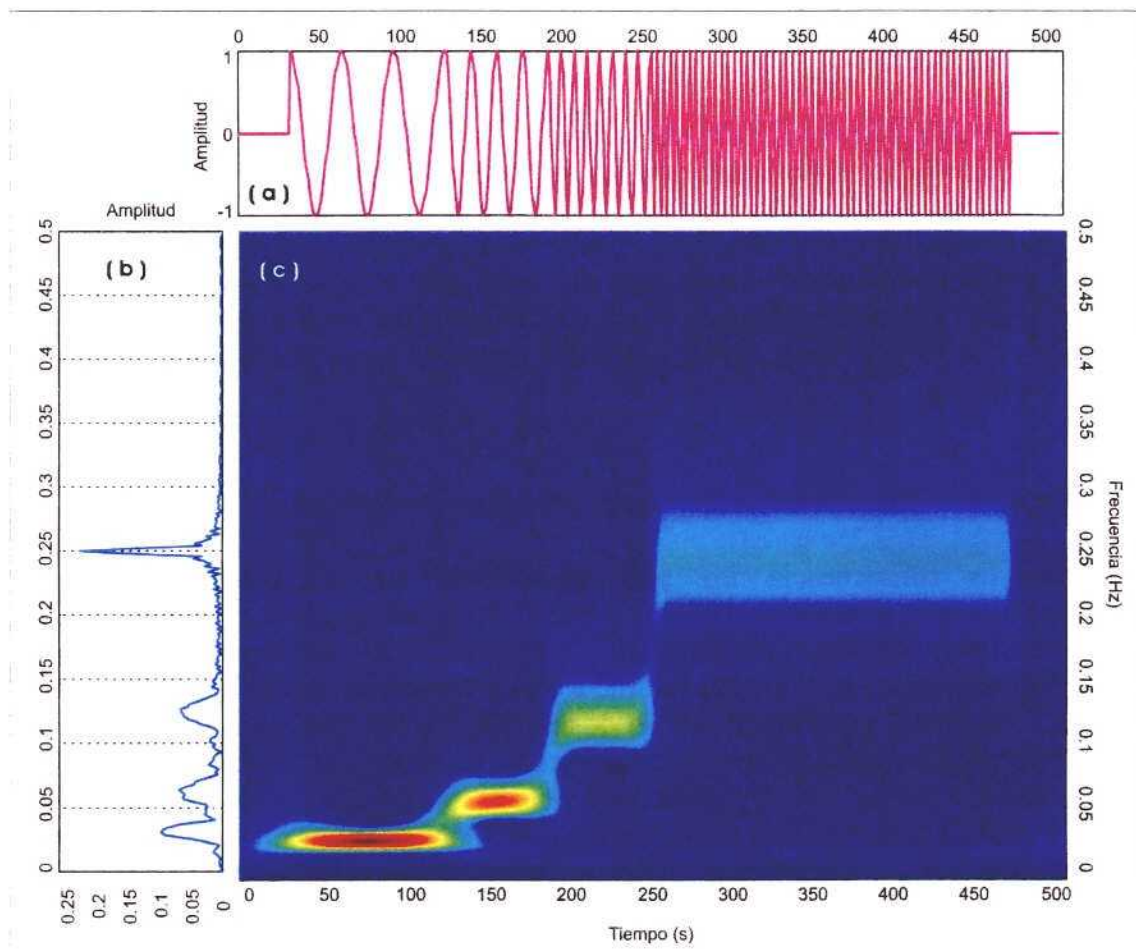


Figura 5.1 a) Señal temporal compuesta por cuatro señales sinusoidales de diferente frecuencia fundamental, b) transformada de Fourier y c) transformada ondicular.

En ella se ve cómo para una señal temporal (panel a) la transformada de Fourier (panel b) identifica satisfactoriamente su contenido espectral, y la transformada ondicular (panel c), además determina la distribución espectral en el tiempo.

A partir de la transformada ondicular se ha construido un algoritmo para el procesado de las señales magnetotelégrafas, que calcula las funciones de respuesta a partir de la selección de segmentos energéticos de la transformada ondicular. En las siguientes s (5.2 y 5.3) se muestra la comparación entre el procesado mediante la transformada de Fourier y la transformada ondicular. Se presentan las curvas de resistividad aparente y de fases, en donde se ve que la transformada ondicular mejora la calidad de los datos, reduciendo la barra de error y obteniendo una menor dispersión en los datos, tal como se ilustra en la 5.2. Por otro lado se observa que también mejoran las curvas de coherencia entre la señal y la estimación, cuyo valor debe aproximarse a la unidad.

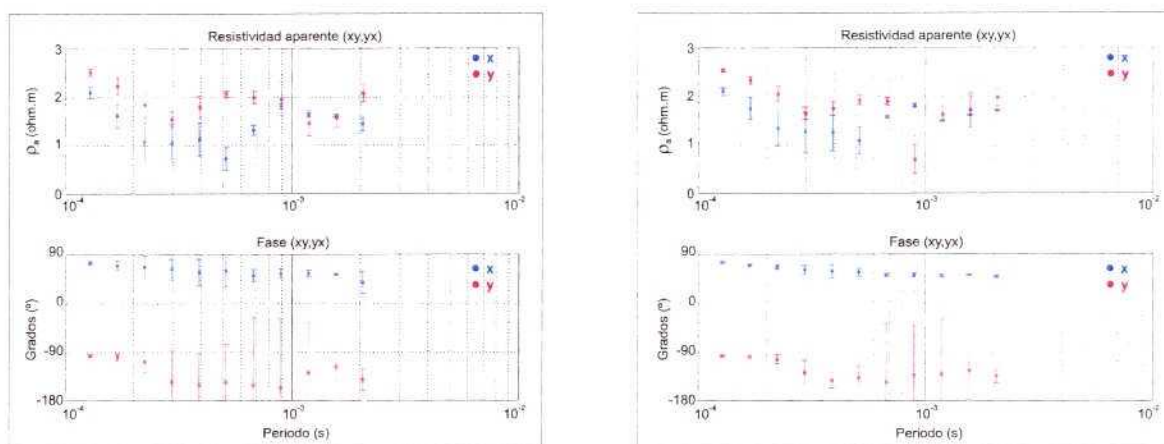


Figura 5.2 Curvas de resistividad aparente y fase para datos reales calculadas mediante la transformada de Fourier (izda.) y la transformada Ondicular (dcha.). Las barras de error corresponden a la desviación estándar de la estimación

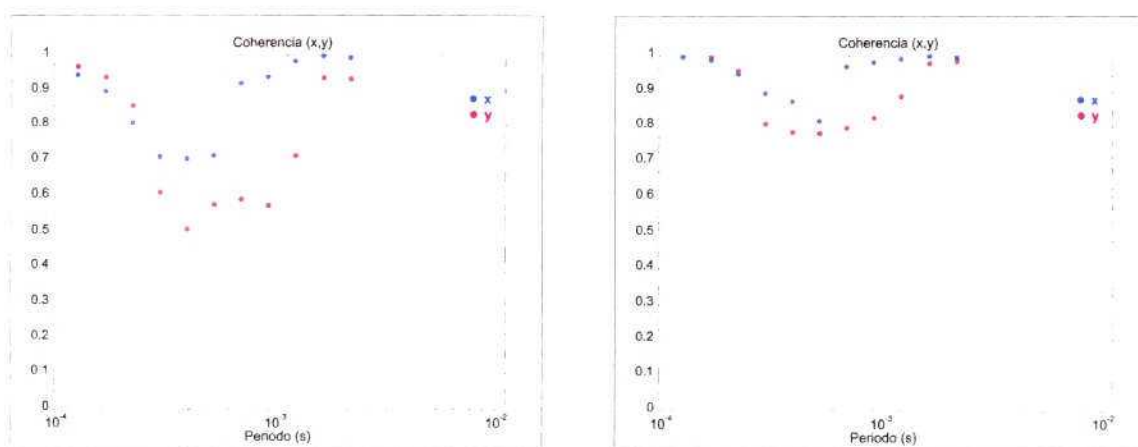


Figura 5.3 Curvas de coherencia para los datos anteriores calculadas mediante la transformada de Fourier (izda.) y la Transformada Ondicular (dcha.).

5.2 LAS RELACIONES DE DISPERSIÓN PARA EL TIPPER

La utilización del *tipper* en la corrección del static shift supuso la revisión de la calidad de esta respuesta magnetotélica, que relaciona la componente vertical del campo magnético con las componentes horizontales y es un número complejo. Las relaciones de dispersión (RD) establecen una relación analítica entre la parte real e imaginaria de esta magnitud, basándose en la transformada de Hilbert. Esta cuestión es relevante en hidrogeología porque el *tipper* es la magnitud que se mide con los instrumentos de VLF, que en determinadas condiciones son ampliamente utilizados para la exploración hidrogeológica.

Este desarrollo permitió cubrir tres aspectos: a) la identificación de inconsistencias entre la parte real e imaginaria del *tipper*, para evitar la inversión de datos inconsistentes; b) el desarrollo de un método para extender y obtener medidas fuera del rango de frecuencias registradas, y c) mostrar un significado físico para la parte imaginaria del *tipper*, que tradicionalmente no se utiliza porque no se sabe qué significado darle. A continuación se muestran como funcionan estos aspectos.

En la 5.4 se muestran los datos del *tipper* en dos estaciones diferentes, los puntos indican los datos medidos y las líneas son los valores asociados a las relaciones de dispersión. Se observa que estas relaciones se cumplen en los datos de la curva de la izquierda, pero no se cumplen en los datos de la curva de la derecha, detectándose esta inconsistencia entre la parte real e imaginaria del *tipper*.

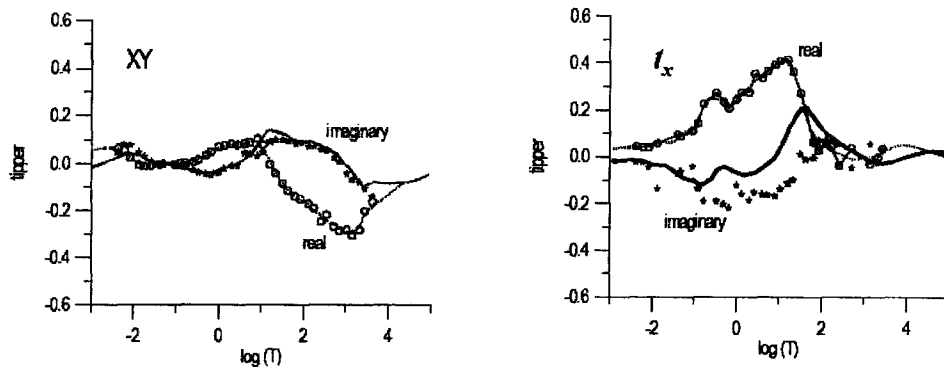


Figura 5.4 Tipper para dos estaciones diferentes, la curva de la izquierda muestra una inconsistencia entre datos (puntos) y relaciones de dispersión (líneas).

En la 5.5 se muestra cómo se pueden extrapolar los datos fuera del intervalo de frecuencias medidas. Ello es consecuencia de las propiedades analíticas de las relaciones de dispersión. La zona señalada podría considerarse como una buena extrapolación de la parte real e imaginaria del *tipper* a partir de los datos (puntos y cruces), donde las extrapolaciones están ligadas por las relaciones de dispersión

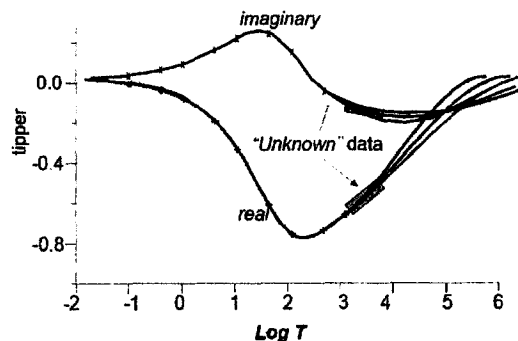


Figura 5.5 Ejemplo de cómo se puede extrapolar los datos en intervalos fuera de las frecuencias medidas.

En la 5.6 se muestra el significado de la parte imaginaria del *tipper* (y también de las medidas obtenidas por los instrumentos de VLF); como primera aproximación se puede interpretar la parte imaginaria del *tipper* (T) según la siguiente expresión:

$$\text{Im}(T(f)) \approx -\frac{d\text{Re}(T(f))}{d\ln f},$$

donde f es la frecuencia. Eso quiere decir que la parte imaginaria indica hacia dónde va a cambiar la parte real, tal como muestra la figura 5.6.

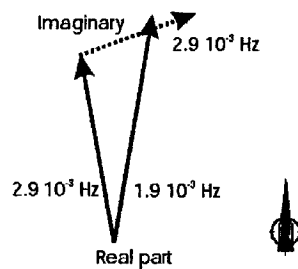


Figura 5.6 Relaciones entre las parte reales para dos frecuencias próximas y la parte imaginaria. Se ha representado el tipper mediante las flechas de inducción.

5.3 ESTUDIO DE LOS INVARIANTES DEL TENSOR DE IMPEDANCIAS

El carácter tensorial de la impedancia permite determinar la dimensionalidad de la estructura geoelectrica del subsuelo, es decir, si la estructura es principalmente uni, bi o tridimensional; este aspecto es necesario para la interpretación de los datos. Ello es así porque cuando la distribución de resistividad del subsuelo varía únicamente con la profundidad, $\rho(z)$, el tensor de impedancia no depende de la orientación de medición de los campos, y tiene una forma de una matriz antisimétrica. En el caso de una estructura bidimensional, es posible encontrar unas direcciones de medidas perpendiculares para las que los elementos de la diagonal del tensor de impedancia son nulos, y una de las direcciones de medida coincide con la dirección de la estructura bidimensional. Finalmente, en el caso tridimensional, el tensor de impedancia está en general completo, independientemente de la dirección de medida. Determinar este aspecto es relevante para determinar que tipo de técnica se utilizará para efectuar las correcciones galvánicas.

Un marco adecuado para estudiar la dimensionalidad son los llamados invariantes del tensor de impedancias, que corresponden a unas magnitudes que no dependen de las direcciones en la que se han medido las componentes de los campos. En la práctica sólo existen siete invariantes independientes.

Desde el punto de vista de la dimensionalidad, algunos invariantes adoptan valores nulos según el tipo de dimensionalidad de la estructura, y este aspecto les confiere un carácter de herramientas útiles para proporcionar información acerca de si el tensor puede asociarse con una estructura uni, bi o tridimensional.

Se ha desarrollado un algoritmo que considera los siete invariante WAL definidos por Weaver *et al.* (2000), y que permite trabajar con datos experimentales al incorpora su error en el algoritmo. Esta es la situación cuando se utilizan los datos de campo. El cálculo de los invariantes está afectado por estos errores (propagación del error), y como consecuencia no es posible saber cuándo un invariante es cero, que es un aspecto relevante en el empleo de los invariantes para determinar la dimensionalidad. Por ello se ha determinado un valor umbral por debajo del cual se considera cero. El uso de este algoritmo se ilustra en la 5.7, que muestra en un mapa la ubicación de las estaciones y la dimensionalidad obtenida por los datos para cada estación y frecuencia o intervalo de frecuencia.

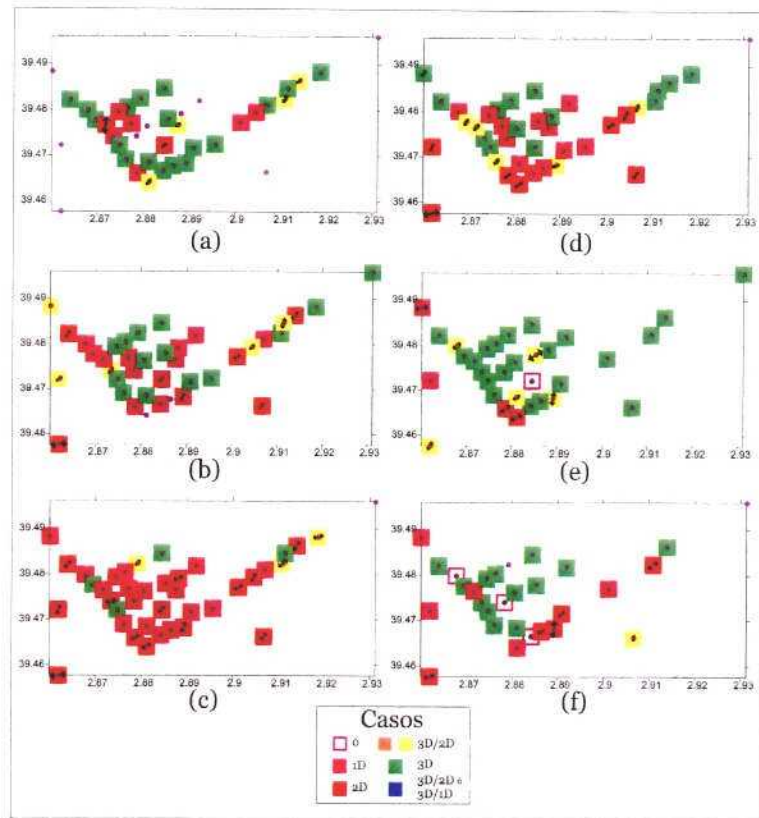


Figura 5.7 Ejemplo de aplicación para la dimensionalidad eléctrica de una zona y seis intervalos de frecuencia.

6. MEJORA DE LA INSTRUMENTACIÓN

Como estaba contemplado en los objetivos del Proyecto, se ha procedido a la adquisición de instrumentación para completar y extender las prestaciones de la disponible por el Grupo de Trabajo de la Universidad de Barcelona; por este motivo y con los fondos del Proyecto se ha adquirido una estación de registro ADU06 y dos bobinas MFS06 de la marca Metronix GMBH (Figura 6.1), que permiten abordar estudios someros propios de la caracterización geoelectrica de acuíferos y que opera con fuente de origen natural.

Las características técnicas de los aparatos son las siguientes: a) la estación ADU06 es una estación de registro de cinco canales, con dos convertidores A/D de 24 bit por canal (uno con capacidad de muestreo de 40960 muestras/s, y el otro con 4096 muestras/s), 256 Mb de memoria, un rango de frecuencia comprendido entre CC y 20 kHz, y una sincronización controlada mediante GPS; b) los sensores magnéticos MFS06 son de bajo ruido y operan en un amplio rango, de $2,5 \cdot 10^{-4}$ a 10^4 Hz.



Figura 6.1 Estación ADU06 (caja azul) y bobinas MFS06 (en la decha.).

En los trabajos de campo llevados a cabo en este Proyecto, también se ha empleado la estación de audiomagnetotelúrica con fuente controlada (CSAMT) del modelo Stratagem 4EH fabricado por Geometrics Inc., que ha servido para complementar a la anterior. Este instrumento fue recientemente adquirido como parte de una infraestructura del Ministerio de Ciencia y Tecnología (2003UNBA-E005) concedida al departamento de Geodinámica y Geofísica (U.B.), y cuya propuesta fue apoyada por este Proyecto.

Las características de este instrumento son un emisor, que posee dos bucles verticales que emiten una señal magnética en el rango de frecuencias de 10^3 - $6,5 \cdot 10^3$ Hz; b) dos bobinas de inducción, como sensores magnéticos, que operan en el rango de 10 a 10^5 Hz; c) cuatro electrodos como sensores del campo eléctrico horizontal; d) una estación de registro de cuatro canales, con un único convertidor A/D de 18 bit, y 1,2 Gb de memoria, que se completa con diferentes cables y accesorios.

7. CAMPAÑAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA EN EL RÍO TORDERA

La cuenca del río Tordera está situada al NE de Cataluña, en el límite de las provincias de Gerona y Barcelona. La zona de estudio de este trabajo se localiza en el denominado Bajo Tordera, que es el tercero de los tramos hidrológicos en que se divide este río, y más concretamente en la zona deltaica.

El sistema acuífero del Bajo Tordera, se extiende desde las proximidades de Fogars de Tordera hasta el sistema fluvio-deltaico en contacto con el mar. En la zona próxima a Fogars el sistema tiene un anchura de 150 m, mientras que en la desembocadura (delta) aumenta hasta 5 km (ver anexo A). La profundidad del sistema acuífero varía desde unos 30 m en Fogars a más de 180 m en el litoral.

En este sistema acuífero detrítico-costero se han descrito tres unidades lito-estratigráficas SDT-1, 2, y 3 que, de más antigua a más moderna, presentan importantes cambios laterales de facies, tanto verticalmente como horizontalmente (Figura 7.1) como es característico de estos sistemas deltaicos.

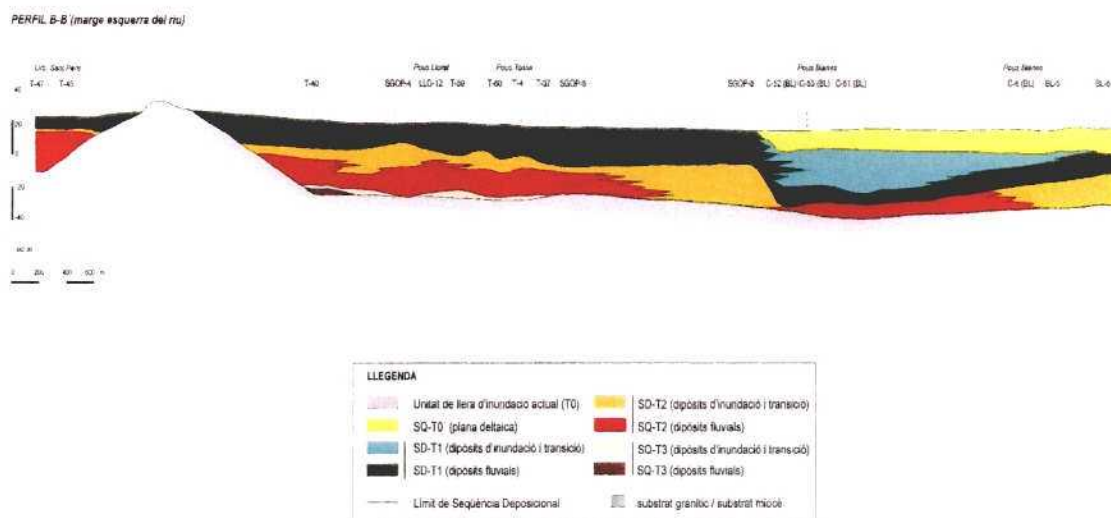


Figura 7.1 Corte longitudinal estratigráfico del delta del río Tordera (Geoservei, 2002) a lo largo de un perfil NO-SE por la margen izquierda del río.

El modelo conceptual del sistema acuífero en el delta está compuesto por cuatro unidades: 1) Un acuífero libre superficial que cubre todo el llano deltaico, constituido principalmente por niveles de gravas medias y gruesas, y presenta un espesor que varía entre 6-20 m. 2) Un acuitardo constituido por arcillas, limos y arenas finas, que presenta una máxima potencia de 25 m en la línea de costa, y se adelgaza progresivamente en dirección tierra adentro. Este nivel no es continuo ni homogéneo granulométricamente, por tanto existen zonas más permeables que actúan como canales de conexión entre los acuíferos que separa. 3) Un acuífero profundo confinado o semiconfinado compuesto

por gravas gruesas y medias, de unos 20 m de potencia de media. 4) Un acuífero basal, situado bajo la línea de costa a una profundidad superior 100 m, cuya presencia se sugirió a partir de la perforación de los pozos Malgrat-1 y Blanes-1 construidos para la desaladora.

El sistema está limitado en su base y lateralmente por un basamento granítico con un alto grado de alteración en su superficie.

El problema de la intrusión marina también es un aspecto importante en este delta cuando se altera el equilibrio entre el agua dulce y la salada. Desde el punto de vista de los métodos geoelectricos, el efecto de la intrusión marina se manifiesta como una estructura muy conductora que puede ser fácilmente identificada mediante los métodos geoelectricos.

Para el trabajo realizado en esta zona ha sido indispensable la colaboración de la Cooperativa Agrícola "El progrés-Garbí" de Malgrat de Mar, y en particular su presidente el Sr. Ramón Hernández, que nos ha facilitado la comunicación con los propietarios a las fincas.

7.1 DATOS PREVIOS. CRITERIOS SEGUIDOS PARA LA SELECCIÓN

En esta zona se dispone de una amplia información de carácter geológico y geofísico (ver anexo D), consecuencia de una actividad realizada por diferentes instituciones y empresas en los últimos años. De entre la información disponible, se han considerado como los más relevantes para la ejecución del Proyecto los que implicaban estudios geoelectricos y sísmicos, que corresponden a:

- El Año 1969 la empresa Geofisa-Prohidro SA realizó unos 80 Sondeos Eléctricos Verticales al lo largo de los 10 últimos kilómetros del Tordera y su delta. El dispositivo utilizado fue una configuración Schlumberger.
- El Instituto Cartográfico de Cataluña, ICC, realizó tres campañas durante los años 1994, 95 y 96 en las que se midieron 28 SEV en zonas próximas a los SEV del año 69, con una configuración equivalente. También realizó tres perfiles sísmicos de reflexión PS1, PS2 y PS3
- El año 2002, el ICC, realizó una campaña geofísica de 25 sondeos eléctricos en la zona nordoccidental del delta. También se realizaron dos perfiles de sísmica de reflexión PS4 y PS5 y cuatro de sísmica de refracción PSR1, PSR2, PSR3 y PSR4.

Algunos de estos estudios están asociados al problema de la intrusión salina que afecta principalmente al acuífero profundo, que es de donde se extrae el agua para el abastecimiento urbano e industrial. El acuífero superficial tiene un uso principalmente agrícola.

En esta zona hay un gran número de pozos, la mayoría para explotaciones agrícolas, pero la información que se obtiene de ellos es muy limitada debido a la calidad de las columnas, y porque los más profundos están en la línea de costa y sus diagráfias eléctricas están afectadas por la intrusión salina.

A la vista de esta información se diseñaron dos tipos trabajos, por un lado uno que permitiese la comparación entre los diferentes métodos geoelectricos: de corriente continua (ERT), el audiomagnetotelúrico (AMT) y los sondeos en el dominio de tiempos (SEDT), y por otro el estudio de la evolución de la cuña de intrusión marina. Para el primer caso se consideraron dos perfiles perpendiculares coincidentes con los perfiles de sísmica de reflexión PS1 que es paralelo a la línea de costa, y según los perfiles PS4 y PS5, que son paralelos al cauce del río. Para el estudio de la intrusión marina se consideró como técnica más adecuada la AMT.

7.2. ADQUISICIÓN DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

7.2.1 Aspectos metodológicos e instrumentales

El principio teórico del método magnetotelúrico (MT) está sustentado por el fenómeno de inducción: la fuente electromagnética (campo primario) genera corrientes inducidas en el subsuelo, que provocan a su vez campos electromagnéticos secundarios. En superficie se mide el campo total, y de las relaciones entre las diferentes componentes se puede determinar las propiedades eléctricas del subsuelo, y a partir de ellas, efectuar la interpretación en términos hidrogeológicos.

La fuente puede ser tanto de origen natural (asociada a las fluctuaciones electromagnéticas de las tormentas y a las corrientes ionosféricas), como de origen artificial, con una fuente controlada por el operador. Es importante para la validez del método que se cumpla la condición de campo lejano, es decir que la distancia entre la fuente y el objeto geológico sea tal que la fuente no produzca efectos indeseados sobre los datos.

El espectro de la señal de interés para el método abarca entre 10^{-5} Hz y 10^5 Hz, y las frecuencias de interés para estudios hidrogeológicos corresponden a las superiores a 1 Hz (que es el método audiomagnetotelúrico – AMT). Para esta parte del espectro la señal natural presenta un intervalo con una importante atenuación de la amplitud (banda muerta de la AMT) ubicado entre 1-5 kHz, que justifica el empleo de fuentes artificiales.

Las magnitudes medidas son las variaciones temporales de las componentes del campo electromagnético en la superficie. Por condiciones de continuidad del campo eléctrico, la adquisición se reduce a medir las dos componentes horizontales de dicho campo y las tres del campo magnético. Su instalación en el campo se muestra en la Figura 7.2. Las componentes eléctricas se miden mediante dos dipolos eléctricos en direcciones perpendiculares. Para cada dipolo se entierran dos electrodos impolarizables separados una distancia de unos 30 m, que puede aumentar o disminuir en función de las características de la adquisición. El campo magnético se mide con magnetómetros de inducción o bobinas.

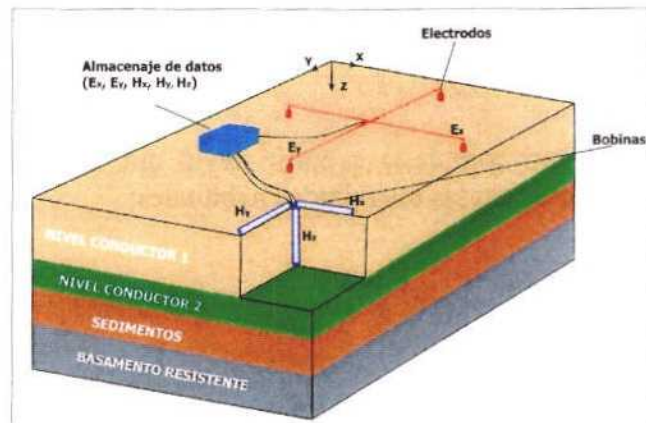


Figura 7.2 Disposición de los sensores de medidas Magnetotelúricas en el campo

El campo eléctrico se determina mediante el cociente entre la diferencia de potencial medida por los electrodos y la distancia que los separa. Esta medida puede estar afectada por heterogeneidades de carácter local (distorsión galvánica), cuya principal consecuencia es el denominado *static shift* de las curvas de resistividad aparente. Los sensores magnéticos están calibrados para obtener el campo magnético a partir de la *fem* generada en la bobina. Los sensores están conectados a la unidad de registro, que digitaliza y almacena los datos. La adquisición de todos los canales se realiza simultáneamente.

Las ondas electromagnéticas que se propagan en el subsuelo (que actúa como un medio conductor) se atenúan. Esta atenuación depende de la frecuencia de la señal y de la resistividad eléctrica del medio, y se estima mediante la denominada penetración (o *skin depth*), que corresponde a la profundidad a la que la amplitud se reduce en un factor e .

$$\delta \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [km]$$

Esta expresión indica que para medios conductores o para altas frecuencias, la señal se atenúa mucho y la penetración es pequeña, obteniendo sólo información de las estructuras más superficiales, mientras que para medios resistentes o para bajas frecuencias la profundidad de penetración aumenta y es posible estudiar estructuras más profundas. Así, la selección del rango de frecuencias dependerá de la profundidad de estudio requerida, rasgo que convierte al método magnetotelúrico en una técnica muy versátil.

Las funciones de respuesta (o datos que se interpretan) se obtienen a partir de la correlación entre las diferentes componentes registradas del campo electromagnético en el dominio de las frecuencias. Las funciones más utilizadas en la caracterización geoelectrica del subsuelo son el tensor de impedancias y la función de transferencia geomagnética o *tipper*.

El tensor de impedancia, Z , relaciona linealmente las componentes ortogonales de los campos eléctrico y magnético:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \text{ o en forma compacta, } \vec{E}_h(f) = Z(f)\vec{H}_h(f)$$

que es una magnitud compleja, a partir de la que se puede definir la resistividad aparente y la fase, que son las magnitudes habituales:

$$\rho_{a,ij}(f) = \frac{1}{\mu 2\pi f} |Z_{ij}(f)|^2 \quad y \quad \varphi_{ij}(f) = \arctg\left(\frac{\text{Im} Z_{ij}(f)}{\text{Re} Z_{ij}(f)}\right)$$

La función de transferencia geomagnética o *tipper*, T , relaciona componente magnética vertical con las componentes magnéticas horizontales

$$H_z = \begin{pmatrix} T_{zx} & T_{zy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

que también es una magnitud compleja. La representación del vector $T = (T_{zx}, T_{zy})$ sobre un mapa se conoce como flecha de inducción, y la parte real coincide con la dirección de máximo gradiente de conductividad horizontal, que en un medio bidimensional es perpendicular a la dirección de la estructura.

El hecho de trabajar con magnitudes vectoriales, y que las respuestas más relevantes estén asociadas a tensores, permite que esta técnica sea capaz de determinar a partir de medidas en superficie cuándo la estructura geoelectrica del subsuelo puede ser descrita satisfactoriamente mediante un modelo uni-, bi, o tridimensional, aspecto que se conoce como estudio de la dimensionalidad, y además, en el caso que sea predominantemente bidimensional, se puede determinar cuál es la dirección de la estructura, o direccionalidad.

7.2.2 Diseño y ejecución de las campañas de campo

Como etapa previa a la adquisición de los datos según los objetivos enumerados, se procedió a la realización de diferentes ensayos con la nueva instrumentación. Estas pruebas se sucedieron a lo largo de los meses de septiembre de 2003 hasta enero de 2004. Se emplearon tanto el instrumento de fuente natural como el de fuente artificial (Figura 7.3), y sirvió para determinar algunas de las características geoelectricas de la zona, evaluar el nivel de ruido electromagnético y parametrizar la posición de la fuente para cuando fuese necesario. La zona tiene un nivel elevado de ruido, al estar relativamente urbanizada y con presencia del ferrocarril.

Con la intención de obtener información sobre las características geoelectricas de la zona, se realizó en primer lugar una campaña que cubría la mayor parte del delta y que consistió en 37 sondeos de AMT, efectuados en dos campañas en el primer semestre de 2004. Se emplearon tanto el instrumento de fuente natural como el de fuente artificial, allí donde el ruido electromagnético lo hizo necesario. En esta campaña la separación media entre estaciones fue de 300 m.



Figura 7.3 Detalle de la estación de registro (izda.) y fuente artificial (dcha.) del CSAMT

Esta campaña permitió obtener una imagen geoelectrica de la zona, y a partir de ella se consideró la conveniencia de efectuar mediciones a lo largo de tres perfiles, dos de ellos en coincidencia con las líneas sísmicas. En abril de 2004 se completó el que coincidía con la línea PS1 que es paralela a la costa, y en junio de 2005 se complementó el que coincidía con el curso del río, correspondiente a los perfiles sísmicos PS4 y PS5.

Por otra parte, y de cara a evaluar la evolución de la intrusión salina, a partir de los resultados obtenidos de la campaña de reconocimiento se definió un nuevo perfil perpendicular a la costa (perfil 6) del que se ha venido efectuando un seguimiento cuatrimestral desde el verano de 2004, que ha dado lugar a cinco campañas de adquisición periódicas en las siete estaciones que definen este perfil (Figura 7.4).

En el cuadro siguiente se resume la actividad de adquisición de datos de AMT realizada:

	Fecha	Descripción
29 sondeos	17-20/02/2004	Malla, zona oeste del Delta
7 sondeos	28/04/2004	Perfil PS1
8 sondeos	14/05/2004	Malla, zona noroeste del delta
11 sondeos	7-8/06/2005	Perfil PS4 y 5
7 sondeos	18/08/2004	Perfil M1
7 sondeos	16/12/2004	Seguimiento del M1
7 sondeos	01/04/2005	Seguimiento del M1
7 sondeos	2/08/2005	Seguimiento del M1
7 sondeos	20/12/2005	Seguimiento del M1

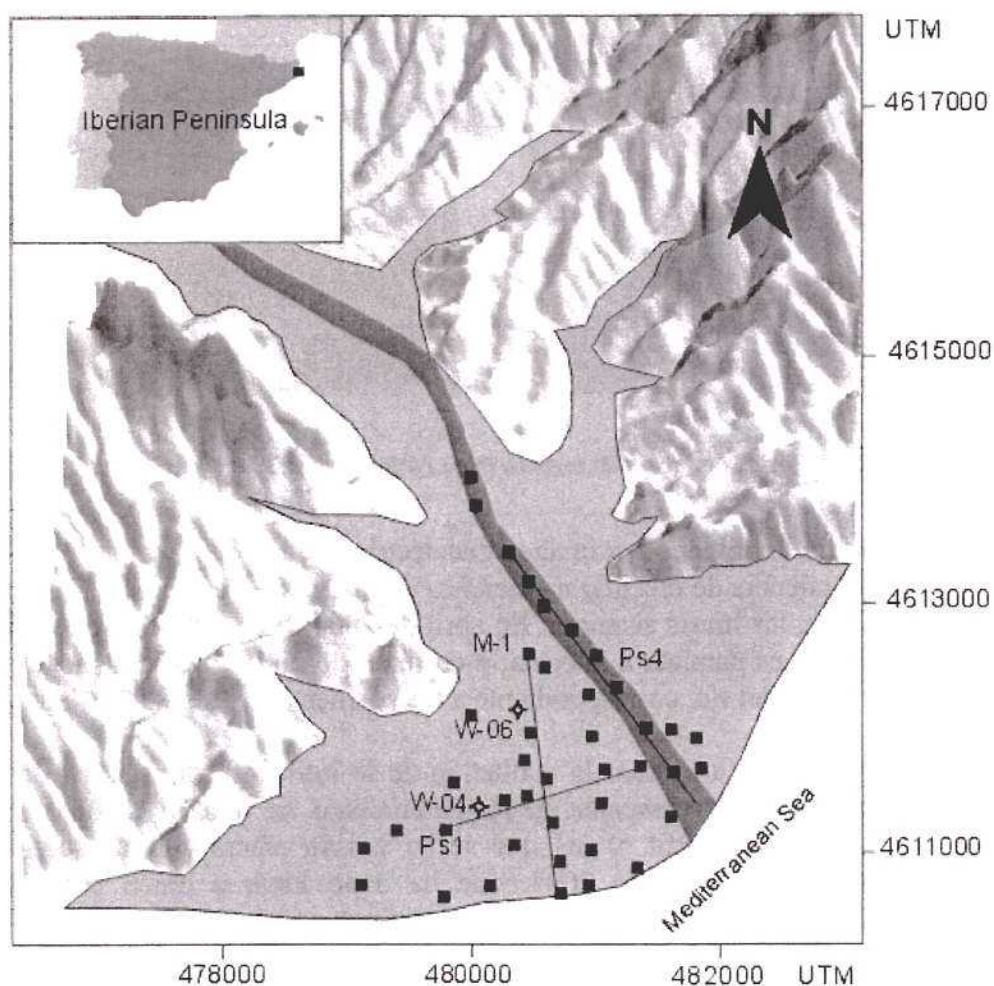


Figura 7.4 Mapa esquemático del área fluviodeltaica del río Tordera. Los cuadrados representan los sondeos de AMT realizados durante el 2004 y 2005. PS1 y PS4 perfil sísmico y perfil magnetotélico. M-1 perfil de seguimiento. W-06 y W-04 piezómetros de la red de control de l'Agència Catalana de l'Aigua.

7.2.3 Proceso e interpretación de datos

Campaña de reconocimiento

En primer lugar se muestran los resultados de la campaña de reconocimiento para identificar las principales características de la zona (Figura 7.5). Como se ha indicado, los datos cubren prácticamente toda la zona del delta. Se llama la atención de que en las figuras de este apartado se ha utilizado el convenio habitual en magnetotélica para la paletas de colores de la resistividad, en la que los valores altos corresponden a los azules, mientras que los bajos, a los rojos.

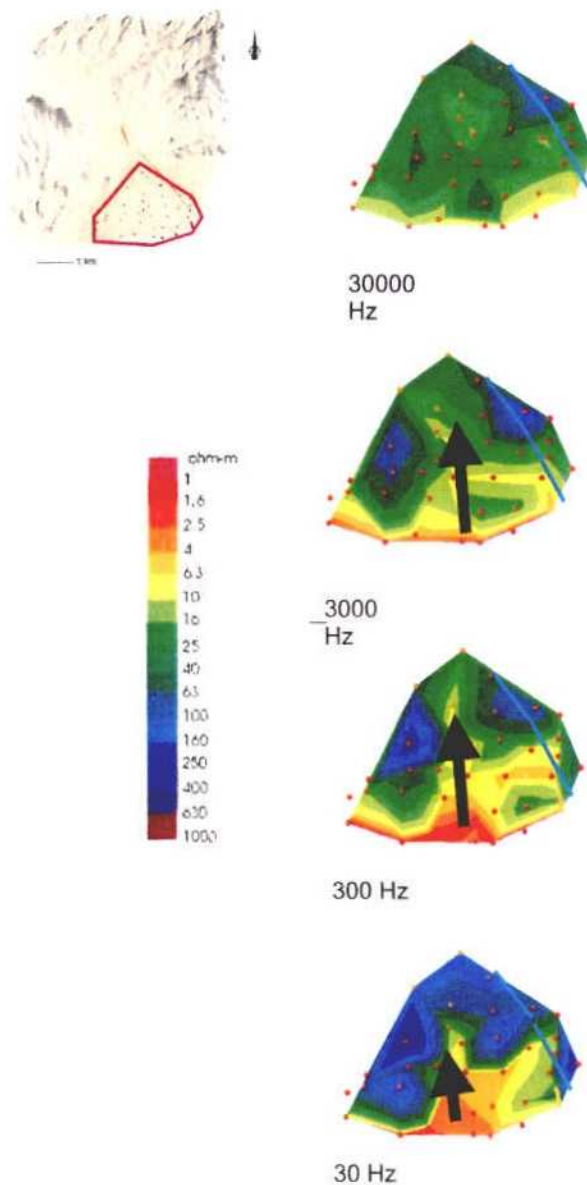


Figura 7.5 Datos de la campaña de reconocimiento. A la izda. situación de los puntos de medida en el delta, y a la derecha la resistividad aparente para diferentes frecuencias, que indican diferentes profundidades de estudio (en la imagen de la parte superior, es más superficial que en la imagen de la parte inferior)

Se observa que en esta zona aparece una zona conductora (identificada por la flecha) que presenta valores máximos entre 300 y 30 Hz, y sugiere que la cuña de intrusión sigue esta dirección. Esto coincide con la interpretación dada por Teixidó (2000) a partir de la comparación de los SEV de 1969 y los adquiridos en los noventa. Este comportamiento se puede justificar asumiendo que esa dirección que favorece la intrusión corresponde al antiguo cauce del río o paleocanal.

Perfil paralelo al río Tordera PS4

Este perfil se corresponde con los perfiles sísmicos realizados a lo largo del cauce del río. En la Figura 7.6 se presenta la pseudosección de resistividades aparente (del determinante de la impedancia) para este perfil a lo largo del río.

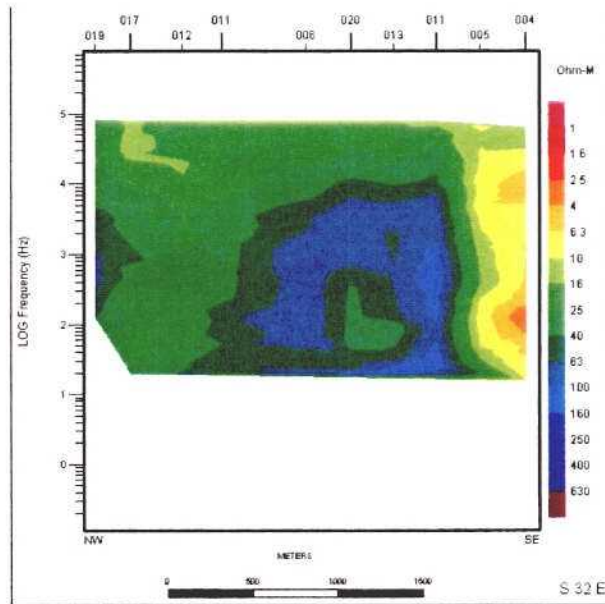


Figura 7.6 Pseudosección de resistividad aparente del perfil PS4

La Figura 7.7 ilustra el modelo obtenido a partir de la inversión de los datos para este perfil. A la derecha (bajo el sondeo 04) aparece una zona altamente conductora asociada al efecto de la intrusión marina; a profundidades comprendidas entre 20 y 80 m se distingue un objeto resistente que presenta una discontinuidad bajo el sondeo 11. Debajo es este aparece una zona conductora, por debajo de la cual se observa un resistente, que se podría asociar al basamento granítico. Este estrato resistente profundo se ha impuesto buscando la topografía compatible con los datos.

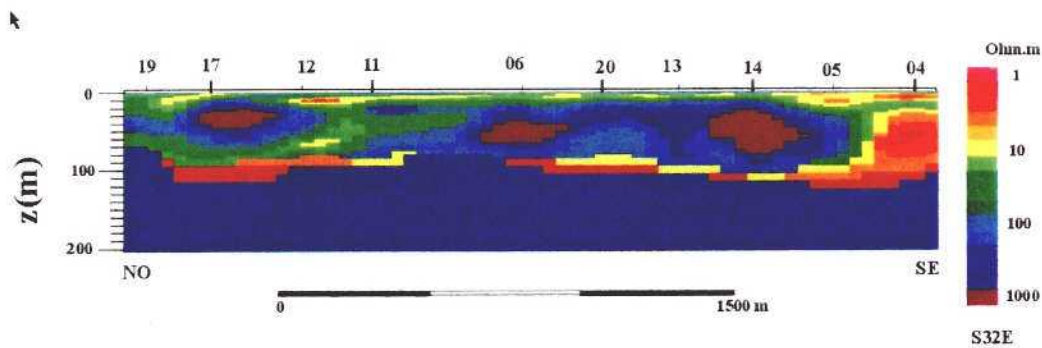


Figura 7.7 Modelo obtenido por la AMT para el perfil PS4 paralelo al río.

Perfil paralelo al perfil sísmico PS1

Este perfil tiene una dirección paralela a la línea de costa. En la Figura 7.8 se presenta la pseudosección de resistividades aparente (del determinante de la impedancia) para este perfil.

En la Figura 7.9 se muestra la interpretación obtenida mediante la inversión. En él se observa una zona conductora a partir de una profundidad de 50 m que presenta continuidad entre los sondeos 18 y 32. Por debajo de la cual se ha determinado la profundidad mínima a la que aparece el resistente inferior asociado al basamento granítico. La existencia de esta zona altamente conductora bajo el sondeo 18 podría

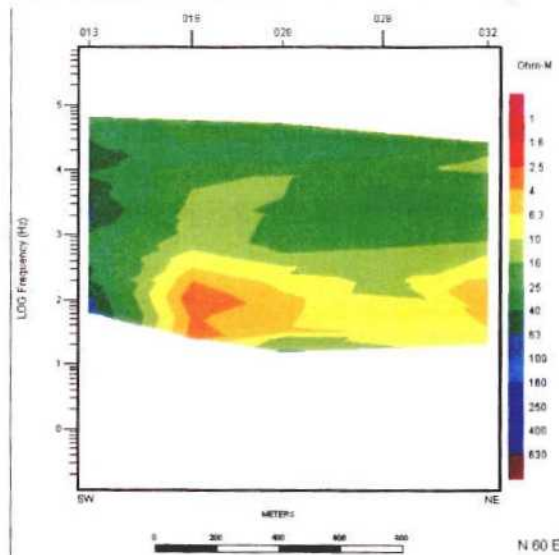


Figura 7.8 Pseudosección de resistividad aparente del perfil PS1

estar asociada a la existencia de un paleocanal utilizado por el agua marina como camino preferente para su avance tierra adentro

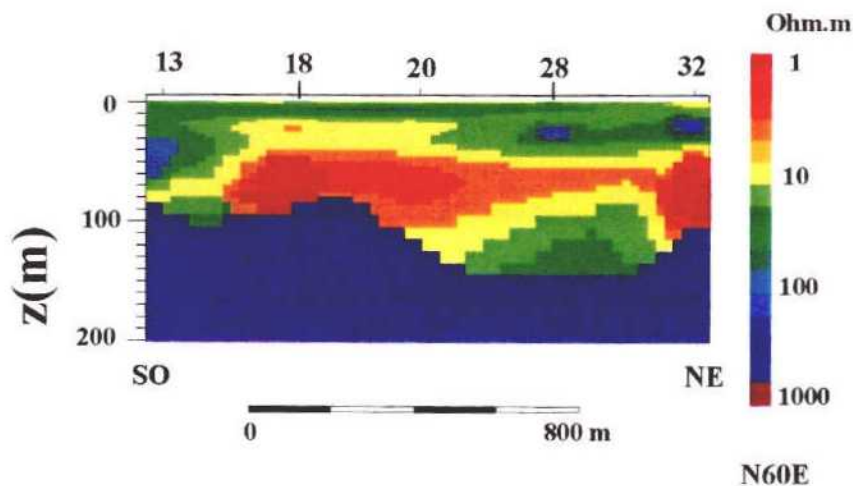


Figura 7.9 Modelo obtenido por la AMT para el perfil paralelo al perfil PS1.

Perfil M1 perpendicular a la línea de costa

Este perfil corresponde al perfil seleccionado a partir de la campaña de reconocimiento para hacer un seguimiento de la intrusión marina, y contiene siete sondeos alineados en una dirección N-S, separados en promedio una distancia de 300 m, si bien esto se ha ajustado a las condiciones de la zona. Este perfil se ha tomado según la dirección que

parecía seguir la intrusión, de acuerdo con los resultados de la campaña de reconocimiento mostrada anteriormente.

En la Figura 7.10 se ilustra la evolución de los modelos obtenidos por la inversión de los datos adquiridos cada cuatro meses, desde abril de 2004 hasta agosto de 2005. Los aspectos comunes a todos ellos son: la presencia de una zona muy conductora a la derecha (sur) que corresponde a la proximidad de la costa; la presencia del basamento resistente con un buzamiento hacia la línea de costa, si bien en los dos primeros modelos este contraste no queda tan bien definido; y se identifica una lengua conductora, a profundidades de unos 50 m, que presenta continuidad a lo largo de todo el perfil, y que se asocia a la evolución seguida por la intrusión.

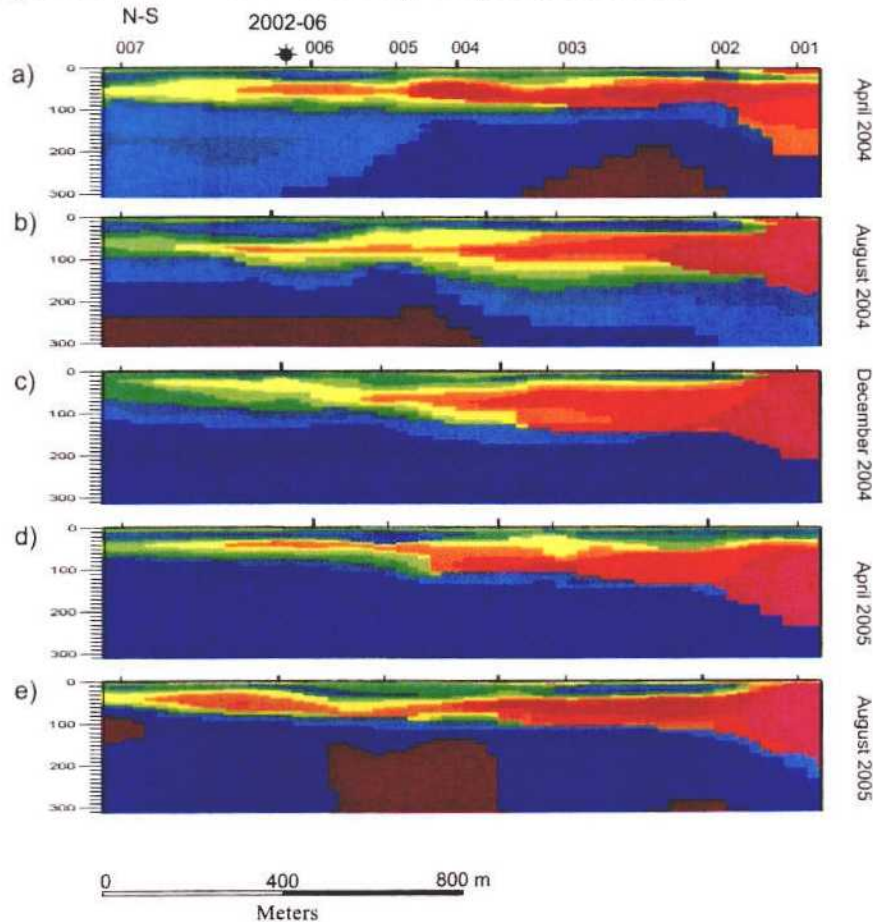


Figura 7.10 Modelos para el perfil M1, entre abril de 2004 y agosto de 2005 (misma paleta de colores que en las figuras anteriores).

7.3 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO PERFILES DE RESISTIVIDAD

7.3.1 Aspectos metodológicos e instrumentales

La resistividad de las rocas está relacionada con parámetros geológicos como son: el contenido mineral y de fluido, la porosidad, el grado de saturación de agua de la roca, etc. El propósito de una campaña geoelectrica es el de determinar la distribución de la resistividad en el subsuelo mediante la realización de medidas en superficie.

Las medidas de resistividad se hacen normalmente introduciendo corriente en el terreno a través de un par de electrodos denominados de "corriente", y midiendo la diferencia de potencial creada entre otro par de electrodos, denominados de "potencial". A partir de la intensidad de la corriente introducida (I) y del voltaje medido (V), se puede calcular un valor de resistividad aparente mediante la expresión:

$$\rho_a = k V/I$$

donde k es un factor geométrico que depende de la disposición de los electrodos. La Figura 7.11 muestra ejemplos de diferentes configuraciones lineales de electrodos, de uso común en las campañas de perfiles eléctricos: Wenner (α, β , y γ), Schlumberger, Dipolo-Dipolo, y Polo-Polo, junto con su factor geométrico. Puede observarse que la configuración Wenner es un caso especial en el que los cuatro electrodos están igualmente espaciados con una separación a . Para la disposición Schlumberger, la relación I/L variará durante el estudio normal; de modo similar el factor n variará en un estudio Dipolo-Dipolo. Las diferentes configuraciones de electrodos ofrecen ventajas y desventajas al comparar una con otra en términos de logística y resolución, y la elección es normalmente un equilibrio entre estos factores. Además, el principio de reciprocidad establece que los electrodos de corriente y potencial pueden intercambiar sus lugares sin afectar la resistividad medida. En algunas aplicaciones, hacer uso del principio de reciprocidad puede ser una ventaja, bien por razones logísticas, o bien para estimar la exactitud de la medición.

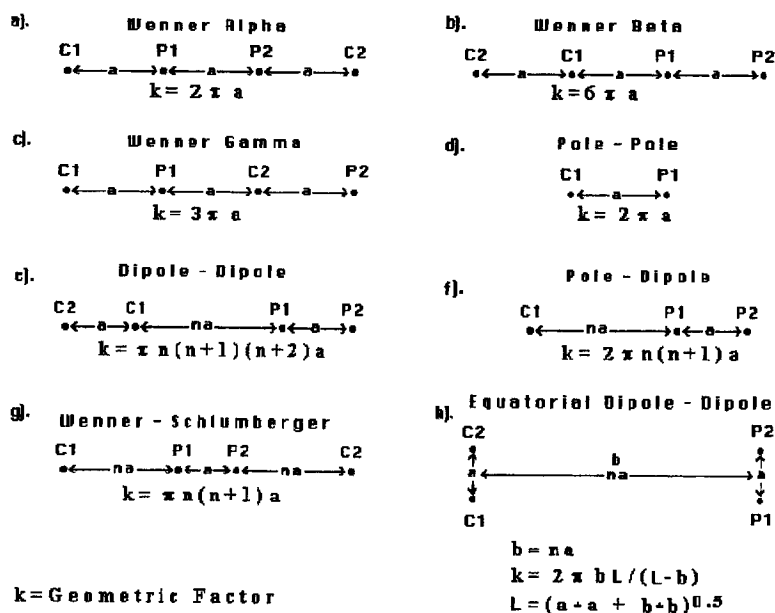
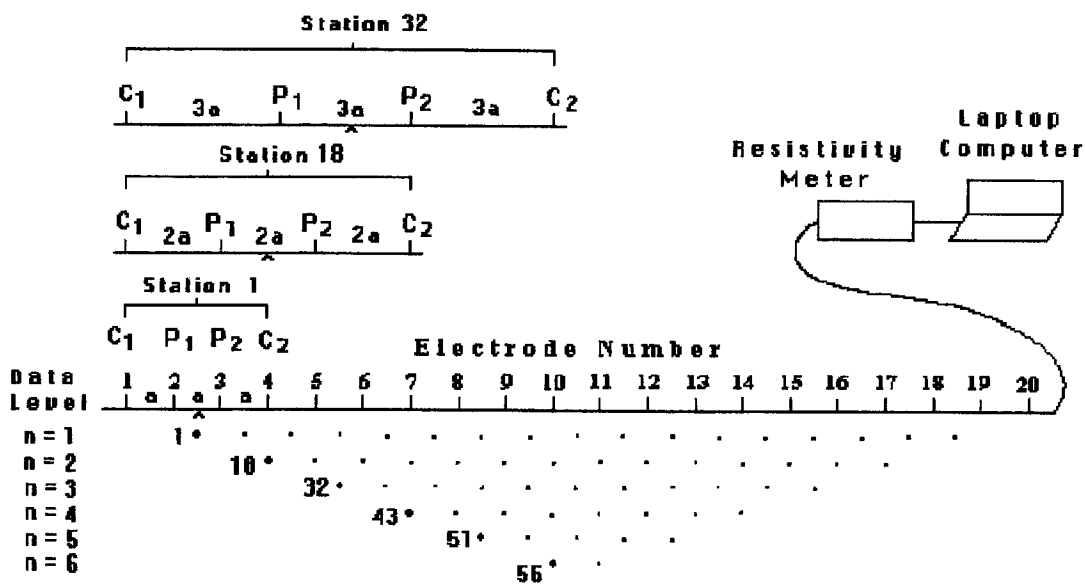


Figura. 7.11 Dispositivos electrónicos más comunes junto con su factor geométrico k utilizados en prospección geoelectrica.

Tradicionalmente las medidas de resistividad se ajustan a un modelo 1-D de las variaciones de resistividad con la profundidad, asumiendo que el subsuelo está compuesto de capas horizontales (Sondeo Eléctrico Vertical). En los últimos años se han desarrollado el uso de perfiles eléctricos 2-D, o **perfiles continuos de resistividad, o imágenes eléctricas (TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA)**, para estudiar áreas con una geología moderadamente compleja, donde la resistividad varía no solo con la profundidad sino que también lo hace lateralmente, sin que cambie en la dirección perpendicular a la línea de medida. Estos perfiles se llevan a cabo utilizando un gran número de electrodos, conectados mediante un cable con varios hilos conductores. De manera automática y controlado por un procesador, se seleccionan los cuatro electrodos que se van a utilizar en cada momento para realizar la medida, de entre los varios que se encuentran dispuestos por el terreno, efectuando las mediciones de campo de una manera rápida y económica. En la Figura 7.12 se muestra un esquema típico de una medida en 2-D, con los electrodos dispuestos en un perfil según una línea recta. Normalmente, se utiliza un espaciado constante entre los electrodos. La secuencia de medida, el tipo de dispositivo a emplear, así como otros parámetros de lectura, se introducen en el aparato mediante un fichero de texto que es leído en el procesador del equipo; los formatos de estos ficheros y el tipo de control del equipo dependen de las características particulares de los diferentes instrumentos que existen en el mercado. Después de leer el fichero de control, el programa selecciona de manera automática los electrodos apropiados para cada lectura.



Sequence of measurements to build up a pseudosection
Figura. 7.12 Esquema típico de la secuencia de medidas 2-D, con los electrodos dispuestos en un perfil según una línea recta.

Los perfiles de resistividad en este Proyecto han sido medidos empleando el sistema Lund de ABEM, sistema multielectrónico para estudios de resistividad en 2D y 3D. El equipo consta de un selector de electrodos, denominado ES 464, y de cables multielectrodos, que se conectan directamente al resistivímetro Terrámeter SAS 4000 / 1000 de ABEM. La fuente de alimentación para el funcionamiento procede de una batería interna recargable de 12 voltios (Figura 7.13).

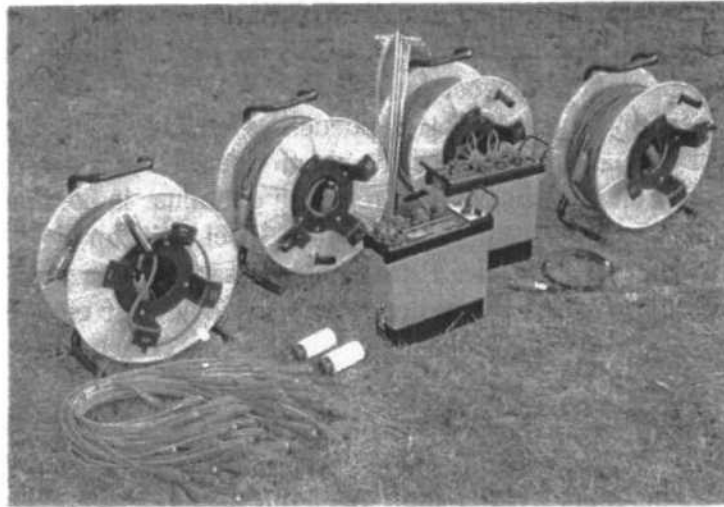


Figura 7.13 Material de que consta el Sistema Lund de ABEM. Cables multielectrodo, resistivímetro SAS4000, Selector de electrodos, electrodos y cables de conexión electrodo cable multielectrodo. (Fuente manual sistema LUND)

En el procedimiento de medida en campo con este sistema, se utilizan cuatro cables de electrodos, denominados cable 1 a cable 4 dependiendo de su posición en cada momento a lo largo de la línea del estudio. Los cables multieléctrodo se desenrollan en la dirección de avance del perfil, es decir con el extremo del carrete de cable mirando hacia el final. Las tomas # 1 y # 21 de los cables se solapan en los empalmes de cable y en el centro del trazado. Los electrodos se conectan a las tomas con número impar en los cuatro cables, pudiendo omitirse temporalmente las tomas de número par. Los cables se unen empleando los dispositivos de empalme de cable. En esta conexión debe respetarse una dirección correcta, para lo que los elementos de empalme llevan una acanaladura que debe apuntar hacia el aparato, situado en el centro de la distribución. El Selector de electrodos se conecta en el centro del tendido de cable, es decir al cable #2 y al cable #3, y el Selector se conecta al resistivímetro SAS 4000 / 1000, Figura 7.14.

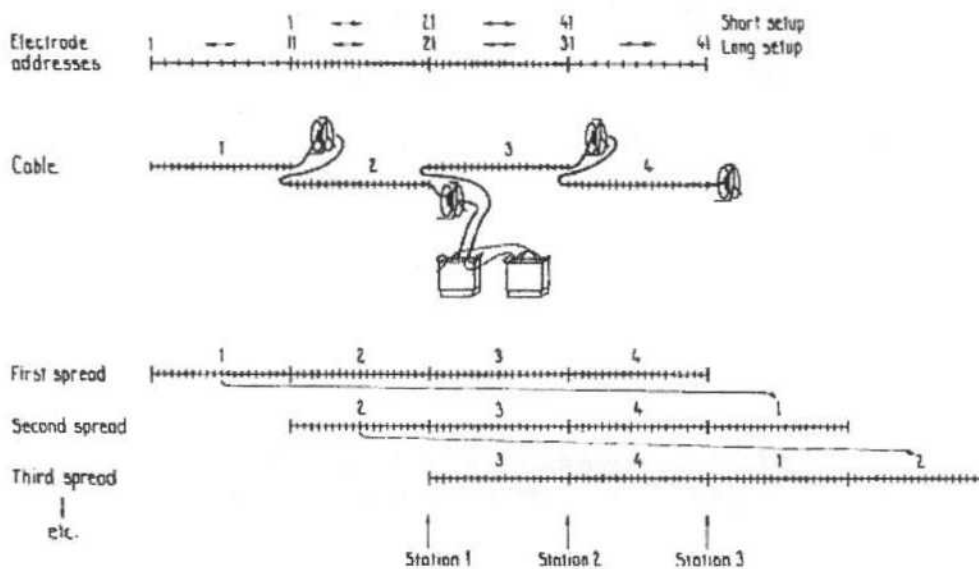


Figura 7.14 Disposición básica del sistema para desarrollo en el estudio CVES usando cuatro cables de electrodo. Con intervalos de 2 metros entre las tomas de electrodo, el sistema tiene una longitud total de 160 metros; con intervalos de 5 metros, la longitud total es de 400 metros. (Fuente manual sistema LUND)

Mientras las mediciones están en progreso para la disposición larga (empleando los cuatro cables), pueden conectarse los electrodos para el resto de las tomas en los dos cables de electrodos próximos al centro (disposición corta). Tan pronto como se ha terminado la medición de la disposición larga, el cable 1 puede desconectarse, recogerse y desenrollarse delante del cable 4. De esta manera todos los electrodos pueden estar colocados cuando se terminen las mediciones en la disposición corta. Para continuar la adquisición de datos en el perfil, es preciso desconectar el cable 2 y el cable 3 del Selector de electrodos, y unirlos mediante el empalme normal de cable. Estos cables pasan ahora a ser los cables 1 y 2. El Selector de electrodos y el Resistivímetro deben entonces colocarse en el nuevo punto central, y conectar lo que es ahora el cable 2 y el cable 3 al Selector de electrodos.

Este proceso se repite cuantas veces se desee para continuar con el desarrollo (arriba y abajo): comprobación de contactos, medición primero para la disposición larga y luego de la disposición corta. Sin embargo, la medición es ahora más rápida ya que previamente se han medido muchas de las posibles combinaciones de medición. Mientras se efectúa la medición en la disposición larga, todos los electrodos de las tomas numeradas en el cable 1 pueden ser movidos y conectados a las tomas con igual numeración del cable 3, para que estén listas para la prueba de contacto para la disposición corta. El perfil puede extenderse tanto como se quiera. Además, la medición puede detenerse en cualquier momento

La cobertura de datos para el estudio de la resistividad con sistemas multielectrodo depende en general de varios factores tales como: el número total de tomas de electrodo, el número de secciones en que está dividida la disposición de cable, el tipo de configuración empleado (Wenner, Polo-Polo, Dipolo-Dipolo, etc.)

Para el Wenner CVES estándar, la cobertura de datos para la primera estación de medición, usando los ficheros de protocolo WENNER_L.ORG y WENNER_S.ORG, se muestra en la Figura 7.15a. La figura está dibujada en unidades de distancia, donde el espaciado de tomas de electrodo es una unidad, que puede ser multiplicada por el verdadero espaciado de tomas de electrodo para obtener la cobertura para una particular determinación de condiciones de cable. Como puede verse en la figura, hay una cobertura razonable de datos para ± 20 unidades, pero sólo se cubre completamente en una porción centrada alrededor del punto medio.

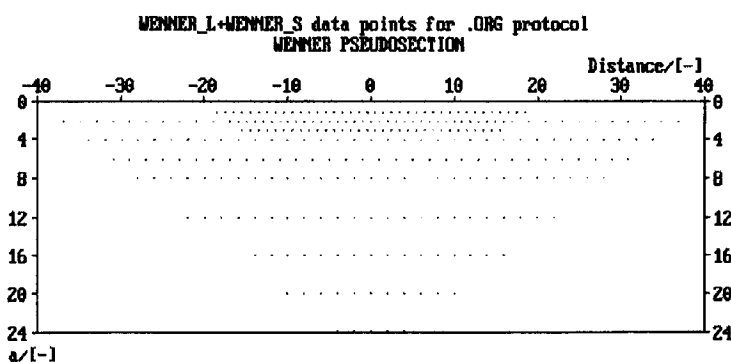


Figura 7.15a Cobertura de datos del CVES Wenner usando WENNER_L y WENNER_S para la primera estación de medición. Las unidades de distancia son el número de multiplicaciones del espaciado de tomas de electrodo. (Fuente manual del sistema LUND)

La WENNER_S está diseñada solamente para complementar la WENNER_L para el espaciado más pequeño de electrodos, y generalmente no es adecuada para utilizarla empleando únicamente los dos cables centrales. Si las mediciones se hacen con dos cables

únicamente debe usarse WENNER_L, y omitir todas las posiciones de electrodos en los cables exteriores de electrodo, o utilizar un protocolo dedicado para emplear dos cables de electrodo únicamente.

Con la medición por medio del desarrollo, la cobertura de datos se hace continua, salvo para las separaciones más largas de electrodos donde hay lagunas en la cobertura entre los puntos de estación (Figura 7.15b). Puesto que existe un solapamiento importante en la cobertura entre puntos de estaciones consecutivas, los ficheros de protocolo .UP y .DWN se reducen, lo que significa que la medición es mucho más rápida. En la práctica esto significa que la medición para estos puntos tarda normalmente alrededor de la mitad del tiempo que el necesario para el primer punto medio.

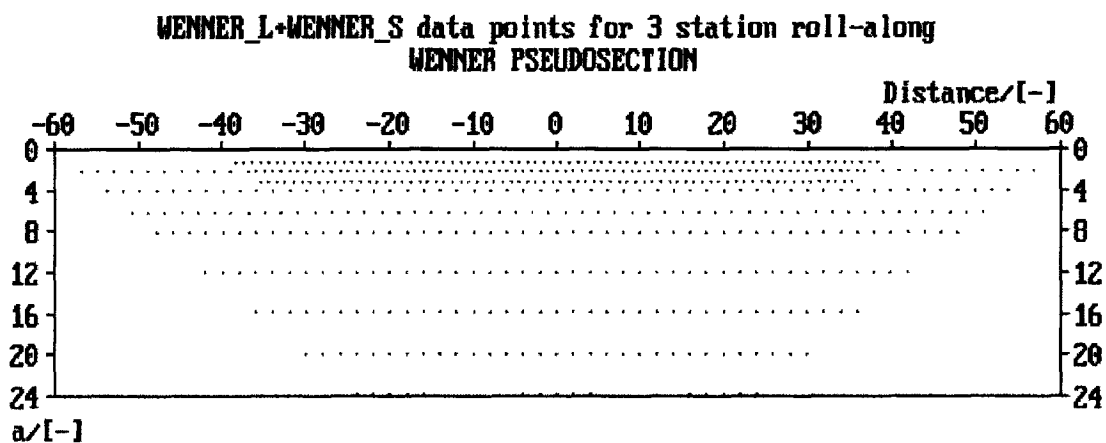


Figura 7.15b Cobertura de datos del CVES Wenner estándar usando WENNER_L y WENNER_S para desarrollo con tres estaciones. Las unidades de distancia son el número de multiplicaciones del espaciado de tomas de electrodo. (Fuente manual del sistema LUND)

En principio, cualquier configuración de cable y disposición de electrodos podría utilizarse para la medición, en tanto que la geometría y secuencia de mediciones esté especificada en los ficheros de protocolo y de dirección usados.

Para representar los datos de la campaña 2-D, se utiliza normalmente la seudosección. La localización horizontal de un dato se establece en el punto medio del juego de electrodos utilizados para hacer la medida. La localización vertical del dato se sitúa a una distancia proporcional a la separación de los electrodos. Otro método consiste en situar la posición vertical del dato en la profundidad media de investigación o seudoprofundidad del dispositivo empleado. El valor de la seudoprofundidad está basado en los valores de sensibilidad o derivadas de Frechet para un semiespacio homogéneo. Puesto que éste último parece tener alguna base matemática, es el que normalmente se emplea. En la Tabla 7.1 se muestran las profundidades medias de investigación para los diferentes dispositivos. No obstante conviene enfatizar que la seudosección es simplemente una manera de representación que proporciona una imagen aproximada de la distribución de resistividad del subsuelo, aunque ésta pueda estar distorsionada debido a que las isolíneas dependen del tipo de dispositivo empleado así como de la verdadera resistividad del subsuelo. La seudosección es útil como un medio de representar la resistividad aparente medida, y como un modelo inicial para la interpretación cuantitativa. Sería un error el utilizar la seudosección como una representación final de la resistividad real del terreno.

Array type		z_p/a	z_p/L
Wenner Alpha		0.519	0.173
Wenner Beta		0.416	0.139
Wenner Gamma		0.594	0.198
Dipole-dipole	$n = 1$	0.416	0.139
	$n = 2$	0.697	0.174
	$n = 3$	0.962	0.192
	$n = 4$	1.220	0.203
	$n = 5$	1.476	0.211
	$n = 6$	1.730	0.216
Equatorial dipole-dipole	$n = 1$	0.451	0.319
	$n = 2$	0.809	0.362
	$n = 3$	1.180	0.373
	$n = 4$	1.556	0.377
Wenner - Schlumberger	$n = 1$	0.52	0.173
	$n = 2$	0.93	0.186
	$n = 3$	1.32	0.189
	$n = 4$	1.71	0.190
	$n = 5$	2.09	0.190
	$n = 6$	2.48	0.190
Pole-dipole	$n = 1$	0.52	
	$n = 2$	0.93	
	$n = 3$	1.32	
	$n = 4$	1.71	
	$n = 5$	2.09	
	$n = 6$	2.48	
Pole-Pole		0.867	

Tabla 7.1 Profundidad media de investigación (Z_p) para los diferentes tipos de dispositivos. L es la longitud total del dispositivo. El factor geométrico es para un $a=1$ metro. (Edwards 1977)

En la Figura 7.16 se indica la construcción de una pseudosección, dibujando los puntos de datos en un diagrama, usando el eje de longitud para la distancia a lo largo de la línea de estudio, y el eje de profundidad para la separación de electrodos.

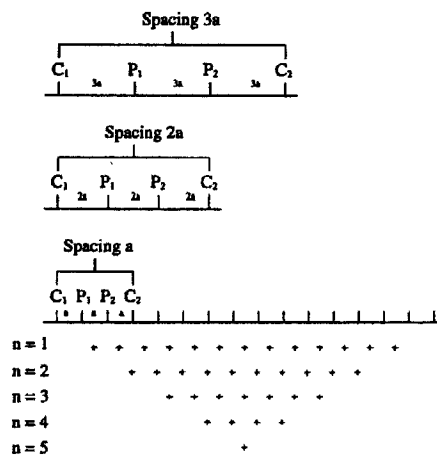


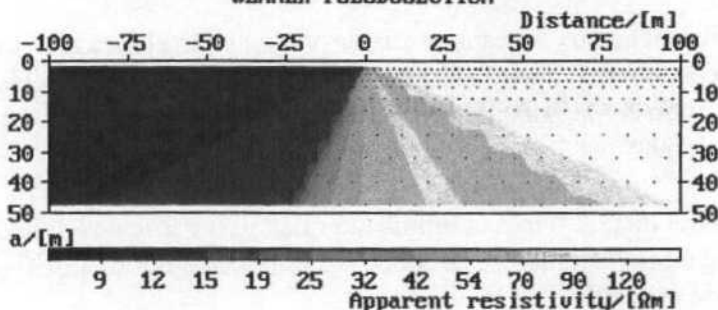
Figura 7.16. Principio de construcción de una pseudosección. (Fuente manual del sistema LUND)

Las resistividades aparentes correspondientes para los puntos dibujados se emplean entonces para perfilar la variación de resistividad aparente a lo largo de la línea de estudio. La seudosección así obtenida refleja la variación de resistividad en el suelo de un modo cualitativo.

La selección de los límites de intervalos de resistividad es de gran importancia cuando se presentan los datos, ya que la percepción de los datos está fuertemente controlada por los colores. Una selección adecuada de los límites puede realzar los cambios geológicos, mientras que una selección inadecuada puede ocultar información importante o resaltar rasgos irrelevantes. Obviamente es necesario tener un control geológico para optimizar la presentación de los datos. El carácter de los datos de resistividad a menudo hace adecuado utilizar una distribución logarítmica entre los intervalos de resistividad.

El ejemplo de un dibujo de seudosección expuesto en la Figura 7.17 muestra la respuesta de un contacto vertical, con $10 \Omega \cdot m$ a la izquierda del contacto y $100 \Omega \cdot m$ a la derecha. El ejemplo muestra una respuesta modelo calculada analíticamente, y emula los datos tomados en pauta similar a la del sistema de colección de datos. El ejemplo señala la importancia de conocer los fuertes efectos laterales en los datos de resistividad de las discontinuidades verticales cuando se interpretan seudosecciones.

Analytical section: vertical contact ($10\Omega m + 100\Omega m$) 0% noise
WENNER PSEUDOSECTION



Gladökvärn profile 2 1993-04-27
WENNER PSEUDOSECTION

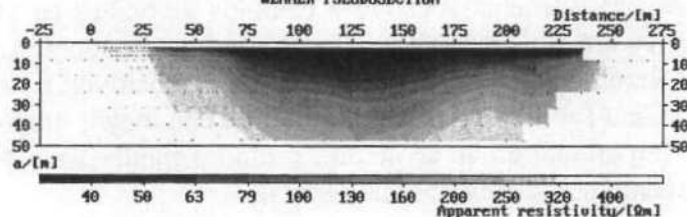


Figura 7.17 Ejemplo de dibujo de seudosección. En la parte superior se muestra la respuesta analítica a un contacto vertical sencillo ($10 \Omega \cdot m$ y $100 \Omega \cdot m$), con datos tomados como datos de campo. La parte inferior es un ejemplo con los datos de campo medidos cerca de Gladökvärn al sur de Estocolmo (Fuente manual sistema LUNDL) (Carpenter, 1955)

En la Figura 7.18 se observa cómo el uso de diferentes dispositivos puede proporcionar formas diferentes en las seudosecciones al estudiar la misma estructura. La presentación de los datos de resistividad en color puede ser discutible cuando los datos no contienen información espectral alguna. Sin embargo, el dibujo en color hace más fácil ver las variaciones de resistividad, lo que es importante cuando pueden ser significativos pequeños cambios en la resistividad en una parte de un perfil largo, incluso si hay grandes variaciones a lo largo del perfil.

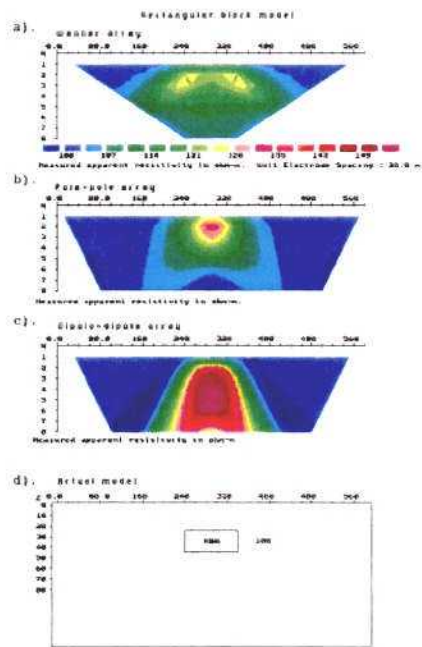


Figura 7.18 Sección geoelectrica proporcionada por diferentes dispositivos, para la misma la misma estructura del subsuelo.

Cada tipo de dispositivo tiene sus ventajas y sus desventajas, la elección del mejor dispositivo para una campaña depende del tipo de estructura a estudiar, la sensibilidad del equipo de medida y el nivel de ruido de la zona. Entre las características a tener en cuenta a la hora de elegir un dispositivo están:

- la sensibilidad del dispositivo a cambios laterales y /o verticales del subsuelo,
- la profundidad de investigación, la cobertura horizontal del dispositivo y
- la intensidad de la señal.

El dispositivo Wenner es relativamente sensible a cambios verticales en la resistividad del subsuelo por debajo del centro del dispositivo. En general es bueno resolviendo cambios horizontales (estructuras verticales). Comparado con otros dispositivos posee una moderada profundidad de investigación (Tabla 7.1), y es el dispositivo con mayor intensidad de señal, lo que puede ser un factor importante en áreas de alto ruido de fondo. Una desventaja de este dispositivo es la relativamente pobre cobertura horizontal.

El dispositivo Dipolo-Dipolo es muy sensible a cambios horizontales de resistividad y relativamente insensible a cambios verticales de resistividad, lo que significa que es muy bueno resolviendo estructuras verticales, como diques y cavidades, pero relativamente pobre resolviendo estructuras horizontales, como capas sedimentarias. Este dispositivo posee una menor profundidad de investigación comparada con el dispositivo Wenner, pero sin embargo posee una mejor cobertura horizontal. Una desventaja de este dispositivo es la señal tan débil que se recibe para grandes valores de n , por lo que el equipo de medida debe de poseer una alta sensibilidad y un buen sistema de rechazo de ruido.

El dispositivo Wenner-Schlumberger es moderadamente sensible a estructuras verticales y horizontales y podría ser un buen compromiso entre los dos dispositivos citados anteriormente. La profundidad de investigación de este dispositivo es alrededor de un 10% mayor que para el dispositivo Wenner; la intensidad de la señal es menor que la del

dispositivo Wenner y mayor que la del dispositivo Dipolo-Dipolo. La cobertura horizontal de este dispositivo es mejor que la obtenida con el Wenner pero peor que la que se obtiene con el Dipolo-Dipolo.

A la hora de realizar la inversión de los datos se tiene que tener en cuenta que la solución no es única; para los mismos datos medidos existe un amplio rango de modelos que pueden dar lugar a los mismos valores calculados de resistividad. En el caso de que los cuerpos del subsuelo posean límites graduales de resistividad, la inversión puede utilizar algoritmos de smoothnes constrain, el cual trata de minimizar el cuadrado de las diferencias entre los valores de resistividad medidos y calculados. En los casos en que la situación geológica sea de cuerpos casi homogéneos internamente, y con límites netos, el algoritmo de inversión apropiado es el robust constrain, que trata de minimizar el valor absoluto de las diferencias entre los valores medidos y calculados de resistividad. Estos dos algoritmos proporcionan valores extremos del rango de modelos que es posible obtener con un conjunto de datos, por lo que puede ser recomendable el realizar dos inversiones, una con cada tipo de algoritmo y comparar los resultados.

Para el cálculo de una primera interpretación del modelo para 2D o 3D se ha empleado en este trabajo el programa RES2DINV, que realiza una inversión ligeramente restringida (interpretación automática del modelo) usando diferencias finitas para la modelización y técnicas casi -Newton. La Figura 7.19 muestra ejemplos de secciones de interpretación de modelos 2D, invertidas usando RES2DINV.

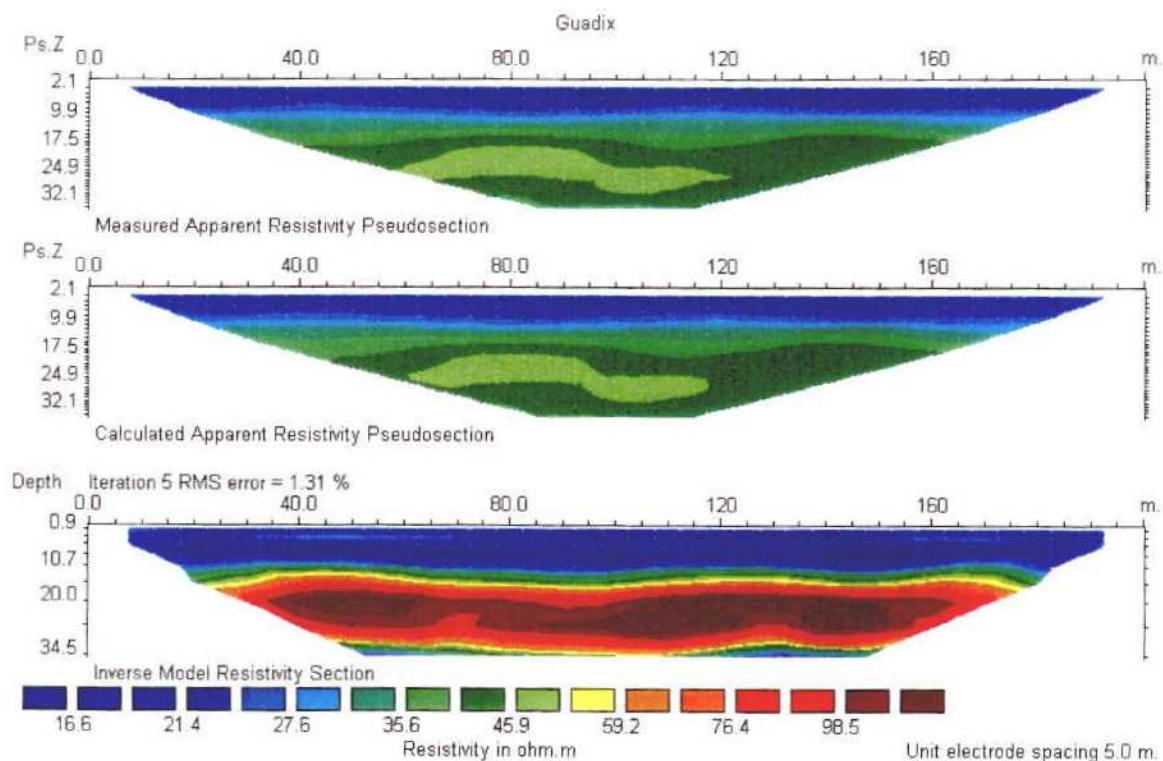


Figura 7.19 Ejemplo de una sección realizada a partir de datos medidos en Dehesas de Guadix (Granada). En la parte superior la pseudosección medida, en el centro la pseudosección de resistividad aparente calculada y en la inferior el modelo invertido de resistividad. (IGME 2001)

7.3.2 Diseño y ejecución de las campañas de campo

A partir de los datos ya conocidos en el acuífero del río Tordera, se planificó el trazado varios perfiles de resistividad de coincidente con las líneas de sísmica de reflexión PS4 (siguiendo el curso del río) y la línea PS1, transversal a la anterior. Su situación está reflejada en la Figura 7.21. Los parámetros de adquisición (tipo de configuración, espaciado interelectródico y longitud del perfil) fueron diseñados en función de los objetivos, y teniendo en cuenta los principios operativos del método, descritos en el apartado anterior. Estos parámetros se resumen en el cuadro siguiente:

Perfil	Fecha	Longitud	Espaciado interelectródico	Configuración
PS4 1	11/2003	2100	15	Wenner
PS4 1 a	11/2003	1200	15	Schlumberger
PS4 1 b	11/2003	1200	15	Dipolo-Dipolo
PS4 2	11/2003	1200	15	Wenner
PS4 2 a	11/2003	1200	15	Schlumberger
Union 1-2	11/2004	1800	15	Wenner
Union 1-2	11/2004	1800	15	Schlumberger
Union 1-2	11/2004	1800	15	Dipolo-Dipolo
Playa	11/2004	600	15	Wenner
PS1	11/2004	1500	15	Wenner
PS1	11/2004	1500	15	Schlumberger

La toma de datos en campo se llevó a cabo en dos campañas, la primera a finales de noviembre de 2003 y la segunda un año después. Estas fechas para la toma de datos han estado condicionadas a periodos secos del río Tordera, de manera que fuera posible la toma de datos en su cauce, con el objeto de minimizar los efectos del ruido electromagnético introducido por las líneas eléctricas e instalaciones industriales de la zona.

El perfil PS4-1 ha sido medido en el camino paralelo al río Tordera en su margen izquierda (Figura 7.20). Se realizó en la primera campaña, con un espaciado interelectródico de 15 m y una longitud de 2100 m, empleando una configuración Wenner. La última parte de este perfil ha sido medida también empleando una configuración Schlumberger, perfil PS4-1a, y una configuración Dipolo-Dipolo, perfil PS4-1b. En esta primera campaña, y por impedimentos logísticos, el perfil no pudo continuarse en este lado del río, ni tampoco era posible en ese momento el cruce del mismo, por lo que se decidió continuarlo aguas abajo, midiéndose en la orilla derecha del río; a esta continuación se la ha denominado perfil PS4-2, alcanzando una longitud de 1200m, con espaciado entre electrodos de 15 m y empleando las configuraciones Wenner, y Schlumberger, perfil PS4-2a.

Al año siguiente, 2004, se realizó una nueva campaña de campo en la que se midieron los siguiente perfiles: un perfil atravesando el río, para unir los segmentos 1 y 2 del perfil PS4 de la campaña anterior; este perfil PS4 se ha medido con las mismas características de los del año anterior y empleando las tres configuraciones: Wenner, Schlumberger y Dipolo-dipolo; la longitud de estos perfiles ha sido de 1800 m, necesaria para solapar en su totalidad los perfiles anteriores y asegurar una cobertura del 100% en la unión. Como consecuencia de esta unión se dispone de un único perfil de unos 3000 m de longitud, medido paralelo al río Tordera. El tramo de unión 1-2 ha sido efectuado como continuación del PS4-1, situando los electrodos del segmento de empalme en los mismo emplazamientos que en el PS4-1, por lo que a

efectos de proceso de datos ha dado lugar a un fichero único. Sin embargo esta operación no es posible realizarla con el segmento PS4-2, que debe ser considerado como independiente.

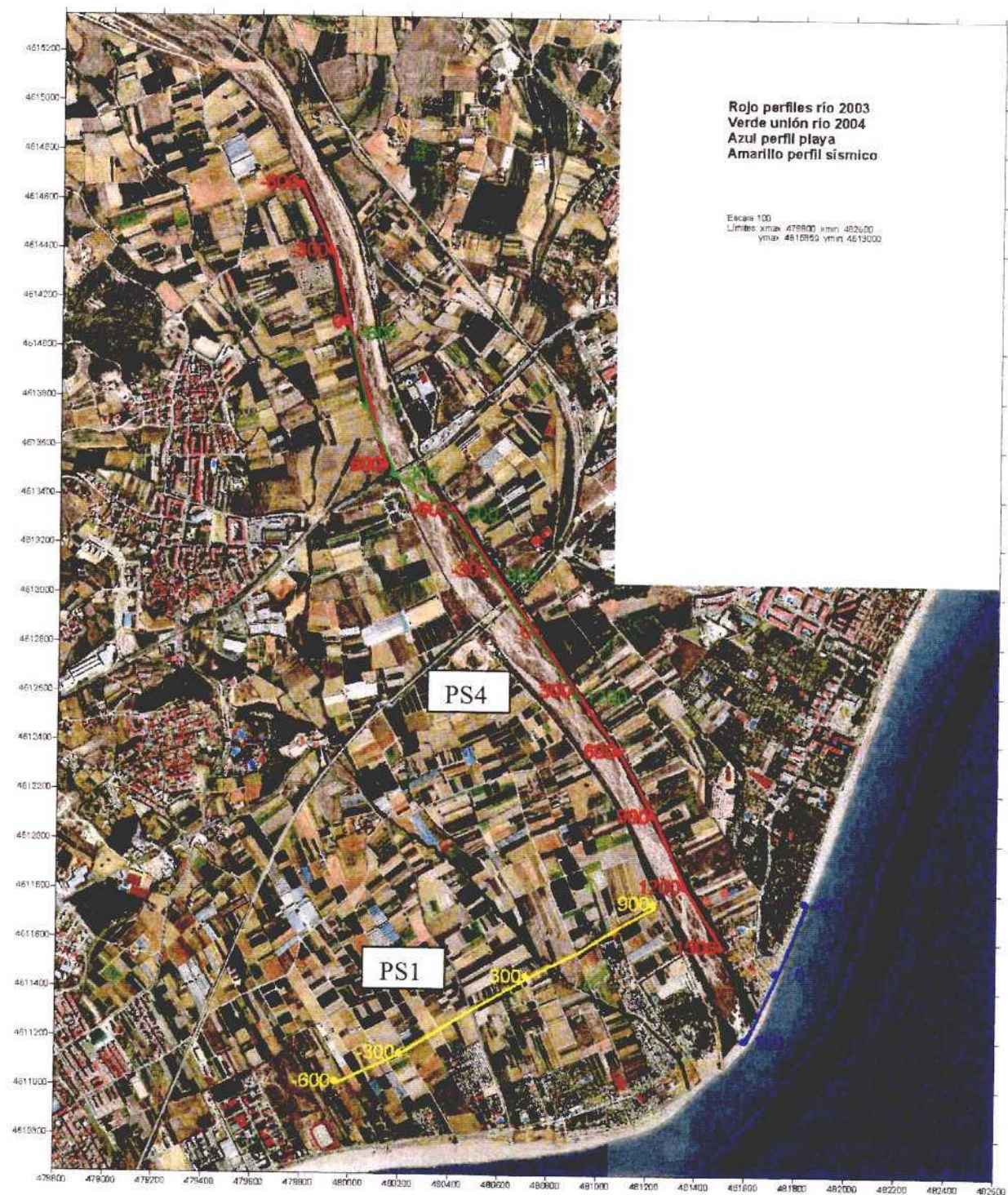


Figura 7.20 Posición de los perfiles medidos. PS1 (en amarillo) y PS4 (en rojo y verde)

También se ha medido un perfil de resistividad coincidente con el perfil sísmico transversal PS1 (Figura 7.20); este perfil tiene una longitud de 1500 m, un espaciado entre electrodos de 15 m y se ha empleado la configuración Wenner.

Por último, y para comprobar la aplicación de esta metodología en un ambiente conductor, se ha medido un perfil en la playa paralelo a la línea de costa (Figura 7.20); este perfil es paralelo a la batería de sondeos mecánicos realizados para la desaladora instalada en la zona; su objetivo es determinar la posibilidad de obtener información de los niveles acuíferos que controlan los sondeos mecánicos, en un ambiente, a priori, no apropiado para la utilización del método; se midió con un dispositivo Wenner, espaciado entre electrodos de 15 m y con una longitud total de 600m.

7.3.3 Proceso e interpretación de datos

Perfil PS4 paralelo al río Tordera

Este perfil, como ya se ha comentado, fue medido en dos campañas. Durante la primera campaña, medida en el año 2003, se midió el tramo de perfil paralelo al río en su margen izquierdo, denominado perfil PS4-1, y el tramo de perfil paralelo al río en su margen derecho, denominado perfil PS4-2. En la campaña de 2004, se midió el tramo de perfil que los une, atravesando el cauce del río (Figura 7.20).

La paleta de colores utilizada en la representación de las secciones geoelectricas, se ha diseñado de tal forma que puedan apreciarse los contrastes de resistividad tanto dentro de los materiales sedimentarios, como entre estos y el granito del basamento; dicha paleta se mantiene en todas las imágenes representadas, para posibilitar su comparación gráfica.

Perfil total PS4 con dispositivo Wenner: el resultado de la inversión, para el dispositivo Wenner, está representado en la Figura 7.21. El perfil PS4-1 (Figura 7.21a), con una longitud de 2100 m, se aprecia un tramo conductor inicial, con mayor conductividad en superficie y en profundidad, que puede ser debido a su proximidad al mar. En la posición 0 del dispositivo se observa un cambio lateral fuerte, pasando de materiales conductores a otros más resistivos con techo hacia los 30 m, y sin que se pueda definir su muro, de profundidad, en principio, superior a los 200 m; por encima de este resistivo existen materiales más conductores, posiblemente un relleno detrítico. Este resistivo se mantiene potente hasta la distancia +450 m del centro del perfil, donde se observa la aparición de un sustrato de carácter más conductor. El resistivo se mantiene hasta unos 1500 m al oeste del centro del dispositivo, donde de una manera brusca pasa de nuevo a materiales más conductores, que rellenan la cuenca desde la superficie.

La inversión realizada al unir el perfil PS4-1 con el segmento de enlace entre los perfiles PS4-1 y PS4-2 (medido en 2004) está representada en la Figura 7.21b). La unión se ha realizado considerando la medición del segmento 1-2 como prolongación del perfil 1, aprovechando la posibilidad que tiene la instrumentación de poder añadir en el mismo fichero las nuevas medidas. Como se aprecia el perfil es bastante coincidente con el anterior en su parte oriental; a partir de la aparición del sustrato conductor entre los materiales resistivos, en la posición +600 desde el centro del dispositivo en este nuevo perfil, la situación es la misma, desde el punto de vista cualitativo, pero se aprecian algunas diferencias cuantitativas: el tramo conductor parece menos extenso, aunque se localiza en la misma posición; el paso a los materiales conductores, alrededor de los 1100 m al oeste del centro, se mantiene en su misma posición, pero aparece entre valores más dispares de resistividad. Continúa el en materiales conductores, situados por debajo del cauce del río, hasta los 1800 m al oeste del centro, donde aparece otra discontinuidad dando paso a materiales más resistivos.

La inversión del perfil PS4-2, Figura 7.21c, medido en 2003, es la prolongación del anterior, en el otro margen del río. Se observa el desarrollo de materiales más resistentes, aunque no tanto como los observados en el centro del perfil 1, bajo un relleno de carácter más conductor. En este perfil 2 aparecen materiales muy resistentes en superficie, ya detectados en el segmento de unión 1-2

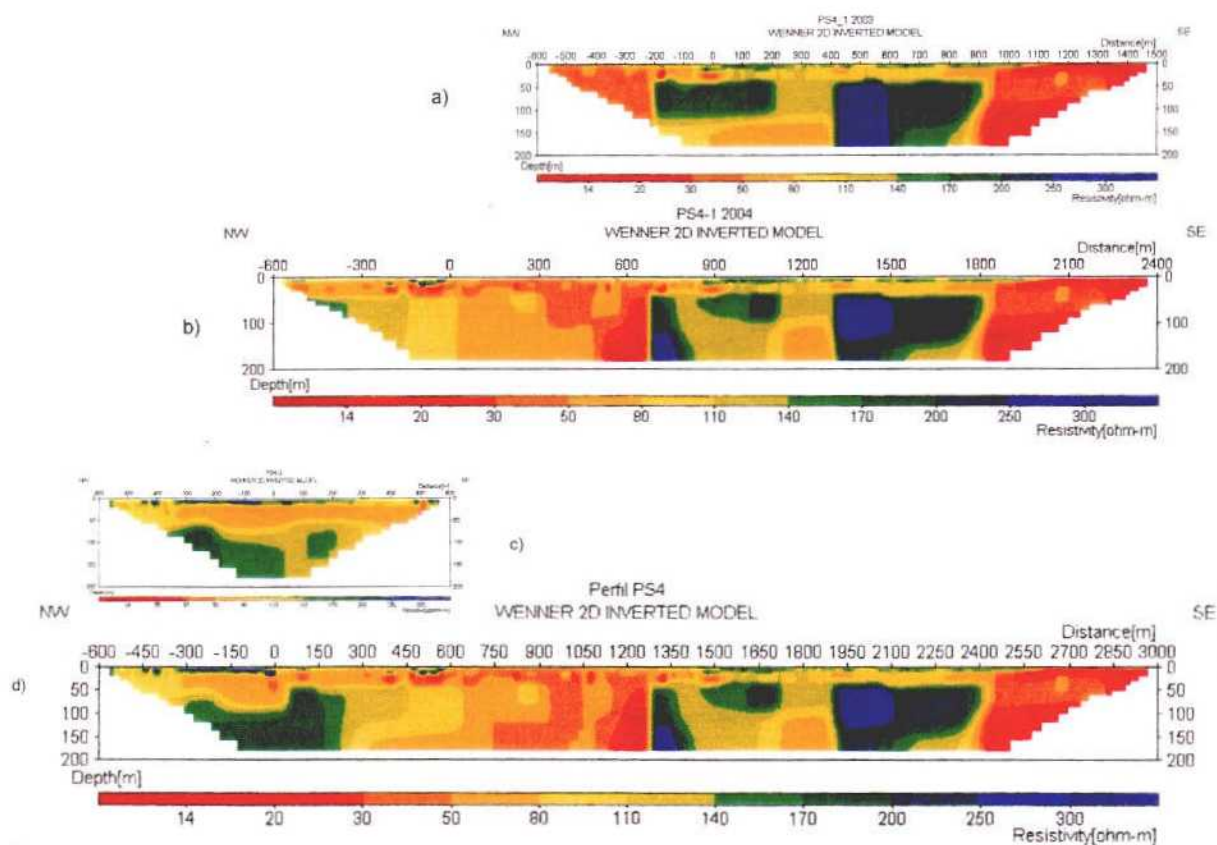


Figura 7.21 Perfil eléctrico PS4 paralelo al río Tordera con dispositivo Wenner. a) perfil 1, medido en 2003. b) perfil 1 unido al perfil 1-2 del cruce del río, medido en 2004. c) perfil 2, medido en 2003. d) perfil total: perfil 1 + unión del río + perfil 2.

Por último, se ha procedido a unir los dos perfiles, el perfil PS4-1 con el tramo del río, y el perfil PS4-2. Esta unión (Figura 7.21-d) ha tenido que realizarse de manera manual, ya que los datos correspondían a dos ficheros diferentes, localizando los puntos de medida común y estableciendo un criterio para la eliminación de uno de ellos.

En la Figura 7.22, se han representado todos los puntos de medida de los perfiles, pero distribuidos por niveles, esto es, puntos con la misma pseudo-profundidad. Los perfiles superiores son los más superficiales, apreciándose los efectos que las heterogeneidades superficiales producen en las medidas, bastante diferentes en ambas campañas, con valores de resistividad más altos en las lecturas del año 2003; a medida, que los niveles son más profundos, los valores de resistividad tienden a igualarse, mostrando una buena continuidad en las lecturas. Para la confección de un fichero común, se han elegido las lecturas del año 2004, por lo que se aprecia en el perfil total, Figura 7.21d, un pequeño salto en los valores de resistividad, más pronunciado en superficie, con respecto a los valores del perfil 2.

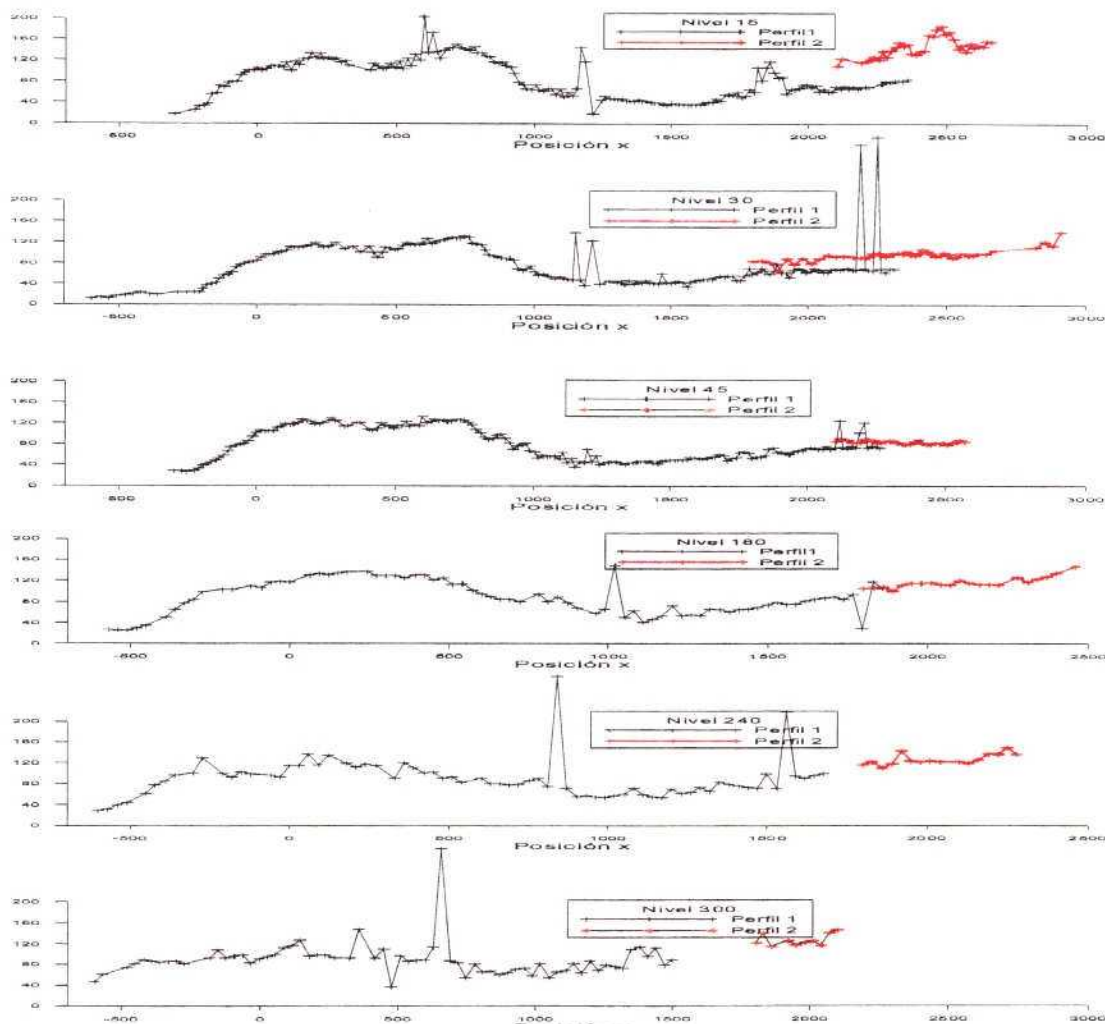


Figura 7.22 Niveles de profundidad, con las medidas de los perfiles 1 Wenner con unión del río (negro) y perfil 2 Wenner (rojo). Los primeros perfiles corresponden a los niveles más superficiales, 15, 30 y 45 m. Los últimos corresponden a los niveles más profundos, 180, 240 y 300 m.

El perfil total PS4 paralelo al río mantiene todas las características ya indicadas en los perfiles parciales anteriores, por lo que en este caso, la unión de los perfiles con medidas tomadas un año después, ha dado buenos resultados.

Comparación del resultado del tramo medido del perfil PS4-1 con dispositivo Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo: además de con la configuración Wenner, el último tramo de 1200 m del perfil PS4-1, se ha medido empleando la configuración Schlumberger y la configuración Dipolo-Dipolo. Todas estas medidas fueron realizadas en el año 2003, y las secciones geoelectricas correspondientes están representadas en la Figura 7.23. Los perfiles medidos con configuración Schlumberger y Dipolo-Dipolo, muestran un aspecto más irregular que el medido con la configuración Wenner, aunque cualitativamente mantienen la misma información. El perfil Dipolo-Dipolo es el más ruidoso de todos; su error de ajuste ha sido 3 veces superior al de las otras configuraciones, y presenta unas características ligeramente diferentes a los anteriores: el resistivo es menos homogéneo y se corta antes hacia el oeste, y el conductor del oeste muestra un tramo con un sustrato más conductor que no se aprecia en las otras configuraciones.

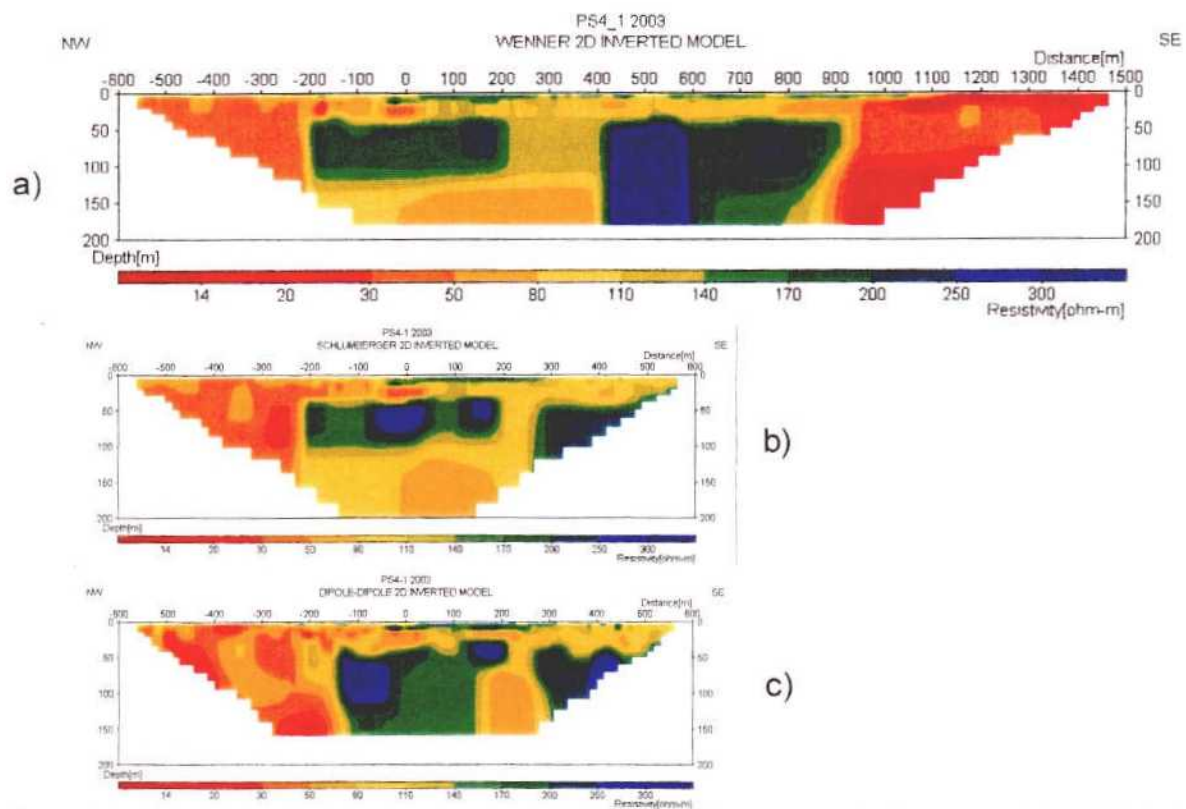


Figura 7.23 Comparación de los resultados de la inversión del tramo común del perfil PS4-1 del año 2003, que fue medido con diferentes configuraciones a) Wenner, b) Schlumberger c) Dipolo-dipolo.

Comparación del perfil PS4-2 Wenner y Schlumberger: una comparación de los resultados de su inversión, puede verse en la Figura 7.24. En la figura se observa, cómo de nuevo la información cualitativa suministrada por las dos configuraciones es la misma, si bien el perfil medido con la configuración Schlumberger, Figura 17.24b, sigue mostrando un aspecto más ruidoso y heterogéneo, con el sustrato resistivo más irregular y presentando unos núcleos más resistivos que no se observan en el perfil medido con la configuración Wenner.

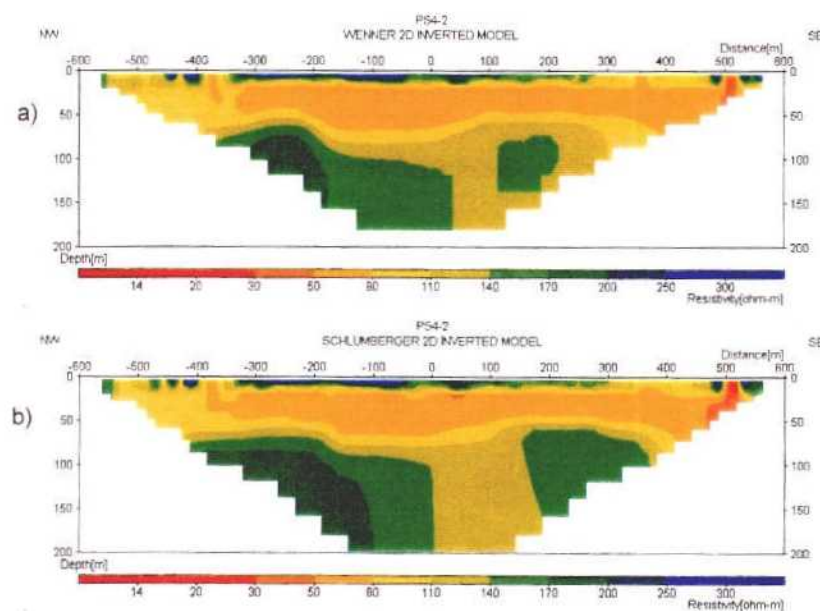


Figura 7.24 Perfil PS4- 2 medido: a) con la configuración Wenner; b) con la configuración Schlumberger

Comparación del perfil PS4-1 total con Wenner y Schlumberger: la unión 1-2 de los dos perfiles ha sido medida con la configuración Schlumberger, Wenner y Dipolo-Dipolo. En la Figura 7.21 ya se mostró el resultado de la unión de los tramos PS4-1, PS4-2 y unión 1-2 con el dispositivo Wenner, habiéndose obtenido también un perfil único mediante unión de todos los tramos con el dispositivo Schlumberger. Se ha realizado un análisis los puntos coincidentes de ambos perfiles, Figura 7.25, que como en el caso anterior ha mostrado mayor diferencia de resistividad en los niveles superficiales, debido posiblemente a la distancia en el tiempo de las medidas, lo que hace que las condiciones de las medidas sean distintas, además de la existencia de heterogeneidades superficiales; de nuevo los niveles más profundos presentan unas resistividades más uniformes. Se ha mantenido el mismo criterio suprimiendo los puntos repetidos medidos en el perfil del año 2003, y se ha confeccionado un perfil único total, que se ha representado en la Figura 7.26 junto con el obtenido con la configuración Wenner.

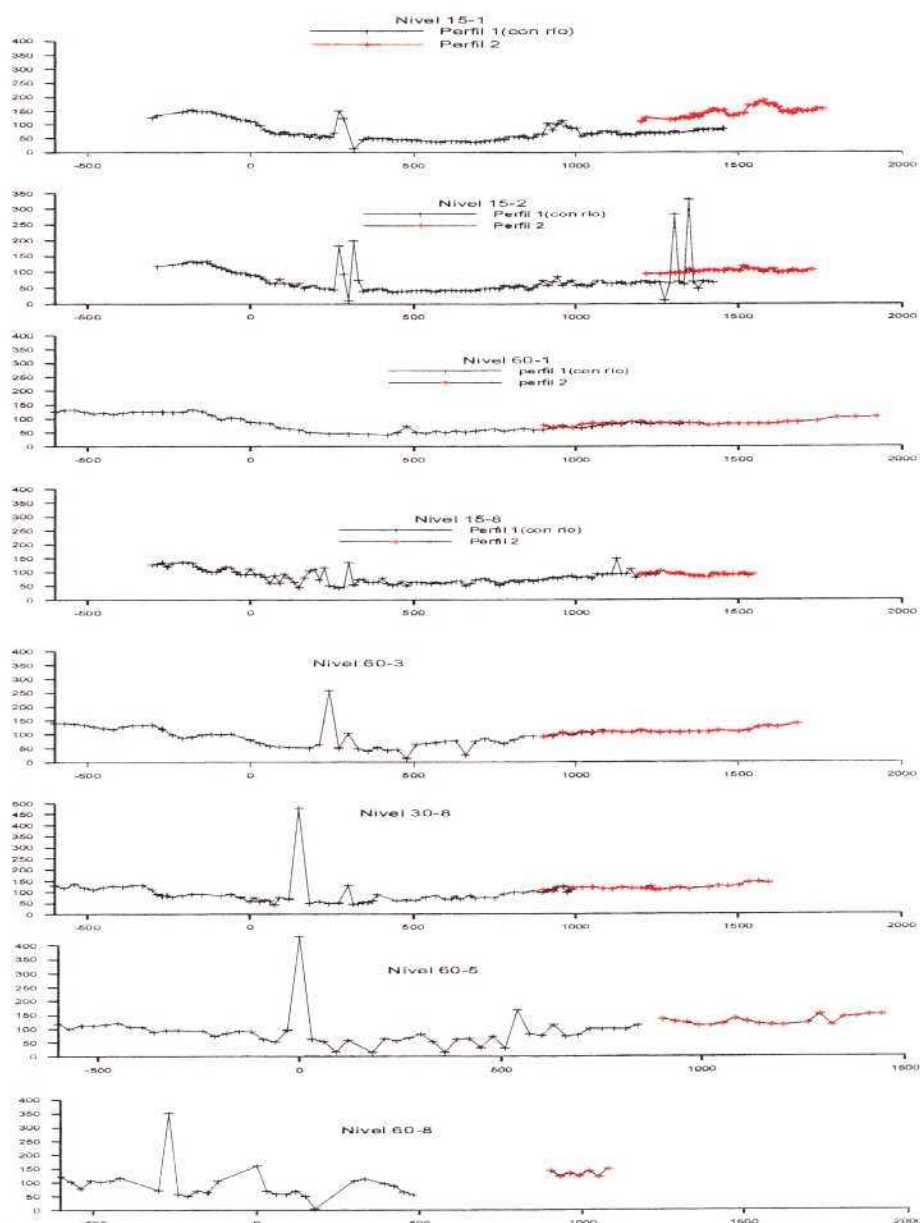


Figura 7.25 Niveles de profundidad, con las medidas de los perfiles 1 con unión del río (negro) y perfil 2 (rojo), medidos con la configuración Schlumberger. Los primeros perfiles corresponden a niveles más superficiales. Los últimos corresponden a los niveles más profundos.

La información suministrada es la misma, aunque más ruidosa en el caso de la configuración Schlumberger. De la observación de los perfiles se puede obtener una idea de la forma de representar las discontinuidades que tienen ambas configuraciones; en el perfil Wenner los cambios horizontales son más suaves y regulares, siendo los cambios laterales de resistividad por saltos netos; en el perfil Schlumberger, los cambios horizontales son también suaves pero más irregulares, los cambios laterales son suaves y presentan una inclinación con la existencia de núcleos resistivos y conductores a ambos lados de la discontinuidad.

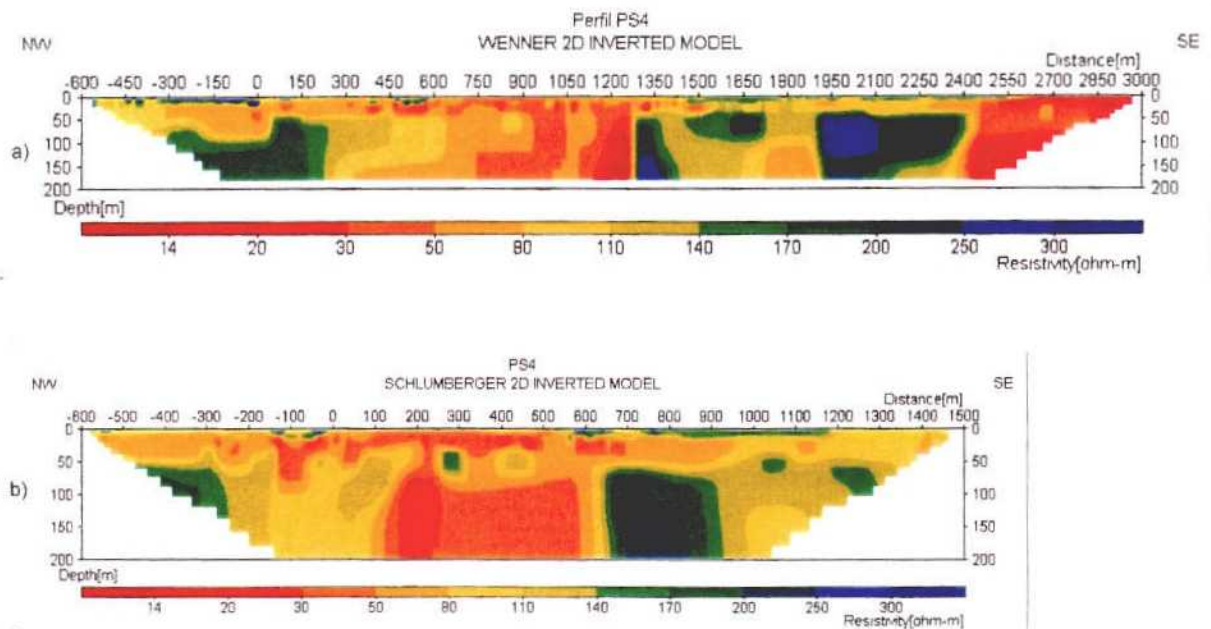


Figura 7.26. Perfil PS4 total a) con configuración Wenner.; b) con configuración Schlumberger

Perfil PS1

Este perfil, se ha realizado paralelo a línea de costa, por tanto perpendicular al río Tordera, y coincidente con el perfil sísmico de alta resolución PS1 (Figura 7.20). El perfil eléctrico tiene una longitud de 1500 m y se midió empleando las configuraciones Wenner y Schlumberger con un espaciado entre electrodos de 15 m.

El proceso seguido en su interpretación ha sido el mismo que el utilizado para el perfil PS4 paralelo al río Tordera, utilizando para la inversión el programa RES2DINV v 3.54.

En la Figura 7.27 pueden observarse las secciones de resistividad resultado de la inversión de este perfil con los dos dispositivos. Como ha sucedido en el perfil PS4, ambos perfiles proporcionan una información muy similar, un poco más ruidosa con la configuración Schlumberger. Se ha mantenido la misma paleta de colores que la empleada en los perfiles PS4, para así poder comparar los valores de resistividad obtenidos en ambas zonas. En el PS1 llama la atención el sustrato conductor existente bajo la cobertera resistiva, de valor similar a la encontrada en el perfil PS4, y más todavía, el sustrato más resistivo que aparece en el perfil medido con la configuración Schlumberger, y que no se observa en el perfil Wenner; es posible que pueda ser debido a una elevación del sustrato, no alcanzado con el perfil Wenner y sí con el Schlumberger, ya que su capacidad de penetración es mayor.

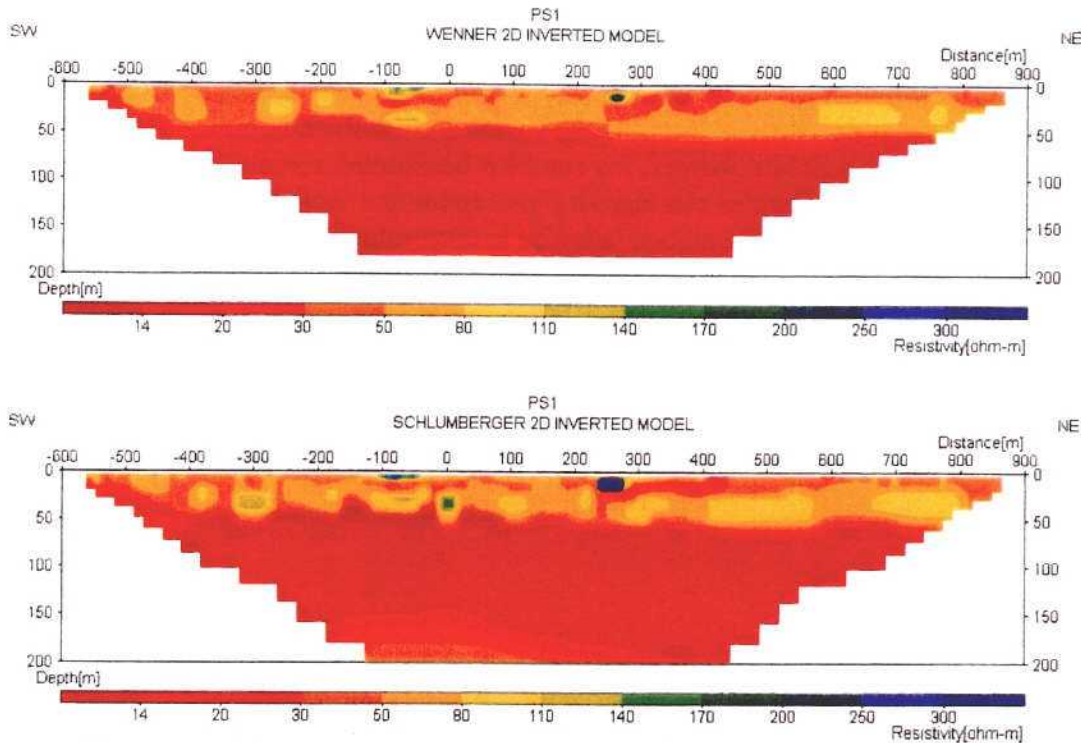


Figura 7.27 Perfil PS1, parte superior con configuración Wenner; parte inferior con configuración Schlumberger.

Perfil de la Playa

Este perfil tiene una longitud de 600 m, y fue realizado empleando una configuración Wenner normal con dos cables y espaciado entre electrodos de 15 m.

El resultado de la inversión de este perfil se representa en la Figura 7.28, en la que se ha modificado la paleta de colores con respecto a los perfiles anteriores debido a los bajos valores de resistividad medidos en esta zona. En el perfil se aprecia la existencia de un nivel resistivo superficial bajo el que se encuentra un nivel conductor a lo largo de todo el perfil. Entre los metros -100 y -200 al suroeste del centro del perfil, existe una zona de elevación de las capas, con un sustrato más resistivo y el tramo conductor aflorante. Los resultados de este perfil han mostrado una gradación de valores de resistividad, diferenciando tramos presumiblemente con mayor salinidad debido posiblemente a encontrarse junto al agua de mar.

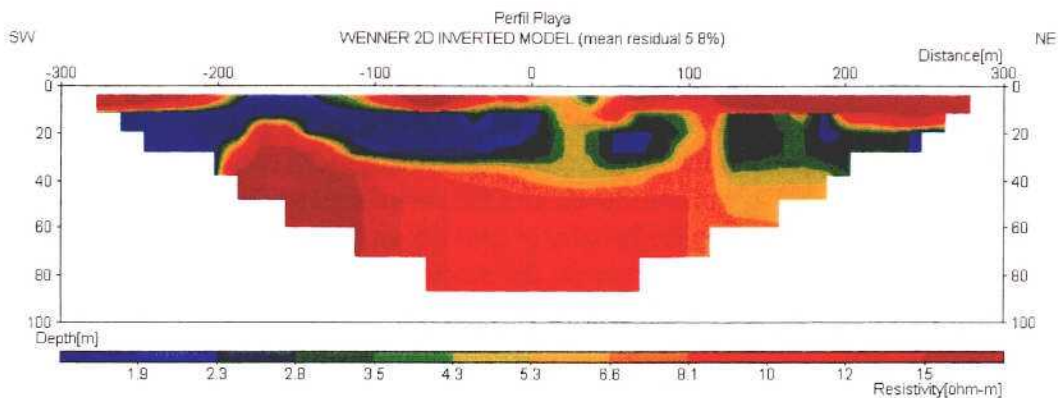


Figura 7.28. Perfil Wenner realizado junto a la Playa.

7.4 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO DE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS

En la secuencia hasta ahora descrita de las campañas de validación experimental de la metodología efectuadas en río Tordera, se ha puesto de manifiesto uno de los posibles casos de indefinición en la resolución y penetración de la tomografía eléctrica por corriente continua a que hicimos mención en la definición y encuadre del presente Proyecto. Entonces se mencionó, como uno de los principales problemas metodológicos que no han sido todavía plenamente resueltos, la optimización en el diseño de los dispositivos de medida, de acuerdo con las profundidades y resolución requeridas en cada caso, lo que va unido a las características y prestaciones de cada método e instrumentación disponible.

Dado de que en esta zona del río Tordera se disponía con anterioridad de información geoelectrica obtenida por métodos de corriente continua (SEV), el primer planteamiento fue efectuar nuevas mediciones también de corriente continua, pero con un método de mayor detalle y resolución: los Perfiles de Resistividad. Su diseño (ver párrafo 7.3.2) fue efectuado en función de los datos previos conocidos, y, en particular, de las líneas de sísmica de reflexión existentes. Sin embargo, los perfiles de resistividad obtenidos, no llegan a detectar la existencia del granito a la profundidad esperada, por lo que habría que utilizar métodos más penetrativos. Ante la indefinición encontrada, se ha considerado necesario completar el abanico de posibilidades a nuestro alcance mediante la toma de mediciones con métodos electromagnéticos, a fin de conseguir mediciones de mayor penetración que los perfiles de resistividad.

Por otra parte, debido a fenómenos físicos intrínsecos al tipo de corriente eléctrica utilizada, a la forma de introducirla en el terreno, a la frecuencia utilizada, a las dimensiones de los dispositivos de campo, etc., los resultados obtenidos por diversos sistemas de prospección geoelectrica no son siempre directamente comparables, habiéndose esto puesto de manifiesto al interpretar conjuntamente los Perfiles de Resistividad, y las mediciones Magnetotelúricas.

En consonancia con ello, y teniendo en cuenta que dentro de la **validación experimental de la metodología desarrollada**, se consideró que en su aplicación a los acuíferos escogidos como zonas de ensayo se realizarían campañas geofísicas específicas para la adquisición de nuevos datos, con diferente instrumentación y dispositivos tomográficos, utilizando para ello tanto instrumentación propia, como asistencias técnicas, y dado que ninguno de los equipos participantes dispone de la instrumentación necesaria para este tipo de mediciones, se ha procedido a su contratación, haciendo uso de los medios financieros disponibles a partir de los proyectos **REN2002-04538-C02-02**, del PLAN NACIONAL DE I+D+I 2000-2003, y Proyecto **IGME-2003/17**.

7.4.1 Aspectos metodológicos e instrumentales

El método de Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempo (SEDT) se basa en introducir corriente en el subsuelo mediante inducción, utilizando para ello un bucle emisor unido a un transmisor, recibiendo el campo electromagnético secundario generado en el terreno en una bobina receptora, unida a un equipo receptor.

Los parámetros a decidir antes de cada medición son los siguientes:

- dimensiones y/o número de vueltas del bucle emisor. (la intensidad de corriente suele estar limitada por el equipo disponible)
- tiempo de corte de la corriente emisora, o frecuencia de emisión
- ganancia (suele adaptarse automáticamente según el tipo de instrumentación)

La corriente que se inyecta en el bucle es una corriente en forma de ciclo de onda cuadrada, alternando la polaridad. La duración de cada ciclo define la denominada frecuencia de emisión. Las medidas en el receptor se realizan durante el tiempo en que no se está inyectando corriente, y una vez finalizado el decaimiento de la corriente emisora o rampa (Figura 7.29), de forma que sólo están presentes los campos secundarios. Normalmente los intervalos de tiempo de caída en que no se inyecta corriente varían desde 30 microsegundos a cientos de milisegundos para exploraciones profundas, especificándose por la llamada frecuencia de emisión (esta frecuencia, que se refiere a la de los ciclos de introducción de la corriente, no tiene por lo tanto el mismo significado que en el método electromagnético en el dominio de las frecuencias u otros métodos electromagnéticos). No obstante, la frecuencia baja significa que se dispone de más tiempo para medir el transitorio, por lo que la información puede provenir de mayor profundidad, estando también más contaminada por el ruido, al ser la señal de menor amplitud.

Es fundamental sincronizar el transmisor y el receptor, para realmente medir sólo en los intervalos de tiempo en que no se está inyectando corriente en el bucle. En cada medición se efectúa la adición o stacking de la señal medida para varios ciclos de emisión. Además, como control de calidad, cada medida completa es repetida dos o tres veces, para obtener una estimación del rango de repetibilidad, ya que las lecturas deben ser coincidentes en ausencia de ruido.

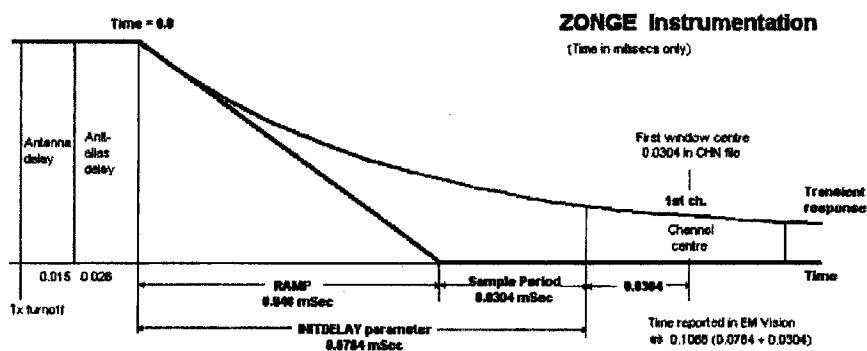


Figura 7.29 Esquema del sistema de ventanas de medición.

La curva de decaimiento o transitorio medido en la bobina receptora se muestrea a intervalos regulares o ventanas.

La penetración del método depende de la intensidad del campo emisor y de la resistividad del terreno, siendo mayor en rocas resistivas, donde la inducción electromagnética queda menos amortiguada. La intensidad de emisión puede gobernarse con las dimensiones del bucle, el número de vueltas del cable emisor y la intensidad de corriente aplicada. El nivel de ruido ambiental es, sin embargo, un factor limitativo de la penetración, ya que las últimas ventanas de lectura, que contienen la información de mayor profundidad, son las de menor amplitud y por tanto las más fácilmente contaminadas por la presencia de ruido. La existencia de

materiales muy conductores próximos a la superficie, limita también la penetración del método.

El resultado de la medición es la curva del transitorio o f.e.m. inducida en la bobina receptora en función del tiempo, en la que las repeticiones efectuadas permiten estimar su calidad. Mediante inversión, dicho transitorio se convierte en una curva de la variación de la resistividad con la profundidad. (Figura 7.30)

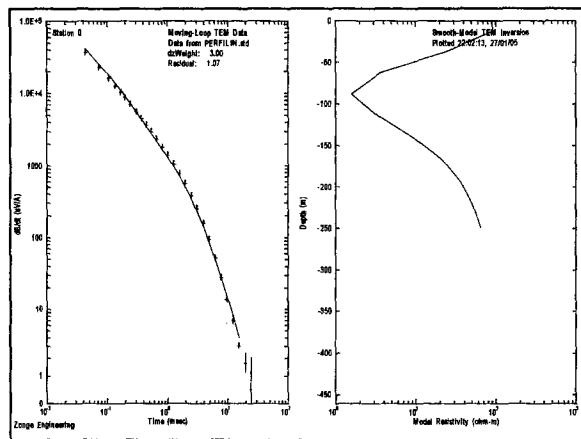


Figura 7.30 Ejemplo de curva de decaimiento o transitorio obtenido en la medición de un SEDT y su interpretación. Los segmentos en color rojo indican los rangos de variación en las sucesivas repeticiones de la medición.

Las medidas se pueden hacer dentro y fuera del bucle, lo que aporta información sobre la posición relativa de las estructuras sujetas a estudio respecto al bucle. Esto se debe a que la medida depende del acoplamiento de las estructuras con la posición del bucle emisor y de la antena receptora. En caso de geologías horizontales o sub-horizontales no debe haber diferencia entre las formas de las curvas de decaimiento medidas dentro y fuera del bucle, pero en caso de geologías verticales o sub-verticales, dentro del bucle puede haber un mal acoplamiento, por lo que el campo secundario medido será de muy baja intensidad, y no ocurriría lo mismo fuera de bucle (Figuras 7.31 y 7.32).

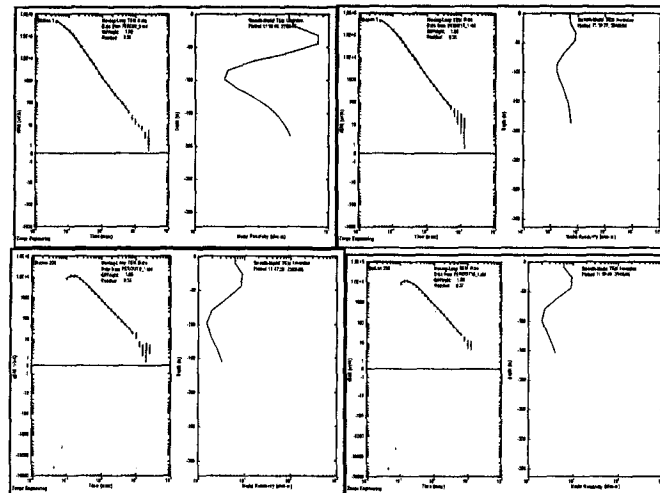


Fig. 7.31 Ejemplo de efecto dentro y fuera del bucle cuando no hay cambios laterales: estación 1 PS4. correspondiente a la 2 de fuera. Parte superior, lecturas efectuadas dentro del bucle con 8 Hz y 16 Hz. Parte inferior, lecturas realizadas fuera del bucle con 8 y 16 Hz

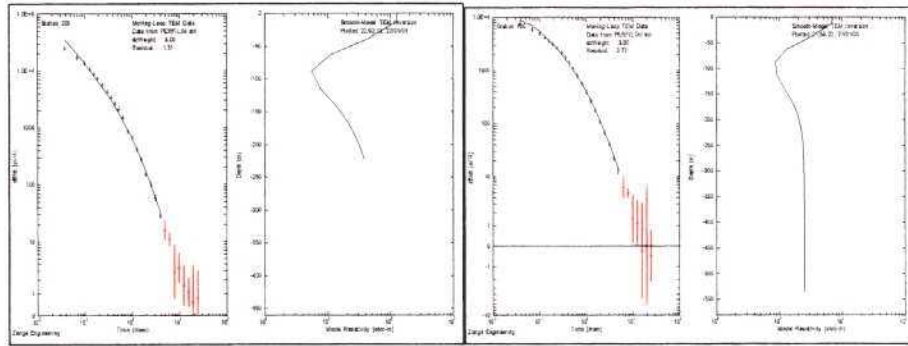


Figura 7.32 Ejemplo cuando hay cambios laterales: derecha estación 100 de PSI efectuada fuera del bucle; izquierda, estación correspondiente (nº 200) efectuada, ambas a 8 Hz.

La topografía del terreno, si es abrupta, puede afectar negativamente a las medidas, ya que se asume que el bucle transmisor y la antena receptora se sitúan sobre superficies paralelas. La topografía llana existente en la zona del Tordera elimina este tipo de problemas.

Al realizar varios Sondeos Electromagnéticos según una alineación, puede formarse una sección de resistividad del subsuelo con la inversión de cada uno de los SEDT.

La instrumentación utilizada ha sido de la marca Zonge (Figura 7.33), con receptor **GDP-32**, transmisor **ZT-30** y antena receptora **TEM-3**. Como bucle emisor se ha utilizado cable de 3 mm de sección.

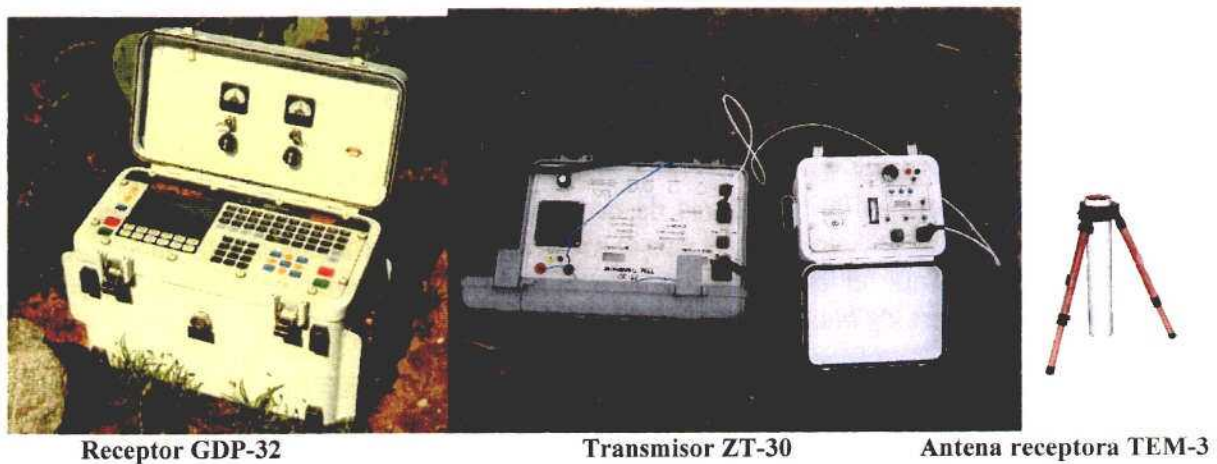


Figura 7.33 Instrumentación ZONGE para medición de SEDT

7.4.2 Diseño y ejecución de las campañas de campo

La toma de datos se ha llevado a cabo en dos periodos: 13-17 de diciembre de 2004, y 7-11 de junio de 2005. Las campañas han sido efectuadas por la compañía de servicios geofísicos GEOGNOSIA S.L., con la colaboración y participación de la Universidad de Castilla La Mancha, y bajo la dirección técnica del equipo de este Proyecto. Se ha seleccionado para efectuar las mediciones las alineaciones utilizadas por los Perfiles de Resistividad, en coincidencia con los perfiles Sísmicos de reflexión PS1 y PS4 (Figura 7.20).

El trabajo desarrollado consta de las siguientes fases:

1.- Determinación de los parámetros a utilizar: definición del tamaño del bucle, la intensidad de corriente, frecuencia, etc., para conseguir una penetración suficiente para llegar al basamento granítico sin alteración, situado, según los datos sísmicos, entre 100 y 150 metros en la zona del perfil PS1, y más somero en la del PS4.

2.- Medición a lo de los perfiles: de tal forma que las posiciones de los centros de los sucesivos bucles de emisión se han situado a una distancia del orden del lado del bucle empleado, con algunas variaciones debidas a evitar ruidos por causa de alambradas, líneas eléctricas, casas o por existir zonas de cultivo que pudieran estropearse por el paso. Las mediciones respecto al bucle emisor se han hecho en dos posiciones por bucle, en el centro del mismo y a 50 ó 100 metros del centro en la dirección longitudinal del perfil.

3.- Proceso, análisis e inversión de los datos, formando la sección geoelectrica con mayor significado geológico para el objetivo de la investigación.

Todas las medidas están identificadas con un número de estación, y con sus coordenadas X e Y en UTM Huso 30, Datum ED50, medidas en campo con un receptor **GPS GARMIN 72**.

En total se tomaron 109 medidas, con una producción media de 10 mediciones por día, aunque varias de las realizadas para determinación de parámetros pertenecen a la misma estación, modificando la frecuencia o/y número de vueltas del bucle emisor:

- determinación de parámetros para el Perfil PS1: 4 mediciones con bucle de dimensiones 50mx50m, y una con 100x100m, en una estación.
- determinación de parámetros para el Perfil PS4: 13 mediciones con bucle de dimensiones 50mx50m, y 7 con 100x100m, en 11 estaciones.
- mediciones del perfil PS1: 15 posiciones dentro del bucle de dimensiones 100mx100m, y 13 posiciones fuera del bucle.
- mediciones del perfil PS4: 30 posiciones dentro del bucle de dimensiones 70mx70m y 26 posiciones fuera del bucle.

En su conjunto, por lo tanto, 25 mediciones se han dedicado a la optimización de los parámetros de toma de medidas, y en los perfiles se han efectuado un total de 45 medidas en los centros de los bucles y 39 fuera, para control de las estructuras. Estos datos dan una idea del carácter especial que se ha dado a estas campañas, al encontrarse efectuadas dentro del contexto de un proyecto de investigación metodológica.

Las mediciones se han efectuado con 256 ciclos para una frecuencia de emisión 8Hz y 128 ciclos para 4Hz. Como control de calidad, se han medido en todas las estaciones por lo menos

3 repeticiones. El que las repeticiones sean o no similares ayuda a rechazar las ventanas de tiempos que no tengan la calidad suficiente.

Los ficheros de datos tomados en este trabajo se presentan en cuatro formatos:

- los datos del volcado directo del receptor al ordenador,
- formatos del pre-procesado con el software de Zonge, con extensiones **z** (formato aceptado por el software de la casa Interpex),
- y **fld** (formato estándar de los equipos de Zonge, que contiene toda la información de los datos volcados)
- **tem** (formato compatible con las bases de datos del IGME).

La explicación de los formatos y de los parámetros que se incluyen en los ficheros se encuentra en el ANEXO F, en donde puede encontrarse una descripción detallada de los trabajos llevados a cabo, que se resumen en los siguientes epígrafes.

Determinación de los parámetros de medición

Se han llevado a cabo mediciones especialmente dedicadas a la determinación de los parámetros con los que efectuar los registros a lo largo de los perfiles, teniendo en cuenta la profundidad de penetración requerida, la resolución de los datos, y la operatividad en el campo.

En parte del **perfil PS1**, paralelo a la línea de costa, existen estructuras metálicas o líneas eléctricas que pueden introducir ruido electromagnético. Para definir los parámetros de adquisición se eligió la estación número 900 (con coordenadas del centro del bucle 480415 y 4611270, Figura 7.34, del perfil PS1, por la ausencia de estructuras próximas.

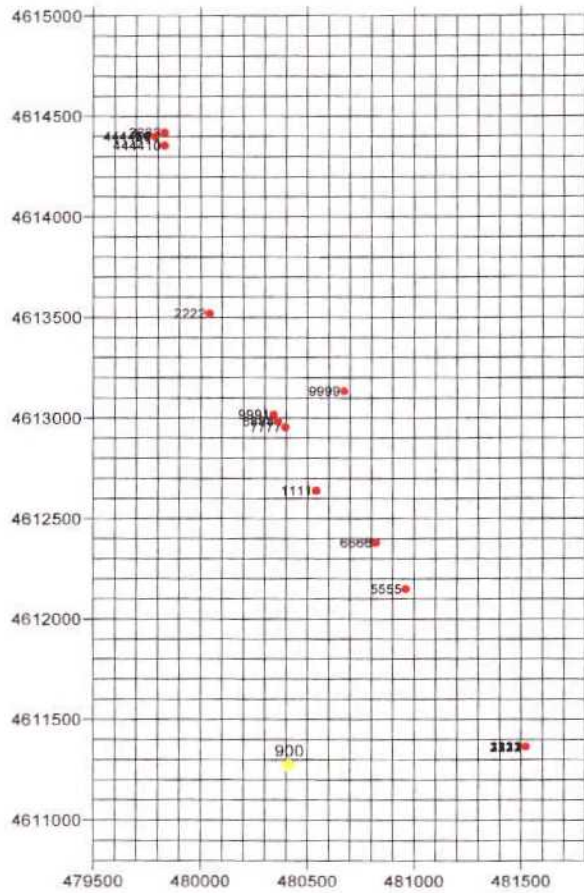
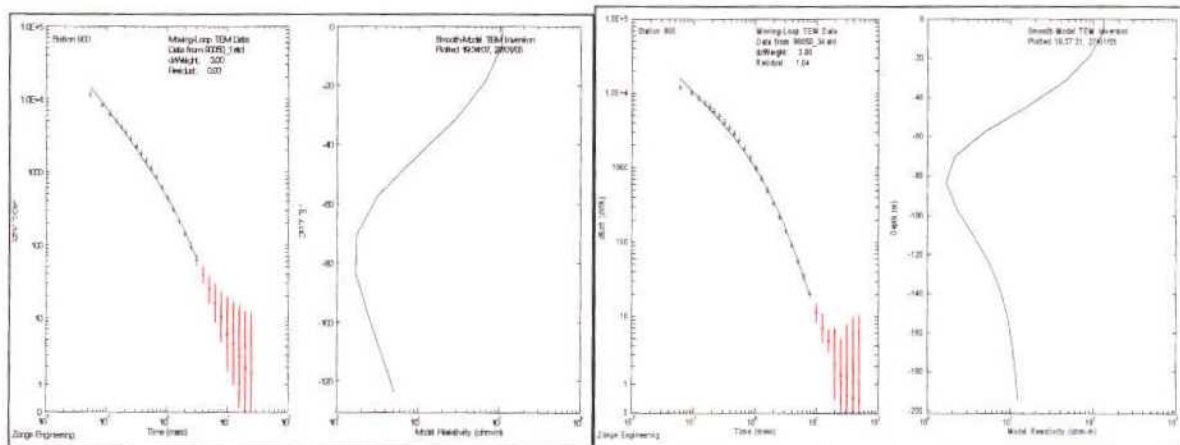


Figura 7.34 Estaciones donde se han efectuado las pruebas para determinación de los parámetros de adquisición. Amarillo, perfil PS1; rojo, perfil PS4.

Dado que el basamento granítico sin alterar se esperaba entre 100 y 150 metros de profundidad, se comenzó midiendo con un bucle de 50mx50m, con 1 vuelta de cable y los siguientes los parámetros indicados en la parte izquierda de la Figura 7.35:

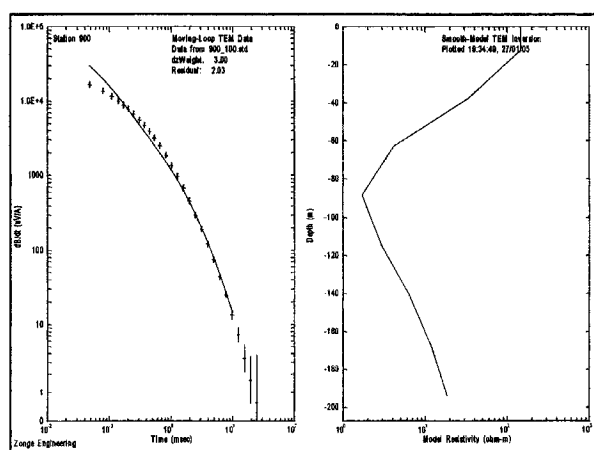


Bucle 50x50 m, 1 vuelta
 Intensidad de corriente: 4.6 A
 Rampa de Caída: 120 us
 Ganancia: 050o (definición de Zonge)
 Frecuencia de emisión: 8Hz

50x50 m, 3 vueltas
 6.6 A
 290 us
 040o
 4Hz

Figura 7.35 Determinación de parámetros de adquisición en el perfil PS1

A la vista de la curva de caída y la resistividad calculada a través de un modelo de inversión suavizado, se puede comprobar que con suficiente calidad de datos (las medidas en rojo son las que tienen error en las diferentes repeticiones que se han tomado) sólo se llega a 120 metros de profundidad, no encontrando un resistivo que indique la presencia del basamento. En consecuencia, para aumentar la calidad de los datos sin aumentar el tamaño del bucle (para evitar lo más posible estructuras a lo largo del perfil que pudieran introducir ruido electromagnético) se tomaron unas cuantas medidas con el mismo tamaño de bucle emisor pero dando 2 y 3 vueltas de cable al bucle, probando con frecuencias de 8 y de 4 Hz. Con el último de estos dispositivos (parte derecha de la Figura 7.35) se consiguió aumentar la profundidad de investigación hasta unos 200 metros, y aunque sin ver aún claramente el basamento resistivo, empieza una tendencia al aumento de la resistividad con la profundidad. Las curvas de caída para las frecuencias de emisión de 8Hz y 4Hz son muy similares, dando esta última información de tres ventanas más para los últimos tiempos, pero no aportan nueva información ya que la repetibilidad de las medidas no es buena en las últimas ventanas. Se procedió, por lo tanto, a variar a un bucle de 100x100 m, con los resultados indicados en la Figura 7.36:



**Estación 900 con un bucle de 100mx100m con 1 vuelta de cable:
Intensidad de corriente: 6.1 A Rampa de Caída: 155 usg
Ganancia: 020o (según definición de Zonge)
Frecuencia de emisión: 8Hz**

Figura 7.36 Determinación de parámetros de adquisición en el perfil PS1

En estas curvas es ya visible un aumento de la resistividad a unos 200 metros de profundidad. Aunque el valor de 10 Ohm-m no es asignable al granito, hay que tener en cuenta que es un modelo de inversión suavizado, siendo más importante la tendencia cualitativa que el valor numérico.

Después de analizar cada configuración utilizada (50x50 1v 8Hz, 50x50 2v 8 Hz, 50x50 3v 8 Hz, 50x50 3v 4Hz, y 100x100 1v 8 Hz), se ha optado por seleccionar como tamaño de bucle para efectuar el perfil PS1 100mx100m, con frecuencia de emisión 8 Hz (por lo tanto 256 ciclos de tiempo de muestreo) y con una sola vuelta de cable al bucle. Para evitar el problema de las estructuras causantes de ruido en el resto del perfil se desplazaron los bucles de su posición original lo mínimo posible en cada caso. En sólo una medida se tuvo que variar la dimensión del bucle pasando a ser 100mx80m, por proximidad a la valla de un Camping.

En el **perfil PS4**, que sigue el curso del río Tordera durante unos 1960 metros de longitud, según la información previa disponible, el granito se localiza a menor profundidad que sobre

el perfil PS1, por lo que, en principio sería suficiente con utilizar bucles de 50x50 m. Sin embargo, en todo este perfil PS4 existen estructuras que pueden introducir ruido, por ejemplo hay dos líneas eléctricas paralelas al perfil. Se tiene por lo tanto que llegar a un compromiso entre tener suficiente señal, para lo que se necesitaría un bucle grande, y minimizar al máximo el ruido externo, por lo que se necesitaría un bucle más pequeño. Existen también razones de operatividad en la selección de las dimensiones del bucle emisor, ya que en ciertas zonas del perfil PS4 el margen del río se estrecha y es imposible posicionar bucles de 100mx100m.

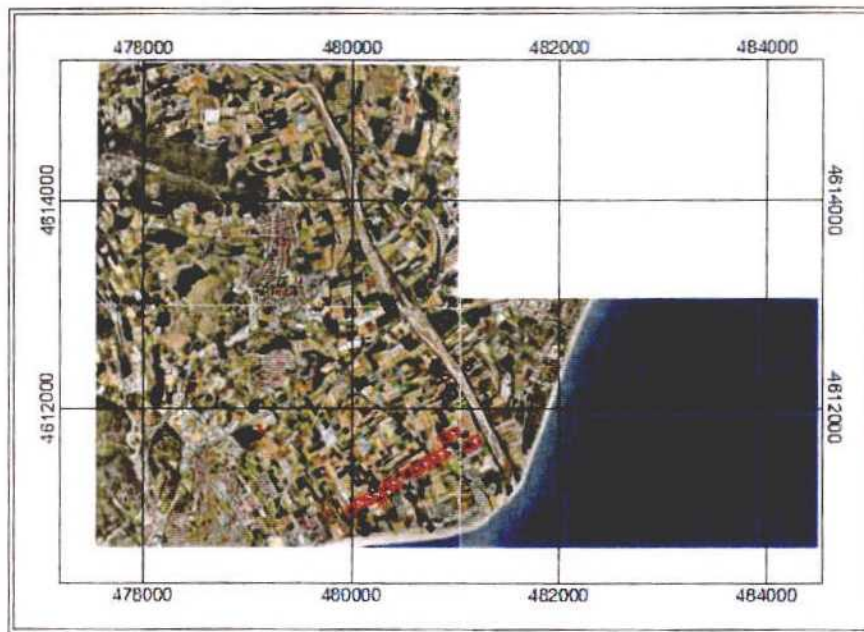


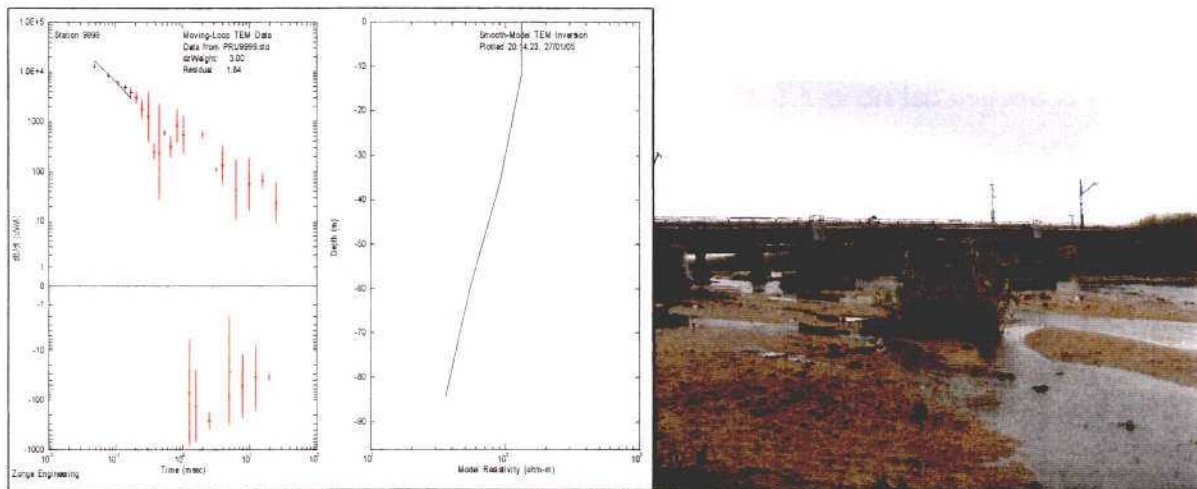
Figura 7.37 Posición de las estaciones donde se han efectuado las pruebas para el Perfil PS4 en los sectores central y norte.

Se han realizado mediciones fundamentalmente en los sectores central y norte del perfil (Figuras 7.34 y 7.37), ya que la zona Sur, por su proximidad al perfil PS1 es mejor conocida por las pruebas anteriores. Se intentó buscar posiciones para las estaciones de prueba en las que el Río Tordera no llevara demasiada agua, ya que en el momento en el que se realizó la campaña el río iba muy crecido (Figura 7.38).



Fig. 7.38 Vista del Río Tordera durante el tiempo de la campaña de campo

La primera estación de prueba es la estación número 9999, en el centro- norte del Perfil, se efectuó con los parámetros indicados en la Figura 7.39:

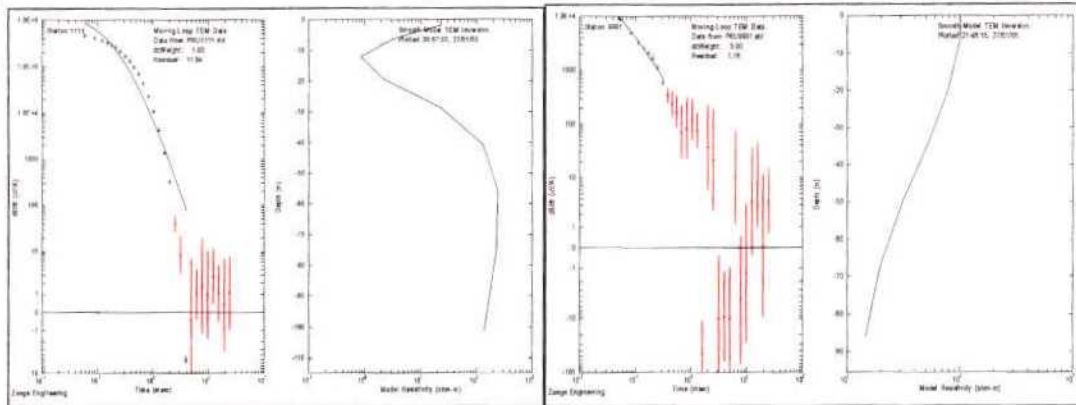


Dimensiones del bucle:	100mx90m
Vueltas del cable:	1
Intensidad de corriente:	6.1
Rampa de caída:	155
Frecuencia de emisión:	8Hz
Ganancia:	030o (según definición de Zonge)
Coordenada X del centro:	480340
Coordenada Y del centro:	4613020

Posición de la estación 9999

Figura 7.39 Determinación de parámetros de adquisición en el perfil PS4

Sólo las cinco primeras ventanas de tiempos no tienen error; según el modelo calculado la información obtenida no pasa de unos 80 metros, y no aparecen valores resistivos. La posición que se eligió para esta medida está muy cerca de varias líneas eléctricas, de una vía del tren, de una desalinizadora, y con la posibilidad, conocida a posteriori, de que hubiera grandes tuberías metálicas enterradas. Es, de todas formas, un ejemplo de las limitaciones ambientales al empleo de los métodos electromagnéticos, y de las dificultades logísticas para la obtención de mediciones aceptables. Así, enfrente de esta estación, pero al otro lado del río, un poco más cerca de la desembocadura (estaciones 1111 y 9991), se midió con mucho menos ruido (Figura 7.40):

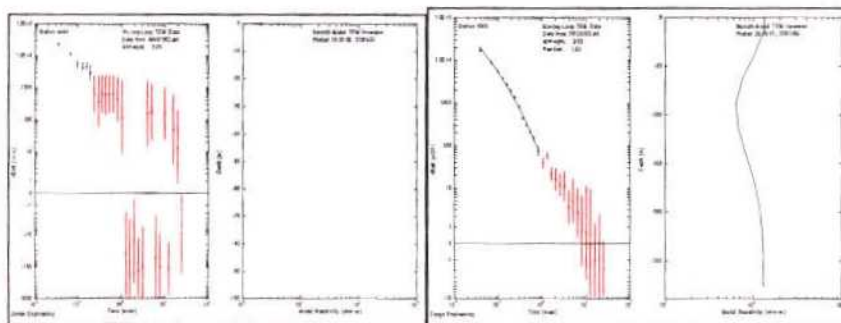


estación de prueba, número 1111		9991:	
Dimensiones del bucle:	50mx50m	50mx50m	
Vueltas del cable:	3	1	
Intensidad de corriente:	6.3	4.8	
Rampa de caída:	175	120	
Frecuencia de emisión:	8Hz	8 Hz	
Ganancia:	000o	050o	
Coordenada X del centro:	480540	480340	
Coordenada Y del centro:	4612640	4613020	

Figura 7.40 Determinación de parámetros de adquisición en el perfil PS4

Aunque el efecto de ruido ambiental es menos pernicioso en estas dos estaciones, las lecturas no son lo suficientemente limpias para poder detectar la profundidad a la que se encuentra el basamento, que puede estimarse en unos 30 metros de profundidad para la 1111 y unos 80 metros en la 9991, ya que la curva de caída cambia de pendiente un poco antes de entrar en ruido.

Se fueron así realizando mediciones hacia el Norte del Perfil PS4, según se indica en la Figura 7.34 en las estaciones 2222, 3333 y 4444 (todos los resultados pueden consultarse en el ANEXO F, insistiendo en algunos casos con bucles de 100x100 y 2 o 3 vueltas de cable, no obteniendo datos válidos nada más que para las tres o cuatro primeras ventanas, debido al exceso de ruido ambiental. Un ejemplo es la realizada en la estación 4444 (Figura 7.41).



estación 4444		estación 5555	
Dimensiones del bucle:	100mx100m	100mx100m	
Vueltas del cable:	2	1	
Intensidad de corriente:	5	6.5	
Rampa de caída:	230	165	
Frecuencia de emisión:	8Hz	8Hz	

Figura 7.41 Determinación de parámetros de adquisición en el perfil PS4

Estas mediciones de prueba ponen de manifiesto el alto ruido electromagnético existente en este perfil desde el primer puente, cercano a la desaladora, hasta el extremo norte. Sólo una estación se ha podido medir sin mucho ruido, la estación número 9991.

En la porción central-sur del perfil (estaciones 5555 y 6666) se obtuvieron resultados algo mejores, como se muestra para la estación 5555 (Figura 7.41), en la que tras una capa resistiva hasta los 20 metros de profundidad, con valores cercanos a 100 Ohm-m, aunque la profundidad puede ser menor si se tiene en cuenta que el tipo de modelo está suavizado, se observa una capa más conductora que finaliza en una tendencia a aumentar la resistividad cerca de los 100 metros. En la estación 6666, se aprecia un claro aumento de resistividad a 80 metros de profundidad. Para que esta interpretación pudiera ser congruente con los sondeos, se precisaría que el granito estuviera estratificado horizontalmente con diferentes grados de alteración. Según la información de los sondeos cercanos, el piezómetro de laboratorio Fehr corta granito a los 42 m, y al otro lado del río, el sondeo C32, de sólo 14 metros no corta el granito. Las estaciones 1111, 5555 y 6666, que están desde el primer puente hacia la costa, son lo suficientemente limpias para poder deducir que el basamento no se encuentra a tanta profundidad como en el perfil PS1.

En el extremo Sur del perfil se ha efectuado una medición de prueba en el punto de coordenadas X: 481520 e Y: 4611365 (Figura 7.42).

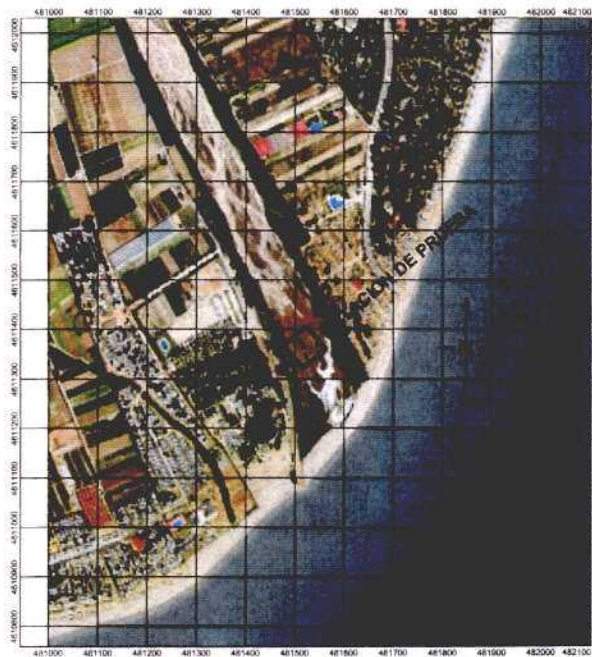
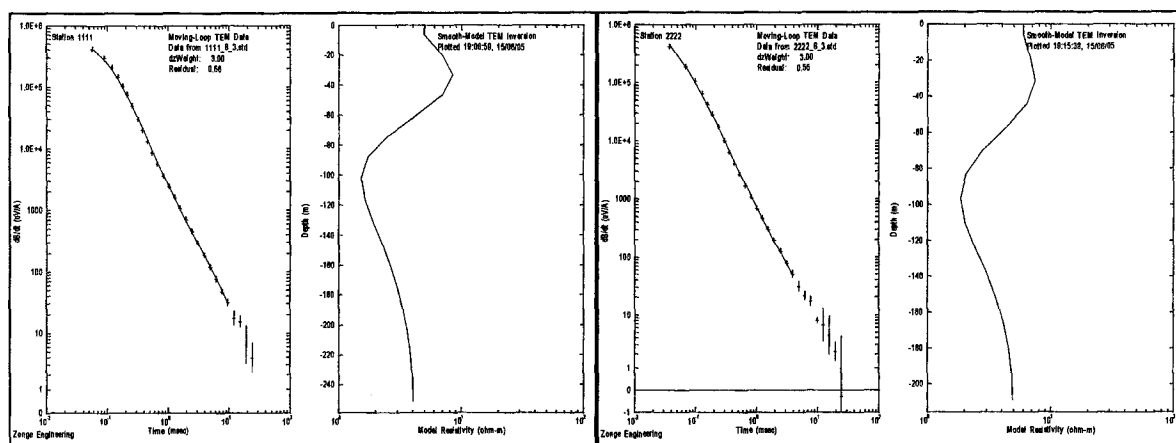


Figura 7.42 Posición de la estación de prueba en el Sur del PS4.

Se efectuaron mediciones con bucles de 100x100 m, una vuelta de cable y frecuencias de 8 y 16 Hz, así como con bucle de 50x50 m, 1 y 2 vueltas de cable y ambas frecuencias (Figura 7.43).



Estación Sur1111n con un bucle de 100mx100m

con 1 vuelta de cable:

Intensidad de corriente: 6 A

Rampa de Caída: 85 us

Ganancia: 000o

Frecuencia de emisión: 8Hz

Estación Sur1111n con un bucle de 50mx50m

con 1 vuelta de cable:

10 A

105 us

000o

8Hz

Figura 7.43 Determinación de parámetros de adquisición en el perfil PS4

Para el bucle mayor, en la curva de caída y en la resistividad calculada a través de un modelo de inversión suavizado, se comprueba que con suficiente calidad de datos se llega a 240 metros de profundidad y se pueden definir 3 capas, con tendencia al aumento de la resistividad al final de los datos. Utilizando 16 Hz, la penetración es algo inferior, aunque puede obtenerse prácticamente a la misma información. Con el bucle de 50x50 m, la información obtenida es la misma que en la medida anterior, llegándose hasta 200 metros, con resultados equivalentes para 16 Hz. Utilizando 2 vueltas de cable la información es también equivalente. La medida con mayor calidad de datos y que llega a mayor profundidad es la tomada utilizando como bucle transmisor el de 100mx100m con una vuelta. El resto de medidas confirman la información obtenida con este bucle, sin que varíe apreciablemente la información si utilizando frecuencias de emisión de 8Hz o 16Hz.

En resumen, se han efectuado 11 estaciones de prueba a lo largo de este perfil:

9999 100x90 1v 8 Hz
 1111 50x50 3v 8 Hz
 2222 50x50 1v 8 Hz
 3333 50x50 1v 8 Hz
 4444 50x50 1v 8 Hz
 4444 50x50 2v 8 Hz
 4444 50x50 3v 8 Hz
 4444 100x100 1v 8 Hz
 4444 100x100 2v 8 Hz
 5555 100x100 1v 8 Hz

6666 100x100 1v 8 Hz
 7777 50x50 1v 8 Hz
 8888 50x50 1v 8 Hz
 9991 50x50 1v 8 Hz
 1111n 100x100 1v 8 Hz
 1111n 100x100 1v 16 Hz
 1111n 50x50 1v 8 Hz
 1111n 50x50 1v 16 Hz
 1111n 50x50 2v 8 Hz
 1111n 50x50 2v 16 Hz

Como resultado de todas estas pruebas en el perfil PS4, con bucles de 100x100, 50x50, una a tres vueltas de cable, y frecuencias de 8 Hz y 16 Hz, y teniendo en cuenta los condicionantes logísticos de este perfil, aunque la profundidad de investigación requerida en este perfil sea menor que en el PS1, se ha optado por utilizar un bucle transmisor de 70mx70m, con ambas frecuencias, para poder intentar discriminar el ruido externo, y efectuar las mediciones lo más cerca posible del cauce del río, a fin de que estén menos afectadas por las carreteras, líneas eléctricas y otras instalaciones. Sin embargo, el efecto negativo de posibles tuberías enterradas que crucen el cauce no es previsible hasta el momento de efectuar las mediciones.

Medición a lo largo de los perfiles

El perfil PS1, localizado perpendicular al río Tordera y paralelo a la línea de costa, tiene 1500 metros de longitud, y es coincidente con el trazado del perfil Sísmico PS1 y el Perfil de Resistividad PS1 (Figura 7.55), aunque su trazado se separa algo de la alineación inicialmente propuesta, ya que por las alambradas, sistemas de riego (Figura 7.56), zonas sembradas, líneas eléctricas y casas, se tuvieron que mover las posiciones de los bucles para evitar el ruido que todo esto podría introducir en las medidas.



Figura 7.55 Localización de las medidas electromagnéticas tomadas en el Perfil PS1

Según el resultado de las pruebas efectuadas en la estación 900, se han utilizado los siguientes parámetros de registro:

Frecuencia de Emisión:	8Hz
Tamaño del Bucle:	100mx100m
Vueltas del cable:	1 vuelta

que han podido ser aplicados en todas las estaciones, menos en la estación 100, en la que el tamaño del bucle emisor utilizado es 100mx80m, debido al muro de un Camping. El perfil PS1 consta de 15 estaciones, numeradas desde la 0 a la 1400, cuyos centros están separados del orden de 100 m. Las lecturas se han realizado con la bobina receptora en el centro del bucle, añadiendo lecturas a 100 m fuera del bucle, en dirección perpendicular al perfil, para 13 estaciones.



Figura 7.56 Vista parcial del principio del perfil PS1.

Las curvas obtenidas en las lecturas dentro del bucle han sido las siguientes (Figura 7.57):

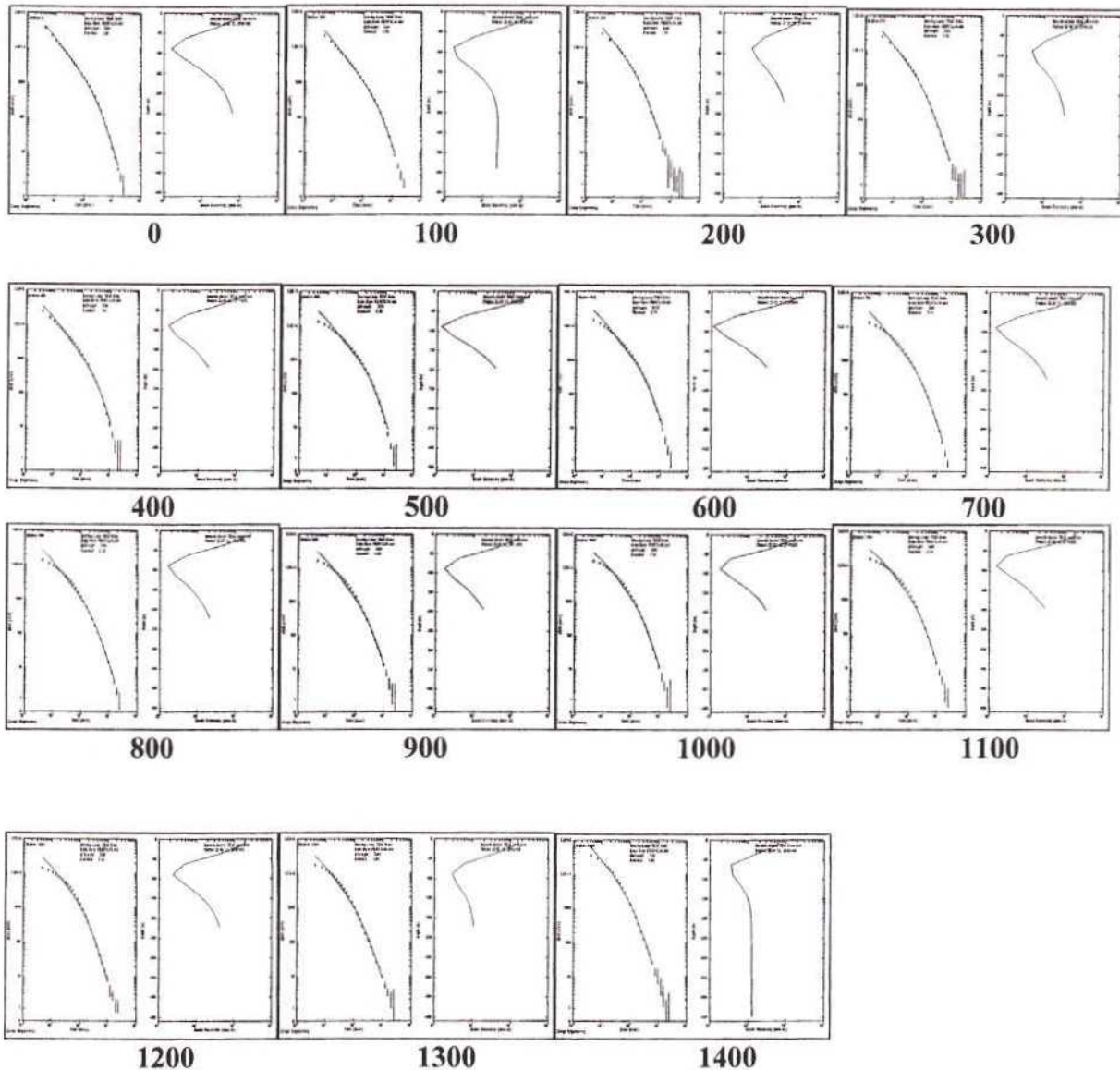


Figura 7.57. Curvas de los transitorios y sus respectivas inversiones medidos en las estaciones del perfil PS1

Todas las curvas de las mediciones tomadas, incluidas las realizadas fuera del bucle, pueden verse en el ANEXO F.

El perfil PS4 sigue el curso del río Tordera y tiene 1960 metros de longitud (Figura 7.58). Las mediciones se han efectuado con los siguientes parámetros:

Frecuencia de Emisión:	8Hz y 16Hz
Tamaño del Bucle:	70mx70m
Vueltas del cable:	1 vuelta

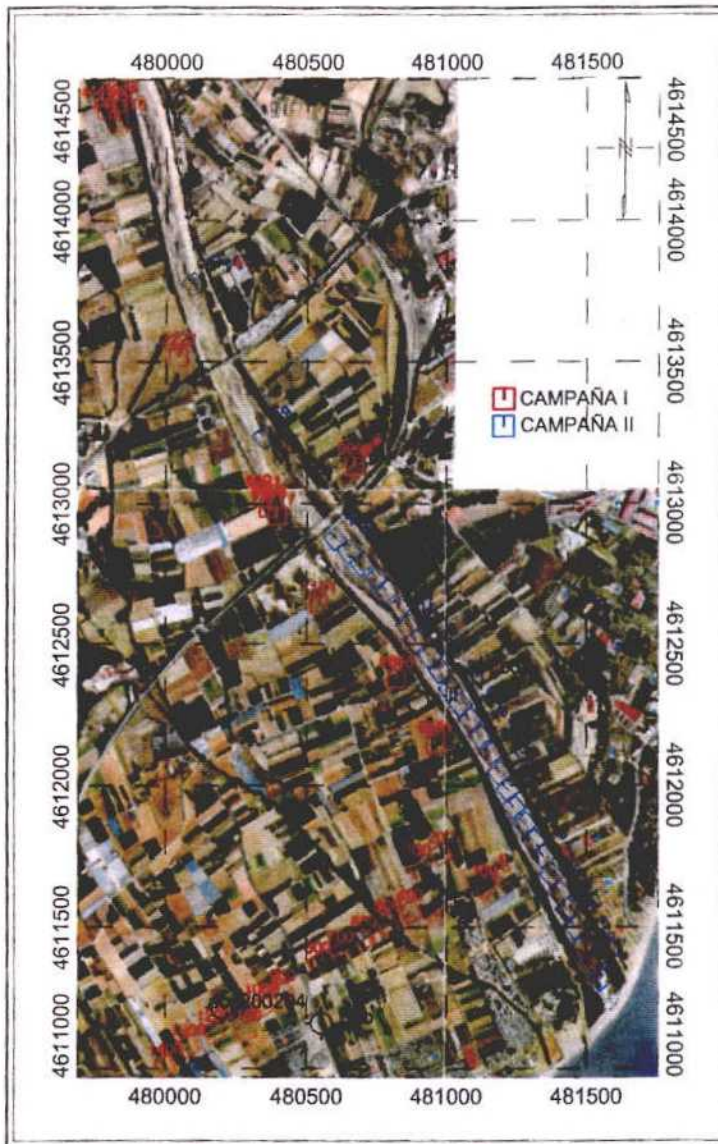


Figura 7.58 Localización de las medidas electromagnéticas tomadas en el Perfil PS4 (son las identificadas como Campaña II). Las estaciones nombradas como Campaña I constituyen las mediciones utilizadas para determinación de los parámetros de adquisición, salvo las del Sur que constituyen el perfil PS.

Se han tomado 30 medidas en el centro de cada bucle y 26 a 70 metros fuera del bucle, en dirección longitudinal al perfil y coincidiendo con el centro del bucle siguiente. Las medidas se asignan a la posición de la antena receptora, por lo tanto la medida dentro del bucle siguiente debe ser equivalente a la medida fuera del bucle anterior si la geología es horizontal o sub-horizontal, ya que se mide en un mismo punto el resultado de introducir el campo inductor desde posiciones diferentes. Como ya se indicó anteriormente, la razón por la que el estudio se ha completado con medidas fuera del bucle, es porque la medida depende del acoplamiento de las estructuras con la posición del bucle emisor y de la antena receptora. En caso de geologías horizontales o sub-horizontales no debe haber diferencia entre las formas de las curvas dentro y fuera del bucle, pero en caso de geologías verticales o sub-verticales dentro del bucle puede darse un mal acoplamiento, por lo que el campo secundario medido será de muy baja intensidad, y no ocurriría lo mismo fuera de bucle. Se ha aprovechado todo lo posible el propio cauce del río para efectuar las mediciones (Figura 7.59).

Las curvas de campo para todas las mediciones efectuadas dentro y fuera del bucle y con 8 y 16 Hz, así como su análisis detallado, pueden verse en el ANEXO F, reproduciéndose aquí (Figura 7.60) solamente las efectuadas dentro del bucle y para emisión de 8 Hz, a efectos comparativos de las obtenidas en el Perfil PS1.

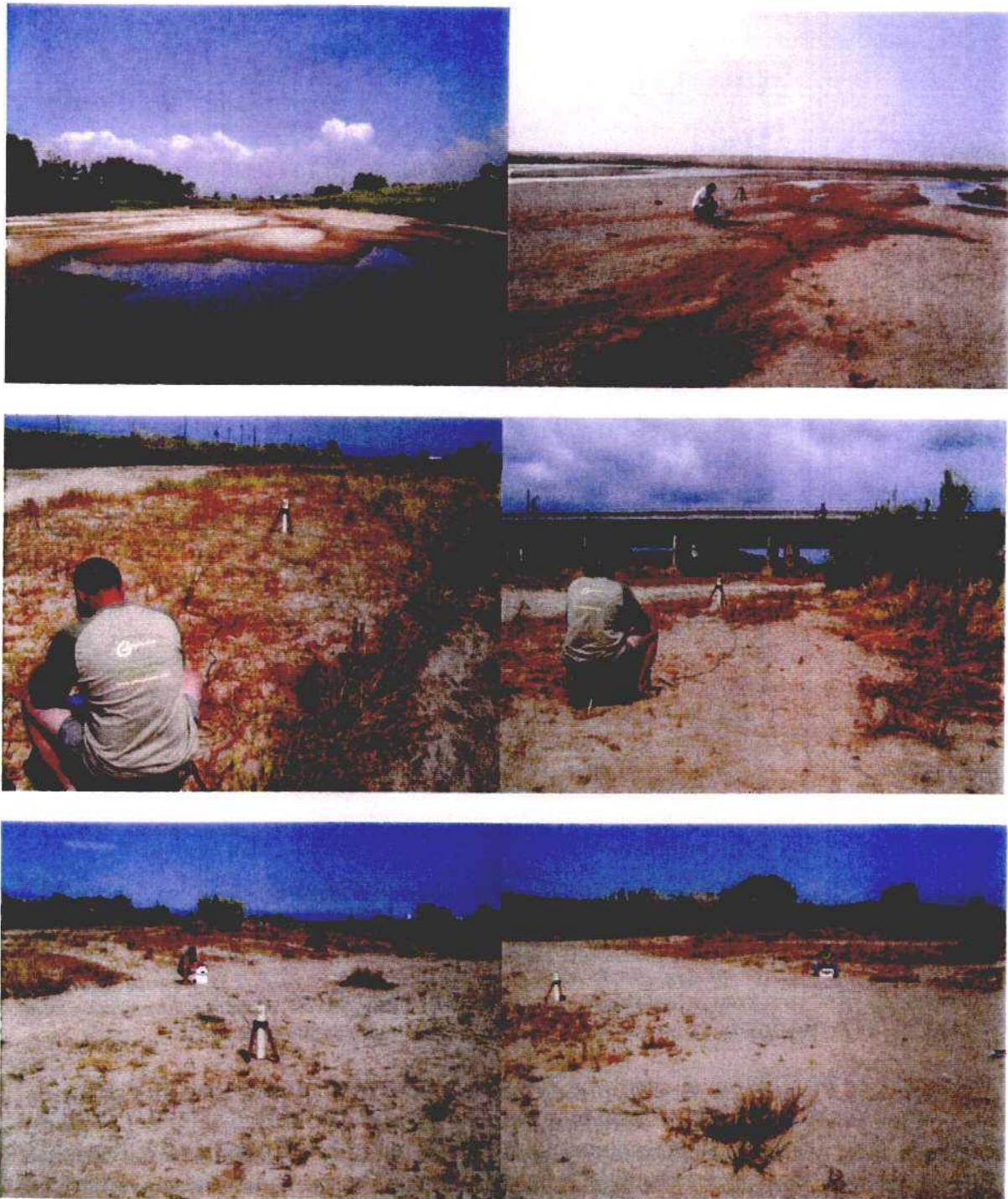


Figura 7.59 Vista de algunas estaciones del Perfil PS4

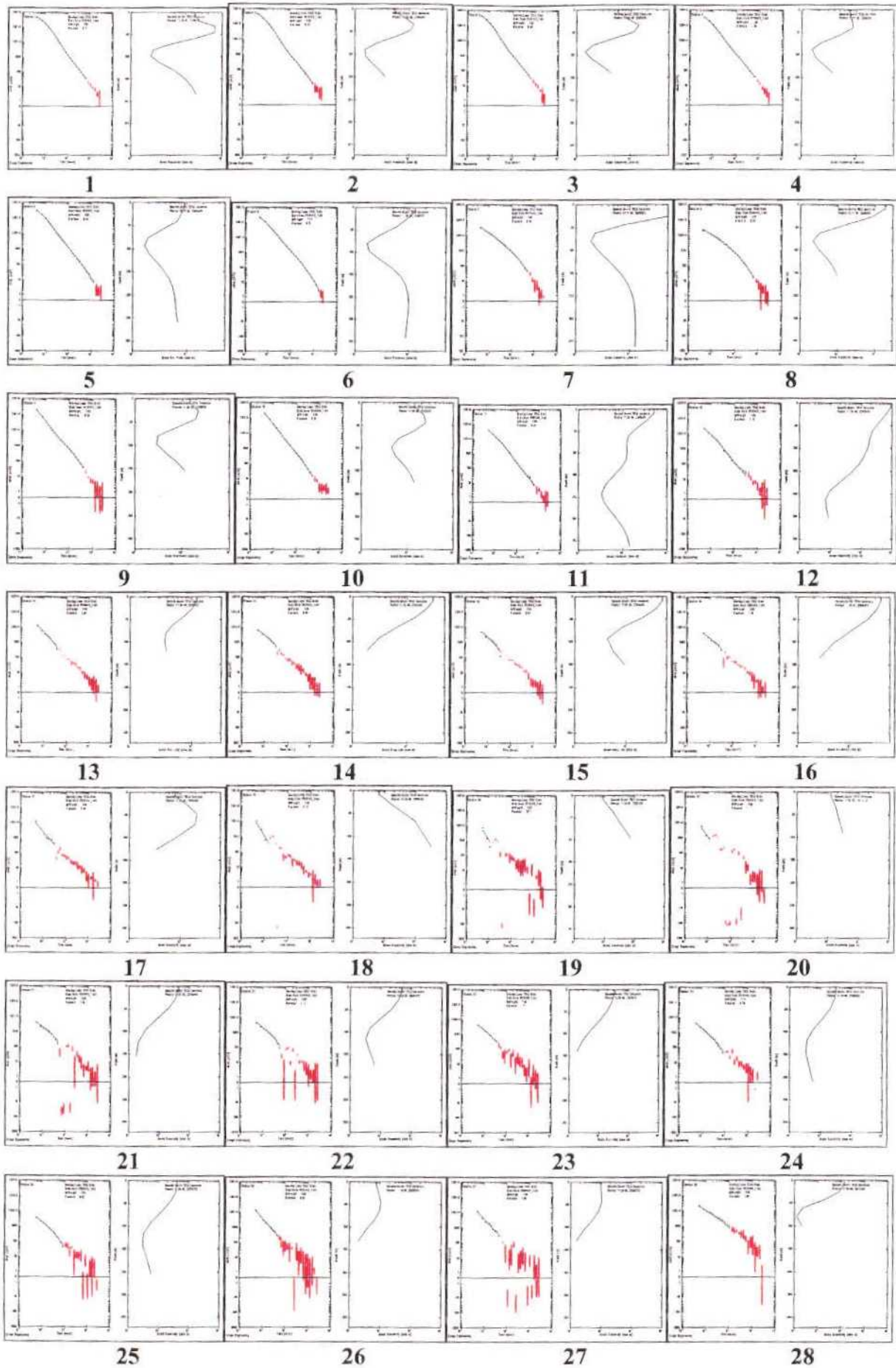


Figura 7.60 Curvas de los transitorios y sus respectivas inversiones medidos dentro del bucle y para emisión de 8 Hz, en las estaciones del perfil PS4 (disposición de Sur a Norte).

7.4.3 Proceso, Análisis e Interpretación de los datos

Los modelos de inversión convierten los datos medidos en perfiles de variación de la resistividad con la profundidad.

Existen dos parámetros en el proceso de inversión que determinan el tipo de resultado: el peso que se le asigna al modelo inicial, y el peso que se le asigna al modelo final o suavizado. El peso del modelo inicial controla el grado en que el resultado final debe respetar dicho modelo inicial; puede variar entre 0.001 y 100, siendo los valores más altos los que calculan modelos más parecidos al modelo inicial y los más bajos al contrario. El peso que se le asigna al modelo final o suavizado controla el gradiente de resistividades en los cambios; cuanto más alto es el peso del suavizado, menos contrastes son permitidos en el modelo; si el valor es muy bajo los cambios serán muy bruscos. En todos los casos se debe jugar con estos parámetros para crear modelos con errores bajos pero con significado geológicamente adecuado a la investigación.

Los modelos iniciales se calculan a partir de los propios datos observados, estando el modelo de partida o inicial formado por un conjunto de capas horizontales. El espesor de las capas se determina calculando la profundidad de penetración del campo fuente para cada ventana de tiempos. La resistividad de cada capa se ajusta iterativamente hasta que la diferencia entre el modelo y los datos observados se ajusta al error determinado, siempre que sea consistente con un contraste suavizado. El contraste del suavizado limita la variación de resistividad entre las distintas capas.

El resultado de un modelo de suavizado es un conjunto de resistividades estimadas que varían suavemente con la profundidad. La variación lateral se obtiene invirtiendo sucesivamente las mediciones efectuadas en las estaciones a lo largo de un perfil. Los resultados para una línea completa se presentan en una pseudo-sección con los contornos de resistividades. Para calcular los contornos se adjudican, por convenio, las resistividades a un punto medio de cada capa, formando una columna por debajo de cada estación.

Se han generado varios modelos inversos con los datos de las medidas tomadas dentro del bucle. La diferencia entre los modelos radica en la variación de los pesos del modelo inicial y del suavizado:

- Cuanto mayor es el peso del modelo inicial el resultado se parece más a dicho modelo.
- Cuanto menor es el peso del suavizado los resultados pueden tener cambios más bruscos, ajustándose más a los datos brutos.

Análisis de los datos del perfil PS1

A continuación se presentan los modelos obtenidos con diferentes pesos, en secciones orientadas Oeste-Este:

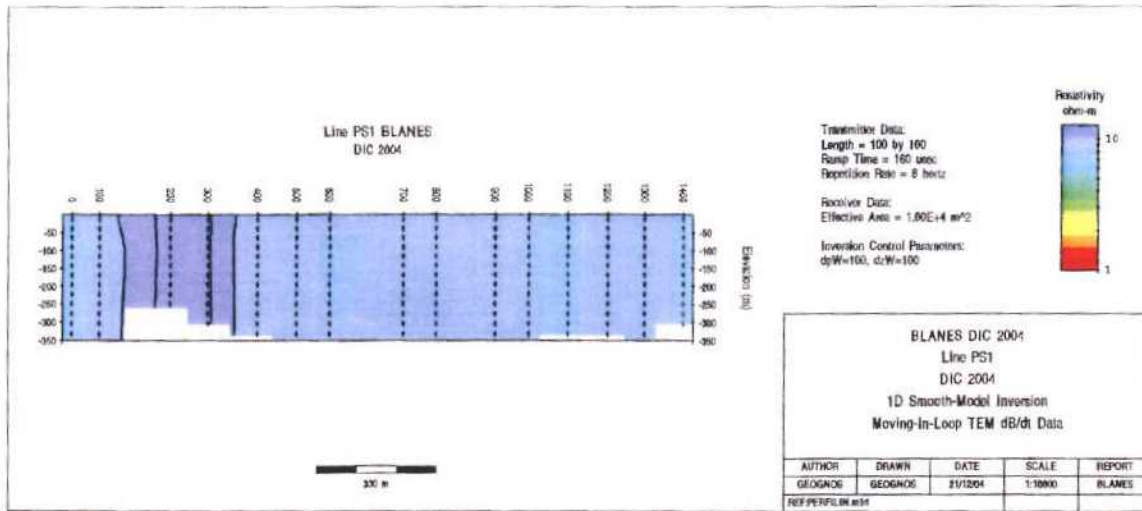


Figura 7.61 Perfil PS1, datos dentro del bucle. Peso del modelo inicial 100 Peso del suavizado 100

En este caso el peso del suavizado es demasiado alto y hay muy poca variación en los valores de resistividad.

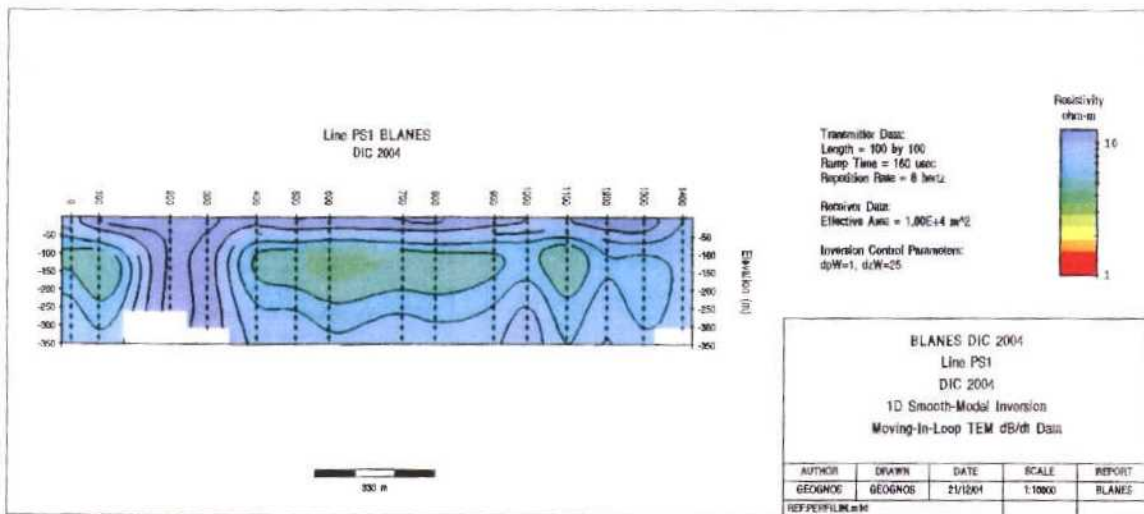


Figura 7.62 Perfil PS1, datos dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 25

Sigue habiendo muy poca variación en la resistividad, el modelo no tiene sentido geológico ya que el basamento granítico sin alterar se encontraría a más de 300 metros de profundidad. En este caso todavía es muy alto el peso dado al suavizado.

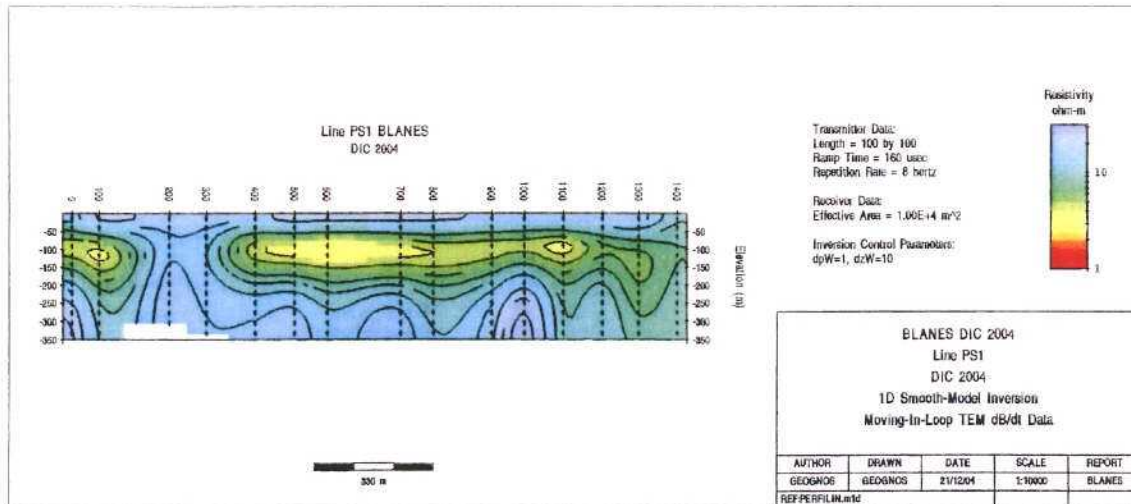


Figura 7.63 Perfil PS1, datos dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 10

En este caso se han permitido cambios más bruscos en las distintas capas del modelo geológico, respecto a la información que se tenía anteriormente de los perfiles sísmicos, resultando un modelo más lógico, en el que excepto en las estaciones 200 y 300, donde no se ve la capa conductora que existe en el resto de estaciones, el basamento granítico sin alterar se encontraría a unos 250 metros de profundidad.

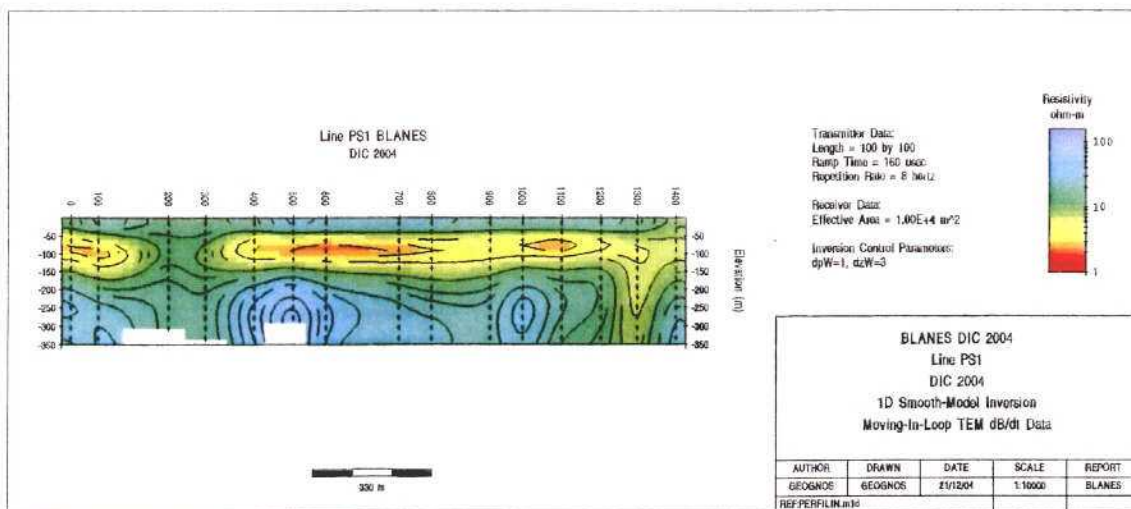


Figura 7.64 Perfil PS1, datos dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 3

Este modelo es muy parecido al anterior; la diferencia está en las variaciones de la resistividad, que ahora resultan con mayor significado geológico. En este caso el basamento se encontraría entre 150 metros y 200 metros de profundidad.

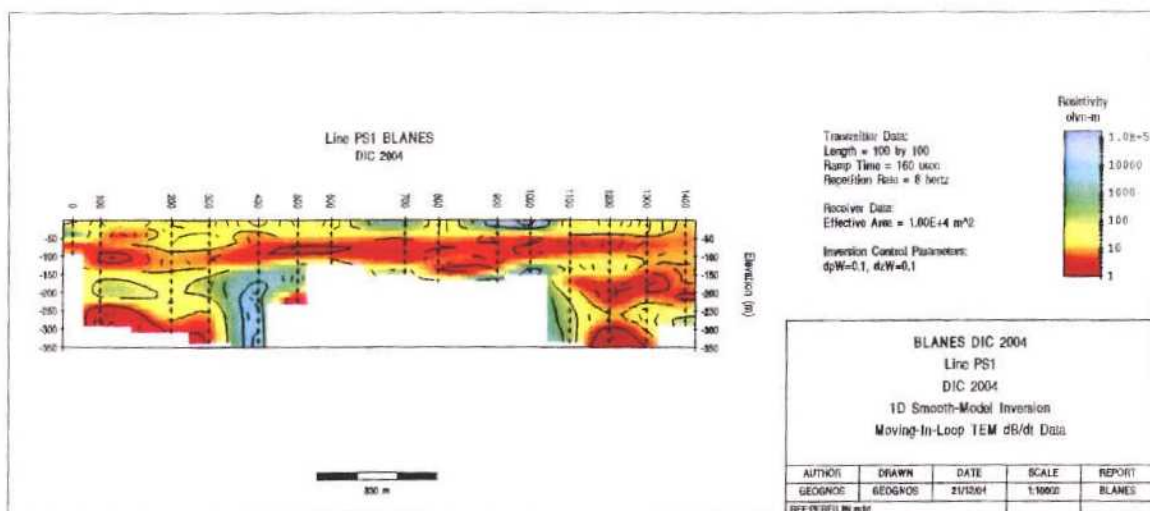


Figura 7.65 Perfil PS1, datos dentro del bucle. Peso del modelo inicial 0.1 Peso del suavizado 0.1

Al dar muy poco peso a los datos, se obtiene un resultado con un error muy bajo pero sin ningún sentido geológico.

Respecto de los modelos para los datos tomados fuera del bucle, siguiendo el mismo criterio que para las medidas dentro del bucle se presentan varios ejemplos:

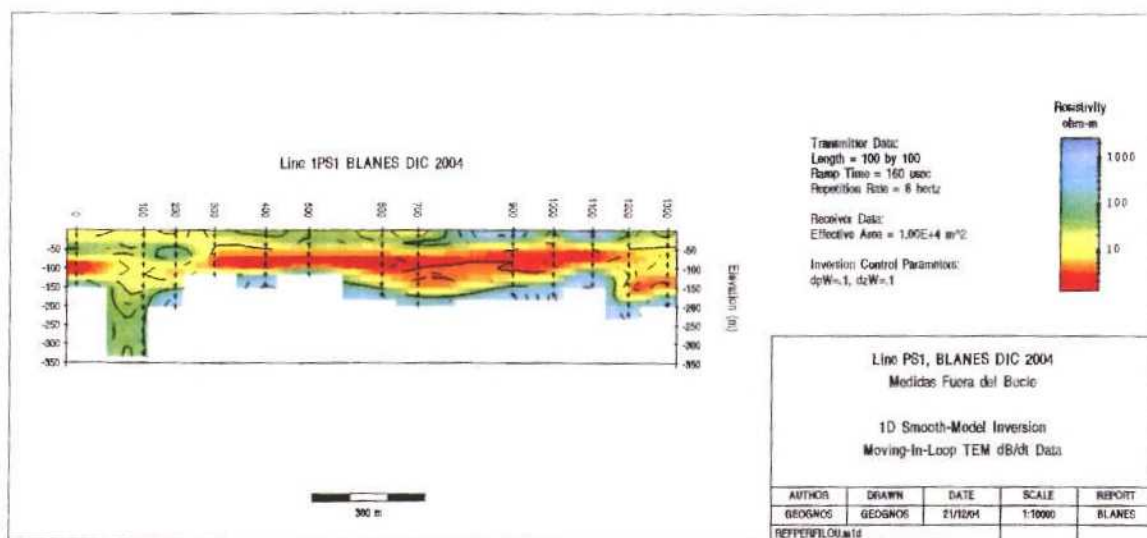


Figura 7.66 Perfil PS1, datos fuera del bucle. Peso del modelo inicial 0.1 Peso del suavizado 0.1

En este modelo ocurre lo mismo que en el caso de medidas dentro del bucle para los mismos parámetros; el error es muy bajo pero no tiene sentido geológico.

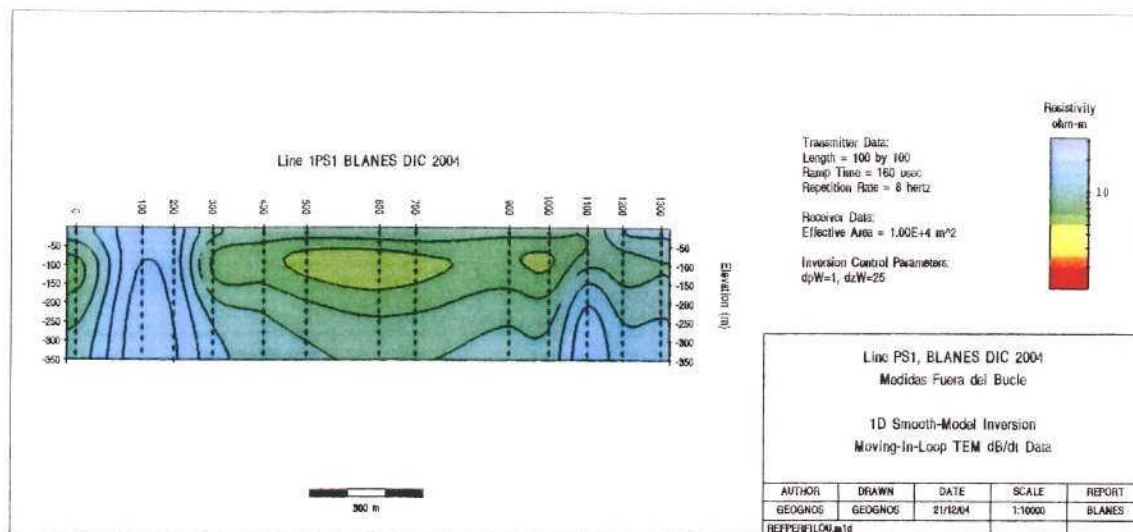


Figura 7.67 Perfil PS1, datos fuera del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 25

El modelo esta demasiado suavizado y no hay contraste de resistividad.

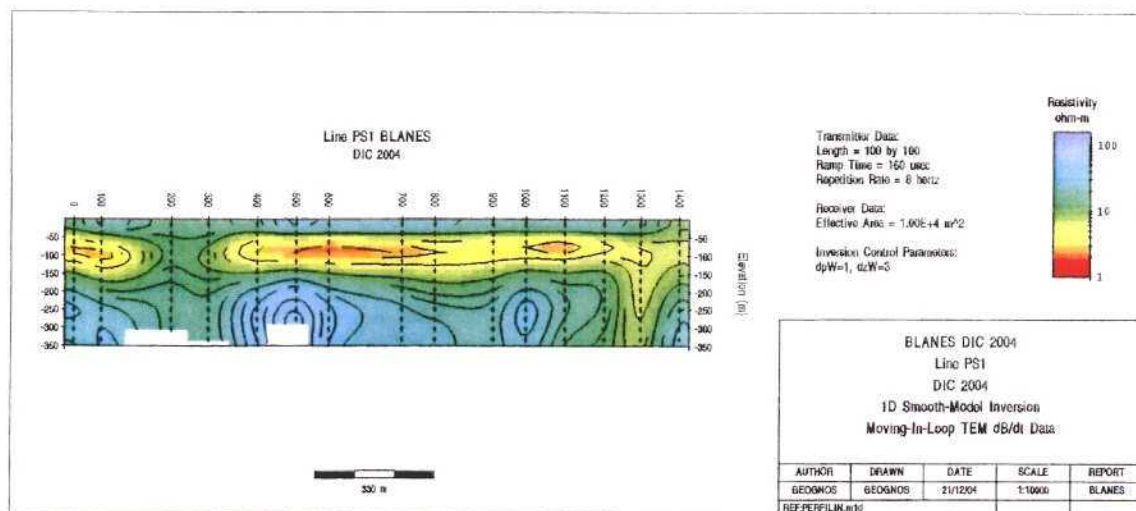


Figura 7.68 Perfil PS1, datos fuera del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 3

Este modelo nuevamente es el más lógico geológicamente y de nuevo sitúa el basamento a unos 200 metros de profundidad. Es muy similar al obtenido con los datos dentro de bucle, excepto en las estaciones 100 y 1300, como fue comentado en el análisis anterior.

Para la estación 200 dentro del bucle, correspondiente en posición a la 100 efectuada fuera del bucle (Figura 7.69), se aprecian diferencias entre las mediciones efectuadas dentro y fuera del bucle, aumentando la resistividad a menor profundidad. Cuando esto ocurre, es debido a que existe un cambio lateral, que podría ser interpretado como una falla, o un contacto litológico lateral.

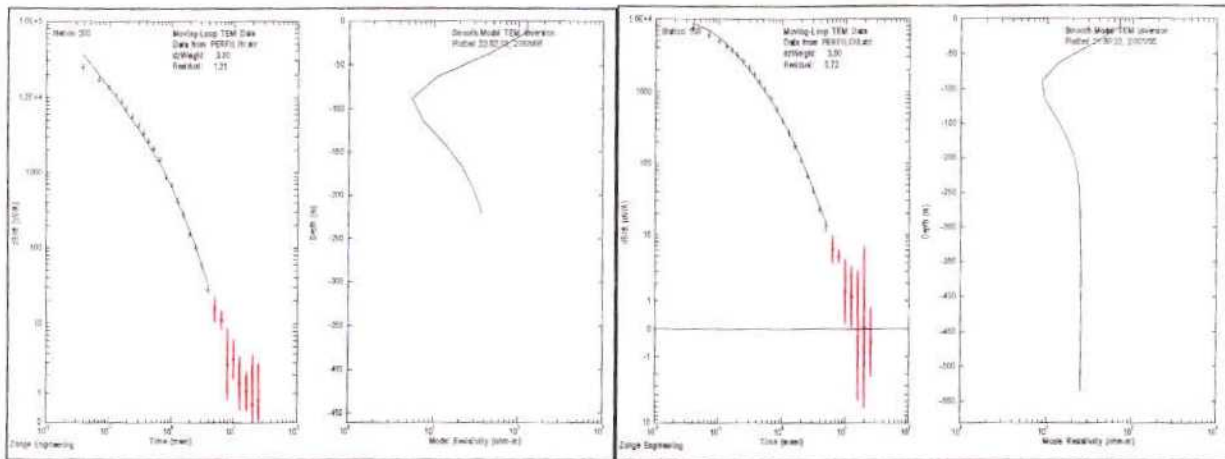


Figura 7.69 Estación 200, dentro del bucle

Estación 100, fuera del bucle

Sin embargo, en la estación 1300 las lecturas efectuadas, que tiene unos datos muy limpios, tanto en medidas dentro y fuera del bucle (Figura 7.70), la capa conductora llega a más profundidad que en el resto del perfil. En ambas curvas, la resistividad se mantiene prácticamente constante con la profundidad.

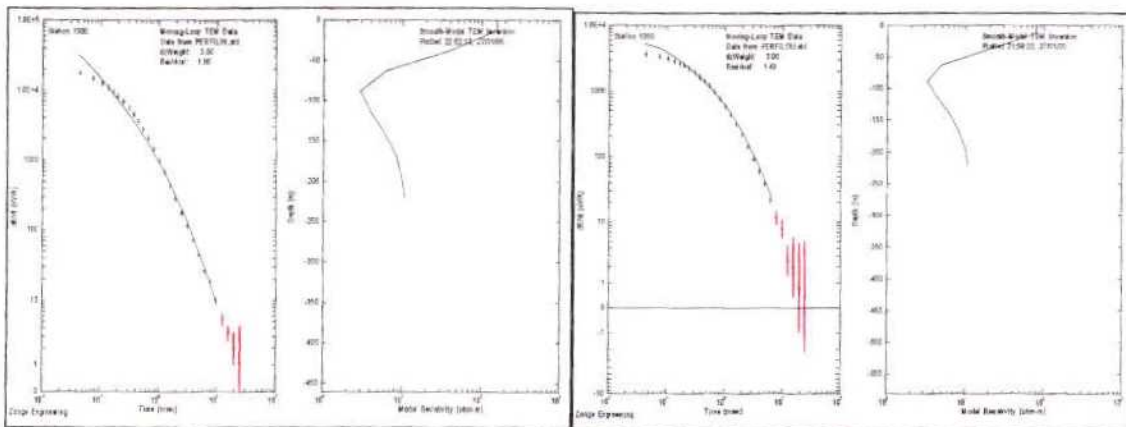


Figura 7.70 Estación 1300 Dentro del bucle

Fuera del bucle:

Como **conclusión**, en la **interpretación final del perfil PS-1**, se ha optado por realizar la inversión con valores de 1 para el peso del modelo inicial y de 3 para el resultado suavizado, procediendo además a una estricta limpieza de los datos de ruido antes de generar los modelos finales, que se presentan a continuación (Figuras 7.71 Y 7.72), (no son exactamente iguales que los presentados anteriormente):

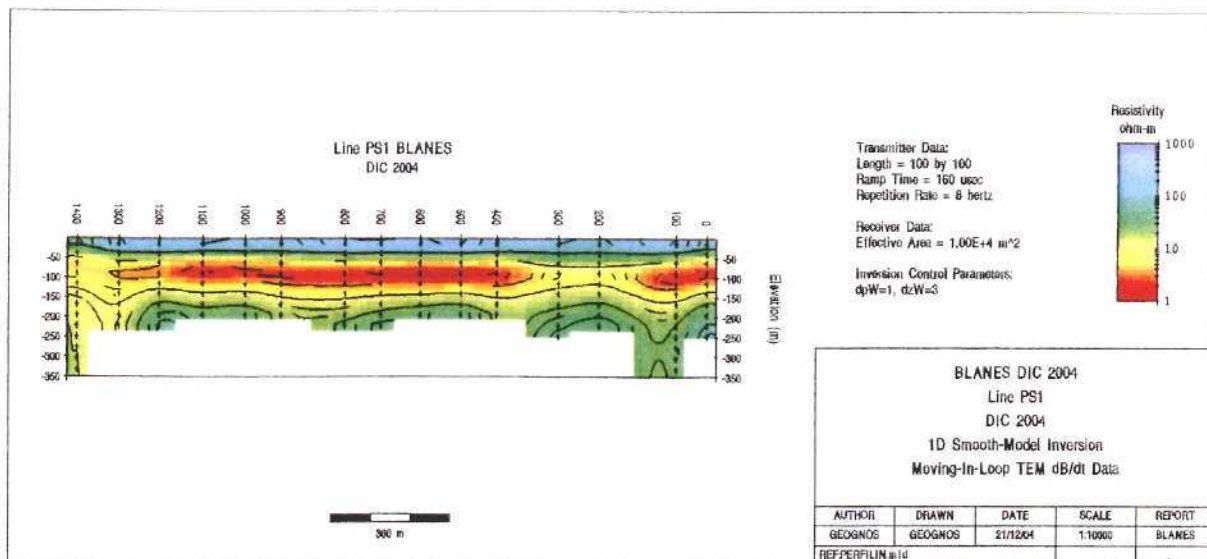


Figura 7.71 Perfil PS1 MODELO FINAL con Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 3. Medidas dentro del bucle. Orientación E-O.

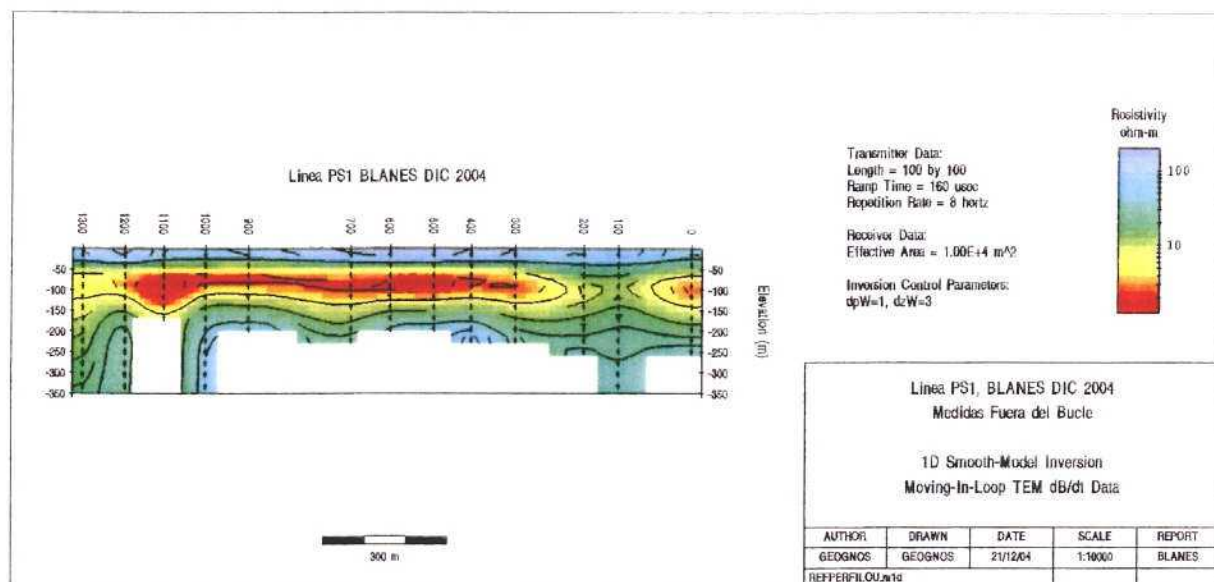


Figura 7.72 Perfil PS1 MODELO FINAL con Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 3. Medidas fuera del bucle. Orientación E-O.

Para la interpretación de los resultados se ha contado además con los siguientes sondeos mecánicos (posición en Figura 7.73):

SONDEO	X UTM 30	Y UTM 30	profundidad del granito
B-2b	480553	4611159	74.2 m
Laboratoris Fher	480900	4612300	42 m
Malgrat-1	480767	4610850	No corta (prof.155 m)
A-2 a	480131	4610807	No corta (prof. 38.4 m)
C-32	481125	4612400	No corta (prof. 13 m)
ACA-2002-04	480200	4611214	89 m

Los sondeos mecánicos aca-2002-04 y B2b son los más cercanos al perfil. El primero corta granito a los 89 metros de profundidad, lo que no es compatible con los datos de los SEDT, al menos, no se puede tratar de de granito fresco, aunque cabe la posibilidad de que la resistividad se deba a estar alterado. El sondeo B-2-b, corta granito a los 74,2 metros, y se localiza a 130 metros al sur del perfil, planteándose la misma discordancia respecto de la resistividad obtenida en los SEDT. El resto de los sondeos no están lo suficientemente cerca para ser representativos en la interpretación de este perfil.



Figura 7.73 Posición de los sondeos mecánicos disponibles a lo largo del perfil PSI

Análisis de los datos del perfil PS4

El análisis de los parámetros de modelado se ha hecho con los datos tomados dentro del bucle y con frecuencia de emisión de 8Hz. La diferencia entre los modelos radica en la variación de los pesos del modelo suavizado, habiéndose mantenido constante la del modelo inicial. El mayor peso del modelo suavizado lleva implícito la admisión de cambios de resistividad más bruscos, buscando la mayor aproximación a los datos brutos. A continuación se presentan los modelos con diferentes pesos, en secciones orientadas Sur-Norte:

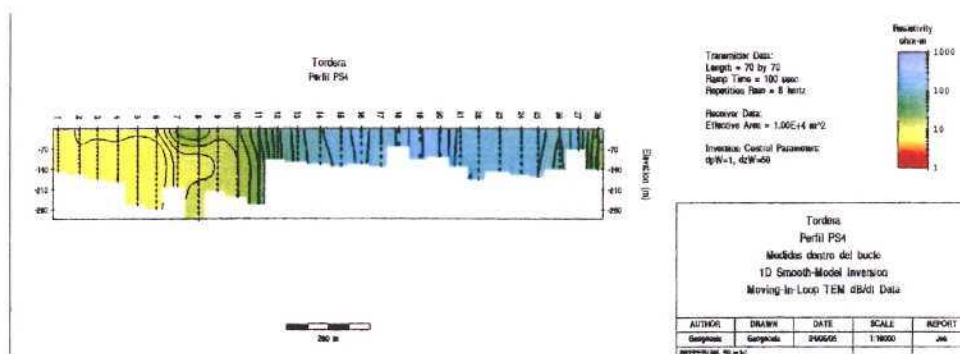


Figura 7.74 Perfil PS4, medidas dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 50

En este caso el peso del suavizado es demasiado alto, y hay muy poca variación en los valores de resistividad, pero sirve para ver cambios laterales importantes.

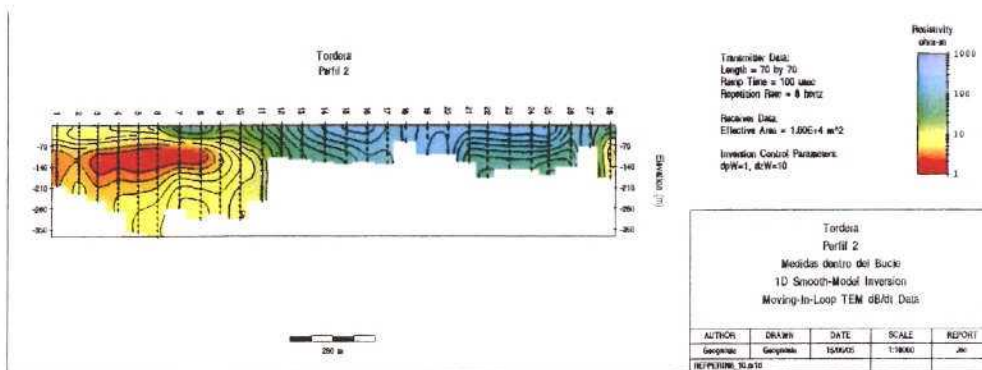


Figura 7.75 Perfil PS4, medidas dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 10

Sigue habiendo muy poca variación en la resistividad.

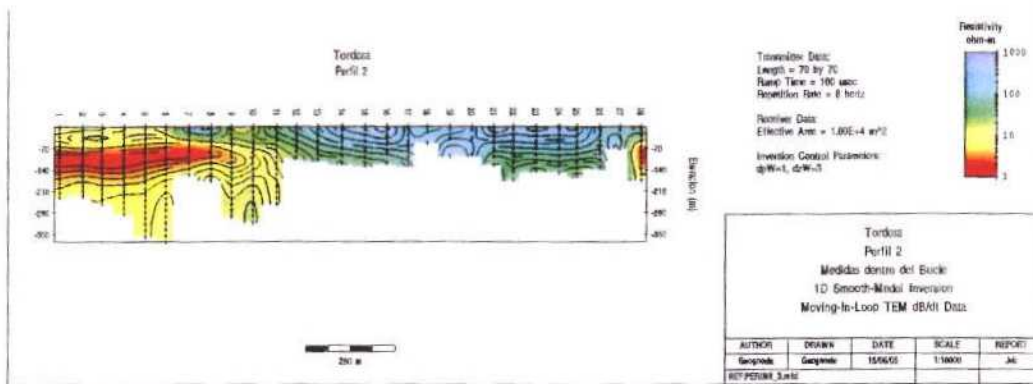


Figura 7.76 Perfil PS4, medidas dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 3

Se han permitido cambios más bruscos en las distintas capas del modelo geológico. Este modelo se corresponde mejor con la información previa suministrada por el perfil sísmico.

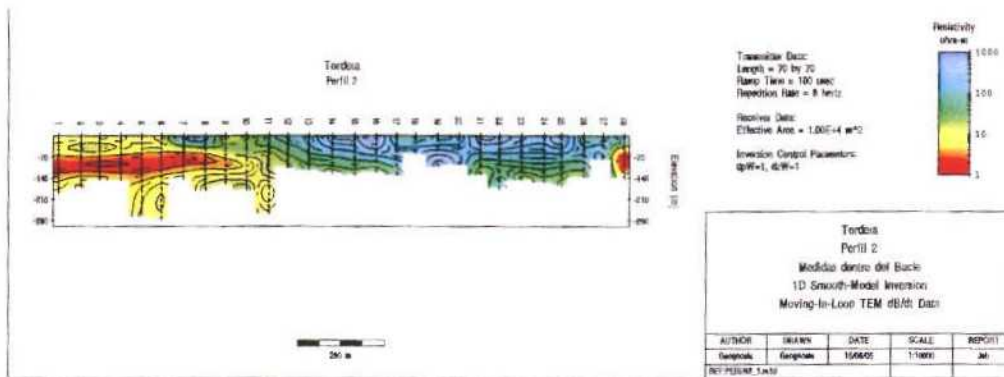


Figura 7.77 Perfil PS4, medidas dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 1

En este caso se han permitido cambios todavía más bruscos en las distintas capas del modelo geológico, aunque la variación respecto al modelo anterior no es muy grande. El elegir este parámetro de suavizado o el anterior es muy subjetivo, ya que con pesos más altos se puede perder información de capas pequeñas, pero se filtran ruidos externos. Según este modelo se aprecia un cambio lateral claro entre las estaciones 10 y 11, que puede ser debido a la cercanía al mar (posible intrusión salina).

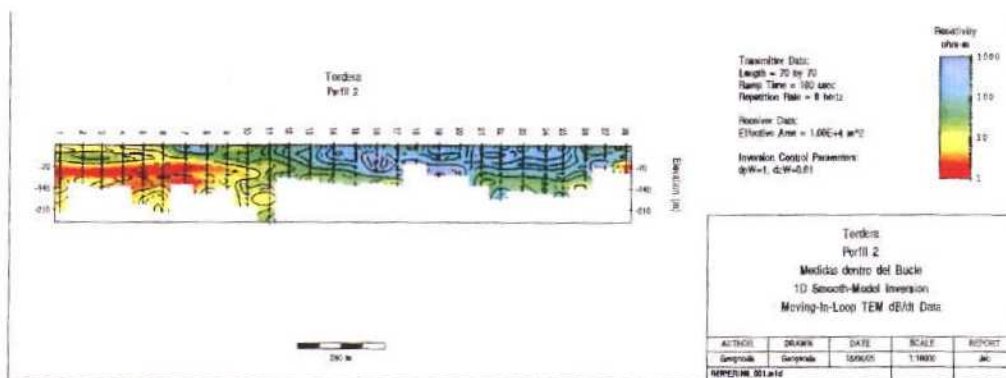


Figura 7.78 Perfil PS4, medidas dentro del bucle. Peso del modelo inicial 1 Peso del suavizado 0.01

Con estos parámetros se obtiene un modelo con un error muy bajo pero sin ningún sentido geológico.

También se han generado diferentes modelos con los datos tomados fuera del bucle. Las estaciones en este caso se han numerado cada 100, la correspondencia con las medidas dentro del bucle es: 2 dentro es 200 fuera y así sucesivamente.

Siguiendo el mismo criterio que para las medidas dentro del bucle se presentan dos modelos con los mismos parámetros de modelado y con distinta frecuencia de emisión:

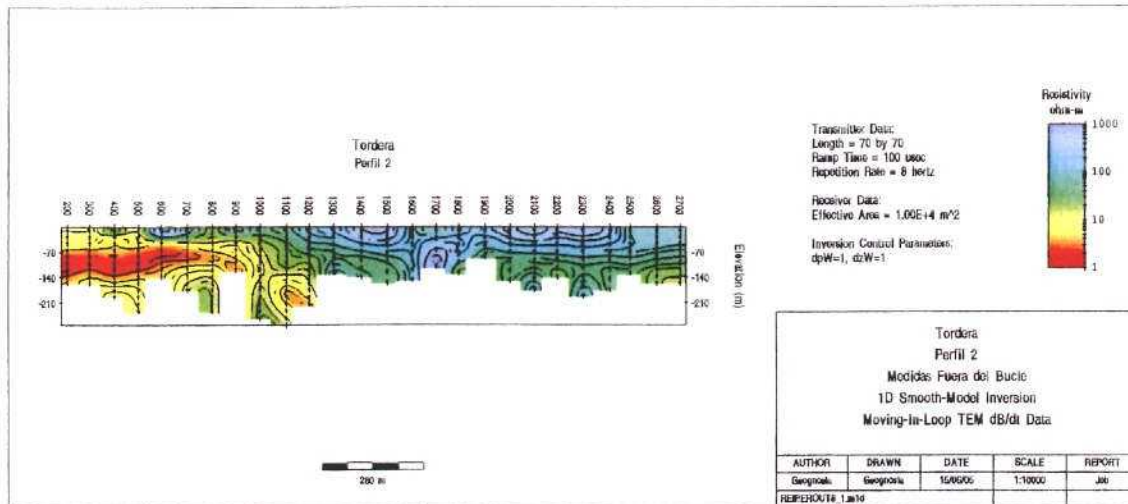


Figura 7.79 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 8Hz. Medidas fuera del bucle

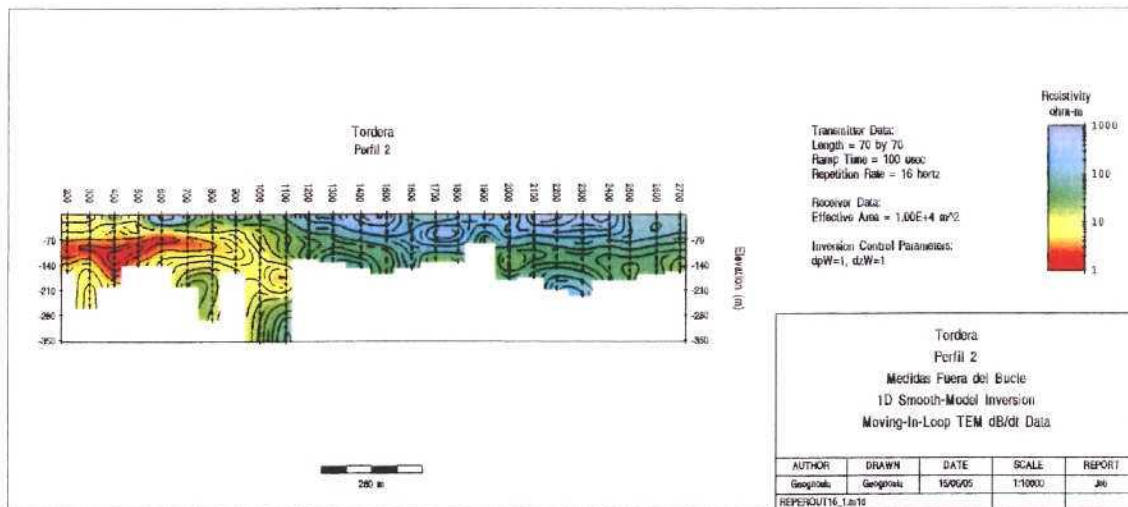


Figura 7.80 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 16Hz. Medidas fuera del bucle

Ambos modelos aportan una información muy similar y completamente compatible con la de los modelos generados con las medidas dentro del bucle.

En consecuencia, se ha decidido utilizar como parámetros de modelado los siguientes:

Peso del modelo inicial 1
Peso del suavizado 1

Con ellos, se han analizado los datos para decidir cuáles se aceptan como limpios y qué datos se rechazan por ruido, teniendo en cuenta las estructuras vistas en campo que son susceptibles de introducir ruido. En los casos en que se aprecien datos con ruido, pero no se haya observado en campo la presencia de este tipo de estructuras, se intentará discriminar el ruido analizando las curvas de caída de cada estación, no utilizando las ventanas de tiempo con ruido. A la hora de aceptar o rechazar estaciones completas o ventanas de tiempo de estas estaciones, se ha utilizado un criterio común para todas las estaciones, analizando posteriormente, con un punto de vista más y menos conservador, todas las medidas.

El criterio común para todas las estaciones es el siguiente:

- Usar a priori todas las ventanas de tiempos.
- Rechazar las ventanas de tiempo en las que las repeticiones tengan diferencias mayores del 15%.
- Rechazar todas las medidas negativas.
- Rechazar las ventanas que tengan pendientes superiores a 1.

En el campo se visualizaron estructuras causantes de ruido en las siguientes estaciones:

- Dos líneas eléctricas paralelas a todo el perfil PS4.
- Una de estas líneas cruza el perfil en la estación 7 y 8.
- En las estaciones 12 y 13 hay varios transformadores y cruces de líneas eléctricas.
- Una de las líneas cruza el perfil en la estación 19.
- La estación 28 está cerca de primer puente del Río Tordera desde la costa. Cerca del puente hay una desaladora, y hay varias líneas eléctricas asociadas a este puente, además de la vía del tren.

Esta información se confirma en los datos en casi todos los casos, según vemos en las siguientes curvas de caída para las estaciones 7 y 8 (Figura 7.81):

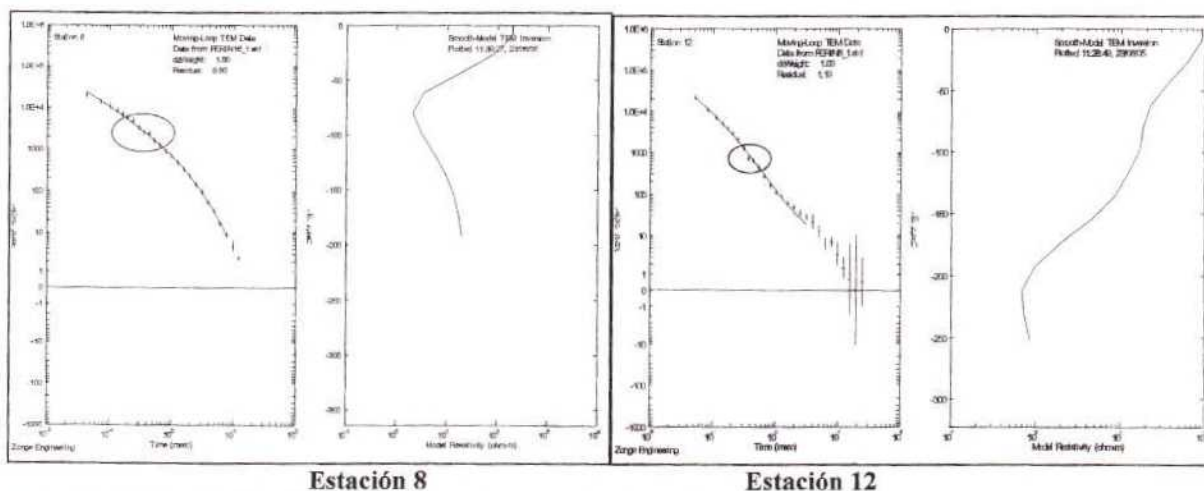
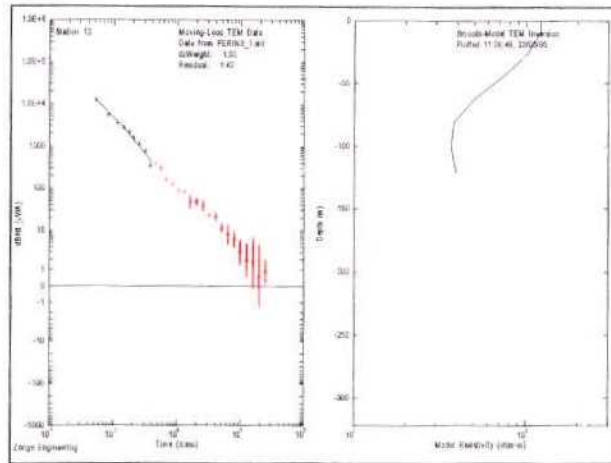


Figura 7.81 Transitorios obtenidos en las estaciones 7 y 8, lecturas dentro del bucle.

En la estación 8, la parte de la curva señalada en rojo con una elipse está causada posiblemente por ruido externo, aunque en este caso la afección que tiene la línea eléctrica es muy baja no es igual en el resto de estaciones, viéndose el mismo tipo de señal en la estación 12. Aunque en las estaciones 7 y 8 cruza una línea eléctrica los datos son bastante limpios.



Estación 13

Figura 7.82 Transitorios obtenidos en la estaciones 13, lecturas dentro del bucle.

En el caso de la estación 13 (Figura 7.82), la afección es mucho más grande, y sólo se pueden medir con calidad las primeras 9 ventanas. En todos estos casos, fuera del bucle se observan las mismas anomalías. A partir de la estación 12 las medidas son mucho menos limpias que al principio del perfil, lo que es debido a que hay más estructuras causantes de ruido, que afectan en mayor medida que al principio del perfil.

La distinta afección de los datos al ruido externo depende de muchos factores, entre ellos los parámetros de medida; al ser estos los mismos para todo el perfil, la diferencia de afección debe ser debida a la diferencia de materiales sobre los que se toman las distintas medidas. Con toda esta información y asumiendo que puede haber fuentes de ruido electromagnético que no son visibles (cómo tuberías enterradas) se han establecido criterio conservadores (eliminando todo lo que esté cerca de estas fuentes de ruido que pueda parecer extraño) o criterios menos conservadores, asumiendo que ciertos comportamientos extraños en las medidas, aunque estén cercanas a estructuras que pueden causar ruido, pueden ser debidas a cambios en los materiales del subsuelo, cuando se repiten a diferentes frecuencias y en diferentes posiciones del bucle transmisor.

Modelos Conservadores:

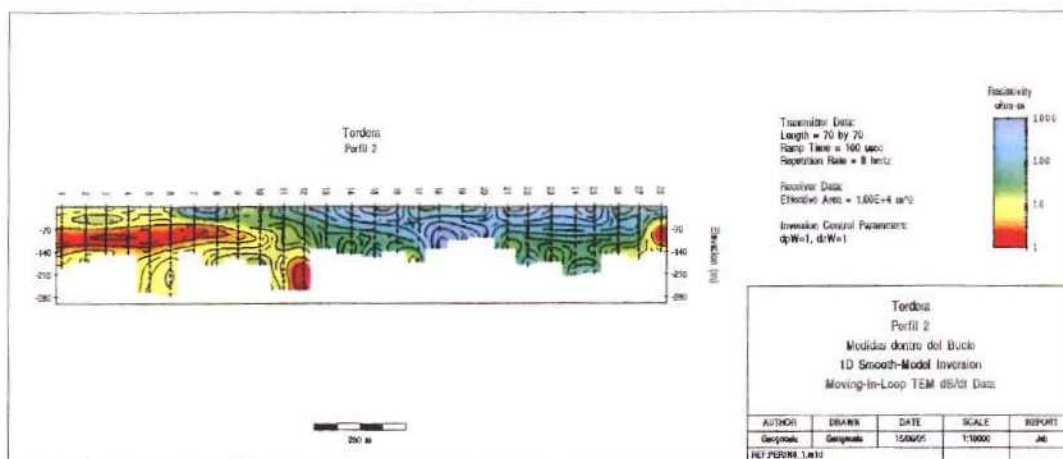


Figura 7.83 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 8Hz. Medidas dentro del bucle

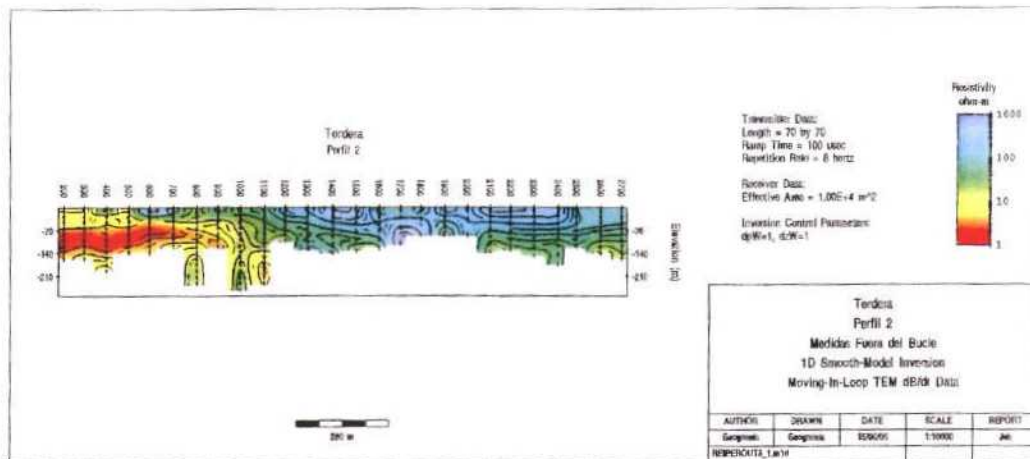


Figura 7.84 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 8Hz. Medidas fuera del bucle

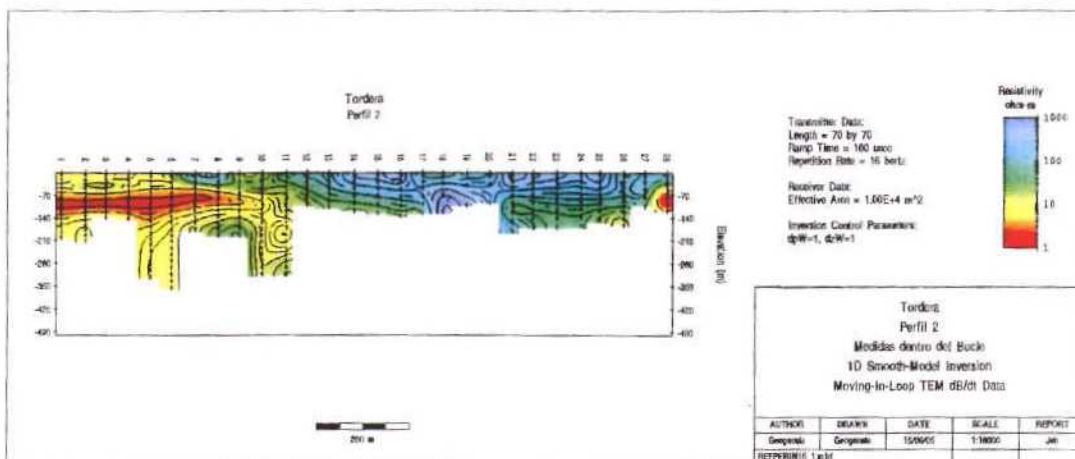


Figura 7.85 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 16Hz. Medidas dentro del bucle

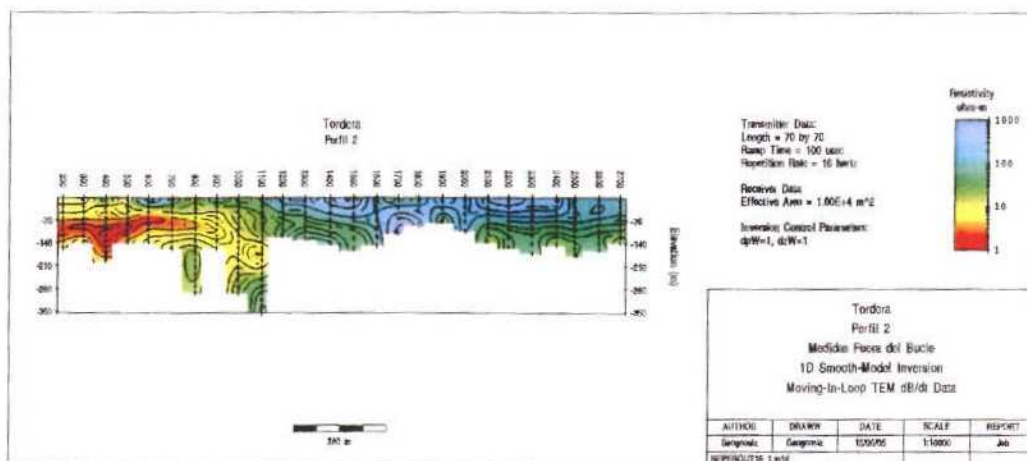


Figura 7.86 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 16Hz. Medidas fuera del bucle

Como se observa, los resultados obtenidos con las distintas frecuencias y en las medidas dentro y fuera los modelos son muy similares, y básicamente aportan la misma información.

Modelos menos conservadores:

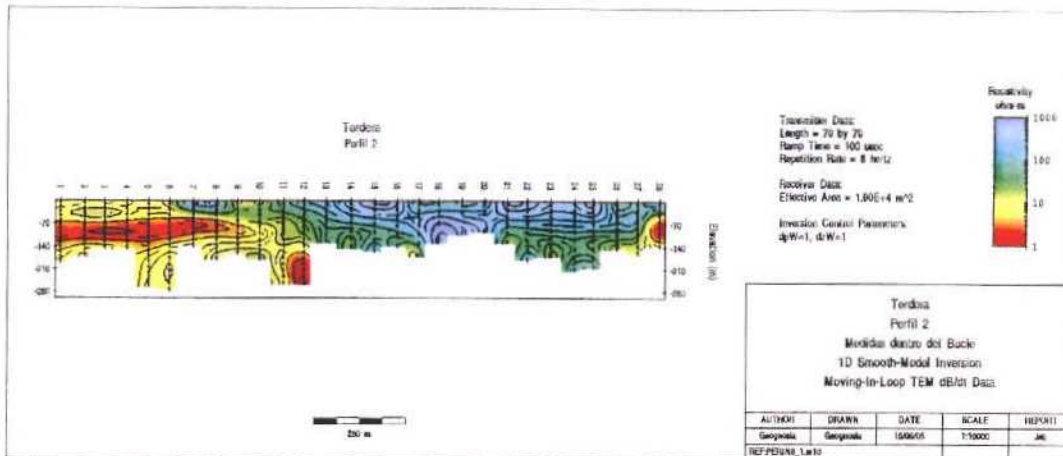


Figura 7.87 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 8Hz. Medidas dentro del bucle

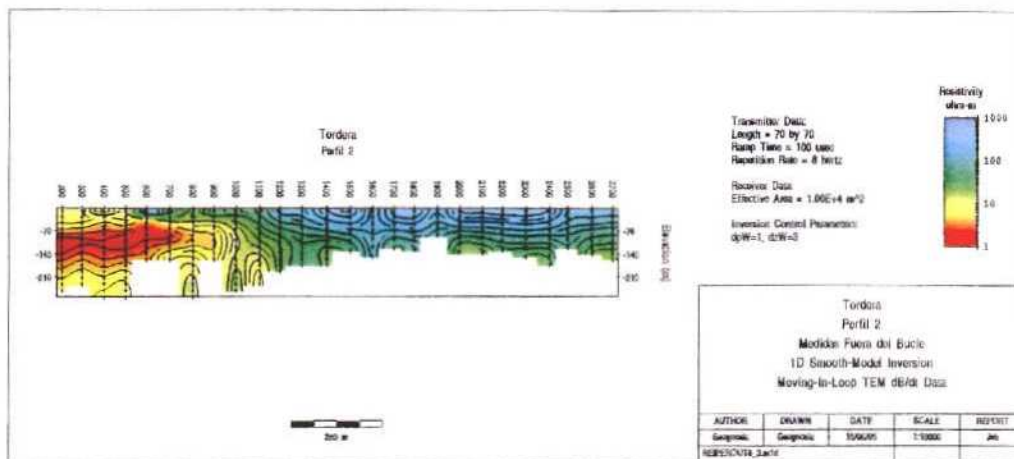


Figura 7.88 Perfil PS4. Peso suavizado: 3, Frecuencia: 8Hz. Medidas fuera del bucle

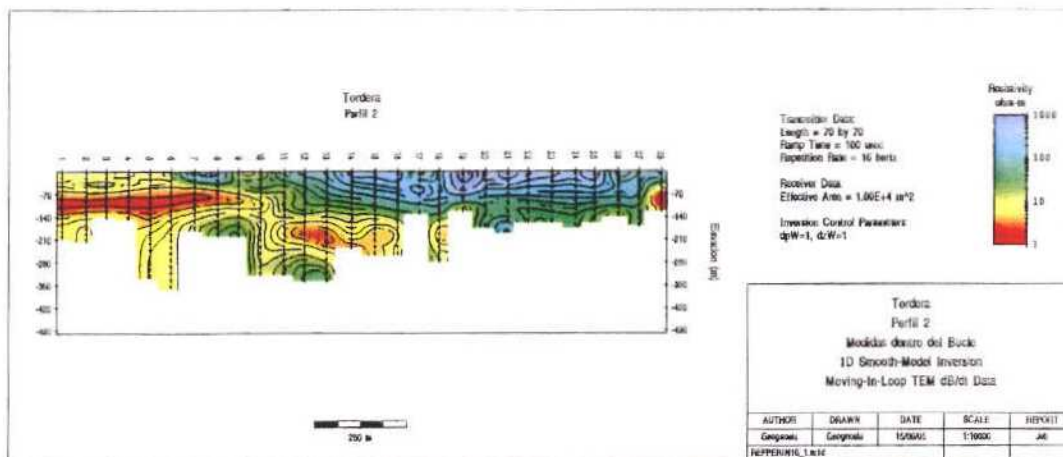


Figura 7.89 Perfil PS4. Peso suavizado: 1, Frecuencia: 16Hz. Medidas dentro del bucle

Incluso con un criterio menos conservador, la información es muy similar, aunque en alguno de los últimos modelos se llega a mayor profundidad aceptando datos con más ruido. Las zonas más difíciles o más subjetivas a la hora de limpiar los datos son las zonas donde en el campo se han visto posibles causas de ruido. Aunque los datos en estas zonas sean limpios, siempre queda la duda de si esa curva de caída es debida exclusivamente a la diferencia de resistividad de los materiales o está influida por causas externas.

Como conclusión, la **interpretación final del Perfil PS-4** se presentan los siguientes modelos:

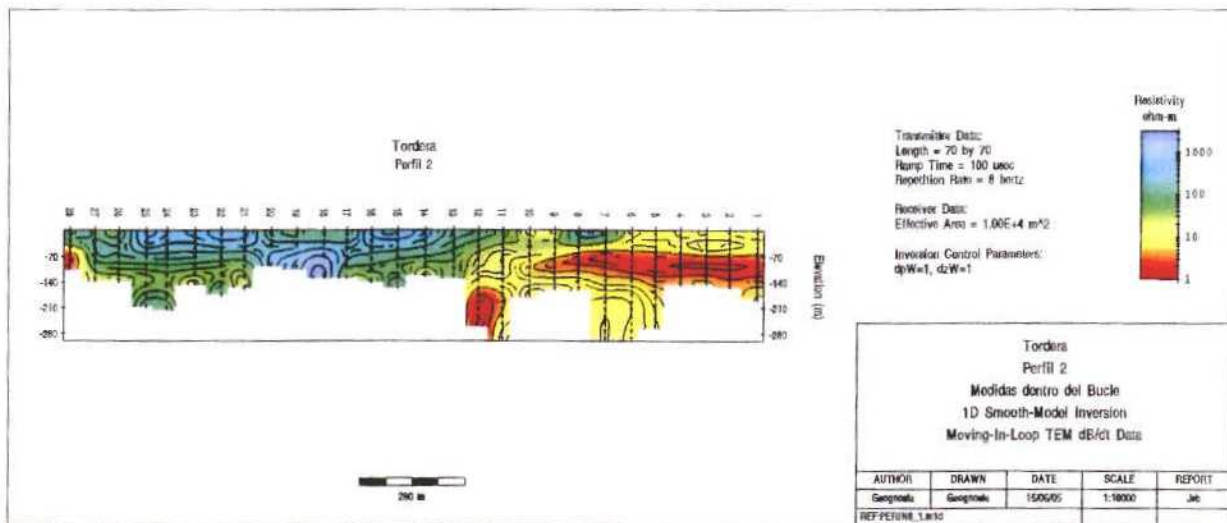


Figura 7.90 Perfil PS-4. Medidas dentro del bucle 8Hz Peso modelo inicial 1; suavizado 1. Orientación N-S

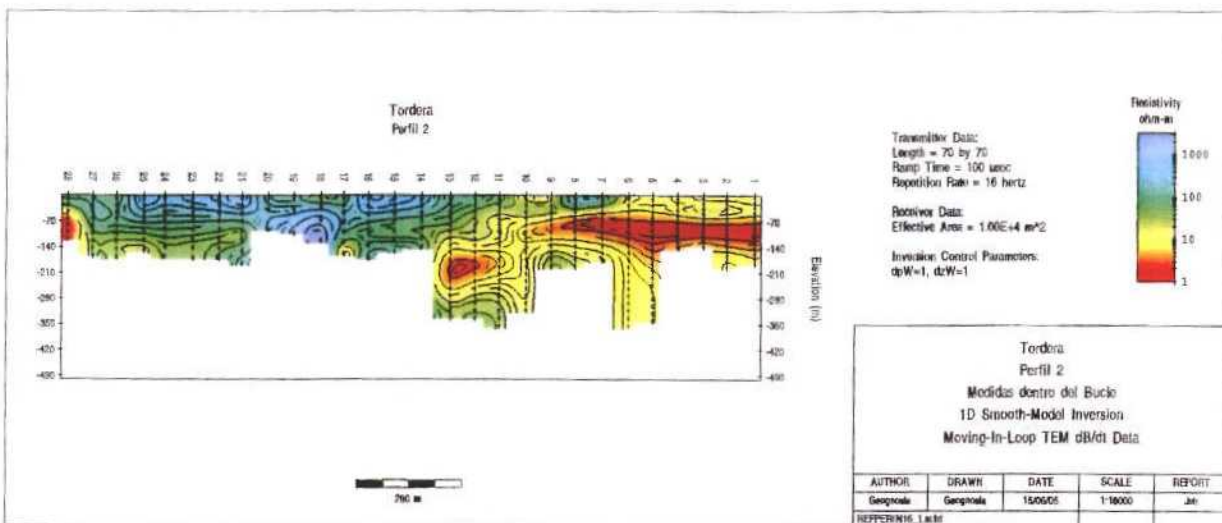


Figura 7.91 Perfil PS-4. Medidas dentro del bucle 16Hz Peso modelo inicial 1 suavizado 1 Orientación N-S

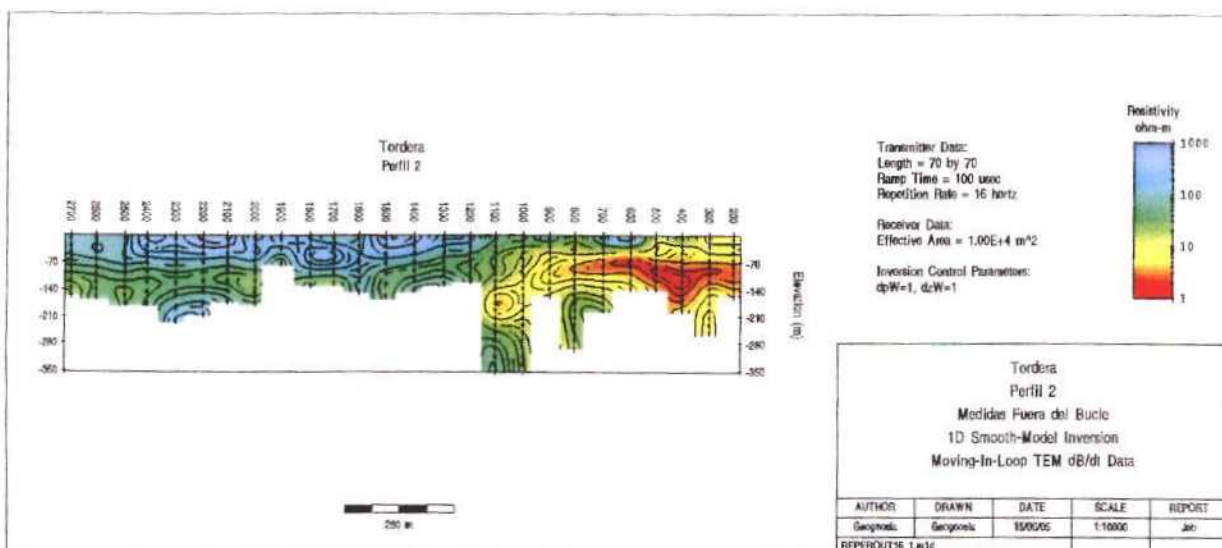


Figura 7.92 Perfil PS-4. Medidas fuera del bucle 16Hz Peso modelo inicial 1; suavizado 1. Orientación N-S

Básicamente, todos los modelos aportan la misma información. Las medidas fuera del bucle son muy similares a las tomadas dentro, lo que implica una geología muy horizontal, y además sirve de verificación de la información tomada en el centro de cada bucle emisor.

La profundidad de investigación varía mucho de unas estaciones a otras, llegando casi todo el perfil hasta 150 metros de profundidad. Esta variación es debida a la diferencia de materiales de unas estaciones a otras y por supuesto al ruido externo.

Aunque los modelos presentados en este último apartado son los más fiables (haber sido sometidos a varios criterios de calidad, limpieza de los datos, retirada de las ventanas con ruido), se ha preparado también un modelo generado con los datos tomados dentro del bucle y con frecuencia de emisión 8Hz, usando como parámetro del peso de suavizado 10, para subrayar el cambio lateral existente entre las estaciones 11 y 12. Este cambio lateral es claro en todos los modelos, pero se visualiza con mayor claridad usando altos pesos en el suavizado, ya que al suavizar mucho el modelo se pierde información de capas pequeñas pero que pueden suponer cambios importantes:

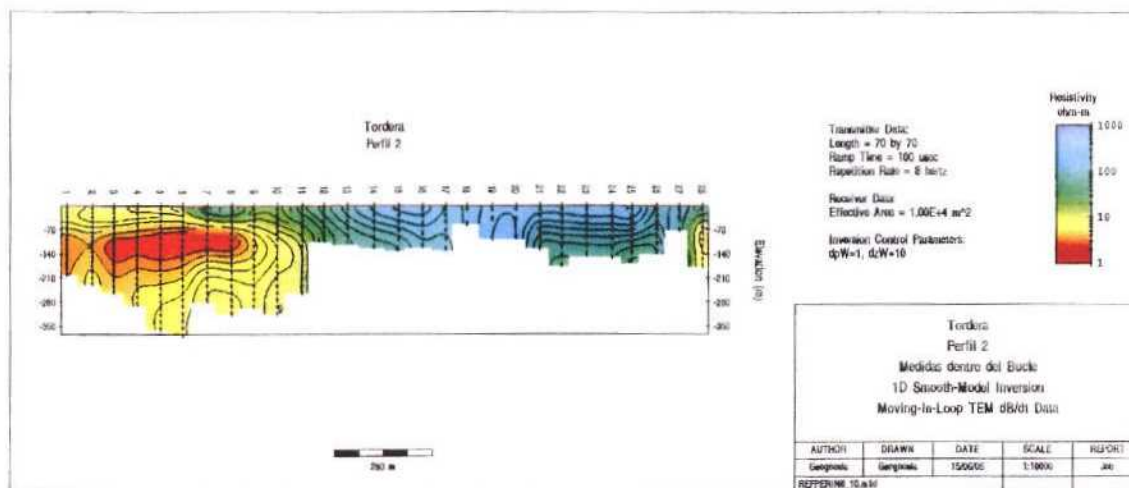


Figura 7.93 Perfil PS-4. Medidas dentro del bucle. 8Hz. Peso modelo inicial 1; suavizado 10.

Comparando con la información obtenida en los modelos con pesos de suavizado menores, se aprecia que por debajo de los 100 metros y a partir de la estación 12 se encuentra una capa más conductora que la capa superficial, excepto en las estaciones 18, 19 y 20 (estaciones que tiene mucho ruido y en las que sólo se han utilizado las primeras 3 o 4 ventanas, por lo tanto no son representativas). En la estación 28 se encuentra un conductor más potente a unos 50 metros de la superficie; esta estación es limpia en apariencia, pero se encuentra cerca de muchas estructuras causantes de ruido, por lo que aunque la información medida parece no estar afectada por el ruido, hay que tratarla con cautela debido a su posición.

En resumen y como conclusión final después del análisis completo de toda la información obtenida sobre el perfil PS4 y habiendo tomado medidas a dos frecuencias distintas y dentro y fuera del bucle, y siendo todas las medidas similares para cada estación cabe señalar lo siguiente:

- Hay un cambio lateral importante entre las estaciones 11, 12 y 13, que separa dos zonas distintas, una más conductora cerca del mar de otra más resistiva (esto podría interpretarse con la influencia de una intrusión salina).
- Por debajo de la zona más resistiva (de unos 100 Ohm-m) a partir de la estación 12 o 13, se encuentra de nuevo una zona más conductora, excepto en las estaciones 18, 19 y 20, que como se ha dicho anteriormente, tienen mucho ruido y no deben tenerse en cuenta.
- La estación 28 presenta un conductor importante a unos 50 metros, aislado, que no tiene continuidad en las estaciones anteriores, y que, por ser el fin del perfil, no se sabe si la tiene en las estaciones siguientes. Esta estación de ser, no obstante, interpretada con precaución por los motivos expuestos anteriormente.

Se han medido también dos estaciones sueltas, por encima del primer puente que cruza el Río Tordera desde el mar: las estaciones 29 y 30 (Figura 7.94). Ambas estaciones se han medido a dos frecuencias, como el resto del estudio.

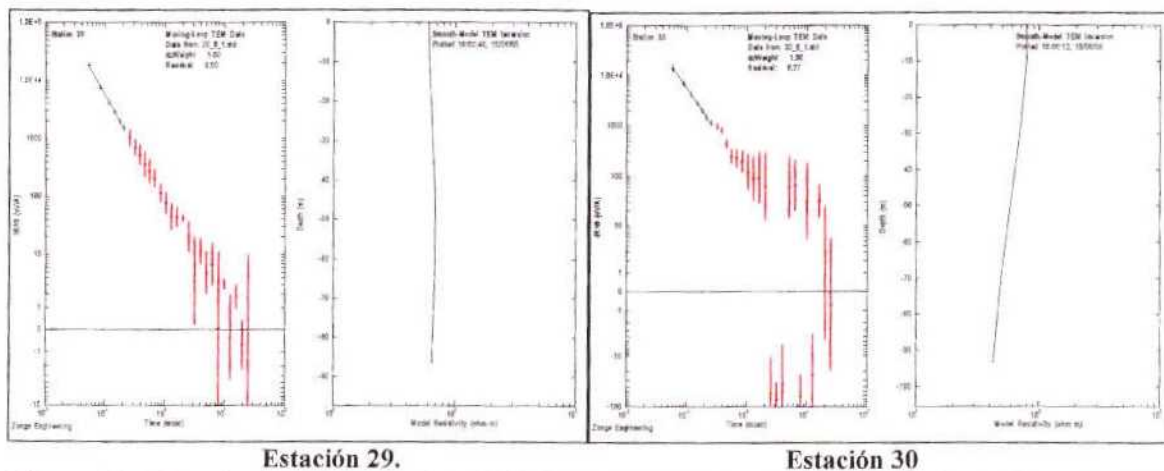


Figura 7.94 Transitorios y curvas de resistividad obtenidas en las estaciones medidas fuera del Perfil PS4, al norte de la zona.

En ambos casos la información aportada es insuficiente para hacer una interpretación muy detallada, ya que se han podido utilizar sólo las 6 o 7 primeras ventanas respectivamente. No se tomaron medidas fuera ya que cuando en el centro del bucle hay mucho ruido, fuera, donde la señal emitida es menor, el ruido es más importante. Cabe solamente destacar que las resistividades, en ambos casos, tienen poca variación en los primeros 90 metros, y son de alrededor de 60 Ohm-m; también en ambos casos, parece ser que con la profundidad la resistividad disminuye, teniendo la misma tendencia que a partir de la estación 12 en el Perfil PS4.

8. CAMPAÑAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA EN EL HORST DE BECHI (CASTELLÓN)

Como ya se ha comentado en la introducción, unas de las zonas de ensayo seleccionada en Proyecto corresponde al sistema acuífero 56.01 de La Plana de Castellón. El detalle de la información geológica, hidrogeológica, geofísica y de sondeos mecánicos de este acuífero se encuentra recogido en el Anexo B. Tras el análisis de esta información previa, se seleccionaron dos posibles áreas de actuación:

Sector occidental de Villarreal: En esta zona, el acuífero pliocuaternario tiene más de 150 m de potencia. Se dispone de la información suministrada por los sondeos mecánicos CS-3, CS-2, VR-1 y CS-1 y por el perfil 3 de Sondeos Eléctricos Verticales de la campaña de 1972 de Aeroservice (perfil 9 en la reinterpretación de Astier del año 1973). El objetivo que se propone es estudiar la capacidad de los métodos geoeléctricos para definir la geometría del basamento mesozoico, donde destaca la presencia de un horst de dirección NE-SO, limitado por fallas con un salto vertical superior a los 150 m.

Sector meridional de la Plana, entre Nules y Chilches: En esta zona no existen sondeos mecánicos con columnas fiables, pero existen dos campañas de SEV y una de Polarización Inducida. El acuífero se encuentra intruido por agua de mar, presentando el agua subterránea concentraciones de 1000 mg/l al NO de Moncófar. En una primera reunión de los componentes del equipo de trabajo, se descartó la segunda área debido, entre otras cosas, a la falta de información fiable existente en la misma, fundamentalmente de sondeos mecánicos. Por lo tanto se seleccionó como zona de actuación la zona correspondiente al sector de Villarreal.

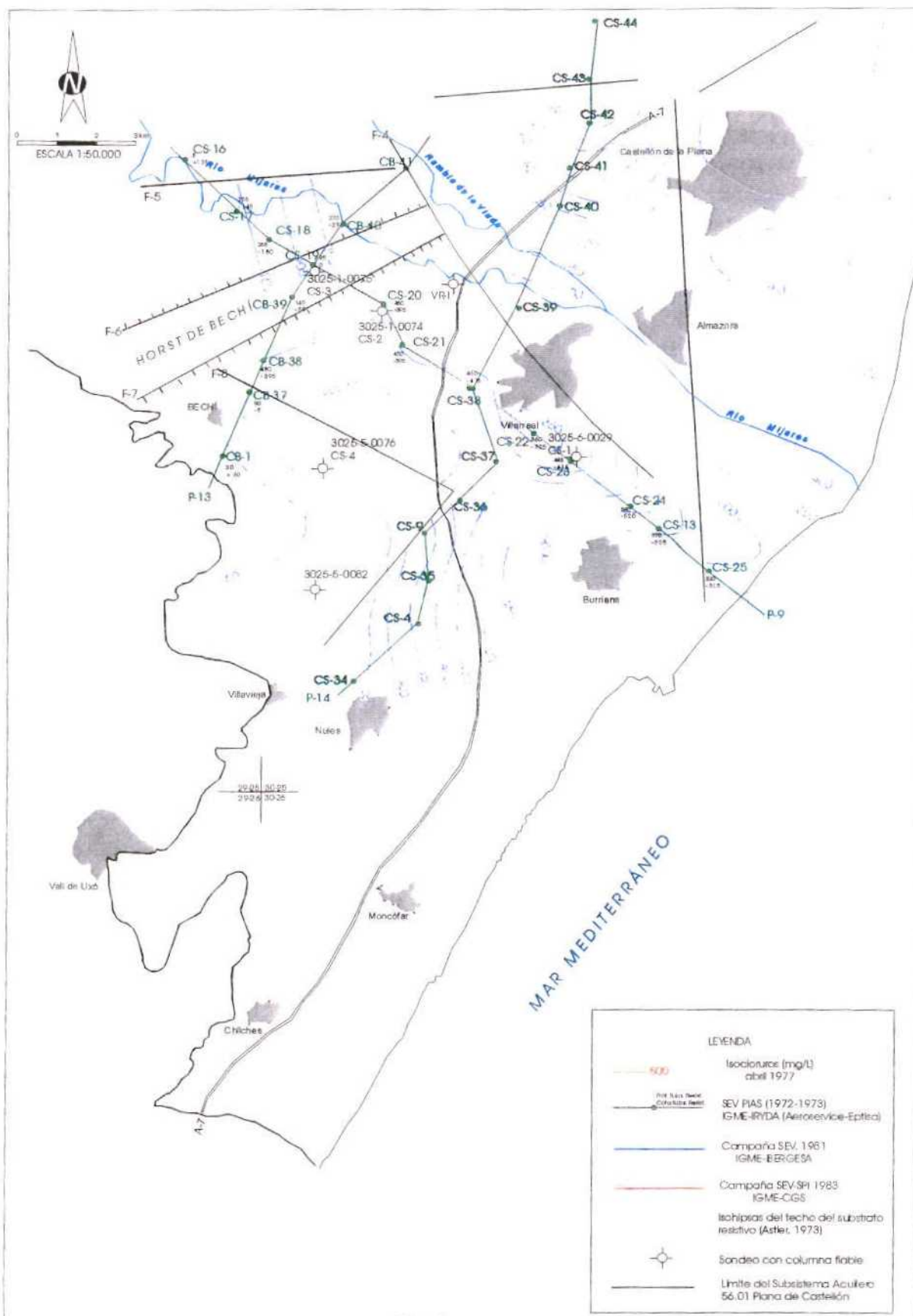


Figura 8.1 Área de Villareal

8.1 DATOS PREVIOS

En esta zona se dispone de la información geofísica procedente de la campaña de sondeos eléctricos verticales que Aeroservice realizó para el IGME-IRIDA en 1972 dentro del PIAS, y que fue reinterpretada por Astier en 1973, Figura 8.1. Según el informe de Astier la mayor parte de los SEV ponen en evidencia la existencia de las cinco formaciones siguientes:

- una formación resistiva superficial
- un primer conductor
- una formación resistiva intermedia
- un segundo conductor
- un substrato resistivo.

La formación resistiva superficial corresponde a las arenas, gravas y conglomerados cuaternarios; esta formación está dividida en dos o tres capas por unas pasadas de arcillas; la parte inferior de esta formación, situada bajo el nivel hidrostático, constituye el primer acuífero o acuífero cuaternario. El primer conductor lo constituye una capa espesa de arcillas probablemente plio-miocena, con espesores entre 60 y 80 metros. Algunas veces este conductor desaparece o disminuye enormemente su espesor.

La formación resistiva intermedia, no aparece claramente en todos los SEV, su naturaleza litológica es muy variable, pero pertenece siempre a la edad miocena. Esta formación resistiva intermedia constituye el segundo acuífero, y junto con el acuífero cuaternario forma lo que se denomina el acuífero mio-cuaternario. Este acuífero es monocapa en los lugares donde el primer conductor desaparece o bicapa en el caso contrario.

El segundo conductor tiene un espesor de varios centenares de metros, en su mayoría corresponde a las arcillas y margas miocenas, y constituye la base impermeable del acuífero. El substrato resistivo corresponde al techo del mesozoico. Según el mismo informe, el mapa del substrato resistivo pone de manifiesto la existencia de nueve grandes fallas que dividen la región en ocho grandes compartimentos (Figura 8.1). Entre ellas las fallas F5, F6 y F7 se encuentran una zona particularmente compleja. La falla F5 limita hacia el sur las calizas aptienses y prolonga de alguna manera las fallas F1 y F2. Las fallas F6 y F7 delimitan un horst de dirección bética, llamado horst de Bechi.

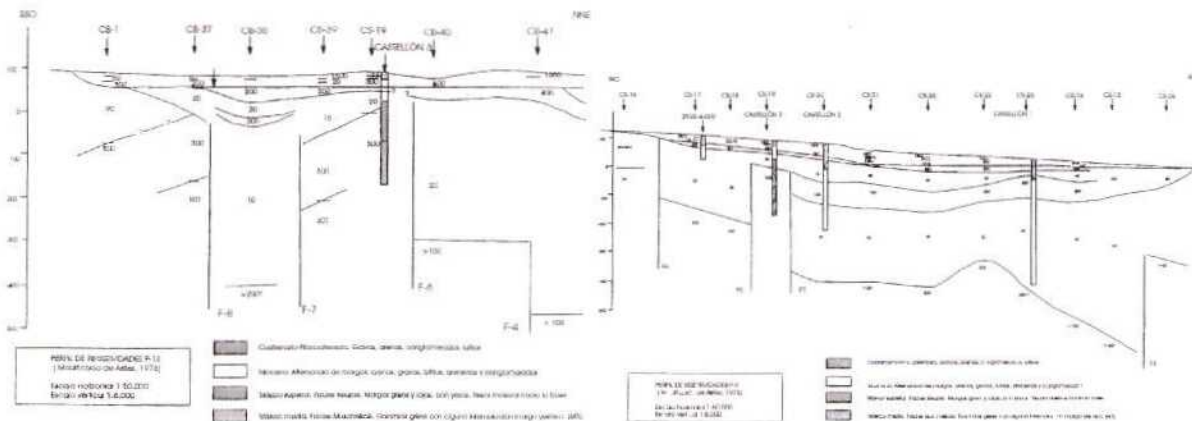


Figura 8.2 Cortes geoelectrónicos a partir de SEV de la zona del Horst de Bechi, y sondeos mecánicos de apoyo.

Es este horst el que se ha considerado como objetivo de la campaña de campo en esta zona. Esta estructura está cartografiada mediante SEV, perfiles 9 y 13, y está comprobada mediante el sondeo mecánico Castellón 3 (3025-1-0075) (Figuras 8.1 y 8.2). Según estos datos, el substrato se encuentra entre los 100 y 150 m de profundidad y posee un contraste de resistividad suficiente, de 15-20 ohm.m a 300 ohm.m. El objetivo de este ensayo consiste en comprobar la existencia del horst y cartografiar su desarrollo mediante las técnicas de perfiles continuos de resistividad y sondeos magnetoteléuticos.

8.2 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO PERFILES DE RESISTIVIDAD

8.2.1 Diseño y ejecución de las campañas de campo

Con vistas a cubrir los objetivos planteados en esta zona se planificaron los siguientes trabajos de campo:

Un primer perfil geoelectrico con una longitud de 1500 m y de dirección norte sur, de tal forma que atravesase la estructura con dirección ortogonal a la misma. Parte del río Millares y sigue el camino denominado de "la ratlla", hasta la granja situada antes de las fábricas de cerámica, Figura 8.3. El sondeo mecánico Castellón3, localizado dentro del horst, está situado junto a la granja. La existencia de una nueva autovía en construcción, que no figura en la cartografía disponible, ha impedido la continuidad de este perfil hacia el sur, no pudiendo medirse más allá de la granja mencionada, por lo que el perfil no ha podido atravesar el horst completamente.

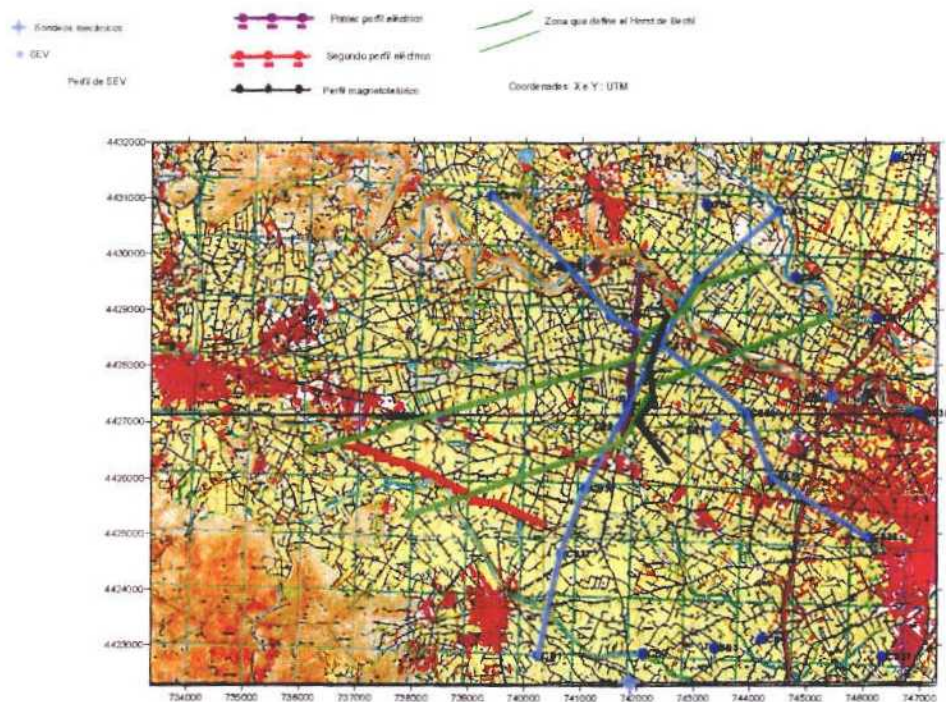


Figura 8. 3 Situación de las medidas por tomografía eléctrica y magnetoteléutica.

Por esta razón fue realizado un segundo perfil geoelectrico situado al suroeste del anterior, con una longitud de 3000 m, y dirección es sureste-noreste. Sigue el camino denominado de

la Volta desde su intersección con la CV10 al noroeste de la población de Bechí, y llega hasta la parte sur de la población de Onda, Figura 8.3. Se programó este perfil por considerar que era el único que podía realizarse dentro de la zona con posibilidad de atravesar el horst completamente, aunque de una manera oblicua al mismo. En esta zona no se dispone de información geofísica previa o de sondeos mecánicos en los que apoyar la interpretación.

También se realizó la medición de unas estaciones de magnetotelúrico, en concreto 6, situadas en un perfil paralelo al primer perfil geoelectrico. (Figura 8.3)

Los perfiles de resistividad, tomografía eléctrica, se midieron utilizando el sistema multielectrónico LUND, de la casa sueca ABEM, propiedad del IGME. Este equipo se compone del resistivímetro SAS 4000, que controla la secuencia de medición; un selector de electrodos de cuatro canales, que gestiona, según el protocolo de medida adoptado, la conexión de los cuatro electrodos empleados en la medida, dos de corriente y dos de potencial; por último se dispone de cuatro cables multielectrónicos de medida, cada uno con veinte tomas de salida, donde se conectan los electrodos. La interpretación de los perfiles fue hecha con el programa RES2DINV v. 3.46b de M.H. Loke, empleándose tanto para la inversión de los datos de campo como para la obtención de los perfiles de resistividad finales. Una descripción del sistema operativo seguido ha sido ya realizada en el párrafo 7.3 de este Informe.

Dadas las características del objetivo planteado, y según los principios enumerados en el párrafo 7.3, se ha seleccionado un dispositivo Wenner, con distancia entre electrodos de 15 m, por lo que un dispositivo completo, cuatro cables de 20 tomas cada uno, tiene una longitud de 1200 de metros; la prolongación del perfil se realiza mediante desplazamientos de un cable de 300 metros. Además, en el primer perfil el último dispositivo fue medido también empleando una configuración dipolo-dipolo. Los parámetros empleados en la inversión han sido los mismos para todos los perfiles.

El primer perfil se midió durante los días 22 y 23 de junio de 2004. Su longitud total es de 2400 m, con acimut que oscila entre los 189 y los 200 grados (Figura 8.3) con dispositivo Wenner, repitiendo la parte final del perfil, 1200 m, con un dispositivo dipolo-dipolo.

El segundo perfil, cuya situación se indica en la Figura 8.3, se midió durante los días 24 y 29 de junio de 2004, tiene una longitud total de 3600 m, y se ha medido con un dispositivo Wenner con 15 m de espaciado mínimo entre electrodos. Este perfil tiene una dirección noroeste-sureste, y se ha orientado con bastante inclinación con el fin de intentar atravesar el horst de Bechí en su totalidad.

8.2.2 Proceso e interpretación de datos

La inversión del primer perfil se ha realizado empleando el algoritmo robust constrain del programa RES2DINV. El resultado está representado en la Figura 8.4, donde en la parte superior se reproduce el perfil medido con el dispositivo Wenner, con indicación de los puntos de corte con los perfiles eléctricos y la proyección en el perfil de la situación de las estaciones medidas con magnetotelúrico. Se aprecia la existencia de un relleno cuaternario con un espesor de unos 35 a 40 m más o menos constante a lo largo del perfil, formado por arenas, gravas y conglomerados. Bajo este cuaternario se encuentra un conductor, arcillas y margas miocenas, que rellena la cuenca. En la parte final del perfil, a partir del metro 800

desde el centro del primer dispositivo y hasta el final, se observa la presencia de un sustrato resistivo que se ha correlacionado con una elevación del techo mesozoico, el horst objetivo del ensayo, y que aparece hacia los 100-120 m de profundidad, tal y como se esperaba. Este horst no ha podido cartografiarse en su totalidad, ya que el perfil no ha podido prolongarse debido a la existencia de una autovía en construcción. En la parte inferior de la Figura 8.4 se muestra el resultado de la inversión para el tramo del perfil medido con el dispositivo Dipolo-Dipolo; en la representación se han enfrentado los tramos coincidentes de ambos; como puede observarse el resultado del perfil Dipolo-Dipolo es igual al obtenido con el dispositivo Wenner, confirmando la existencia a la misma profundidad del tramo resistivo, asociado al horst, en la parte final del perfil, y por lo tanto puede deducirse que en este tipo de estructuras tiene el mismo poder resolutivo el empleo de uno u otro tipo de dispositivo de medición.

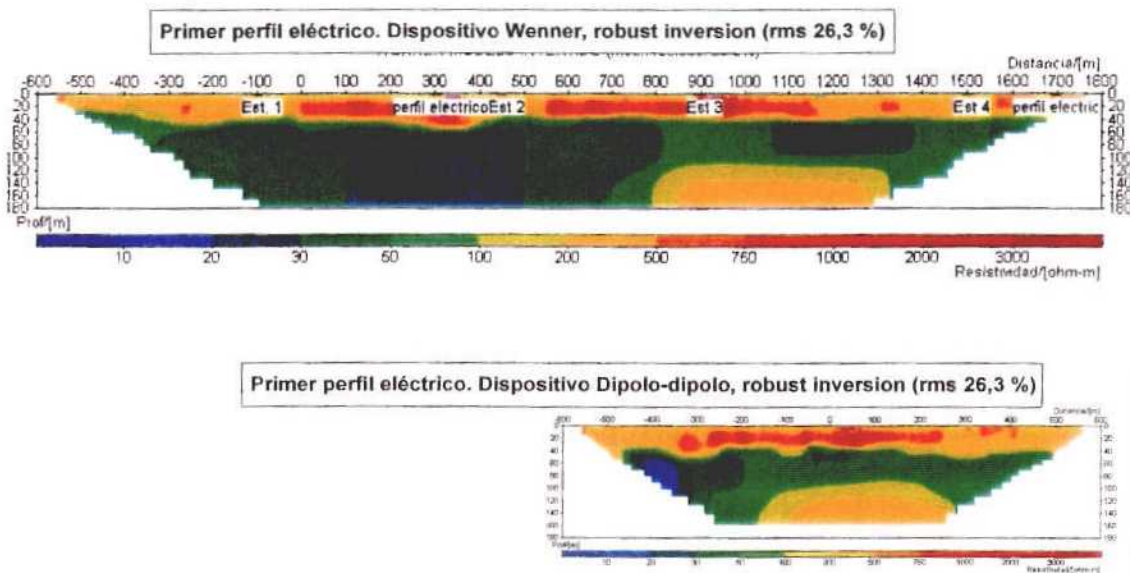


Figura 8. 4. Resultado de la inversión del primer perfil.

En la Figura 8.5 se reproduce el resultado de la inversión del segundo perfil. La paleta de colores empleada en su representación es la misma que la utilizada en los resultados del primer perfil para poder compararlos. En este perfil se observa cómo la cobertera cuaternaria, formada por arenas, gravas y conglomerados, se va estrechando a medida que se progresa hacia el Norte, llegando a casi desaparecer a partir del metro 1500. No se observa un sustrato resistivo tan claro como en el perfil anterior, pero si se intuye la presencia del mismo entre los metros 900 y 1900 y entre los metros 2100 y el final, indicado por una ligera subida de resistividad pero sin alcanzar los valores de los perfiles anteriores. Este resistivo, con un valor de resistividad igual a la del material que cubría el resistivo en el perfil anterior, parece estar indicando la presencia del horst, que en esta zona se encuentra más profundo, por lo que en este caso no ha sido claramente alcanzado.

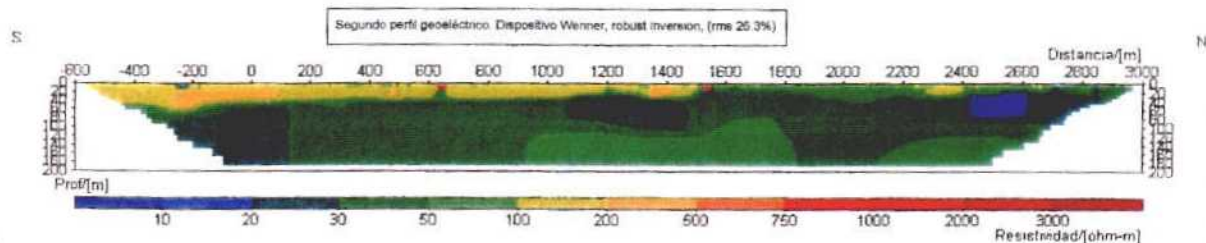


Figura 8.5. Resultado de la inversión del segundo perfil.

8.3 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

8.3.1 Diseño y ejecución de las campañas de campo

La campaña de adquisición de datos magnetotelúricos se planeó según un perfil en la dirección NS para poder atravesar el horst. La zona estaba cruzada por dos líneas de alta tensión que podían afectar a los registros, y para reducir su efecto y el de la carretera sobre la que se hizo el primer perfil de eléctrica, el perfil de AMT se situó a unos 500 m hacia el este (figura 8.3). Dado el objetivo de estudio con estructuras superficiales se consideró para este caso que el instrumento más adecuado era el equipo Stratagem 4EH la Universidad de Barcelona sin fuente artificial.

La campaña se ejecutó el 16 de junio de 2004. El perfil tuvo una longitud de 2,5 km, y se adquirieron seis estaciones, con una separación promedio de 500 m entre estaciones. Los dos puntos situados más al sur están muy afectados por autovía de reciente construcción, ya que están hechos a cada lado de esta autovía, y los datos son de peor calidad.

8.3.2 Proceso e interpretación de datos

Los datos se han procesado y analizado sugiriendo una dirección estructural geoelectrica de 45E, de manera que los puntos del perfil se han proyectado según un perfil con la dirección 135E para realizar su inversión. Ello hace que el modelo presentado (figura 8.6) se interprete como un objeto bidimensional con aquella dirección estructural (45E). El convenio para la paleta de colores de la resistividad que se ha utilizado es habitual en magnetotelúrica: los valores altos corresponden a los azules, mientras que los bajos, a los rojos, que es el opuesto al del empleado en los modelos de eléctrica.

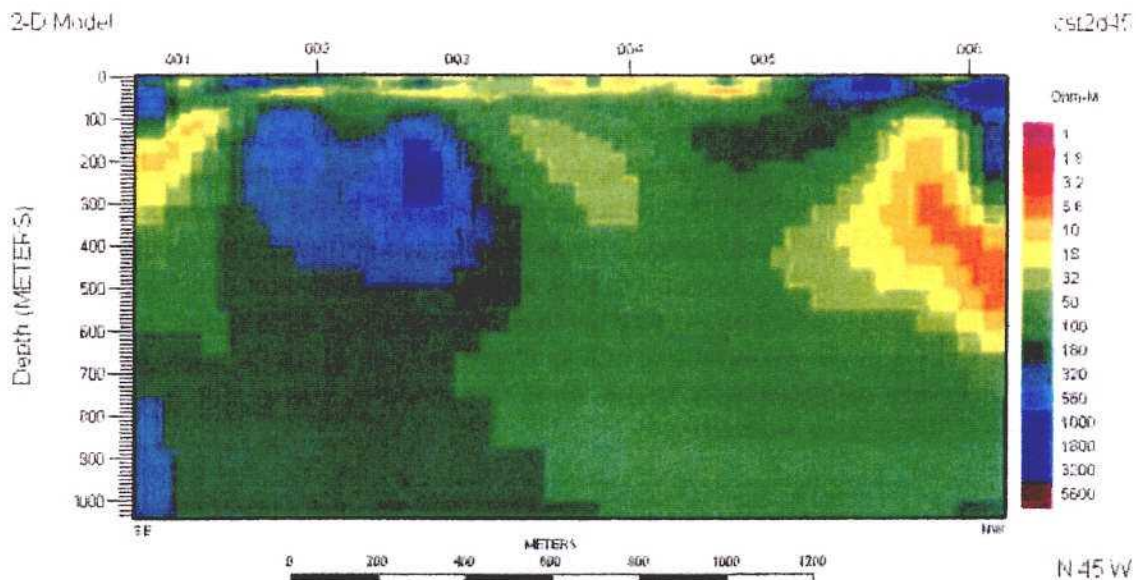


Figura 8.6 Perfil magnetotelúrico

La longitud del modelo proyectado es de unos 2000 m; situando el NO a la izquierda y el SE a la derecha. Se identifica claramente una estructura resistente situada bajo los puntos

proyectados de las estaciones 02 y 03, con un techo situado a unos 100 m, que estaría asociado al horst. El conductor superficial presenta continuidad entre las estaciones 01 y 05, y estaría asociado a los sedimentos terciarios. Bajo las estaciones 05 y 06 aparece un objeto resistivo superficial de unos 100 m de potencia, bajo el que aparece una estructura altamente conductora.

9. CAMPAÑAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA EN LA ZONA COSTERA DE LA MARISMA DE CÁDIZ

La Bahía de Cádiz tiene una extensión de unos 50 km² y forma romboidal, con los márgenes definidos por alineaciones aproximadamente NE-SO y NO-SE. Está limitada al oeste por el Océano Atlántico y el istmo de Cádiz, de unos 14 m de altitud, 12 km de longitud y orientación NNO-SSE; al norte y al este por el relieve continental, constituido principalmente por unidades detríticas postorogénicas; y al sur por la flecha litoral de Sancti Petri y el relieve de Chiclana de la Frontera. En el interior se encuentra un relieve, de unos 29 m de altitud y orientación NE-SO, sobre el que se sitúa la ciudad de San Fernando.

Desde un punto de vista geográfico e hidrodinámico, la bahía de Cádiz está claramente dividida en tres sectores: una bahía externa, conectada al mar abierto, situada al norte y noreste de la ciudad de Cádiz; una bahía colmatada que corresponde al relleno del antiguo estuario del río Guadalete (Flecha de Valdelagrana y marismas del Guadalete); y una bahía interna, localizada al sur, separada por el Estrecho de Puntales y de facies predominantemente mareales.

Los sedimentos que ocupan el fondo de la bahía externa son arenosos y arenoso limosos en la parte más abierta al océano, y fango-arcillosos en la interna. La parte colmatada de la bahía está ocupada por marismas. La bahía interna constituye un área más restringida y está dominada por ambientes mareales someros. Presenta un gran desarrollo de marismas que configuran una superficie llana de unos 30 km² de área entre las poblaciones de Puerto Real al norte, San Fernando al oeste y Chiclana al sur. Las marismas se ponen en contacto con el mar abierto a través del caño de Sancti Petri. Hasta hace pocos siglos, este caño aislaba la zona donde se sitúa la población de San Fernando (antigua Isla de León) formando una isla dentro de la bahía. Posteriormente, se produjo el relleno y colmatación de esta parte de la Bahía hasta llegar a la marisma actual, cuya evolución ha sido muy rápida en los últimos cientos de años.

Una descripción completa de la geología de esta zona se encuentra recogida en el ANEXO C. La formación y constitución de los sedimentos de la Bahía externa y parte colmatada, son actualmente bastante conocidos. En la zona de la bahía interna el espesor máximo conocido de sedimentos holocenos es de 10 m, estando constituidos por arenas transgresivas en la base, que afloran al este de Cádiz en la zona dragada artificialmente del canal del Puntal, y están cubiertas por fangos. Actualmente se tiene muy poca información del subsuelo de esta parte de la bahía, donde únicamente un sondeo de siete metros no llega a alcanzar el sustrato pleistoceno. Sin embargo, si se posee un buen conocimiento de los sedimentos que afloran en superficie. Dentro de las marismas afloran depósitos marinos holocenos que se podrían atribuir al máximo transgresivo flandriense. Entre estos depósitos cabe señalar una terraza marina colgada situada al sur de Barrio Jarana. Esta terraza (+2,5-3 m), datada entre 4860 y 5325 a BP, está constituida por 1,5-2 m de arenas con abundantes restos de bivalvos y está cubierta por un glacis proveniente de los relieves circundantes. El primer depósito, situado al sur de Puerto Real, es una terraza marina (+0,76 m) constituida por depósitos de playa que contienen cerámica romana de los siglos I y II d.C. Cerca del Coto de la Isleta, situado en la desembocadura sur del caño de Sancti Petri, encuentran tres niveles altos de marisma y llanura mareal a las cotas de +0,1, +0,34 y +0,66 m, cuyo nivel superior contiene cerámica romana de los siglos I o II d.C. El cordón arenoso se extiende en dirección norte-sur, y está constituido por gravas y arenas de edad 2900 a 2500 a BP y corresponde al final de la primera fase progradante atlántica. Por diversas consideraciones, resulta de gran interés profundizar en el conocimiento de la potencia y morfología de estas colmataciones.

9.1 DATOS PREVIOS

En esta zona, se dispone, además de toda la información geológica expuesta en el ANEXO C, de la información procedente de la testificación geológica de varios sondeos mecánicos, que ha sido realizada por el Área de Investigación y Estudios Geológicos del IGME dentro del proyecto: "Evaluación histórica de la sedimentación en las marismas de la Bahía de Cadiz y bajo Guadalquivir".

Los sondeos mecánicos de esta zona, bahía interna de Cádiz, muestran la existencia de un relleno antrópico de espesor variable formado por biclastos, arena y cantos, seguido de unos depósitos de estuario compuestos de arcillas con alguna intercalación de arenas marinas, en algunas zonas continúan unos depósitos fluviales compuestos de arenas y arcillas, antes de alcanzar la facies marina (ostionera) compuesta de arenas y constituye la base de los sondeos.

Dada la importancia que tiene para el proyecto anterior el conocer la evolución y el espesor de los depósitos de estuarios y fluviales por encima de la ostionera, se consideró de interés evaluar la posibilidad del método de las imágenes eléctricas, tomografía eléctrica, para tal fin, y estudiar su respuesta dentro de un ambiente tan conductor.

Con este objetivo se seleccionaron tres sondeos mecánicos de entre los realizados en la zona, sondeos 12, sondeos 17 y sondeo 30, localizados según se observa en la Figura 9.1, y se midieron perfiles eléctricos junto a ellos. Estos perfiles se midieron con diferentes configuraciones de electrodos y adecuando el espaciado entre los electrodos a la información disponible.



Mapa de Situación de los perfiles realizados en la Bahía de Cadiz

Figura 9.1 Plano de situación de los perfiles geoelectricos y sondeos mecánicos.

9.2 TOMA DE NUEVOS DATOS CON EL MÉTODO PERFILES DE RESISTIVIDAD

Dada la profundidad de investigación requerida en este caso, solamente se ha considerado la toma de datos con el método de imágenes eléctricas o Perfiles de Resistividad, único método de los empleados en este Proyecto con la capacidad de resolución requerida en función de los objetivos. En efecto, cómo fue explicado anteriormente, la profundidad y resolución vertical viene controlada en este método por la distancia interelectródica empleada.

9.2.1 Diseño y ejecución de las campañas de campo

Con vistas a cubrir los objetivos planteados en esta zona se planificaron trabajos de campo efectuando perfiles que pasaran lo más cerca posible de los sondeos mecánicos disponibles. A fin de controlar lo mejor posible la resolución tanto vertical como horizontal, en todos los casos se han utilizado dos configuraciones diferentes: Wenner y Wenner-Schlumberger, variando la separación interelectródica en función de las circunstancias de cada zona en concreto. Los datos se han tomado utilizando el sistema multielectródico LUND, de la casa sueca ABEM, propiedad del IGME, ya explicado anteriormente

En la zona del sondeo 17 se realizó un perfil con un espaciado entre electrodos de 1m, con centro en el sondeo mecánico, longitud total de 80 metros y acimut de 55 grados. Este perfil se midió durante el día 7 de octubre de 2004

En la zona del sondeo 12 se realizó un perfil con espaciado entre electrodos de 5 m, alcanzando una longitud total de 700 m de perfil, en dirección oeste-este. Este perfil se midió durante los días 5 y 7 de octubre de 2004.

Junto al sondeo 30 se efectuó un perfil con espaciado entre electrodos de 5 m, alcanzando una longitud final de 700 metros. Este perfil se realizó con dirección norte-sur, paralelo a la entrada del caño de Sancti Petri, dentro de una piscifactoría natural aprovechando los caminos existentes. Se midió el día 14 de octubre de 2004.

Dadas las distancias entre electrodos empleadas en este trabajo, que han sido de 1 y 5 m, un dispositivo completo, cuatro cables de 20 tomas cada uno, constituye un dispositivo de 80 metros de longitud, para la distancia entre electrodos de 1 m, y de 400 m para el caso de 5 m. El desplazamiento del dispositivo se realiza mediante cambios de un cable, 20 y 100 metros respectivamente.

9.2.2 PROCESO E INTERPRETACIÓN DE DATOS

En la Figura 9.2 se representa el resultado de la inversión del **Perfil geoelectrico en el sondeo 17**, empleando el algoritmo robust constrain del programa RES2DINV. En la parte superior se observa el perfil medido con el dispositivo Wenner, en el que se ha incluido la columna simplificada del sondeo mecánico donde se indica el paso de la fácies de estuario a la fácies marina (ostionera) que se considera el sustrato. En la parte inferior se observa el resultado del perfil medido con el dispositivo Wenner Schlumberger, con la información del sondeo mecánico también representada.

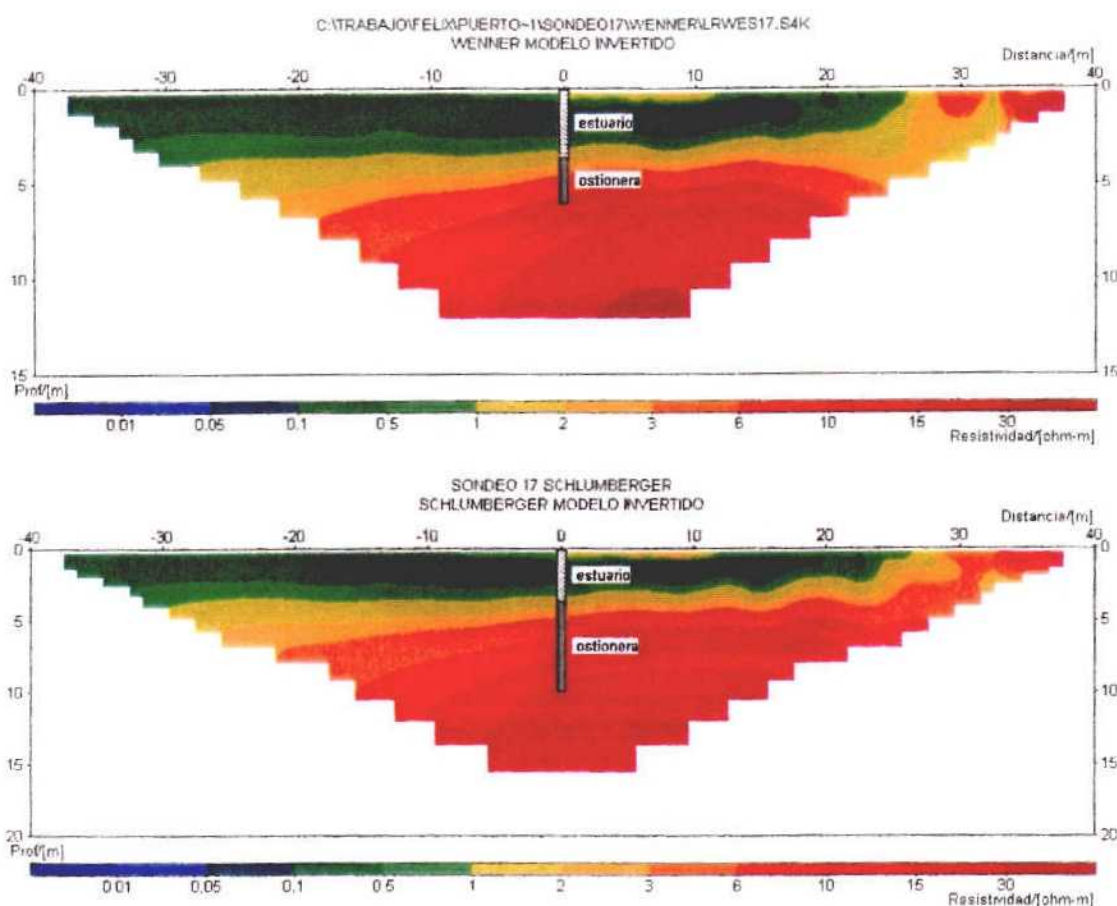


Figura 9.2 Inversión del perfil tomado en la zona del sondeo 17, con ambos dispositivos.

De la observación de los dos perfiles se deduce que ambos proporcionan la misma información, cartografiando el espesor de la fásies estuario y el techo de la ostionera; en los dos se aprecia como la fásies estuario se acuña hacia el este hasta desaparecer al final del perfil, mientras que la fásies estuario tiende a tener un poco más de espesor hacia el oeste. En ambos perfiles se observa la presencia de un tramo resistivo superficial entre el centro del perfil y el metro 10 hacia el este.

Los resultados de la inversión del **Perfil geoelectrico en el sondeo 12** se han representado con la misma paleta de colores que la empleada en el perfil del sondeo 17. En ambos perfiles, Figura 9.3 se ha representado la columna simplificada del sondeo 12, mostrándose la fásies de estuario y la ostionera. Como se observa en la figura las interpretaciones con los dos dispositivos son muy parecidas, cartografiando la fásies estuario y el techo de la ostionera; se aprecia un mayor espesor de la fásies estuario al oeste del perfil, acuniándose hacia el este hasta desaparecer al final este del perfil. La morfología de la fásies estuario es más irregular, y con un mayor espesor en el perfil Wenner donde se extiende más hacia el este.

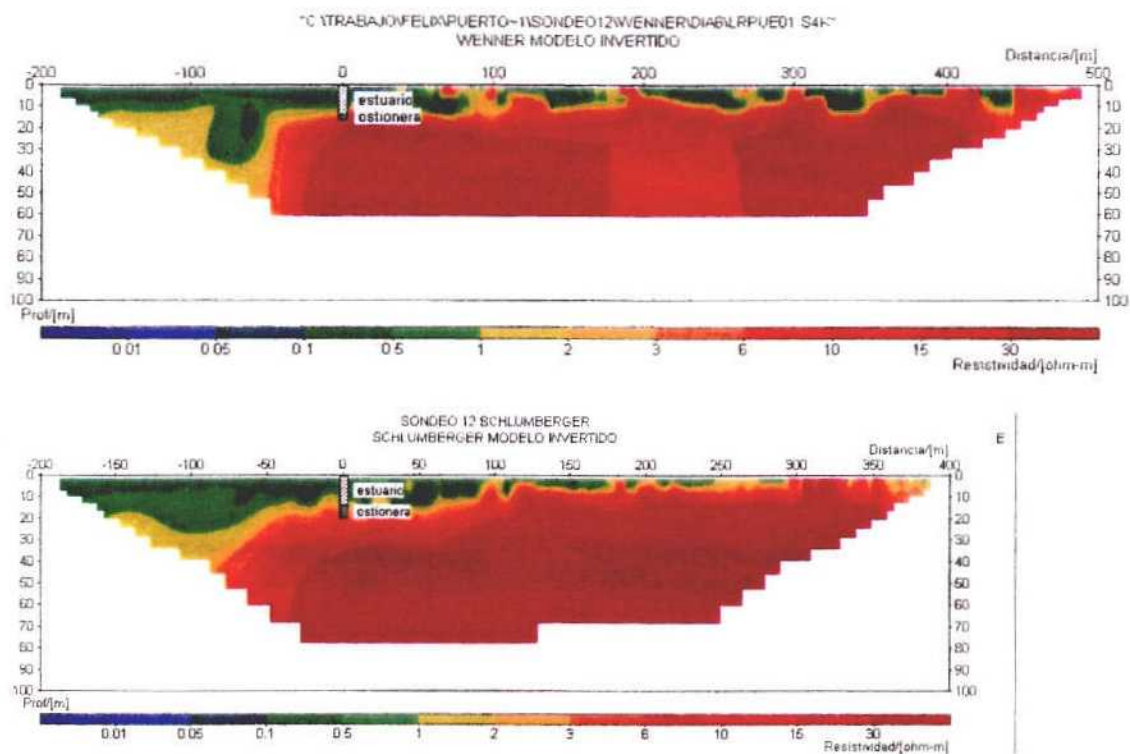


Figura 9.3 Inversión del perfil tomado en la zona del sondeo 12, con ambos dispositivos.

Los resultados de la inversión del **Perfil geoelectrico en el sondeo 30** para ambos dispositivos y con la columna simplificada del sondeo 30 representada en ellos, se observan en la Figura 9.4, en ellos se ha empleado la misma paleta de colores que la utilizada en los dos perfiles anteriores. Como se observa este es el perfil más “ruidoso” de todos, posiblemente por el sitio en el que fue realizado, presentando un aspecto más suave el perfil medido con el dispositivo Wenner que el medido con el dispositivo Wenner-Schlumberger. La información que proporcionan ambos perfiles es muy similar, representando los dos en los mismos lugares unos tramos resistivos que se han correlacionado con la ostionera. En este perfil la fácies estuario no es regular a lo largo del mismo, presentando zonas de mayor espesor donde no parece alcanzarse la ostionera. Ambos perfiles coinciden en atribuirle una mayor entidad a esta fácies en el sur del perfil. La ostionera se presenta más superficial en la parte central del perfil, desde los 50 m hacia el sur y desde el centro hasta los 250 m.

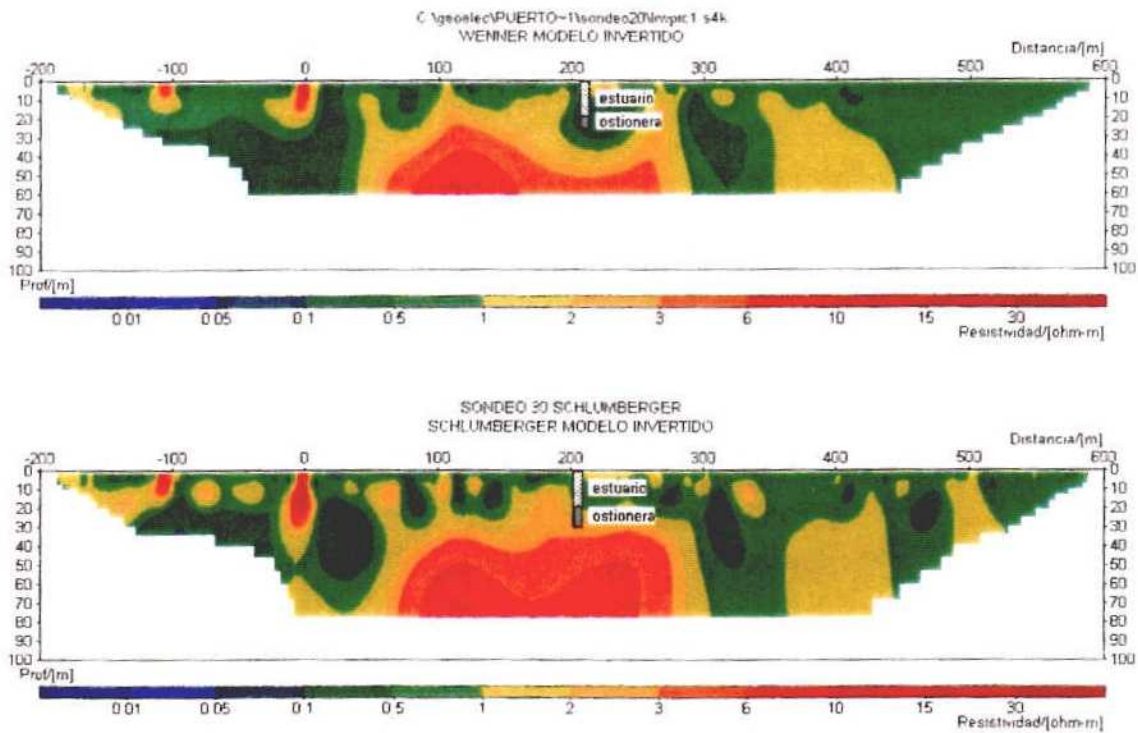


Figura 9.4 Inversión del perfil tomado en la zona del sondeo 30, con ambos dispositivos.

A la vista de los resultados de la inversión de los diferentes perfiles, y su correlación con las columnas simplificadas de los sondeos mecánicos que se han empleado como referencia, se aprecia cómo la tomografía eléctrica ha definido bastante bien la situación de la fácies estuario, su espesor y su morfología, siendo una metodología apta para abordar temas de superficiales de alta resolución.

ANEXO A

INFORME HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA DEL RÍO TORDERA

ANEXO A

Contexto geográfico de la zona de estudio en el río Tordera

La cuenca del río Tordera está situada al NE de Catalunya, en el límite de las provincias de Girona y Barcelona. El Tordera tiene una longitud de 65 km, nace en el Montseny, en la Font Bona, situada en el collado de Sant Marçal y desemboca entre las poblaciones de Blanes y Malgrat de Mar, formando un pequeño delta de unos 21 km². La cuenca hidrológica del Tordera drena una superficie de 1786 km², y comprende su curso fluvial y afluentes principales, así como su sistema acuífero asociado.

En el curso del Tordera se identifican tres tramos hidrológicos: 1) el alto Tordera, desde la cabecera hasta el municipio de Sant Celoni; 2) el Tordera medio que comprende el tramo desde Sant Celoni hasta la confluencia de la riera de Santa Coloma, y 3) el Bajo Tordera que se extiende desde Fogars de Tordera hasta la desembocadura.

El curso fluvial presenta una morfología típica de río de llanura, con suaves meandros y un curso con poco agua la mayor parte del año, especialmente la época de verano.

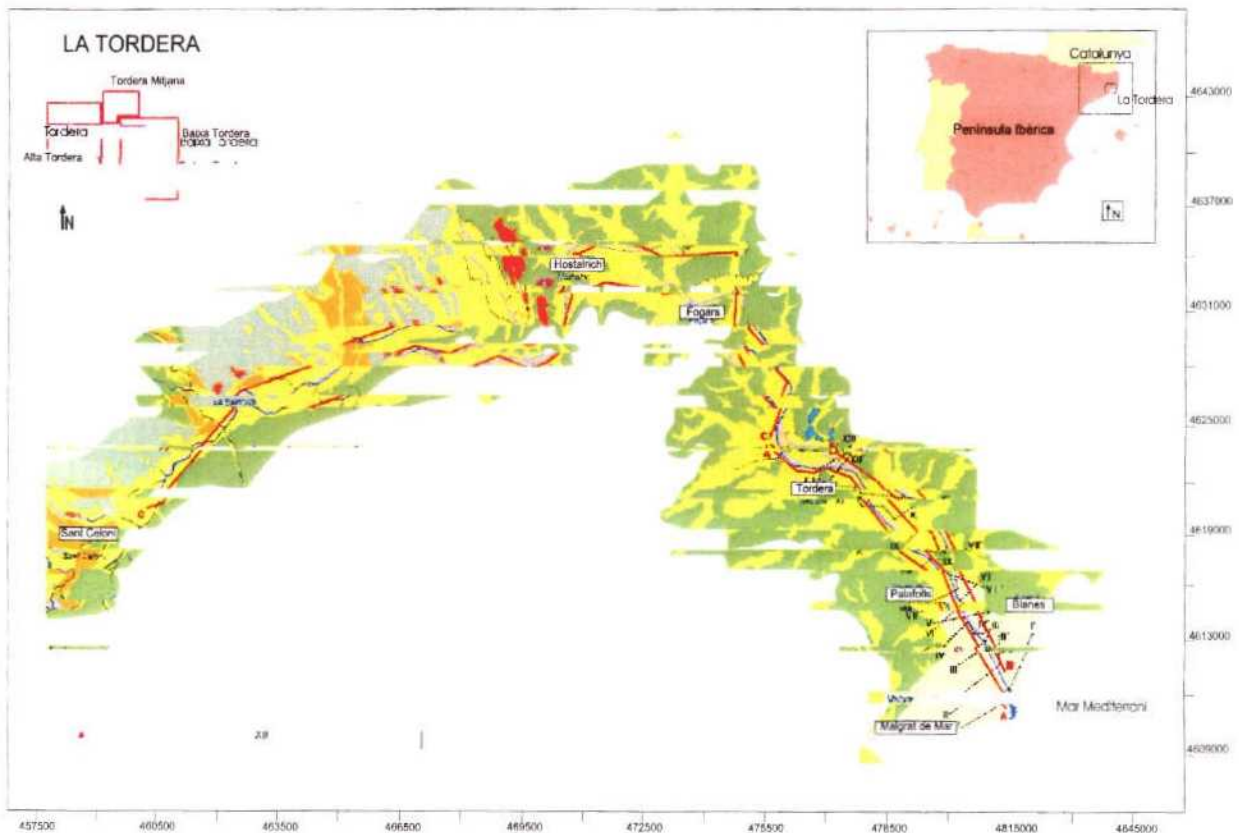


Figura 1. Marco geográfico de la cuenca del Tordera, situación dentro de la Península Ibérica y Catalunya.

El delta está delimitado geográficamente por tres poblaciones Palafolls, Blanes y Malgrat de Mar (Fig1), que tradicionalmente han sido zonas agrícolas, aunque en los últimos diez años han experimentado un aumento progresivo tanto de las actividades industriales como turísticas que han favorecido el aumento de los núcleos urbanos y la demanda de agua.

Contexto Geológico

El río Tordera se encuentra dentro de la unidad estructural de las cordilleras Costeras Catalanas, formadas por el pliegue de un antiguo macizo herciniano, recubierto posteriormente por materiales terciarios y cuaternarios. (figura 2).

La morfología del trazado fluvial ha estado controlada estructuralmente por las orogénias herciniana (compresión y metamorfismo de los materiales paleozoicos), alpina (compresión y formación de fallas) y etapa extensiva neógena posterior. Se observa por ejemplo cambios bruscos de la orientación del trazado en Sant Celoni, que sigue las fallas asociadas a la fosa tectónica del Vallés, o pasado Hostalric, donde el curso toma la dirección NW-SE, correspondiente a una falla que atraviesa la cordillera Litoral (Figura 2).

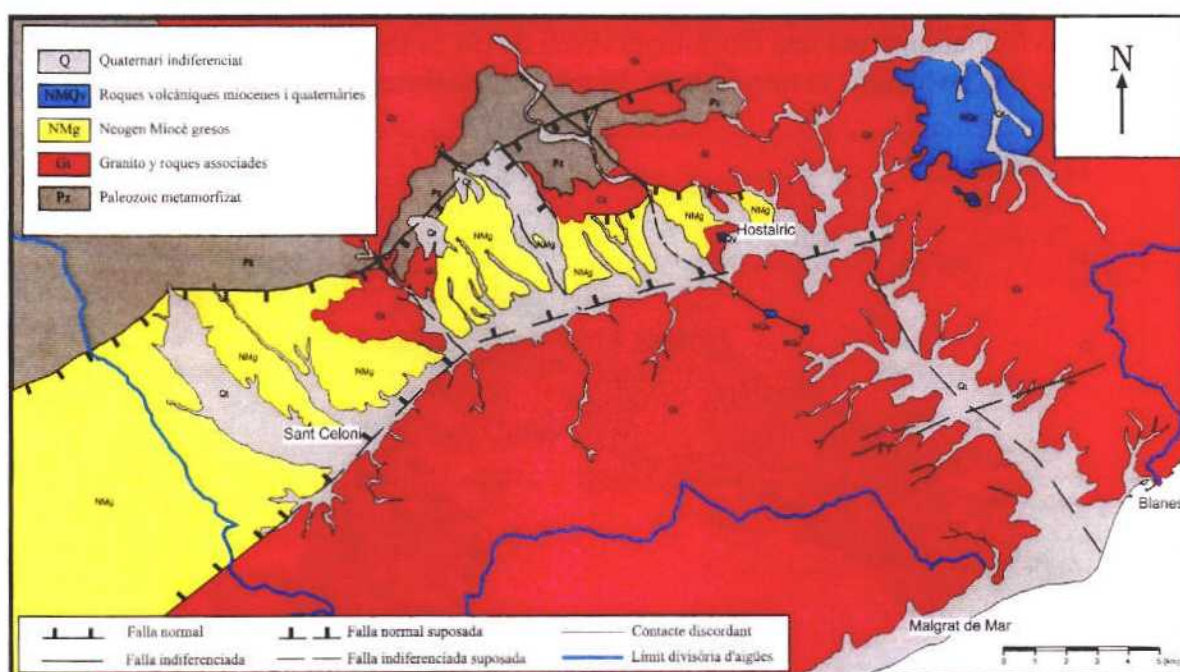


Figura 2. Mapa Geológico de la cuenca del Tordera. Modificado de los mapas 364, 365 y 395 1:50.000 del IGME.

Estratigráficamente, los materiales que conforman una columna ideal de la cuenca se describen a continuación ordenados de más antiguo a más moderno:

Materiales paleozoicos. El macizo herciniano está compuesto por materiales graníticos y granodioríticos, así como por materiales sedimentarios metamorfizados: pizarras, grauwacas y cuarcitas.

Materiales terciarios. Rellenando las depresiones post-alpinas (Vallés-Penedés) aparecen materiales del Oligoceno medio, Mioceno y Plioceno constituidos por materiales detríticos continentales, de origen torrencial y lacustre.

Materiales cuaternarios. A lo largo del cuaternario, la red fluvial establece el control del registro estratigráfico donde se desarrollan: 1) depósitos torrenciales que conforman un sistema de terrazas encajadas, y 2) un sistema deposicional fluvio-deltaico compuesto por facies de transición de continental a marino. Ambos están compuestos por materiales detríticos, con una gran variabilidad granulométrica, de limos y arcillas, a arenas finas y gravas gruesas.

3.3 Modelo hidrogeológico conceptual

El sistema acuífero del Bajo Tordera se clasifica dentro el grupo de los acuíferos granulares o detríticos. El flujo de agua subterránea se transmite a través de un medio poroso compuesto por material detrítico, arcillas, limos, arenas y gravas.

Por otro lado, el sistema acuífero del Bajo Tordera, también se puede clasificar dentro de los acuíferos costeros. Su estado hidrodinámico y químico está fuertemente ligado al mar con el que establece un equilibrio dinámico entre agua dulce y agua salada, que depende del volumen de agua dulce que el sistema drena hacia el mar, y por tanto es función directa del balance recargas-extracciones.

Dominio hidrogeológico del Bajo Tordera

El sistema acuífero del Bajo Tordera, se extiende desde las proximidades de Fogars de Tordera hasta el sistema fluvio-deltaico en contacto con el mar. En la zona próxima a Fogars el sistema tiene un ancho de 150 m mientras que en la desembocadura (delta) éste aumenta hasta 5 km (Figura 1.) La profundidad del sistema acuífero varía desde unos 30 m en Fogars a más de 180m en el litoral (Fig 3).

El modelo conceptual (Figura 4) del sistema acuífero en el delta está compuesto por cuatro unidades.

- Un acuífero libre superficial que cubre todo el llano deltaico, constituido principalmente por niveles de gravas medias y grandes, y presenta un espesor que varía entre 6-20 m. Su principal recarga es a través de curso del Tordera
- Un acuitardo, o zona de baja permeabilidad constituida por arcillas, limos, y arenas finas, que presenta su máxima potencia en la línea de costa, de unos 25 m de potencia, adelgazándose tierra adentro. Este nivel no es continuo ni homogéneo granulométricamente, por tanto existen zonas más permeables que actúan como canales de conexión entre ambos acuíferos.
- Un acuífero profundo confinado o semiconfinado compuesto por gravas gruesas y medias de unos 20 m de potencia de media. La recarga se produce principalmente en las zonas superiores de la cuenca, pero también del acuífero superficial a través del acuitardo.
- Un acuífero basal, situado bajo la línea de costa a una profundidad superior 100m. La presencia de este acuífero se sugirió a partir de la perforación de los pozos Malgrat-1 y Blanes-1 construidos para la desaladora.

El sistema está limitado en su base y lateralmente por un basamento granítico con un alto grado de alteración en su superficie.

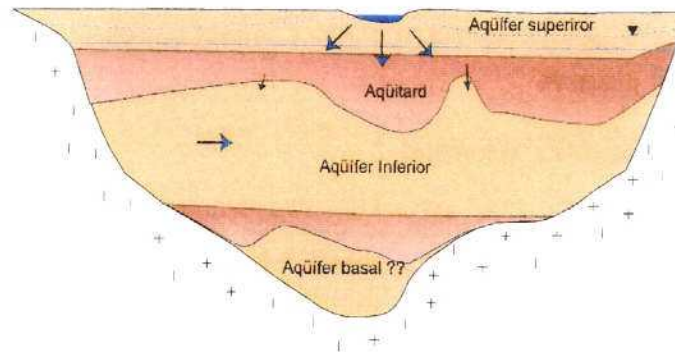


Figura 4. Modelo hidrológico conceptual.

Datos disponibles

Las fuentes de información utilizadas son las siguientes:

- *Plan Hidrológico del Pirineo Oriental*. Confederación Hidrográfica del Pirineo Oriental. PHPO 1985
- *Informe hidrogeológico sobre los depósitos aluviales del río Tordera-Estudio de los recursos hidráulicos totales del Pirineo Oriental*. Servicio Geológico de Obras Públicas, Comisaría de Aguas. REPO 1971.
- *Actualización y Cartografía Hidrogeológica del Sistema Fluvio-Deltaico del Curso Medio Y Bajo del río Tordera*. Consultora Geoservei 2000
- *Modelo 3D de densidad variable para simular el sistema acuífero multicapa del Delta del río Tordera*. Comunicación TIAC 2003. Alicante. Guimerá *et al.* 2003
- *Actualización hidrogeológica del acuífero del Bajo Tordera*. Rahola y Casas, CHIS, 2003.
- *Caracterització del subsòl mitjançant sísmica de reflexió de alta resolució*. Memoria de tesis doctoral (Universidad de Barcelona). T.Texidó, 2000.
- Registro de puntos de agua de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA)
- Registro interactivo de niveles piezométricos y químicos, red de control y calidad del ACA. <http://mediambient.gencat.net/aca/>.

Comentario crítico de los datos hidrogeológicos

La administración que gestiona las aguas subterráneas en Cataluña (Agència Catalana de l'Aigua, ACA) está haciendo un gran esfuerzo para tener un inventario de puntos de agua completo actual y funcional. Sin embargo existen muchas indeterminaciones en la información disponible de los puntos de agua, tanto en el rigor de las descripciones litológicas, toponimia y situación exacta.

En la zona del Bajo Tordera, existen del orden de 100 pozos de abastecimiento, de los que solamente se tiene información litológica de 43. Estos, han estado perforados desde los años 60 hasta la actualidad, y generalmente su descripción litológica es vaga y poco fiable.

La localización dada por las coordenadas UTM de los puntos de agua que aparecen en el registro no coincide en algunos casos con su ubicación real, lo que dificulta el estudio de detalle, así como la construcción de los mapas piezométricos.

Los datos de los parámetros hidráulicos se han obtenido a partir de ensayos de bombeo y recuperación, empleando leyes empíricas para obtener caudales específicos. Se trata por lo tanto de datos de una propiedad efectiva en la que el pozo está ranurado, que no es siempre un dato que aparece en el inventario.

Pozos

Se han considerado 43 pozos, que en su mayoría son de abastecimiento urbano e industrial, sin embargo existen también piezómetros de la red de control del ACA. Espacialmente los pozos se encuentran agrupados en tres zonas (figura 5).

- Zona superior: distribución a lo largo del río en dirección NNW-SSE
- Zona central: distribución en dirección NE-SW, aproximadamente a unos 1200 m de la línea de costa.
- Zona litoral: es la zona más ancha, donde existen menos pozos pero estos son más profundos.

La profundidad de los pozos es variable, en la zona superior varían de 15 a 60 m, y hacia el litoral, donde existe más potencia de sedimentos pueden llegar a profundidades de 80 a más de 180. Las litologías de los pozos corresponden a materiales detríticos, desde arcillas hasta gravas, cubriendo una gran variedad de combinaciones granulométricas. El basamento es granítico, pero solamente un 20% de las captaciones de los pozos es suficientemente profunda como para alcanzarlo.

A partir de los logs litológicos se ha dividido las litologías en 11 clases (figura 6c), se ha realizado una correlación entre materiales finos y gruesos para determinar diferentes zonas de permeabilidad e interpretar a gran escala los límites de las diferentes unidades del sistema acuífero. En la figura siguiente (figura 6) se describen la secuencia de representación de los pozos y la interpretación de los límites del acuífero superior, acuitardo y acuífero inferior. Existen por tanto dos niveles de información, una litológica, y la otra de unidad hidrológica, para poder comparar posteriormente con los modelos resistivos y sísmicos.

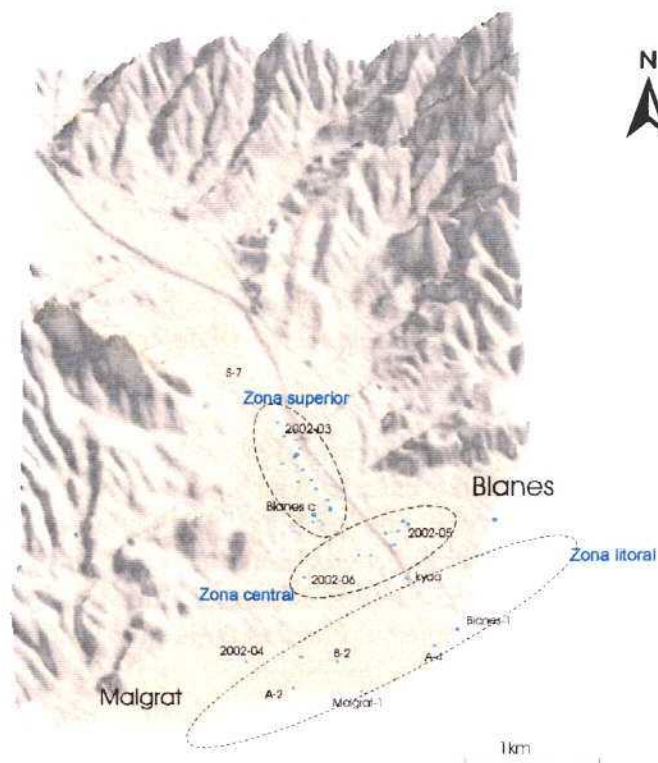


Figura 5. Mapa esquemático de la situación de los pozos de abastecimiento. Se marcan tres zonas donde se concentran las extracciones.

Se ha observado que la zona oeste del delta presenta mayor proporción de material arenoso, el que podría corresponder a una antigua fase deltaica y por lo tanto presentar una zona de paleocanales subparalelos al curso actual. Se observa por ejemplo los pozos 2002-04 -06, y B2 compuestos casi totalmente por arenas de diversas granulometrías.

El acuífero superficial libre recarga el acuífero profundo a través del acuitardo y ventanas de mayor permeabilidad. Los niveles piezométricos de los dos acuíferos son muy similares. Por lo tanto, en períodos de mayor o menor explotación i/o pluviometría, las relaciones de influencia y efluencia entre unidades acuíferas pueden cambiar puntualmente.

Los niveles piezométricos presentan un gradiente bajo, $(2 - 3,35) \cdot 10^{-3}$, típico de zonas deltaicas. La dirección regional del flujo subterráneo es a grandes rasgos NW-SE, con alturas piezométricas que en esta zona y en abril de 2003 oscilaban entre 4 y -1 m snm (Rahola y Casas, 2003) inducidas seguramente por el régimen de extracciones. Cabe destacar que la isolínea piezométrica 0 m snm de mayo del 2003 se encontraba a 0,5 km al interior de la línea de costa.

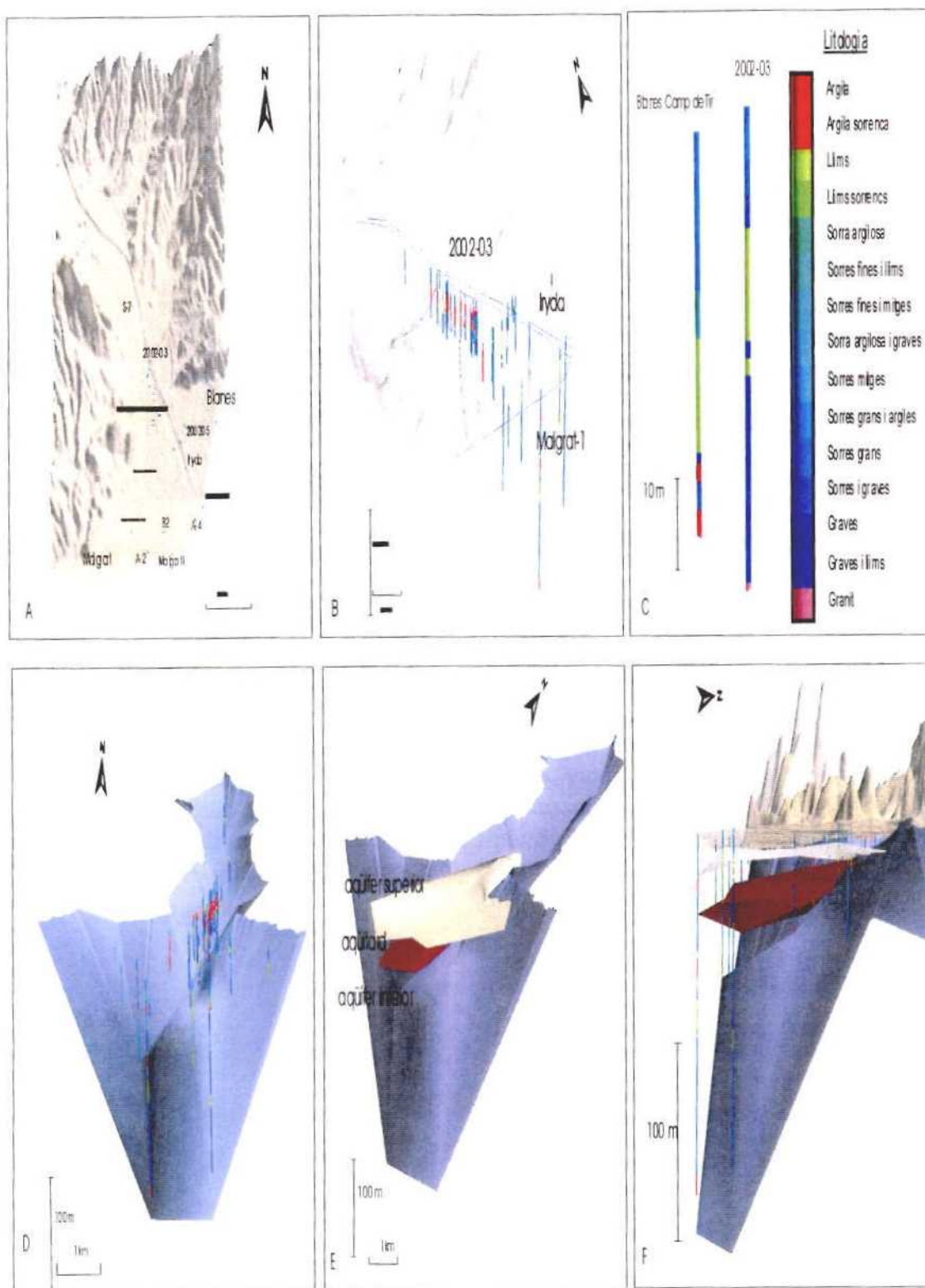


Fig.6. Esquema del proceso de tratamiento e interpretación de los datos litológicos de los pozos. A) situación de los pozos. B) Representación tridimensional del registro. C) Detalle de representación litológica de dos pozos. D) Superficie del basamento granítico. E) Interpretación de las superficies de las unidades litológicas. F) Mapa general con toda la información, superficies i logs litológicos.

Intrusión marina

Los acuíferos costeros como el Delta del Tordera presentan un equilibrio dinámico entre el agua dulce y marina, definiendo bajo la línea de costa una cuña de intrusión marina. Este límite no es brusco sino es gradual, y se denomina zona de mezcla (figura 8).

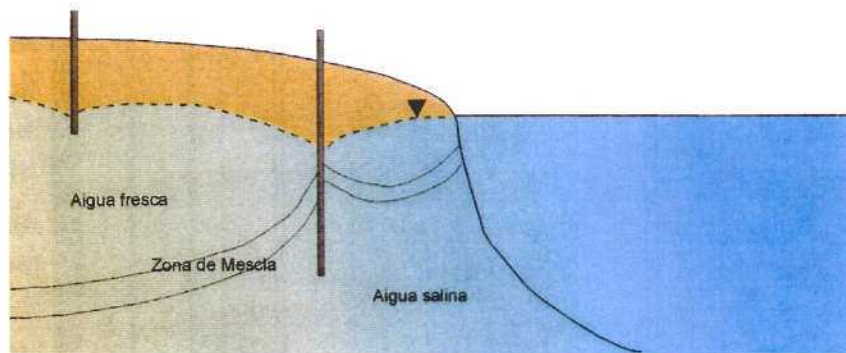


Figura 8. Esquema de la morfología de la cuña de intrusión marina con efecto de cono de bombeo

La problemática de la contaminación salina del sistema del Bajo Tordera se localiza en el acuífero profundo, ya que es el soporta la mayor parte de extracciones de abastecimiento urbano e industrial. La información de la red de control del ACA no es exhaustiva, y en el acuífero profundo solamente están disponibles dos datos de concentración de cloruros. En la figura 9 se observa tanto su situación como el valor de concentración de cloruros. Los pozos muestreados se encuentran una distancia de entre 1 y 2 km de la línea de costa, alcanzando valores de 1500 ppm de cloruro en el registro de 2003. Así mismo en el registro de abril de 2004 se han obtenido unos valores de 16000 ppm para el pozo 2002-04, y 1500 ppm para el pozo 2002-06. Por lo tanto presentan unos valores mucho muy elevados.

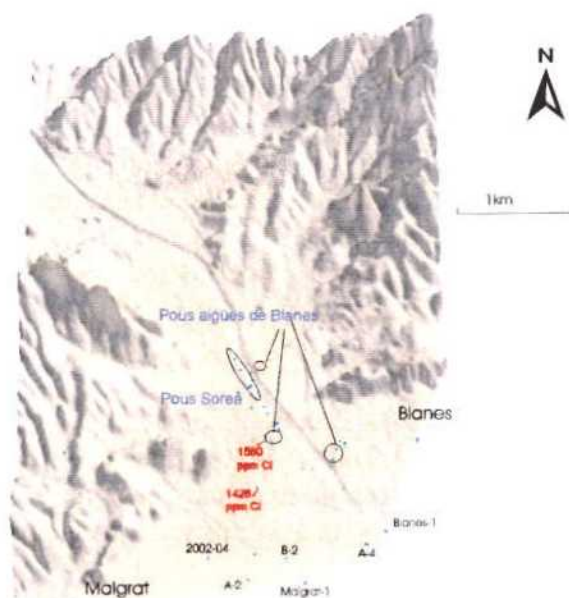


Figura 9. Mapa del delta de la Tordera con la posición de lecturas de salinidad

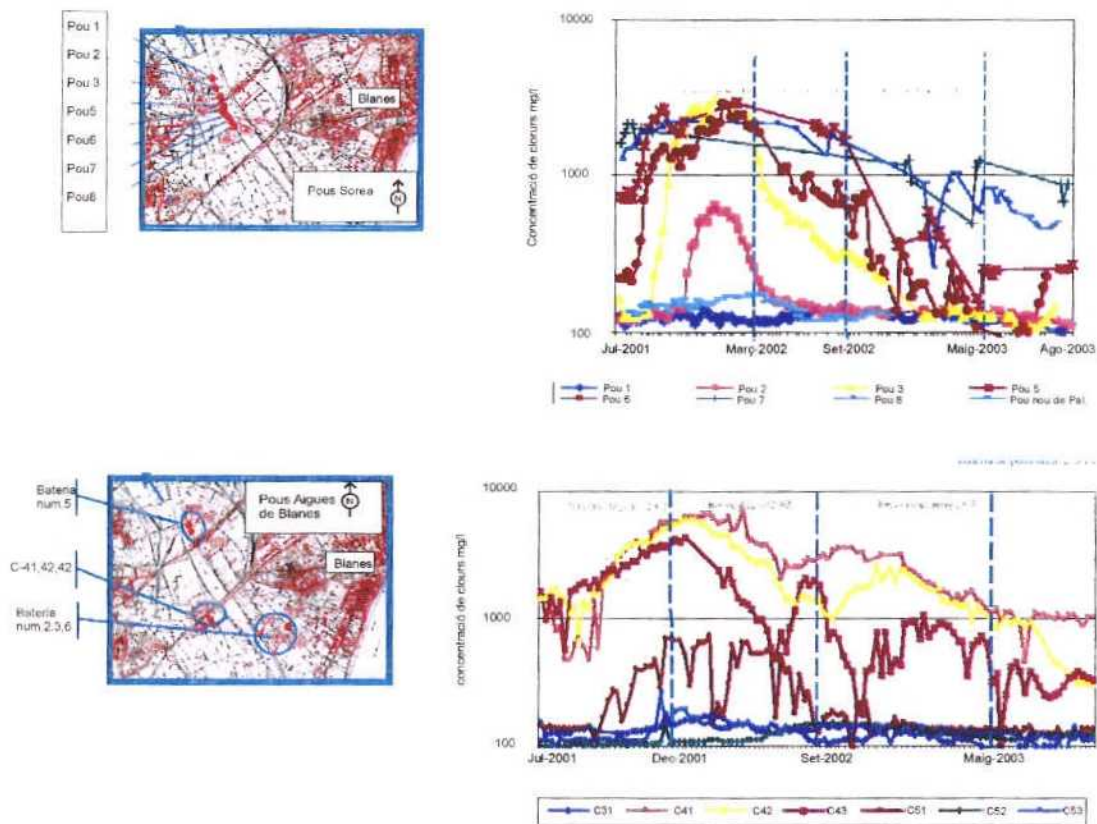


Figura 10. Gráfico de concentración de cloruro en las baterías de las empresas de abastecimiento urbano durante l'any 2002 y 2003 (modificado del ACA). Se observan valores de concentración de cloruros muy elevados

En el estudio presentado por el ACA en octubre de 2003 (disponible en la web del Departament de Medi Ambient, de la Generalitat de Catalunya) se presentan unas gráficas con valores de salinidad en la batería de pozos de las empresas de abastecimiento de Aigües de Malgrat y Aigües de Blanes (Figura 9 y 10).

El estudio concluye que el sistema acuífero ha experimentado una amplia recuperación de los valores de salinidad debido al funcionamiento de la desaladora, y a las buenas condiciones hidrológicas de los años 2002 y 2003. Sin embargo los límites establecidos de potabilidad de agua es 350 ppm de Cl⁻, y muchos de los pozos muestreados en dicho estudio sobrepasan los 1000 ppm de Cl⁻ (Figura 10).

Parámetros Hidráulicos del sistema

Los parámetros hidráulicos del sistema definen el funcionamiento del sistema acuífero en términos hidrogeológicos. Todos los estudios empleados como fuentes de información aportan valores representativos para cada unidad o subunidad hidrológica. En la siguiente tabla se presenta una síntesis de estos parámetros en los trabajos recopilados.

Unidad acuífera	Permeabilidad m/día	Transmisividad m ² /día	Coef de emmagate.	Porosidad
Acuífero libre superficial	200-650 200-2000 3000	160-9500	0.2	0.2
Acuífero confinado o semiconfinado profundo	50-200 1000-2500 1300,1400	1050-4300	6.8*10 ⁻³ 7*10 ⁻³ 6.23 *10 ⁻⁵ 0.5 *10 ⁻³ 6.5 *10 ⁻⁴	0.3
	Permeabilidad vertical (m/día)	Factor de goteo (m)		
Acuitardo	4.5*10 ⁻¹ 5.6*10 ⁻²	340-1340 400-1500 390-1500	1*10 ⁻²	0.1
Acuífero basal	100	150-880	1.01*10 ⁻²	0.1

Taula 1 . Cuadro comparativo entre los estudios recopilados REPO 1971, PHPO 1985, Geoservei 2000, Teixidó, T.2000., XXXVII CIHS Rahola, M.; y Casas, E. ;2003. Guimerá et al 2003.,

Los parámetros hidráulicos definen el sistema a escala de detalle, y sería deseable conocer la distribución espacial de estas magnitudes con suficiente detalle. Los parámetros estimados y medidos son las magnitudes comparables con las adquiridas mediante métodos geofísicos, a través de leyes empíricas, de métodos geoestadísticos, de algoritmos genéticos o de lógica difusa, y así poder obtener un modelo hidrogeológico con mayor extensión espacial, detalle y confianza.

Datos geofísicos

Los estudios geofísicos se han venido realizando desde finales de la década de los 60, en particular los estudios geoelectrónicos y sísmicos más relevantes para la ejecución del proyecto corresponden a

- Estudio realizado por la empresa Geofisa-Prohidro SA que en 1969 realizó unos 80 sondeos eléctricos verticales al lo largo de los 10 últimos kilómetros del Tordera y su delta.
- El Instituto Cartográfico de Catalunya, ICC, realizó tres campañas durante los años 1994, 1995 y 1996 en los que se midieron 28 SEV en zonas próximas a los SEVs del año 1969, con una configuración equivalente. También realizó tres perfiles sísmicos de refracción PS1, PS2 y PS3
- El año 2002, el ICC, realizó una campaña geofísica de 25 sondeos eléctricos en la zona nordoccidental del delta. También se realizaron dos perfiles de sísmica de refracción PS4 y PS5 y cuatro de sísmica de reflexión PSR1, PSR2, PSR3 y PSR4.

Los resultados más relevantes de los estudios geofísicos anteriores se presentan en las figuras 11, 12, 13 y 14.

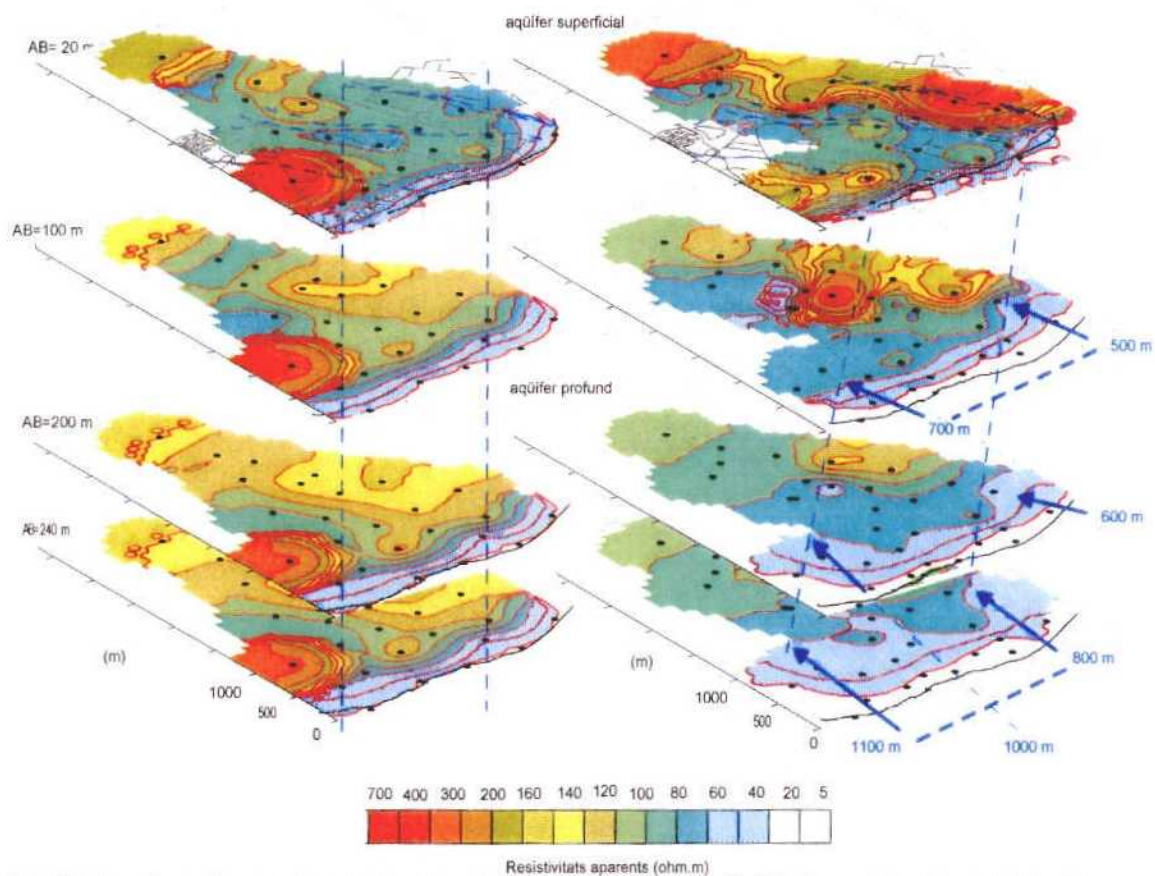
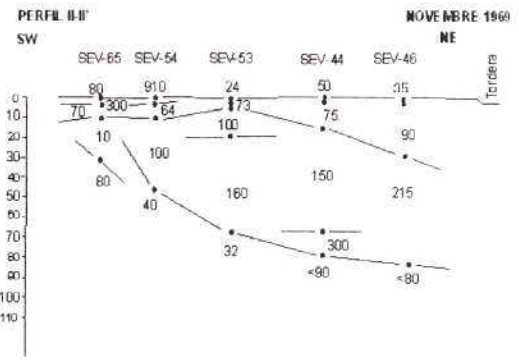
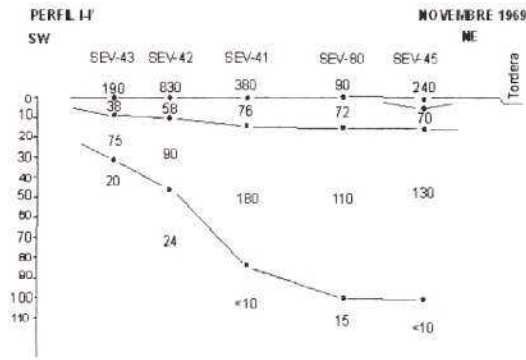


Fig.11 Pseudosecciones de resistividad aparente en pseudopropiundad de la zona oeste del delta del Tordera, a partir de los datos de los SEV del año 1969 (izquierda) y 1994 (derecha). Las flechas muestran las zonas de máximo cambio relacionadas con la evolución de la intrusión marina

1969



1996

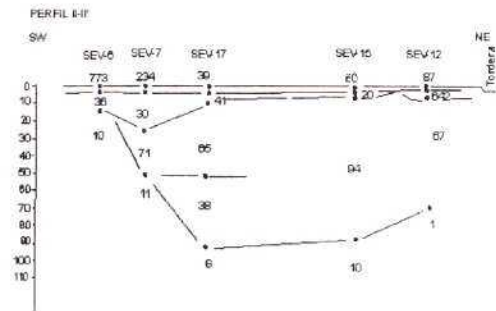
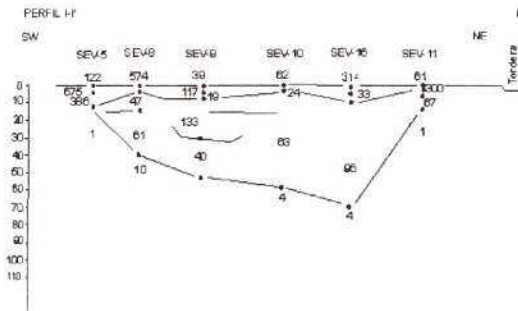


Fig.12. Modelos de resistividad creados a partir de la inversión 1D de los SEV del año 1969 y 1996.

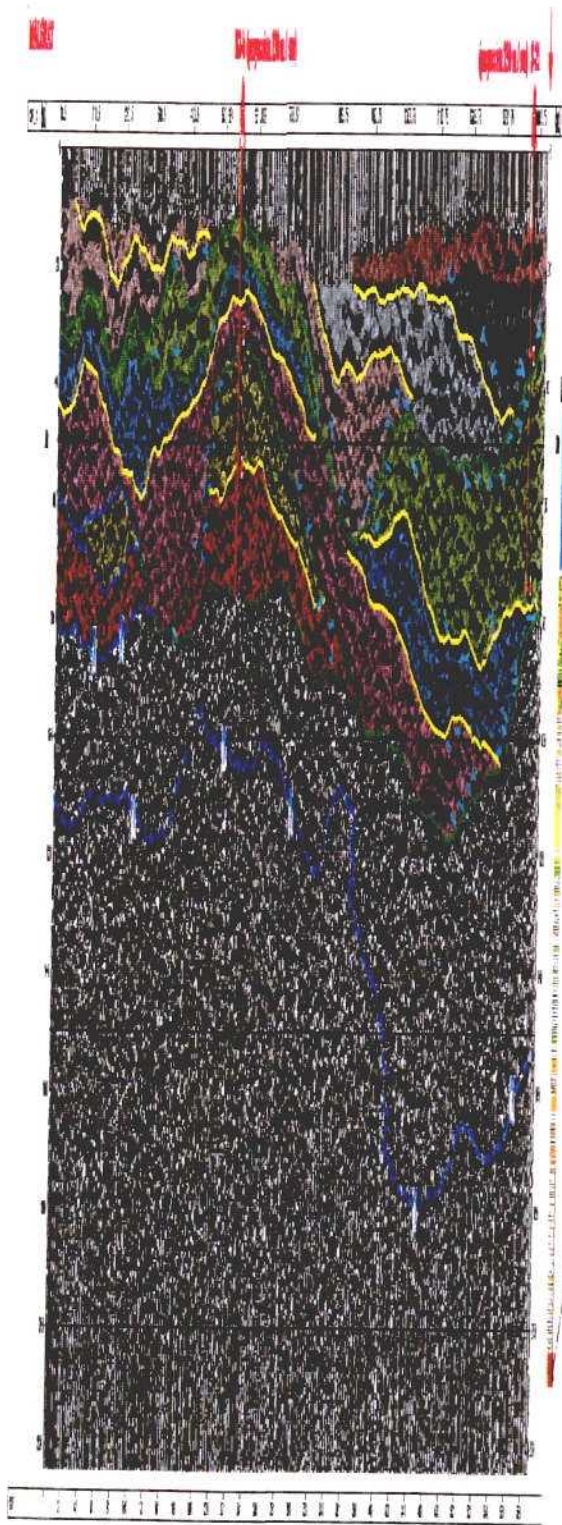


Figura 13. Corte de perfil PS1 interpretado

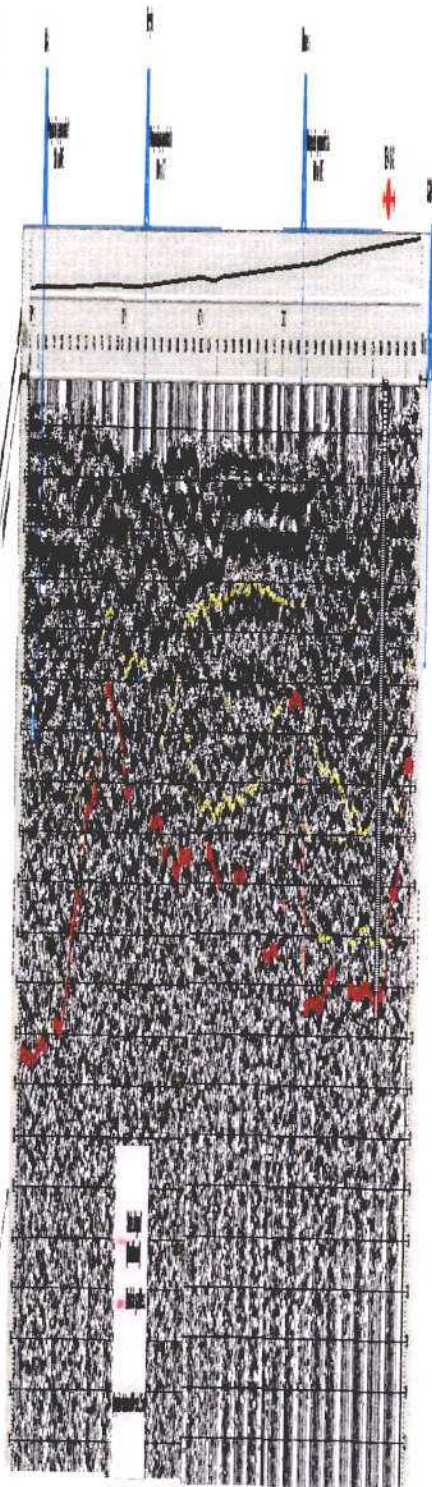


Figura 14. Corte de perfil PS2

ANEXO B

INFORME HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA DE CASTELLÓN

ANEXO B

GEOELEC

SUBSISTEMA ACUÍFERO 56.01. PLANA DE CASTELLÓN

SELECCIÓN DE ÁREAS DE TRABAJO

Octubre 2003

1. GEOLOGÍA

1.1 MARCO GEOLÓGICO

El Subsistema Acuífero 56.01 Plana de Castellón se ubica en el sector suroriental de la provincia de Castellón, ocupando la llanura costera denominada igualmente Plana de Castellón. Sus límites están formados por la Sierra de Espadán en el sector meridional, el Macizo del Desierto de las Palmas en el borde septentrional, separados por la cubeta terciaria de Ribesalbes-Onda, y el Mar Mediterráneo en el borde oriental.

Desde un punto de vista geológico regional, la Plana de Castellón, que constituye una llanura costera, neógena-cuaternaria, se ubica entre el extremo suroriental de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, y el extremo meridional de la Cordillera Costero Catalana.

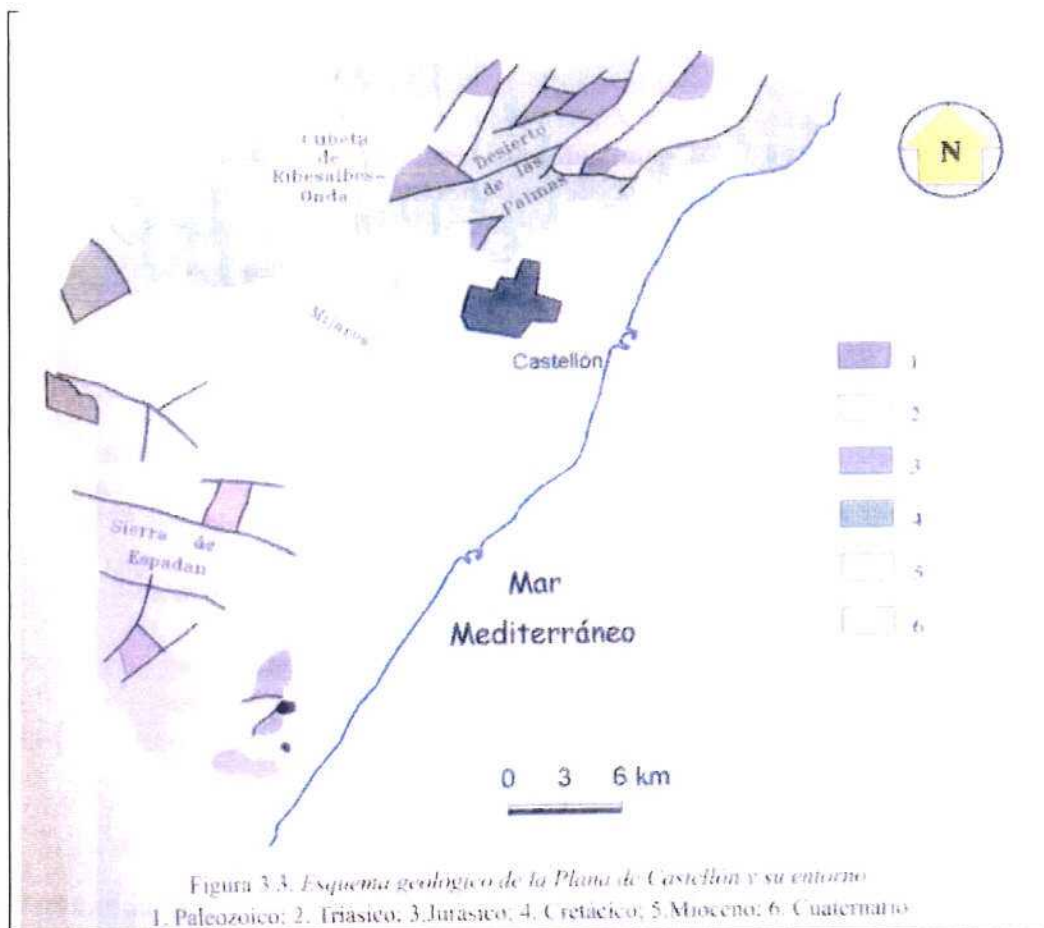


Figura 1. Marco geológico de la Plana de Castellón (Morell y Hernández, 2000)

1.2. ESTRATIGRAFÍA

Los materiales circundantes a la Plana, y que conforman las áreas fuente de los sedimentos de relleno de la misma, abarcan desde el Paleozoico hasta el Terciario. El relleno de la cuenca está constituido por sedimentos neógenos y cuaternarios poligénicos.

1.2.1 Materiales de borde

Materiales Paleozoicos: constituyen el basamento sobre el que se depositaron el resto de materiales. Solo existen dos afloramientos, coincidiendo con los dos límites de la Plana, es decir la Sierra de Espadán y el Desierto de Las Palmas. En ambos casos están formados por areniscas compactas verdosas, pizarras y cuarcitas, de edad indeterminada.

Materiales mesozoicos: los materiales mesozoicos constituyen los bordes y el sustrato del relleno detrítico de la Plana. El Mesozoico de esta parte de la Cordillera Ibérica se puede dividir en cuatro secuencias deposicionales limitadas por cuatro discontinuidades de primer orden:

- **Triásico (Buntsandstein-Hettangiense).** Predomina tanto en la Sierra de Espadán, como en el Desierto de las Palmas. Constituyen el basamento del sector meridional de la Plana, al sur del río Seco. Presenta las facies germánicas del resto de la Cordillera Ibérica. De muro a techo se distinguen: Facies Buntsandstein, constituidas por conglomerados, areniscas y arcillas y argilitas; Facies Muschelkalk, constituidas por una formación dolomítica basal de 150 m de potencia, seguido de una formación margosa intermedia con 100 m de potencia y una formación dolomítica superior con unos 150 m de potencia; Facies Keuper, constituida principalmente por arcillas, margas y yesos, con una potencia muy variable (200 a 400 m)
- **Jurásico.** Aflora de forma muy dispersa en la Sierra de Espadán, en las inmediaciones de Onda y en el Macizo de Las Palmas, donde aparece una serie de 400 m de potencia. Cabe mencionar el hecho de que estos materiales aparecen bajo el Mioceno en el sustrato de la Plana de Castellón, llegando incluso a aflorar puntualmente, en la misma, debido a la presencia de fallas subverticales en el basamento. Los materiales jurásicos son prácticamente carbonatados, constituidos por dolomías, calizas y margas, apareciendo representadas formaciones tanto desde el Lías hasta el Malm.
- **Cretácico.** Los materiales cretácicos, en los bordes de la Plana, aparecen pobremente representados, ya que solo afloran en el Macizo del Desierto de Las Palmas, en el que solo adquieren cierta relevancia las formaciones del Aptiense. En el aptiense se distingue:
 - ✓ Beduoliense inferior. Calizo-dolomítico.
 - ✓ Bedouliense superior. Margoso
 - ✓ Gargasiense. Constituido por dos miembros calizos separados por un tramo margoso.
 - ✓ Clansayense. Constituido por una sucesión de calizas bien estratificadas, sobre la que se disponen margas y arenas albienses.

Materiales terciarios: Abarcan el periodo Neógeno, y están ligados al sistema de fosas mediterráneas. Estos materiales, que afloran en el sector centro-septentrional del borde de la Plana, sirven de base al relleno pliocuaternario de la misma, en algunos sectores de la cuenca.

- **Mioceno inferior.** Se encuentra pobremente representado, aflorando exclusivamente en la cubeta de Ribesalbes (al N de Onda). Está constituido por brechas, calizas y lutitas.
- **Mioceno medio-superior.** Aflora al sur de la franja triásica de Lucena, hasta las inmediaciones de Onda (sector centro-septentrional del borde de la Plana). Está formado por conglomerados, areniscas y lutitas rojas, constituyendo en conjunto depósitos de abanicos aluviales. Aunque la potencia es muy variable, en el sector de Torremundo presenta unos 200 m. Hacia el SE, existe una gradación granulométrica decreciente, que corresponde a facies progresivamente más distales.

1.2.2. Materiales pliocuaternarios de relleno de la plana

La Plana de Castellón es una depresión tectónica originada como consecuencia de la distensión neógena postalpina, y forma parte de un complejo sistema de horst y grabens que continúan bajo el mar.

Los primeros sedimentos que se depositan son de edad miocena. Al comienzo del Plioceno superior se produce un nuevo pulso tectónico compresivo que deforma los sedimentos previos y da origen a las grandes unidades morfoestructurales de la región. Durante este periodo tiene lugar una acumulación de sedimentos detríticos, en la cuenca, que finaliza con el depósito de un sistema de glacis en el Villafranquiense. En el Pleistoceno, una nueva etapa tectónica modifica la antigua estructura, existiendo evidencias geomorfológicas de su continuidad hasta tiempos muy recientes.

Los depósitos de la Plana de Castellón, son de edad pliocuaternaria, formando en conjunto un suave glacis que se prolonga hacia la actual línea de costa. Desde su origen en el Mioceno, la Plana se encuentra en ambiente de acumulación, y queda rodeada por una orla de depósitos de piedemonte, bajo los relieves circundantes, pasando hacia el centro de la cuenca a depósitos de arroyada y fluviales, con predominio de litologías limo-arcillosas. Además en el sector costero existen áreas de marisma, muy restringidas. En el conjunto del relleno de la Plana, existe un predominio de los depósitos de origen continental, aunque también existen depósitos marinos y mixtos.

Depósitos continentales

Se diferencian seis tipos de depósitos

- *Mantos aluviales encostrados.* Descienden desde la cota 100 hasta 30-40 m s.n.m. (línea Castellón-Almazora-Villareal). Están formados por cantos redondeados de caliza y arenisca con matriz arcillosa y cemento calcáreo, constituyendo un depósito fuertemente encostrado (1ª fase de encostramiento). Constituye la base del Cuaternario visible, desapareciendo hacia el mar, bajo unas arcillas rojas que forman la llanura prelitoral. En el sector de Onda aparece con una potencia de 20 m.
- *Depósitos de Piedemonte.* Forman una orla que rodean los relieves circundantes. Desde un punto de vista litológico, están constituidos por una brecha heterométrica (cantos de 5-15 cm), englobada en una matriz arcillosa o arenosa, y con cemento calcáreo. Parece tratarse de un antiguo glacis desarrollado sobre

los mantos aluviales anteriormente descritos, que posteriormente fue encostrado (2ª fase de encostramiento).

- *Mantos de Arroyada*. Son depósitos de tipo laminar situados encima de los mantos aluviales, ocultando el contacto entre éstos y los depósitos de piedemonte. Están constituidos por arcillas rojas, y gravas con cantos procedentes de los mantos aluviales y de costras. Las gravas aparecen dispersas en las arcillas o bien formando niveles continuos, que pueden llegar a tener morfología lenticular.
- *Depósitos Anastomosados*. Asociado a los cauces principales, y aunque de forma muy dispersa, aparecen las tres facies típicas de este tipo de depósitos: conglomerática arcillosa (Channel Bar), arcillosa de llanura de inundación, (Flood-Plain) y detrítica de relleno de canal (Channel-Fill).
- *Depósitos Torrenciales*. Están constituidos por sedimentos heterométricos, caóticos, con presencia areal de matriz arenosa y escasa selección.
- *Terrazas Fluviales*. Se distinguen 5 niveles de terrazas, la mayor parte erosivas, causadas por el encajamiento de la red fluvial durante las glaciaciones Pleistocenas. Las cotas son: 25-30 m, 18-20 m, 11 m, 7-5 m, 3-2 m.

Depósitos Marinos

- *Cordón litoral*. Se extiende desde la desembocadura del río Mijares hasta el límite meridional de la Plana de Castellón. Está formado por un conglomerado marino fosilífero con altura de 2 m, que correspondería con el máximo avance de la transgresión Flandriense. Este cordón es el cerraba las antiguas albuferas, actualmente desaparecidas por colmatación.

Depósitos Mixtos

- *Deltas*. Existen varios abanicos aluviales deltaicos que coinciden con la desembocadura de los ríos Seco y Mijares. En el caso del río Mijares, tiene además una clara expresión morfológica, produciendo un saliente en la línea de costa. El espesor de sedimentos en la desembocadura de este río, alcanza los 150 m, lo que indica la existencia de una subsidencia considerable.
- *Limos de Albufera*. Constituyen una corona que rodea las albuferas colmatadas, cuyo origen puede relacionarse con el lavado de arcillas rojas. La presencia de cantos marinos afectados por litófagos hace pensar en el origen mixto de estos depósitos.
- *Dunas litorales*. Se trata de un cordón de arenas, parcialmente fijadas por la vegetación, que cierra la albufera al norte del río Mijares.

1.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La Plana constituye una cuenca tectónica neógena-cuaternaria, cuyos bordes se encuentran controlados por estructuras de dirección NNE-SSO (directriz catalánide) y NO-SE (directriz ibérica). El primer sistema de estructuras (catalánide), corresponde a fracturas de tipo desgarre con componente vertical, normal o inversa, dependiendo de la orientación de los ejes de esfuerzos, aunque predomina un régimen transtensivo, que es el responsable de la configuración tanto de las cuencas neógenas interiores de la región del Maestrazgo, como de la línea de costa. El eje principal de la Plana de Castellón (NE-SO) es subparalelo a este sistema de fracturas. El sistema NO-SE (directriz ibérica) está constituido por pliegues y fallas inversas-cabalgamientos de dirección N120 E, que corresponden a estructuras compresivas alpinas. Existe además un sistema conjugado

N150E – N70E de fracturas de tipo desgarre y componente vertical variable, posterior a los anteriormente descritos. La interferencia de estos sistemas de estructuras, provoca una elevada complejidad estructural tanto en los materiales circundantes a la Plana, como en el propio basamento de la misma. El basamento de la Plana está formado por una serie de bloques de edad mesozoica, limitados por fallas subverticales, con una importante componente de salto vertical, sobre los que se disponen materiales margoarcillosos terciarios. Sobre este basamento aparece un relleno detrítico de edad Plio-Cuaternario, que colmata la cuenca.

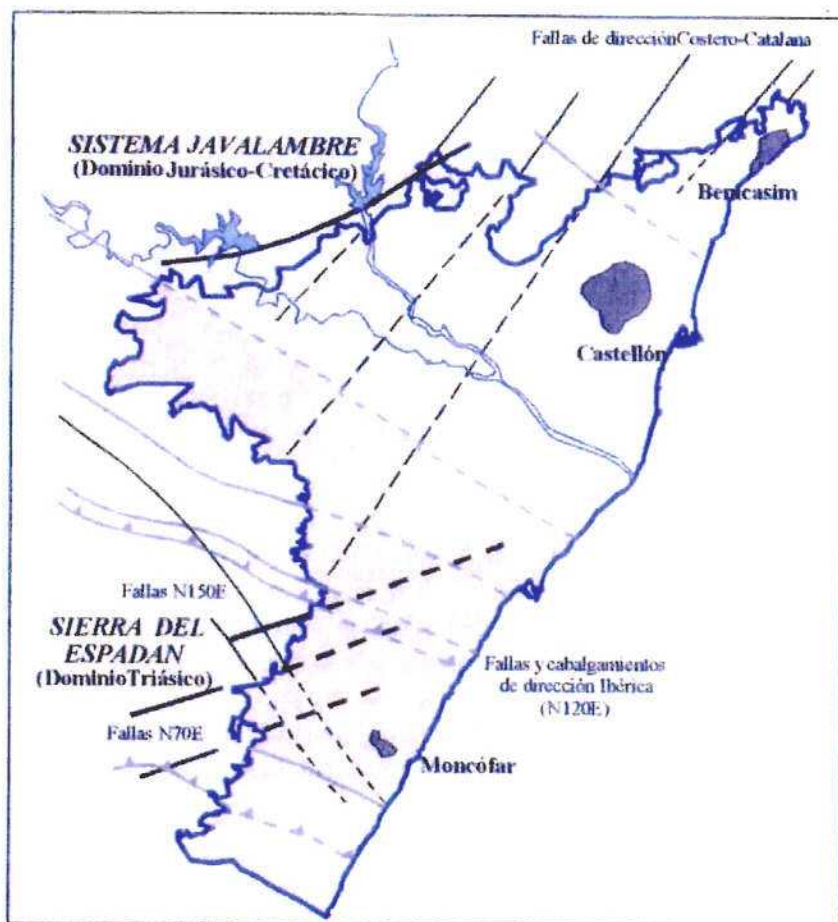


Figura 2. Esquema estructural del basamento de la Plana de Castellón (Morell y Hernández, 2000)

2. HIDROGEOLOGÍA

2.1. MARCO HIDROGEOLÓGICO

La Plana de Castellón es una comarca geográfica natural que ocupa una franja costera comprendida entre Benicasim y Almenara, de 464 km² de extensión, situada casi totalmente entre el nivel del mar y la cota 130, en cuyos extremos meridional y septentrional se encuentran las marjalerías de Chilches-Almenara y Castellón, respectivamente. Desde un punto de vista hidrogeológico, constituye el Subsistema Acuífero 56.01 Plana de Castellón, englobado dentro del Sistema Acuífero 56 Sierra de Espadán-Plana de Castellón-Plana de Sagunto.

Este Subsistema se ubica en la mitad septentrional de la Cuenca Hidrográfica del Júcar. Los límites son: al norte las calizas cretácicas del Sistema Acuífero Javalambre-Maestrazgo, con la que existe conexión hidráulica; al sur, con el acuífero detrítico de la Plana de Sagunto, siendo igualmente abierto; al oeste, existe conexión hidráulica con las calizas y dolomías jurásicas y triásicas del Subsistema de Onda y las areniscas triásicas del Subsistema de la Sierra de Espadán; el límite oriental es abierto, permitiendo la conexión hidráulica con el Mar Mediterráneo.

2.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

La formación acuífera está constituida por un conjunto de sedimentos pliocuaternarios, compuestos por paquetes de gravas, arenas y conglomerados embutidos en una formación eminentemente arcilloso-limosa. Este conjunto descansa indistintamente, sobre materiales mesozoicos (hacia el oeste de la Plana), que constituyen un segundo acuífero, o sobre sedimentos terciarios de muy baja permeabilidad (hacia el este).

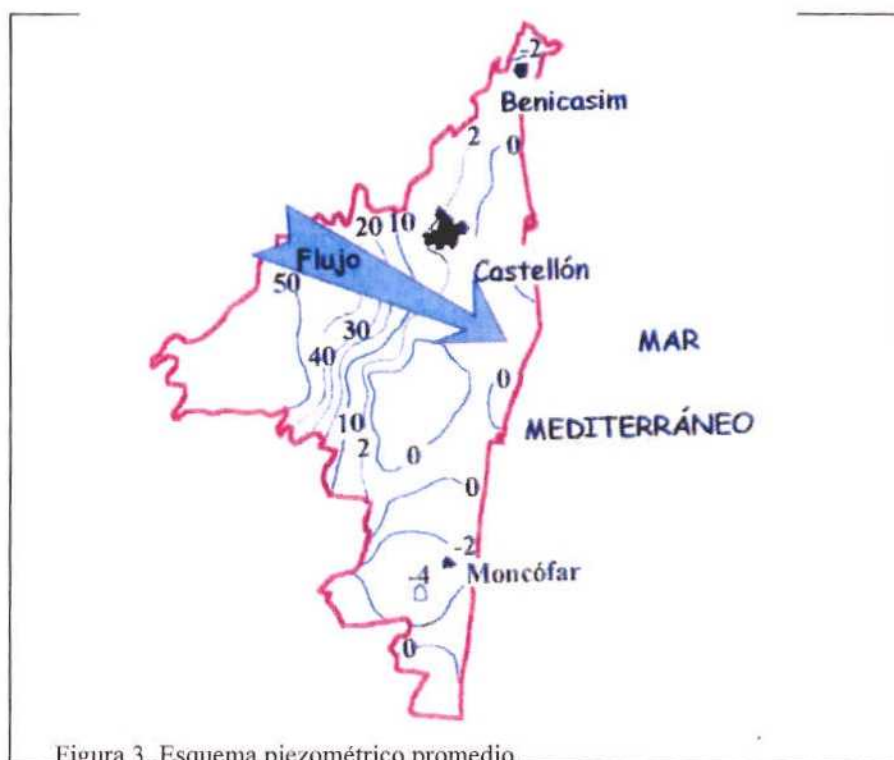


Figura 3. Esquema piezométrico promedio.

Los depósitos pliocuaternarios dan lugar a un importante acuífero, constituido por niveles y lentejones de conglomerados, arenas y gravas, intercalados y englobados en limos y arcillas. La gran heterogeneidad de estos materiales hace difícil establecer una continuidad litológica. Son muy frecuentes los cambios laterales de facies y los depósitos con geometría lenticular. Aunque a priori se trata de un acuífero multicapa, con distintos niveles acuíferos superpuestos, la interconexión entre los distintos niveles transmisivos, provocada por contactos laterales y verticalmente por las captaciones, hace que en conjunto y a gran escala funcione como un acuífero libre, con porosidad intergranular.

El espesor máximo se da en las inmediaciones del Río Mijares y zonas localizadas, tales como SO de Nules y S. de Villarreal, en donde se han llegado a alcanzar 270 m. de potencia, espesor asociado al paleocauce del río Mijares. En general los espesores más

comunes están comprendidos entre 50 y 200 m. En la zona norte y centro oscilan entre 100-150 m, mientras que en la zona sur entre 10 y 150 m

Las características hidráulicas de las numerosas captaciones existentes, indican caudales específicos que oscilan entre valores ligeramente inferiores a 1 L/seg/m., y superiores a 20 Lseg./m. Los valores predominantes se encuentran comprendidos entre 10 y 20 L/seg/m.

El valor de la transmisividad se encuentra comprendido entre cifras inferiores a 500 m²/día y superiores a 6.000 m²/día aunque la gran mayoría se sitúa entre 1.500 y 6.000 m²/día. Las mayores transmisividades aparecen en el borde sur de la Plana, al sur de Moncófar (mayores de 6.000 m²/día). El coeficiente de almacenamiento varía entre 5 y 15% y la permeabilidad entre 30 y 120 m/día. Los más usuales están comprendidos entre 50 y 100 m/día.

Aunque la estructura hidrogeológica responde a un sistema de acuíferos superpuestos, la supuesta conexión entre los distintos niveles acuíferos hace que el funcionamiento hidráulico de la unidad sea asociable al de un acuífero libre en el que la superficie piezométrica, en la mayor parte de la Plana, varía entre 10 m s.n.m. y el nivel del mar, si bien en los sectores del interior y concretamente en los situados en los cursos altos de los ríos Seco y Mijares, la piezometría se eleva considerablemente, alcanzándose en la transversal de Betxi la cota de 60 m s.n.m. y en las proximidades de Onda la de 90 m s.n.m.

La circulación del agua subterránea sigue una dirección aproximada ONO-ESE, es decir, desde el interior hacia el mar, excepto en áreas localizadas en las que las fuertes extracciones provocan una inversión del gradiente hidráulico, tales como la de Moncófar y Villarreal-Betsi-Nules. En la primera, la superficie piezométrica se encuentra permanentemente bajo el nivel del mar, alcanzándose esporádicamente cotas de hasta -7 m; en la segunda se detecta una depresión piezométrica alargada, en dirección NO-SE, en la que el nivel piezométrico se sitúa próximo al nivel del mar.

En las proximidades del río Mijares se observa la presencia de un domo piezométrico, que responde a la existencia de una importante recarga, como consecuencia de la infiltración de excedentes de regadíos con aguas superficiales y de la infiltración directa a través del lecho del río.

Las oscilaciones anuales varían entre 5 y 10 m. en el borde occidental y aproximadamente 1 m. en el litoral. El descenso acumulado desde 1973, varía entre 10-11 m. en las zonas más interiores y 0,5-1 m. en las litorales. No obstante se detecta un aumento de la recuperación de niveles piezométricos en el sector de Benicasim, debido a la disminución de las extracciones en pozos previamente salinizados.

Las entradas de agua para el año medio del período 1948-1983, ascienden a 276 hm³/año, de los cuales 90 hm³/año corresponden a las entradas laterales, en su mayoría procedentes de las calizas cretácicas del sistema 55, infiltración a partir del Río Mijares, estimadas en 36 hm³/año; infiltración de excedentes de regadíos con aguas externas al subsistema, fundamentalmente las procedentes del río Mijares, estimadas en 40 hm³/año; infiltración de agua de lluvia, 50 hm³; e infiltración de excedentes de regadíos con aguas subterráneas, estimadas en 60 hm³/año.

Las salidas se producen fundamentalmente por extracciones para la dotación de regadíos y bombeos urbanos e industriales (201 hm³/año); salidas al mar (39 hm³/año), la mayor parte de ellas localizadas en los sectores próximos a desembocadura del río Mijares; drenaje de las marjalerías de Castellón-Benicasim (12 hm³/año) y Chilches-Almenara (15 hm³/año) y emergencias a través de la Fuente del Molino (9 hm³/año). En total las salidas ascienden a 276 hm³/año.

El agua subterránea utilizada en el subsistema de la Plana de Castellón asciende a 201 hm³/año, por término medio, de acuerdo con la siguiente distribución:

- Abastecimiento urbano: 32 hm³/año.
- Abastecimiento industrial: 11 hm³/año.
- Abastecimiento agrícola: 158 hm³/año.
- Abastecimiento ganadero: 0,44 hm³/año.

Durante los períodos de extrema sequía, la regulación del río Mijares hace que no sea posible atender la demanda de los regadíos dotados con aguas superficiales, por lo que éstas se complementan mediante el bombeo y posterior vertido a las acequias de riego, circunstancia que incrementa notablemente la cifra antes mencionada.

2.3. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

2.3.1. Diagnóstico del estado del acuífero

Las aguas subterráneas presentan gran variedad de facies hidroquímicas, si bien predomina la facies sulfatada cálcica en la mayor parte de la Plana y la clorurada sódica en la franja litoral.

La mineralización suele crecer en la dirección del flujo subterráneo, evolucionando desde aguas con residuos secos del orden de 525 mg/L, en los casos más favorables, a otros cuyos valores más usuales se aproximan a 1.500 mg/L. Esta distribución general presenta excepciones en amplias zona de la Plana. Así, en las inmediaciones del río Mijares la mineralización de las aguas suele ser inferior a la que a priori debería corresponderle, dada su proximidad al litoral, fenómeno sin duda achacable a las fuertes recargas provenientes de los excedentes de regadíos con aguas superficiales del río Mijares, y directamente del propio río.

En contraposición la mineralización crece notablemente en sectores localizados, generalmente coincidentes con zonas de piezometría muy deprimida, en donde la intrusión marina, o en su caso la formación de domos salinos bajo las captaciones más significativas, propician que las agrías alcancen un residuo seco de hasta 5.500 mg/L en los casos más extremos.

La calidad natural de las aguas subterráneas, de por sí mediocre, está muy deterioradas por factores antrópicos, con elevada concentración en nitratos. En la mayoría de los puntos los contenidos están comprendidos entre 85 y 120 mg/L aunque sumamente irregular.

El contenido en sulfatos también muestra un progresivo incremento y en el 62% de los puntos muestreados se sobrepasa la concentración de 400 mg/L.

El contenido de cloruros se mantiene prácticamente estacionario en las aguas no pertenecientes a la facies clorurada sódica y se encuentra en progresivo aumento en zonas actualmente afectadas por intrusión marina. En el área de Moncófar-Chilches la concentración supera los 2.000 mg/L. Dentro del área de Benicasim se superan los 1.000 mg/L.

Por el contrario el mínimo contenido en cloruros se presenta en las inmediaciones del río Mijares por las razones antes aducidas, con valores comprendidos entre los 50 y 100 mg/L.

La evolución del residuo seco de las aguas no presenta una tendencia claramente definida en las zonas no afectadas por la intrusión salina, donde los valores más usuales están comprendidos entre 600 y 1.200 mg/L. Por el contrario en las zonas en donde este fenómeno es acusado el contenido aumenta progresivamente hasta alcanzar valores máximos de hasta 5.600 mg/L.

Los valores máximos de todos estos componentes se dan en la zona de Moncófar, a excepción de los nitratos, en los que el valor máximo corresponde al punto 30.25-1.016 situado al norte de Betxi.

La contaminación orgánica no adquiere en este subsistema especial relevancia. Solamente cabe citar la presencia de nitritos en dos pozos destinados al abastecimiento de Castellón: en el primero (3025-2-007), se registraron concentraciones de 0,11; 0,15 y 0,70 mg/L en los años 1977, 1979 y 1982, respectivamente, en tanto que en el pozo n.º 3025-3-010, las concentraciones de nitritos detectadas fueron de 0,3 y 0,2 mg/L, en los años 1977 y 1979 respectivamente. En la actualidad, el contenido en este componente es nula en ambos puntos.

2.3.2. Situación respecto a la intrusión marina

El análisis de los puntos de las redes de control de las aguas subterráneas, del IGME, (piezometría, calidad e intrusión), controladas hasta el año 2001, permiten definir una concentración promedio del ion cloruro, en la mayor parte del acuífero de la Plana de Castellón, en torno a los 200 mg/L, valor relativamente bajo para un acuífero costero. Sin embargo se detectan dos áreas en las que existen problemas puntuales de contaminación por intrusión marina. Se trata del área de Benicasim, en el extremo septentrional de la Plana, y el sector de Moncófar, en el extremo meridional.

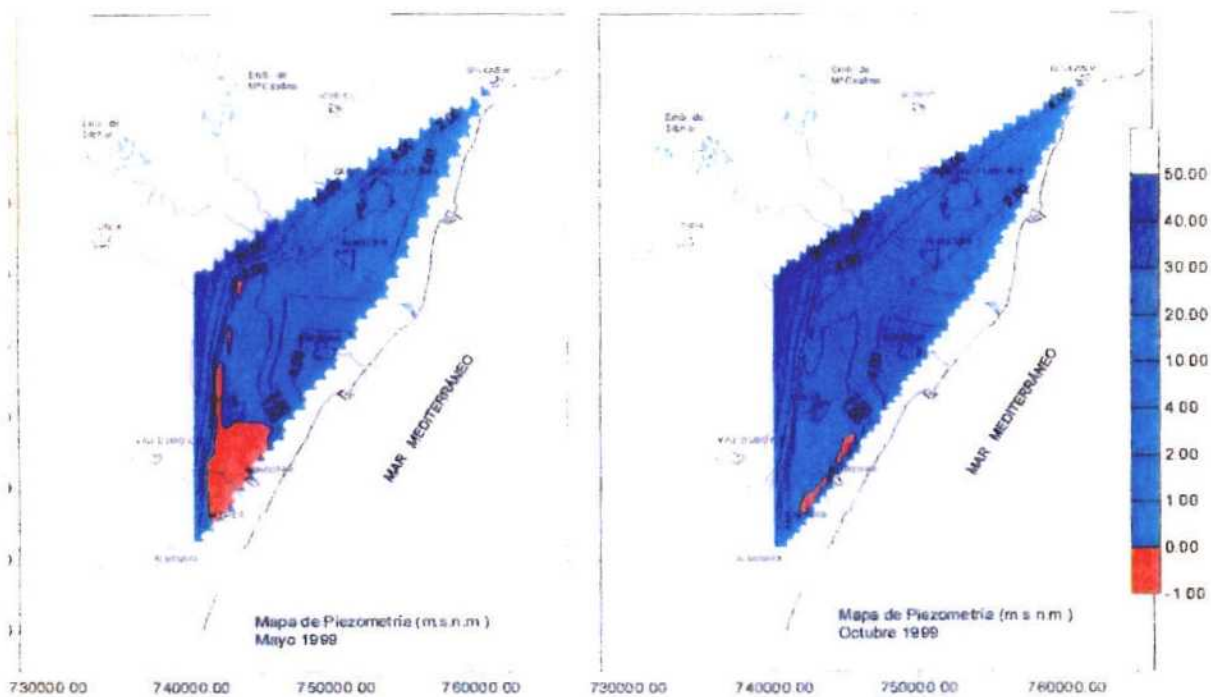


Figura 4. Piezometría en mayo y octubre de 1999

En el sector de Benicasim, la concentración de cloruros es de unos 600 mg/L, con facies cloruradas sódico-cálcicas, que evolucionan desde 1995 a 1999 a cloruradas sódicas. Estos datos evidencian que existe un proceso de intrusión en estado incipiente, ya que la concentración de cloruros se mantiene en unos valores que aunque son elevados con respecto al promedio del acuífero, se pueden considerar como relativamente moderados.

En el área de Moncófar, las concentraciones del ion cloruro oscilan entre 1.600 y 2.000 mg/L, coincidiendo los valores máximos con una zona de depresión piezométrica, bajo el nivel del mar, llegándose a alcanzar cotas de -4 m s.n.m. Las facies son cloruradas Ca-Mg-Na.

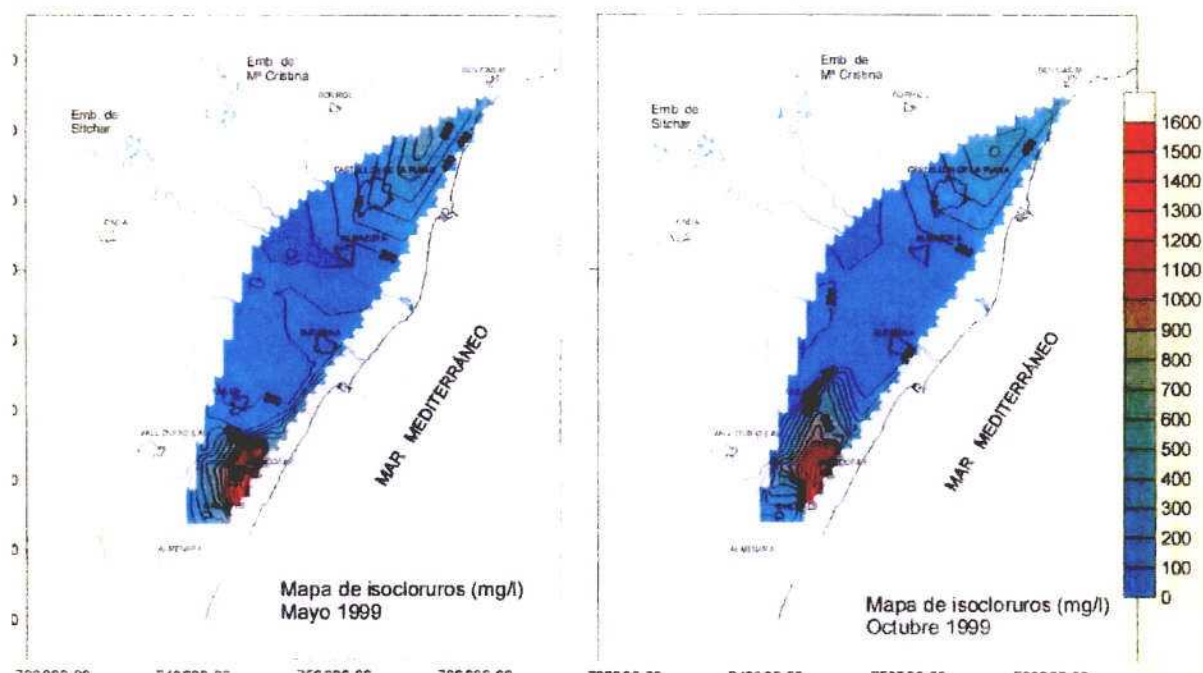


Figura 5. Mapas de isocloruros mayo y octubre 1999

En ambos casos, existen fuertes extracciones, en el sector norte para uso agrícola y urbano, y en el sector meridional para uso agrícola. El proceso de intrusión detectado se atribuye a ascensos de domos de agua de mar (up conning), provocados por las extracciones, que son más fuertes y abundantes en el sector de Moncófar que en el de Benicasim. La mayor amplitud de la anomalía de Moncófar unido a la depresión piezométrica existente, hace pensar en la coalescencia de varios domos.

3. INFORMACIÓN DEL SUBSUELO

3.1 GEOFÍSICA

De acuerdo con la documentación consultada en la base de datos del IGME, las campañas geofísicas eléctricas cubren la totalidad de la Plana de Castellón, aunque las más recientes se centran en el sector meridional de la misma, al sur del río Mijares, entre las localidades de Chilches, al sur, y Burriana, al norte.

La información disponible, hasta el momento, consiste en al menos dos campañas de sondeos eléctricos verticales, utilizadas para la elaboración del PIAS (IGME-IRYDA) de la cuenca media y baja del Júcar (años 1972-1973), una campaña de sondeos eléctricos verticales realizada por el IGME en 1981, y una campaña de sondeos eléctricos verticales y sondeos de polarización inducida, realizados por el IGME en 1983.

- Campaña SEV 1972-1973. Se trata de las campañas de SEV realizadas por Aeroservice durante los años 1972-1973, e incluidas en los trabajos del PIAS de la cuenca media y baja del Júcar. Los sondeos de IRYDA CS-1, CS-2, y CS-3, en el sector de Villarreal, se ubican de acuerdo con los resultados de dicha campaña. Se dispone de los datos de los SEV próximos a CS-1, CS-2 y CS-3. La

interpretación de Astier del año 1973 permite establecer la geometría del sustrato resistivo de la Plana.

- Campaña SEV 1981. Se trata del Proyecto de Investigación Geoeléctrica en las áreas de Granada-Jaén y Valencia. Dentro de la denominada área de Valencia se incluye el sector meridional de la Plana de Castellón. En este sector se realizaron 32 SEV, según un dispositivo Schlumberger distribuidos en 8 perfiles de dirección NO-SE. De los 32 SEV 31 se realizaron con $AB=3000$ m y uno con $AB=2000$ m, que no se pudo prolongar por dificultades topográficas.

Según el citado proyecto en el área de Moncófar la estructura geoeléctrica consta de tres unidades fundamentales:

- Formación resistiva superficial, atribuible a materiales detríticos, con espesor variable desde 20 a 200 m. Esta formación se descompone en varias capas, por lo general de varios centenares de ohmios-metro.
 - Formación intermedia, subyacente a la anterior, y que a su vez, puede dividirse en dos. La primera con resistividades superiores al centenar de ohmios-metro, incluye a los SEV 1, 4, 9, 14, 21, 22, 23, y 26, situado en la parte oeste de los perfiles, y la segunda, con resistividades próximas a 60 ohmios-metro, incluye a los restantes SEV, con excepción del SEV 32, que presenta características propias del primer grupo.
 - Sustrato resistivo, que se detecta a profundidades que varían desde 300 a 1300 m, y que parece afectado por una tectónica de bloques.
Algunos SEV presentan resistividades muy bajas, lo que se atribuye a invasión marina. Estos son los SEV 7, 8, 12, 13, 19 (dudoso) y 20.
- Campaña SEV-SPI 1983. Los resultados de esta campaña se recogen en el informe interno del IGME “Ensayo sobre la aplicación del método de polarización inducida a la detección de invasiones marinas”. Este trabajo se realizó con el fin de desarrollar un método geofísico alternativo a la medida de resistividad aparente (técnica de SEV), para el estudio de la intrusión marina, ya que está constatada su limitación cuando se trata de acuíferos detríticos costeros multicapa, con intercalaciones arcillosas. Esta limitación se debe a que disminuciones de la resistividad aparente se pueden atribuir tanto a niveles arcillosos como a niveles transmisivos salinizados.

Por ello en esta clase de acuíferos es deseable la medida de otros parámetros, geofísicos, como la polaribilidad (en el dominio de frecuencias) o cargabilidad (en el dominio del tiempo), que permitan resolver la indeterminación anterior. Por ello se realizó una campaña de SPI-SEV.

En el sector sur de la Plana de Castellón se realizaron 39 SPI-SEV, distribuidos en 8 perfiles de dirección NO-SE. Los puntos de medida se distribuyeron a intervalos de 1000 m aproximadamente. El tiempo de excitación en la magnitud de las lecturas de PI, se inició con ciclos de 4 seg, y posteriormente con ciclos de 2 seg y repetición de las lecturas, siempre que hubo dudas al respecto de la calidad de las mismas. Si la lectura fue la misma en un proceso de cinco lecturas, se adoptó la media como válida. Cuando aparecieron discrepancias en cada serie de medidas, se adoptó el promedio de las mismas.

Debido a que el ámbito de profundidades de interés se restringe a los primeros 200 m, se planteó que todos los SEV-SPI se hicieran según un dispositivo Schlumberger con $AB = 1000$, aunque por motivos tácticos, en algunos casos la apertura fue de 600 a 1000m.

En términos generales, todos los SEV-SPI se caracterizaron por resistividad y cargabilidad muy bajas.

Las conclusiones del trabajo se resumen en los siguientes puntos:

- En base a los resultados de los perfiles geoelectricos y de cargabilidad, se puede establecer el límite de 4 milisegundos como valor que diferencia entre zonas salinizadas (< 4 ms) y zonas nada o poco salinizadas (> 4 ms). La distribución de isolíneas de cargabilidad indican que el mayor grado de salinización se produciría entre Moncófar y la Playa de Chilches, aunque existe apreciable intrusión a lo largo de toda la costa.
- La zona salinizada se caracteriza por valores muy bajos de resistividad, valores que van creciendo de forma progresiva a medida que la intrusión es menos acusada.
- Análogo comportamiento se observa con los valores reales de cargabilidad. Las áreas con mayor grado de salinización presentan cargabilidades menores de 2 ms, dentro del acuífero detrítico. La presencia del basamento carbonatado introduce modificaciones dentro del rango de profundidades en que se sitúa.
- Las variaciones de cargabilidad dentro del Terciario, fuera de la zona salinizada, responden a la presencia de formaciones detríticas de tipo lenticular. Cuando éstas tienen un espesor apreciable se manifiestan con cargabilidad sensiblemente más alta que en los tramos puramente arcillosos.
- En cualquier caso las curvas de SPI y SEV son de aspecto muy suave con escaso contraste de valores, excepto en algunos puntos situados en el extremo occidental de algunos perfiles, donde se manifiesta la influencia del Triás subaflorante.
- No existe una buena correlación entre los resultados interpretados mediante SEV-SPI y los datos hidroquímicos de la red de control del IGME, debido principalmente a que el rango de profundidades de las técnicas aplicadas se sitúa entre 100-200 m, mientras que el muestreo hidroquímico corresponde a pozos con profundidades inferiores a 50 m.

3.2. SONDEOS

De acuerdo con la base de datos de puntos acuíferos del IGME, en la Plana de Castellón existen innumerables pozos y sondeos, la mayor parte de los cuales captan los primeros 50 m del acuífero. Como contrapartida, los sondeos con columnas fiables y datos de testificaciones geofísicas, son muy escasos, restringiéndose a los realizados por el IRYDA durante los años 70. Al igual que ocurre con los trabajos de geofísica, la mayor parte de estos sondeos se ubican al sur del río Mijares, y en concreto en el sector entre Villarreal y Burriana.

Después de un filtrado exhaustivo, los sondeos que aportan información de interés son los siguientes:

- ✓ 3025-1-0075 (CS-3)
- ✓ 3025-1-0074 (CS-2)
- ✓ 3025-6-0029 (CS-1)
- ✓ VR-I
- ✓ 3025-5-76 (CS-4)
- ✓ 3025-5-0082 (INÉS 3)

En todos los casos los sondeos están emboquillados en materiales cuaternarios, disponen de columna litológica detallada, y en el caso de los sondeos CS, existen algunas diagrfias (resistividad, potencial, y en el caso de CS-4 rayos gamma). No obstante es conveniente realizar un análisis e interpretación de los datos aportados.

4. ÁREAS DE ACTUACIÓN

De acuerdo con la información disponible, y teniendo en cuenta los objetivos del proyecto, se pueden definir dos áreas de actuación:

- Sector occidental de Villarreal. Vendría definido por la zona donde se agrupan los sondeos CS-3, CS-2 y VR-I, prolongable hacia el SE, hasta el sondeo CS-1. En esta zona se dispone de la información de los sondeos citados, así como el perfil P-3 de sondeos eléctricos verticales de la campaña de 1972 realizada por Aeroservice (perfil P-9 en la reinterpretación de Astier en 1973). En este caso, se estudiaría el acuífero pliocuaternario, con más de 150 m de potencia y la geometría del basamento mesozóico, donde destaca la presencia de un horst de dirección NE-SO, limitado por fallas con un salto vertical superior a los 150 m.
- Sector meridional de la Plana, entre Nules y Chilches. En esta zona, no existen sondeos mecánicos con columnas fiables, pero existen don campañas de SEV y una de Polarización Inducida. El acuífero se encuentra intruido por agua de mar, presentando el agua subterránea concentraciones de 1.000 mg/L al NO de Moncófar.

Entre los dos sectores descritos, existe una tercera zona, Villavieja - Villarreal (entorno a los sondeos 3025-5-0082 y CS-4), en los que el acuífero pliocuaternario tiene un espesor mínimo (50-70 m), y donde el sustrato mesozoico es subaflorante. En esta zona el agua subterránea tiene una concentración en cloruros de 200 a 300 mg/L, pudiendo haber un proceso incipiente de intrusión.

5. BIBLIOGRAFÍA

- IGME-IRYDA (1975). Proyecto de investigación hidrogeológica de la Cuenca Media y Baja del Júcar.
- IGME-IRYDA (1977). Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas. Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Media y Baja del Júcar.
- IGME (1981). Proyecto de investigación geoelectrica en las áreas de Granada-Jaén y Valencia.
- IGME (1983). Ensayo sobre la aplicación del método de polarización inducida a la detección de invasiones marinas.

- Ángel Granda Sanz (1988). Aplicación de métodos geofísicos al estudio de la intrusión en acuíferos costeros. Experiencia española. En: Tecnología de la Intrusión Salina en Acuíferos Costeros. pp. 111-134. Actas del TIAC'88 Almuñecar.
- ITGE (1988). Las aguas subterráneas en la Comunidad Valenciana. Uso, calidad y perspectivas de utilización. Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- ITGE (1989). Castellón de la Plana y Sagunto. Serie: Manuales de utilización de acuíferos
- ITGE-DPC (1990). Proyecto para la evaluación de abastecimiento a núcleos urbanos con aguas subterráneas en la provincia de Castellón. Primera fase.
- Ignacio Morell y Félix Hernández (2000). El agua en Castellón. Un reto para el siglo XX. Edita Universidad Jaume I. Castellón de la Plana.

ANEXO C

INFORME GEOLÓGICO DE LA ZONA DE CÁDIZ

ANEXO C

ANEXO GEOLÓGICO DE LA BAHIA DE CADIZ

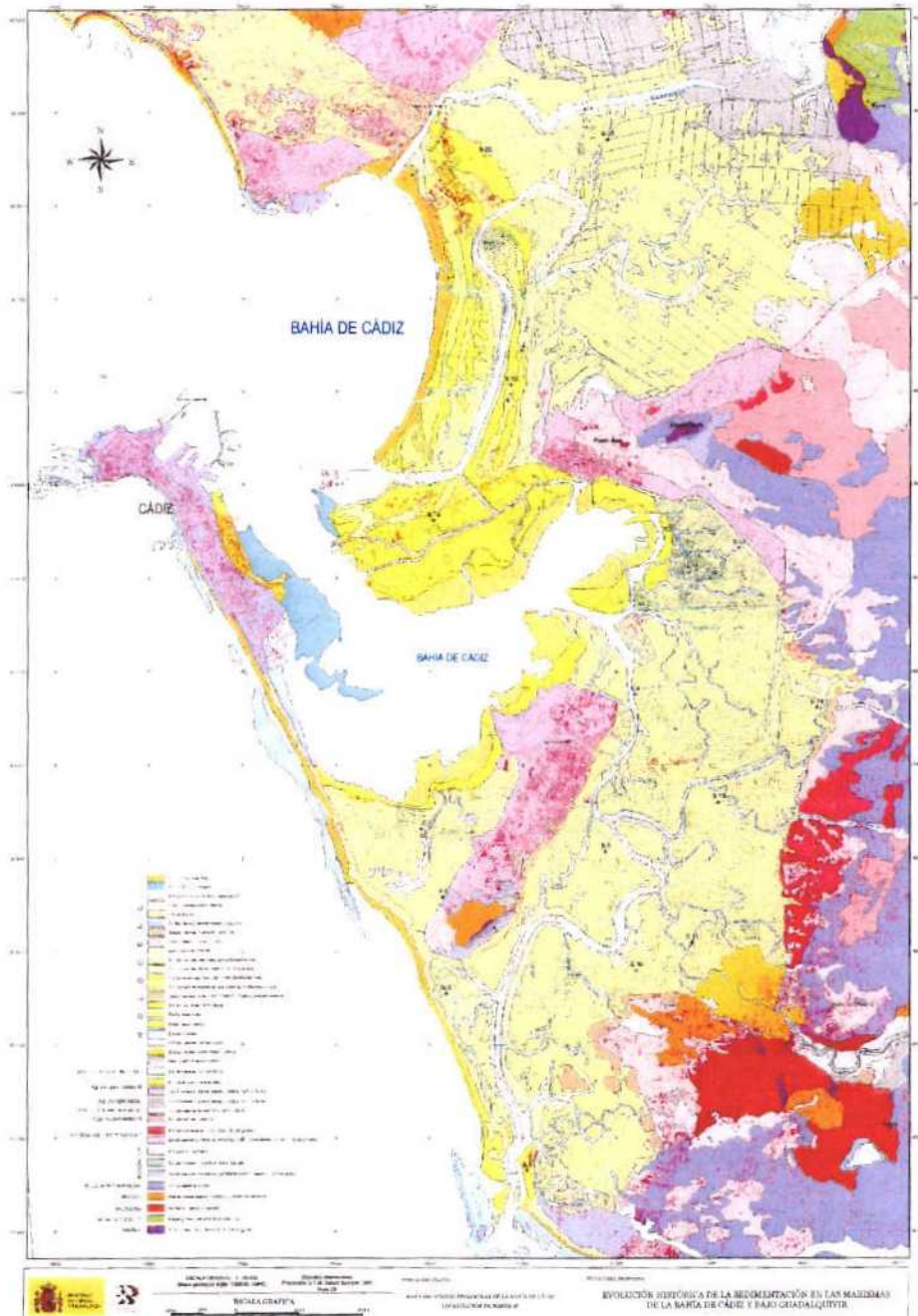
La bahía de Cádiz está claramente dividida en tres sectores desde un punto de vista geográfico e hidrodinámico: una bahía externa, conectada al mar abierto, situada al norte y noreste de la ciudad de Cádiz, una bahía colmatada que corresponde al relleno del antiguo estuario del río Guadalete (Flecha de Valdelagrana y marismas del Guadalete) y una bahía interna, localizada al sur, separada por el Estrecho de Puntales y de facies predominantemente mareales (Hernández- Molina *et al.*, 1996).

En la bahía externa, la deriva litoral en la costa es de dirección SE condicionada por los vientos de Poniente, más constantes, y la morfología del litoral (NNO-SSE con escalones O-E). El sistema hidrodinámico en la plataforma lo domina la corriente del Agua Superficial del Atlántico Norte (NASW) que se desplaza en la misma dirección (Gutiérrez-Más *et al.*, 1995). La principal corriente hidrodinámica en la bahía es el reflujo de marea, que en parte rellena la bahía interna y se expulsa a través del caño de Sancti Petri. Los sedimentos que ocupan el fondo de la bahía externa son arenosos y arenoso limosos en la parte más abierta al océano y fango-arcillosos en la interna (Achab *et al.*, 2000).

La bahía interna, también denominada El Saco, es claramente distinguible por su comportamiento hidrodinámico, ya que constituye un área más restringida y está dominada por ambientes mareales someros. Presenta un gran desarrollo de marismas que configuran una superficie llana de unos 30 km² de área entre las poblaciones de Puerto Real al norte, San Fernando al oeste y Chiclana al sur. Las aguas de esta bahía interna presentan bastante turbidez, debido a la removilización del fondo por el viento, principalmente de levante, y al transporte por las corrientes de marea y del oleaje (Gutiérrez *et al.*, 2000). Las marismas se ponen en contacto con el mar abierto a través del caño de Sancti Petri. Hasta hace pocos siglos, este caño aislaba la zona donde se sitúa la población de San Fernando (antigua Isla de León) formando una isla dentro de la bahía (Gavala, 1927). Posteriormente, se produjo el relleno y colmatación de esta parte de la Bahía hasta llegar a la marisma actual, cuya evolución ha sido muy rápida en los últimos cientos de años (Dabrio *et al.*, 1995, 1999, 2000; Goy *et al.*, 1996).

La parte colmatada de la bahía está ocupada por marismas que se encuentran restringidas en su margen occidental por una flecha litoral arenosa de dirección nortesur (Flecha de Valdelagrana) a través de la que desembocan los cauces de los ríos Guadalete y San Pedro. Los aportes detríticos provenientes del río Guadalete y la deriva litoral han contribuido al rápido relleno sedimentario del estuario y su parcial colmatación, lo que ha dado lugar a la formación de las amplias marismas del mismo nombre.

Marco Geológico



La Bahía de Cádiz tiene una extensión de unos 50 km² y forma romboidal, con los márgenes definidos por alineaciones aproximadamente NE-SO y NO-SE. Está limitada al oeste por el Océano Atlántico y el istmo de Cádiz, de unos 14 m de altitud, 12 km de longitud y orientación NNO-SSE; al norte y al este por el relieve continental, constituido principalmente por unidades detríticas postorogénicas; y al sur por la flecha litoral de Sancti Petri y el relieve de Chiclana de la Frontera (Baena *et al.*, 1987). En el interior se encuentra un relieve, de unos 29 m de altitud y orientación NE-SO, sobre el que se sitúa la ciudad de San Fernando.

Desde un punto de vista geológico el área de la bahía se sitúa en el extremo occidental de la Cordillera Bética. En esta área, al final del Mioceno superior, se produce una fase

distensiva que provoca el hundimiento de los materiales del Mioceno terminal de San Cristobal mediante fallas de dirección ENE-OSO y NO-SE, aunque es probable la actuación de otras fallas hoy fosilizadas. Durante este período distensivo se generó la Bahía de Cádiz sobre el bloque meridional (labio hundido) de una falla normal ENE-OSO que discurre por el borde norte de la bahía (Sierra de San Cristobal y El Aculadero). Esta falla actuó al final del Mioceno quizá como falla en dirección, rejugó durante el Plioceno inferior y medio con carácter normal, y fue fosilizada en el Plioceno superior (Benkhelil, 1976; Baena *et al.*, 1987).

Durante el Plioceno inferior-medio se produce una transgresión, el mar sobrepasa los límites actuales de la bahía y las facies que se desarrollan son marinas de carácter litoral, al este de la bahía, e infralitorales, en el ámbito de la bahía. Durante el Plioceno superior el mar comienza a retroceder, de tal suerte que durante este período de claro carácter regresivo sólo perdura el régimen marino en la bahía mientras que se forman lagos desconectados del mar en las zonas del interior. Las facies que se desarrollan en la bahía son marinas litorales (conglomerado ostionero inferior) marino-salobres, o de *lagoon*, y marismas. Registran el desarrollo de un sistema de islas barreras (o flechas litorales) que separaba áreas de *lagoon* y marismas del mar abierto (Zazo *et al.*, 1983). Durante el Pleistoceno inferior el mar continúa retrocediendo, aunque con pequeñas oscilaciones positivas. Estas oscilaciones relativas del nivel del mar determinan que los ambientes marinos y fluvio-marinos se sucedan en el tiempo dentro de la bahía. Las facies que se desarrollan son marinas litorales (conglomerado ostionero medio y superior) y fluvio-marinas, correspondiendo éstas últimas a depósitos de un antiguo cauce del Guadalquivir que desembocaba, a través del cauce del Guadalete, en la Bahía (Zazo *et al.*, 1983; Zazo, 1989; Rodríguez-Vidal, 1989a).

En el Pleistoceno inferior (post-Villafranchense) se registró una segunda fase tectónica, esta vez de carácter compresivo, con el eje mayor de compresión según una dirección de NNO-SSE a N-S y una extensión asociada en torno a ENE-OSO (Benkhelil, 1976; Baena *et al.*, 1987; Rodríguez-Vidal, 1989b). Como consecuencia de esta fase de deformación la Bahía de Cádiz y la Cuenca del Guadalquivir se individualizan debido a la elevación del bloque sur de la falla del Bajo Guadalquivir y la formación del anticlinal de Jerez, que modifica el curso del río Guadalquivir situándolo en zonas más próximas al curso actual. En el ámbito de la bahía se produjo una compartimentación en bloques, a favor de fracturas de direcciones preferentes NNO-SSE y NNE-SSO, y se generaron diversos relieves estructurales que, a partir de este momento, condicionaron la sedimentación en el área. La actividad tectónica perduró en la Bahía a lo largo del Cuaternario. Las dataciones radiométricas realizadas confirman que la actividad tectónica continuó hasta el Pleistoceno superior (Gracia *et al.*, 1999) y los datos obtenidos de perfiles sísmicos, realizados en mar, indican que los depósitos holocenos están afectados por fracturas ENE-OSO de escasa longitud y desplazamiento (Vázquez *et al.*, 2000).

Durante el Pleistoceno medio-superior la bahía constituía un área de dominio continental donde se desarrollaron depósitos de glaciares y terrazas fluviales. En el subsuelo del norte de la bahía se han identificado depósitos fluviales (Dabrio *et al.*, 1995; Llave, 1998), de 25-30000 a BP (Pleistoceno superior), que registran la sedimentación durante un *highstand*, correspondiente al estadio isotópico IS3, que no llegó a alcanzar el nivel del mar actual (Dabrio *et al.*, 1999, 2000). Posteriormente, durante el último período glacial, los ríos incidieron en estos depósitos fluviales creando

paleovalles que se rellenaron durante el Holoceno (Dabrio *et al.*, 2000; Zazo y Goy, 2000).

Evolución sedimentaria de la Bahía de Cádiz durante el Holoceno

Tras el mínimo del nivel del mar alcanzado durante el último periodo glacial (-120 m, Hernández-Molina *et al.*, 1994) comenzó la transgresión Flandriense. Durante este periodo se produjo un gran retroceso de la línea de costa, inundándose los antiguos valles fluviales y configurándose una amplia bahía en la zona, que posteriormente se ha ido rellenando de sedimentos (Dabrio *et al.*, 2000). La evolución sedimentaria de la zona ha sido objeto de estudio de numerosos autores, constituyendo actualmente uno de los ejemplos mejor conocidos de evolución paleogeográfica del litoral atlántico español. Estos estudios han utilizado, sobre todo, fotointerpretación y dataciones radiométricas para el estudio de la flecha litoral de Valdelagrana (Zazo *et al.*, 1994; Goy *et al.*, 1996; Borja *et al.*, 1999; Gómez-Ponce *et al.*, 1999) y sondeos en la zona de la marisma (Dabrio *et al.*, 1995, 1999, 2000; Goy *et al.*, 1996; Lario, 1996; Luque, 2002) realizados, muchos de ellos, con motivo de la construcción de la autovía que une El Puerto de Santa María con Puerto Real.

Marismas del Guadalete

El estudio de los sondeos realizados en el relleno de la marisma, ha permitido reconstruir la estratigrafía secuencial durante el último hem ciclo glacial-interglacial y su interpretación paleoambiental (Dabrio *et al.*, 2000; Lario, 1996). Así, se observa que durante el Último Máximo Glacial (18000 – 20000 a BP) el río Guadalete se encontraba encajado sobre otros depósitos fluviales, depositados durante una corta etapa de mayor humedad que corresponde al episodio isotópico IS3 con una edad de 25-30000 a BP (Dabrio *et al.*, 1999). Con el inicio del Presente Interglacial y el ascenso del nivel del mar debido a la transgresión Flandriense (14000 – 6500 BP) el valle queda inundado. Los depósitos transgresivos son escasos y corresponden a facies fluviales y marinas, con una edad de 10520 a 9920 a BP (Dabrio *et al.*, 2000), que marcan el inicio del Holoceno. El máximo transgresivo (6500 a BP) se traduce en un retroceso de la línea de costa y el desplazamiento hacia tierra de las barras estuarinas. Durante el *highstand* el relleno sedimentario está en estrecha relación con la tasa de ascenso del nivel del mar. Entre 6500 y 2700 a BP la tasa sedimentaria supera a la del ascenso eustático produciendo acreción vertical de los depósitos. El incremento de la acreción lleva a una reducción del prisma mareal y a un aumento del efecto del oleaje, especialmente entre 2700 y 2500 a BP. Esto también favorece la estabilización de las flechas litorales, que reciben sedimentos de dos cauces, el río Guadalete y el San Pedro. Durante los últimos 500 años estos aportes se incrementan de forma importante (Dabrio *et al.*, 1999, 2000).

Flecha de Valdelagrana

En la costa andaluza mediterránea comienzan a formarse cordones litorales a partir de 6500 a BP en los que Zazo *et al.* (1994) diferencian cuatro unidades de progradación (H1 a H4). En el litoral atlántico no hay registro de la primera unidad progradante (H1), estando representadas en el sistema de la flecha litoral de Valdelagrana las unidades H2 (4400-2700 a BP), H3 (2400-700 a BP) y H4 (500-actualidad) (Zazo *et al.*, 1994; Borja

et al., 1999). La formación de estos cordones está condicionada por la deceleración o descenso general del nivel del mar, la tasa de aporte sedimentario, las variaciones climáticas y la mayor o menor entrada de Agua Superficial del Atlántico Norte en el Golfo de Cádiz (Zazo *et al.*, 1994, Lario, 1996).

La formación de dunas eólicas comienza a partir de los últimos 2700 años con el desarrollo de tres generaciones de dunas que cubren parcialmente los cordones y muestran las distintas orientaciones de los vientos predominantes: D1, del Neolítico tardío al Bronce basal (4000 a.C.), vientos de dirección oeste-suroeste; D2, que contiene restos romanos y medievales, de los siglos XIV al XVII y vientos del suroeste y D3, desde el siglo XVII hasta la actualidad (Borja, *et al.*, 1999).

Bahía externa

La Bahía externa presenta una profundidad media de 5 m que aumenta hacia el oeste hasta los 15 m. El estudio en perfiles sísmicos de los depósitos de la bahía muestran la presencia de tres cortejos sedimentarios correspondientes al nivel del mar bajo, al periodo transgresivo flandriense y al máximo holoceno (Llave *et al.*, 2000). Según Hernández-Molina *et al.* (1996) dentro de la bahía externa los depósitos holocenos presentan una cuña basal de 10 m de potencia máxima y, separada por una superficie erosiva, otra de 6-7 m cubierta de una delgada unidad arenosa agradante de 1-1,5 m de potencia, que pueden ser correlacionables con las unidades de Llave *et al.* (2000). Los máximos espesores se encuentran en depocentros relacionados con los antiguos paleovalles que han sido rellenados por estos sedimentos holocenos (Hernández-Molina *et al.*, 1996; Achab y Gutiérrez-Más, 2000).

Bahía interna

En la zona de la bahía interna el espesor máximo conocido de sedimentos holocenos es de 10 m según Hernández-Molina *et al.* (1996). Éstos están constituidos por arenas transgresivas en la base, que afloran al este de Cádiz en la zona dragada artificialmente del canal del Puntal, y están cubiertas por fangos.

Actualmente poseemos muy poca información del subsuelo de esta parte de la bahía, únicamente Luque (2002) realiza un sondeo de siete metros que no llega a alcanzar el sustrato pleistoceno. Sin embargo, si se posee un buen conocimiento de los sedimentos que afloran en superficie. Dentro de las marismas afloran depósitos marinos holocenos que se podrían atribuir al máximo transgresivo flandriense. Entre estos depósitos cabe señalar una terraza marina colgada situada al sur de Barrio Jarana (García Domingo *et al.*, 1990). Esta terraza (+2,5-3 m), datada entre 4860 y 5325 a BP, está constituida por 1,5-2 m de arenas con abundantes restos de bivalvos y está cubierta por un glacis proveniente de los relieves circundantes (Gracia *et al.*, 2000). Gracia *et al.* (2000) describen otros depósitos de terrazas en esta parte de la bahía. El primer depósito, situado al sur de Puerto Real, es una terraza marina (+0,76 m) constituida por depósitos de playa que contienen cerámica romana de los siglos I y II d.C. Cerca del Coto de la Isleta, situado en la desembocadura sur del caño de Sancti Petri, encuentran tres niveles altos de marisma y llanura mareal a las cotas de +0,1, +0,34 y +0,66 m, cuyo nivel superior contiene cerámica romana de los siglos I o II d.C. Finalmente, describen el

único resto de flecha litoral situado en el interior de la marisma y cerca de Barrio Jarana. El cordón arenoso se extiende en dirección norte-sur, está constituido por gravas y arenas de edad 2900 a 2500 a BP y corresponde al final de la primera fase progradante atlántica, dentro de la unidad H2 de Zazo *et al.* (1994).

BIBLIOGRAFÍA

- Achab, M., Gutiérrez Más, J.M., Sánchez Bellón, A. y López Aguayo, F. (2000). Dinámica de incorporación y transporte de sedimentos finos y minerales de la arcilla entre la zona interna y externa de la bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 27: 3-6.
- Achab, M. y Gutiérrez Más, J.M. (2000). Análisis de los componentes terrígenos presentes en la fracción arena de los fondos de la Bahía de Cádiz. *Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlántica*, Lisboa: 269-270.
- Baena, J., Zazo, C. y Goy, J.L. (1987). Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1061 (Cádiz) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME.
- Baena, J., Zazo, C. y Goy, J.L. (1987). Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1062 (Paterna de Rivera) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME.
- Benavente, J., Reyes, J.L. y Anfuso, G. (2000). Patrón de presentación de morfologías intermareales en dos playas expuestas de la Bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 27:19-22.
- Benkhelil, J. (1976). Etude néotectonique de la terminaison occidentale des Cordilleres Bétiques (Espagne). Tesis Doctoral Univ. Nice, 180 pp.
- Borja, F., Zazo, C., Dabrio, C.J., Díaz del Olmo, F., Goy, J.L. y Lario, J. (1999). Holocene aeolian phases and human settlements along the Atlantic coast of Southern Spain. *The Holocene*, 9: 333-339.
- Gracia, F.J., Rodríguez Vidal, J., Benavente, J., Cáceres, L. y López Aguayo, F. (1999). Tectónica cuaternaria en la Bahía de Cádiz. *Avances en el estudio del Cuaternario español*. L. Pallí Buxó y C. Roqué Pau (eds), 64-74.
- Gracia, F.J., Alonso, C., Gallardo, M., Giles, F., Benavente, J. y López Aguayo, F. (2000). Evolución eustática postflandriense en las marismas del Sur de la Bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 27, 71-74.
- Dabrio, C.J., Goy, J.L., Lario, J., Zazo, C., Borja, F. y González, A. (1995). The Guadalete estuary during the Holocene times (Bay of Cadiz, Spain) INQUA MBSS NEWSLETTER, 17: 19-22.
- Dabrio, C.J., Zazo, C., Goy, J.L., Siervo, F.J., Borja, F., Lario, J., González, J. A. y Flores, J. A. (1999). Sequence stratigraphy of Holocene incised-valley fill and coastal evolution in the Gulf of Cádiz (Southern Spain). *Geologie en Mijnbouw*, 77: 263-281

- Dabrio, C. J., Zazo, c., Goy, J. L, Sierro, F.J., Borja, F., Lario, J., González, J. A. y Flores, J. A. (2000). Depositional history of estuarine infill during the Last Postglacial transgression (Gulf of Cadiz, Southern Spain). *Marine Geology*: 26-58.
- Goy, J.L., Zazo, C., Dabrio, C.J., Lario, J., Borja, F., Sierro, F. y Flores, J.A. (1996). Global and regional factors controlling changes of coastlines in southern Iberia during the Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 15(3-4):1-8
- Gutiérrez, A., Luna del Barco, J. M., Parrado, J. M., Sánchez, E., Fernández Palacios, A. y Ojeda, J. (2000). Variaciones de la turbidez de las aguas de la bahía de Cádiz determinadas a partir del análisis de imágenes Landsat TM. *Geogaceta*, 27: 79-82.
- Gutiérrez Más, J. M., López Galindo, A., González Caballero, J. L. y López Aguayo, F. (1995). Las facies detríticas de la plataforma continental de Cádiz (Tramo Chipiona- Trafalgar) en relación con la evolución de la dinámica sedimentaria reciente. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 8: 61-71.
- Gavala, J. (1924). Mapa geológico de la provincia de Cádiz e. 1:100.000. IGME
- Gavala, J. (1959). Mapa Geológico de España e. 1:50.000 Hoja 1061 (Cádiz), 1ª Serie IGME
- Hernández-Molina, F.J., Somoza, L. Rey, J. y Pomar, L. (1994). Late Pleistocene-Holocene sediments on the Spanish continental shelves: Model for very high resolution sequence stratigraphy. *Marine Geology*, 120: 129-174
- Hernández-Molina, F. J., Fernández Puga, MC., Fernández Salas, L.M., Clave, E., Lobo, F.J., Vázquez, J.T., Acosta, J. y López Aguayo, F. (1996). Distribución y estructuración sedimentaria de los depósitos del Holoceno terminal en la Bahía de Cádiz. *Geogaceta* 20: 416-419
- IGME y EPTISA. 1973. Proyecto de investigación hidrogeológica del bajo y medio Jucar. Comentarios de J.L.Astier sobre la prospección geofísica efectuada en 1972. N.F.D. del IGME 31525
- Lario, J., (1996). Último y Presente Interglacial en el área de conexión Atlántico-Mediterráneo (Sur de España). Variaciones del nivel del mar, paleoclima y paleoambientes. Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Madrid, 269 pp.
- Luque, L., (2002) Cambios en los paleoambientes costeros del sur de la Península Ibérica (España) durante el Holoceno. Tesis Doctoral. Universidad Complutense, Madrid, 377 pp.
- Llave, E., Hernández-Molina, E J. y López Aguayo, E (2000). Consideraciones paleoceanográficas a partir del registro estratigráfico Holoceno de la Bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 27: 231-234.
- Rodríguez Vidal, J. (1989b). El inicio de la red fluvial cuaternaria en el sector occidental de la Depresión del Guadalquivir. *En: El Cuaternario en Andalucía Occidental, AEQUA, Monografías*, 1: 27-31.

- Zazo, C. (1989). Los depósitos marinos cuaternarios del Golfo de Cádiz. En: *El Cuaternario en Andalucía Occidental*. AEQUA Monografías, 1: 113-122.
- Zazo, C., Goy, J.L y Dabrio, C. J. (1983). Medios marinos y marino-salobres en la bahía de Cádiz durante el Pleistoceno. *Mediterranea*, 3: 29-52.
- Zazo, C., Goy, J.L, Somoza, L, Dabrio, C.J., Belluomini, G., Improta, S., Lario, J., Bardají, T. y Silva, P.G. (1994). Holocene sequence of Sea-Level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast. *Journal of Coastal Research* 10: 933-945.
- Zazo, C. y Goy, J.L. (2000). Cambios eustáticos y climáticos durante el Cuaternario. Una síntesis sobre su registro en los litorales del sur y sureste peninsular, Islas Canaria y Baleares (España). *Geomorfología litoral. Procesos activos*, J.R. de Andrés y F. J. Gracia (Eds) 187-206.

ANEXO D

DATOS INICIALES DE LA ZONA DEL RÍO TORDERA

ANEXO D DATOS INICIALES DE LA ZONA DEL RIO TORDERA

Este Anexo contiene documentación de trabajo utilizada durante la ejecución del proyecto, referente a las líneas sísmicas, SEV y sondeos mecánicos preexistentes, así como mapas y fotografías georeferenciadas. Parte del material está en soporte de papel y parte en ficheros informáticos.



- 1- material entregado por el ICC en 2003 (disco 1, carpeta D1)
- 2- material entregado por el ICC en 2004 (disco 2, carpeta D2)
- 3- material de trabajo elaborado por la UB, 2004 (disco 1, carpeta D1)
- 4- material complementario (disco 1, carpeta D1)

De este ANEXO sólo existe un ejemplar en soporte de papel, que queda archivado en el Área de Geofísica del IGME.

1- ICC2003

1- LISTA DE MATERIAL PARA LA CAMPAÑA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA DE NOVIEMBRE DEL 2003 A LO LARGO DEL CURSO BAJO EL RÍO TORDERA PROYECTO COORDINADO GEOELEC

- 1- Colección de ortofotomapas (E: 1/5000) de la zona a investigar del ICC. En concreto los mapas:
 - 394-7-1 (303-113) Les Ferreries
 - 394-8-1 (304-113) Platja de Sabanell
 - 365-7-8 (303-112) PalafollsAdicionalmente se acompaña de tres mapas que circundan la zona (1 ejemplar).
 - 365-6-8 (303-112)
 - 394-7-2 (303-114)
 - 365-8-8 (304-112)
- 2- Un mapa de situación de la sección sísmica de reflexión PS-4 sobre composición de ortofotomapas (E: 1/5000).
- 3- Copia a papel de la sección sísmica de reflexión PS-4
- 4- Colección impresa de los SEV realizados a lo largo del curso del río (2002).
- 5- Un mapa con la localización de la profundidad del techo de granito deducida a partir de los perfiles sísmicos y los SEV
- 6- Cortes geológicos de interés
- 7- UN CD con las siguientes carpetas:

Mapas

Ortofotomapas en formato digital *.TIF Acompañadas de los correspondientes ficheros TXT para su posterior georeferenciación.

PS 4

PS4_situación.SRF (Surfer, V.7) Mapa de situación de la sección sísmica de reflexión PS-5 sobre composición de ortofotomapas (E: 1/5000), georeferenciado.

PS4.TIF Imagen de la Sección sísmica PS-4

PS4_Imágenes.cdr (Corel V.8) Imágenes de la sección sísmica PS4 distintas del modo clásico.

PS4_interpretado.cdr (Corel V.8)

Información

Cortes_geologicos.doc

2-ICC2004

2- LISTA DE MATERIAL PARA LA CAMPAÑA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA DE NOVIEMBRE DEL 2004 TRANSVERSAL A LA LÍNEA DE COSTA DEL DELTA DE LA TORDERA

- 1) Mapa de situación de la zona para trabajo en campo; sobre composición de ortofoto-mapas (E: 1/5000).
- 2) Mapa de situación de la sección sísmica de reflexión PS-1 sobre composición de ortofoto-mapas (E: 1/5000).
- 3) Copia a papel de la sección sísmica de reflexión PS-1 interpretada.
- 4) UN CD con las siguientes carpetas:

Mapas

- ✓ Colección de ortofoto-mapas (E: 1/5000) de la zona a investigar; en formato digital *.TIF acompañadas de los correspondientes ficheros TXT para su posterior geo-referenciación. En concreto los mapas: 303-113; 304-113; 303-112 y 304-112.

Nota: Son las ortofoto-mapas de la versión 30; en color (última edición) y por tanto de mayor tamaño (MB). Las ortofoto-mapas en blanco y negro (V20) se dieron en el CD del año anterior. –También se incluye pliego de descripción técnica–.

- ✓ Colección de mapas topográficos (“batimétricos”) (E: 1/5000) del sector del delta; en formato digital *.DXF acompañadas de los correspondientes ficheros TXT para su posterior geo-referenciación. (Cada fichero es una capa). En concreto los mapas: 303-113; 304-113; 303-112 y 304-112.

- ✓ Margen_Derecho_Situacion.SRF (Surfer, V.7). Mapa de situación de la sección sísmica de reflexión PS-1 sobre composición de ortofoto-mapas (E: 1/5000), geo-referenciado. Corresponde al mapa (1).

- ✓ Tordera_topografico.SRF Base topográfica de la zona de estudio

PS 1

- ✓ PS1_interprecion_Geologica.cdr (Corel V.8 y V.9) Interpretación geológica del perfil sísmico

- ✓ PS1_interprecion_Sísmica.cdr (Corel V.8 y V.9) Interpretación sísmica del perfil sísmico
- ✓ Coordenadas_PS1.XLS (Excel-Surfer) Coordenadas (UTM) de la línea PS-1

SEVS

- ✓ SEVS_Malgrat.PPS Presentación PowerPoint que contiene los resultados de campañas eléctricas realizadas en el margen derecho del río Tordera.
- ✓ SEVS_Malgrat.XLS Coordenadas y resistividades aparentes de los SEV del margen derecho del río Tordera; T.M. de Malgrat.

Geofísica Aplicada
Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)

10-Noviembre- 2004

3- MATERIAL DE TRABAJO ELABORADO POR LA UB, 2004

Consta de un CD con los siguientes documentos:



Indice de Figuras

Sondeos eléctricos Verticales

Figura 0 Mapa situación sevs i perfiles

Figura 1 Perfil A 4 3 2 1

Figura 2 Perfil B 8 9 10 15 12

Figura 3 Perfil C 6 7 17 15 14 13

Figura 4 Perfil D 16 15 14

Figura 5 Perfil E 11 12 13

Figura 6 Perfil F 24 20 18 15 27 16 2

Figura 7 Perfil G 22 19 19

Pozos

Figura 8 Mapa situación

Figura 9 Representación litológica de todos los pozos Proyeccion N-S

Figura 10 Representación litológica de los pozos perfil X

Figura 11 Representación litológica de los pozos perfil Y

Figura 12 Representación litológica de los pozos perfil Z

4- MATERIAL COMPLEMENTARIO

Artículos presentados sobre el Proyecto:

- Geophysical characterization of a Mediterranean coastal aquifer: the Baixa Tordera fluvio-deltaic aquifer unit. 18 SWIM, Cartagena 2004
- Groundwater resources assessment using audiomagnetotellurics and seismic data: the fluvial deltaic Tordera aquifer unit. Near Surface EAGE Palermo 2005

ANEXO E

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES DE TOMOGRAFÍA DEL TORDERA

ANEXO E

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES DE TOMOGRAFÍA DEL TORDERA

Contiene los datos, las figuras generadas en el proceso y presentación del estudio y los ficheros de posición de los perfiles medidos.



DATOS:



Contiene los datos de campo y proceso de los perfiles de resistividad medidos por el IGME en la zona del río Tordera, con los siguientes tipos:

Ficheros con los datos de campo:

Se han agrupado por las fechas y zonas medidas. Para cada emplazamiento existen los

fichero ascii de texto (.txt) con parámetros de la medida

fichero binario (.s4k), con todos los datos.

Estos ficheros se generan en el aparato de medida y son volcados a un Pc con la utilidad del programa SAS4000.

Ficheros de datos e interpretados por RES2DINV:

Agrupados por emplazamiento y dispositivo usado.

(nombrebinario.año.mes.dia.hora.minuto.segundo).dat o .amp. Es un fichero ASCII de datos procedentes del binario *.s4k, transformados mediante el programa SAS4000. El .dat es el

fichero tipo de partida para ser procesado con RES2DINV. El .amp es un fichero que contiene todos los datos de la medición.

*.dat Fichero anterior cambiado de nombre

*sort.dat Fichero anterior ordenado y clasificado

*sortelimin.dat Fichero anterior con puntos ruidosos eliminados. Este es el fichero de partida para RES2DINV.

*sortelimininv.dat Fichero anterior cambiado de nombre indicando que es mismo pero cambiado de dirección. Cuando exista es el fichero de partida para RES2DINV.

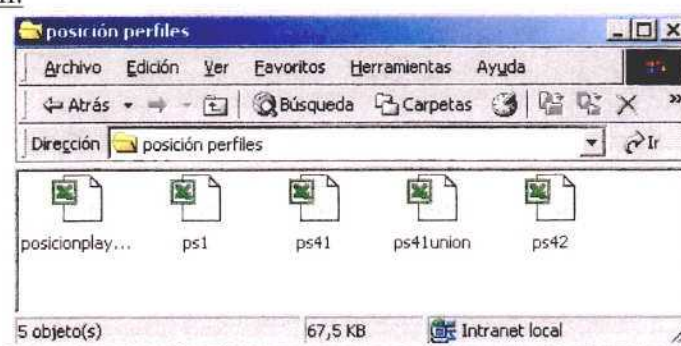
*.inv Fichero resultado de la inversión mediante RES2DINV.

*.rho, *.rms Estos dos ficheros son generados en el programa RES2DINV en el apartado "Display" con la opción "create lund files" y son los ficheros de partida para la representación por el programa erigraph.

*.inf, *.glf, *.rlf, *.ref Estos ficheros son generados por el programa Erigraph con los parámetros de la representación

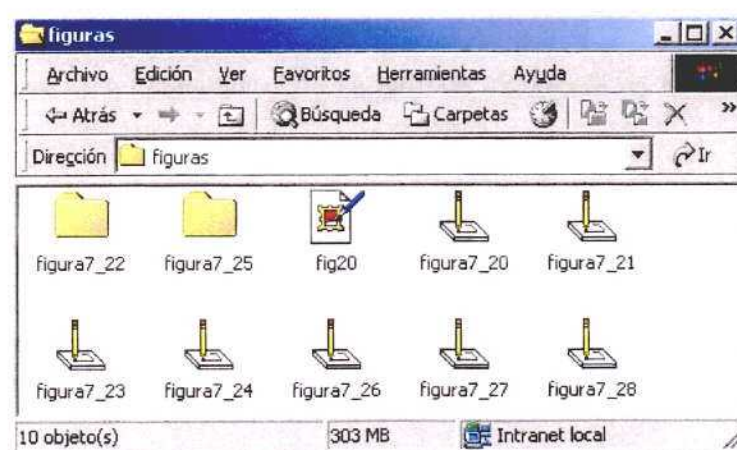
Los formatos de estos ficheros se pueden encontrar en los manuales correspondientes a los programas indicados.

Ficheros de Posición:



La posición de los perfiles se encuentra en ficheros Excel, conteniendo las coordenadas x e y (UTM) de las estaciones del perfil, el número de la estación según la dirección de la medida, y en algún caso el número de la estación según el perfil cambiado de dirección.

Ficheros de representación:



Los datos han sido además preparados para su carga en SIGEOF (Anexo K). Los datos que se almacenan son:

Posición del perfil: fichero Excel con las coordenadas del comienzo y final del perfil.

Fichero de datos del perfil (*.dat sin invertir cuando sea el caso)

Fichero resultados de la inversión por RES2DINV, con formato para SURFER, en concreto el fichero de datos *_modres.dat y el fichero de blanqueo *_modres.blm

ANEXO F

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES DE SEDT DEL TORDERA

ANEXO F DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES DE SEDT DEL TORDERA

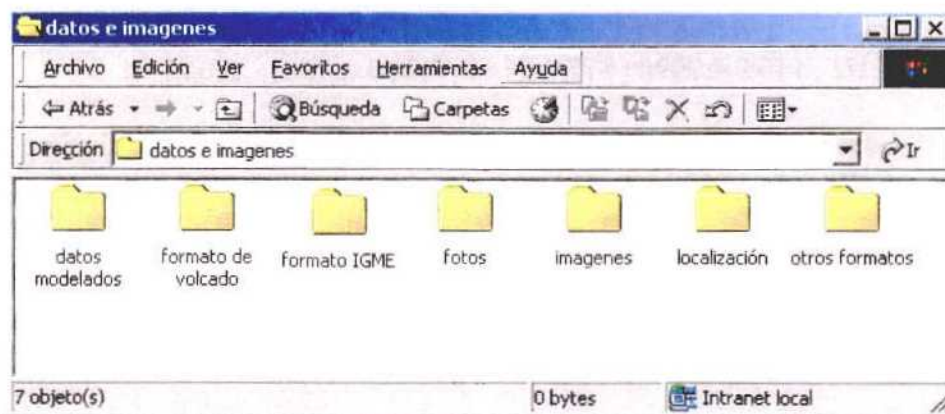
Contiene los informes originales de las campañas de SEDT efectuadas en 2004 (Perfil PS1) y 2005 (Perfil PS4). Se han incluido las secciones geoelectricas finales representadas con la orientación normalizada para poder establecer su comparación con el resto de los trabajos del Proyecto (Carpeta SeccionesBienOrientadas).



Para cada campaña se dispone del texto del Informe correspondiente, efectuado por Geognosia, y cuya parte principal del contenido ha sido incluida en los capítulos correspondientes de este Informe Final.



Respecto de los Datos e Imágenes, se dan los datos de campo en varios formatos, entre ellos el especificado para la base de datos del IGME (SIGEOF, ANEXO K).



Se acompaña igualmente los correspondientes ficheros de las figuras generadas, fotografías, y datos de posición.

Los datos de esta campaña se presentan en dos formatos distintos:

1. Formato con extensión txt. Son los datos directamente volcados del receptor.
2. Formato con extensión tem. Formato solicitado por el IGME.

Datos del volcado del receptor:

Son los datos como se vuelcan del receptor directamente. Tiene tres tipos de cabeceros y sus datos correspondientes:

1. Cabecera y datos de sincronización:

0110

SYNC0537 2004-12-14 9:09:54 12.7v D-D 0.0% 0.0 DegC

OPER isla TX ID 1 A-SP 50 M

JOB lanes LINE 1 E SPREAD 25 MAV Enabled

1 DiffAmp Notch 50,3-5,9 S/N 737 Passed 1.00000

2 DiffAmp Notch 50,3-5,9 S/N 594 Passed 1.00000

3 NanoTEM A/D 16-bit S/N 13 Passed 1.00000

Front Panel S/N 39, Cal S/N 10, Temp 0.0, Humidity 0.0, EPROM

030901BLD321

0111

SYNC0537 2004-12-14 9:28:03 12.7v D-D 0.0% 0.0 DegC

Tx 1 Rx 1 N 50, 5 ESys 1.000

1 Hz 8 Cyc Tx Curr 4.6

1 ON 1 1.2699 4.9 940.0 0100 0.76 0.00 0

2 ON 2 3.3819 10.01K 0000 0.01 6.59 0

El primer bloque es la cabecera y solo es información general del receptor.

El segundo bloque es la medida de sincronización. En este caso lo único importante es la diferencia de fase entre el receptor y el XMT (controlador de corriente del transmisor). Este datos se encuentra en la quinta fila y la quinta columna y las unidades son mrad (deben ser cercanas a 0).

2. Datos de calibración:

TEM 0618 2004-12-15 10:05:04 12.7v INL 58.2% 22.2 DegC

Tx 1400 Rx 1400 N OUT ICal 1.000

8 Hz 256 Cyc Tx Curr 6.2 244.1u 26u 30.52u

1 Hz 1400 0.9996 817.6u 0 0000 0.551u 0.00 0

Lo importante en este caso es comprobar que el valor de la columna 4 de la fila cuarta sea cercano a 1. Ya que lo que hace la calibración interna es introducir 1 Voltio y medir, si no hay problemas debe medir también 1V.

3. Cabecera y datos de medidas:

0277

TEM 0618 2004-12-15 10:36:50 12.6v INL 59.6% 21.1 DegC

OPER isla TX ID 1 A-SP 50 M

JOB lanes LINE 1 E SPREAD 25

50% RxM 10000 TxX 100 TxY 100 #T 1

Tx Delay 160 Antenna Delay 15 Alias IN

Robust None

1 DiffAmp Notch 50,3-5,9 S/N 737 Passed 1.00000

2 DiffAmp Notch 50,3-5,9 S/N 594 Passed 1.00000

3 NanoTEM A/D 16-bit S/N 13 Passed 1.00000

Front Panel S/N 39, Cal S/N 10, Temp 21.1, Humidity 59.6, EPROM

030901BLD321

Nombre del campo Unidades Rango Tipo Anchura Final

Línea 1

Número de bloque Varía del 0 al 9999

Línea 2

Tipo de campaña – ej.: "TEM "

Número de versión: Varía del 0 al 9999

Rechazar el bloque: x o espacio

Fecha dd mmm yy

Tiempo hh:mm:ss

Voltaje Varía de 0 a 99.9

Configuración ej.: "INL" (in loop/ dentro del bucle)

Línea 3

Operador ej.: "Emilio"

Identificación del transmisor ej.: "UNO"

Espacio entre dipolos No se usa en SEDT

Línea 4

Identificación de trabajo ej.: "Blan"

Línea ej.: "1+00"

Dirección de la línea ej.: "N"

Identificación de la línea ej.: "A"

Línea 5

Duty Cycle % 50 or 100%

Área de la antena receptora Medida en m2 varía entre 1 y 999999

Longitud del bucle transmisor (X) Medida en m varía entre 1 y 9999

Longitud del bucle transmisor (Y) Medida en m varía entre 1 y 9999

Número de vueltas del bucle Varía entre 1 y 99

Referencia de la antena Varía entre .001 y 9.999

Línea 6

Tiempo de caída Medido en μ s y varía entre 1 y 9999

Retraso de la antena Medido en μ s y varía entre 1 y 9999

Filtro alias ej.: "OUT"

Línea 7+

Información de las tarjetas internas del receptor de los canales instalados. Una línea por canal.

0278

TEM 0618 2004-12-15 10:38:55 12.6v INL 59.6% 21.1 DegC

Tx 0.00000 Rx 0.00000 N OUT

8 Hz 64 Cyc Tx Curr 6.2 244.1u 26u 30.52u

1 Hz 0.000 1.8355m 817.6u 12.71 0300 2.342u 0.55 0

Wn Mag 1 Rho 1

43.14u 37.120m 230.66

73.66u 23.016m 130.06

104.2u 16.470m 91.224

134.7u 12.781m 70.398

165.2u 10.395m 57.485

195.7u 8.7489m 48.617

240.9u 7.0826m 39.592

302.1u 5.5856m 31.810

363.2u 4.6034m 26.619

438.7u 3.7164m 22.413

530.5u 3.0273m 18.723

650.4u 2.3922m 15.595

817.6u 1.8355m 12.709

1.015m 1.4101m 10.559

1.258m 1.0795m 8.8322

1.561m 801.39u 7.5123

1.954m 570.53u 6.4840

2.469m 388.01u 5.6764

3.107m 252.32u 5.1557

3.895m 157.32u 4.8466

4.881m 96.544u 4.6075

6.137m 53.352u 4.6720

7.730m 29.071u 4.7667

9.702m 13.762u 5.3735

12.19m 7.7523u 5.3882

15.34m 3.1980u 6.6263

19.30m 2.1866u 5.8236

24.28m -0.0415u 55.791

Línea 1

Número de bloque

Varía del 0 al 9999

Línea 2

Tipo de campaña –

ej.: "TEM "

Número de versión:

Varía del 0 al 9999

Rechazar el bloque:

x o espacio

Fecha

dd mmm yy

Tiempo

hh:mm:ss

Voltaje

Varía de 0 a 99.9

Configuración

ej.: "INL" (in loop/ dentro del bucle)

Línea 3

Operador

ej.: "Emilio"

Identificación del transmisor

ej.: "UNO"

Espacio entre dipolos

No se usa en SEDT

Línea 4

Frecuencia	Medida en Hz ej.:" 1"
Ciclos de la medida	Varían entre 1 y 16384
Intensidad de corriente	Medida en Amperios Varía entre 0 y 99999
Retraso de muestreo	Medido en sg
Retraso del filtro alias	Medido en sg
Intervalo de muestreo	Medido en sg

Línea 5:

Número de canal	Varía entre el 1 y el 8
Rechazo de medidas	X rechazada, espacio no rechazada
Tipo de canal	ej.:"Hz" (Componente z del campo magnético)
Número de estación	Varía entre 0 a +/- 99999
Tiempo de la ventana de referencia	Medido en sg
Resistividad de la ventana de referencia	Medido en ohm-m
Ganancias/Atenuación	ej.:"0600"
Error cuadrático medio	Medido en V/A
Potencial espontáneo	Medido en mV
Resistencia de contacto	Medida en ohm
Ganancia externa de la amplitud	Varía entre 1 y 9

Línea 6:

Wn(Ventana de tiempos en sg) Mag 1 (dB/dt en V/A) Rho 1(Resistividad aparente calculada en ohm)

Línea 7 y siguientes

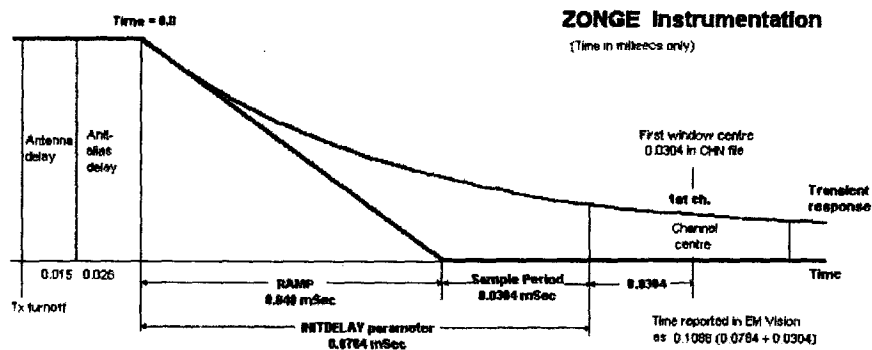
Datos

Tiempo en sg

Magnitud en V/A

Resistividad en ohm*m

Nota: Las ventanas de tiempo en los ficheros de volcado de los equipos de Zonge están referenciadas desde el final de la rampa mas los retrasos de la antena y del filtro alias. La siguiente imagen representa los tiempos después de convertirlos a formatos compatibles con datos de otros fabricantes.



De los documentos Informe_sedt_Tordera (Perfil PS1) e Informe_sedt_Tordera1 (Perfil PS4) incluidos en este Anexo, se entregan copias en formato papel en el Servicio de Documentación del IGME, y en el Área de Geofísica.

ANEXO G

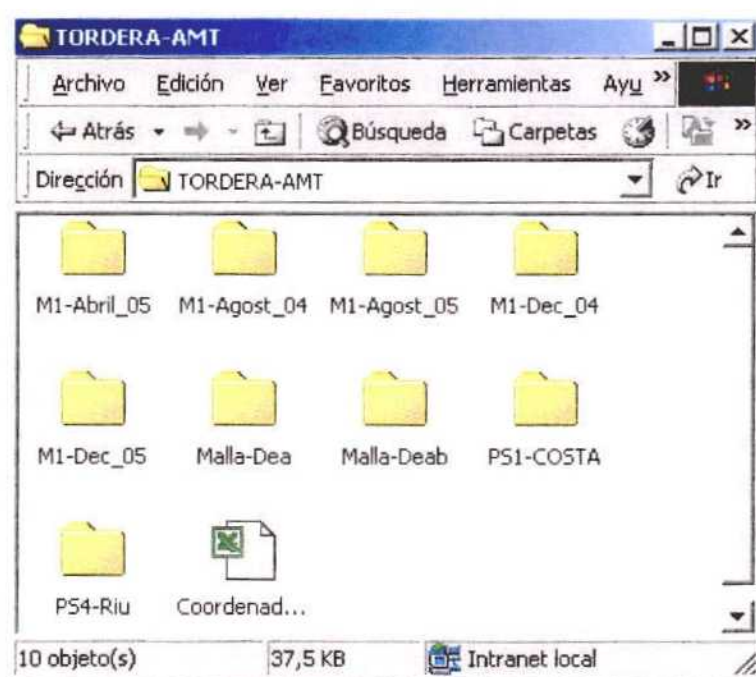
DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES MT DEL TORDERA

ANEXO G DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES MT DEL TORDERA

Contiene los ficheros de los datos medidos por la Universidad de Barcelona en la zona del Tordera, indicando el formato de los leídos con el instrumento Stratagem. Se incluyen además los ficheros de las secciones geoelectricas resultantes para el perfil PS1, PS4 y M1 para su reproducción por Surfer.



Los datos están organizados por sitios de medición:



incluyéndose el fichero de coordenadas de las estaciones.

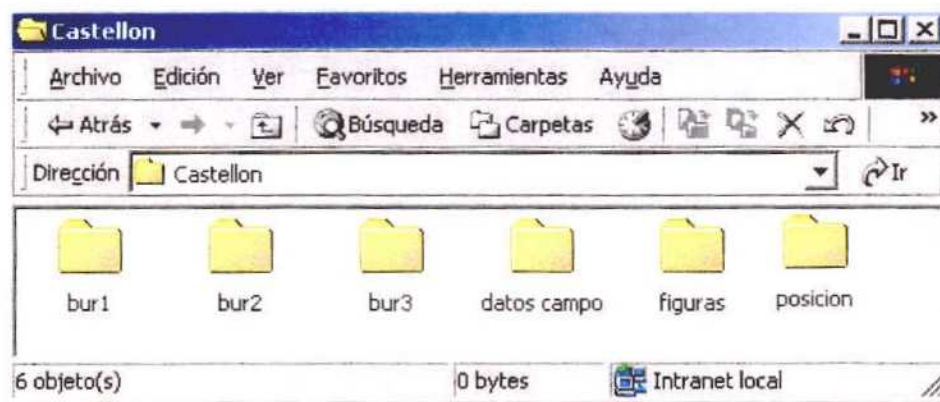
ANEXO H

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES DE TOMOGRAFÍA EN BECHÍ

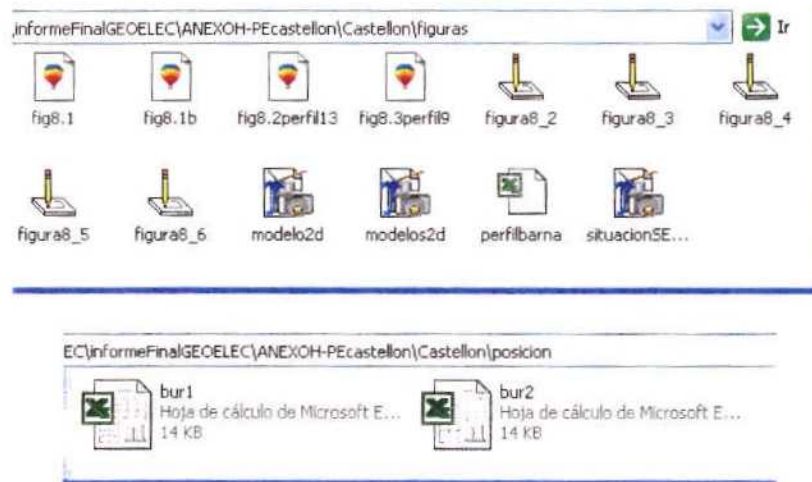
ANEXO H

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDILCIONES DE TOMOGRAFÍA EN BECHI (CASTELLON)

Consta de los ficheros con los datos tomados por el IGME en la zona de Bechí (Castellón), organizados por emplazamientos.



Además se incluyen los originales de las figuras de las secciones geoelectricas de esta zona, así como los ficheros de posición de las estaciones.



El formato de los datos es el mismo especificado en el ANEXO E. Los datos preparados para SIGEOF están en el ANEXO K.

ANEXO I

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES MT EN BECHÍ

ANEXO I DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES MT EN BECHÍ (CASTELLÓN)

Contiene los ficheros de los datos medidos por la Universidad de Barcelona en la zona de Castellón. El formato de las medidas efectuadas con el instrumento Stratagem se indica en el Anexo G. Se incluyen además el fichero de la sección geoelectrónica resultante, preparada para su reproducción por Surfer, y el fichero de coordenadas de las estaciones.



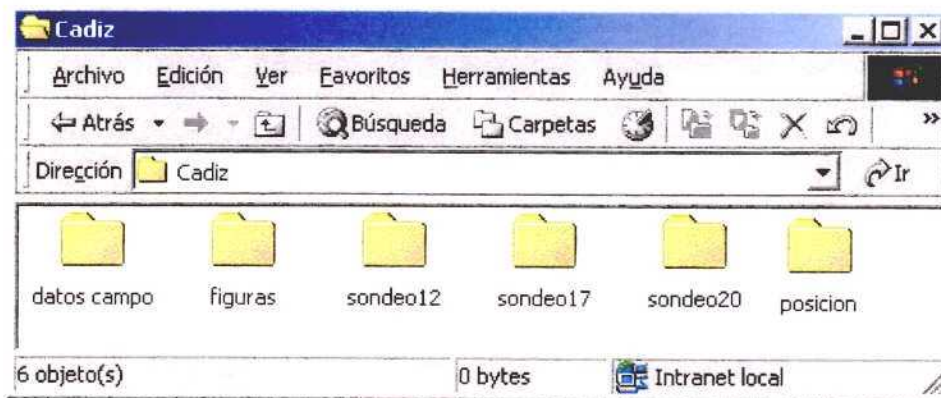
ANEXO J

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDICIONES DE TOMOGRFÍA EN CÁDIZ

ANEXO J

DATOS DE CAMPO DE LAS MEDILCIONES DE TOMOGRAFÍA EN CADIZ

Consta de los ficheros con los datos tomados por el IGME en la zona de Cádiz, organizados por emplazamientos.



Además se incluyen los originales de las figuras de las secciones geoelectricas de esta zona, así como los ficheros de posición de las estaciones.



El formato de los datos es el mismo especificado en el ANEXO E.

ANEXO K

DATOS PARA LA BASE SIGEOF