

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN SISTEMA DE FLUJO CON DENSIDAD VARIABLE: SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA (MÁLAGA)

TOMO III



ANEXOS V

Julio de 2009

ANEXO V

GEOFÍSICA: Informe: Geofísica aplicada en la laguna de Fuente de Piedra
(Málaga)

GEOFÍSICA APLICADA EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA Y SU CUENCA ENDORREICA (MÁLAGA)



Informe dentro del proyecto:

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE
UN SISTEMA DE FLUJO CON DENSIDAD VARIABLE: SISTEMA
HIDROGEOLÓGICO DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA**

Edición: P. Ibarra, F.M. Rubio

Tres Cantos, abril 2009

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
3. ENTORNO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	6
4. GEOFÍSICA APLICADA EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA Y SU CUENCA ASOCIADA	8
5 CAMPAÑA DE PERFILAJE ELÉCTRICO (PE), (TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD O ELÉCTRICA)	13
5.1 Nociones generales del método de perfilaje eléctrico	13
5.2 Campañas de campo de perfilaje eléctrico (PE).....	20
5.2.1 Descripción de los trabajos y equipos (personal y material) empleados.....	20
5.2.2 Primera campaña (junio 2005)	23
5.2.3 Segunda campaña (septiembre-octubre 2006).....	31
5.2.4 Resumen de las campañas de perfilaje eléctrico	44
6. REINTERPRETACIÓN Y PERFILAJE DE SEVs	45
6.1 Conclusiones de las reinterpretaciones de los SEVs	55
7. CAMPAÑA 2006-2007 DE SEDT EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA..	56
7.1 Interpretación conjunta de los SEDTs realizados en el interior de la laguna	58
7.1 Interpretación de los SEDTs realizados en la cuenca endorreica	63
8. TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA	69
8.1 Testificación de conductividad en pozos entre 2005 y 2007.....	69
8.2 Interpretación de los SEDTs realizados en la cuenca endorreica.....	70
9. RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS GEOFÍSICAS	72
ANEXO 1 Relación de Ficheros Generados	77
ANEXO 2 Estudio Mediante Sondeos Electromagneticos En El Dominio De Tiempos Con Fines Hidrogeológicos En La Laguna De Fuente De Piedra (Málaga).	85
ANEXO 3 Campaña 2006: Testificación De Sondeos De Referencia.....	133
ANEXO 4 Campaña 2005: Testificación De Sondeos De Referencia	143
ANEXO 5 Tomografía eléctrica: imágenes.....	153

1. INTRODUCCIÓN

La Laguna de Fuente de Piedra es un reservorio natural de agua salada ubicado en la zona noroeste de la provincia de Málaga, dentro de la hoja del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 nº 1023 (Antequera). Se encuentra en el interior de una cuenca endorreica ubicada entre las cuencas hidrográficas de los ríos Guadalquivir (al norte) y Guadalhorce (al sur), figuras 1 y 2.



Figura 1. Situación de la laguna de Fuente de Piedra

Su interés medioambiental (pues la laguna es en si misma Reserva Natural y está incluida en la lista de humedales españoles incorporados al Convenio de Ramsar) y su singularidad geológica, han propiciado una serie de estudios sobre su funcionamiento hidrogeológico que culminan en el actual proyecto propio del Instituto Geológico y Minero de España (IGME): “CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN SISTEMA DE FLUJO CON DENSIDAD VARIABLE: SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA”. Este proyecto, cuya zona de trabajo se sitúa en la laguna, su cuenca endorreica, y eventualmente en algunas zonas limítrofes de la cuenca, integra anteriores estudios y ensayos del IGME en la zona con los nuevos que se están llevando a cabo a su amparo, al objeto de elaborar un modelo numérico del sistema.



Figura 2. Ortofoto de la laguna de Fuente de Piedra. En rojo se han dibujado los límites de la cuenca endorreica.

Entre los anteriores estudios realizados por parte del IGME para el estudio de la cuenca, se encuentra una campaña de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), distribuidos en varios perfiles alrededor de la Laguna, llevada a cabo en el año 1983. Complementariamente, y a lo largo del tiempo, se han realizado medidas de conductividad en sondeo, en los pozos existentes y en los de nueva perforación.

Dentro del proyecto actual se han considerado todos los ensayos geofísicos efectuados con anterioridad y se han proyectado nuevas pruebas. Así, y con el objetivo de validar el método de Perfilaje Eléctrico (PE), también conocido como Tomografía Eléctrica, para la detección de zonas de salmueras, se realizaron durante el año 2005, 7 km de perfiles eléctricos, repartidos en 4 perfiles medidos en el interior del vaso de la laguna y en la zona al norte de la misma. Como resultado del trabajo anterior, en 2006 fue realizada una nueva campaña midiéndose cerca de 25 kms más de perfiles eléctricos en toda la cuenca; esta campaña ha sido complementada con la realización de 21 Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDTs), y la reinterpretación de la antigua campaña de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs).

2. OBJETIVOS

El proyecto “CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN SISTEMA DE FLUJO CON DENSIDAD VARIABLE: SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA”, tiene como objetivos generales los siguientes:

- Identificación de un modelo genético-evolutivo de las salmueras de la laguna.
- Entender el comportamiento hidrogeológico de los materiales triásicos resedimentados en el mioceno y su control sobre los sistemas lagunares de la región.
- Definir un modelo conceptual del sistema hidrogeológico de la laguna.
- Desarrollar un modelo numérico del sistema (incluyendo las complejidades del mismo como su variabilidad de la densidad de flujo) y simular escenarios para establecer una adecuada gestión de la cuenca y de la Reserva Natural.

Para la consecución de estos objetivos, la geofísica juega un importante papel al proporcionar datos sobre la ubicación de las salmueras y su alcance, extensión, e incluso concentración. De esta forma, los objetivos particulares de las campañas geofísicas realizadas son:

- Realizar una cobertura extensa de medidas de resistividad en toda la cuenca, haciendo hincapié en zonas no cubiertas hasta el momento, así como en zonas singulares dentro de la misma, como las lagunas menores.
- Realizar medidas en el interior del vaso en la laguna y sus bordes a fin de conocer la distribución de salmueras en el acuífero bajo la laguna.
- Aportar datos consistentes para la definición de un modelo de funcionamiento hidrogeológico para la laguna y su cuenca.
- Aportar datos para el desarrollo de un modelo numérico para el sistema hidrogeológico de la laguna y su cuenca.
- Posibilidad de cartografiar horizontes litológicos y ubicación y extensión de cuerpos de salmueras que puedan ayudar en la gestión hídrica de la cuenca.
- Localización y caracterización de techos y muros de los niveles de salmueras y aguas salobres.

3. ENTORNO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La cuenca endorreica de Fuente de Piedra, se emplaza en las Zonas Externas de la Cordillera Bética, en el denominado Complejo Caótico Subbético. Este complejo, asociado al dominio Subbético, presenta una estructura interna muy compleja, producida por un intenso proceso de aloctonía que ha motivado su pérdida de coherencia interna, transformándose en un conjunto de masas caóticas brechificadas, figura 3. Este complejo olistostrómico está formado por una serie de bloques u olistoplasas, de naturaleza fundamentalmente calcárea atribuidos a los dominios del Subbético y del Campo de Gibraltar, inmersas en una pasta de naturaleza fundamentalmente arcilloso-yesífera, procedente de la desestructuración de materiales arcilloso-yesífero-salinos muy poco competentes del Triásico Superior (Keuper), sobre los que se asentaron en el Mioceno. De esta forma, resulta un sistema compuesto por restos de los materiales plásticos del Keuper mezclados irregularmente con calizas miocenas, todo en un ambiente brechoide con composiciones diversas y cambiantes entre los dos tipos de materiales y dispuestos de forma irregular, de forma que quedan más o menos afectados de un proceso intenso de karstificación y disolución.

En el Mioceno superior, estos niveles quedaron fosilizados por arcillas, margas, arenas y calcarenitas que fijaron el Complejo, aunque el proceso de karstificación continuó originando redisoluciones, hundimientos y colapsos que provocaron la aparición de la laguna y su cuenca endorreica. Este ambiente, dada su escasa circulación hacia los márgenes, acentuó las especiales características del sistema, con más disoluciones y karstificaciones o su carácter brechoide, dando lugar también a una componente evaporítica adicional.

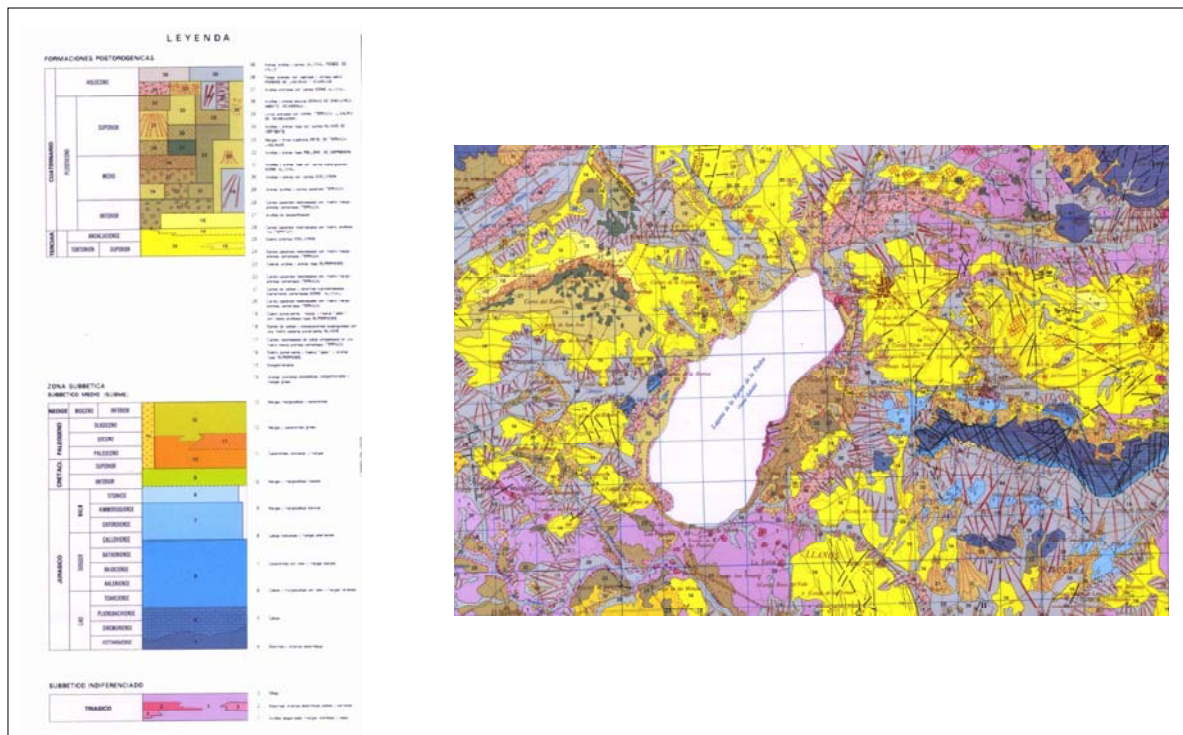


Figura 3. Mapa Geológico de la zona de la laguna de Fuente de Piedra. El mapa y la leyenda están tomados de la hoja geológica a escala 1:50000 n° 1023 (Antequera)

Estos materiales aparecen revueltos y distribuidos de forma irregular en amplias zonas del dominio Subbético, que incluyen acuíferos y lagunas con diverso grado de salinidad, originados por contacto con los materiales del Keuper. La laguna de Fuente de Piedra y su cuenca, constituye una de las más vastas extensiones de este complejo, el cual, por su carácter endorreico reúne las condiciones más extremas de este tipo de ambiente, pues se pueden encontrar aguas dulces en las formaciones calizas junto a salmueras de alta concentración, superior en zonas profundas a los 330 g/l, pasando por zonas salobres en diverso grado de salinidad.

Es decir, por un lado la gran extensión del Complejo Caótico en la zona de Fuente de Piedra ha generado el carácter endorreico del sistema y el endorreísmo ha contribuido a acentuar sus especiales características hidrogeológicas y litoestratigráficas.

Este entorno conforma un conjunto geológico singular, que culmina en un humedal (la propia laguna de Fuente de Piedra), incluido en la Lista del Convenio de Ramsar, declarado de especial interés para su protección y conservación (es Reserva Integral desde 1984, con 1.364 ha de espacio de protección especial que cubre casi exclusivamente el vaso de la laguna). Para ello, es necesario desarrollar un modelo

hidrogeológico conceptual consistente, como herramienta de soporte en la gestión hídrica de los recursos de la cuenca.

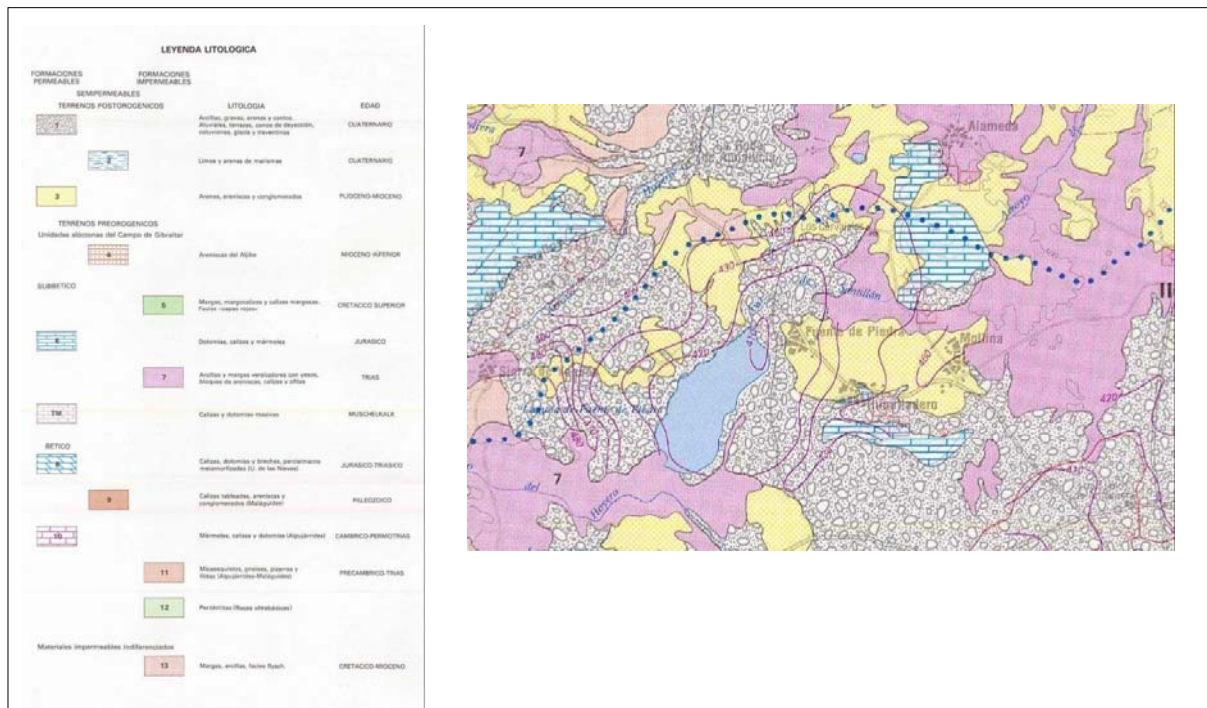


Figura 4. Mapa hidrogeológico de la zona de la laguna de Fuente de Piedra. Tomado del mapa hidrogeológico a escala 1:200000 n° 82 (Morón de la Frontera).

4. GEOFÍSICA APLICADA EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA Y SU CUENCA ASOCIADA

Dentro de los estudios, análisis y pruebas que se han realizado en la cuenca, los métodos geofísicos desempeñan un importante papel como ayuda para la generación de un modelo hidrogeológico. La detección eléctrica de las salmueras, dado su carácter fuertemente conductor, se ha convertido en una potente herramienta para la caracterización hidrogeológica. Por ello, en este trabajo se han aplicado diversos métodos eléctricos y electromagnéticos de superficie, ligados a la testificación geofísica, pues estos giran en torno al parámetro físico clave para detectar, definir y evaluar la existencia de salmueras: la resistividad.

Así en el año 1983 y dentro de los estudios que venían realizándose por parte del IGME para el estudio de la cuenca se realizó una campaña de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), distribuidos en varios perfiles alrededor de la Laguna. Complementariamente, y a lo largo del tiempo, se han realizado medidas de conductividad en sondeo, en los pozos existentes y los de nueva perforación.

Dentro del proyecto actual, en el año 2005 se realizó una primera campaña con el método de Perfilaje Eléctrico (PE o tomografía eléctrica). Esta campaña, diseñada a modo de ensayo de viabilidad del propio método en la detección de salmueras, consistió en la ejecución de 7 km de perfiles eléctricos, repartidos en 4 perfiles. El método, fue inicialmente utilizado en una zona relativamente restringida, situada en el interior del vaso de la laguna y al norte de la misma. La metodología fue controlada gracias a que se efectuaron mediciones junto a pozos testificados y de columna geológica conocida, demostrando ser de gran utilidad para detectar salmueras aunque no tanto para delimitar las diferentes litologías existentes.

El resultado de esta campaña demostró la viabilidad de este método para detectar y crear imágenes de la resistividad del terreno de forma contrastada. La testificación geológica y geofísica de varios pozos de control sirvió para correlacionar las variaciones de resistividad de los perfiles con la existencia de salmueras. En las figuras 9, 10 y 11 pueden apreciarse las correlaciones entre los perfiles Laguna 1, Laguna 2 y Laguna 3 con varios sondeos mecánicos en el perfil que disponen de registros de conductividad del fluido del sondeo, apreciándose la buena correlación entre las variaciones de la resistividad medida del terreno y la conductividad del fluido (derivada de ella hallamos la salinidad correspondiente a una temperatura).

Debido a la mayor densidad de las salmueras, los registros de conductividad del fluido en sondeo una vez estabilizado éste, permiten aproximar la posición del techo de las masas de salmueras, pero no su muro. Los registros son casi siempre de conductividad creciente con la profundidad, apreciándose saltos incrementales que pueden corresponderse con cambios de salinidad o con entradas de salmueras. Este efecto puede seguirse en varios pozos, donde se ha encontrado una ajustada correlación entre estos registros y los valores de resistividad obtenidos en los perfiles, tal como puede apreciarse en las figuras 9, 10 y 11. En él se aprecia el nivel de salmueras situado bajo la

laguna, de muy baja resistividad, con valores inferiores a 1.5 ohm.m (posición 600 a 1800), así como el acuífero asociado hacia el lado noreste de la misma (posición 1800 a 4000), el cual tiene forma de cuña que profundiza a la vez que penetra bajo terrenos alejados de la laguna. Sin embargo, hacia el SW, la presencia de salmueras es poco relevante, probablemente debido a un cierto control litológico en el borde sur de la misma. El perfil de resistividad presenta una buena correlación con los registros de conductividad de los dos pozos de investigación atravesados.

Así, es posible relacionar niveles de baja resistividad con la presencia de salmueras en la cuenca. Este hecho ha sido comprobado en sondeos de investigación perforados con posterioridad (Heredia et al., 2005). Con carácter general, puede decirse que valores por encima de 100 mS/cm conjuntamente con valores de resistividad del terreno por debajo de 2 ohm.m pueden representar los parámetros de corte acerca de la presencia de salmueras con un grado de concentración significativo.

Este aspecto es de importancia en un estudio de carácter hidrogeológico aun cuando, sin embargo, desde el punto de vista geológico, esta metodología no puede establecer una relación directa entre la resistividad medida y las formaciones geológicas presentes dado que éstas están conformadas por mezclas litológicas heterogéneas con muchos materiales comunes a varias de ellas. Ello impide discriminar formaciones y litologías con seguridad utilizando estos métodos geofísicos.

A partir de este trabajo se concluyó que el método de perfilaje eléctrico era muy válido para la detección de cuerpos de salmueras, convirtiéndose además en herramienta de apoyo para generar un modelo hidrogeológico.

Como resultado del trabajo anterior, en 2006 fue realizada una nueva campaña midiéndose cerca de 25 km más de perfiles eléctricos repartidos en 6 perfiles distribuidos por toda la cuenca. Esta nueva campaña, de mayor escala, se ha enfocado a obtener una mayor cobertura en la distribución de la resistividad en la cuenca, utilizando mayoritariamente este método.

Como complemento a los trabajos anteriores, se han medido también varios sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempos (SEDT). Con este método se pretende

alcanzar una mayor profundidad de investigación que la obtenida con el PE y medir, en zonas de difícil acceso o no cubiertas con PE. Así, entre 2005 y 2006 se han realizado 11 SEDTs en el interior del vaso de la laguna y zonas marginales de ésta y 10 más en puntos dispersos de la cuenca endorreica, realizados en zonas no cubiertas previamente por otros métodos (entre estos, 2 SEDTs en zonas como las sierras de Humilladero y Mollina, a cuyo complejo acceso añaden una cobertera caliza que es necesario superar para, eventualmente, detectar salmueras debajo.

También se ha abordado la reinterpretación de los SEVs de la campaña de 1983 y la generación de nuevos perfiles con los mismos. El objetivo ha sido el densificar y complementar la información geofísica de la cuenca.

Adicionalmente, se han realizado campañas de testificación geofísica en algunos de los pozos de investigación perforados, obteniéndose registros de conductividad del fluido y temperatura; estas medidas se han realizado a lo largo de diversos periodos de tiempo proporcionando una visión de la evolución temporal de estos parámetros (monitorización).

En la figura 5 puede observarse la situación de todos estos trabajos realizados en la laguna de Fuente de Piedra, su cuenca endorreica asociada y algunos puntos exteriores a ella colindantes.

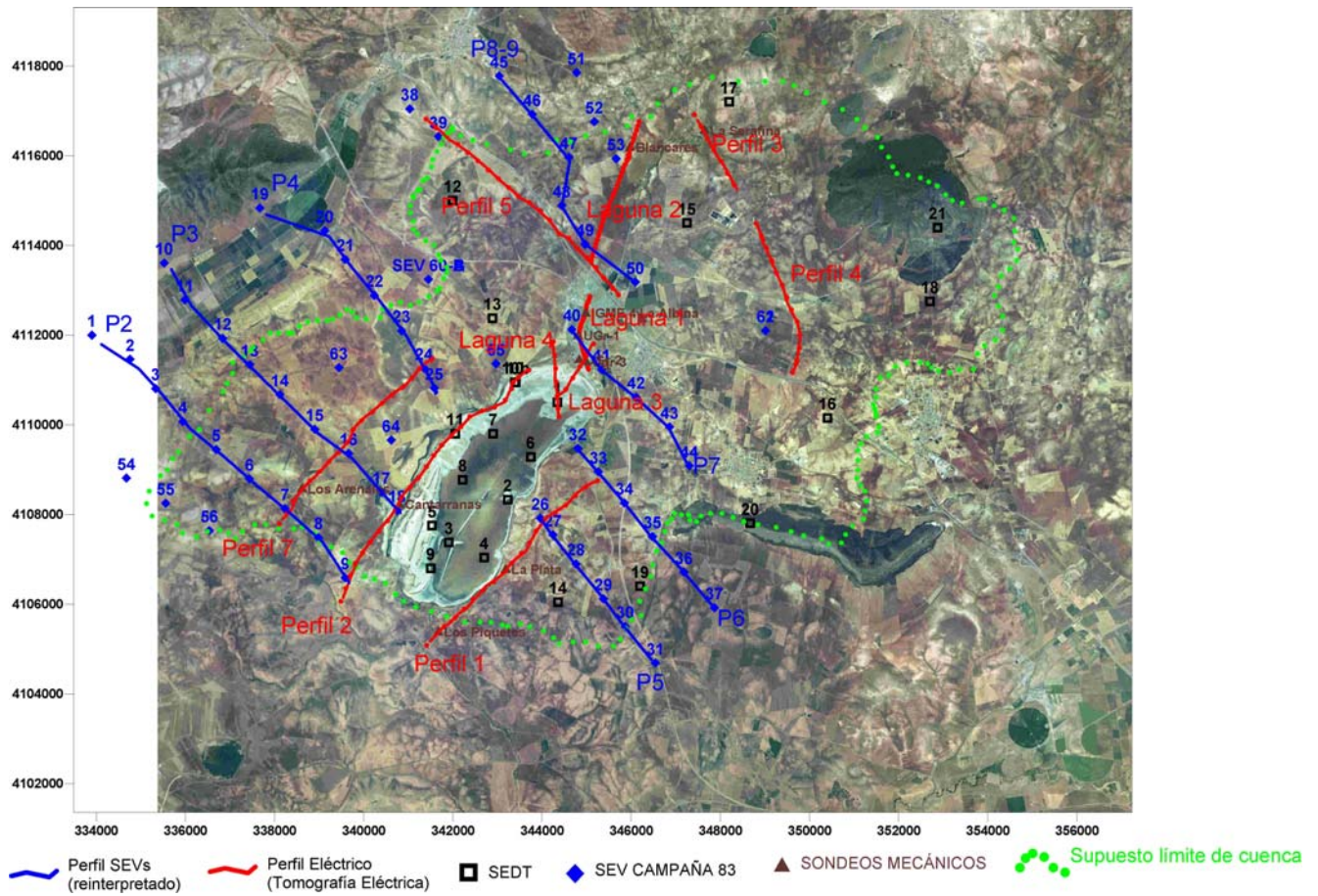


Figura 5: imagen con la posición de perfiles de tomografía eléctrica (PE, en rojo), perfiles de SEVs (en azul) y SEDTs (en negro) con respecto a la laguna de Fuente de Piedra y la cuenca endorreica en la que se incluye (límites de la cuenca en verde).

5 CAMPAÑA DE PERFILAJE ELÉCTRICO (PE), (TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD O ELÉCTRICA)

5.1 Nociones generales del método de perfilaje eléctrico

El propósito de una campaña eléctrica es el de determinar la distribución en el subsuelo de la resistividad mediante la realización de medidas en superficie. A partir de estas medidas, podemos estimar la verdadera resistividad del subsuelo, que esta relacionada con parámetros geológicos como son: el contenido mineral y de fluido, la porosidad, el grado de saturación de agua de la roca, etc.

Las medidas de resistividad se hacen normalmente inyectando corriente al terreno a través de un par de electrodos denominados de "corriente", y midiendo la diferencia de potencial entre otro par de electrodos denominados de "potencial". A partir de la corriente y el voltaje medido podemos 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. En la figura 6 se muestran los dispositivos más comunes junto con su factor geométrico.

Tradicionalmente las medidas de resistividad se ajustan a un modelo 1-D, con variaciones de resistividad con la profundidad y asumiendo que el subsuelo esta compuesto de capas horizontales (Sondeo Eléctrico Vertical).

Actualmente se trabaja con modelos del subsuelo en 2-D, 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, de una manera rápida y económica.

En los últimos años se han desarrollado el uso de perfiles eléctricos 2-D (tomografía), para estudiar áreas con una geología moderadamente compleja. Estas campañas se llevan a cabo utilizando un gran número de electrodos, conectados mediante un cable

multiconductor (cable con varios hilos conductores). De manera automática y controlado por un procesador, se seleccionan los cuatro electrodos que se van a utilizar en ese momento para realizar la medida de entre los varios que se encuentran dispuestos por el terreno.

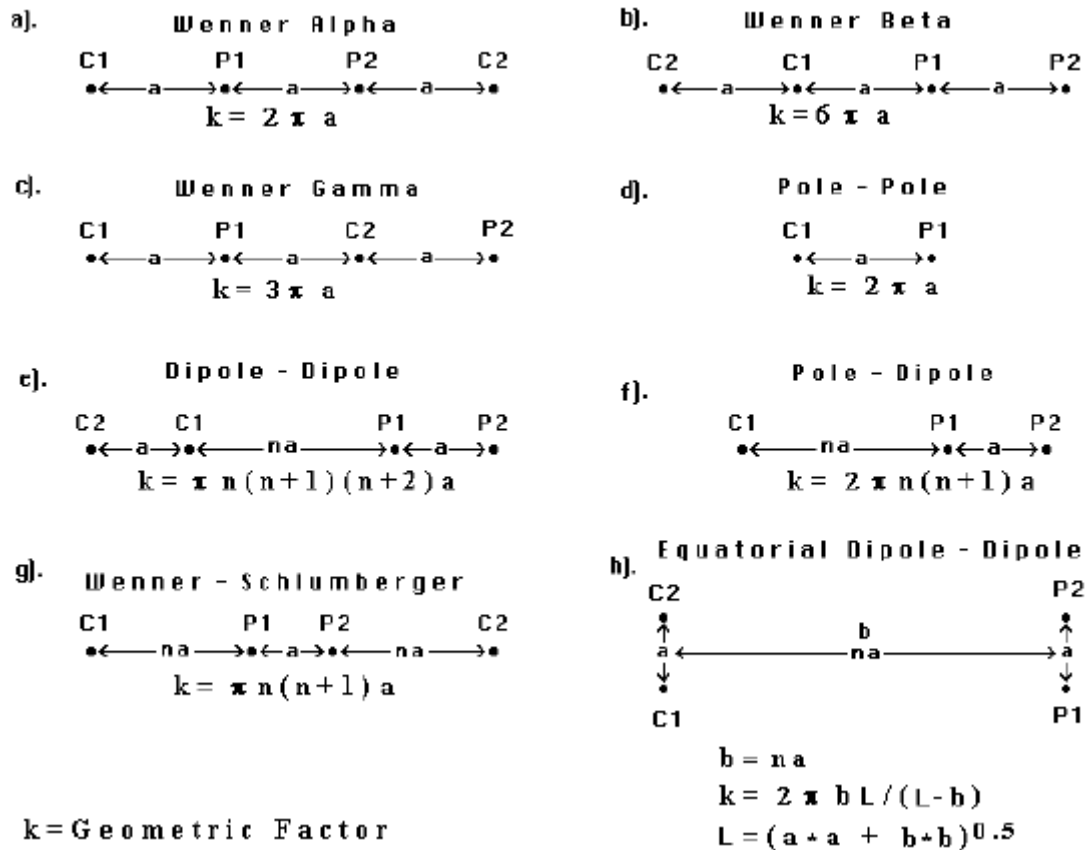
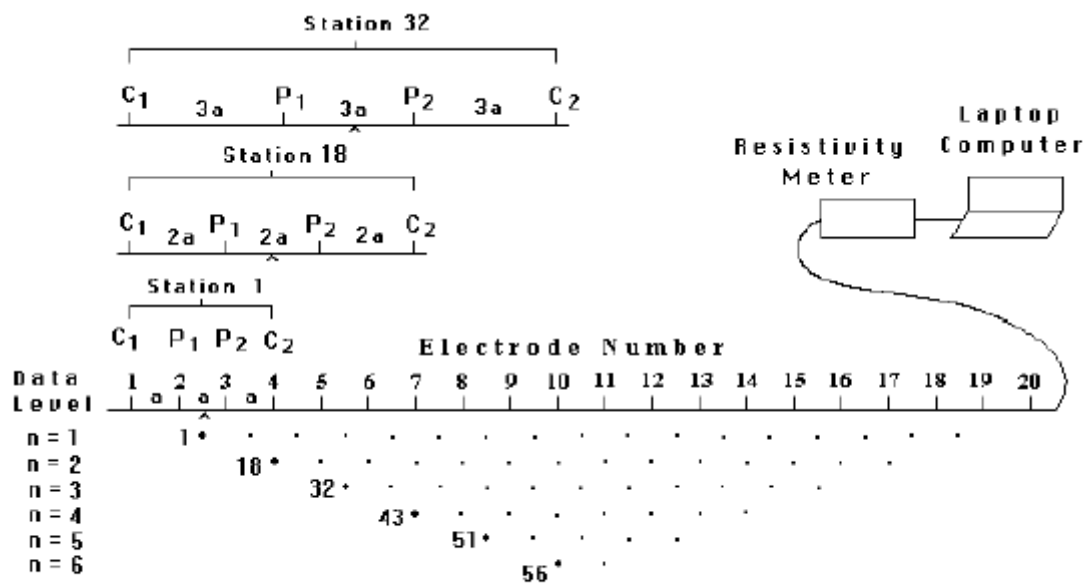


Figura 6. Dispositivos comunes utilizados en campañas eléctricas y sus factores geométricos

En la figura 7 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. En una campaña la mayor parte del trabajo de campo se dedica a la disposición de los electrodos y el dispositivo en general, mientras el resto del tiempo se dedica a esperar mientras se toman las medidas (la programación del aparato lleva breves minutos).



Sequence of measurements to build up a pseudosection

Figura 7. Disposición de electrodos para una campaña eléctrica 2-D y la secuencia de medición para construir una pseudosección

Para representar los datos de la campaña 2-D, se utiliza normalmente la pseudosección. La localización horizontal de un dato se sitúa 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 (Edwards 1977, Geophysics, 42, 1020-1036), o seudoprofundidad del dispositivo empleado. El valor de la seudoprofundidad esta basado en los valores de sensibilidad o derivadas de Frechet para un semiespacio homogéneo. Puesto que este último parece tener alguna base matemática, es el que normalmente se emplea. En la tabla 1 se muestran las profundidades medias de investigación para los diferentes dispositivos. No obstante conviene enfatizar que la pseudosección 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 pseudosección es útil como un medio de representar la resistividad aparente medida, y como un modelo inicial para la interpretación cuantitativa. Un error sería el utilizar la pseudosección como una representación final de la resistividad real del terreno.

En la figura 8 se observa como el uso de diferentes dispositivos puede proporcionar formas diferentes en las pseudosecciones al estudiar la misma estructura. 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 fuerza de la señal.

Array type		z_e/a	z_e/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 1. Profundidad media de investigación (Z_e) para los diferentes tipos de dispositivos. L es la longitud total del dispositivo. El factor geométrico es para un $a=1$ metro. (Edwards 1977).

El dispositivo Wenner es relativamente sensible a cambios verticales en la resistividad del subsuelo 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 A.1), y es el dispositivo con mayor fuerza 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 y su fuerza de 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 tenemos que tener en cuenta que la solución no es única, para los mismos datos medidos existen 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 el programa de inversión puede utilizar el algoritmo de inversión 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 los cuerpos consisten en cuerpos discretos, casi homogéneos internamente, y con límites netos, el algoritmo de inversión apropiado es el *robust constrain*, que trata de minimizar al 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.

En el caso del presente trabajo, se emplearon 2 dispositivos: dispositivo Wenner en todos los perfiles de tomografía eléctrica realizados dentro del proyecto, utilizando diferentes espaciados interelectródicos (5m y 15m: más resolutivos los primeros y más penetrativos los segundos), y dispositivo Schlumberger en los SEVs realizados en la cuenca con anterioridad.

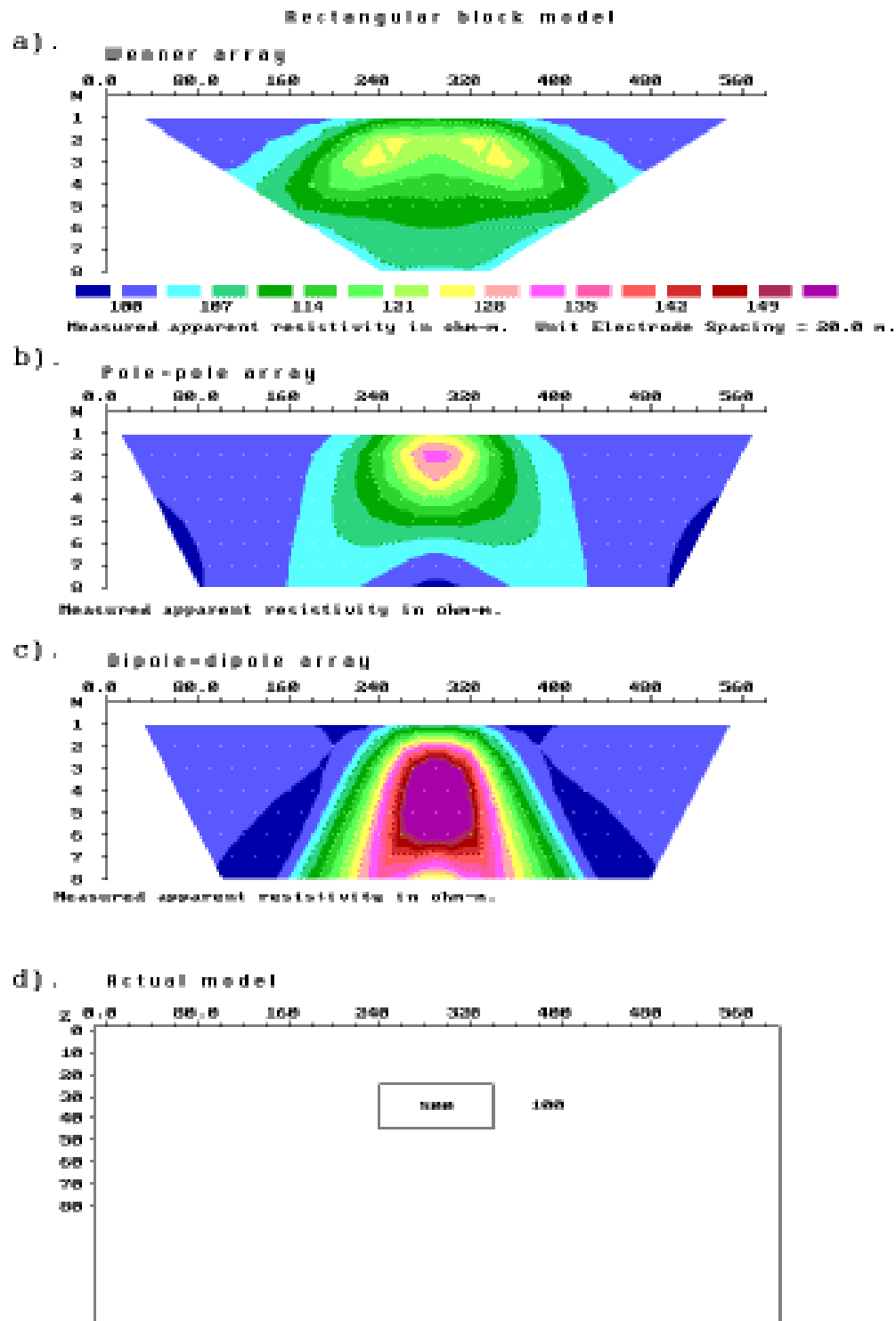


Figura 8. Pseudosecciones de resistividad aparente correspondientes a las imágenes 2-D obtenibles con diferentes dispositivos de medida, realizados sobre un modelo simple: bloque rectangular resistivo enterrado en un medio homogéneo más conductor.

5.2 Campañas de campo de perfilaje eléctrico (PE)

5.2.1 Descripción de los trabajos y equipos (personal y material) empleados

En la cuenca endorreica de la Laguna de Fuente de Piedra se han realizado dos campañas de Perfilaje Eléctrico (P.E. ó tomografía eléctrica). La primera de ellas fue en el año 2005, diseñada a modo de ensayo de viabilidad del propio método en la detección de salmueras. El método, fue inicialmente utilizado en una zona relativamente restringida, situada al norte de la laguna y en el extremo norte de ésta misma, cuya geología era parcialmente conocida gracias a algunos sondeos mecánicos, figura 5. Fue chequeado y comprobado realizando mediciones junto a pozos testificados y controlados, demostrando ser de gran utilidad para detectar salmueras y no tanto para delimitar las diferentes litologías existentes. Esto lo convierte en una herramienta muy gráfica y fiable para acometer una exploración a mayor escala para toda la cuenca, pero encaminada a la detección de aguas más o menos salobres. De esta forma, se realizó una nueva campaña en el año 2006 cuyo objetivo fue obtener una mayor cobertura en la distribución de la resistividad en la cuenca.

El equipo de trabajo por parte de la antigua Área de Geofísica del IGME ha sido el siguiente:

Félix Manuel Rubio Sánchez-Aguililla, Doctor Ingeniero de Minas, coordinador de los trabajos geofísicos realizados. Coautor de la memoria final.

Pedro Ibarra Torre, Ingeniero de Minas, encargado del control de los trabajos de campo y de la supervisión de las asistencias técnicas. Coautor de la memoria final

Agustín González, operador de campo.

Ángel Pelayo Cañamero, operador de campo.

José María Llorente, operador de campo.

Los perfiles de resistividad, tomografía eléctrica, se midieron utilizando el sistema multielectrónico LUND de la casa sueca ABEM, con el modelo transmisor-receptor SAS4000. Dicho sistema permite implantar hasta 60 electrodos, que funcionan como electrodos de corriente o de potencial de acuerdo a una secuencia de medida programada de antemano, la cual puede responder a cualquier esquema de dispositivo

eléctrico tradicional. En este caso, se ha utilizado el dispositivo Wenner por ser relativamente sensible a los cambios verticales de resistividad y más resolutivo frente a cambios horizontales consiguiendo un buen punto de compromiso en ambas dimensiones así como una muy buena relación señal-ruido.

De acuerdo a este sistema, bajo el dispositivo Wenner, para cada lectura se seleccionan cuatro electrodos (un par de corriente y un par de potencial) de entre el conjunto del sistema hasta realizar la lectura. Para evitar, la polarización de éstos, la siguiente medida se realiza con un cuarteto de electrodos distinto (son todos metálicos), según una secuencia automática preestablecida, de forma que se miden todas las posibles combinaciones y espaciados que permiten los 60 electrodos bajo el esquema elegido. De ello resulta un conjunto de puntos de atribución de medida cuya posición es la central de cada dispositivo Wenner y su profundidad, la correspondiente al espaciado electródico con la que se realiza cada lectura. La malla de medidas resultante, o pseudosección, representa una primera aproximación a la distribución de resistividades del subsuelo, basada en una posición regular pero ficticia de los puntos de atribución. Esta distribución no se corresponde con la real en el subsuelo, pero es el punto de partida para su inversión, cuyo resultado final es un perfil de resistividades que sirve como base para la interpretación.

La inversión de los datos de campo y obtención de los perfiles de resistividad finales fue hecha con el programa RES2DINV v. 3.46b de M.H. Loke. Los parámetros empleados en la inversión han sido los mismos para todos los perfiles, tras evaluar la modalidad que mejor puede reflejar el problema planteado. Se ha elegido la inversión tipo “robusto” para resaltar los contrastes y límites de niveles conductores, presumiblemente salmueras, respecto a terrenos más resistivos.

Los ficheros con los datos de campo y los resultantes de la interpretación, así como los ficheros de texto de este informe se han almacenado en formato digital. Su descripción y relación se encuentra en el Anexo 1.

En la figura 9 adjunta, se muestran los trabajos de campo de tomografía de resistividad eléctricas efectuados sobre imagen de satélite referenciada.

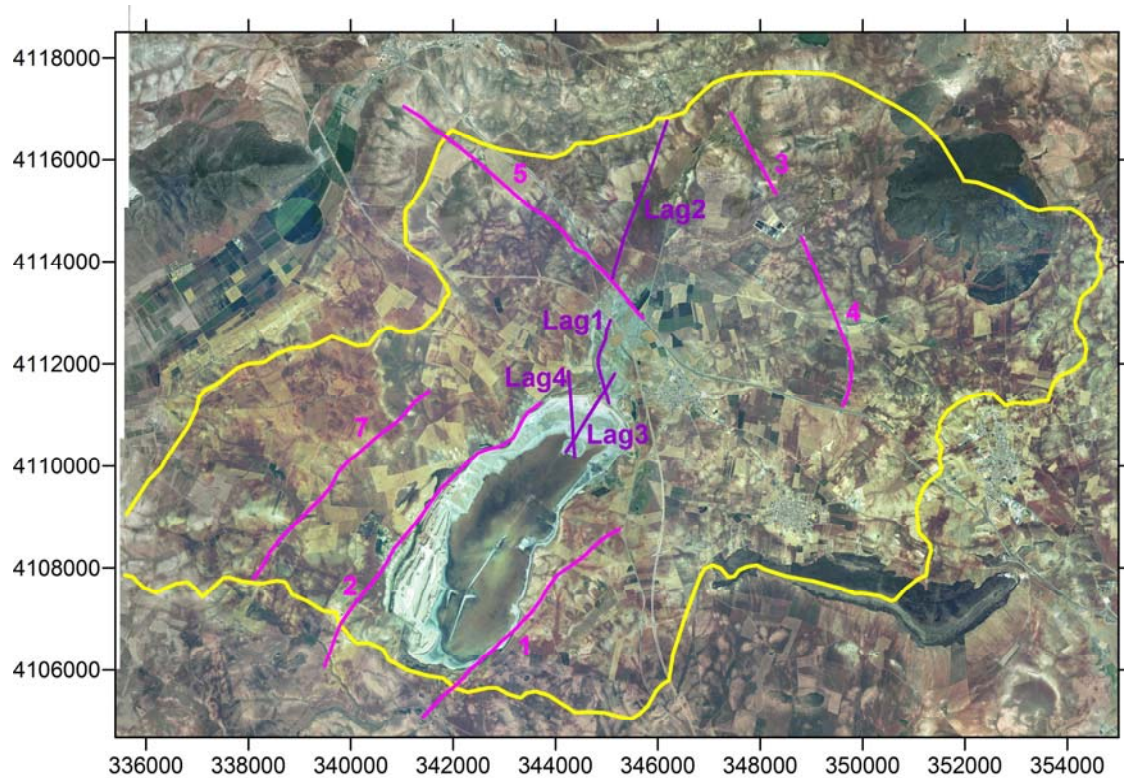


Figura 9: posición de los perfiles de resistividad realizados en la cuenca: en color morado, los realizados en junio de 2005 y en color rosa los efectuados en la campaña de septiembre-octubre de 2006.

5.2.2 Primera campaña (junio 2005)

En la primera campaña, la toma de datos fue realizada en junio de 2005. Se midieron 4 perfiles ubicados en el borde norte la laguna y en su interior dentro de un corto tramo, así como en la zona norte de la cuenca, según se aprecia en la figura 5.

Dado su carácter como ensayo sobre la viabilidad del método, esta campaña fue restringida a la zona norte de la laguna, dado que en esa zona se disponía de los primeros pozos de investigación y existe un fácil acceso, tratando en lo posible de comprobar la respuesta eléctrica en diferentes ambientes en torno a la laguna, y cuando fue posible, parcialmente dentro de la misma.

Las líneas fueron medidas utilizando dispositivos Wenner con espaciados interelectródicos de 5m y 15m al objeto de estudiar las respuestas y resoluciones a diferente profundidad. Igualmente, se trazaron pasando por los pozos de investigación, a fin de disponer de un criterio de correlación entre la testificación geológica, la testificación geofísica y el perfil eléctrico.

PERFIL	X UTM		Y UTM	
	Inicio	Final	Inicio	Final
Laguna 1	345041	345071	4111235	4112863
Laguna 2	346181	345107	4116765	4113675
Laguna 3	345156	344206	4111807	4110276
Laguna 4	344250	344374	4111854	4110178

Tabla 2. Coordenadas de inicio y final de los perfiles medidos en la campaña del 2005.

De acuerdo a ello, fueron trazadas 4 líneas, ver tabla 2, con diversas características de acuerdo a los diferentes objetivos locales perseguidos. Su descripción se muestra a continuación:

Laguna 1: perfil de 1700 m de longitud, con dirección aproximada norte-sur empezando desde el borde norte de la laguna. Tiene una ligera curvatura a fin de pasar por las proximidades de los sondeos mecánicos de investigación IGME “La Albina”, Ugr1, y Ugr3 (figuras 5 y 10). Fue realizado como ensayo inicial con un espaciado

interelectrónico de 5m, por lo que la profundidad de investigación estimada es de unos 60 m.

En el resultado de la inversión se aprecian resistividades muy bajas en las cercanías de la laguna (valores de 0.3 ohm.m a 2.5 ohm.m), que continúan 1 km hacia el norte de la misma en forma de cuña que disminuye en entidad e incrementa levemente su profundidad con la distancia a la laguna. Esta cuña conductora presenta un nivel resistivo relativo inferior con valores superiores a 5-8 ohm.m a unos 40-60m de profundidad, que tiene cierta continuidad y podría responder a algún tipo de control litológico, figura 9. La columna litológica del sondeo mecánico Ugr3 indica la presencia de materiales brechoides miocenos (con su componente triásica) a una profundidad de 39m. Ello supone un límite equivalente a la profundidad de la cuña conductora

El perfil corta de forma tangencial a la laguna en las proximidades del sondeo Ugr3, cuyo fluido es de alta conductividad ($>100\text{mS/cm}$), de forma que existe buena correspondencia entre los valores de resistividad del terreno en el punto de sondeo mecánico y la conductividad del fluido contenido en el mismo. [Aunque físicamente la propiedad resistividad/conductividad es la misma, una inversa de la otra, ambas se utilizan para referirse a medios distintos: la primera representa la resistividad del terreno incluso los fluidos que lo ocupan y la segunda se refiere a la resistividad de los fluidos contenidos en el pozo, incluyendo a lo sumo una pequeña parte del terreno muy cercana al mismo; es decir, ambas magnitudes resultantes no son directamente comparables].

Esta correspondencia se produce también en los sondeos Ugr1 e IGME Albina, situados a 400m y 800m al norte de Ugr3. El primero muestra un aumento de la conductividad del fluido de sondeo, es decir mayor salinidad, a unos 10 m de profundidad coincidentemente con una disminución de la resistividad medida en el perfil (de 3 a menos de 1 ohm.m).

El segundo sondeo, IGME Albina, es de escasa profundidad. Muestra muy baja conductividad (valores inferiores a 10 mS/cm) en su parte inferior, justamente en una zona donde se encuentra un tramo más resistivo en el perfil (la resistividad medida supera los 6.3 ohm.m.), aunque éste está en contacto con un nivel más conductor inmediatamente por debajo del límite del sondeo.

También se observa una buena correlación entre la reinterpretación obtenida en el SEV 40 y el resultado del perfil en ese punto. Todo esto puede apreciarse en la parte inferior de la figura 10, que incluye las columnas de conductividad de fluido de sondeo y la interpretación del SEV, junto al perfil de resistividad.

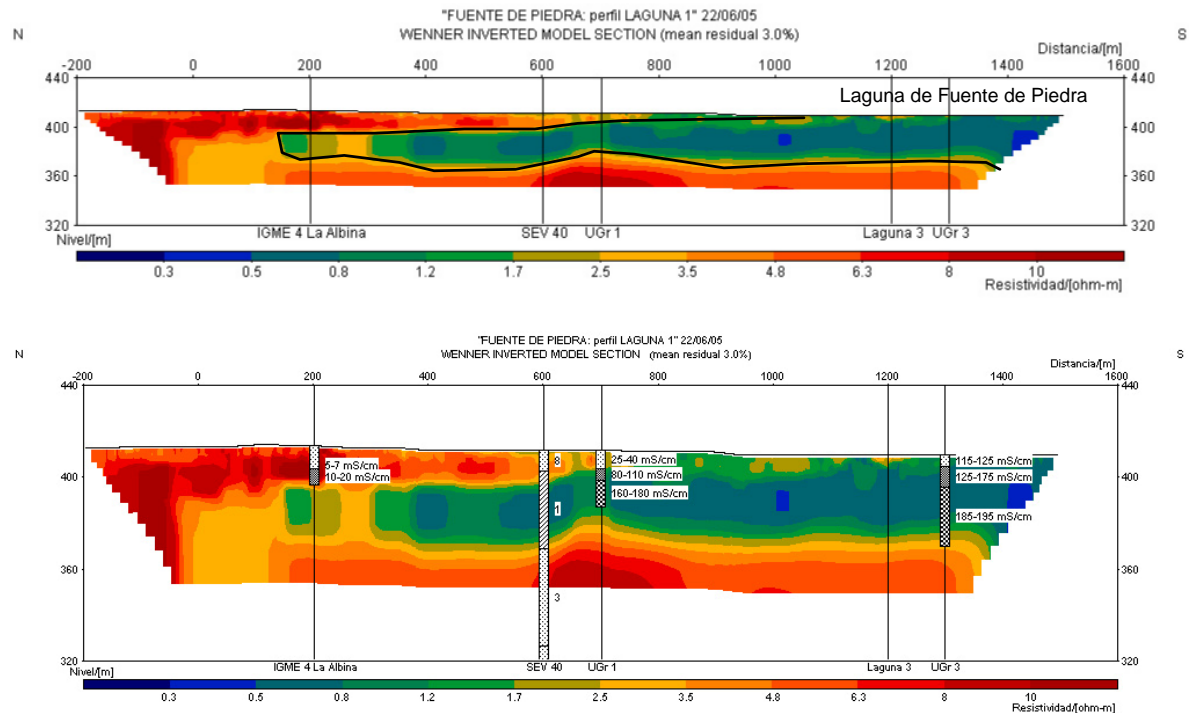
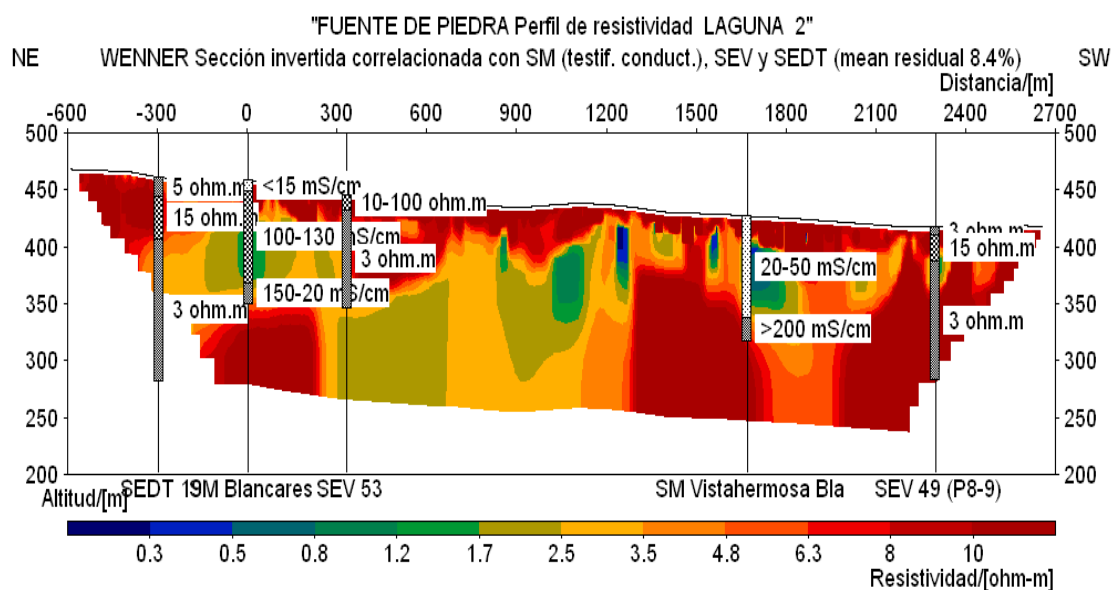
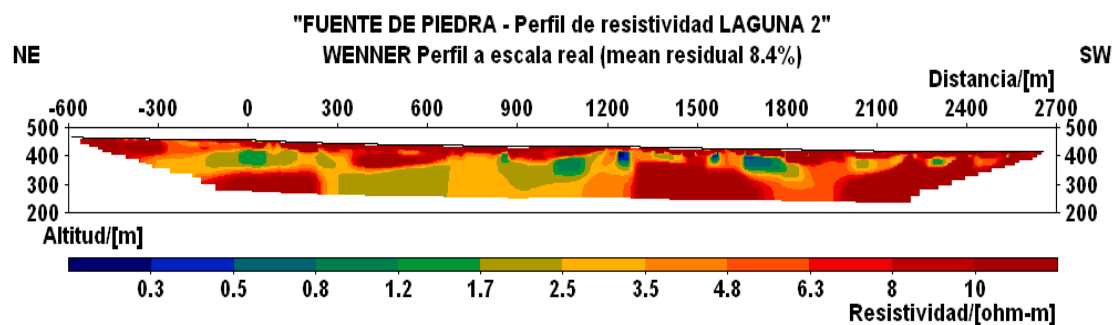


Figura 10. Resultado de la inversión del Perfil Laguna 1. En la parte superior se muestra la situación de los sondeos mecánicos, el SEV 40 y el corte con el perfil Laguna3. En la parte inferior se ha representado con la escala vertical más exagerada e incluyendo los registros de conductividad del fluido en los sondeos indicados y la reinterpretación del SEV 40.

Laguna 2: perfil que comienza a unos 2.5 km del borde norte de la laguna, con una longitud de unos 3300m en dirección aproximadamente NE-SW, figura 5. A la vista de los resultados obtenidos en el perfil anterior, se programó con espaciado interelectrónico de 15 m, para intentar conseguir una profundidad de investigación que superase los 100-120 m. Este perfil pasa por el pozo “Blancares”, del que se dispone de registro de conductividad del fluido de sondeo (figura 11).

Este perfil, parcialmente continuación del perfil Laguna 1, muestra un tramo superficial de carácter resistivo, con valores extremos de hasta 30 ohm.m, (por razones de homogeneización de paleta de colores, algunos valores resistivos quedan enmascarados por otros valores inferiores). Por debajo se observa la existencia de un conductor, que en

conjunto parece tener continuidad a lo largo de todo el perfil, figura 11 superior, y del que no se ha alcanzado su muro en la parte central del perfil, tramo 300 al 1200, mientras que en los extremos sí se aprecian los tramos resistivos sobre los que descansa. Dentro de este conductor aparecen zonas con valores muy bajos de resistividad, inferiores a 0.5 ohm.m, que parecen indicar la existencia de cuerpos más conductores, sin aparente continuidad clara entre ellos. Uno de estos conductores es intersectado por el sondeo mecánico Blancares, en donde aparecen salmueras de cierta concentración, parte inferior de la figura 10, por lo que de nuevo se encuentran resistividades bajas en correspondencia directa con la existencia de salmueras. Por tanto, se apreciaría la existencia de diversos embolsamientos de salmueras sin aparente continuidad entre si, es decir, se encuentran zonas más conductoras separadas por otras más resistivas. Las morfologías de los conductores son diversas, así como su continuidad lateral y en profundidad. A la vista del perfil no parece existir conexión clara entre ellos, o al menos, la presencia de salmueras es discontinua en cuanto a su concentración se refiere.



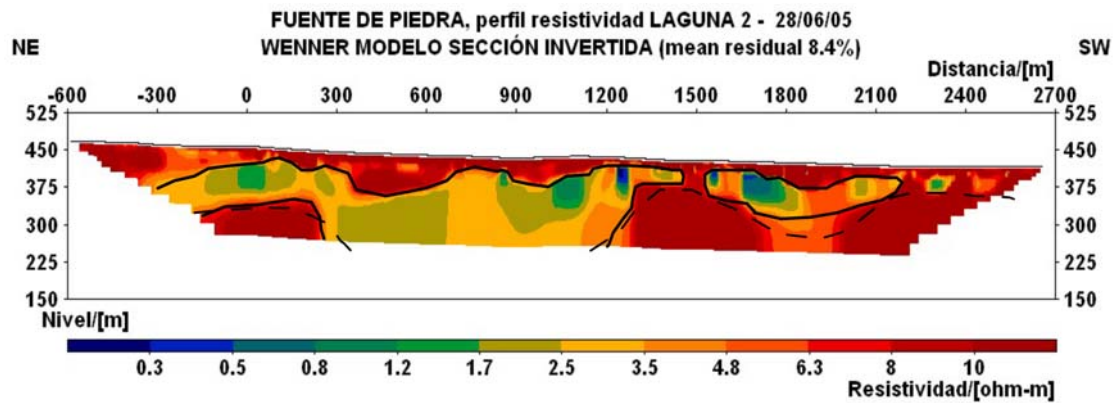


Figura 11. Resultado de la inversión del Perfil laguna 2. En la parte superior se muestra el perfil a escala real y sin ninguna correlación. En el centro se muestra con la escala vertical más exagerada y correlacionado con los registros de conductividad del fluido en los sondeos mecánicos Blancares y Vistahermosa, con la interpretación de los SEDT 19 y SEVs 53 y 49 (éste último del perfil de SEVs P8-9). En la parte inferior se muestra el perfil con una interpretación “grosso modo” de la posición de las salmueras.

Al comienzo de este perfil, en su posición -300, se ha medido el SEDT 19 cuya interpretación se corresponde bastante bien con la del perfil. En efecto, como se puede observar en la parte inferior de la figura 10, el tramo más resistivo del perfil en esta localización se corresponde bastante bien con el tramo más resistivo del SEDT, de unos 18 Ω .m, a continuación tanto en el perfil como en el SEDT se entra en un tramo más conductor, unos 2 Ω .m.

Laguna 3: Perfil de 1200m realizado parcialmente en el interior del vaso de la laguna, con dirección NE-SW, e intersectando el sondeo Ugr2. Fue realizado con espaciado interelectródico de 15 m. Su objetivo es detectar la hipotética presencia de un posible control resistivo. La mitad sur del perfil (desde el punto 50, hasta el final, punto 600) se sitúa dentro del vaso de la laguna, figura 12.

De manera similar al perfil Laguna 1, el perfil Laguna 3 presenta un bloque muy conductor en niveles superficiales, claramente atribuible al acuífero salino que se ubica bajo la laguna así como en los terrenos inundables que se sitúan en el norte de ésta (entendiendo por inundables las zonas bajas que antaño se anegaban con cierta frecuencia fuera del vaso actual, lo que incluso quedó reflejado en la cartografía usual; actualmente, buena parte de ellos se han constituido en zonas desecadas de uso agrícola).

Los valores del elemento conductor son muy bajos (entre 0.2 y 0.5 ohm.m) en la zona sur de la laguna y un poco menos en la zona norte (entre 0.5 y 1.5 ohm.m) y que tiene una gran continuidad en todo el perfil. Se aprecia también, la existencia de un nivel resistivo relativo con valores de hasta 10 ohm.m que alcanza hasta una profundidad de 50-60m bajo la zona norte, de forma que este nivel se profundiza notablemente a la altura del límite de la laguna y dentro de ésta. Es decir, bajo la laguna el resistivo tiene mayor profundidad pues el cambio de resistividad es muy tenue (a valores de 3 ohm.m incluso a más de 100m de profundidad).

La correspondencia con el cercano sondeo Ugr2 es buena, pues en éste se detecta la presencia de salmueras (aun cuando su profundidad es escasa y arroja poca información).

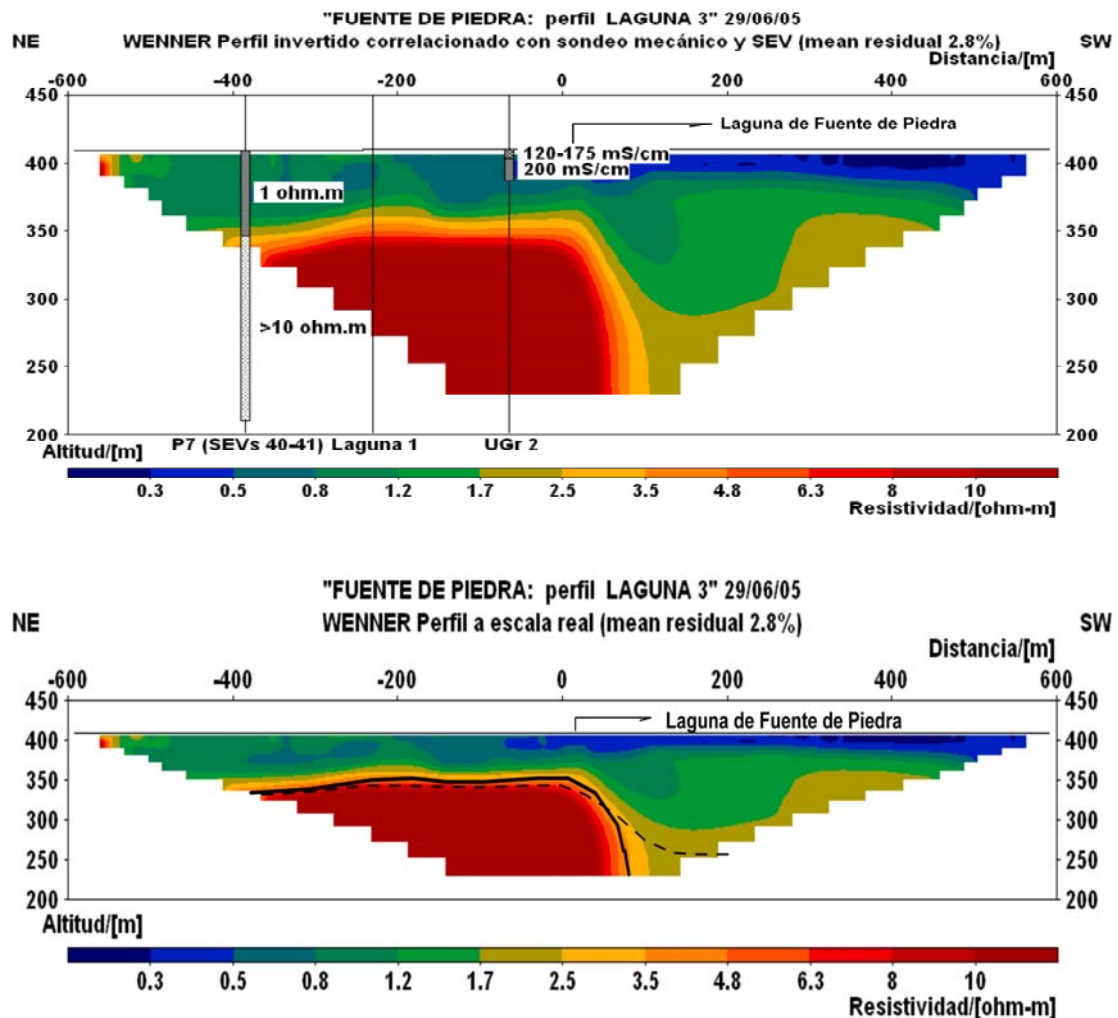


Figura 12. Resultado de la inversión del Perfil laguna 3. Se muestra con la escala vertical exagerada y correlacionado con los registros de conductividad del fluido en el sondeo UGr2. Se indica también el cruce con el perfil Laguna 1 y con el perfil de SEV P7 (entre los SEVs 40 y 41). Debajo, el perfil interpretado a escala 1:1.

Lo más notable por tanto, es la existencia de un nivel resistivo, análogamente a lo encontrado en el perfil Laguna 1, que podría funcionar como algún tipo de control litológico. También es remarcable el salto en profundidad de este resistivo, salto que es brusco y vertical, y parece estar relacionado con el límite de la propia laguna, según se aprecia en la figura 12.

Laguna 4: Perfil de unos 1650m de longitud, medido con un espaciado interelectródico de 15m. Este perfil también se ha realizado parcialmente en el interior de la laguna, desde el punto -100 hasta el final hacia el sur. Este perfil no pasa junto a ningún sondeo y su objetivo es alcanzar el mayor grado de conocimiento en las zonas centrales del vaso de la laguna. Su extremo sur casi alcanza a intersectar el perfil Laguna 3. Asimismo, en esa zona se realizó con posterioridad el SEDT 1, de mayor profundidad de investigación que el perfil. Ver figura 13.

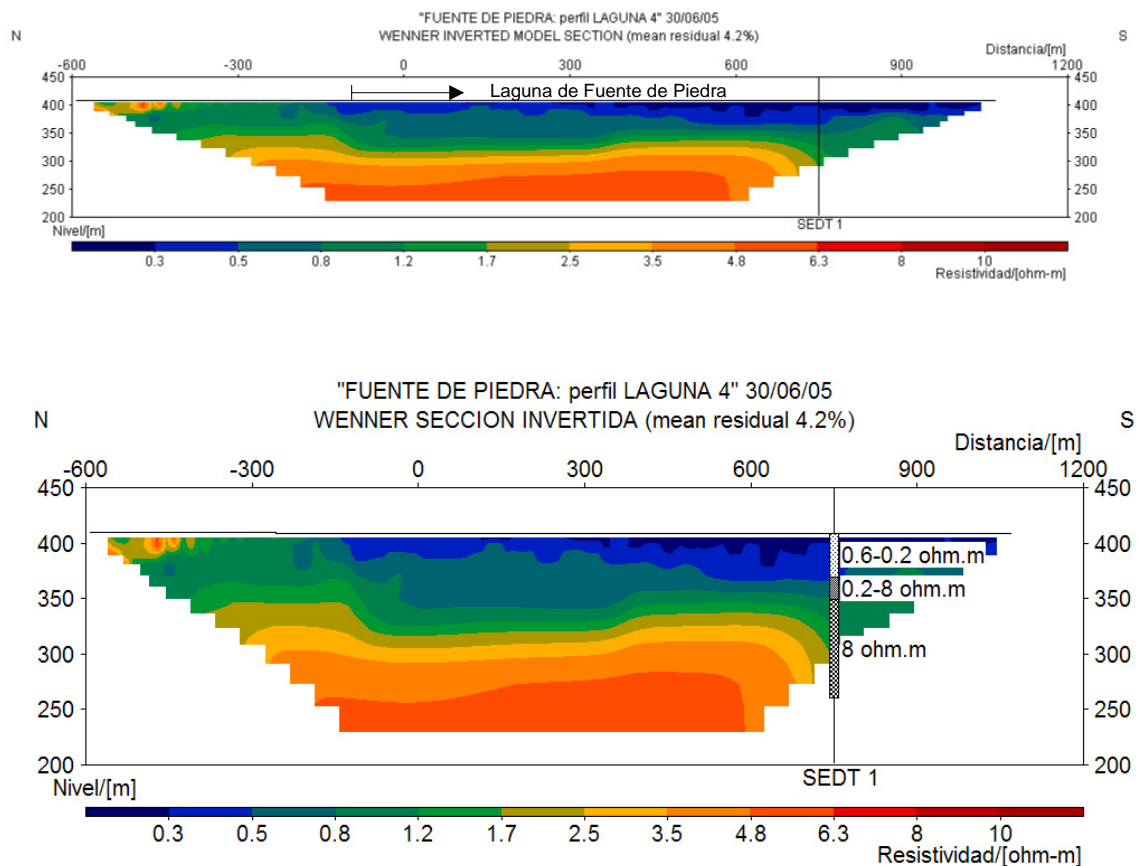


Figura 13. Resultado de la inversión del Perfil laguna 4. En la parte superior se indica la parte medida en el interior de la laguna y la posición del SEDT 1. En la parte inferior se incluye la interpretación del SEDT 1.

En su interpretación, figura 13, se aprecia de nuevo la existencia de un potente conductor superficial con valores de hasta 0.2 ohm.m que abarca todo el subsuelo de la laguna hasta una profundidad de 80-100m en que se pasa a un bloque más resistivo infrayacente con valores de hasta 6 ohm.m. Esta misma disposición se observa en la interpretación de SEDT 1 medido en el interior de la Laguna, si bien éste sitúa el bloque resistivo sobre 60 m de profundidad, es decir establece un contraste a menos profundidad.

Asimismo, se aprecia un leve resalte en la superficie del resistivo de base justamente bajo la posición del borde de la laguna, de forma similar (aunque menos marcada) al perfil Laguna 3. Ello indicaría de nuevo algún tipo de control litológico bajo la laguna, cuya forma y tamaño quedaría condicionada por el resalte del resistivo (podría tratarse de algún límite en el alcance del colapso que origina finalmente la forma actual de la laguna).

Con este perfil, se finalizó la campaña de junio de 2005. La viabilidad del perfilaje eléctrico (tomografía de resistividad), quedó puesta de manifiesto para la detección de acuíferos salinos y embolsamientos de salmueras en diverso grado de concentración y de forma muy evidente, para la localización de cuerpos salados concentrados. Resultó menos útil para la discriminación de las formaciones eléctricas presentes, dada su similitud geoelectrica (además de la irregular distribución de éstas).

Esta campaña motivó su ampliación dentro del proyecto de investigación “CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELACIÓN NUMÉRICA DE UN SISTEMA DE FLUJO CON DENSIDAD VARIABLE: SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA”, el cual se inició en marzo de 2006. Los estudios anteriores, perfilaje eléctrico y SEVs, fueron incorporados al presente estudio geofísico, el cual forma parte del citado proyecto.

5.2.3 Segunda campaña (septiembre-octubre 2006)

Una vez comprobada la viabilidad y la capacidad de generar imágenes de gran resolución y utilidad, se diseñó una segunda campaña de perfilaje eléctrico (PE) en la Laguna de Fuente de Piedra y su cuenca endorreica adyacente. Al igual que en la primera campaña, se realizaron varios perfiles de PE, con espaciados diversos, aunque en esta ocasión se buscaba cubrir de forma más extensiva la cuenca endorreica, ya fuera en los límites de la laguna como en zonas alejadas de ésta. Así, se han realizado perfiles en la zona sur, este y oeste de la laguna, en sus cercanías y alejados de ésta, incluso en zonas a considerable distancia, figura 5.

La toma de datos fue realizada entre septiembre y octubre de 2006. Fueron medidos 29,5 km de perfiles de resistividad con espaciado interelectrónico de 15 m y 2700 m utilizando un espaciado interelectrónico de 5 m. En todos los perfiles se ha utilizado un dispositivo Wenner.

Dada la considerable extensión de la cuenca a cubrir, los nuevos perfiles fueron trazados buscando su complementariedad con otros datos previos que eran de utilidad, en este caso los SEVs, de forma que se intentó no repetir medidas en las mismas zonas, pero si obtener cruces de perfiles al objeto de chequear la fiabilidad de las medidas y verificar su correlación (aun cuando se tratara de métodos diferentes).

Igualmente, se realizaron algunos SEDTs en ciertas zonas singulares, al objeto de cubrir “huecos” no investigados previamente y de explorar en zonas singulares o de difícil acceso (ver apartado siguiente).

PERFIL	X UTM		Y UTM	
Perfil1 largo	341412	345241	4105077	4108750
Perfil1 corto	342193	343288	4105833	4106866
Perfil 2 Largo	339486	343708	4106066	4111224
Perfil 2 corto	341917	342677	4109702	4110325
Perfil 3	347423	348311	4116915	4115349
Perfil 4	348801	349617	4114486	4111177
Perfil 5	341397	345713	4116822	4112900
Perfil 7	338098	341525	4107794	4111450

Tabla 3 Coordenadas de inicio y final de los perfiles medidos en la campaña del 2006.

La posición de todos los perfiles de PE y del resto de trabajos geofísicos realizados en la zona puede apreciarse en la figura 5. En la tabla 3 se indican las coordenadas inicial y final de estos perfiles de la campaña del 2006.

A continuación se pasa a comentar las características de los nuevos perfiles realizados de PE y la interpretación de los datos obtenidos.

Perfil 1 Largo – Laguna de Fuente de Piedra, lado sureste

Este perfil tiene una longitud de 5400 m, y se ha medido con un espaciado interelectródico de 15m. El perfil se ha trazado siguiendo una orientación SW-NE pasando junto al borde sureste de la laguna de Fuente de Piedra, cortando el interior del vaso de ésta en un tramo de unos 1200 metros (entre los puntos 700 y 1900 del perfil, figura 14 inferior), al final del cual se cruza junto al sondeo mecánico “La Plata”, del que se dispone de registro de conductividad. Igualmente, el perfil pasa por el sondeo mecánico “Los Piquetes” emplazado fuera de la cuenca endorreica, y próximo al SEV 26 de la campaña de 1983, figura 5.

En el perfil, figura 13, es fácil distinguir la zona cortada correspondiente a la laguna, dada la bajísima resistividad del cuerpo de salmueras existente bajo ella. Al suroeste, junto al borde norte de la laguna, el perfil es notablemente más resistivo, lo que denotaría escasa presencia de salmueras (aunque parece existir algún pequeño cuerpo, como se ve en el perfil así como en la presencia de altas conductividades en el más lejano sondeo de “Los Piquetes” (el cual está emplazado en zonas de aparentemente menor presencia de salmueras y materiales yesíferos). Es decir, parece existir un cierto control litológico en el borde sur de la laguna, como parecen constatar la presencia de algunas calizas y dolomías, así como la propia topografía de esta zona (el límite de la cuenca endorreica es, en esta zona, muy próximo al vaso de la laguna).

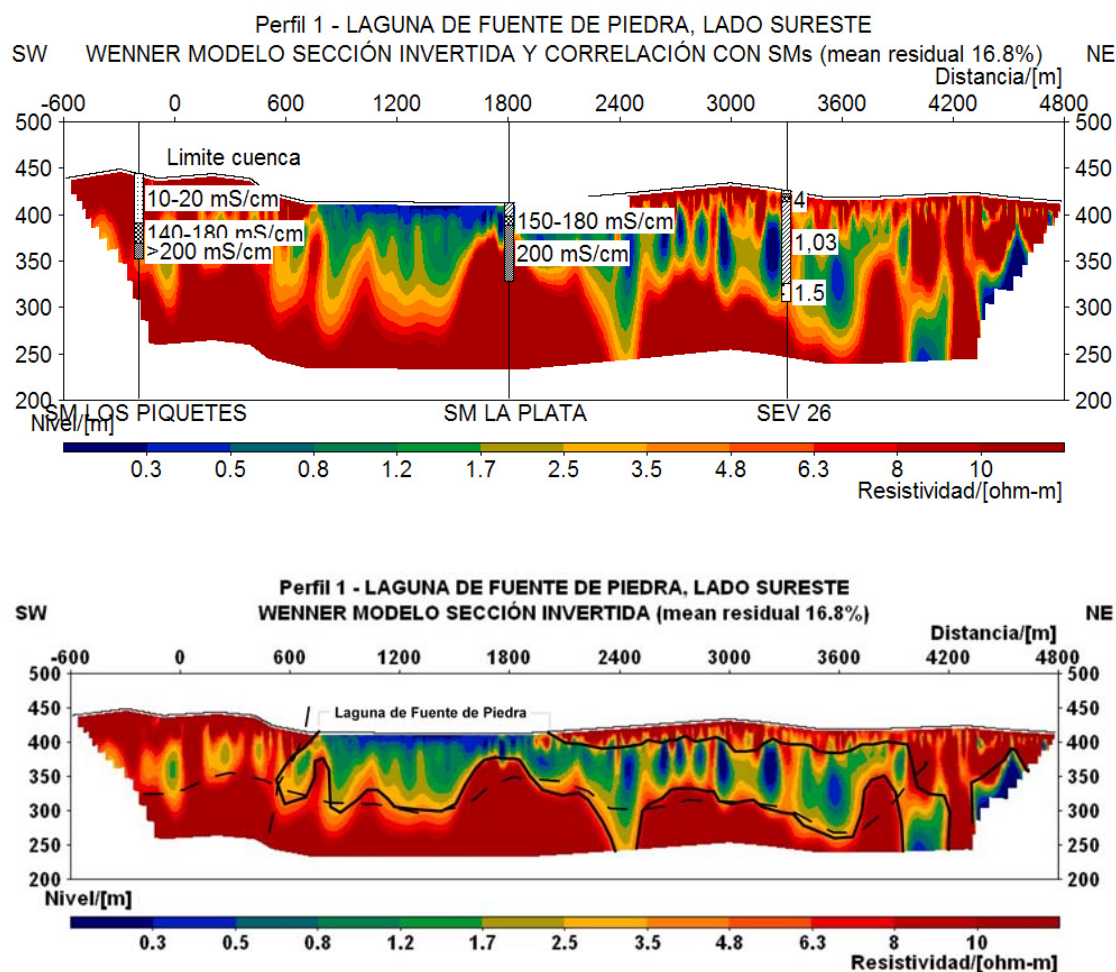


Figura 14. Perfil 1 Largo, Laguna de Fuente de Piedra, lado sureste. Parte superior, incluye la posición e interpretación en ohm.m del SEV 26 realizado en las proximidades del perfil y las columnas de conductividad de fluido en los sondeos mecánicos atravesado por el mismo. Parte inferior, se ha destacado el cuerpo de salmueras, y posibles direcciones de flujo. En las dos perfiles la topografía esta referida al nivel del mar.

Hacia el noreste, el perfil sobrepasa el vaso de la laguna y discurre con dirección noreste, siguiendo un trazo sesgado respecto de ésta. En esta zona, el perfil muestra la existencia de un cuerpo conductor el cual, casi a modo de lentejón, trasciende con mucho, los límites del vaso de la laguna, pues se puede detectar aproximadamente entre los puntos 1800 y 3800 del perfil. Este cuerpo de muy baja resistividad (valores inferiores a 1 ohm.m en muchos puntos) denota la presencia de salmueras en un cuerpo aproximadamente continuo, lentejónar, hasta una distancia de 1 km del vaso de la laguna, que también se observa en la interpretación del SEV 26 próximo al perfil; precisamente, en las zonas más alejadas, parece apreciarse un incremento de la profundidad de este cuerpo, es decir, el nivel de salmueras aumenta en profundidad con la distancia a la laguna.

En el borde noreste del perfil, además, se aprecian algunos niveles de resistividad baja, con forma de embolsamientos inconexos. En algunos embolsamientos de salmueras, tanto inconexos como en algunos tramos de cuerpos de gran continuidad, se aprecia una extensión de éstos en profundidad, (puntos 2400 y 4000 del perfil), aspecto éste que puede denotar una presencia de salmueras más profundas o una generación de éstas a partir de niveles más profundos, pudiendo existir algún tipo de flujo vertical de salmueras a través de estos niveles, figura 13 inferior.

Perfil 1 corto. Laguna de Fuente de Piedra, lado sureste

Este perfil, medido con un espaciado interelectródico de 5 m, tiene una longitud de 1500m, y ha sido realizado enteramente sobre el tramo del perfil 1 largo que atraviesa la laguna de Fuente de Piedra, buscando más resolución en zonas más superficiales. En cualquier caso, no aporta información más relevante respecto al perfil de espaciado largo. Esta línea discurre subparalela a la orilla sureste de la laguna de Fuente de Piedra. Ver figuras 5 y 15.

De este perfil, se deduce que la laguna de Fuente de Piedra tiene un potente nivel de salmueras asociado bajo ella, pues el registro resulta de muy baja resistividad (inferior a 1 ohm.m y en la zona superficial, por debajo de 0.3 ohm.m), con una profundidad de al menos 50m en la zona atravesada de la laguna, lo que puede suponer un cierto control geológico de base, como se comprueba en ésta y otras medidas realizadas.

El perfil pasa junto al sondeo La Plata, con el que se obtiene buena concordancia, pues dicho sondeo presenta elevadas conductividades del fluido, figura 15. Además se aprecia con más detalle el notable control geológico que debe existir en el borde sur de la laguna, con un fuerte salto de resistividad en este punto (fuerte cambio lateral de resistividad en torno al metro 0 del perfil, que coincide con la orilla sur de la laguna), que implicaría una disminución de la presencia de salmueras más al sur. También se aprecian algunos embolsamientos de salmuera independientes (metro 0 a metro -100 del perfil), quizá debidos a cierta karstificación que se aprecia en las dolomías del borde sur de la laguna.

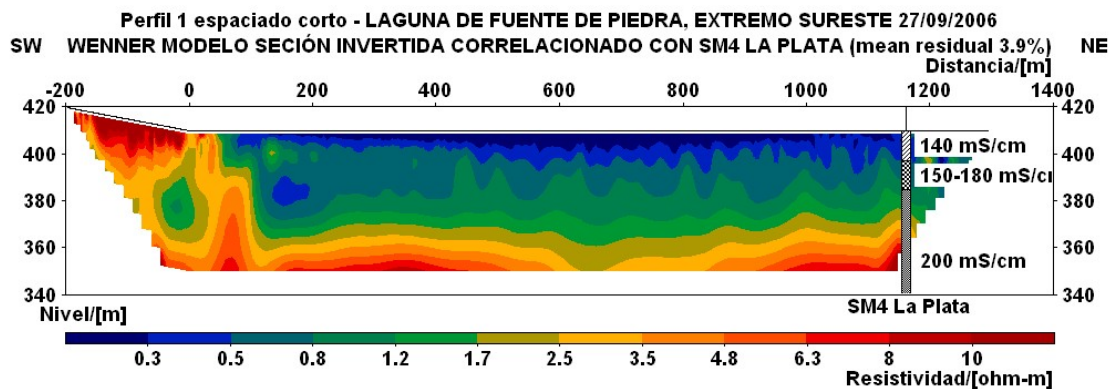


Figura 15. Perfil corto, Laguna de Fuente de Piedra, lado sureste. Incluye topografía snm, así como posición y columna de conductividad de salmueras en el sondeo mecánico atravesado por el perfil. La extensión del perfil es coincidente con la zona central del perfil 1 largo.

Perfil 2 Largo. Cantarranas, laguna de Fuente de Piedra, lado oeste

Este perfil, comienza en su lado suroeste fuera de los límites de la cuenca endorreica, para discurrir con dirección noreste, pasando junto al sondeo Cantarranas, hasta alcanzar tangencialmente el borde oeste de la laguna, junto a la que discurre en su tramo final, figura 5. La longitud del perfil es de 6900m, con espaciado entre electrodos de 15m.

El perfil, tras un comienzo donde se observa la presencia de materiales conductores aislados, posiblemente debidos a la existencia de salmueras, presenta un sector de relativa elevada resistividad en su continuidad, entre los puntos 0 y el 1500, a partir del cual, ya por proximidad con la laguna, se encuentran niveles de baja y muy baja resistividad, que denotan la presencia de salmueras. El trazado de borde del perfil (tangencialmente al vaso) motiva cierta irregularidad en el perfilaje de resistividades. Así, se muestra un cuerpo conductor bajo la laguna en todo su trazado con gran continuidad y una profundidad variable pero en el entorno de los 100 metros. No obstante, se aprecian 2 puntos en los que el cuerpo de salmueras penetra en profundidad, a modo de conexión con niveles profundos, que pueden denotar algún flujo de salmueras, en forma de “tubos” de ascenso (o descenso) desde niveles más profundos, quizá a modo de celdas de convección, parte inferior figura 16. Este efecto se constata también en otros perfiles (Perfil 1 y otros), lo que se supone debe tener un cierto significado en la dinámica hidrogeológica de la cuenca.

Los SEV 9 y 12, de los perfiles de SEVs P2 y P3 respectivamente, se sitúan en los bordes del tramo resistivo entre los puntos 0 y 1500, lo que viene reflejado en los valores relativamente resistivos del SEV 9, figura 15 superior, y el tramo conductor de $0.6 \Omega.m$ entre los 6 y los 94 m de profundidad en el SEV 18, muy próximo a un cuerpo conductor del perfil en el punto 1800. En la figura 16 superior se ha incluido la interpretación del SEV 9, sin embargo solo se indica la posición del SEV 18 para no sobrescribir sobre los datos del sondeos Cantarranas.

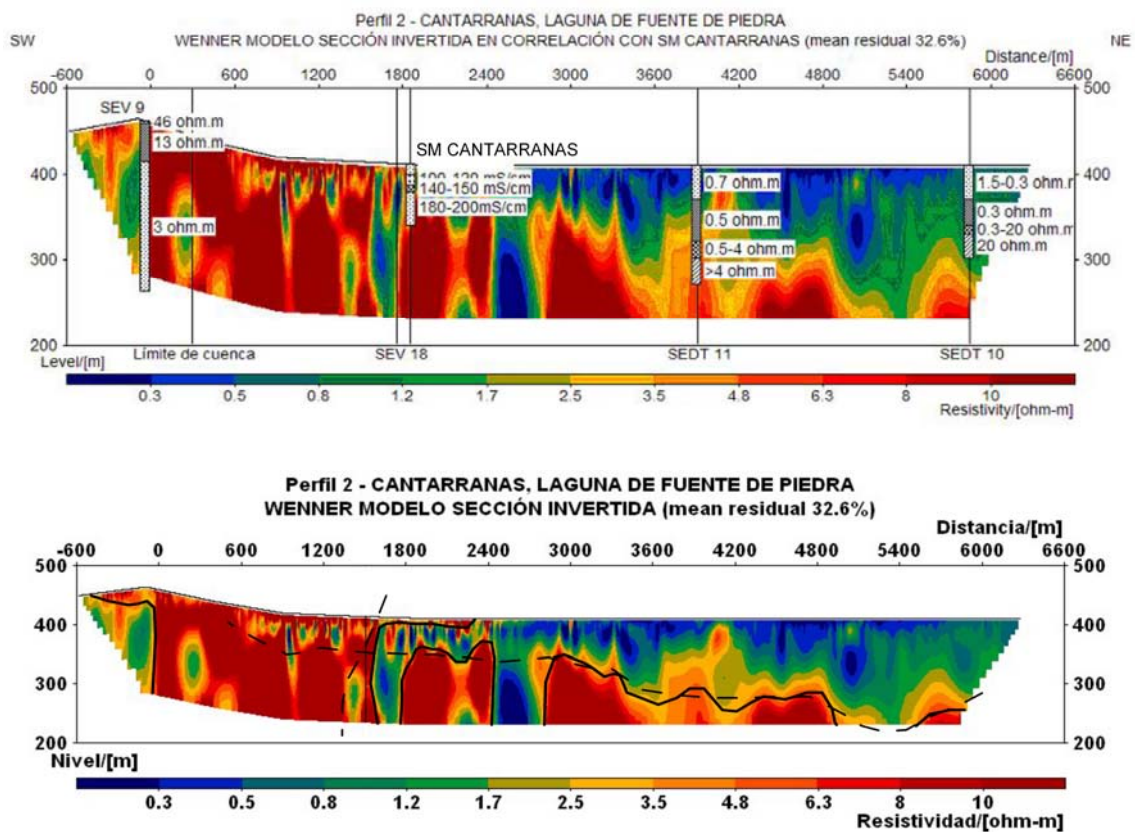


Figura 16. Perfil 2 Largo, Cantarranas, Laguna de Fuente de Piedra, lado oeste. Parte superior, incluye la posición aproximada y la interpretación de alguno de los SEV realizados en las proximidades del perfil y la columna de conductividad de fluido en el sondeo Cantarranas. Parte inferior, se ha destacado el cuerpo de salmueras, y posibles direcciones de flujo. En las dos perfiles la topografía esta referida al nivel del mar.

En la parte final del perfil se localizan los SEDTs 11 y 10; su interpretación coincide cualitativamente con la indicada en el perfil, si bien en el SEDT muestra mayor espesor de conductor y al contrario en el SEDT 10.

Perfil 2 corto. Laguna de Fuente de Piedra, lado oeste

Perfil medido con un espaciado interelectrónico de 5 m. y de 1200m de longitud, realizado sobre la zona final del Perfil 2 largo (Cantarranas, parte noroeste de la Laguna), repasando esta con mayor resolución superficial. Aun siendo de mayor resolución por medirse con un espaciado menor, mas sensible a los cambios de resistividad en la zonas más superficiales, lo cierto es que el carácter altamente conductivo del perfil al completo, impide discernir algún tipo de cambio o singularidad atribuible a factores geológicos, figura 17. En el perfil tan sólo se detectan salmueras de elevada concentración que empapan materiales indiferenciables, incluso a profundidades de 60m. En toda la longitud del mismo no se aprecian cambios significativos de resistividad, obteniéndose valores entre 0.2 y 1.5 ohm.m, rango de resistividades demasiado pequeño que no permite contrastes con algún significado.

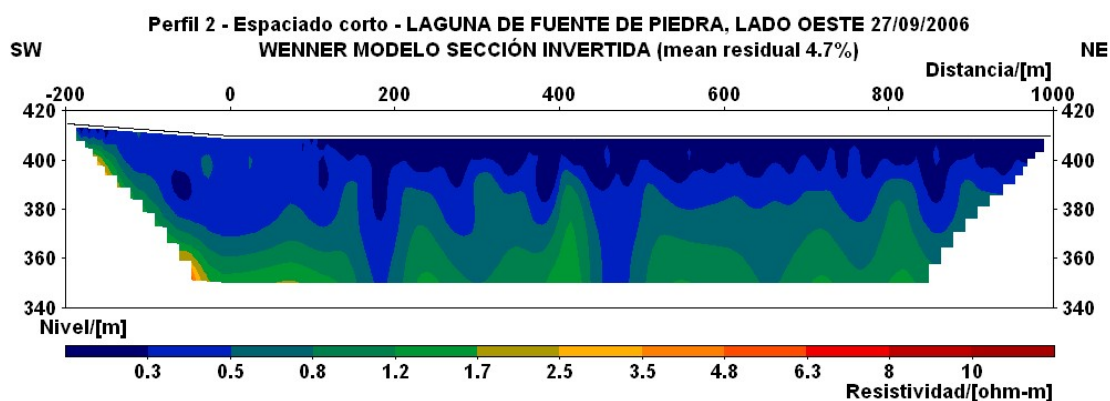


Figura 17. Perfil 2 corto, Laguna de Fuente de Piedra, lado oeste. Incluye topografía referida al nivel del mar. Este perfil está realizado en la zona central del perfil 2 largo, siguiendo un trazado junto al borde oeste de la laguna de Fuente de Piedra.

Perfil 7. Arenales a La Herriza

Este perfil, de 5000 m de longitud con un espaciado interelectrónico de 15m, es aproximadamente paralelo al Perfil 2 largo, pero desplazado entre 1,5 y 1,8 kms al noroeste, figura 5. Presenta un carácter más resistivo en general que éste, como parecería lógico, dado que se encuentra en zonas más alejadas de la laguna. No obstante, se detecta la presencia de cuerpos conductores, uno en el entorno de la posición 0, de gran continuidad en profundidad; entre éste y la posición 2000, se observa un conjunto de pequeños conductores más o menos profundos (a partir de la

posición 800), que podrían tener cierta continuidad; entre las posiciones 2000 y 4000 existe una sucesión de cuerpos conductores claramente visibles, que podrían formar parte de un cuerpo único de salmueras, que tendría cierto desarrollo en profundidad, siendo algunos de ellos del tipo “tubo” anteriormente comentado, figura 18 inferior.

Por otro lado, existe muy buena correspondencia entre la resistividad obtenida en el perfil 7 y la conductividad del fluido del sondeo Arenales, situado junto a la posición 340 del perfil. Se aprecia un fuerte incremento de la conductividad en el sondeo (una vez estabilizado) en su zona más profunda, que corresponde con un mínimo relativo de resistividad en el perfil en esa posición, figura 18 superior. En cuanto a los SEVs próximos al perfil, éstos presentan unas interpretaciones que coinciden cualitativamente con las del mismo.

[Nota: deben recordarse las diferencias señaladas entre los SEVs y el perfilaje eléctrico en lo referente a resolución, penetratividad y en general a la calidad de las imágenes derivadas de ambos (ver páginas 44 y 45). Igualmente, debe notarse que la situación de los SEVs no es perfectamente coincidente con el perfil correspondiente cuando se representan ambos a un tiempo (a veces existen cientos de metros de separación, suficientes para mostrar o enmascarar cuerpos anómalos). De este modo aquí se muestran las proyecciones de los SEVs sobre el perfil correspondiente. Debe tenerse en cuenta que el posible elemento anómalo puede estar desplazado lateralmente a la línea del perfil medido y no bajo su vertical como parecería desprenderse de un análisis del perfil]

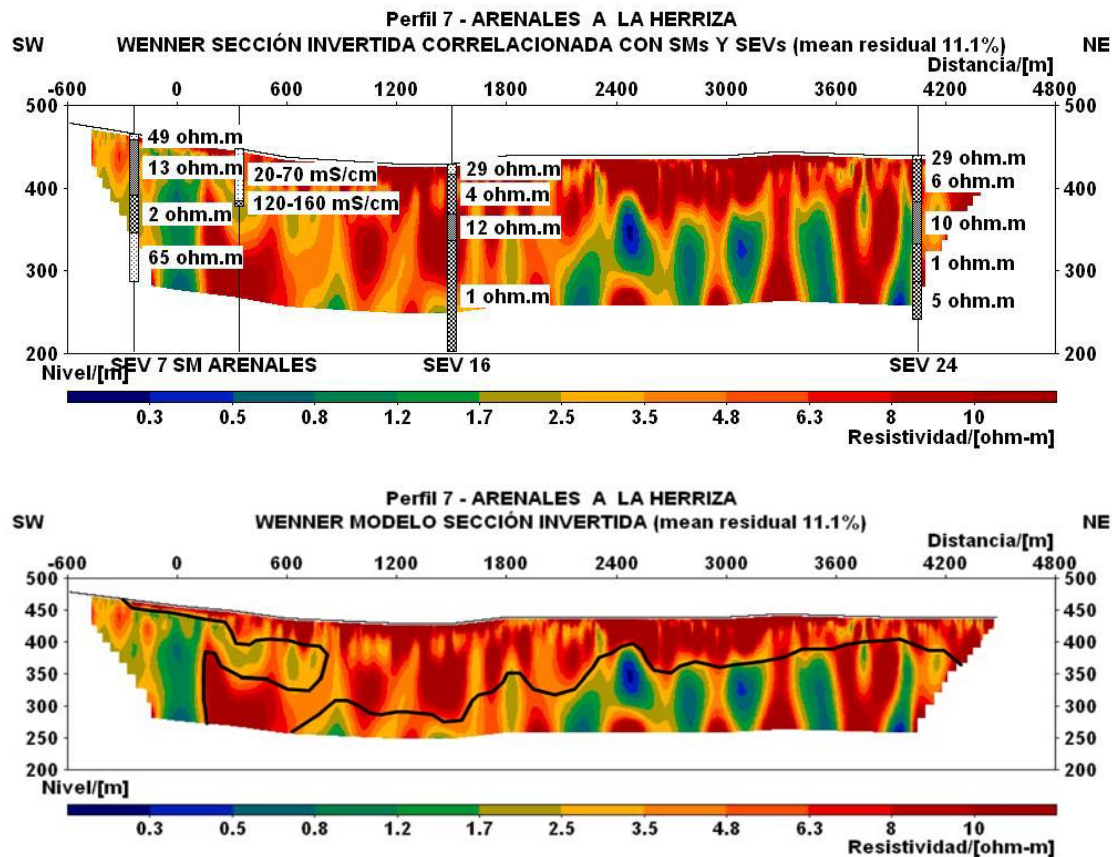


Figura 18. Perfil 7, Arenales a la Herriza. Incluye topografía del perfil referida al nivel del mar y escalas verticales exageradas. Parte superior, perfil mostrando la correlación con la columna de conductividad en pozo, obtenida en el Sondeo Mecánico Arenales y la proyección sobre el perfil de la situación de algunos SEVs realizados en sus proximidades junto con su interpretación. Parte inferior, se muestran cartografiados los cuerpos de salmueras (tonos verde-azul dentro del trazo negro).

Perfil 5. La Roda de Andalucía a Fuente de Piedra

Este perfil, de 5900 m de longitud y espaciado interelectródico de 15 m, fue realizado en una zona de la cuenca en la que hasta ahora no se habían realizado otras medidas, además su extremo noroeste sobrepasa el límite de la cuenca endorreica. Se inicia cerca de la población de La Roda de Andalucía, en el noroeste y son dirección sureste termina próximo al triángulo comprendido por la autovía y las dos líneas de ferrocarril.

En general, el perfil presenta en promedio un carácter resistivo elevado, con valores que superan los 10 ohm.m en gran parte del mismo, figura 19. El perfil es relativamente más resistivo en su zona noroeste hasta la posición 1600, a partir de la cual y hasta el final, comienzan a aparecer zonas de baja resistividad relativa (con valores de hasta 0.5

ohm.m). Esta presencia de numerosos elementos conductores, se produce en casi todos los casos, a profundidades medias (de 50 a 100 m de profundidad por término medio). Aunque estos conductores son de apariencia inconexa entre si, parece que pudieran estar unidos a modo de un cuerpo más o menos continuo de forma lentejonar, indicando la posible presencia de salmueras más o menos concentradas en una larga zona del perfil. En 3 de los cuerpos conductores, además, se aprecia una gran continuidad en profundidad (posiciones 2500, 3300 y eventualmente, el cuerpo de la posición 4300), en forma de tubos que podrían denotar, como en anteriores perfiles, una posible circulación de salmueras desde (o hacia) niveles más profundos.

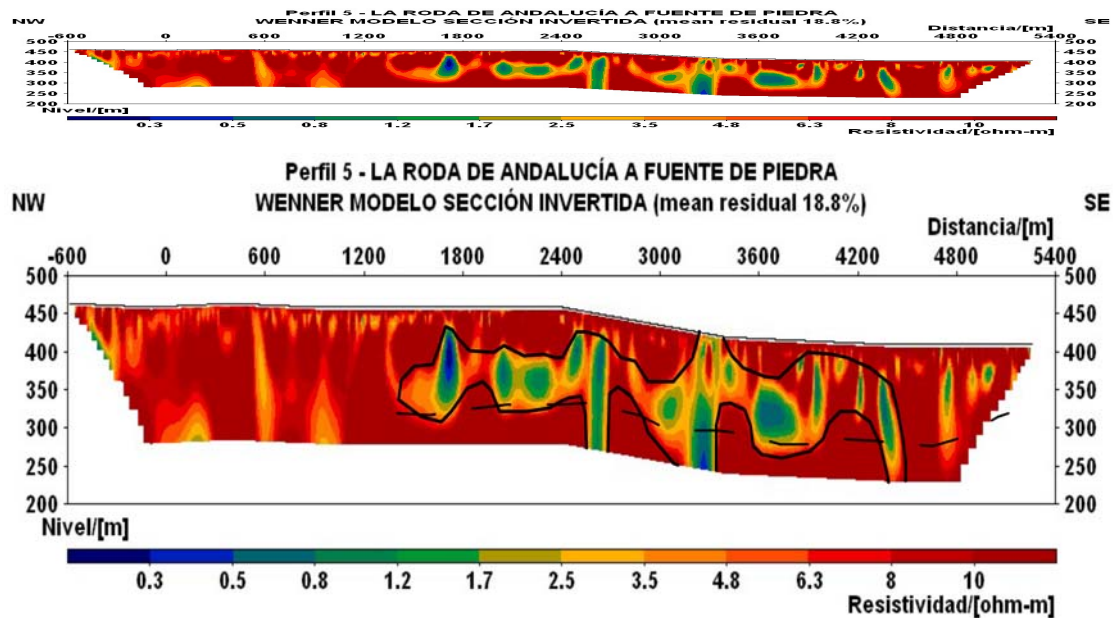


Figura 19. Perfil 5, La Roda de Andalucía a Fuente de Piedra. Incluye topografía referida al nivel del mar. Se muestran el perfil a escala casi 1:1 superior) y cartografiados los cuerpos de salmueras y sus posibles direcciones de flujo (parte inferior).

Perfil 3. La Serafina

Perfil de 2400m de longitud y espaciado interelectrónico de 15 m, realizado en las proximidades de la laguna estacional de La Serafina, pequeña cubeta endorreica dentro de la cuenca asimismo endorreica de Fuente de Piedra, figura 5. El perfil, comienza en las cercanías de la pequeña laguna para desplazarse con dirección sureste. En la primera parte del perfil, bajo la laguna, presenta un cuerpo conductor de forma lantejonar, a una profundidad de entre 50 y 100m, con unos valores de baja resistividad relativa, entre 0.7 y 3 ohm.m, lo que parece indicar una presencia de salmueras (más o menos salobres) de alguna forma asociadas a la laguna, aunque no se aprecia una conexión clara entre este cuerpo lantejonar y la propia laguna, pues aparece un bloque resistivo entre ambas (la propia lagunilla presenta un leve y delgado mínimo de resistividad directamente relacionado con la acumulación de aguas salobres en la misma), figura 19 inferior . Este cuerpo se correlaciona muy bien con el registro de conductividad del fluido en el sondeo mecánico La Serafina, figura 20 superior.

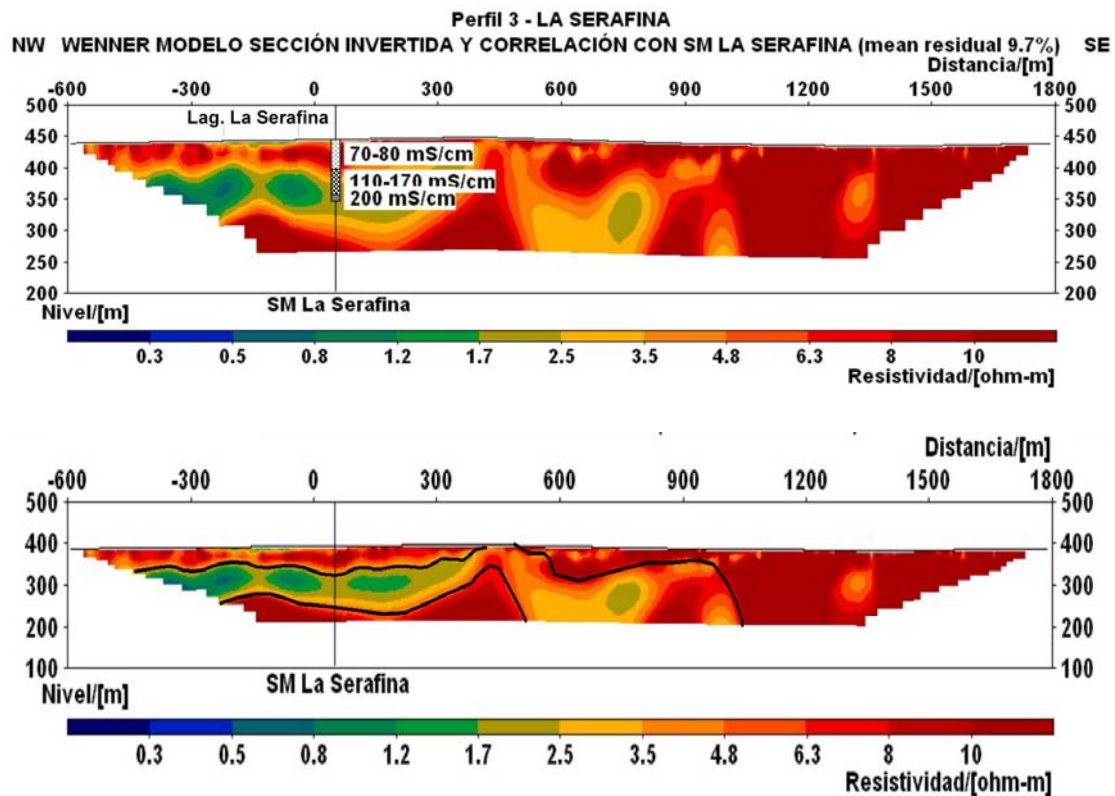


Figura 20. Perfil 3, La Serafina. Incluye topografía del perfil referida al nivel del mar. En la parte superior se muestra la correlación con la columna de conductividad en pozo, obtenida en el Sondeo Mecánico La Serafina. En la parte inferior, se destacan los cuerpos conductores existentes.

Hacia el sureste, el perfil presenta en general un elevado carácter resistivo, aunque aparece algún mínimo relativo de resistividad (2 ohm.m) en profundidad, sobre la posición 600-700 de este perfil, que parece denotar la eventual presencia de salmueras profundas, aunque los valores obtenidos tras la inversión, no resultan excesivamente bajos. Este mínimo podría estar de alguna forma conectado con el cuerpo lentejónar presente bajo la pequeña laguna.

Perfil 4. Arroyo de Santillán

Perfil de 3500m de longitud, con espaciado interelectrónico de 15 m. De orientación noroeste a sureste, constituye en cierto modo, una prolongación del perfil 3 hacia el sureste, con un salto de 1 km respecto de éste. Se trata de un perfil, en promedio, de fuerte carácter resistivo, de manera similar al límite sureste del perfil 3, figura 21. No obstante, presenta algunos pequeños cuerpos conductores, aparentemente inconexos entre si, que parecen tener difícil explicación pues el ambiente general es más resistivo. Sin embargo, dichos cuerpos conductores parecen tener una profundidad similar con excepción del más importante de ellos, lo que en hipótesis, pudiera denotar algún tipo de control litológico a unos 100m de profundidad, según se aprecia en la figura 21 inferior, que muestra una interpretación tentativa de este nivel.

No obstante, el cuerpo conductor más notable es el situado en la posición 900-1100, pues es de mayor tamaño y tiene gran continuidad en profundidad. Se trata de un elemento conductor (resistividad mínima de 0,5 ohm.m) ubicado prácticamente bajo la vertical del arroyo Santillán, lo que puede denotar la presencia de salmueras bajo cierto control estructural que también afectaría al arroyo en superficie.

En general el perfil, dentro de su carácter notablemente más resistivo, tiene elementos comunes a otros perfiles en la cuenca, como un nivel a unos 100m de profundidad que controla elementos más conductores y otros conductores más profundos (cuya imagen no llega a cerrarse en profundidad).

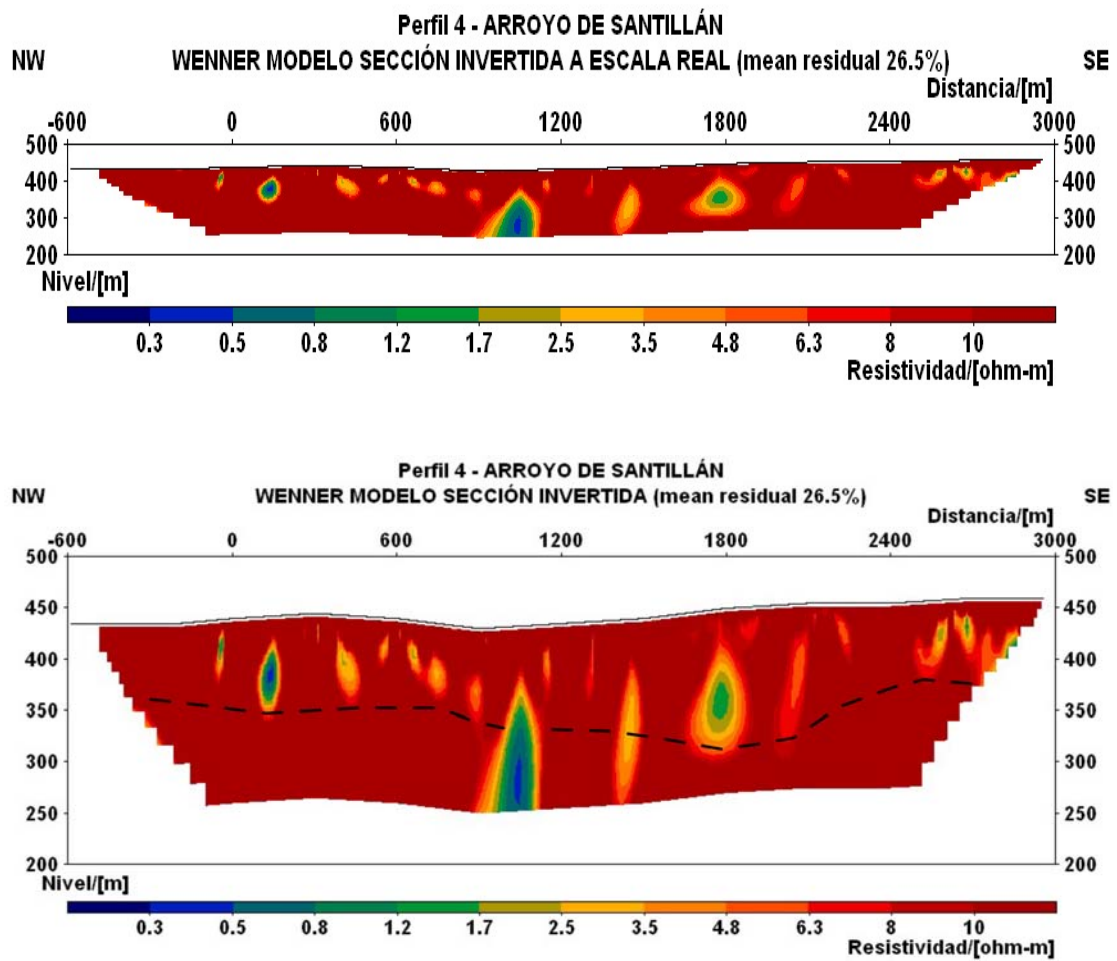


Figura 21. Perfil 4, Arroyo de Santillán. Incluye topografía del perfil referida al nivel del mar a escala aproximadamente real (figura 21 superior). Debajo, a escala vertical exagerada, se muestra un perfil interpretado con posible nivel de control

5.2.4 Resumen de las campañas de perfilaje eléctrico

Los perfiles medidos en la primera campaña tienen un bajo nivel de ruido, lo que ha permitido obtener interpretaciones con errores de ajuste pequeños, lo que aumenta la confianza en su validez. En la segunda campaña, los perfiles más largos poseen un mayor nivel de ruido y los errores de ajuste han sido más altos, no obstante las interpretaciones obtenidas poseen la calidad suficiente para cumplir los objetivos de la campaña.

Se ha observado que existe una buena correlación entre las interpretaciones de los perfiles de resistividad y las columnas de medidas de conductividad de fluido de los sondeos. Lo mismo sucede con las correlaciones con las interpretaciones de los SEDT y SEV próximos a los perfiles, que es bastante buena, sobre todo cualitativamente, teniendo en cuenta las particularidades de cada método.

En este trabajo se ha comprobado que el método de perfilaje eléctrico es adecuado para la localización de elementos conductores en contraste con bloques más resistivos que actúan como substrato de control geológico, visualizando su disposición en dos dimensiones con gran contraste y precisión.

Podemos concluir que el método funciona bien y es resolutorio para el objetivo propuesto, definiendo bien la disposición de los niveles de salmueras, lateralmente y en profundidad.

6. REINTERPRETACIÓN Y PERFILAJE DE SEVs

En el año 1983, por encargo del IGME, la empresa IBERGESA llevo a cabo una campaña geoeléctrica en los alrededores de la laguna de Fuente de Piedra. Se midieron un total de 63 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), distribuidos en 11 perfiles aproximadamente radiales con respecto a la laguna, figura 5. La longitud de alas (AB) alcanzada fue de 1000 m en 55 SEV, de 632 m en 4 SEV, de 500 m en 3 SEV, y de 400m en 1 SEV.

La descripción de los cortes geoeléctricos y la interpretación general de la campaña se puede consultar en el informe de la misma: "Estudio geoeléctrico en Fuente de Piedra (Málaga)" almacenado en el centro de Documentación del IGME con el número .

De manera literal las conclusiones generales del informe son:

- 1. Las formaciones litológicas presentes manifiestan escaso contraste de resistividades, lo que dificulta, y a veces impide, su diferenciación, en especial en lo que concierne al Terciario inferior y al Keuper.*
- 2. Se observan los efectos de un proceso de salinización, que se manifiesta por un descenso de resistividades. La salinización más fuerte aparece en las proximidades de la Laguna. Esta salinización contribuye a enmascarar el contraste de resistividad entre las diferentes formaciones litológicas.*

Entre los trabajos geofísicos llevados a cabo en este estudio, se ha efectuado una reinterpretación de los 63 SEVs realizados por Ibergesa en 1983. En estas reinterpretaciones se ha empleado el programa de interpretación semiautomática de SEVs IX1D de la casa Interpex. Además, con las reinterpretaciones de varios de estos SEVs se han confeccionado 7 nuevos perfiles cuya posición se observa en la figura 5. Para la correlación de las reinterpretaciones de los SEVs y la obtención de estos nuevos perfiles se ha utilizado programa GEOSCAN. Estos nuevos perfiles se han representado aplicando una escala de colores lo más similar posible a la utilizada en los perfiles de resistividad para su mejor comparación. Un aspecto muy importante que hay que tener en cuenta es que, a diferencia de los perfiles de resistividad, en la representación de los perfiles de SEVs no se ha tenido en cuenta la topografía del terreno.

Estos nuevos perfiles contienen cada uno entre 5 y 9 SEVs, espaciados a distancias variables de entre 500m y 1500m. Todos los perfiles tienen una dirección aproximada NW-SE, de los que 3 están emplazados en el lado noroeste de la laguna, otros 3 hacia el este y sureste, y el último en la zona norte de la misma. La mayoría de los SEVs están emplazados en el interior de la cuenca endorreica, aunque los extremos de cada perfil suelen quedar fuera de esta, de forma que estos perfiles abarcan una zona más extensa de estudio que los PEs.

Los SEVs son medidas unidimensionales (1D), de forma que cada punto de medida es un promedio de una región 3D más amplia alrededor de él, en el que además toma una gran importancia la orientación de las alas del SEV (en muchos de estos casos, casi perpendicular a la dirección de los perfiles). La extensión de las alas de los SEVs oscila entre 400 y 1000 m, lo que a priori proporciona una mayor profundidad de investigación que la obtenida en los PEs. Sin embargo, a pesar de la mayor cobertura en profundidad y extensión, la resolución y fiabilidad de estos perfiles obtenidos con las interpretaciones de los SEVs es sustancialmente menor que la obtenida en los perfiles de resistividad (PEs). Para la obtención del perfil confeccionado con los SEVs, el programa realiza una interpolación a 2D, partiendo de medidas 1D relativamente distantes. Además, ha de tenerse en cuenta que las distancias entre SEVs de un perfil, que son de un promedio de 1 km, tienden a ser superiores al tamaño de muchas anomalías obtenidas en PE, por lo éstas quedarán diluidas o promediadas dentro de un valor general más regional. Esto explica la menor fiabilidad y resolución de estos perfiles como aproximación a la distribución real de la resistividad en el terreno con respecto a los PE. Así, estas medidas, que podemos denominar “pseudo 2D” deben tomarse con carácter general, para evaluar una tendencia promedio de resistividad regional y no tanto como una herramienta de detección eficaz de salmueras.

Por las razones anteriores, la correlación entre estos perfiles de SEVs y los perfiles de resistividad (PEs), tomados en direcciones perpendiculares, no es muy exacta en ocasiones. Los puntos de coincidencia son escasos y no siempre coinciden con SEVs 1D sino con zonas interpoladas.

La posición de los perfiles de SEV resultantes es la que se muestra en la figura 22.

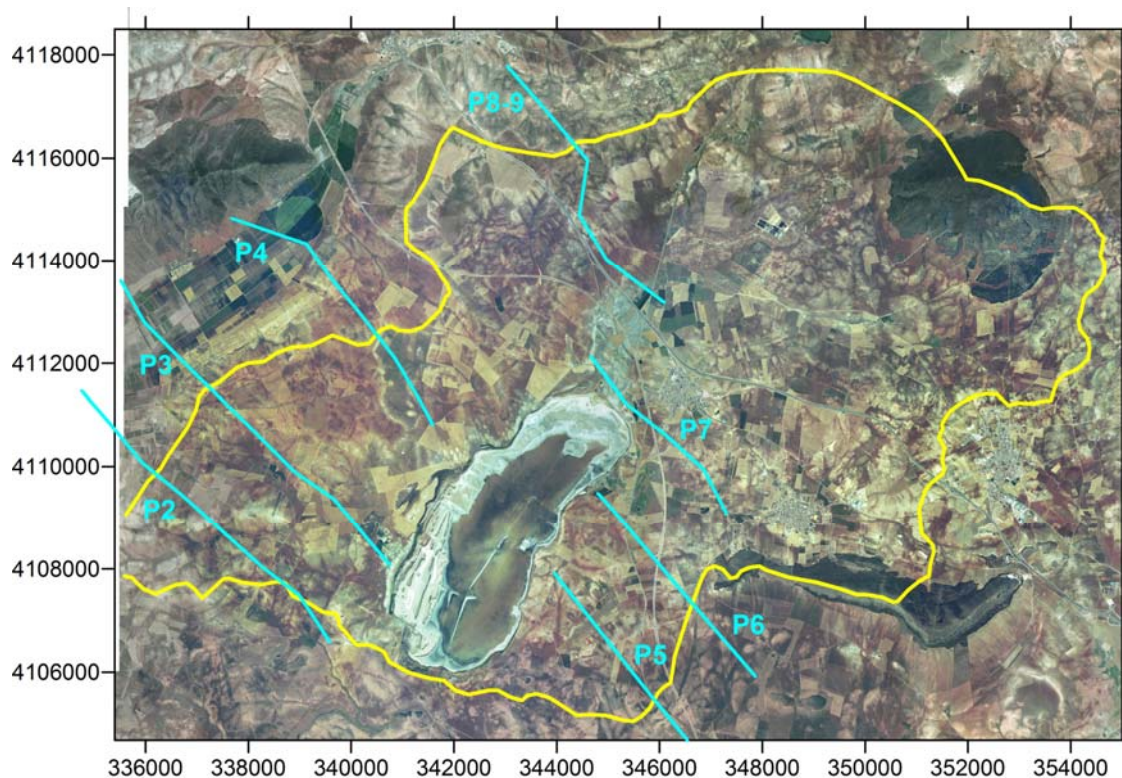


Figura 22: posición de los perfiles de SEV sobre imagen de satélite referenciada.

A continuación, y siempre con las reservas que impone este método, se pasa a discutir los resultados de los “pseudoperfiles” obtenidos. Dada su falta de resolución, no se realiza una interpretación sobre la existencia y posición o no de niveles de salmueras, ofreciendo tan solo una interpretación cualitativa.

Perfil P2: Es el perfil situado más al sur de los que se han tomado al oeste de la laguna, aunque gran parte de él se ubica fuera de la cuenca endorreica (el límite de ésta pasa entre los SEVs 5 y 6). Presenta un carácter general resistivo, con valores superficiales superiores a 10 ohm.m. El perfil presenta dos zonas con un cierto carácter conductor (hasta menos de 3 ohm.m por debajo de los 200m de profundidad), quedando la zona más SE de ambas, situada dentro de la cuenca endorreica, figura 23. Contiene algunos mínimos profundos de resistividad, en torno a 3 ohm.m que podrían denotar alguna presencia de salmueras a la altura del SEV 7, pero la seudosección no tiene resolución suficiente para detectarlas como en el caso de los perfiles de PE.

Este perfil cruza los perfiles de PE, 2 y 7, a la altura de los SEVs 7 y 9. En las figuras 16 y 18 se puede observar la correlación entre estos SEVs y los perfiles, los cuales presentan un aspecto algo más conductor (dentro de la escasez de datos de coincidencia, puesto que el perfil de SEVs P2 es más profundo).

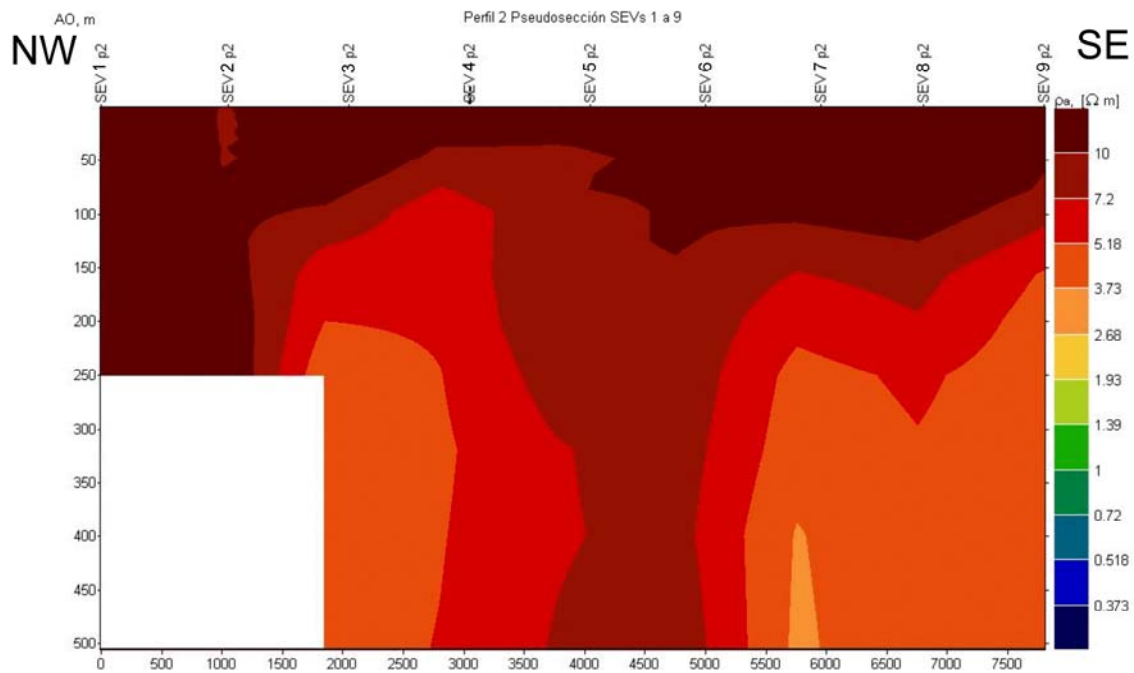


Figura 23. Perfil P2, orientado de NW a SE (izquierda a derecha). La cuenca endorreica se sitúa aproximadamente a partir del SEV 5 hacia el SE (derecha).

Perfil P3: Este perfil se localiza al oeste de la laguna. En su inicio en el NW, fuera de la cuenca, presenta un carácter resistivo que se acuña según se aproxima al límite de la cuenca endorreica, situado entre los SEVs 12 y 13. Ya dentro de ésta, el carácter es más conductor, pasando a valores muy conductores hacia el final del perfil, en su extremo SE, que linda con el borde de la laguna. El promedio de resistividad del perfil es algo alto, pero se aprecian grandes elementos conductores profundos dentro de la cuenca endorreica que pueden corresponder a otros tantos niveles de salmueras o conjuntos de ellos (por ejemplo, a la altura del SEV 16). No obstante, el aspecto general de esta sección, aun con menor resolución, es similar a los perfiles PE de la zona, (2 y 7) con los que existe una correspondencia aceptable.

El perfil P3 se muestra en la Figura 24. El perfil 2 cruza a la altura del SEV 18 en las cercanías del sondeo Cantarranas, figura 16 superior, y el perfil 7 lo hace próximo al SEVs 16, figura 18 superior.

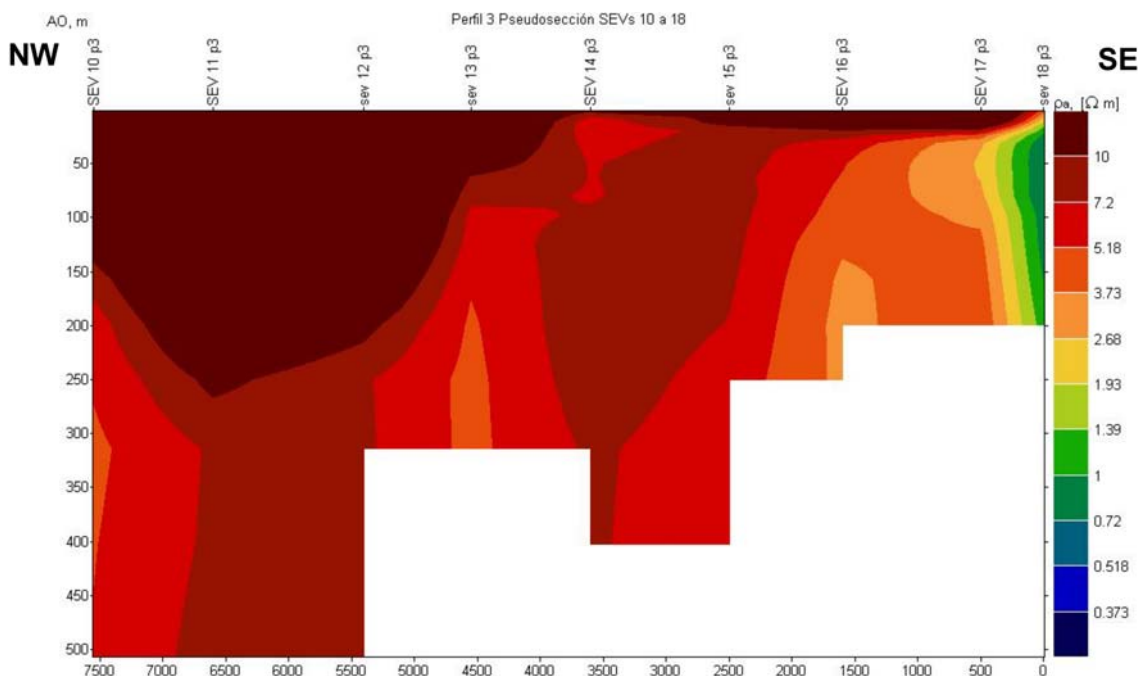


Figura 24. Perfil P3, de NW a SE (izquierda a derecha). La cuenca endorreica se sitúa entre los SEV 12 y 13 hacia la derecha (sureste), mientras el SEV 18 se realizó en la orilla de la laguna.

Perfil P4: Se sitúa en el centro del lado oeste de la laguna, según muestra la figura 25. Presenta cierta regularidad y homogeneidad en sus valores de resistividad, en torno a 5 ohm.m de promedio, aumentando ligeramente la resistividad a medida que nos alejamos de la laguna, figura 23. En la zona más próxima a ésta, pero aún distante cerca de 1 km, se obtienen los valores más bajos, en torno a 3 ohm.m en profundidad.

Cuando se sale de la cuenca endorreica, a partir del SEV 22 hacia el final del perfil, en el SEV 19, se observa el aumento de potencia del nivel resistivo superficial (en torno a 10 ohm.m), pero sin cambios bruscos ni elementos singulares. Sin embargo, este perfil, como los demás realizados a partir de una malla espaciada de SEVs, puede enmascarar variaciones de resistividad de pequeño tamaño, de forma que el perfil tiende a promediar las resistividades de cuerpos menores cuando el tamaño de éstos es inferior al

espacio entre SEVs (y este puede superar los 2 kms). El conductor más notable (sobre los 3 ohm.m se aprecia en zonas profundas más cercanas a la laguna (SEVs 24 y 25)

Este Perfil P4 corta al perfil 7 de resistividad a la altura del SEV 24, con aceptable coincidencia, figura 18 superior.

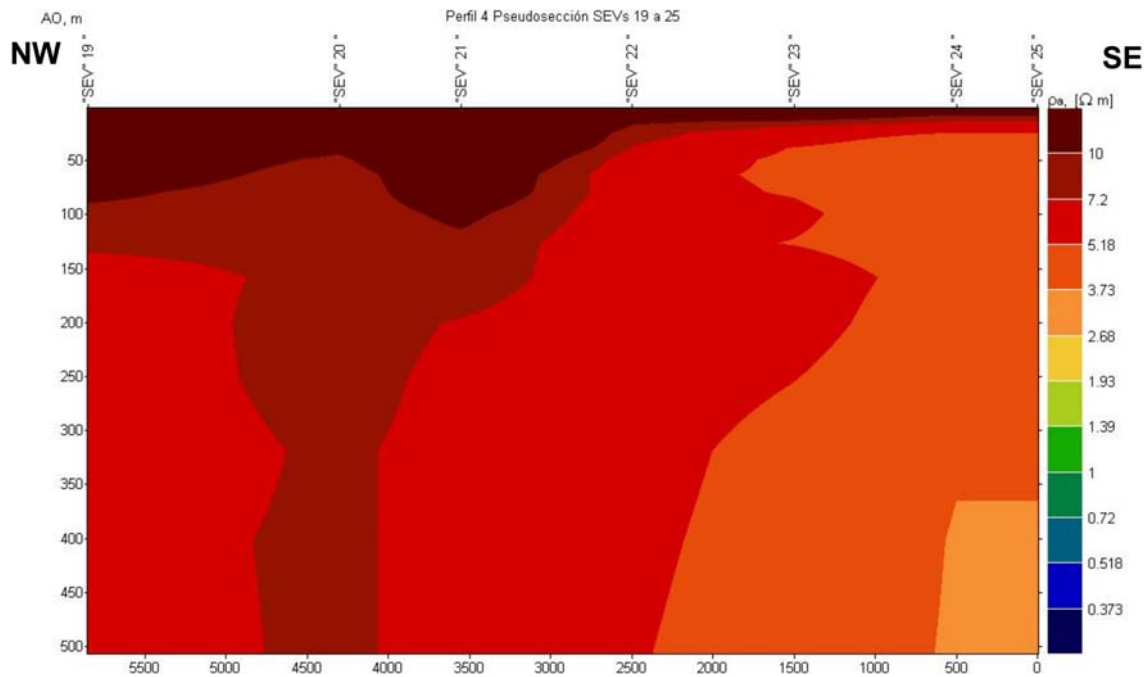


Figura 25. Perfil P4, de NW (izquierda) a SE (derecha) donde se sitúa la laguna. El límite de la cuenca endorreica se localiza próximo al SEV 22 y hacia la derecha en la figura (SE).

Perfil P5: Se sitúa en el lado sureste de la laguna. Como se observa en la figura 26, partiendo de la laguna, el perfil presenta un nivel inicial muy conductor, con valores hasta de 1 ohm.m, que se prolongan hacia el este en forma de cuña conductora con valores en torno a 2 ohm, dentro de un fondo levemente más resistivo (3-4 ohm.m), y que presenta cierto espesor, superior a 200m en algunos casos y una tendencia a ganar en profundidad a medida que se aleja de la laguna. Este conductor se atenúa y cierra hacia el este sobre la posición 2500m, justamente en la zona límite de la cuenca endorreica (a la altura del SEV 30).

Aproximadamente sobre los SEVs 28 y 29 se situaría la subdepresión de El Navazo, ocupada por una pequeña laguna (hoy desecada) con lo que quizá esta cuña conductora pudiera suponer alguna conexión entre ambas lagunas. La disposición, emplazamiento y forma de esta cuña coincide con datos similares obtenidos en perfiles de SEVs y de tomografía próximos, no obstante su baja resolución. Este efecto se ha sugerido como una hipotética zona de descarga hidrológica del sistema fuera de la cuenca, aunque esto carece de prueba alguna.

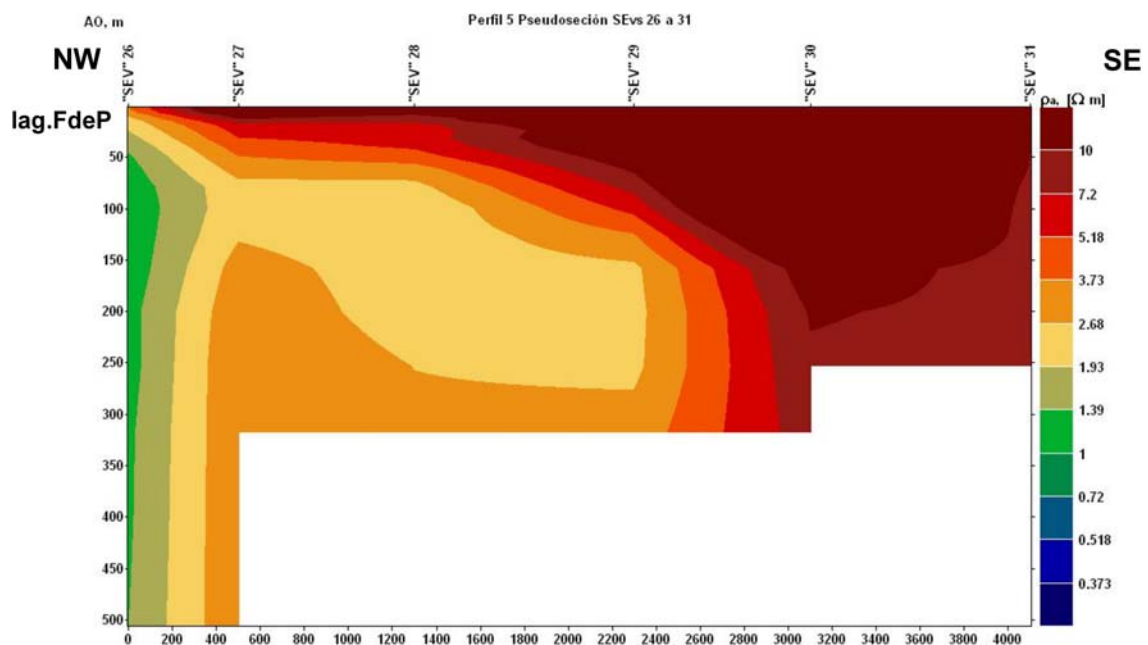


Figura 26. Perfil P5 mostrando una cuña conductora (en amarillo), seguramente con bastante contenido en salmueras que penetra hacia el sureste (hacia la derecha), desde las cercanías de la laguna (SEV 26 a unos 800m de la orilla sureste).

Perfil P6: Perfil situado más al norte y paralelo al anterior, que parte desde el borde medio este de la laguna. El perfil muestra 2 fuertes cuerpos conductores (con resistividades inferiores a un 1 ohm.m), aparentemente inconexos entre si, figura 27. El conductor situado más próximo a la laguna se detecta especialmente en el SEV 33 (a más de 1 km de ésta) y corresponde muy bien con otro cuerpo similar vislumbrado en el extremo este del perfil 1 de PE, figura 14 superior. Este conductor tiene gran extensión en profundidad y cierto aspecto de cuña hacia el este. Se trata de un punto singular, pero aun con las reservas que impone este tipo de perfilaje, parece corresponderse con un potente conductor situado debajo con cierta extensión fuera de la laguna.

El cuerpo conductor situado más al este, es detectado por el SEV 37 al final del perfil, ya situado fuera del límite de la cuenca endorreica (que estaría entre los SEVs 35 y 36). En el intermedio, existe una zona más resistiva (de hasta 10 ohm.m) con cambios graduales y menos significativos.

La apariencia del perfil no es muy distinta del perfil 1 de PE ni del contiguo Perfil 5 de SEV y parece guardar cierta relación, sobre todo en lo referente a la extensión hacia el este y sureste de los niveles conductores y por tanto, de las salmueras.

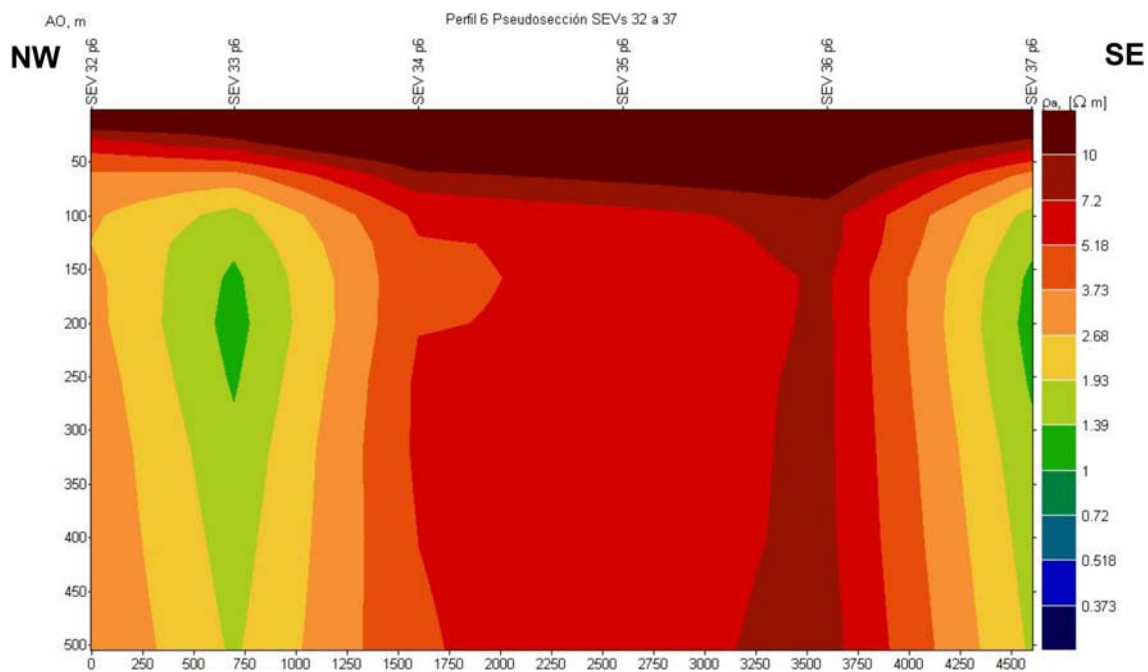


Figura 27: Perfil P6, de noroeste (izquierda) a sureste (derecha). La cuenca endorreica está situada entre los SEVs 35 y 36 hacia el NW.

Perfil P7: Este perfil comienza, por su extremo noroeste, en la zona norte de la laguna, continuando en dirección sureste, y subparalelo a ésta durante un tramo (2 km), hasta separarse de ella. El punto más cercano al borde mismo del vaso lagunar es coincidente con el SEV 41, junto a la orilla norte, y cercano al sondeo mecánico Ugr3 y a los PE Laguna 1 y Laguna 3, figuras 9 y 11 en su zona de cruce. En esta zona se encuentran las resistividades más bajas del perfil (inferiores a 0.7 ohm.m) y que muestran buena consonancia con los valores de dichos perfiles, de forma que se aprecia un notable

conductor de aspecto lentejónar que queda limitado en profundidad por un resistivo relativo, aquí sobre los 150m. (debe hacerse hincapié en la menor resolución de los perfiles de SEVs), figura 28. También se aprecia la extensión del cuerpo conductor lentejónar hacia el norte (de forma similar al perfil Laguna 1) y hacia el sureste, a distancias de más de 3 km de la laguna. Este perfil, aun no sobrepasando el límite de la cuenca, refuerza la extensión del cuerpo conductor de la laguna de manera significativa, en este caso hacia el este. Igualmente, permite apreciar zonas conductoras en profundidad (no obstante su baja resolución), como la detectada en el SEV 43, con morfología similar a las obtenidas en los PE.

La correspondencia con los perfiles de PE y los sondeos mecánicos es buena, pues detecta los elementos más conductores con valores análogos de resistividad.

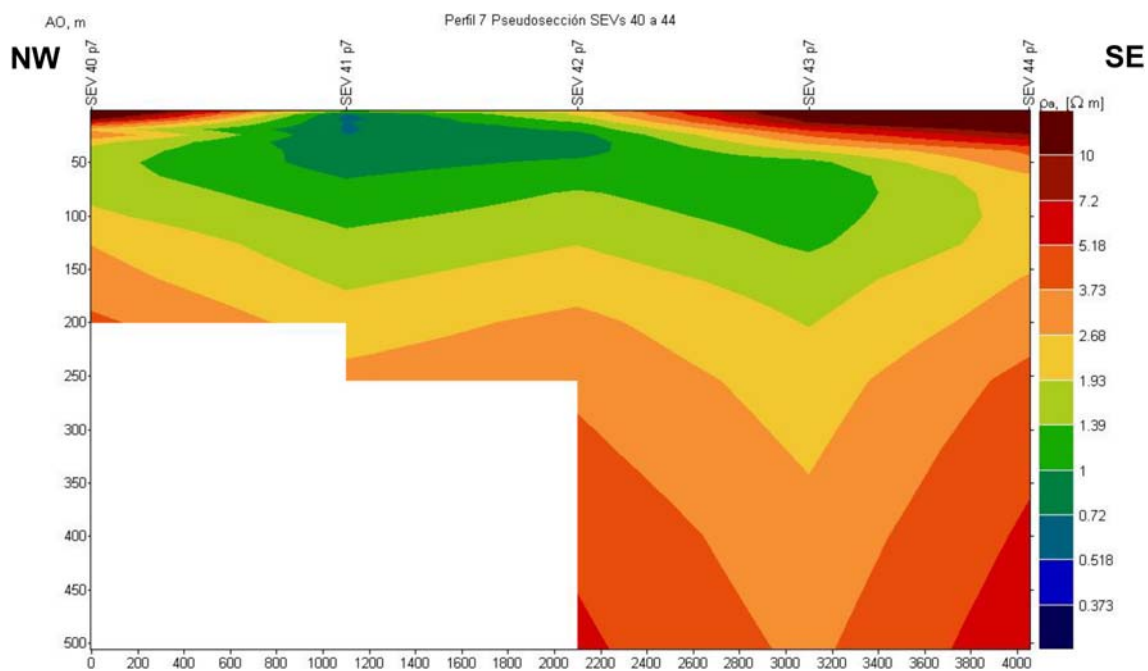


Figura 28. Perfil 7, de Noroeste (izquierda) a sureste (derecha)

Perfil P8-9: Este perfil se ha formado de la unión los perfiles 8 y 9 de la campaña de SEV de Ibergesa, figura 5. Cubre una amplia zona al norte de la laguna de forma que parte de él sale de los límites de la cuenca endorreica (desde el SEV 47 hacia el noroeste). Corta al perfil de resistividad (PE) Laguna 2, en su extremo sur, a la altura del SEV 49, figura 11.

El perfil presenta un carácter resistivo, incluyendo zonas relativamente conductoras con un cierto aspecto de embolsamiento, figura 29. Dado el gran tamaño del perfil (6km) y el largo espaciado entre SEV, resulta claro que cualquier zona anómala de tamaño inferior a ese espaciado quedará enmascarada como un valor promedio entre ella y su zona circundante, por lo que este perfil debe ser tomado con carácter general y no de detalle. Bajo esta perspectiva, el perfil presenta un suave ondulado de resistividades que pudieran corresponderse con zonas anómalas o agrupaciones de anomalías (especialmente se aprecia esto bajo los SEVs 47 y 49, con valores en torno a 2 ohm.m), figura 27.

En un ejercicio de abstracción, este perfil de baja resolución, sería de resultados muy similares al PE Laguna 2, el cual, bajo un fondo de cierta resistividad (a menudo superior a 10 ohm.m) presenta anomalías globulares más o menos aisladas. La mayor diferencia se encuentra en la profundidad de estas anomalías, que es levemente superior en este perfil respecto a las obtenidas en PE Laguna 2.

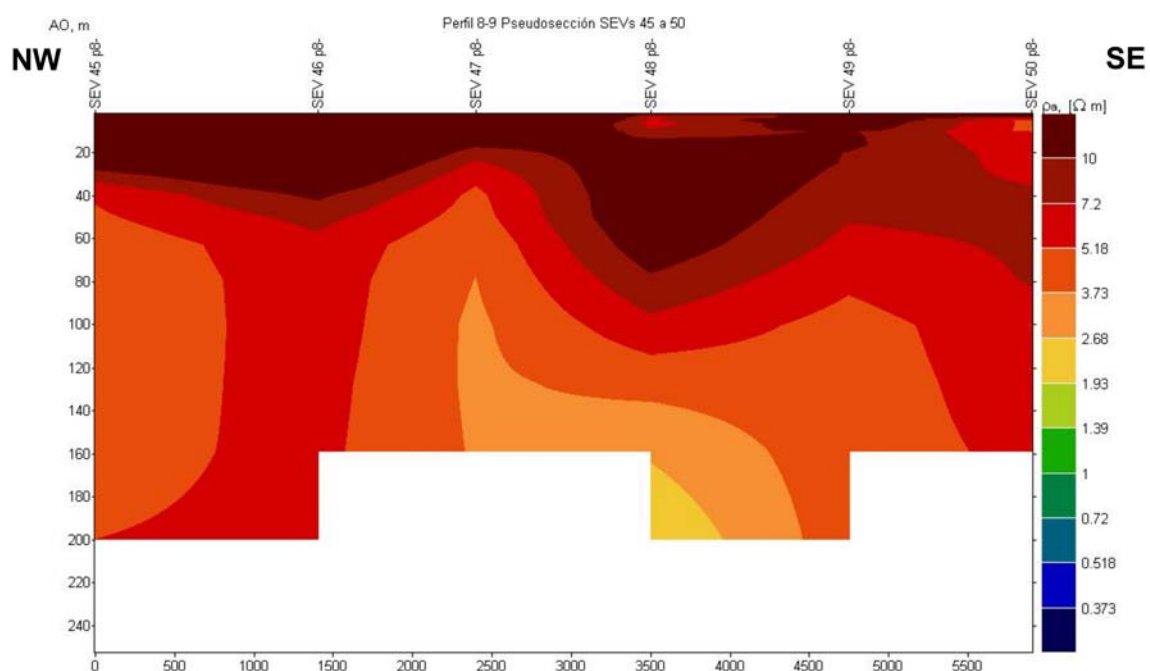


Figura 29. Perfil 8-9, representado de noroeste (izquierda) a suroeste (derecha).

6.1 Conclusiones de las reinterpretaciones de los SEVs

Se ha realizado una reinterpretación de los SEVs medidos en el año 1983 por Ibergesa por encargo del IGME en la Laguna de Fuente de Piedra y su cuenca. Con algunos de ellos se han confeccionado 7 nuevos perfiles, que contienen cada uno entre 5 y 9 SEVs.

Aunque la mayoría de los SEVs están emplazados en el interior de la cuenca endorreica, los extremos de cada perfil suelen quedar fuera de esta, de forma que estos perfiles trascienden sus límites.

Dada las características del método de SEV, medida unidimensional; la distancia entre ellos, entre 500m y 1500m; y la extensión de las alas que oscila entre 400 y 1000m; la resolución y fiabilidad de estos perfiles obtenidos con las interpretaciones de los SEVs es sustancialmente menor que la obtenida en los perfiles de resistividad (PEs)

Al ser las distancias entre SEVs de un perfil de 1 km de promedio, tienden a ser superiores al tamaño de muchas anomalías obtenidas en PE, por lo éstas quedarán diluidas o promediadas dentro de un valor general más regional.

Los perfiles de SEVs han servido para evaluar una tendencia promedio de resistividad regional y no tanto como una herramienta de detección eficaz de salmueras. Estos perfiles de SEVs han permitido obtener una información general en toda la extensión de la cuenca, proporcionando una importante información del desarrollo de los cuerpos conductores dentro y fuera de ella.

Aunque por las razones expuestas, la correlación entre estos perfiles de SEVs y los perfiles de resistividad (PEs), en general, tomados en direcciones perpendiculares, no es muy exacta en ocasiones. Se ha encontrado una aceptable correspondencia, tanto cualitativa como cuantitativa en algunos casos, entre los perfiles de PE y los SEVs realizados en sus proximidades, aun con las reservas debidas a la diferente escala y alcance de un método y otro.

7. CAMPAÑA 2006-2007 DE SEDT EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA

A lo largo del otoño de 2006 y a comienzos de 2007, se realizaron los 21 Sondeos electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT) correspondientes a la campaña de exploración del subsuelo en la laguna de Fuente de Piedra y la cuenca endorreica en que ésta se ubica, dentro de los trabajos de asistencia técnica contemplados en el Proyecto “Caracterización hidrogeológica y modelación numérica de un sistema de flujo con densidad variable. Sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga)”. Su posición se muestra en la figura 30 adjunta.

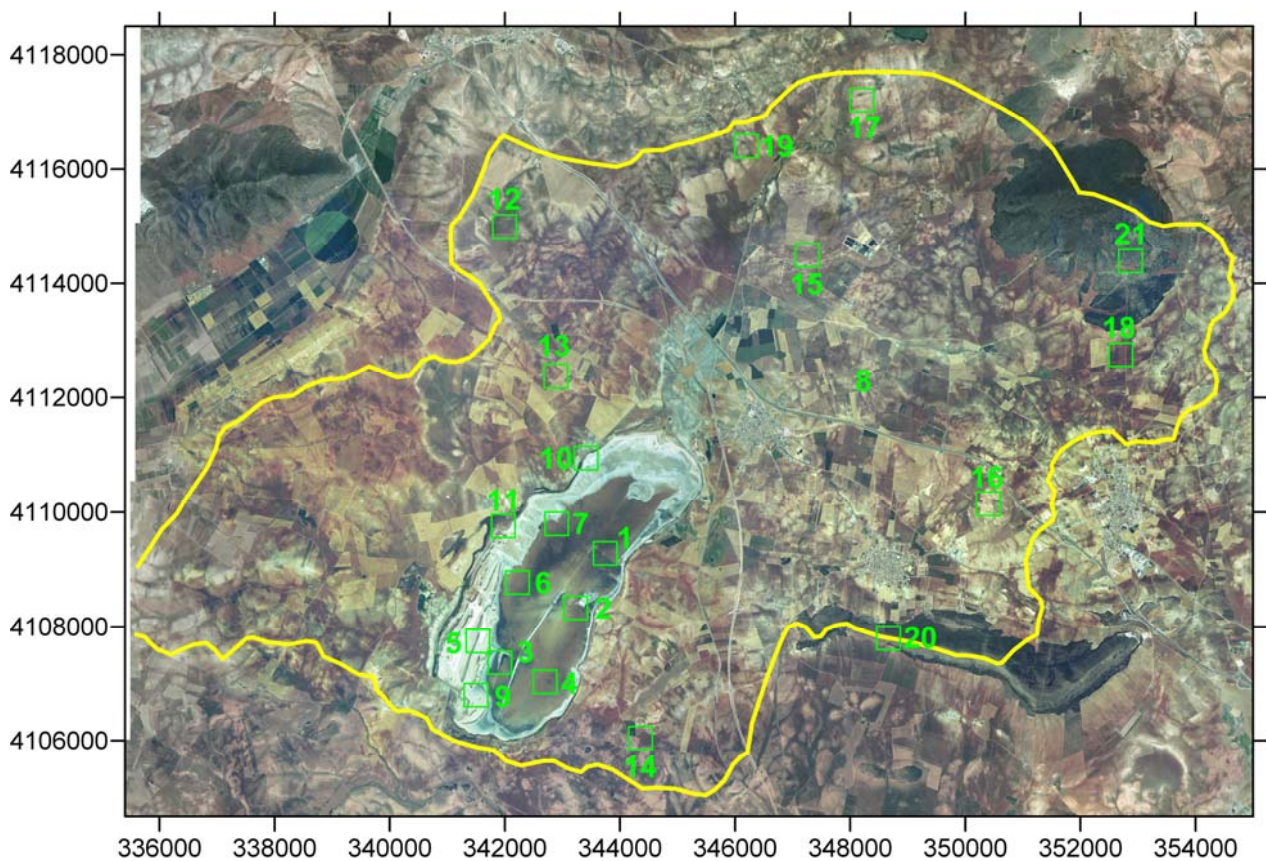


Figura 30: posición de 21 los puntos de Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT)

Los SEDTs han sido realizados, procesados e interpretados por la compañía de servicios “GEOGNOSIA, S.L.” utilizando el equipo receptor ZONGE GDP-32 de ZONGE ENGINEERING AND ORGANIZATION de Tucson (Arizona, Estados Unidos),

empleando diferentes sistemas transmisores dependientes del tamaño de bucle emisor seleccionado para cada sondeo. Como prueba, se realizaron algunos sondeos en la misma posición, utilizando diferentes tamaños de bucle, a fin de comprobar la diferente capacidad de penetración y/o apantallamiento de la señal emisora, ver tabla 4, especialmente en el interior del vaso de la laguna donde este efecto es mayor.

Un primer grupo de los SEDTs medidos, del 1 al 11, fueron realizados en el interior del vaso de la laguna de Fuente de Piedra, y un segundo grupo, del 12 al 21, fueron realizados fuera del vaso, a lo largo de la cuenca endorreica, con una distribución dispersa, pero con la intención de cubrir zonas hasta entonces no prospectadas con otros métodos. Dos de estos últimos fueron realizados en las sierras marginales de la cuenca, donde, dado el espesor de los niveles calizos superiores, se utilizaron bucles de 200m x 200m, a fin de alcanzar la profundidad suficiente para detectar los niveles infrayacentes a éstos. La posición en coordenadas UTM de todos los SEDTs realizados se indica en la tabla 4.

En el anexo 2 se incluye al completo el informe presentado por Geognosia (con excepción de las fotografías acompañantes), describiendo los trabajos realizados, así como las curvas de decaimiento generadas, los modelos 1D de resistividad respecto a la profundidad y las interpretaciones de todos los SEDTs medidos realizadas por Geognosia, S.L.

COORDENADAS DE SEDT 2006-07 FUENTE DE PIEDRA

	Tamaño bucle	Profundidad esperable	UTM X	UTM Y
Estación SEDT 1	50x50; 100x100	200-250	344345	4110500
Estación SEDT 2	100x100	200-250	343230	4108330
Estación SEDT 3	50x50; 100x100	200-250	341910	4107375
Estación SEDT 4	50x50; 100x100	200-250	342700	4107040
Estación SEDT 5	100x100	200-250	341530	4107750
Estación SEDT 6	50x50; 100x100	200-250	343745	4109285
Estación SEDT 7	100x100	200-250	342900	4109800
Estación SEDT 8	100x100	200-250	342220	4108775
Estación SEDT 9	100x100	200-250	341500	4106800
Estación SEDT 10	50x50	150	343390	4110945
Estación SEDT 10b	100x100	150	343410	4110945
Estación SEDT 11	100x100	150	342050	4109800
Estación SEDT 12	100x100	150	341995	4115000
Estación SEDT 13	100x100	150	342885	4112375
Estación SEDT 14	50x50	150	344355	4106045
Estación SEDT 15	100x100	150	347250	4114500
Estación SEDT 16	100x100	150	350400	4110150
Estación SEDT 17	50x50	150	348200	4117200
Estación SEDT 18	50x50	150	352700	4112750
Estación SEDT 19	50x50	150	346200	4116400
Estación SEDT 20	200x200	250	348665	4107805
Estación SEDT 21	200x200	250	352872	4114395

Tabla 4. Coordenadas y características de los SEDTs medidos.

7.1 Interpretación conjunta de los SEDTs realizados en el interior de la laguna

Los SEDTs realizados en el interior de la laguna muestran todos ellos un carácter fuertemente conductor en las primeras capas, lo que condiciona notablemente la penetración y la inversión de los mismos. Por tanto, muchos de ellos fueron realizados

doblemente, utilizando 2 tamaños distintos de bucle, 50mx 50m y 100mx100m. El tamaño menor es más resolutivo pero menos penetrativo y a la vez, resulta menos afectado por el ruido y por el “efecto apantallamiento” de un conductor superficial, en este caso, muy potente. Los bucles más grandes pueden estar afectados por este efecto, influyendo a la calidad de las medidas o distorsionando éstas (caso del fenómeno “static shift” que aquí podría estar presente en algunos casos). Por ello, a modo de control, se duplicaron las medidas en las estaciones 1, 3, 4, 6 y 10 con ambos tamaños de bucle.

El resultado aparente es que las medidas efectuadas con bucle mayor resultaron algo más penetrativas sin grandes distorsiones en los valores de resistividad así como en la apariencia de las curvas resultantes, salvo en los SEDTs que parecen detectar un segundo conductor profundo.

A la vista de las interpretaciones que se adjuntan en el informe correspondiente, Anexo 2, se puede concluir que en todos los SEDTs del interior de la laguna se observa la existencia en los primeros 50-60 m de profundidad (en promedio), de una capa o conjunto de capas altamente conductoras, con resistividades por debajo de 1 Ω .m. Solamente en los SEDT 10 y 11 se alcanza una mayor profundidad de estas capas, 75 a 100 m. Por debajo de esta capa(s) conductora se observa una capa más resistiva, en general entre 5 y 8 Ω .m, que constituye el substrato eléctrico en todos los SEDT.

El contacto entre ambos niveles (el conductor más somero de valores >1 ohm.m y el resistivo relativo más profundo, de valores >5 ohm.m) podría tener un carácter gradual, pero en todo caso puede detectarse en todos los SEDTs realizados en la laguna y su margen, de forma que puede establecerse una superficie de “contacto” aproximada a una profundidad media de entre 50 y 70 metros, con tendencia a ganar en profundidad hacia el lado oeste de la laguna, tal como se aprecia en el mapa de isobatas de este nivel de la figura 2, obtenido solo utilizando los datos de SEDTs. La figura 29 se ha obtenido con un bajo número de puntos de muestra, de forma que la superficie resultante aparenta ser de curvatura homogénea, aun cuando podría ser más irregular, tal y como se ha visto en el resto del trabajo. En todo caso, este contacto parece estar levemente basculado hacia el oeste hasta acercarse a los 100 m de profundidad, de forma congruente con el perfil 2 tomográfico, mientras en zonas del borde este podría estar sobre los 40 metros. Este contacto podría sugerirse, en hipótesis, como algún tipo de control litológico.

Únicamente, en los SEDTs 4 y 6, y por debajo de este nivel más resistivo (a unos 80-100m de profundidad), aparece una nueva capa conductora que llega a superar los 200m de profundidad, con un valor de 1 Ω .m. En hipótesis, quizá este segundo nivel conductor esté vinculado o conectado con salmueras profundas detectables en el perfil 1 de PE, y los pseudoperfiles 5 y 6 de SEVs realizados en la zona este de la laguna.

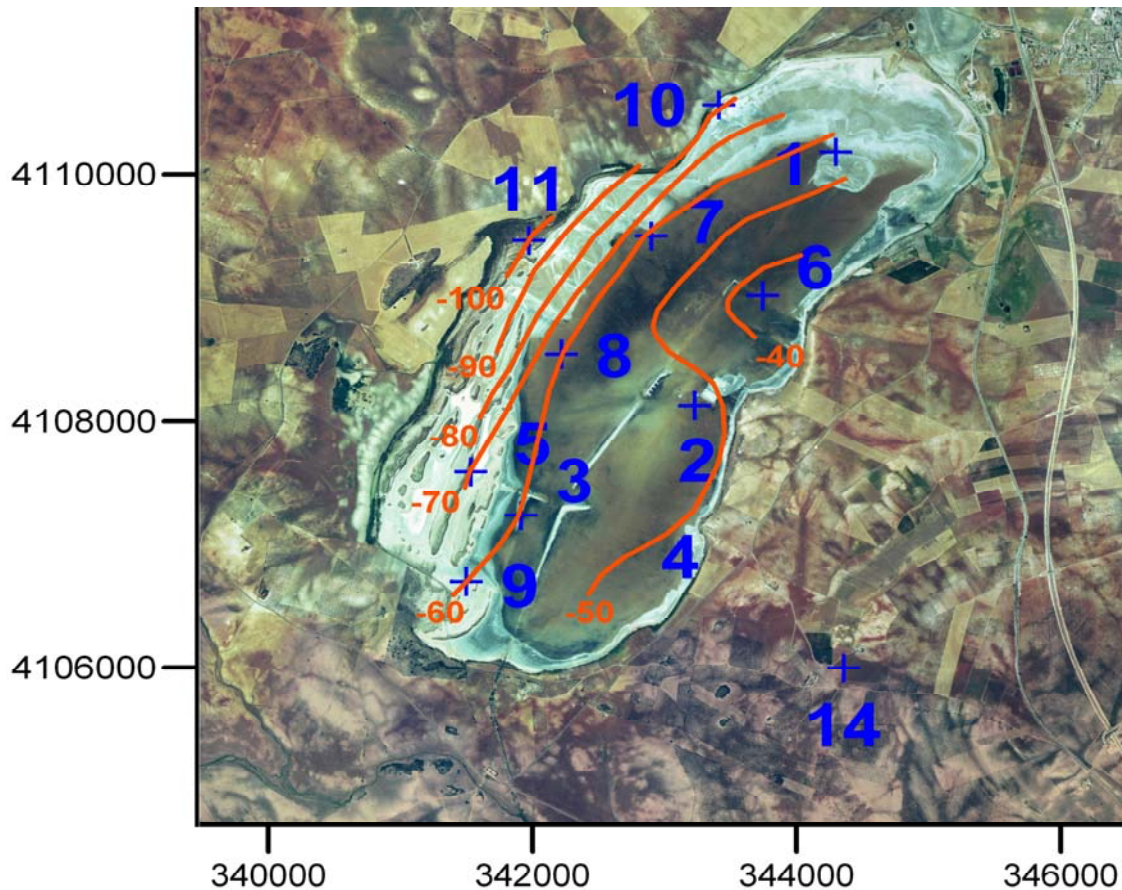
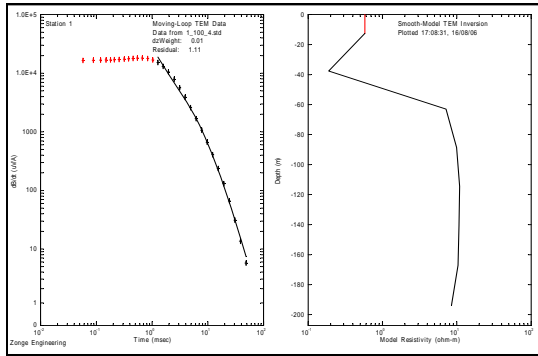


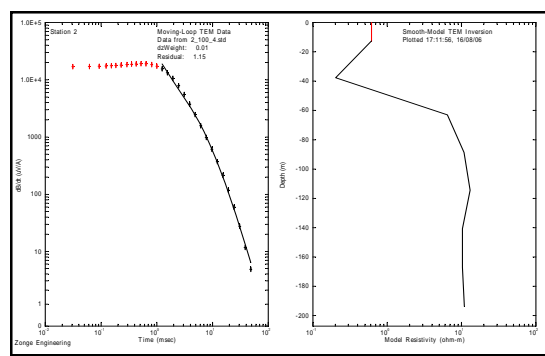
Figura 29: Isobatas (en metros) del contacto entre el cuerpo altamente conductor superficial (<1 ohm.m) y el resistivo relativo (>5 ohm.m) sobre el que descansa, respecto al nivel medio de la laguna de Fuente de Piedra. Estimación realizada exclusivamente a través de las profundidades individuales obtenidas en los SEDTs de las estaciones 1 a 11, medidas en el interior de la laguna, mediante contorneado por “kriging”. La superficie resultante, en apariencia continua, es el resultado de una interpolación con un bajo número de muestras, que obvia anomalías de tamaño menor al espaciado entre estaciones. Se ha omitido el segundo conductor, más profundo detectado en las estaciones 4 y 6 (zona este de la laguna).

A continuación, se adjuntan las curvas de decaimiento de la señal recibida junto a los correspondientes modelos de resistividad respecto a la profundidad (1D) resultantes de cada estación de los SEDTs realizados en la laguna y su orilla. Las curvas que se adjunen son las utilizadas para dibujar las isobatas de la figura 28 arriba expuesta.

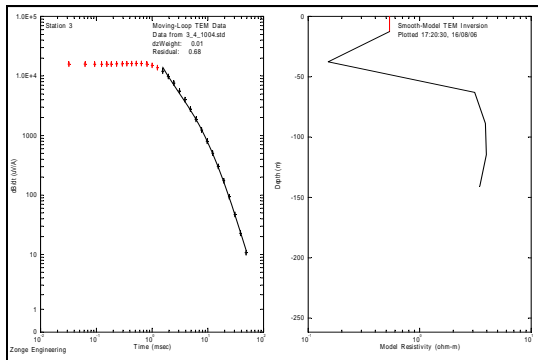
Estación 1



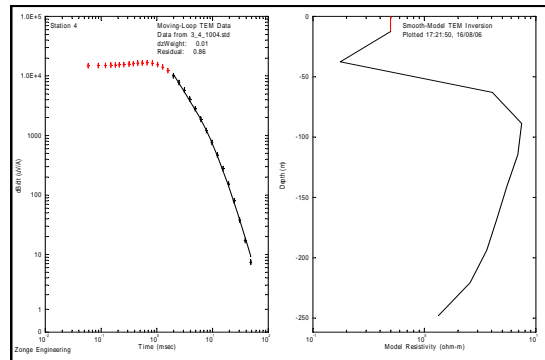
Estación 2



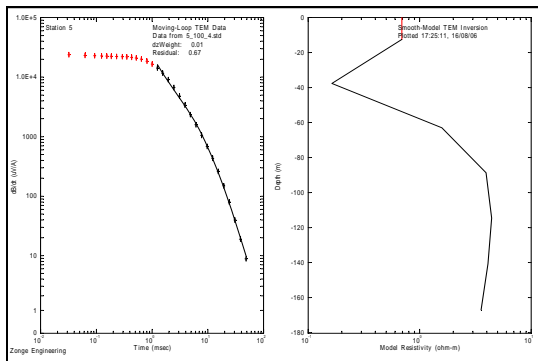
Estación 3



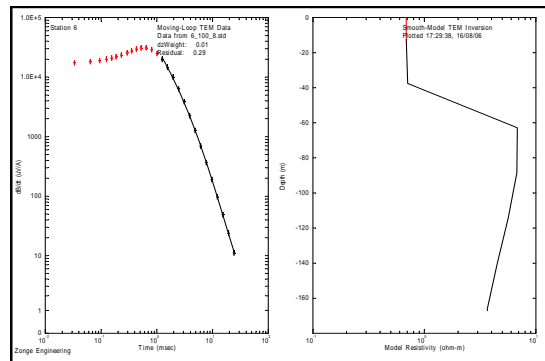
Estación 4



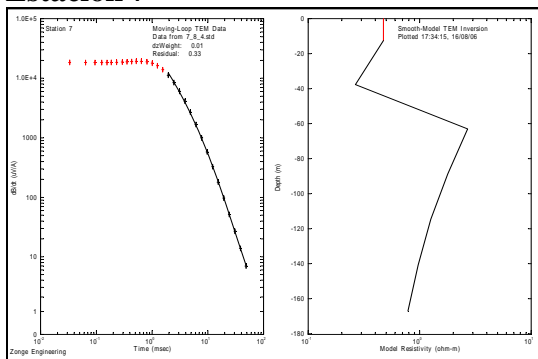
Estación 5



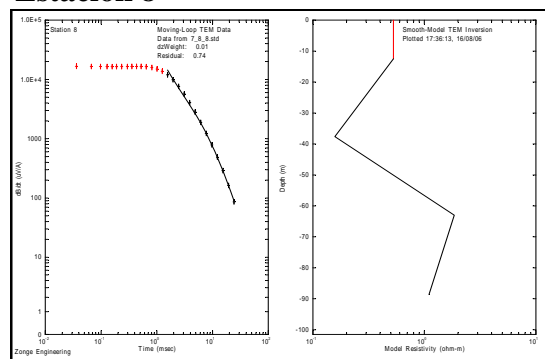
Estación 6



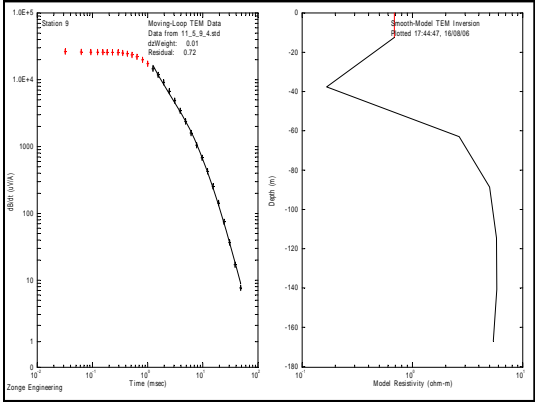
Estación 7



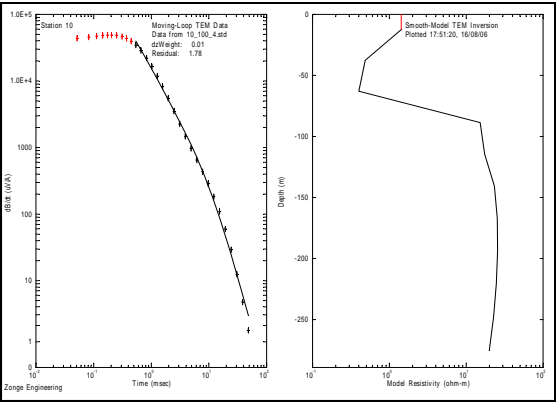
Estación 8



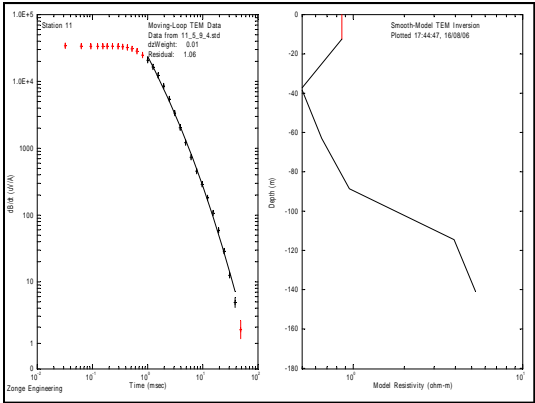
Estación 9



Estación 10



Estación 11

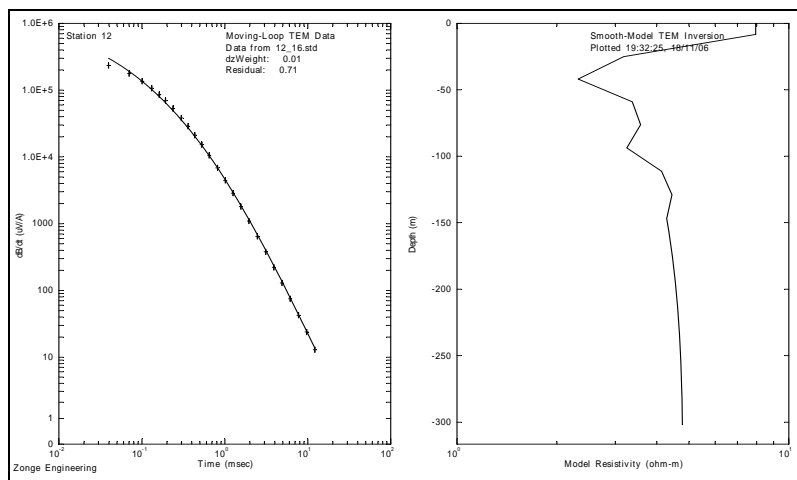


7.1 Interpretación de los SEDTs realizados en la cuenca endorreica

Los SEDTs realizados fuera de la laguna presentan las siguientes características:

SEDT 12

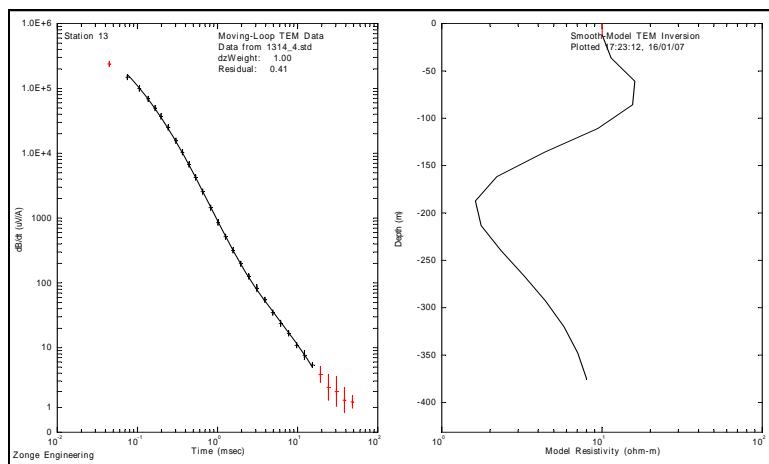
Terreno conductor en general con un mínimo de resistividad marcado a unos 50m de profundidad. Posible presencia de salmueras a esa profundidad y en menor concentración en todo el sondeo. Correlaciona con alguna proximidad con algunos mínimos conductores detectados en el perfil de resistividad “5-La Roda-Fuente de Piedra”, con los cuales tiene cierta semejanza.



Bucle:100X100m(16 Hz)

SEDT 13

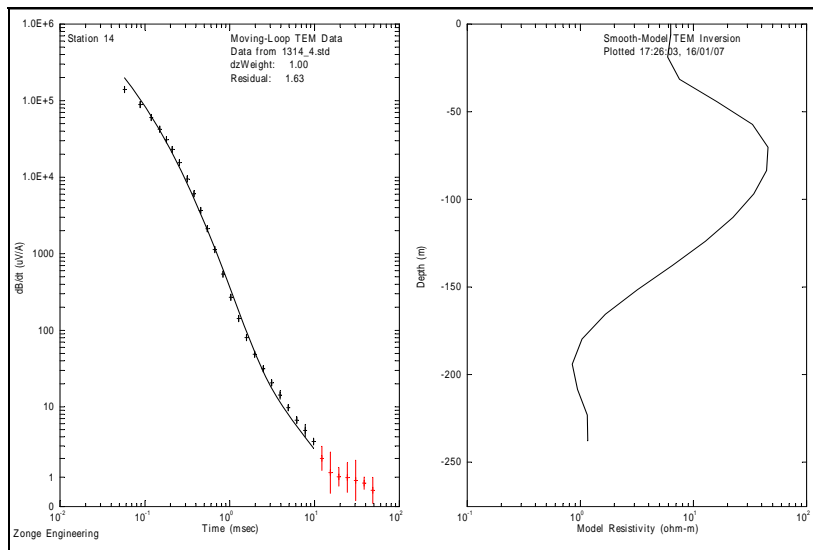
Presenta un nivel conductor importante en profundidad, entre 150 y 250 m., de cierta entidad (mínimo resistividad 1,5 ohm.m. Sondeo realizado en zona poco cubierta, tan sólo el SEV 60 paramétrico es relativamente próximo (>1km) pero éste con menor carácter conductor.



Bucle: 100X100m a 4Hz

SED T 14

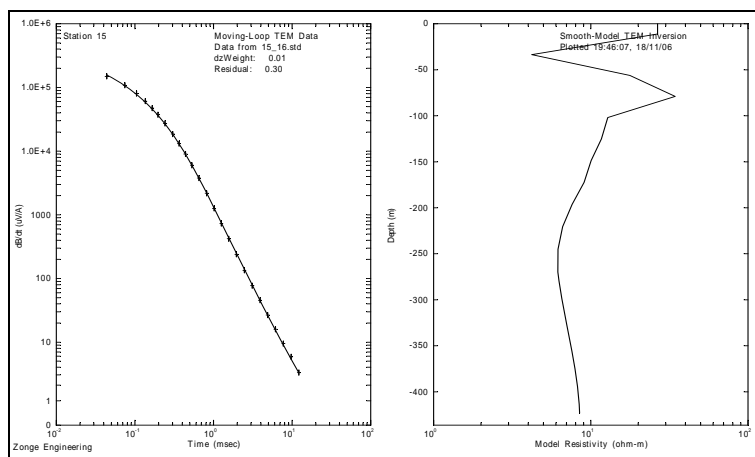
Presenta un fuerte y potente conductor profundo, de hasta 0.8 ohm.m, a más de 150m. El punto de sondeo es de posición intermedia entre la laguna de Fuente de Piedra y la subdepresión de El Navazo, con lo que ambos cuerpos podrían tener algún tipo de conexión profunda de salmueras, algo de lo que parecen existir más evidencias: niveles de salmueras profundas en el Perfil 1 de tomografía eléctrica (“Cortijo Los Piquetes a Cortijo La Plata” posición 4400m), o presencia de un elemento conductor en la relativamente próxima pseudosección de SEVs 26 a 31 (perfil P5 de SEVs).



Bucle: 50X50m a 4Hz

SED T 15

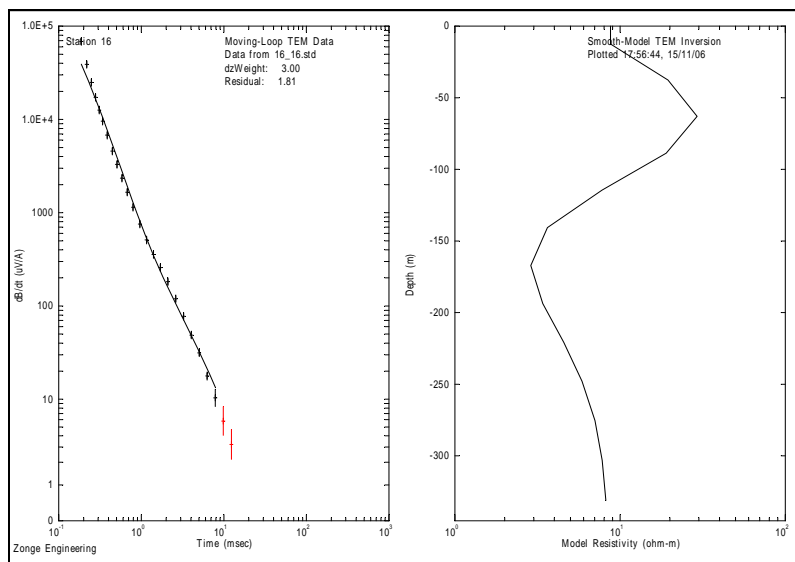
Sondeo relativamente próximo al Perfil 3-La Serafina en dirección a la laguna de Fuente de Piedra. Contiene un nivel superficial como conductor relativo (unos 3 ohm.m a 20-50m) y un nivel potente de baja resistividad relativa (6 ohm.m) en profundidad (por debajo de 150m), el cual podría suponer alguna conexión profunda, incluso flujo, entre las pequeñas lagunas del norte de la cuenca (Serafina, Ratosa) y la de Fuente de Piedra



Bucle: 100X100m a 16Hz

SED T 16

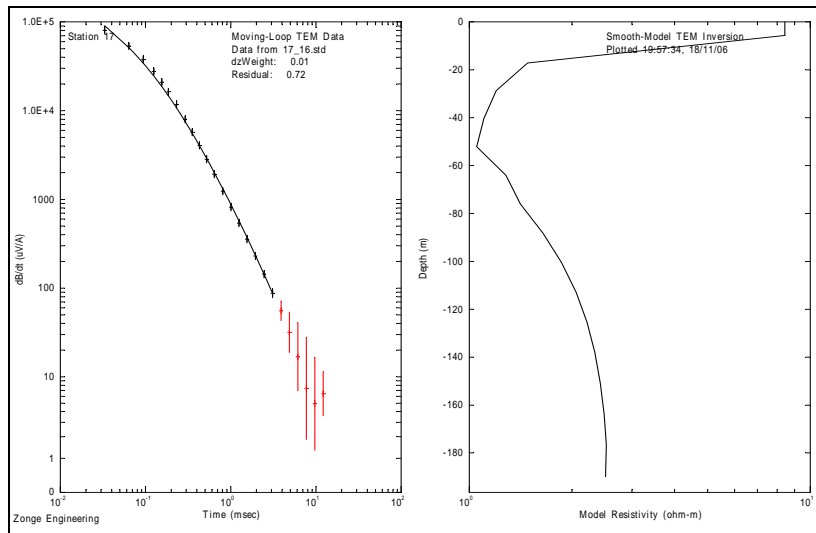
Sondeo en la zona este de la cuenca, ubicado al sureste del perfil 4. Presenta un elevado carácter resistivo en relación a los niveles promedios de resistividad para la cuenca, lo que parece descartar la presencia de salmueras salvo en profundidad: se aprecia un potente bloque conductor profundo (120 a 160 m), con bajas resistividades relativas (1,5 a 2 ohm.). Es decir, es un perfil que presenta un fuerte contraste de resistividades, con algunos niveles conductores fuertemente encajados entre elevados resistivos, de forma análoga a los resultados obtenidos en la línea de resistividad “Perfil 4-Santillán”, del que está próximo. (a modo de continuación de éste por el borde SE). Por analogía con este perfil, parece que los elementos más resistivos se corresponderían con materiales miocenos menos conductores, bajo los cuales se podrían encontrar pequeños embolsamientos inconexos de salmueras.



Bucle 100X100m a 16Hz

SED T 17

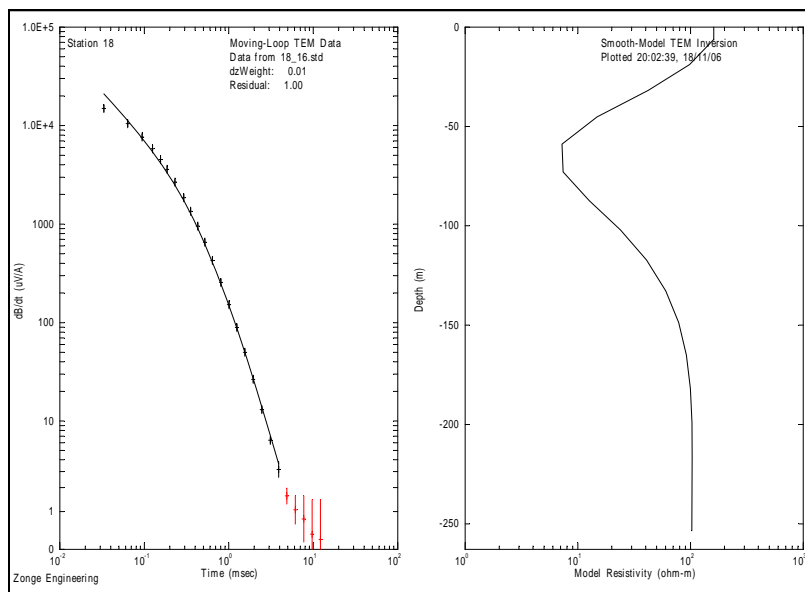
Sondeo próximo al borde norte de la cuenca endorreica, algo al suroeste de la laguna-depresión de La Ratosa (pequeña laguna salada situada fuera de la cuenca endorreica) y al norte de la laguna de la Serafina. Presenta un fortísimo cuerpo conductor (valores de salmueras de hasta 0,65 ohm.m) con bastante continuidad en profundidad. Todavía presenta valores de 2 ohm.m a más de 200 m de profundidad, por lo que aparentemente se trata de un gran cuerpo de salmueras asociado a la laguna de la Ratosa, y posiblemente podría suponer algún tipo de conexión, dada su situación intermedia entre ambas lagunas.



Bucle 50X50m a 16Hz

SED18

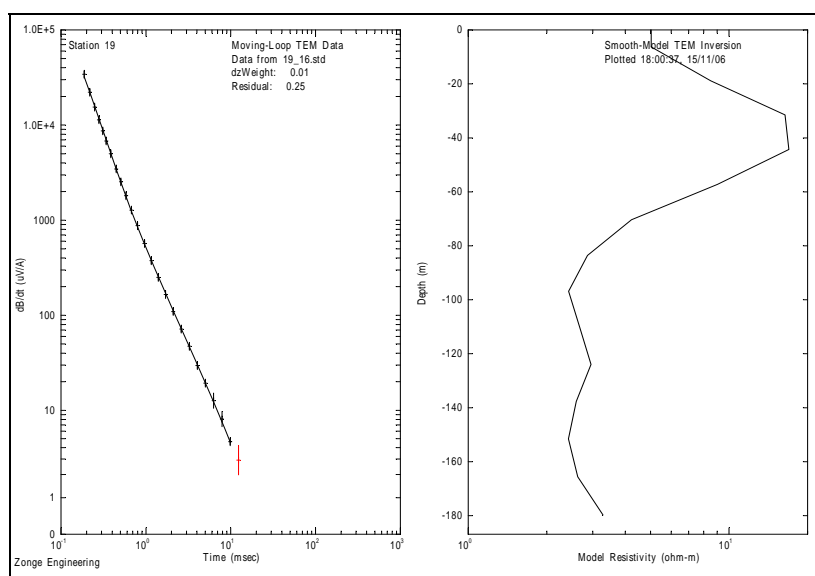
Sondeo situado en el extremo oriental de la cuenca, al sur de la sierra de Humilladero. Se trata de un sondeo fuertemente resistivo (en relación a los valores generales obtenidos en el resto de la cuenca), con hasta 100 ohm.m, aunque presenta algún elemento levemente conductor a profundidad media (7-10 ohm.m a 50-90 m), que podría atender a algún tipo de acumulación o circulación de agua, dentro del entorno fuertemente resistivo de ese sondeo o sencillamente, tratarse de algún nivel de arcillas o materiales miocenos por debajo de niveles calizos (resistivos). Dados los valores obtenidos, por tanto, se supondría una nula, o al menos, escasa presencia de salmueras.



Bucle 50X50m a 16Hz

SED19

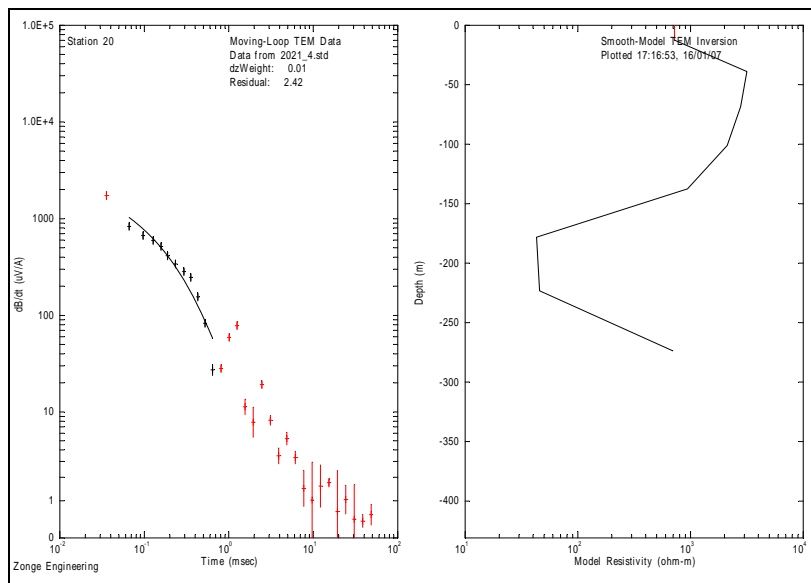
Sondeo ligeramente al este de la depresión-laguna de El Navazo. Presenta un potente cuerpo conductor relativo (valores 2,5-3 ohm.m) a cierta profundidad, entre los 60m, sobrepasando los 200m. Este cuerpo conductor profundo podría tener alguna correspondencia con los cuerpos conductores más superficiales pero que van aumentando en profundidad hacia el sur y el este, según se aprecia en las pseudosecciones de 5, 6 y 7 de SEVs, así como en el perfil 1 (Laguna borde sureste) y en el SEDT 14.



Bucle 50X50m a 16Hz

SED20

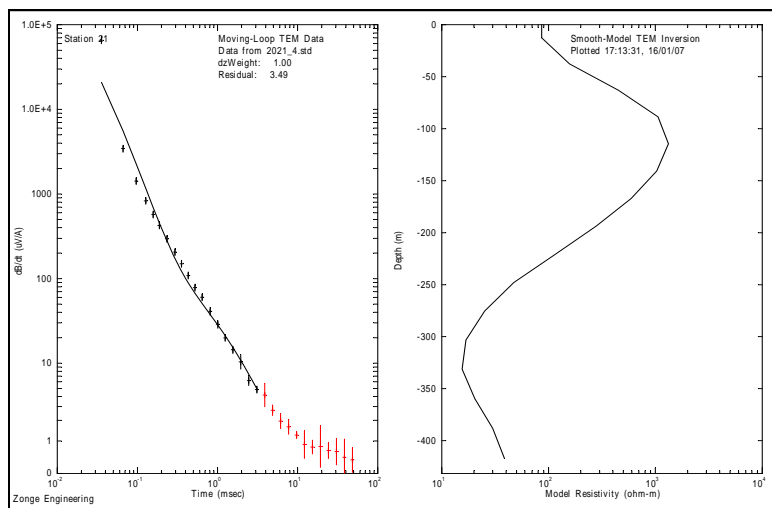
Como corresponde a los SEDTs planteados en las sierras calizas de borde de la cuenca, éste sobre la cumbre de la sierra del Humilladero, se trata de sondeos muy resistivos, pues han sido realizados sobre potentes paquetes de calizas miocenas karstificadas y secas. Los valores con alguna menor resistividad pueden deberse a niveles de arcillas o cuerpos conductores que se emplacen en su base, en este caso, se podría suponer un espesor de calizas de más de 150m a la altura de este SEDT, el cual fue realizado a unos 580-590 m.s.n.m. Por debajo podría haber un nivel más conductor (30-50 ohm.m), probablemente materiales miocenos, eventualmente y aún por debajo de los 250m, se pasaría a basamentos más resistivos de nuevo. No es probable que existan salmueras bajo esta sierra, pues éstas alcanzan valores muy inferiores a los obtenidos.



Bucle: 200X200 a 4Hz

SEDT 21

De forma similar, este sondeo fue realizado en la ladera sur de la sierra caliza de Mollina y a una altura de unos 580m s.n.m. Es fuertemente resistivo (hasta 1200 ohm.m) debido a la presencia de calizas karstificadas y secas; presenta un leve conductor, menos resistivo (hasta 15 ohm.m), que podría corresponderse con materiales más conductores de la base de las calizas, a una profundidad de unos 250 m (unos 330 m.s.n.m.); posiblemente se trate de arcillas, conglomerados y materiales miocenos pues la cota sería similar a la de estos tramos en el resto de la cuenca. Eventualmente, podría tratarse de algún tramo calizo con presencia de agua, por tanto en el nivel de base del macizo calizo. No parece que existan salmueras, pues éstas suelen alcanzar valores de resistividad por debajo del valor registrado.



Bucle: 200X200 a 4Hz

8. TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA

8.1 Testificación de conductividad en pozos entre 2005 y 2007

A lo largo de los años, se han realizado numerosos sondeos mecánicos con carácter de investigación en la cuenca endorreica, e incluso se han empleado con este propósito otros pozos perforados para riego agrícola. Dentro de este proyecto se han perforado varios sondeos y se ha realizado testificación geofísica además de geológica y otros análisis (hidroquímica, etc) en todos ellos. Además se han reutilizado algunos sondeos de investigación anteriores así como algunos pozos de regadío (muchos de ellos presentan una salinidad elevada que los hace inservibles para uso agrícola) para realizar nuevas testificaciones geofísicas con los parámetros conductividad y temperatura, principalmente.

Inicialmente, en 2005, se realizaron registros de conductividad en algunos pozos ya existentes (UGr1, UGr2, UGr 3, UGr El Charcón, UGr La Herriza, UGr La Vicaría, IGME La Albina, Blancares), de forma que el registro geológico de los pozos es de calidad variable o inexistente (sondeo Blancares). Algunos sondeos son de escasa profundidad, y en todo caso están emplazados en la zona norte de la laguna, algunos muy próximos entre sí. Ello motivó que la primera campaña de perfilaje eléctrico se realizara en esa zona, a fin de parametrizar los resultados. Los logs de conductividad-temperatura se encuentran resumidos en las tablas del Anexo 5, junto a un breve resumen de las columnas geológicas (cuando están disponibles).

En 2006, ya dentro del proyecto actual, se perforaron nuevos pozos de investigación en otras zonas de interés dentro de la cuenca y aun fuera de ella. Todos ellos fueron testificados por la compañía CGS: Arenales, Vistahermosa-Blancares, Cantarranas, La Plata, Santillán, La Serafina, Los Piquetes y LaRatosa (estos 2 últimos fuera de la cuenca), siguiendo un programa de monitorización: los primeros registros se efectuaron al poco de perforar el pozo; los segundos unos 3-4 meses después, una vez que los pozos quedaban estabilizados y en ocasiones se realizó una tercera testificación al cabo de un año. Todos los logs de conductividad corregida de 2006-2007, se muestran en el anexo 4, junto a la testificación geológica.

8.2 Interpretación de los SEDTs realizados en la cuenca endorreica

La testificación geofísica, especialmente de conductividad eléctrica, se ha revelado de gran importancia, pues ha servido para calibrar las resistividades del terreno y determinar con cierta aproximación las correspondencias entre los rangos de variación de resistividades, conductividades, salinidad y geología.

En lo referente a resistividad y conductividad, ha de indicarse que aun tratándose de magnitudes que miden la misma propiedad física (una inversa de la otra), usualmente son empleadas para referirse a fenómenos y entornos distintos. La resistividad es referida al promedio obtenido en el terreno incluyendo el contenido en agua que esté presente, asignándose la resistividad de un cierto recinto a un punto de atribución. La conductividad obtenida en testificación es la referida al fluido presente en el sondeo, medido de forma puntual por la sonda de conductividad (corregida por la temperatura). La correlación entre ambas magnitudes no es fácil de fijar y tan solo es indicada con carácter aproximado y orientativo. Para ello hay que observar los perfiles de resistividad obtenidos que han pasado sobre pozos testificados. En la campaña inicial de 2005, los perfiles Laguna 1, Laguna 2 y Laguna 3 pasaron junto a varios pozos de investigación con registro de conductividad (UGr1 y UGr3; Blancares y UGr2 respectivamente), el cual ha sido dibujado sobre los perfiles en las figuras 9, 10 y 11.

Según estas figuras, puede apreciarse que los logs de conductividad en pozos estabilizados son de conductividad creciente con la profundidad, independientemente de su valor, lo que parece significar que todos los pozos tienen un cierto contenido (mayor o menor) en sal de modo que la salmuera tiende a decantarse en profundidad por diferencia de densidad. Paralelamente, el techo de los mínimos de resistividad observados en los perfiles eléctricos se corresponden bien con los incrementos de conductividad del fluido del sondeo. Ello implica un aumento de la conductividad-salinidad del fluido en paralelo con la disminución de la resistividad del terreno en profundidad, lo que proporciona una clave para la correlación. En la zona profunda de los sondeos sin embargo, nada se puede decir dado el efecto de gravedad de las salmueras. Extrapolando estos efectos, se puede concluir que los valores más bajos en resistividad medidos en la cuenca se corresponden con acumulaciones de agua salada o salmueras con notable grado de concentración. Este dato es crucial para la

interpretación de todos los perfiles y medidas geofísicas realizadas. La existencia de acuíferos salinos, embolsamientos de salmueras o karstificaciones está deducida a partir de esta interpretación, la cual ha sido ratificada en sondeos de investigación perforados con posterioridad (Heredia et al., 2005). Este efecto potencia a su vez a las herramientas geofísicas de resistividad para la investigación hidrogeológica en la cuenca.

En la tabla 5 se establece la relación cualitativa entre los diferentes grados de salinidad su concentración expresada en Total de sólidos disueltos (TDS) y la conductividad eléctrica estándar. Resulta de interés pues asocia la calidad de las aguas (aguas dulces y aptas para riego) y los rangos de conductividad correspondientes. A partir de esta tabla podemos concluir que casi todos los sondeos relacionados en el presente trabajo presentan agua no aptas el consumo o el riego (éstas podrían llegar a un máximo de 2000 ppm o hasta 3 mS/cm) y en muchos casos se trata de salmueras muy concentradas, con mayor contenido en sales que las aguas marinas.

TIPOS DE AGUA	SALINIDAD (PPM DE TDS ó 1000 PPM = 1 gr/l)	Conductividad en mS/cm (corregida a 25°C)
Pura	0.3	
Desionizada	3	
Dulce (potable)	< 1.000	<1,5
Salobre	1.000-10.000	1,5-17,0
Salina	10.000-30.000	17,0-46,3
Marina	30.000-50.000	46,3-

Tabla 5. Rangos de salinidad de los diferentes tipos de agua. Fuente: Fariñas (1999); Medina (2000), en relación a la conductividad

De la inspección de los perfiles eléctricos correlacionados con registros de conductividad de pozos intersectados pertenecientes a ambas campañas (ver capítulo 5), puede decirse con carácter general y a “grosso modo”, que valores por encima de 100 mS/cm se corresponden con valores de resistividad del terreno por debajo de 2 ohm.m. Este punto puede representar un criterio de corte acerca de la presencia de salmueras muy concentradas, respecto a terrenos con salmueras menos concentradas o aguas salobres/dulces. Ha de notarse que un valor por encima de 100 mS/cm supone una concentración TDS superior a la de cualquier agua marina.

9. RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS GEOFÍSICAS

A raíz de las interpretaciones de las diferentes campañas geofísicas llevadas a cabo en diferentes épocas, y empleando diferentes metodologías, en la Laguna de Fuente de Piedra y su cuenca asociada, se puede señalar lo siguiente:

El cuerpo de salmuera asociado a la laguna tiene una extensión mayor que el tamaño actual del vaso de la misma, especialmente al norte, oeste y sureste de la laguna.

Bajo el vaso de la laguna se observa un gran nivel conductor, que es asimilable a un nivel saturado de salmueras. Es un horizonte de muy baja resistividad (inferior a 2 ohm.m), limitado por debajo, por un nivel de mayor resistividad relativa (por encima de 6 ohm.m), que parece actuar como un control litológico y que se presenta a profundidad variable, en el entorno de los 60-100 m por debajo de la laguna, aunque en algunos casos es superior. Se aprecia un leve basculamiento de este horizonte, hacia el lado oeste de la laguna. Este nivel presenta un resalte de resistividad coincidente con el límite del vaso de la laguna actual, lo que pudiera responder a algún tipo de colapso de los materiales karstificados sobre los que se asienta la laguna. Este efecto se aprecia sobre todo en el contorno norte de la laguna.

La extensión del cuerpo conductor trasciende los límites actuales de la laguna. En general, el conductor se va adelgazando y profundizando conforme aumenta la distancia a la laguna a modo de cuña. Este hecho se aprecia en mayor o menor medida, prácticamente en todo el perímetro de la laguna con excepción del lado sur, el cual parece presentar un claro control geológico que limita la extensión de las salmueras en esa dirección. La cuña de salmueras presenta un control litológico de base, de forma similar a la laguna, pero más somera (la profundidad del resistivo de base bajo la laguna es cercana a los 100 m y pasa a unos 50-60m a partir del borde de la misma hacia el norte). La extensión del cuerpo de salmueras asociado a la laguna es mayor y más continua en las zonas norte y este de la misma.

En el conjunto de la cuenca se detectan innumerables cuerpos conductores, con diversa extensión, atribuibles a la presencia de salmueras, de mayor o menor concentración. Estos cuerpos están repartidos de forma irregular en toda la cuenca e incluso fuera de

ella, , tienen continuidad diversa, aunque su presencia es mayor en unas zonas u otras, lo que denota que algunas zonas son más secas y otras contienen potentes y abundantes conductores. Estos cuerpos son de morfología más o menos lenticular, y suelen estar ubicados a profundidades medias (de 50 a 100m), a modo de un confinamiento finito que parece implicar un escaso movimiento de las salmueras. Suelen tener una base a modo de control geológico, con profundidades variables.

Lejos de la laguna, los horizontes son en general de carácter más resistivo, pero asimismo aparecen de forma discontinua, separados por otros niveles más conductores., los cuales estarían ocupados por salmueras.

La presencia de salmueras en la zona norte de la laguna, podría tener alguna conexión estructural con las pequeñas lagunas de La Serafina y La Ratosa (ésta, fuera de la cuenca endorreica), situadas más al norte y ligadas al Arroyo de La Serafina, el cual desemboca en la laguna de Fuente de Piedra. Ligado a este arroyo parece existir mayor abundancia de salmueras. Incluso en el borde norte de la cuenca, cerca de la laguna de la Ratosa y a gran distancia de la de Fuente de Piedra, se ha detectado un potente conductor de gran continuidad en profundidad.

En la zona este de la laguna, el nivel de salmueras trasciende con mucho los límites de ésta y a cierta distancia de la misma, va ganando en profundidad, hasta alcanzar la zona de la subdepresión de El Navazo, e incluso podría superar los límites de la cuenca endorreica.

En las zonas oeste y noroeste los cuerpos de salmueras son relativamente abundantes, pero aparentemente parecen aislados entre si, formando acumulaciones inconexas o cuerpos lenticulares de salmueras con diferente contenido en sales.

Algunos cuerpos conductores tienen extensiones mayores en profundidad con respecto al sugerido nivel de control. Se trata de cuerpos con morfologías más verticales, en forma de globos de salmueras de gran continuidad en profundidad pero límite no determinado; esto sugiere la existencia de salmueras de posición y origen más profundo, en posición no detectada con las metodologías empleadas. Se sugiere la posibilidad de fenómenos convectivos en los niveles de salmueras, creando ciertas zonas de

circulaciones profundas preferentes, pero ningún método geofísico empleado lo puede asegurar, pues no se alcanza profundidad de investigación suficiente, además de que los aludios conductos verticales son un número relativamente discreto y ocupan espacios relativamente pequeños para ser detectados con claridad.

La zona este presenta mayores resistividades en promedio y hay menor presencia de embolsamientos de salmueras, aunque pueden aparecer algunas acumulaciones aparentemente más aisladas, posiblemente ligadas a algunas estructuras.

La dos sierras calizas (Mollina y Humilladero) que se sitúan en el interior de la cuenca endorreica, están formadas por materiales calizos karstificados, secos y fuertemente resistivos. Son de origen alóctono y parecen ubicarse directamente sobre materiales miocenos y triásicos, de forma que bajo las calizas se encuentran de nuevo los materiales habituales al resto de la cuenca, pero con escasa probabilidad de presencia de salmueras, pues no se han detectado resistividades muy bajas (rango 15-40 $\Omega.m$).

Los patrones detectados en la distribución de salmueras parecen responder a 2 modelos: uno constituido por un gran acuífero asociado a la laguna cuyos límites trascienden los de ésta hasta acuñarse a cierta distancia, la cual depende de la existencia de controles geológicos. El segundo modelo responde a una serie de acumulaciones de salmueras por toda la cuenca con diverso grado de aislamiento, continuidad y conectividad entre si, lo que denota un aparente escaso flujo entre ellas. En ambos casos, parecen existir eventuales conexiones de salmueras con niveles más profundos, que pudieran implicar flujos verticales entre unos y otros, o un origen más profundo de las salmueras.

Estos modelos hidrogeológicos han sido sugeridos a partir de los datos geofísicos y parecen corresponderse bien con las observaciones y teorías morfogenéticas para la cuenca

P. Ibarra, F.M. Rubio, abril 2009

REFERENCIAS

Vera, J.A. (2004): “Cordillera Bética” in: Vera, J.M. (Ed). *Geología de España*, IGME, Sociedad Geológica de España, Madrid, pp. 345-464.

García Cortés, A., Mansilla, H., Quintero, I., (1991): “Puesta de manifiesto de la Unidad Olistostrómica del Mioceno medio en el sector oriental de las Cordilleras Béticas (provincias de Jaén, Almería, Murcia y Alicante)”. *Bl. Geol. Min.*, 102, pp. 524-535.

Pérez López, A. y Sanz de Galdeano, C. (1994): “Tectónica de los materiales triásicos en el sector central de la Zona Subbética (Cordillera Bética). *Rev. Soc. Geol. España*. 7, pp 141-153.

Loke, M.H. Software comercial para inversión e interpretación de perfiles de tomografía eléctrica “Res2DInv V3.5” (2004) de la firma *Geotomo Software (Malaysia)*.

Stoyer, C, Interpex Ltd. “IX1D V3.23” (2002-06): software comercial para la interpretación de sondeos eléctricos verticales, de la firma *Interpex Limited (Golden, Colorado, EEUU)*

ANEXO 1 Relación de Ficheros Generados

ARCHIVOS INCLUIDOS EN EL CD DE ACOMPAÑAMIENTO AL INFORME

Todos los ficheros aquí descritos se encuentran recogidos en el CD que se adjunta con el informe.

CARPETA TEXTO:

“Informe Geofísica Fuente de Piedra.doc”: Documento word con el texto de este informe.

“Titulo.doc”: Fichero word con el título del informe

“Ficheros FuentedePiedra.doc”: archivo con la relación de ficheros generados.

CARPETA TABLAS:

En esta carpeta se incluyen algunas de las tablas del informe

Asimismo se incluye la tabla de posición de todos los puntos de sondeos y posición de perfiles realizados en el ámbito del proyecto:

“Posicion puntos medida Fuente de Piedra.xls”

CARPETA SEV:

Contiene todos los ficheros dato de los SEV y de la interpretación de los mismos por el programa IX1D:

P*.dat: Ficheros ASCII con los datos de campo del SEV p*

P*.ixr: Fichero binario con los datos sin empalmes y la interpretación del SEV p* (*=1 a 3)

CARPETAS PERFILES RESISTIVIDAD (PE):

Contienen los ficheros de datos de campo y las interpretaciones de los perfiles PE mediante el programa Res2dinv.

Los tipos de ficheros que se encuentran en estas carpetas poseen las siguientes extensiones:

“*.log” y “*.s4k” ficheros de datos de campo generados en el equipo ABEM

“*.dat” fichero ASCII con los datos de campo transformados al formato para el programa Res2dinv

“ *.amp” fichero ASCII con todos los datos de campo y en formato propio de ABEM

“*.inv”, “*.rho”, “*.rms”, “*.inf”, “*.GLF”, “*.ref”, “*.RLF” ficheros generados por el programa res2dinv, donde se almacenan los datos de la inversión (.inv) y los ficheros necesarios para representar los perfiles con el programa Erigraph v2.2 (.rho).

SUBCARPETA LAGUNA 1:

“laguna1”: fichero datos del perfil medido.

“LAGUNA1reverse”: fichero datos del perfil medido invertido

“Irlag01.2005.06.22.20.01.25.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“Irlag01.2005.06.22.20.02.07.amp”: fichero datos de campo del perfil medido.

“Irlag01.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo.

“Laguna1.jpg”: imagen del perfil de resistividad a escala casi real.

“Laguna1 correlacionado.jpg”: imagen del perfil de resistividad correlacionado con registros de conductividad en sondeos mecánicos y SEVs.

“Laguna1 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA LAGUNA 2:

“laguna250”: fichero datos del perfil medido

“laguna250eliminados”: fichero datos del perfil medido con puntos ruidosos eliminados.

“Irlag02.2005.06.28.17.19.13.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“Irlag02.2005.06.28.17.19.34.amp”: fichero datos de campo del perfil medido.

“Irlag02.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo.

“Laguna2.jpg”: imagen del perfil de resistividad a escala casi real.

“Laguna2 correlacionado.jpg”: imagen del perfil de resistividad correlacionado con registros de conductividad en sondeos mecánicos y SEVs.

“Laguna2 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA LAGUNA 3:

“laguna3cortado reverse con topografia”: fichero datos del perfil medido cortado los últimos 300m, invertido y añadido la topografía.

“Irlag14.2005.06.30.00.50.52.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“Irlag14.2005.06.30.00.50.41.amp”: fichero datos de campo del perfil medido.

“Irlag14.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo.

“Laguna3.jpg”: imagen del perfil de resistividad a escala casi real.

“Laguna3 correlacionado.jpg”: imagen del perfil de resistividad correlacionado con registros de conductividad en sondeos mecánicos.

“Laguna3 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

“Laguna3 interpr correl.jpg”: imagen del perfil de resistividad conjuntamente interpretado y correlacionado con un sondeo mecánico.

SUBCARPETA LAGUNA 4 :

“laguna4 eliminado con topografia”: fichero datos del perfil medido con puntos ruidosos eliminados y añadido la topografía.

“Irlag05.2005.06.30.17.15.43.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“lrlag05.2005.06.30.17.15.35.amp”: fichero datos de campo del perfil medido.
“lrlag05.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo.
“Laguna4.jpg”: imagen del perfil de resistividad a escala casi real.
“Laguna4 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA PERFIL1CORTO:

“lagunaperfil12006topo”: fichero datos del perfil medido y añadido la topografía.
“lrfec01.2006.09.27.21.04.40.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.
“lrfec01.2006.09.27.21.05.15.amp”: fichero datos de campo del perfil medido.
“lrfec01.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo.
“Perfil 1 (espaciado corto) topo marcador.jpg”: imagen del Perfil 1 de resistividad 1 con topografía y marcador de sondeo mecánico próximo.

SUBCARPETA PERFIL1LARGO:

“perfil106piqueteslaplatacompllimptopo”: fichero datos del perfil medido con puntos ruidosos eliminados y añadido la topografía.
“lrep001.2006.09.27.19.46.44.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.
“lrep001.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo
“Perfil 1 topo.jpg”: imagen del perfil de resistividad a escala vertical por 4.
“Perfil 1 correlacionado.jpg”: imagen del perfil de resistividad correlacionado con registros de conductividad en sondeos mecánicos y SEV.
“Perfil 1 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA PERFIL2CORTO:

“perfil2limp2oprocestopo”: fichero datos del perfil medido y añadido la topografía.
“lrfpc02.2006.09.28.18.59.40.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.
“lrfpc22.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo
“Perfil 2 (espaciado corto) topo.jpg”: imagen del Perfil 1 de resistividad 1 con topografía y marcador de sondeo mecánico próximo.

SUBCARPETA PERFIL2LARGO:

“perfil2compltopo2oproces”: fichero datos del perfil medido y añadido la topografía.
“lrfp002.2006.09.21.21.14.19.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.
“lrfp002.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo

“Perfil 2 topo.jpg”: imagen del perfil de resistividad.

“Perfil 2 correlacionado.jpg”: imagen del perfil de resistividad correlacionado con registros de conductividad en sondeos mecánicos, SEV y SEDT.

“Perfil 2 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA PERFIL3:

“perfil3laserafinalimp2topo”: fichero datos del perfil medido y añadido la topografía.

“lrfp003.2006.11.02.10.50.25.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“lrfp003.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo

“Perfil 3 correlacionado.jpg”: imagen del perfil de resistividad correlacionado con registro de conductividad en sondeo mecánico.

“Perfil 3 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA PERFIL4:

“perfil4santillán2oprocestopo”: fichero datos del perfil medido y añadido la topografía.

“lrfp004.2006.10.25.19.54.41.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“lrfp004.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo

“Perfil 4 topo escala real.jpg”: imagen del perfil de resistividad a escala vertical 1:1.

“Perfil 4 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA PERFIL5:

“perfil5laroda2oprocestopo”: fichero datos del perfil medido y añadido la topografía.

“lrfp005.2006.10.25.20.20.37.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“lrfp005.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo

“Perfil 5 topo.jpg”: imagen del perfil de resistividad.

“Perfil 5 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

SUBCARPETA PERFIL7:

“perfil7laherrizaoste2oprocestopo”: fichero datos del perfil medido y añadido la topografía.

“lrfp007.2006.11.02.10.57.32.dat”: fichero datos de campo del perfil medido.

“lrfp007.s4k”: fichero de datos de salida procedentes del equipo ABEM SAS4000 en campo

“Perfil 7 topo.jpg”: imagen del perfil de resistividad.

“Perfil 7 correlacionado.jpg”: imagen del perfil de resistividad correlacionado con registro de conductividad en sondeo mecánico y SEVs.

“Perfil 7 interpretado.jpg”: imagen del perfil de resistividad interpretado.

CARPETA PERFILES DE SEVs (PSEUDOPERFILES ELÉCTRICOS):

Se incluyen aquí los perfiles de SEVs realizados con el programa Geoscan y exportados como archivos de extensión .jpg

“P2 SEV 1-9”

“P3 SEV 10-18”

“P4 SEV 19-25”

“P5 SEV 26-31”

“P6 SEV 32-37”

“P7 SEV 40-44”

“P8-9 SEV 45-50”

CARPETA SEDTs (TDEM-TEM):

1. 21 registros de SEDT en formato TEM. Formato legible e interpretable con el programa IX1D v 3.23.

“1_50_4.TEM”

“1_100_4.TEM”

“2_100_4.TEM”

“3_50_4.TEM”

“3_100_4.TEM”

“4_50_4.TEM”

“4_100_4.TEM”

“4_50_4.TEM”

“4_100_4.TEM”

“5_100_4.TEM”

“6_50_8.TEM”

“6_100_8.TEM”

“7_100_4.TEM”

“8_100_8.TEM”

“9_100_4.TEM”

“10_50_4.TEM”

“10_100_4.TEM”

“11_100_4.TEM”

“12_4.TEM”

“13_4.TEM”

“14_4.TEM”

“15_4.TEM”

“16_4.TEM”

“17_4.TEM”

“18_4.TEM”

“19_16.TEM”

“20_4.TEM”

“21_4.TEM”

2. Informe completo en formato “.PDF”. Este archivo incluye todas las figuras relativas a cada SEDT adjuntadas en este informe

“Informe_FUENTEDEPIEDRA”

3. Informe completo en formato “Word”. Este archivo incluye todas las figuras relativas a cada SEDT adjuntadas en este informe

“Informe_FUENTEDEPIEDRA Geognosia”

4. 1 archivo en formato Power Point con los diagramas de cada uno de los 21 registros SEDT efectuados, incluso Curvas de caída y Curvas de resistividad respecto a la profundidad de sondeo; en algunos sondeos se incluyen ensayos a varias frecuencias de emisión. Este archivo incluye todas las figuras relativas a cada SEDT adjuntadas en este informe.

“Apéndice D”

5. 6 archivos de formato “.txt”, recogiendo los datos directos procedentes del volcado del equipo de toma de datos.

“010806”

“020806”

“030806”

“040806”

“13142021”

“14151104”

6. Imagen .jpg referenciada, de foto satélite de la cuenca endorreica conteniendo la posición de los puntos de medida de los SEDTs realizados:

“Foto ref posición SEDTs”

CARPETA TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA DE SONDEOS MECÁNICOS (SM):

Se adjunta archivo Word (.doc) incluyendo las columnas litoestratigráficas y los registros de conductividad de los sondeos mecánicos testificados en 2005 o anteriormente:

“Conductividades sondeos 2005.doc”

Asimismo, se adjuntan los archivos .jpg de los logs realizados en 2006-07, incluyendo interpretación geológica y logs de conductividad testificados en diferentes fechas:

“Conduct Pozo Arenales”

“Conduct Pozo Cantarranas”

“Conduct Pozo La Plata”

“Conduct Pozo La Ratosa”

“Conduct Pozo La Serafina”

“Conduct Pozo Los Piquetes”

“Conduct Pozo Santillán”

“Conduct Pozo Vistahermosa”

CARPETA MAPAS Y POSICIÓN DE LOS TRABAJOS:

Esta carpeta contiene varias imágenes referenciadas .jpg conteniendo la posición de los trabajos geofísicos realizados sobre una base fotográfica digital procedente de satélite. Se adjunta archivo .jpg del modelo digital del terreno resultante para la zona

“Imagen laguna y cuenca endorreica.jpg”

“Imagen laguna y cuenca endorreica 2.jpg”: imagenes de la laguna de Fuente de Piedra y los límites de su cuenca endorreica.

“imagen-fdp.jpg”: imagen del modelo digital del terreno resultante para la zona.

“mdt-cuenca-FdP.txt”: documento de texto con el modelo digital de terreno.

“Horizonte cambio resistivo laguna.jpg”: mapa de isobatas del horizonte de cambio conductor a resistivo bajo la laguna de Fuente de Piedra, sobre imagen fotográfica referenciada.

“Posicion de trabajos geofísicos en la cuenca.jpg”: posición de los trabajos geofísicos realizados en la laguna de Fuente de Piedra y su cuenca endorreica asociada sobre base fotográfica referenciada.

“Posición de perfiles tomografía, SEV y SEDT.jpg”: posición de trabajos geofísicos de campo, tomografía de resistividad, SEVs, SEDTs en la laguna de Fuente de Piedra y su cuenca sobre imagen referenciada.

“Posicion trabajos geofísicos cuenca-Doc maestro.sfr”: imagen maestra referenciada de la posición de todos los trabajos geofísicos realizados en la cuenca en formato .sfr, utilizable mediante el programa SURFER.

ANEXO 2

**Oficina Madrid**

C/ Mahón 10, 1º D, oficina 2
28230 Las Rozas de Madrid
Madrid (España)
Teléfono: 916402879

Oficina Huelva

C/ Ayamonte nº 32
21600 Valverde del Camino
Huelva (España)
Teléfono: 959555070
CIF B-21358544

**ESTUDIO MEDIANTE SONDEOS
ELECTROMAGNETICOS EN EL DOMINIO DE
TIEMPOS CON FINES HIDROGEOLÓGICOS EN
LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA
(MÁLAGA).**

IGME

AGOSTO-NOVIEMBRE-2006

**Oficina Madrid**

C/ Mahón 10, 1º D, oficina 2
28230 Las Rozas de Madrid
Madrid (España)
Teléfono: 916402879

Oficina Huelva

C/ Ayamonte nº 32
21600 Valverde del Camino
Huelva (España)
Teléfono: 959555070
CIF B-21358544

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos	1
2. Metodología y equipo técnico	4
3. Resultados y conclusiones	7
APÉNDICE A: Breve explicación del método	34
APÉNDICE B: Instrumentación	36
APÉNDICE C: Modelos	41
APÉNDICE D: Figuras	44
APÉNDICE E: Reportaje fotográfico	71



1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.



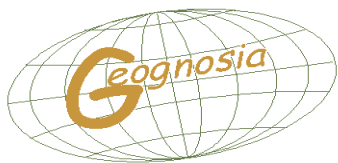
1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

El presente estudio fue realizado durante los meses de Agosto a Noviembre de 2006 en la Laguna de Fuente de Piedra y sus alrededores (Málaga) para cubrir los siguientes objetivos:

- 1.- Medidas Electromagnéticas realizadas sobre la laguna.
- 2.- Medidas Electromagnéticas realizadas alrededor de la laguna.
- 3.- Medidas Electromagnéticas en dos de las Sierras que la rodean.

Dependiendo del objetivo geológico a cubrir la profundidad del estudio requerida es diferente, por lo que los bucles Electromagnéticos realizados tienen diferentes tamaños, a continuación se presenta una tabla con las coordenadas aproximadas propuestas y la profundidad y el tamaño de los bucles requeridos a priori para llegar a esa profundidad:

<i>BUCLE</i>	<i>COORDENADAS</i>	<i>PROFUNDIDAD</i>	<i>TAMAÑO DEL BUCLE</i>
<i>1</i>	<i>344345 4110500</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>2</i>	<i>343230 4108330</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>3</i>	<i>341910 4107375</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>4</i>	<i>342700 4107040</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>5</i>	<i>341530 4107750</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>6</i>	<i>343745 4109285</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>7</i>	<i>342900 4109800</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>8</i>	<i>342220 4108775</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>9</i>	<i>341500 4106800</i>	<i>200-250</i>	<i>100x100</i>
<i>10</i>	<i>343410 4110945</i>	<i>150</i>	<i>100x100</i>
<i>11</i>	<i>342050 4109800</i>	<i>150</i>	<i>100x100</i>



12	<i>342000 4115000</i>	<i>150</i>	<i>100x100</i>
13	<i>342800 4112500</i>	<i>150</i>	<i>100x100</i>
14	<i>344250 4106000</i>	<i>150</i>	<i>50x50</i>
15	<i>347250 4114500</i>	<i>150</i>	<i>100x100</i>
16	<i>350400 4110150</i>	<i>150</i>	<i>100x100</i>
17	<i>348300 4117200</i>	<i>150</i>	<i>50x50</i>
18	<i>352700 4112750</i>	<i>150</i>	<i>50x50</i>
19	<i>346200 4106400</i>	<i>150</i>	<i>50x50</i>
20	<i>Sierra de Humilladero</i>	<i>250</i>	<i>200x200</i>
21	<i>Sierra de Molina</i>	<i>250</i>	<i>200x200</i>



2.- METODOLOGÍA Y EQUIPO TÉCNICO.



2.- METODOLOGÍA Y EQUIPO TÉCNICO.

El presente estudio ha sido dirigido e interpretado por Isla Fernández Rodríguez, licenciada en CC. Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (especialidad de geofísica). El trabajo de campo fue realizado por Yolanda Verges Leandro y Luís Javier Pérez Rodríguez, licenciados en Geología por la Universidad de Huelva y dirigido por Emilio E. Mora Pérez, operador geofísico.

Para la realización de este estudio electromagnético en el dominio de tiempos se empleó un equipo para prospección electromagnética de la marca ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION que constaba de un receptor GDP-32, un transmisor ZT-30 y demás equipos y accesorios necesarios para la realización de este tipo de estudios (para más detalle ver Apéndice B).

La realización del trabajo de campo siguió estos pasos:

- Se calibra internamente el receptor, para controlar que no tiene fallos internos. El receptor emite una señal de 1 voltio, y el mismo receptor lee esta señal. Si la medida es cercana a 1 voltio, es que no hay problemas. Esta medida de control se realiza una vez al comenzar cada campaña. En el caso del estudio que nos ocupa se realizó al principio de cada semana que se fue al campo.
- Se sincronizan el receptor y el transmisor para que el receptor conozca la señal emitida por el transmisor y en todos los casos se mida en ausencia de corriente, y por lo tanto en ausencia del campo magnético primario. Esta sincronización se realiza cada día de trabajo, ya que cada vez que se apaga el receptor o la caja controladora del transmisor se pierde la sincronización.
- Se mide cada estación a tres frecuencias de emisión (4Hz, 8Hz y 16Hz) como método de control de errores (hay determinados tipos de ruidos externos que cambiando de frecuencias se pueden evitar).



- Se comprueba en campo si en cada estación se ha llegado a la profundidad requerida a priori. La visualización de los datos en el campo permite determinar con cierta precisión si los datos medidos son lo suficientemente limpios para llegar a una profundidad determinada, pero la determinación de la profundidad del estudio puede variar respecto a la estimada en campo con el receptor de manera notable después de depurar los datos y modelarlos con algoritmos más precisos que los que usa el receptor.
- En varios casos se tuvieron que modificar las posiciones propuestas para evitar el ruido electromagnético externo.
- También en varios casos se realizaron medidas en la misma posición con dos tamaños de bucle diferentes para definir las primeras capas con mayor precisión con el bucle más pequeño.
- Todas las coordenadas de las medidas se presentan en UTM Huso 30 Norte DATUM ED50.

Una vez realizada la toma de datos en campo se pasa al procesado e interpretación de los perfiles en gabinete. Dentro de esta etapa podemos destacar:

- Se depuraron los datos y se modelaron las medidas tomadas en el centro del bucle. Se modelan todas las diferentes frecuencias y se decide para cual de ellas tenemos los datos más limpios.
- Todos los datos se modelan con diferente peso de suavizado y peso del modelo inicial para poder conseguir los modelos más cercanos al modelo geológico esperado (Para más información sobre el programa de modelado ver Apéndice C).



3.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

3.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

A continuación pasamos a describir cada bucle en la frecuencia de emisión para la que hemos obtenido los datos más precisos. Para esta frecuencia se han realizado diferentes modelos, usando distintos pesos de suavizado para cada modelo (Ver APENDICE C para obtener más información sobre los modelos), se presentan solo los que se han considerado más adecuados después del análisis de los datos y de la interpretación.

Las imágenes con las curvas de caída y las curvas modeladas, con la resistividad respecto a la profundidad se encuentran en el APENDICE D.

La interpretación como modelos por bloques se encuentra en el fichero TEYGE.XLS

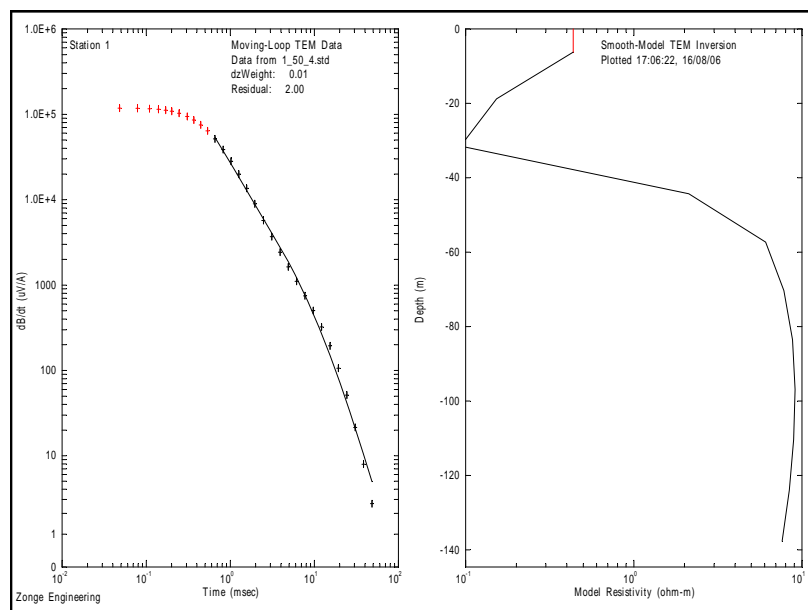
1.- Medidas Electromagnéticas realizadas sobre la laguna.

ESTACIÓN 1

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 344345 4110500





0-20 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.4 Ohm-m hasta 0.2 Ohm-m
20-30 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.2 Ohm-m hasta 0.1 Ohm-m
30-45 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.1 Ohm-m hasta 2 Ohm-m
45-55 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 2 Ohm-m hasta 7 Ohm-m
55 metros -	capa de unos 7 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 135 metros de profundidad.

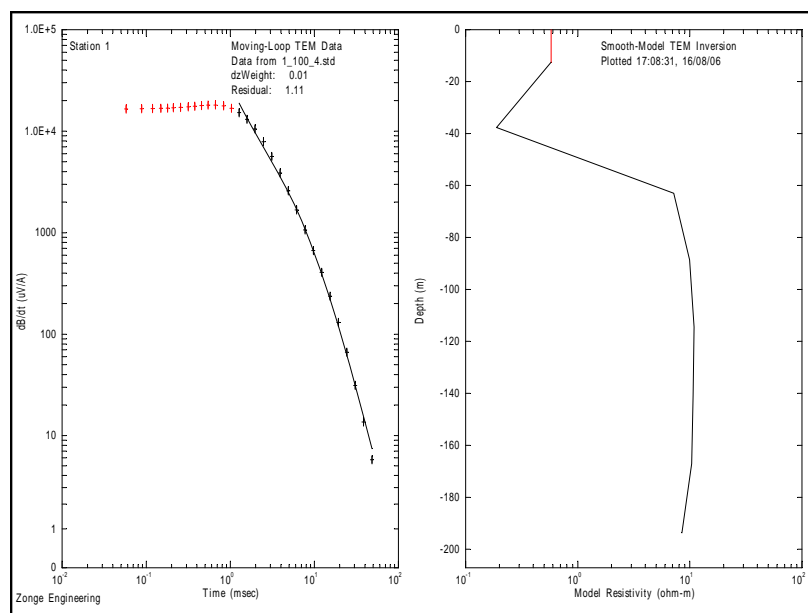
Al ser un medio muy conductivo (agua con una concentración de sal muy alta) las primeras ventanas tienen una caída muy suave, y por este motivo son muy difíciles de modelar con un algoritmo de inversión de suavizado.

ESTACIÓN 1

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 344345 4110500





0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.6 Ohm-m hasta 0.2 Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.2 Ohm-m 8 Ohm-m
60 metros -	capa de unos 8 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 190 metros de profundidad.

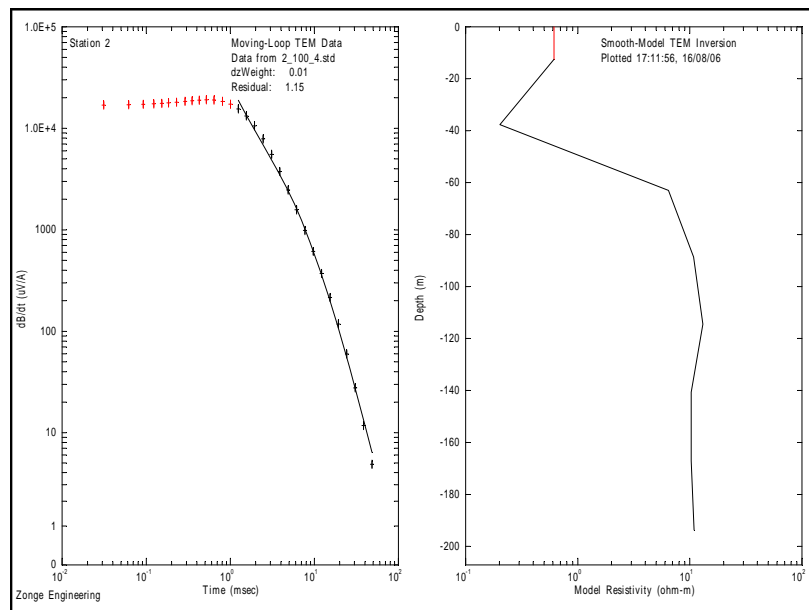
Básicamente la información obtenida es la misma en ambos bucles. Existe un cambio importante a unos 60 metros de profundidad.

ESTACIÓN 2

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 343230 4108330



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.6 Ohm-m hasta 0.2 Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.2 Ohm-m 8 Ohm-m
60 metros -	capa de unos 10 Ohm-m.



Hay datos limpios hasta unos 190 metros de profundidad.

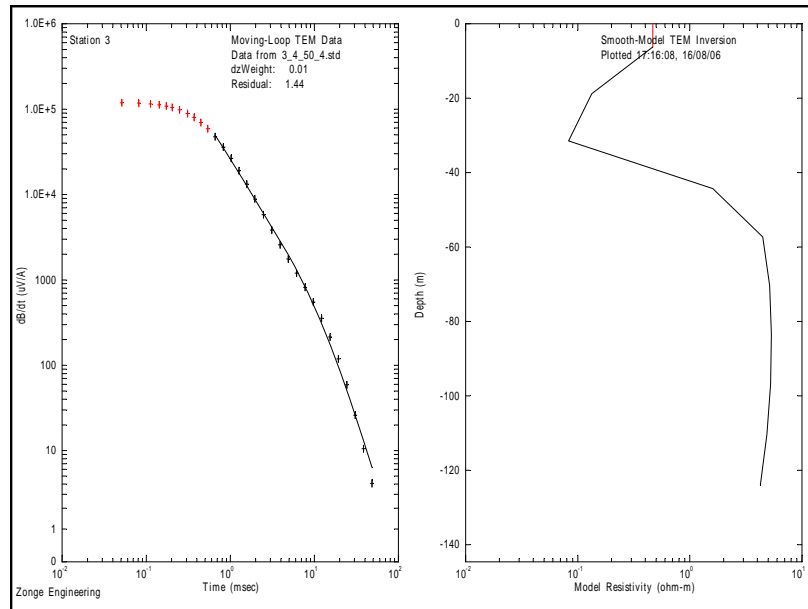
La información obtenida en este punto es muy parecida a la obtenida en la estación anterior.

ESTACIÓN 3

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 341910 4107375



0-20 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.5 Ohm-m hasta 0.1 Ohm-m
20-30 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.1 Ohm-m hasta 0.06 Ohm-m
30-45 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.06 Ohm-m hasta 2 Ohm-m
45-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 2 Ohm-m hasta 5 Ohm-m
60 metros -	capa de unos 5 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 120 metros de profundidad.

El modelo es muy parecido al modelo de la posición 1 con un bucle de 50mx50m.

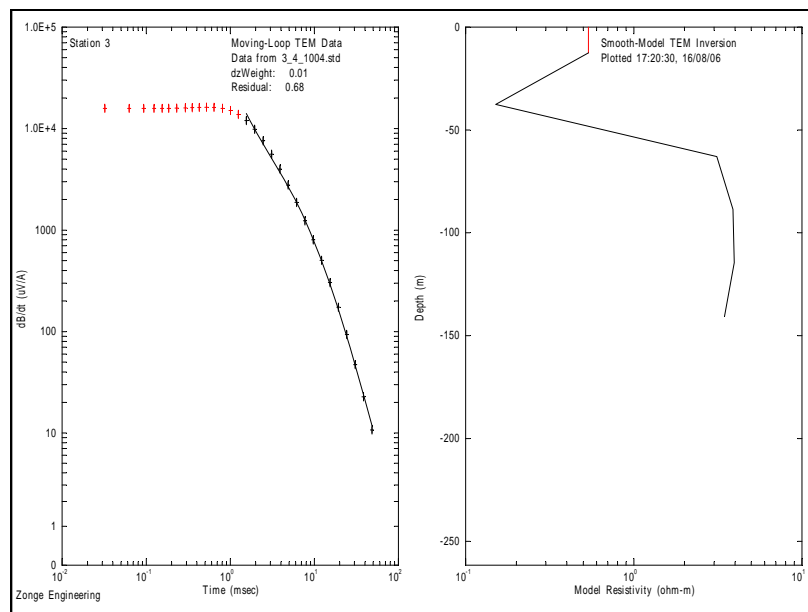


ESTACIÓN 3

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 341910 4107375



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.5Ohm-m hasta 0.15 Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.15 Ohm-m hasta 4 Ohm-m
60 metros -	capa de unos 4 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 140 metros de profundidad.

De nuevo la información obtenida en la misma posición con bucles emisores de 50mx50m y 100mx100m es muy parecida, más precisa en los primeros metros con el bucle de 50mx50m, en el que podemos discriminar más capas en los primeros 60 metros.

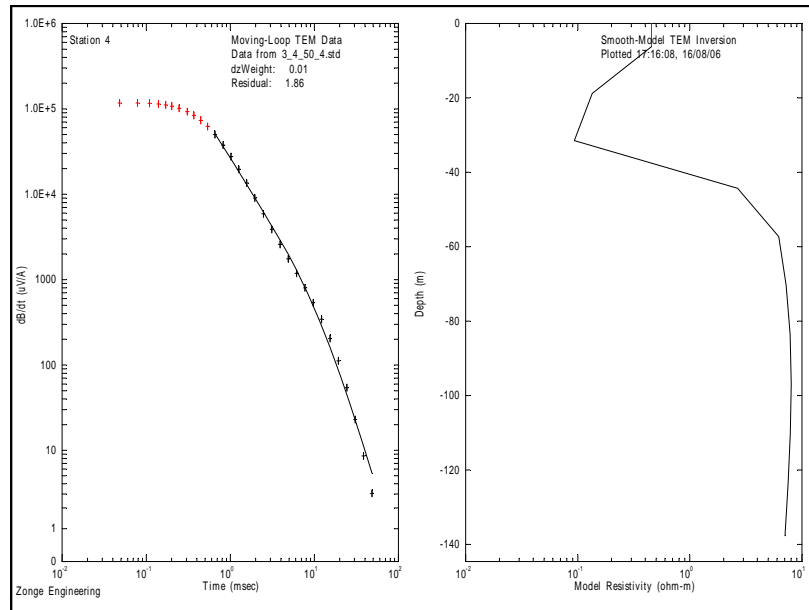
ESTACIÓN 4

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 4Hz



Coordenadas: 342700 4107040



0-20 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.4 Ohm-m hasta 0.1 Ohm-m
20-35 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.1 Ohm-m hasta 0.07 Ohm-m
35-45 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.07 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
45-55 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 3 Ohm-m hasta 8 Ohm-m
55 metros -	capa de unos 7 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 135 metros de profundidad.

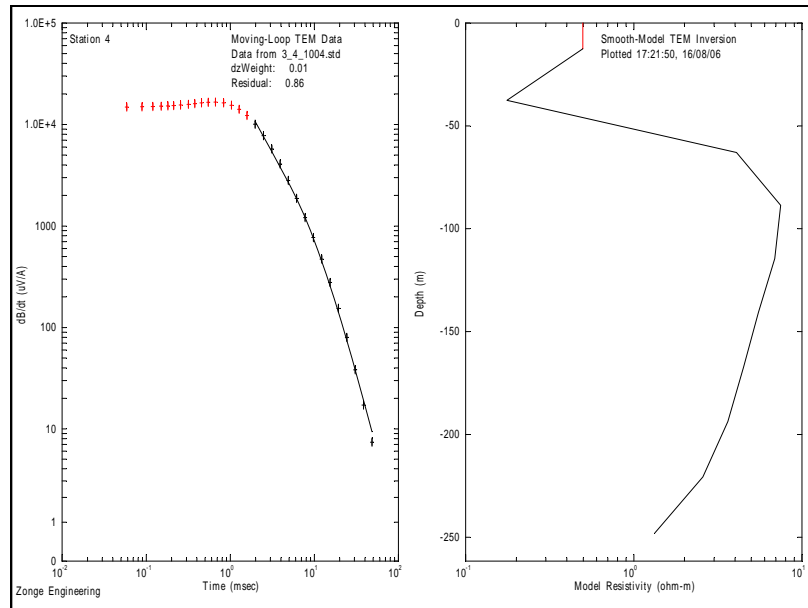
De nuevo tenemos una sucesión de capas hasta 55 metros muy conductivas.

ESTACIÓN 4

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 342700 4107040



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.45Ohm-m hasta 0.2 Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.2 Ohm-m hasta 4 Ohm-m
60-80 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 4 Ohm-m hasta 7 Ohm-m
80-220 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 7 Ohm-m 0.25 Ohm-m
220 metros -	capa con una tendencia a la disminución de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 240 metros de profundidad.

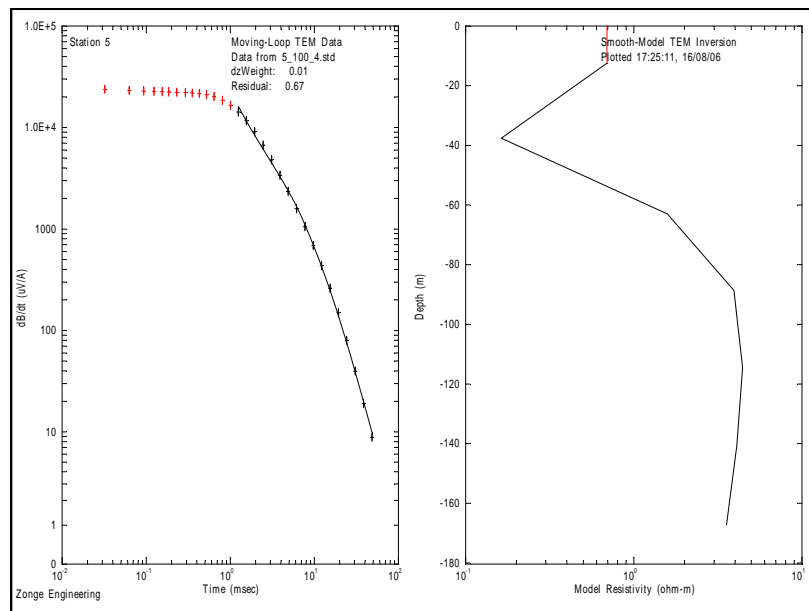
En este caso encontramos una capa más conductiva por debajo de la capa de alrededor de 7-10 Ohm-m que hemos visto hasta ahora en todos los bucles.

ESTACIÓN 5

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 341530 4107750



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.7 Ohm-m hasta 0.15Ohm-m
40-65 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.15Ohm-m hasta 1.5 Ohm-m
65-90 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 1.5 Ohm-m hasta 4 Ohm-m
90 metros -	capa de unos 4 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 160 metros de profundidad.

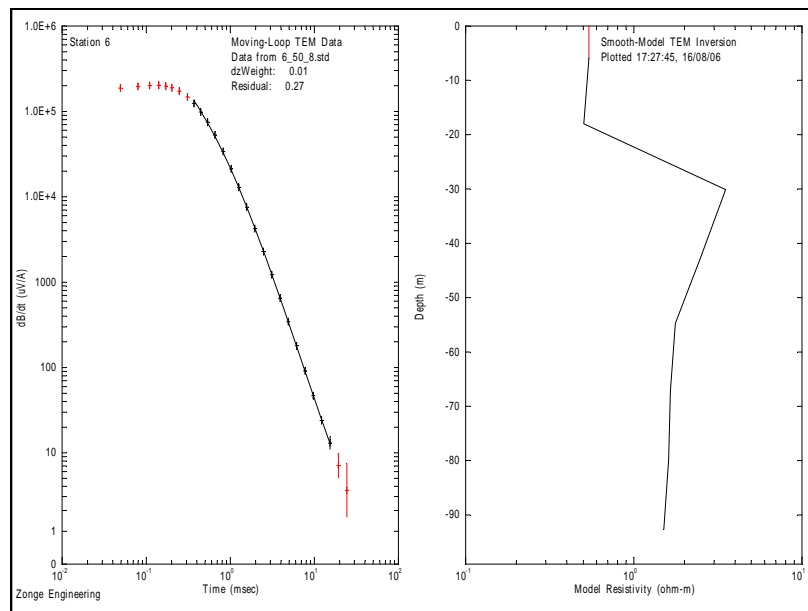
La potencia de las primeras capas muy conductoras es superior que en los casos anteriores, a unos 90 metros. Aunque en este caso la resistividad es menor 4 Ohm-m respecto a los 7, 8 o 10 Ohm-m de los anteriores podemos afirmar que es la misma capa ya que el modelo de suavizado le cuesta llegar a valores altos de resistividad por debajo de una muy conductiva.

ESTACIÓN 6

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 343745 4109285



0-20 metros	capa de unos 0.5 Ohm-m.
20-30 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.5 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
30-55 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 3 Ohm-m hasta 1.5 Ohm-m
55 metros -	capa de unos 1.5 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 90 metros de profundidad.

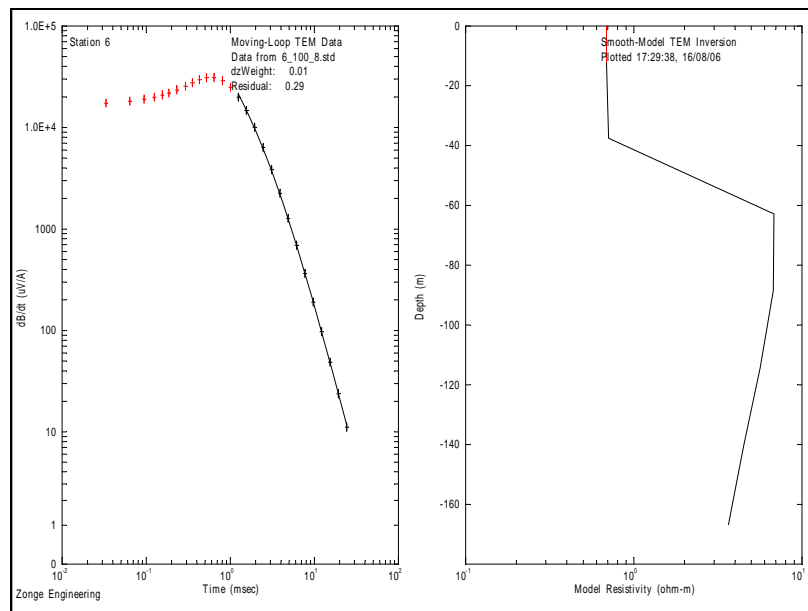
Esta medida es muy diferente a los medidos anteriormente.

ESTACIÓN 6

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 343745 4109285



0-40 metros	capa de unos 0.7 Ohm-m.
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.7 Ohm-m hasta 7 Ohm-m
60-90 metros	capa de unos 7 Ohm-m.
90 metros -	capa con una ligera tendencia a la disminución de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 160 metros de profundidad.

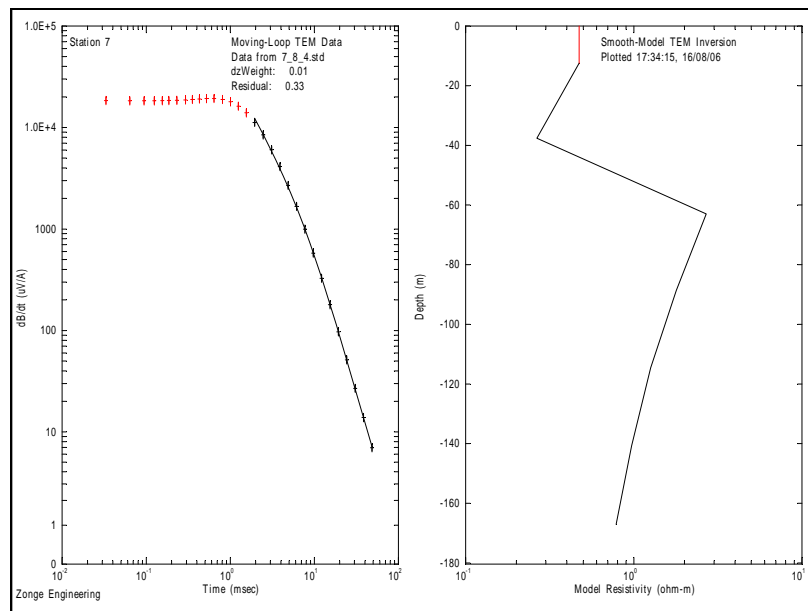
De nuevo en el primer tramo encontramos más información con el bucle más pequeño y llegamos a más profundidad con el bucle más grande.

ESTACIÓN 7

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 342900 4109800



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.5 Ohm-m hasta 0.2 Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.2 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
60 metros -	capa con una ligera tendencia a la disminución de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 160 metros de profundidad.

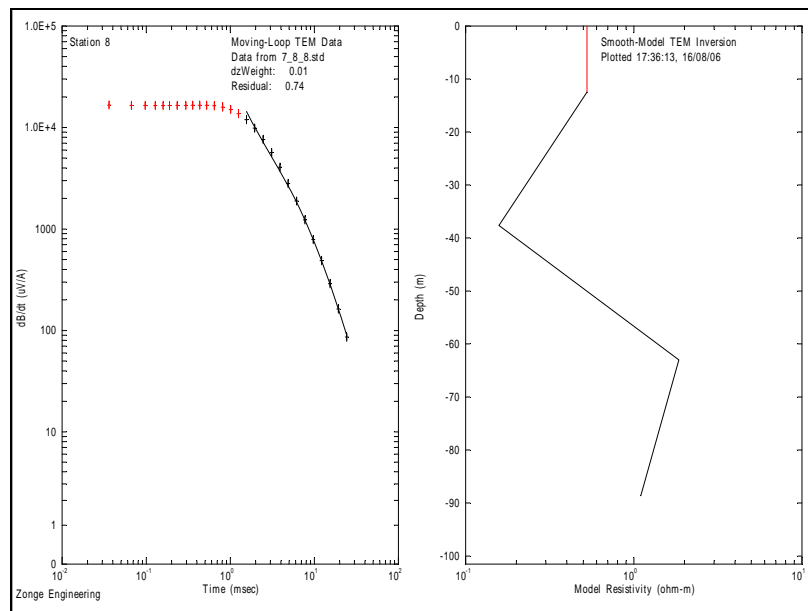
Esta medida es similar a la anterior.

ESTACIÓN 8

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 342220 4108775



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.5 Ohm-m hasta 0.15 Ohm-m
40-65 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.15 Ohm-m hasta 2 Ohm-m
65 metros -	capa con una ligera tendencia a la disminución de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 85 metros de profundidad.

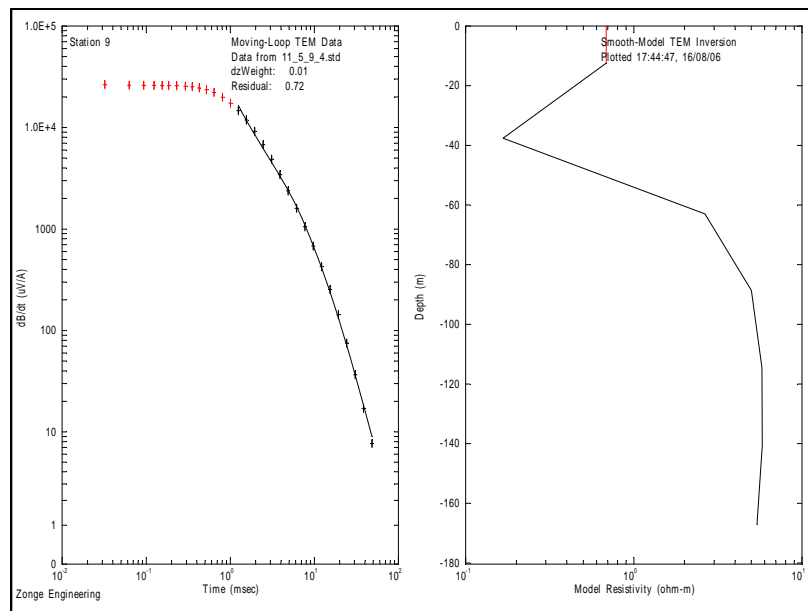
Medida muy parecida a las medidas 6 y 7.

ESTACIÓN 9

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 341500 4106800



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.7 Ohm-m hasta 0.15Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.15Ohm-m hasta 2.5 Ohm-m
60-90 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 2.5 Ohm-m hasta 6 Ohm-m
90 metros -	capa de unos 6 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 160 metros de profundidad.

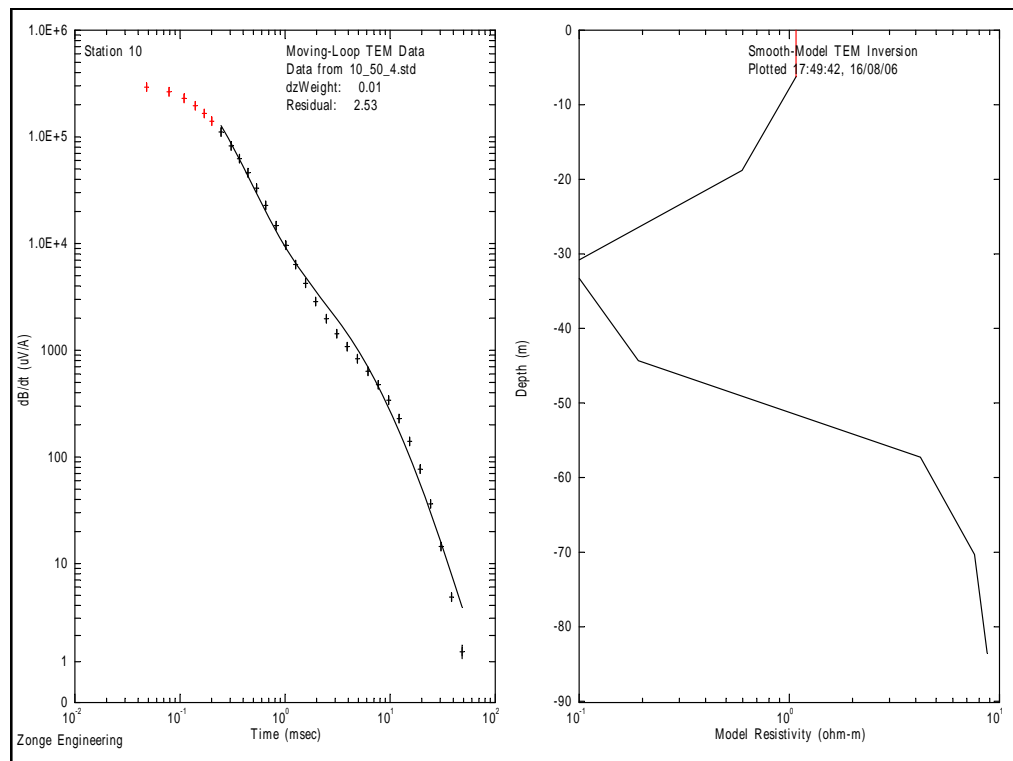
Esta medida se parece mucho a las primeras medidas hasta la 6.

ESTACIÓN 10

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 343390 4110945



0-20 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 1 Ohm-m hasta 0.6 Ohm-m
20-30 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.6 Ohm-m hasta 0.1 Ohm-m
30-45 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.1 Ohm-m hasta 0.2 Ohm-m
45-55 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.2 Ohm-m hasta 5 Ohm-m
55-70 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 5 Ohm-m hasta 8 Ohm-m
70 metros -	capa de unos 8 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 85 metros de profundidad.

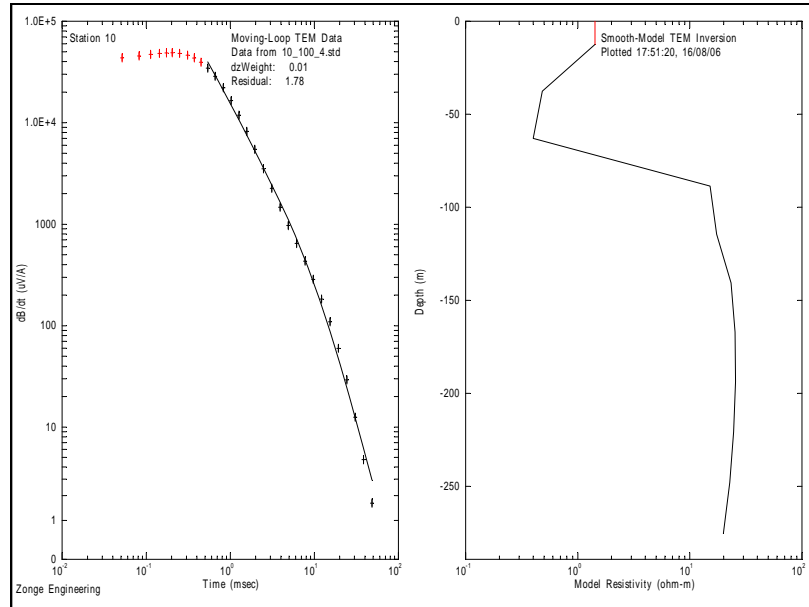
Hasta 55 metros tenemos capas con resistividades menores de 1 Ohm-m.

ESTACIÓN 10

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 343410 4110945



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 1.5 Ohm-m hasta 0.3 Ohm-m
40-70 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.3 Ohm-m hasta 0.2 Ohm-m
70-80 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.2 Ohm-m hasta 20 Ohm-m
80 metros -	capa de unos 20 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 250 metros de profundidad.

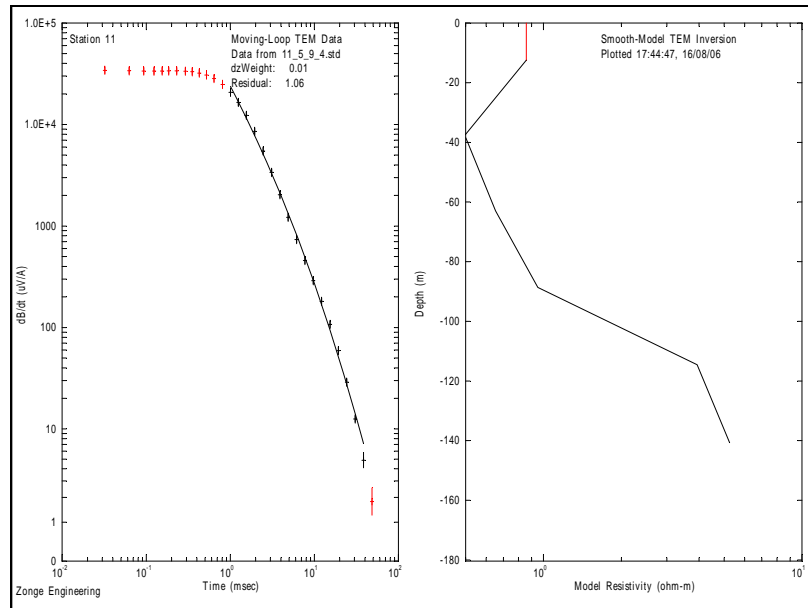
Hasta ahora es el bucle con mayor resistividad en la última capa.

ESTACIÓN 11

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 342048 4109800



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.9 Ohm-m hasta 0.5 Ohm-m
40-90 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.5 Ohm-m hasta 0.9 Ohm-m
90-110 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 0.9 Ohm-m hasta 4 Ohm-m
110 metros -	capa con tendencia al aumento de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 130 metros de profundidad.

En esta medida no se llega a la capa más resistiva hasta cerca de los 100 metros de profundidad. Esta es la razón por la que no se puede penetrar más, debido a la gran potencia de la capa muy conductiva.

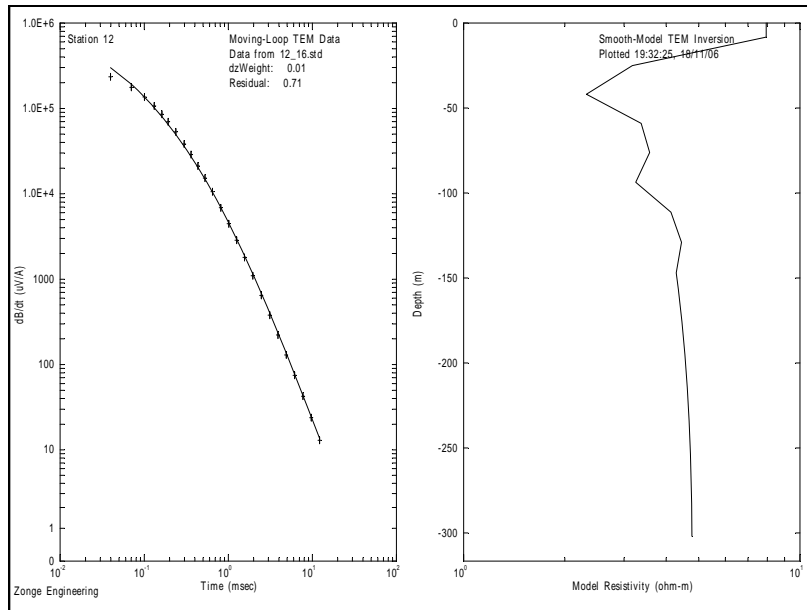
2.- Medidas Electromagnéticas realizadas alrededor de la laguna.

ESTACIÓN 12

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 16Hz

Coordenadas: 341995 4115000



0-20 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 8 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
20-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 3 Ohm-m hasta 2 Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 2 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
60-80 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 3 Ohm-m hasta 3.5 Ohm-m
80-100 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 3.5 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
100-120 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 3 Ohm-m hasta 4 Ohm-m
120 metros -	capa de unos 4 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 300 metros de profundidad.

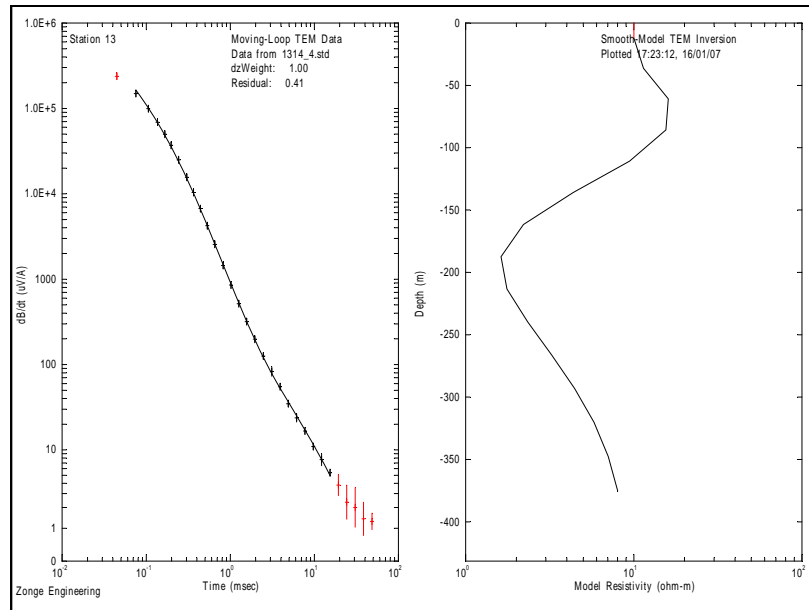
Este bucle también es muy conductivo ya que se encuentra muy cerca de la laguna.

ESTACIÓN 13

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 342885, 4112375



0-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 10 Ohm-m 20 Ohm-m
60-80 metros	capa de unos 20 Ohm-m
80-160 metros	capa o conjunto de capas que varían 20 Ohm-m hasta 2 Ohm-m
160-220 metros	capa de unos 2 Ohm-m
220 metros -	capa con tendencia al aumento de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 350 metros de profundidad.

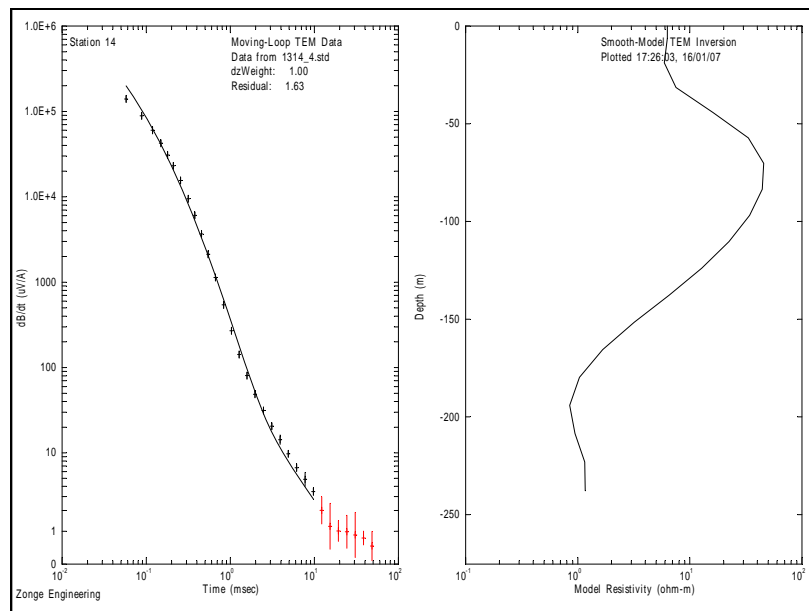
Al ser un medio más resistivo que las medidas tomadas sobre la laguna, con el mismo tamaño de bucle emisor se llega a más profundidad.

ESTACIÓN 14

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 4Hz

Coordenadas: 344355 4106045



0-30 metros	capa de unos 6 Ohm-m
30-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 6 Ohm-m hasta 40 Ohm-m
60-80 metros	capa de unos 40 Ohm-m
80-180 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 40 Ohm-m hasta 1 Ohm-m
180 metros -	capa de unos 1 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 230 metros de profundidad.

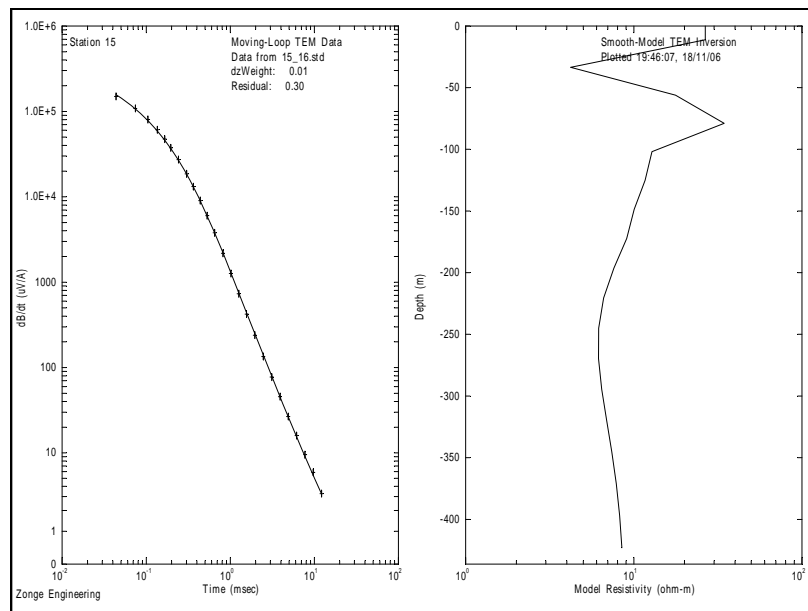
Bucle muy similar al bucle anterior.

ESTACIÓN 15

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 16Hz

Coordenadas: 347250 4114500



0-30 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 25 Ohm-m hasta 4 Ohm-m
30-50 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 4 Ohm-m hasta 20 Ohm-m
50-75 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 20 Ohm-m hasta 35 Ohm-m
75-100 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 35 Ohm-m hasta 10 Ohm-m
100-200 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 10 Ohm-m hasta 7 Ohm-m
200 metros -	capa de unos 7 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 400 metros de profundidad.

De nuevo con el mismo tamaño de bucle llegamos a bastante más profundidad que en la laguna.

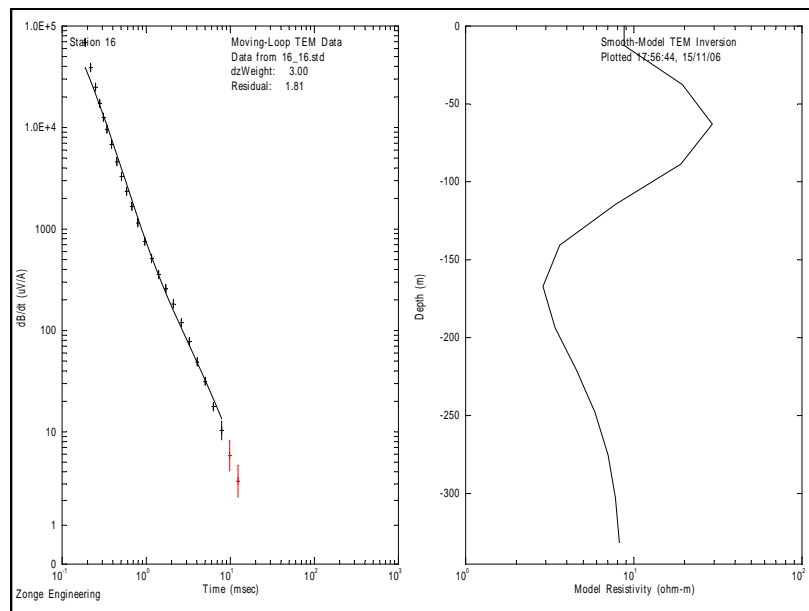
ESTACIÓN 16

Bucle: 100X100

Frecuencia de Emisión: 16Hz

Coordenadas: 350400 4110150

Observaciones: Una línea de alta tensión se encuentra a unos 100m de la antena receptora y otra de baja cruza el bucle.



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 9 Ohm-m hasta 20 Ohm-m
40-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 20 Ohm-m hasta 30 Ohm-m
60-90 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 30 Ohm-m hasta 20 Ohm-m
90-140 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 20 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
140-190 metros	capa de unos 3 Ohm-m.
190 metros -	capa con ligera tendencia al aumento de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 300 metros de profundidad.

De nuevo un bucle muy similar a los primeros de esta segundo tipo de medidas.

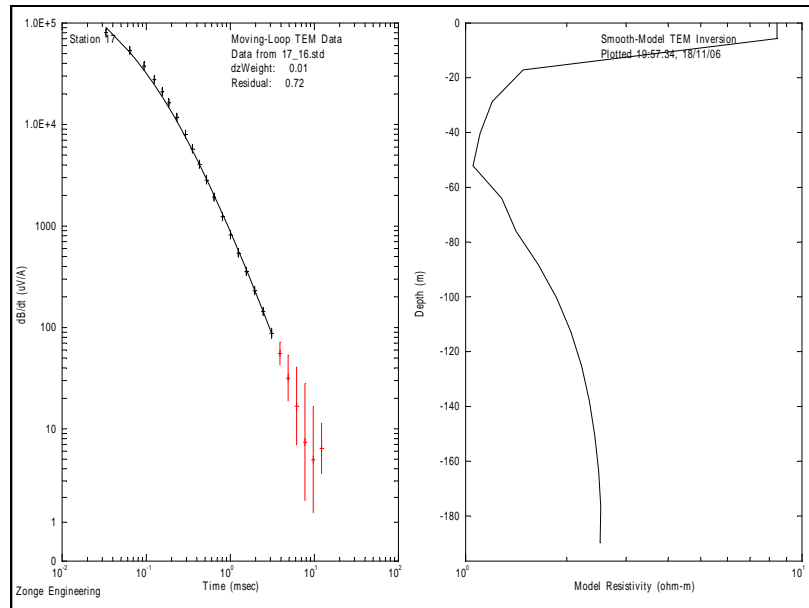
ESTACIÓN 17

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 16Hz

Coordenadas: 348200 4117200

Observaciones: Se modifica la posición propuesta unos 100m en x por la cercanía de las vías del tren.



0-20 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 8 Ohm-m hasta 1.5 Ohm-m
20-30 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 1.5 Ohm-m hasta 1 Ohm-m
30-50 metros	capa de 1 Ohm-m.
50-140 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 1 Ohm-m hasta 2.5 Ohm-m
140 metros -	capa de unos 2.5 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 180 metros de profundidad.

En este bucle se llega a menor profundidad debido a que el medio es mucho más conductivo.

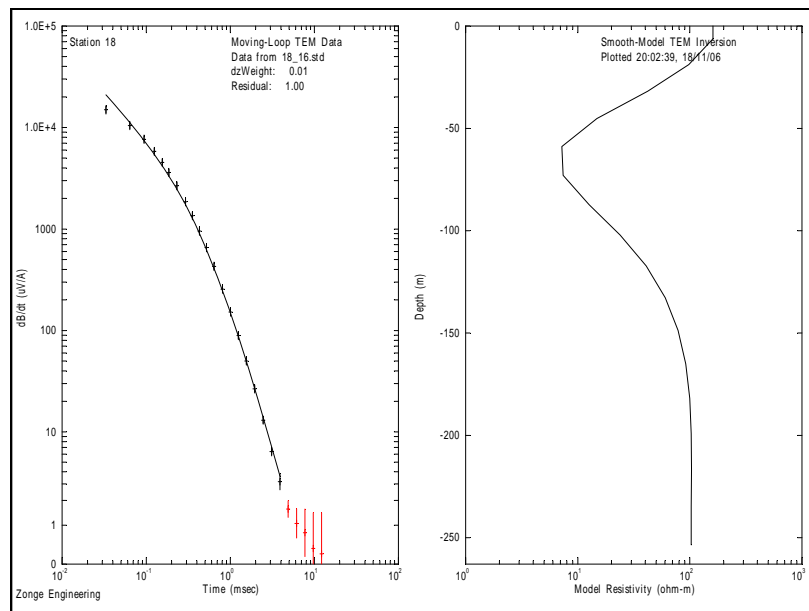
ESTACIÓN 18

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 16Hz

Coordenadas: 352700 4112750

Observaciones: Una línea de alta tensión se encuentra a unos 100m de la antena receptora.



0-60 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 150 Ohm-m hasta 6 Ohm-m
60-70 metros	capa de unos 6 Ohm-m.
70-150 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 6 Ohm-m hasta 100 Ohm-m
150 metros -	capa de unos 100 Ohm-m.

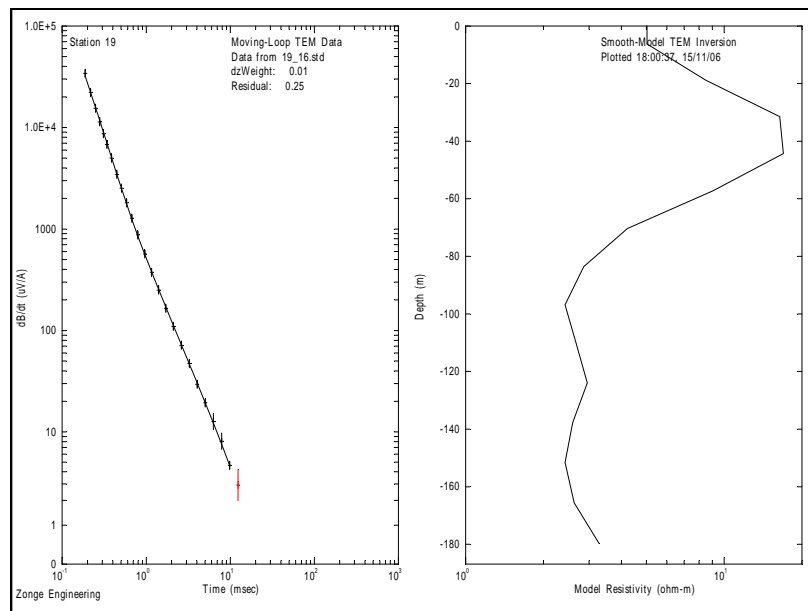
Hay datos limpios hasta unos 250 metros de profundidad.
Este es el bucle más resistivo de este bloque de medidas.

ESTACIÓN 19

Bucle: 50X50

Frecuencia de Emisión: 16Hz

Coordenadas: 346200 4106400



0-30 metros	capa o conjunto de capas que varían 4.5 Ohm-m hasta 15 Ohm-m
30-50 metros	capa de unos 15 Ohm-m
50-80 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 15 Ohm-m hasta 3 Ohm-m
80 metros -	capa de unos 3 Ohm-m.

Hay datos limpios hasta unos 170 metros de profundidad.

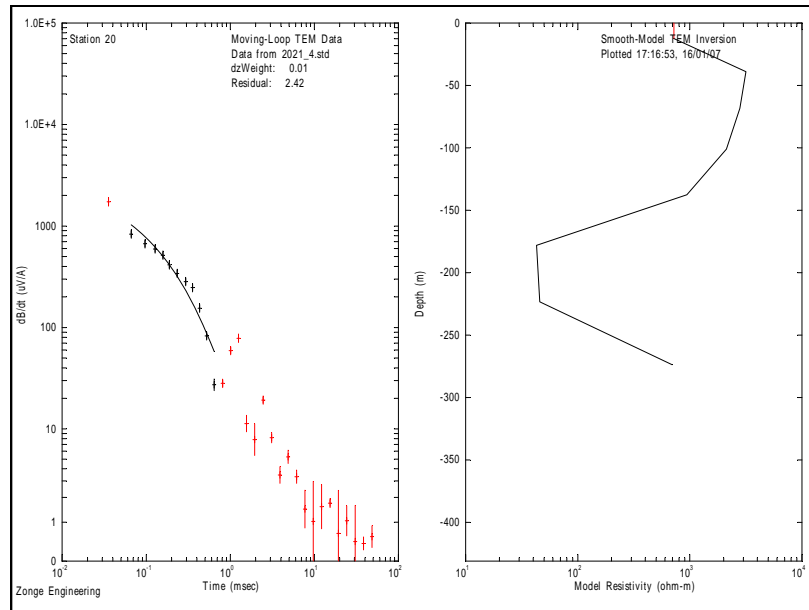
3.- Medidas Electromagnéticas en dos de las Sierras que la rodean.

ESTACIÓN 20

Bucle: 200X200

Frecuencia de Emisión: 4Hz

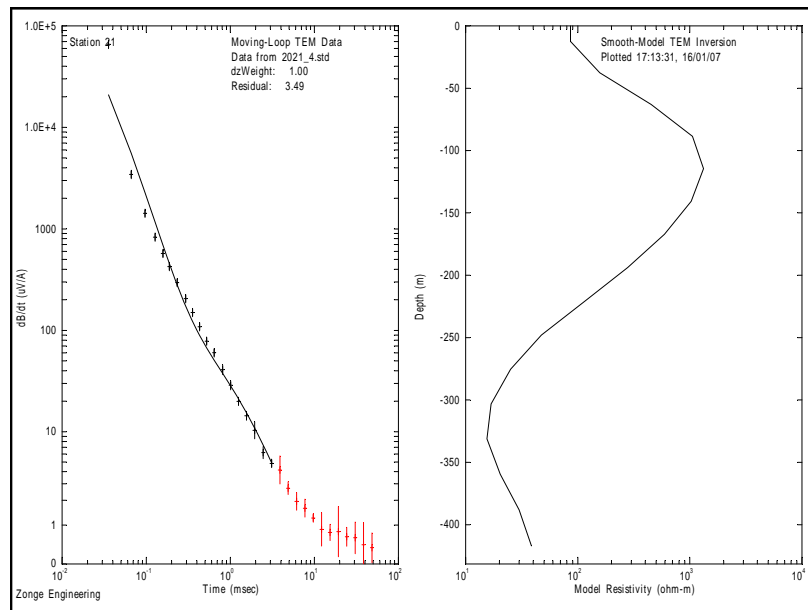
Coordenadas: 348665, 4107805



0-40 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 700 Ohm-m hasta 3000 Ohm-m
40-100 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 3000 Ohm-m hasta 2000 Ohm-m
100-140 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 2000 Ohm-m hasta 900 Ohm-m
140-175 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 900 Ohm-m hasta 50 Ohm-m
175-230 metros	capa de unos 50 Ohm-m
230 metros -	capa con tendencia al aumento de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 270 metros de profundidad.

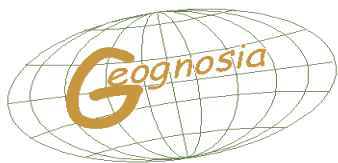
Estación con mucho ruido. No se encuentra en el campo ninguna razón para explicarlo, pero esta estación se repite varias veces, incluso se varía un poco la posición y en todos los casos sale con mucho ruido. Se presenta la estación más limpia.

**ESTACIÓN 21****Bucle: 200X200****Frecuencia de Emisión: 4Hz****Coordenadas: 352872, 4114395**

0-90 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 90 Ohm-m hasta 1000Ohm-m
90-150 metros	capa de unos 1000 Ohm-m
150-300 metros	capa o conjunto de capas que varían desde 1000 Ohm-m hasta 200Ohm-m
300-340 metros	capa de unos 20 Ohm-m
340 metros -	capa con tendencia al aumento de la resistividad.

Hay datos limpios hasta unos 400 metros de profundidad.

Como vemos el medio es mucho más resistivo, y las resistividades son muy similares entre los bucles 20 y 21. Esta es la razón por la que damos por válida la interpretación del bucle 20, aunque tenga bastante ruido.



APÉNDICE A: Breve explicación del método



El SEDT (Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempo) es un método electromagnético en el dominio de tiempos, esto quiere decir que se mide en diferentes ventanas o aperturas de la antena en el tiempo. El equipo necesario consiste en un transmisor que inyecta corriente en un bucle (una antena hecha con un cuadrado de cable) de distintas dimensiones (dependiendo de la profundidad a la que se quiere llegar en el estudio, el área a cubrir y los niveles de ruido ambiental) y un receptor (una antena).

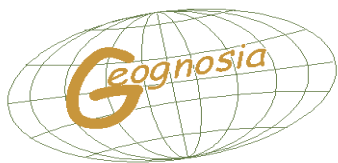
La corriente que se inyecta en el bucle es una corriente en forma de ciclo alternando la polaridad. Las medidas en el receptor se miden durante el tiempo en que no se esta inyectando corriente, de forma que solo están presentes los campos secundarios. Se crea un campo magnético por la inyección de corriente en el bucle, y durante el tiempo en que no hay corriente se mide con la antena receptora el voltaje generado por la difusión de la energía inducida.

Normalmente los intervalos de tiempo de caída en que no se inyecta corriente varían desde 30 microsegundos a cientos de milisegundos para exploraciones profundas.

Es fundamental sincronizar el transmisor y el receptor, para realmente medir solo en los intervalos de tiempo en que no se esta inyectando corriente en el bucle.

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. En este estudio la topografía es bastante llana en casi todos los casos, por lo que solo en el caso de las sierras tenemos este problema.

La configuración de campo que se utilice va a variar los resultados finales de las medidas tomadas en el campo. En este caso se utilizaron bucles como transmisores de 50mx50m, 100mx100m y 200mx200m.



APÉNDICE B: Instrumentación

ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS. ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION

RECEPTOR MULTIFUNCIÓN GDP-32^{II}.

El ZONGE GDP-32II es la cuarta generación de receptores GDP de la marca ZONGE ENGINEERING AND RESEARCH ORGANIZATION. Es un receptor multicanal en el dominio de tiempos o frecuencias para campos eléctricos y magnéticos de fuente natural o controlada.



Figura 15. Receptor de Zonge (GPD32)

Para la sincronización temporal emplea un sistema de oscilador de cuarzo de alta precisión con reloj que mantiene unos tiempos muy estables de referencia con rangos de deriva típica de menos de 5 $\mu\text{s/hr}$ (aproximadamente 0.03 mr/hr de deriva de fase en 1 Hz). Opcionalmente el oscilador puede incorporar un sistema global de posicionamiento (GPS) para reducir los errores temporales. Un reloj idéntico en un controlador de transmisor (XMT-32) puede ser sincronizado con uno o más receptores GDP y usado para conducir un transmisor, eliminando así la necesidad de una conexión física que proporcione la referencia de fase.



El receptor GDP-32II puede adquirir datos para más de 16 canales analógicos independientes. Cada señal de entrada está condicionada por la ganancia aplicada a la señal y por un circuito de filtrado, después del cuál es muestreado y convertido a formato digital. El receptor GDP-32II lleva incorporados programas que permiten al operador revisar los datos numérica y gráficamente en el campo. Un error medio (SEM) es calculado para cada medida así como la resistividad aparente para las distintas antenas y programas de adquisición. Las curvas de caída en el dominio de tiempos y el espectro en el dominio de frecuencias pueden visualizarse gráficamente. Así mismo se puede mostrar la barra de error para un conjunto de medidas repetidas.

Otras características del GDP-32II son:

Es un receptor duro y hermético transportable por un operador.

Posee un procesador de 66 MHz y 586 MPU (opcional hasta 133 MHz).

Es un sistema de banda ancha en el dominio de tiempos y de frecuencias ($0.001 \leq f \leq 8192$ Hz).

Al ser un sistema multifunción permite realizar distinto tipo de estudios: resistividad, PI en Dominio de Tiempos o de Frecuencias, Resistividad Compleja, MTAFC, MT/AMT, SEDT/nanoSEDT,...).

Permite un gran almacenamiento de datos, más de 4 GB de disco duro.

Sistema “Ethernet” para el volcado de datos (0.5 a 1.2 MB/sg).

Sistema de operación remota mediante el puerto serie.

Fuente de calibración interna con Programas que permiten la calibración de los datos.

Control automático de ganancia y de Potencial Espontáneo.

ANTENA TEM-3

Con los avances en los equipos receptores se ha hecho necesario el incremento en la calidad de los sensores para el campo magnético. ZONGE fabrica un completo rango de bobinas de inducción basadas en detectores de campo magnético adaptados a las condiciones de cada

aplicación. Poco ruido, poca potencia y estabilidad térmica son importantes objetivos para los sensores magnéticos aplicados a la exploración geofísica.

Alguna característica de la antena TEM-3 son:

$F_0 > 20 \text{ kHz}$

$\text{dB/dt respuesta } A_e = 10.000 \text{ m}^2$.



Figura 17. Antena TEM-3 de Zonge.

TRANSMISOR ZT-30

ZONGE ha desarrollado 4 transmisores que utilizan fuentes de corriente continua como fuentes primarias de energía (además de los transmisores GGT que utilizan un motor como generador). Tres de estos transmisores fueron desarrollados para estudios SEDT y el cuarto para estudios de PI o resistividad a pequeña escala.

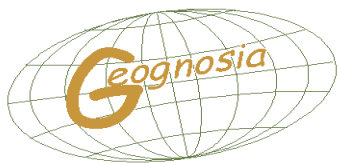
El ZT-30 utiliza fuente corriente continua (24-120 V) generando corrientes que pueden superar los 30 A. Dos o más baterías de coche pueden conectarse en serie de forma que pueden utilizarse como fuente de energía para estudios SEDT con un transmisor ZT-30. El ZT-30 puede también utilizarse como transmisor para estudios de PI/resistividad que necesiten poca

energía en estudios en los que la intensidad no requiera ser regulada (PI en Dominio de Tiempos) o en los que la forma de la curva de corriente pueda ser medida directamente.

El ZT-30 es pequeño y de fácil transporte por una persona. Es un transmisor apropiado para estudios SEDT con objetivos a profundidades menores de 500 metros.



Figura 16. Transmisor ZT30 y controlados de corriente XMT.



APÉNDICE C: Modelos



Los modelos de inversión suavizados convierten los datos medidos (dB/dt) en perfiles de resistividad respecto a la profundidad. Los datos observados de tiempos y dB/dt se utilizan en cada estación para determinar el modelo de partida o inicial que es un modelo 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 suavizado limita la variación de resistividad entre las distintas capas.

Existen dos parámetros en los modelos que determinan el tipo de resultado, estos son el peso que se le da al modelo inicial y el peso que se le da al suavizado. El peso del 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.

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 reales geológicamente.

El resultado de un modelo de suavizado es un conjunto de resistividades estimadas que varían suavemente con la profundidad. La variación lateral es calculada invirtiendo sucesivamente las estaciones a lo largo de un perfil, en el caso en que se hayan medido las estaciones en línea. Los resultados para una línea completa se presentan en una pseudo-sección con los contornos de resistividades.



Para calcular los contornos se localiza por convenio, las resistividades en el punto medio de cada capa, formando una columna por debajo de cada estación.

Los modelos de suavizado no requieren modelos iniciales, estos se calculan a partir de los propios datos observados.

Los datos observados se preparan para la inversión con el programa TEMAVG, que lo que hace es cambiar el formato de los datos de volcado del receptor para que pueda ser leído por los programas de inversión de ZONGE. Todos los parámetros de la campaña, junto con los propios de los datos, pueden modificarse en el paso previo a la inversión, además de asociar los datos con sus coordenadas y borrar los datos de las ventanas de tiempos con ruido o mala repetibilidad.

Los modelos han sido creados por:

Scott MacInnes

Mykle Raymond

April 2001

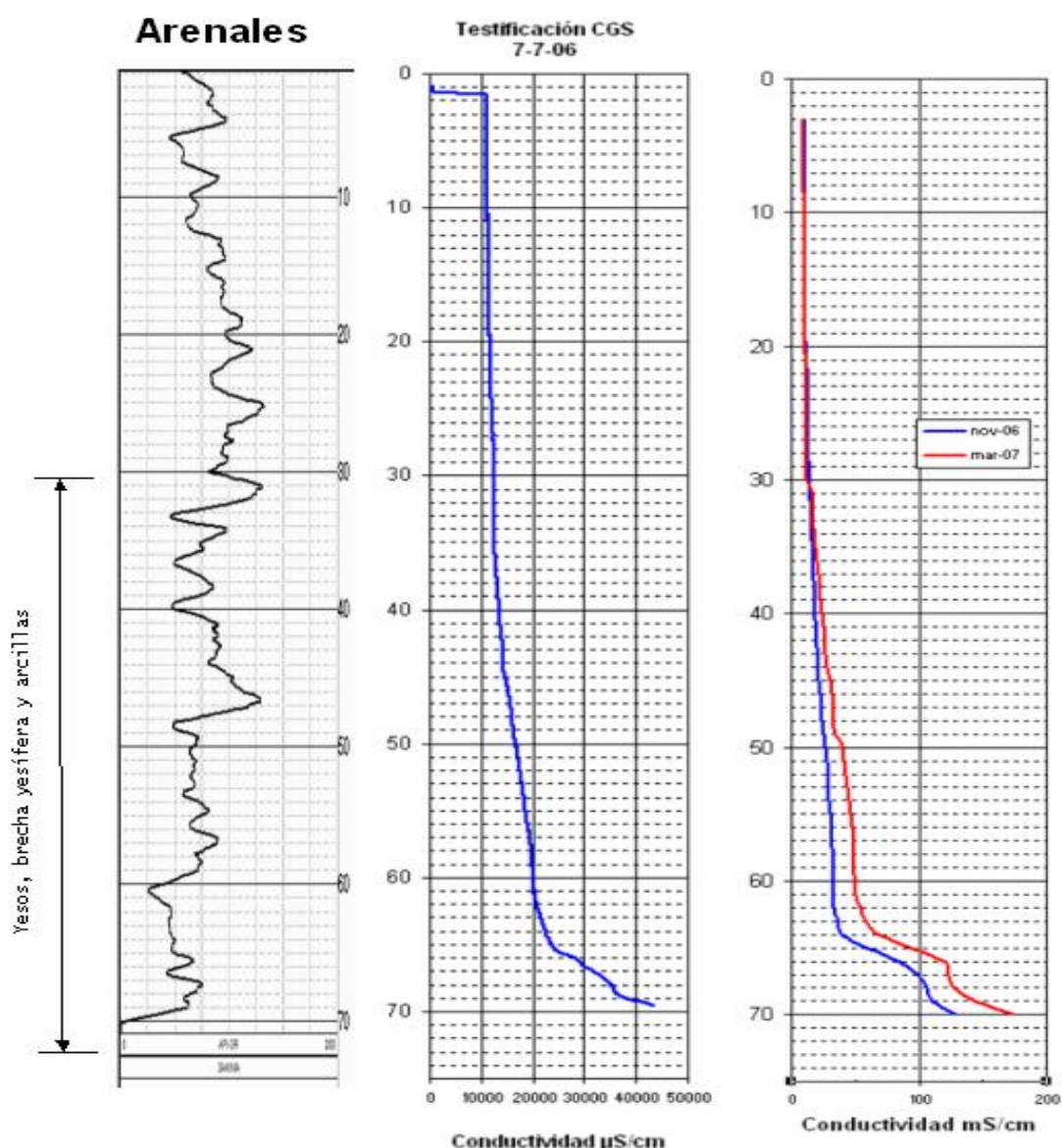
Zonge Engineering and Research Organization, Inc



ANEXO 3

CAMPAÑA 2006: TESTIFICACIÓN DE SONDEOS DE REFERENCIA

A continuación se anexan los logs de testificación de conductividad realizados por la compañía CGS entre 2006 y 2007 en la zona de estudio (supuestamente corregidas por temperatura aunque de calibración no contrastada por el Área de investigación del subsuelo del IGME). Cada pozo, una vez estabilizado, fue testificado a mediados de 2006 (empleando sonda de calibre –columna izquierda, con su interpretación litológica- y de conductividad, -columna central). En septiembre-noviembre de 2006 y marzo de 2007, se realizaron nuevas testificaciones de conductividad (columna dcha comparativa)

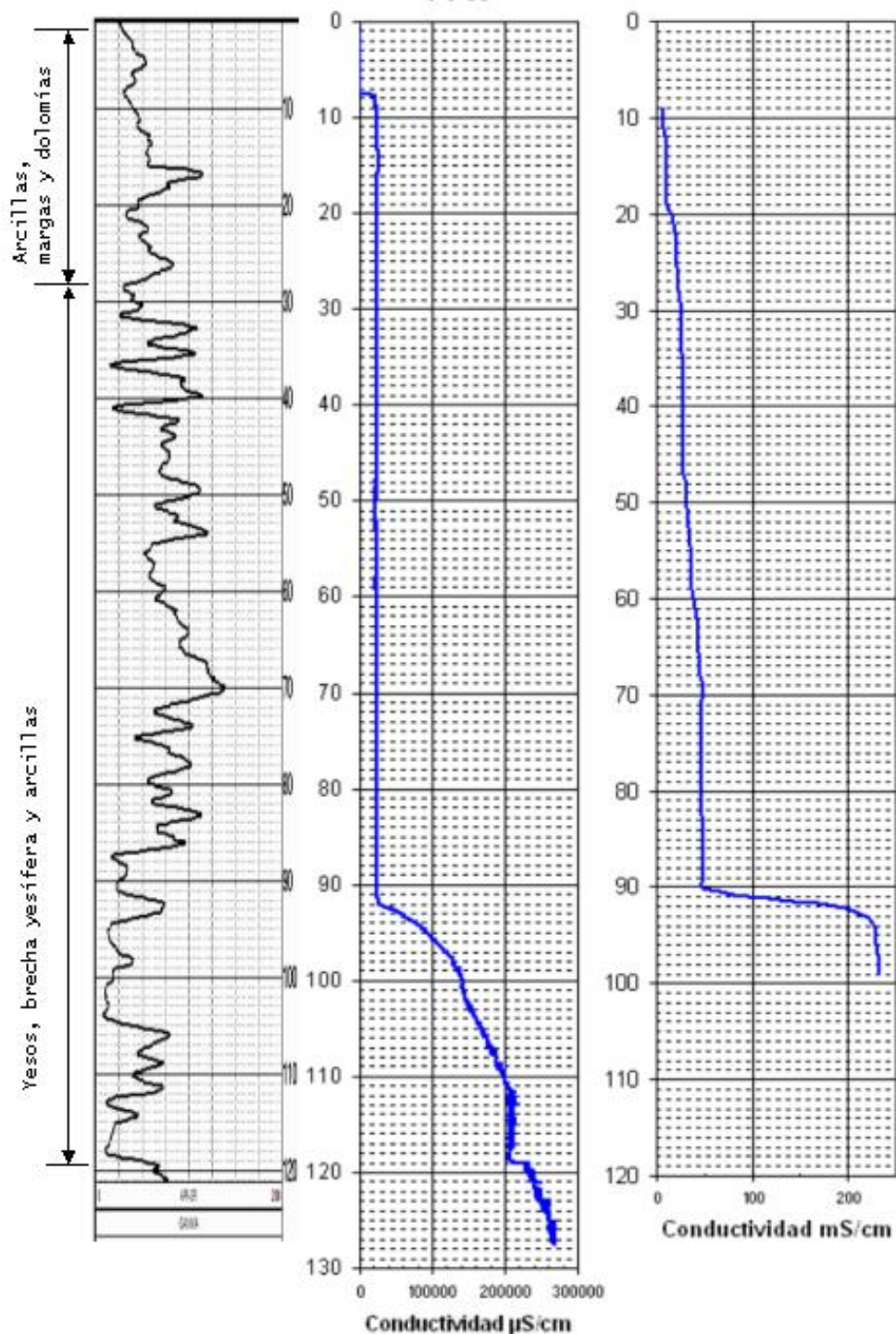


Este sondeo, de 70 m de profundidad, está ocupado por aguas salobres; se aprecia un incremento leve de la salinidad en profundidad con las testificaciones posteriores. La salinidad elevada de su fondo se debe a la decantación por densidad de salmueras, habitual en casi todos los pozos registrados.

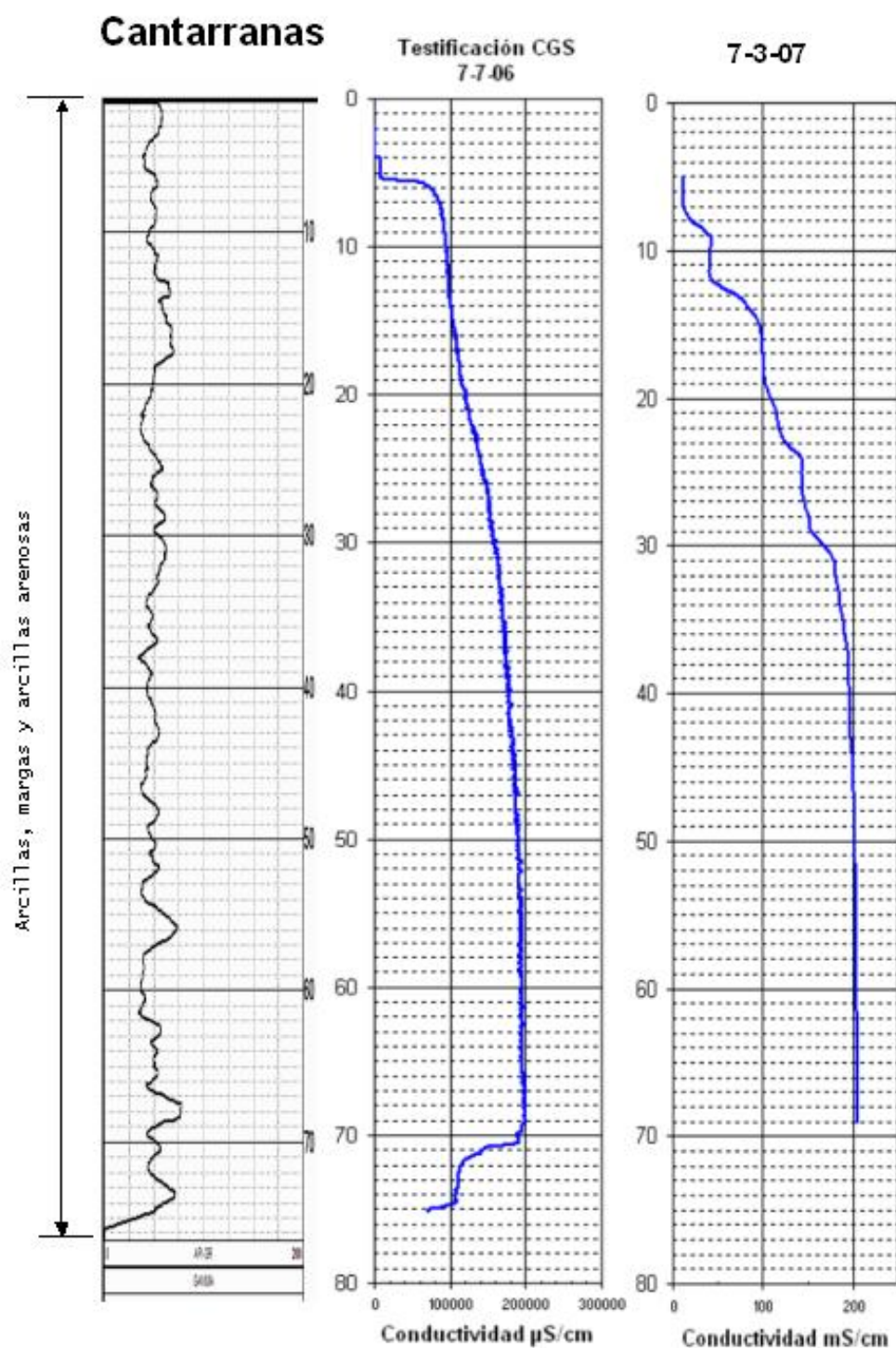
Vista Hermosa-Blancares

Testificación CGS
7-7-06

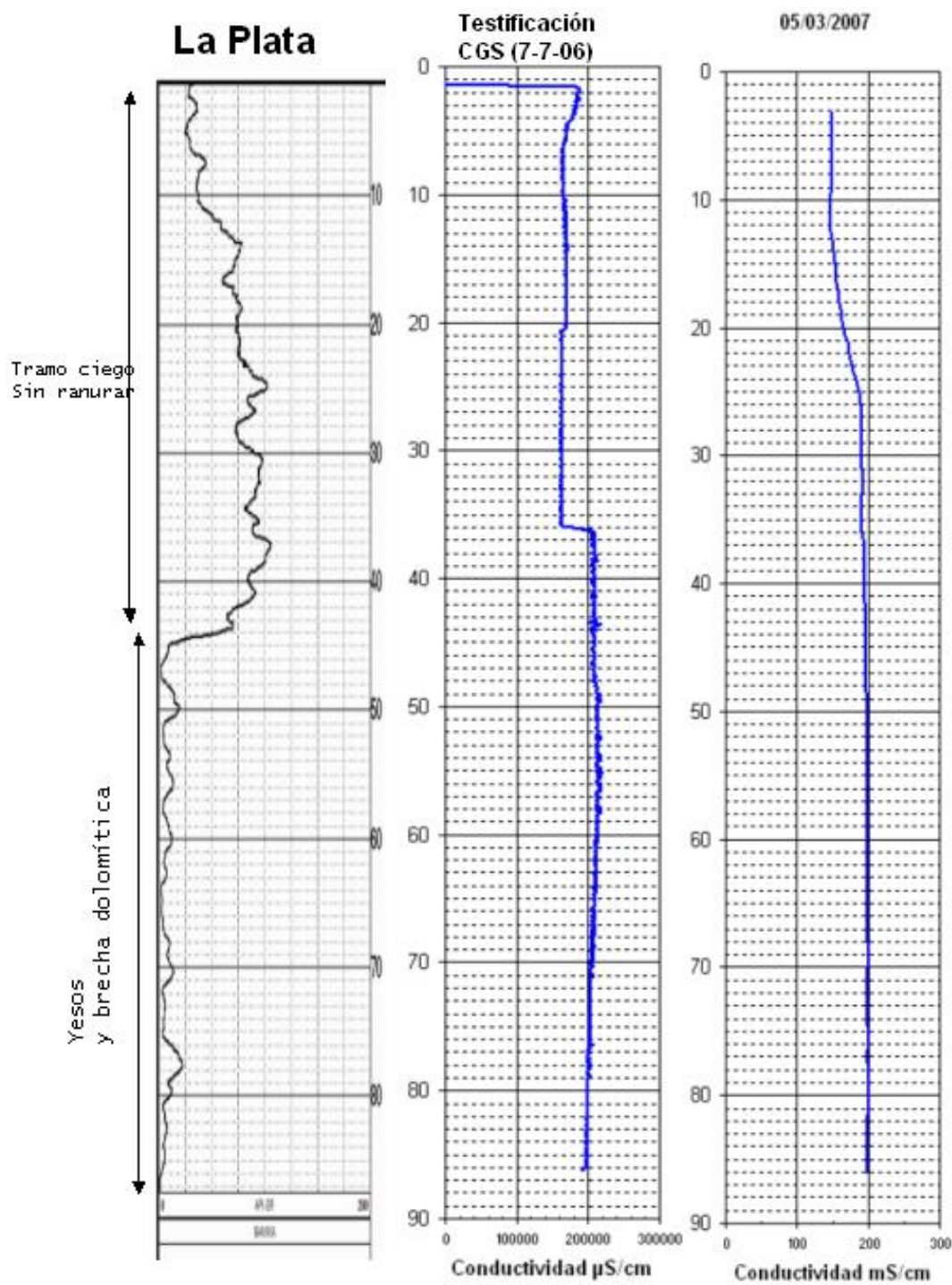
7-3-07



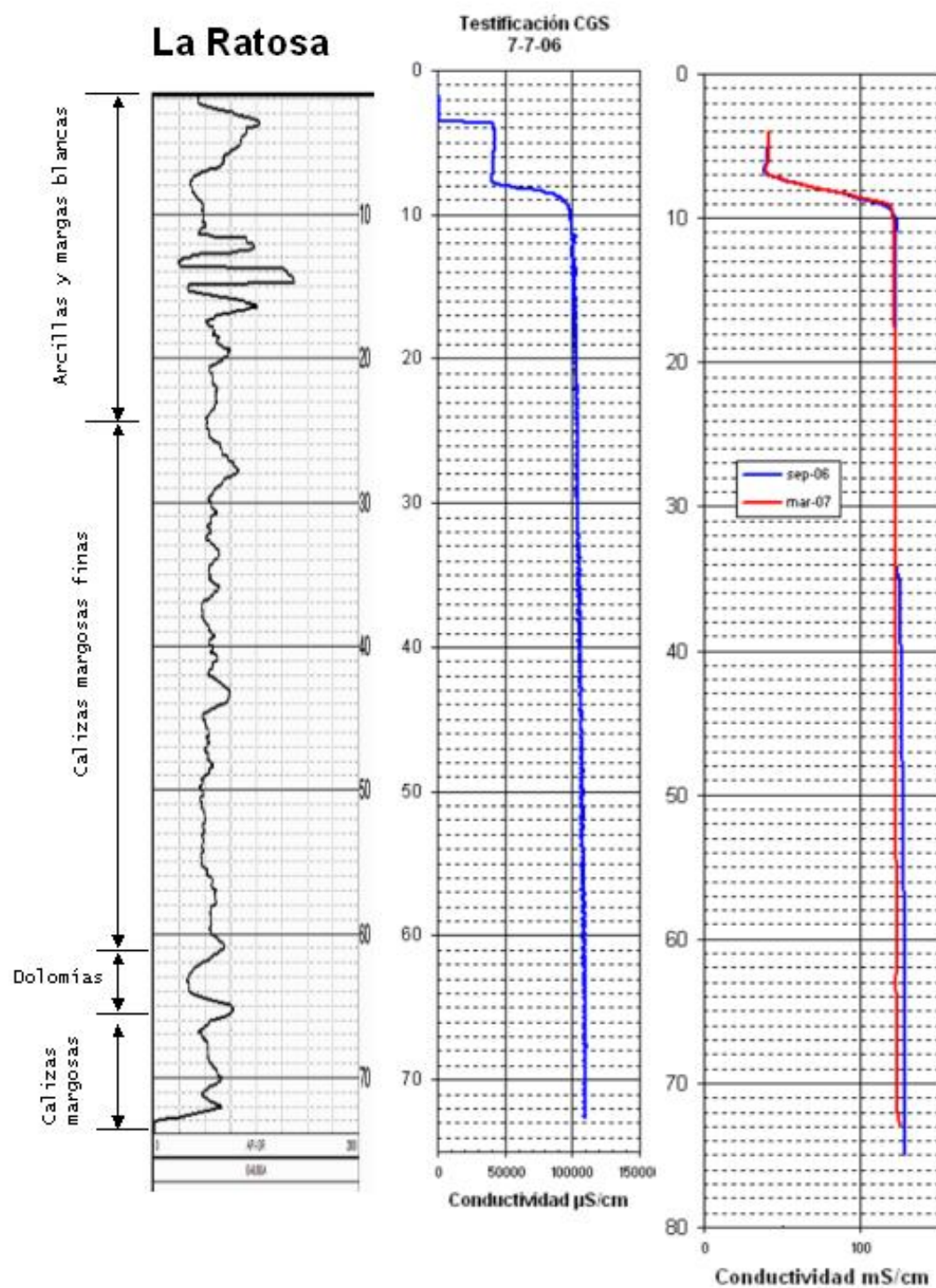
Sondeo situado a unos 1700m al sur del sondeo Blancares (ver registro de conductividad en el Anexo 5), en el punto metro 1686 del perfil Laguna 2 de tomografía. Muestra un contenido salino que se ha incrementado con el tiempo (valor de unos 20mS/cm en toda la columna hasta un cambio brusco a salmueras muy concentradas a unos 90m, desde agua salobre a muy salada. Existe buena correspondencia con el perfil Laguna 2, pues en esa posición, existe un potente embolsamiento de salmueras a partir de los 20-30m de profundidad que resultan en una muy baja resistividad del terreno (hasta 0,5 ohm.m)



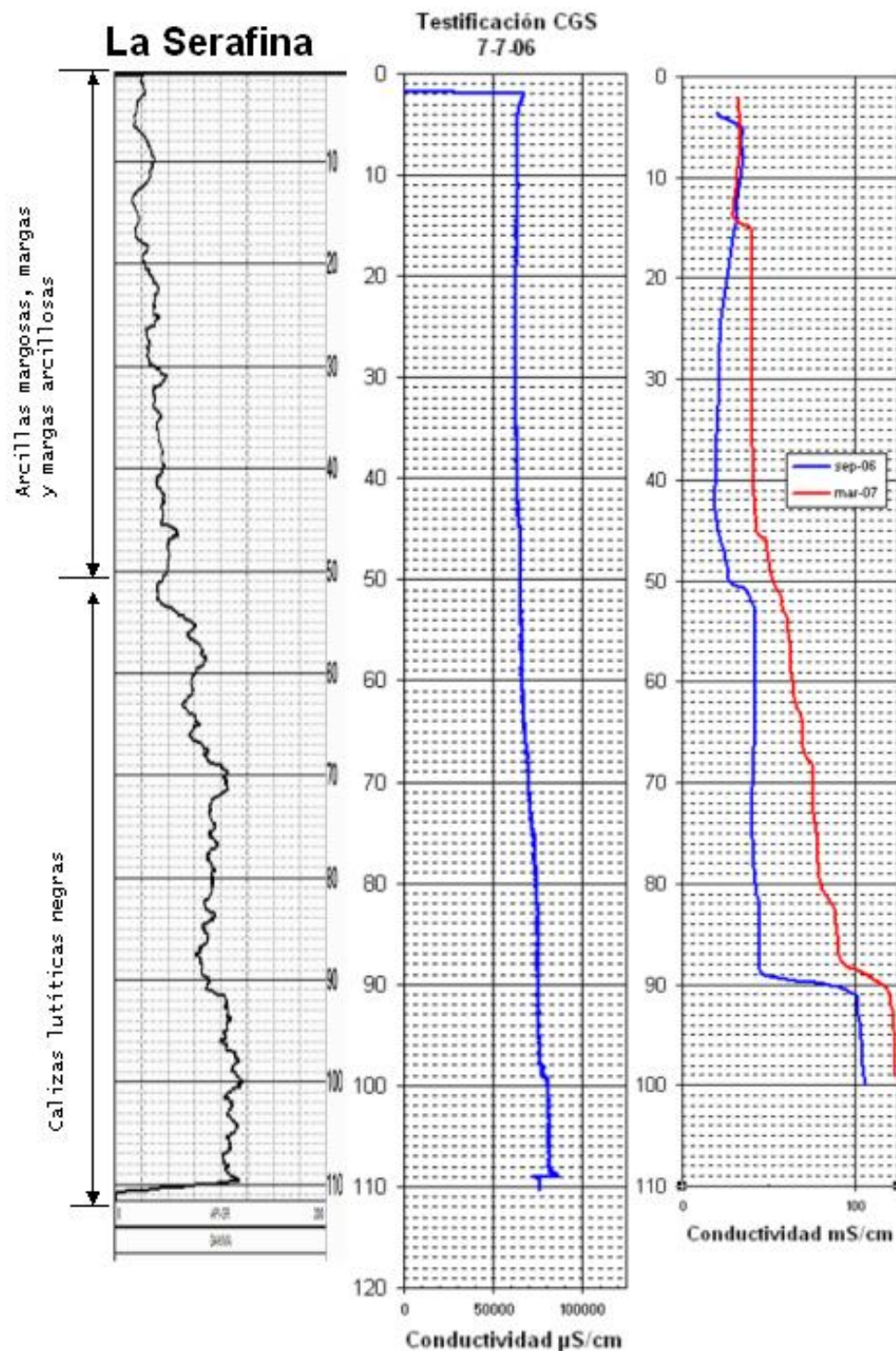
Sondeo al oeste próximo de la laguna, pleno de salmueras en todo su desarrollo, sin gran variación temporal de su fuerte salinidad (solo disminuye levemente en superficie en la segunda testificación, quizá debido a factores estacionales, pues la segunda testificación es en invierno frente a la primera, en verano).



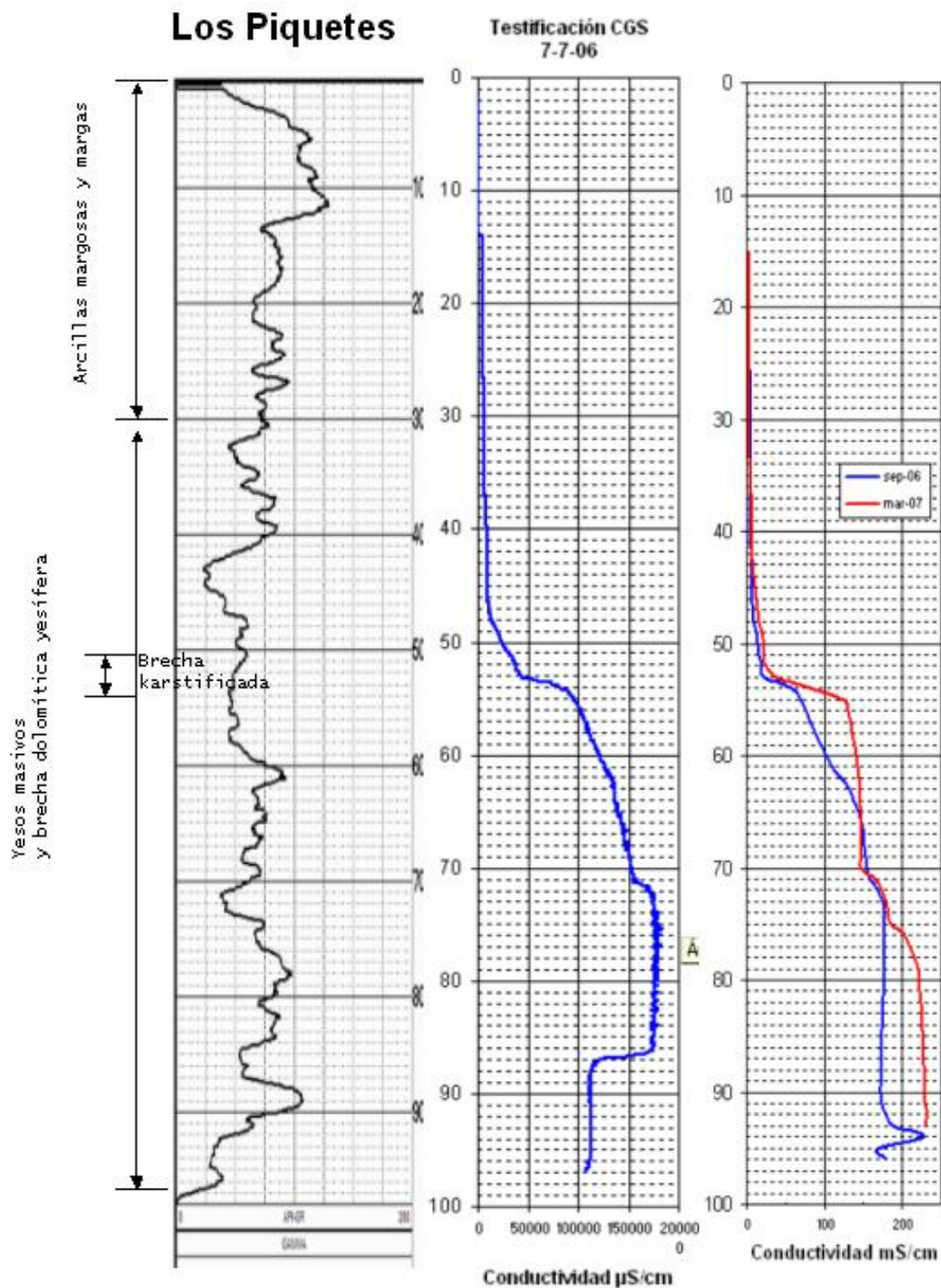
Sondeo perforado en el borde sur-sureste de la laguna y a casi la misma cota de ésta, por tanto la conductividad es muy elevada desde el principio, lo que supone una elevada salinidad en todo su recorrido, con escasa variación temporal Solo una leve disminución superficial quizá debida a factores estacionales)



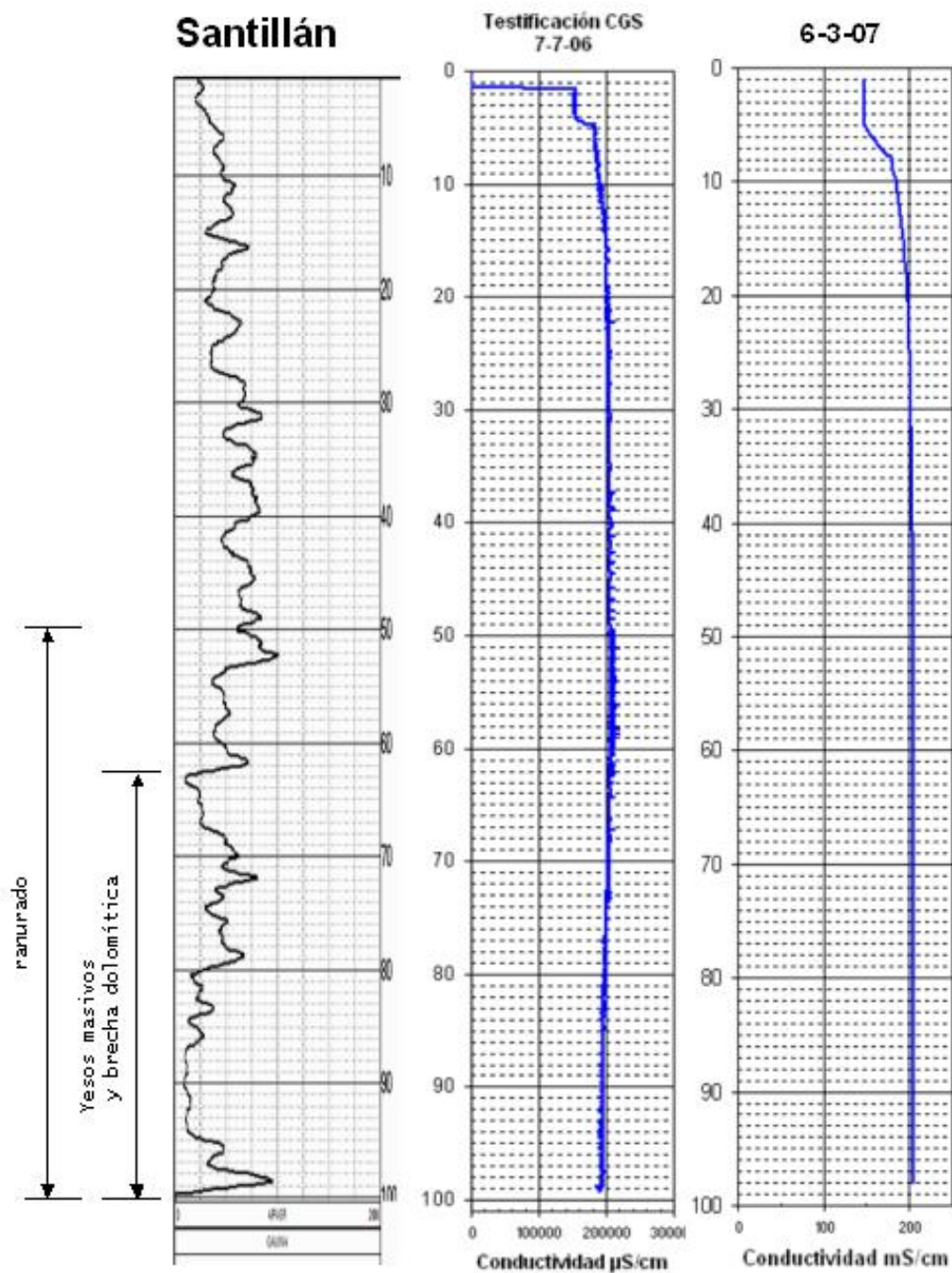
Sondeo en las cercanías de la laguna de La Ratosa (al norte, fuera de la cuenca endorreica). Presenta un perfil bastante conductor desde los 8-10m, por tanto muy salino, con valores que incluso se han incrementado en el tiempo.



Perforación realizada en las proximidades de la pequeña laguna salobre de La Serafina, en la zona norte de la cuenca. Se encuentran aguas saladas y salmueras en todo el sondeo. Una vez estabilizado, parecen acumularse salmueras muy concentradas en su fondo (a unos 90m) al vez que disminuye levemente la salinidad del sondeo, quizá debido a factores estacionales. En todo caso, se muestra la existencia de salmueras bajo la laguna homónima, fuera de la cuenca endorreica, donde persisten las mismas condiciones hidrogeológicas que en ésta.



Sondeo realizado en la zona sur de la laguna, a unos 25m por encima del nivel de ésta y fuera de la cuenca endorreica. Sondeo con aguas dulce o muy levemente salobre en su tramo superior, alcanza salmueras a unos 45-50m de profundidad, en aceptable correspondencia con el perfil 1 de tomografía, aunque las salmueras pueden ser menos habituales en esta zona. Resulta menos explicable la disminución de conductividad en profundidad (a partir de 85m) en las primeras testificaciones, quizá debido a un aporte de agua dulce de diferente procedencia que posteriormente deja de producirse.



Sondeo perforado junto a la desembocadura del Arroyo Santillán en la laguna y próximo a los sondeos Ugr1 y 3. El registro es altamente conductor y muy salino en todo su recorrido, hasta los 100m, dada su proximidad a la laguna y su ambiente “super-conductor”. No presenta variación temporal de conductividad.

ANEXO 4

CAMPAÑA 2005: TESTIFICACIÓN DE SONDEOS DE REFERENCIA

A continuación se incluyen los registros de conductividad medidos en varios sondeos de investigación perforados en 2005 y en otros realizados con anterioridad que fueron reutilizados en este proyecto (de forma que no se dispone de todas las columnas geológicas). Se adjuntan los datos de campo disponibles de los sondeos antes de la fecha de la realización de los primeros perfiles PE de tomografía. Constan de los siguientes capítulos:

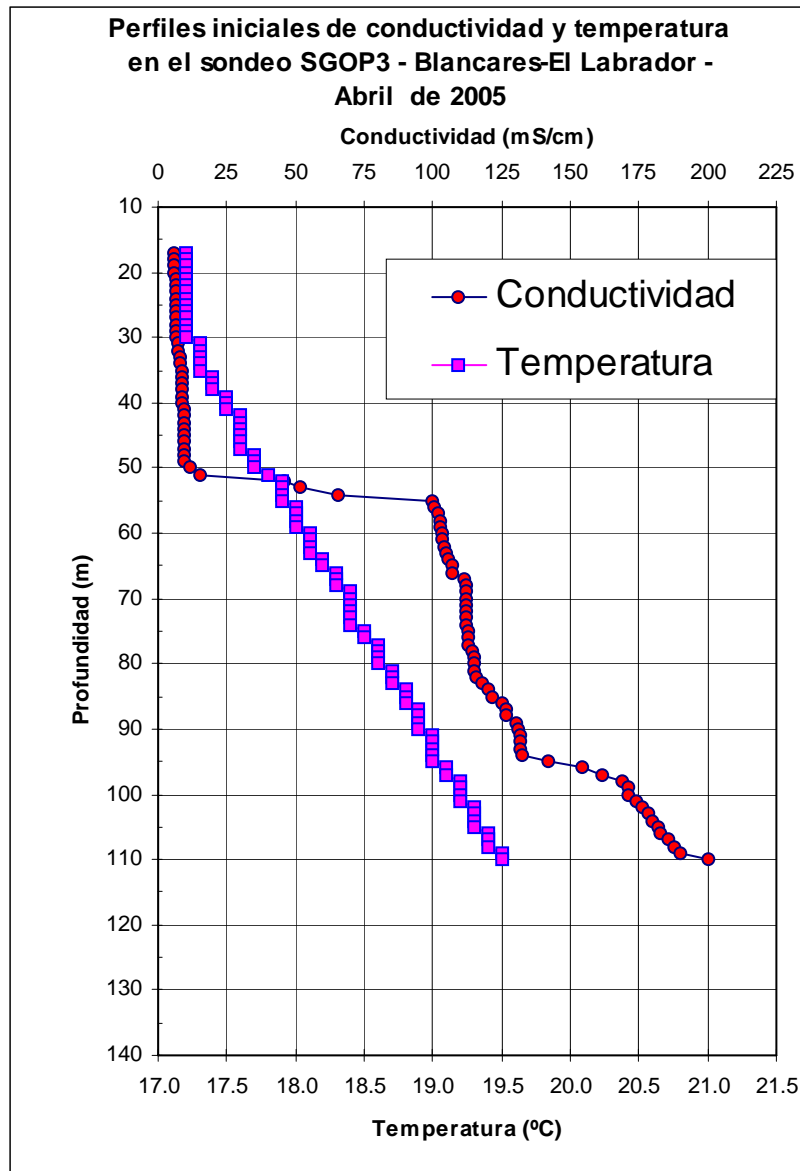
1. Columna geológica resumida.
2. Perfil de conductividad eléctrica (C.E.)
3. Observaciones

Algunas observaciones fueron realizadas en la fecha de testificación o perforación, por lo que incluyen ciertos comentarios a modo de hipótesis, que en muchos casos se han visto confirmadas.

BLANCARES

Columna litológica: no disponible

Perfil de CE:



Observaciones:

Su perfil de C.E. parece corresponderse, dada su situación en el perfil Laguna 2, con el bulbo de baja resistividad (salmueras) observado justo debajo. El cambio de conductividad, a los 50-55m indica el paso de agua dulce o levemente salobre a agua salada, existiendo una notable correspondencia del punto de cambio con el cambio a menor resistividad del terreno medida en ese punto. Ello supone el principal criterio de correlación entre la resistividad de los perfiles y la existencia de salmueras

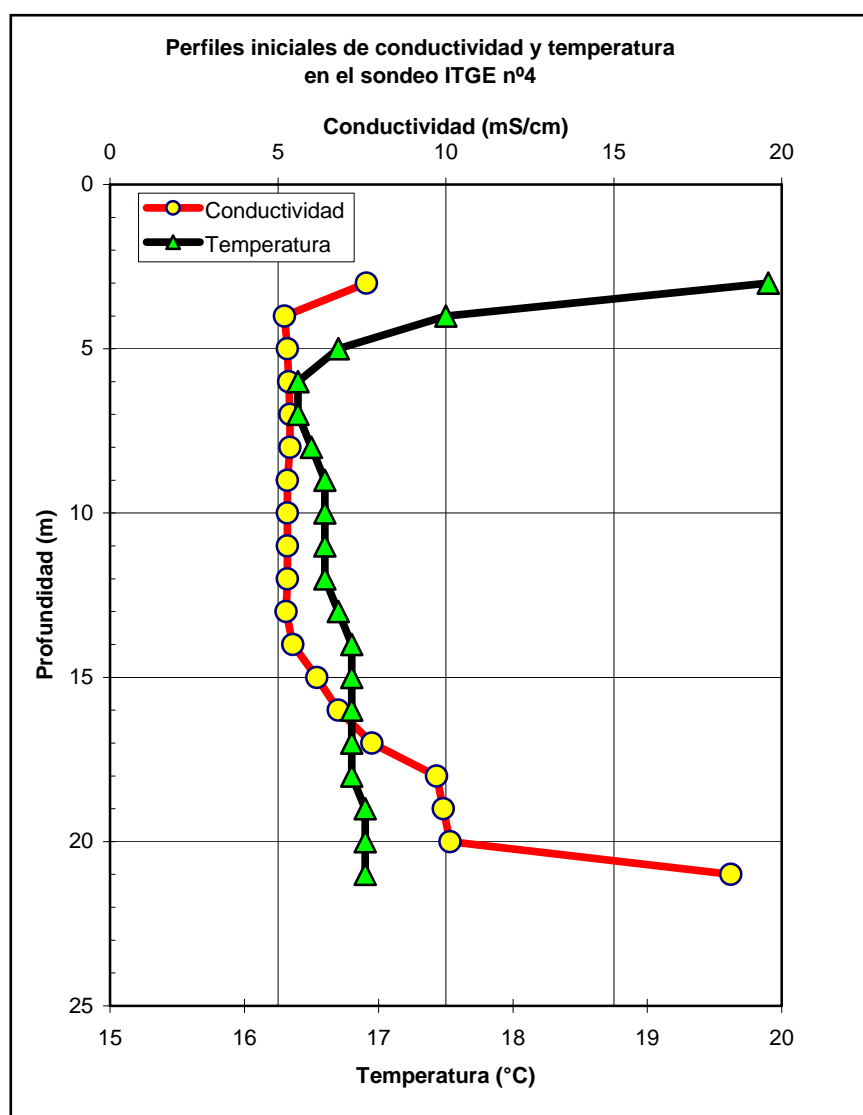
IGME 4 “La Albina”

Columna litológica:

0 – 23 m : Calcarenitas (mioceno superior)

23 – 25 m : Arcillas Grises (*margas triásicas*)

Perfil de CE:



Obs.:

Por su situación en el perfil Laguna 1, su columna litológica y su perfil de CE parecen ser coherentes con la posición del muro de la salmuera y la cuña de agua dulce más superficial que se observan. Presenta aguas salobres con un aumento notable de la salinidad entre 15 y 20 m de profundidad

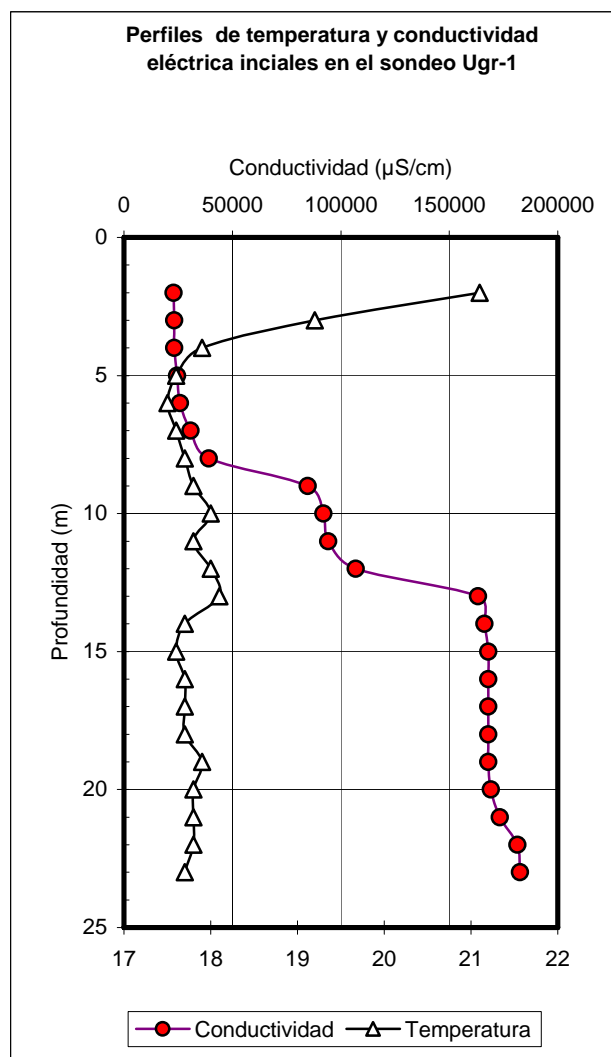
UGr 1.

Columna litológica:

- 0 - 12 m: Arcillas blancas
- 12 - 25 m: Arcillas con arenas – gradualmente más arenosas-
- 25 - 35 m: Calcarenitas con arenas

- 0-12 m: Cuaternario
- 12-35 m: Mioceno superior

Perfil de CE:



Obs.:

Su perfil de CE parece ser coherente con “la descripción de la salmuera” que hace el perfil Laguna 1, en cuanto a la cuña de agua dulce/salobre más superficial que se observa, cambiando a un tramo más salino a 8-12 metros de profundidad

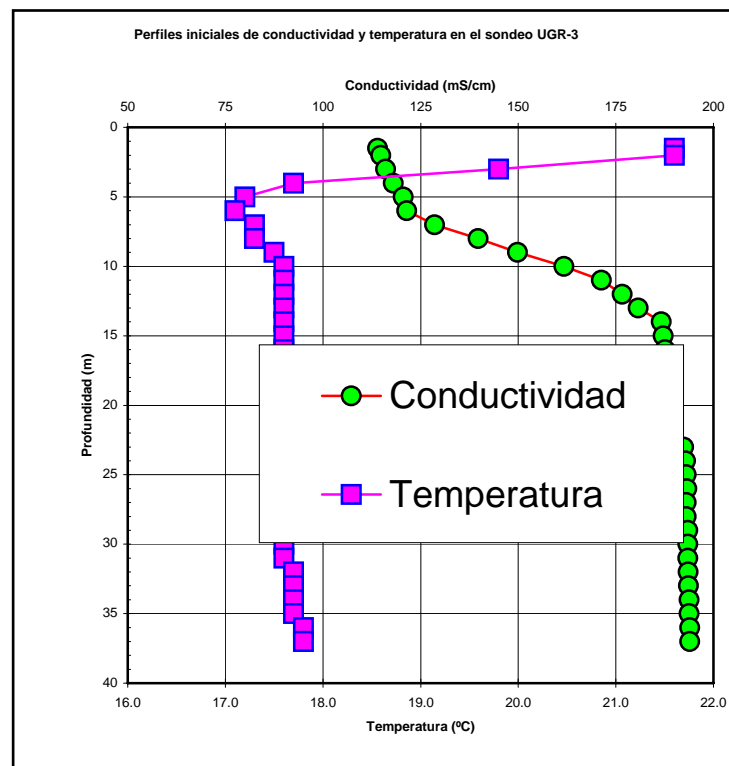
UGr 3

Columna litológica:

- 0 - 3 m: Suelo gris arenoso
- 3 - 6 m: Arcillas blancas
- 6 -12 m: Arcillas limosas azules y marrones con algo de gravilla
- 12-15 m: Limos y niveles de arenas con cantos calizos cementados
- 15-18 m: Calizas con intercalaciones de arenas y gravas
- 18-24 m: Arenas limosas
- 24-27 m: Arcillas limosas con cantos de calizas
- 27-39 m: Calcarenitas.
- 39 m : Margas abigarradas con yesos

- 0-12 m: Cuaternario
- 12-39 m: Mioceno superior
- 39 m : Margas triásicas

Perfil de CE:



Observaciones:

Su columna litológica, con la margas triásicas a 39 m, permite contrastar el muro de la salmuera que indican los perfiles Laguna 1, Laguna 3 y Laguna 4. Parecen ser coherentes con la columna. Su perfil de CE parece ser coherente con “la descripción de la salmuera” que hacen los perfiles Laguna 1 y Laguna 4: Presenta salmueras concentradas en todo su recorrido, con un incremento a 10m.

UGr 2.

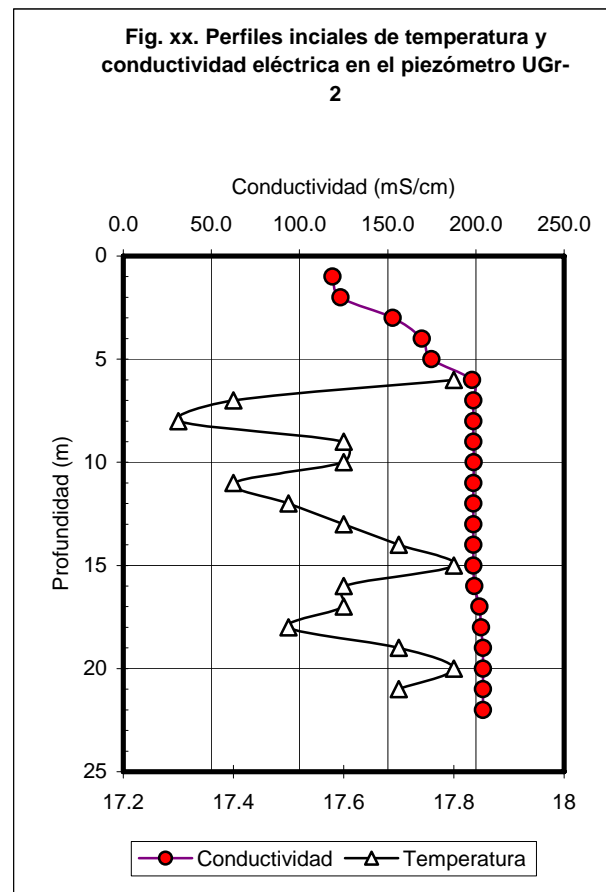
Columna litológica:

- 0 - 16 m: Arcillas blancas con niveles con grandes cristales de yesos
- 16 - 22 m: Arcillas con arenas –gradualmente cada vez más arenosas-
- 22 - 27 m: Calcarenitas
- 27 – 34 m: Arena suelta con matriz limosa

0-16 m: Cuaternario

16-34 m: Mioceno superior

Perfil de CE:



Obs.:

Su perfil de CE parece ser coherente con “la descripción de las salmueras” que hacen los perfiles Laguna 1 y Laguna 4. Hay salmueras muy concentradas en todo su recorrido.

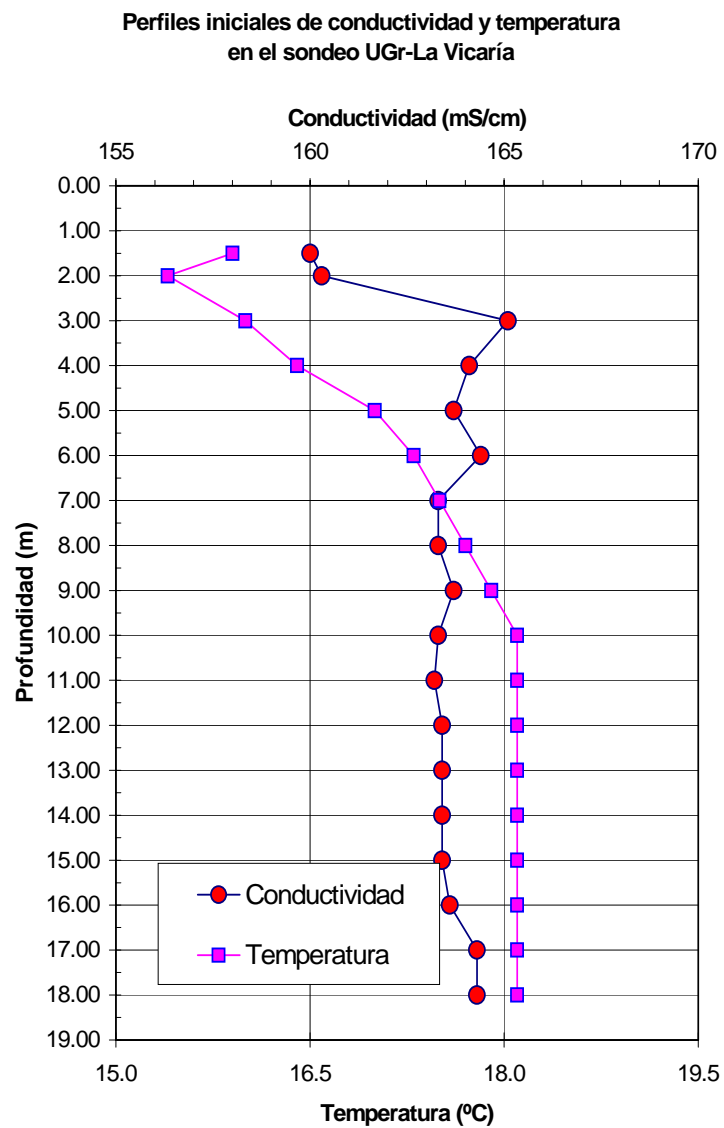
UGr La Vicaría.

Columna litológica:

0 - 18 m: Arcillas rojas con intercalaciones groseras de limo y grava, pasadas orgánicas y otras de yesos microcristalinos:

0-18 m: Cuaternario

Perfil de CE:



Perfil altamente conductor en todo su recorrido, lo que denota presencia de salmueras concentradas en todo su recorrido.

UGr El Charcón.

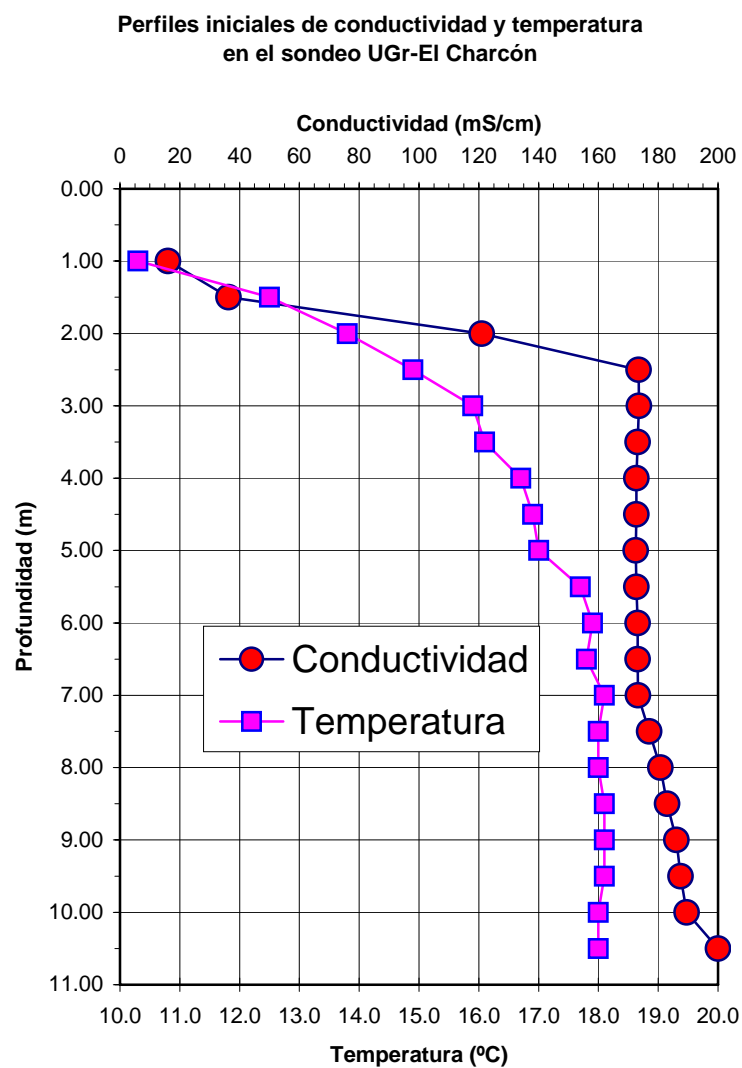
Columna litológica:

0 – 7.8 m: Arcillas margosas blancas con niveles groseros groseras de limo y grava..

7.8 – 15 m: Arcillas rojas con intercalaciones groseras de limo y grava, pasadas orgánicas y otras de yesos pulverulentos

0-15 m: Cuaternario

Perfil de CE:



Este sondeo es altamente conductor en todo su corto recorrido, de modo que presenta una elevada salinidad.

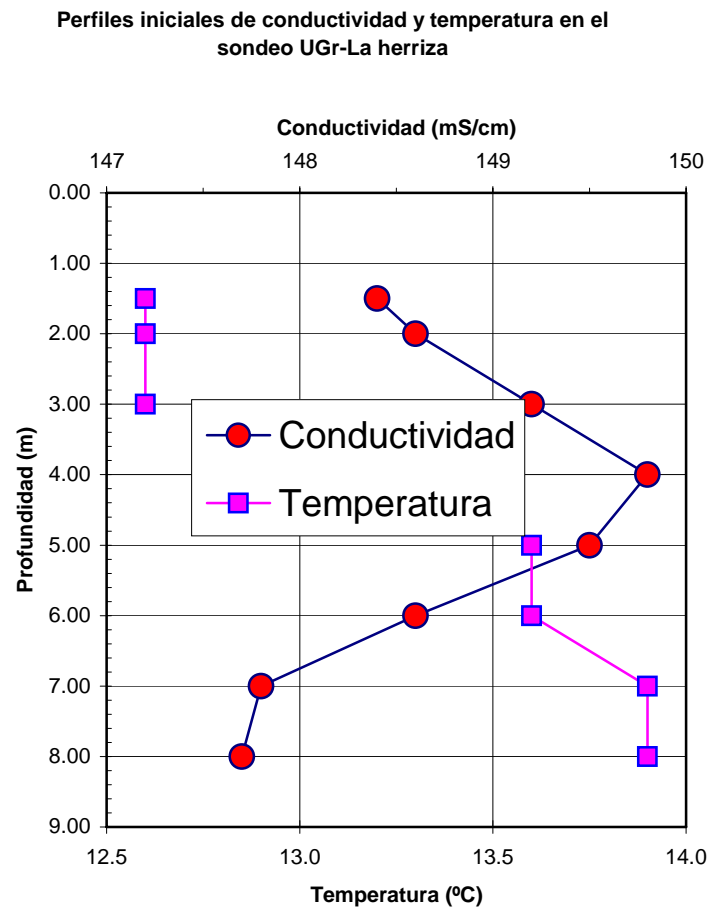
UGr La Herriza.

Columna litológica:

- 0 – 4.7 m: Margosas grises.
- 4.7 – 10.8 m: Arcillas grises con pasadas frecuentes de yeso (microcristalino a selenítico) . Cristales de yesos frecuentes.
- 10.8 – 14 m: Arcillas rojas con intercalaciones groseras blanquecinas. Cristales de yesos frecuentes.
- 14 – 17 m: Arcillas margosas grisáceas

0 - 17 - m: Cuaternario

Perfil de CE:



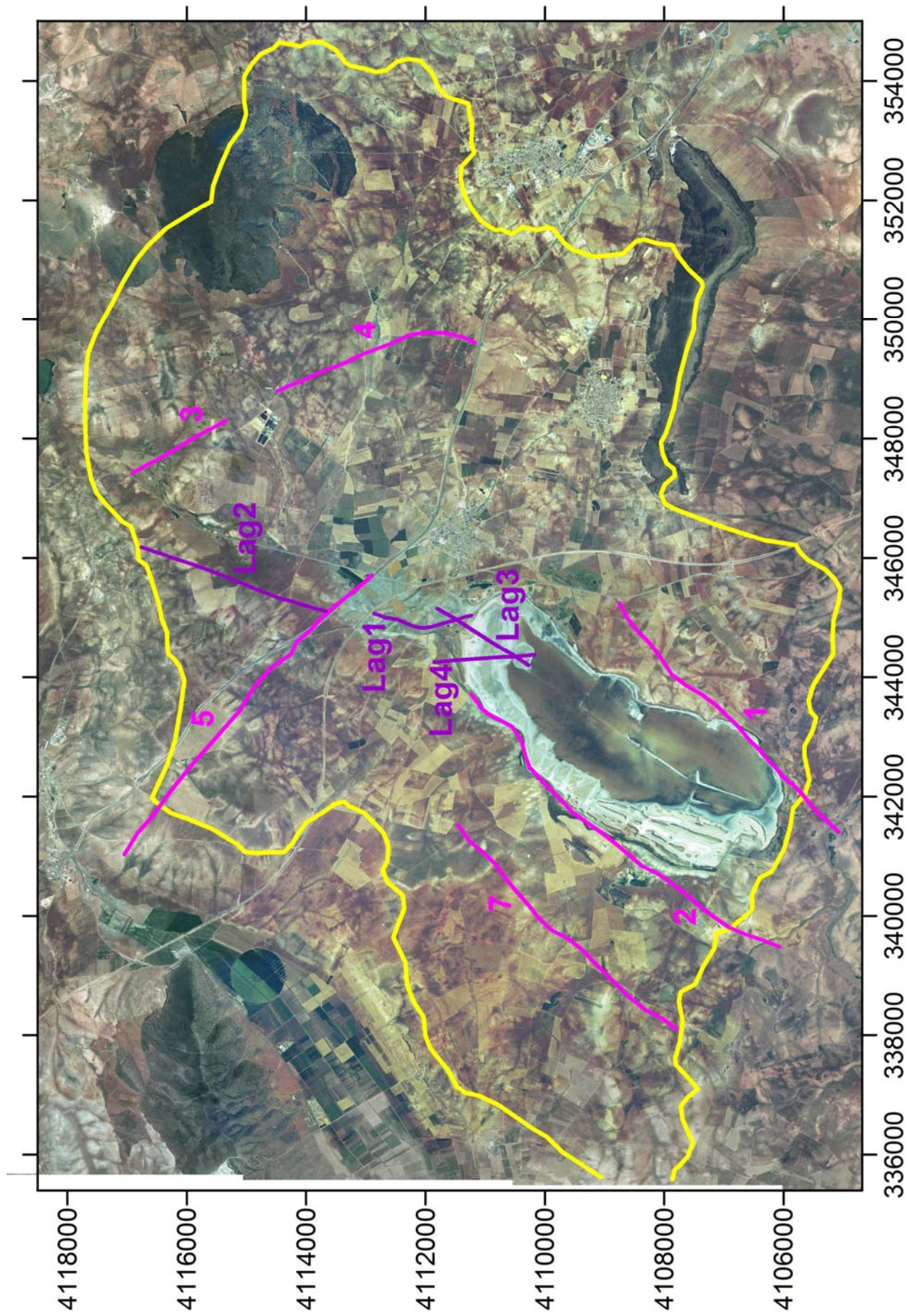
Observaciones:

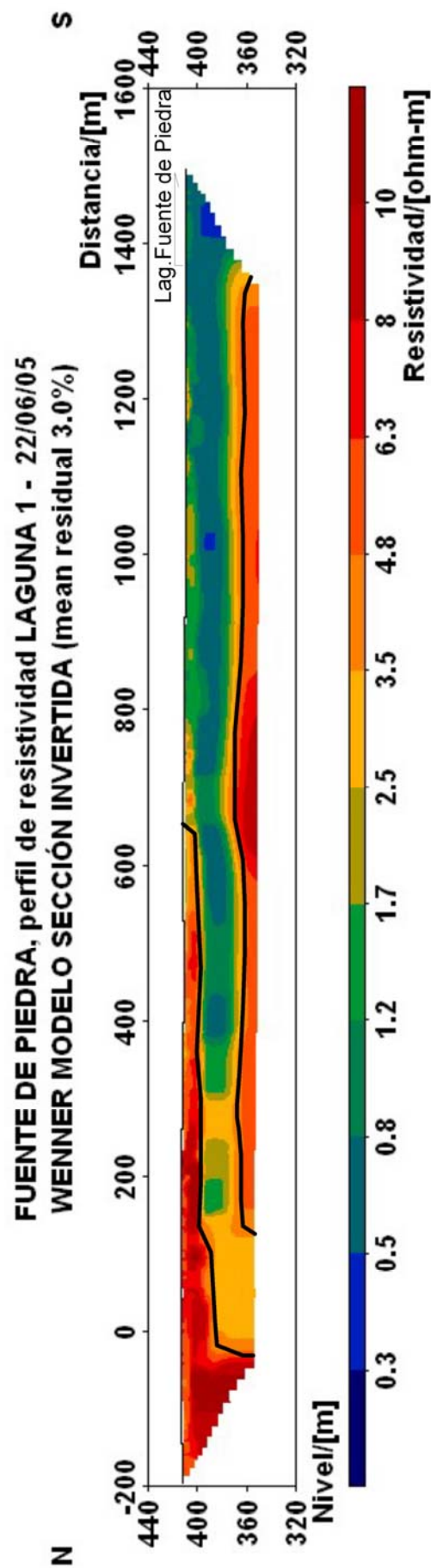
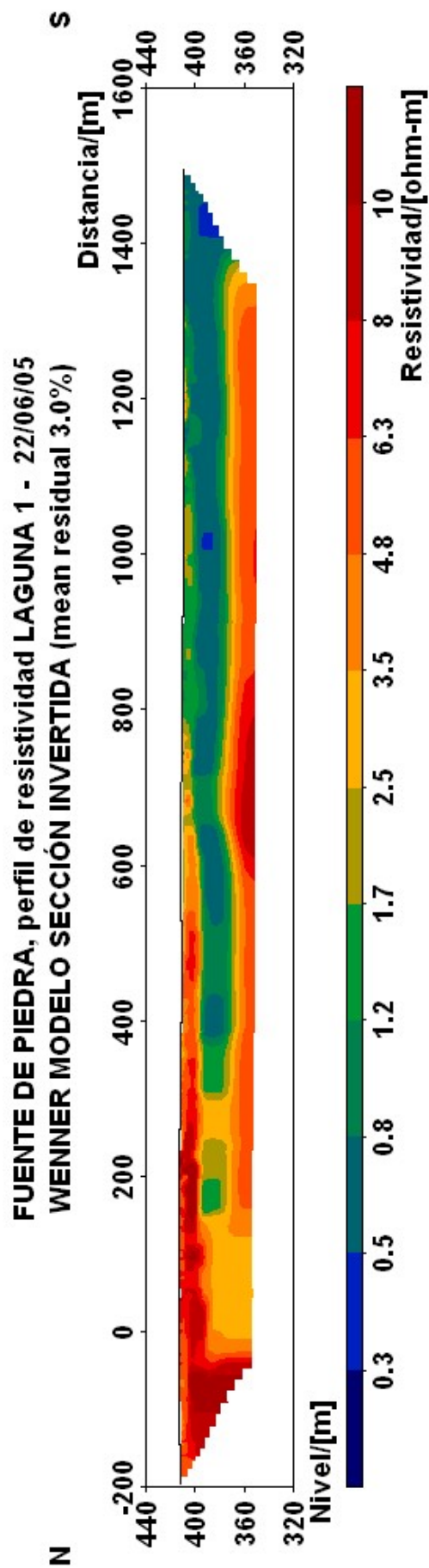
Los sondeos Ugr La Vicaría, El Charcón y La Herriza nos indican con sus columnas litológicas la homogeneidad de los materiales de relleno del vaso y ello, conjuntamente con sus respectivos perfiles de CE nos indican la homogeneidad del cuerpo de la salmuera, al menos mientras estos materiales estén presentes. Ello permitiría entender la homogeneidad del cuerpo con baja resistividad que se ve en los niveles más superficiales del nivel 4 y, probablemente, en el 3 –si se recupera-.

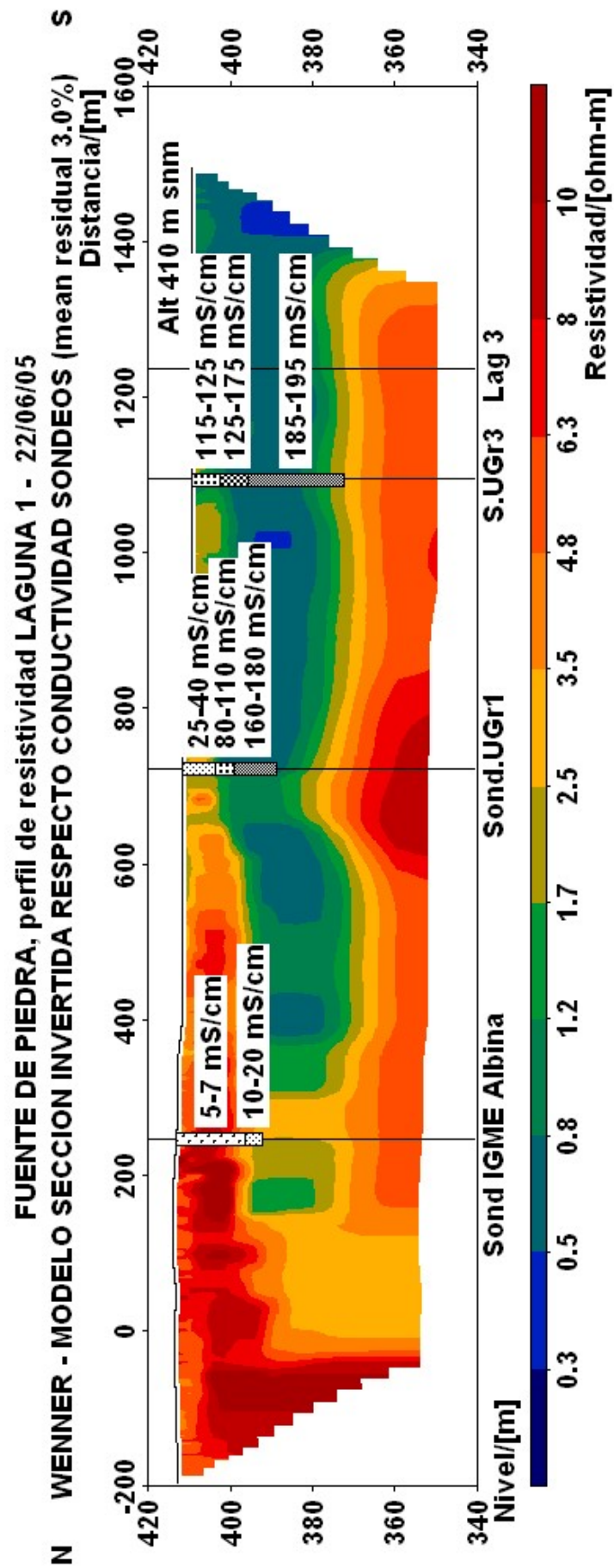
ANEXO 5

TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA : IMÁGENES.

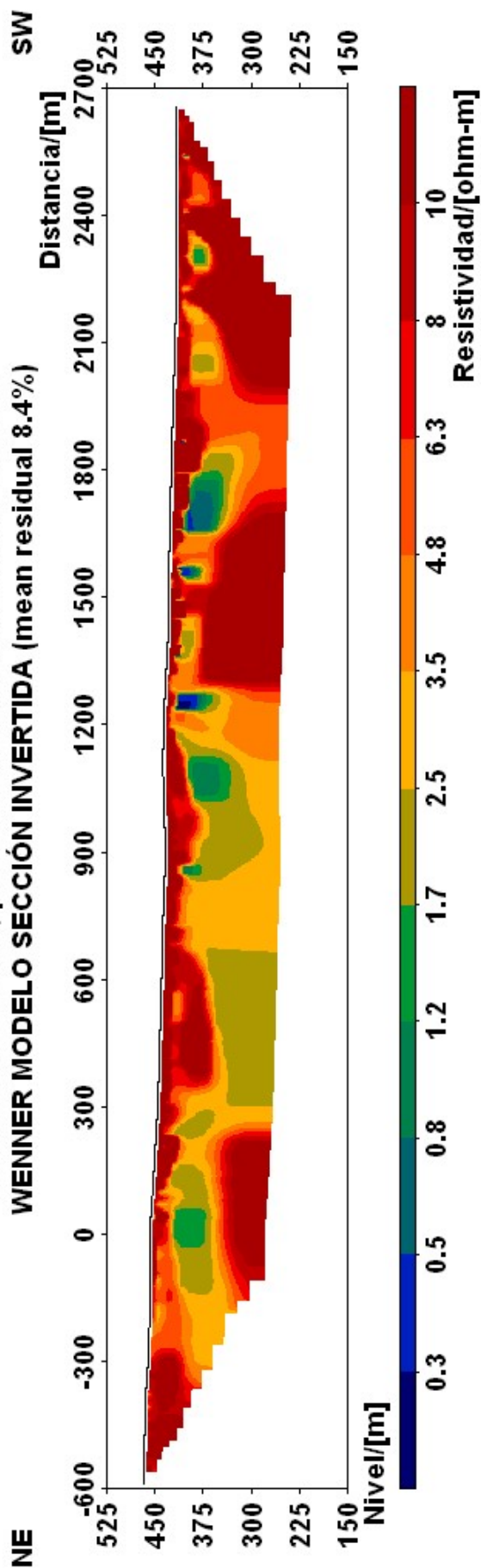
En este anexo se adjuntan, en tamaño grande, todas imágenes de los perfiles de resistividad (tomografía eléctrica) realizados e incluidos en este informe en formato .jpg



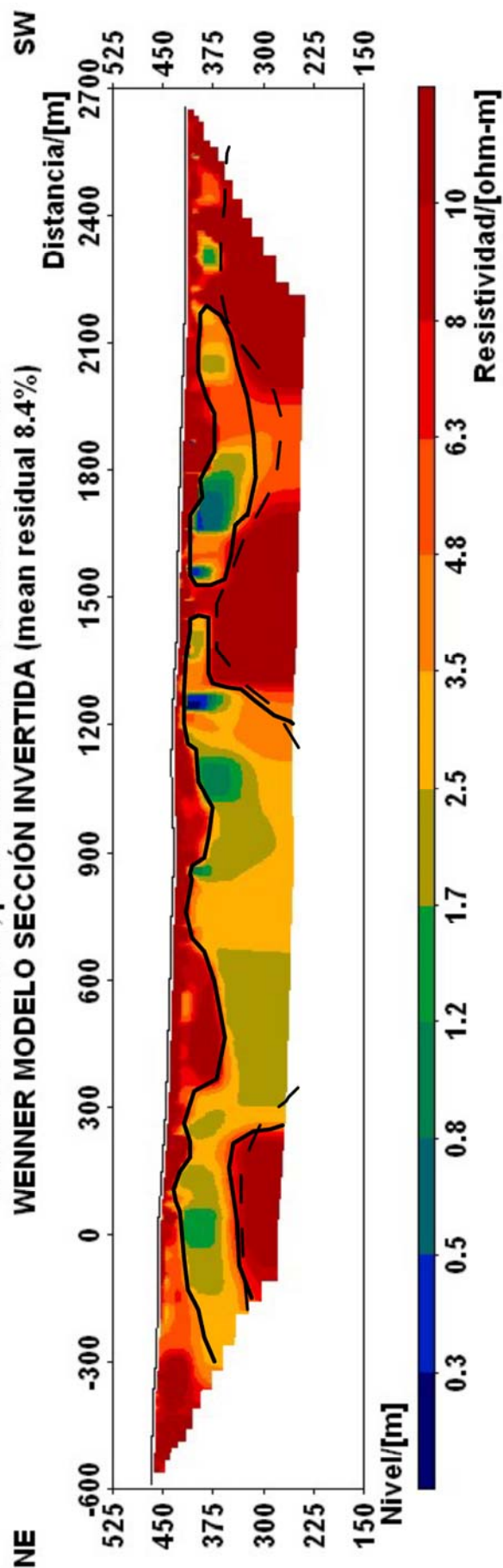


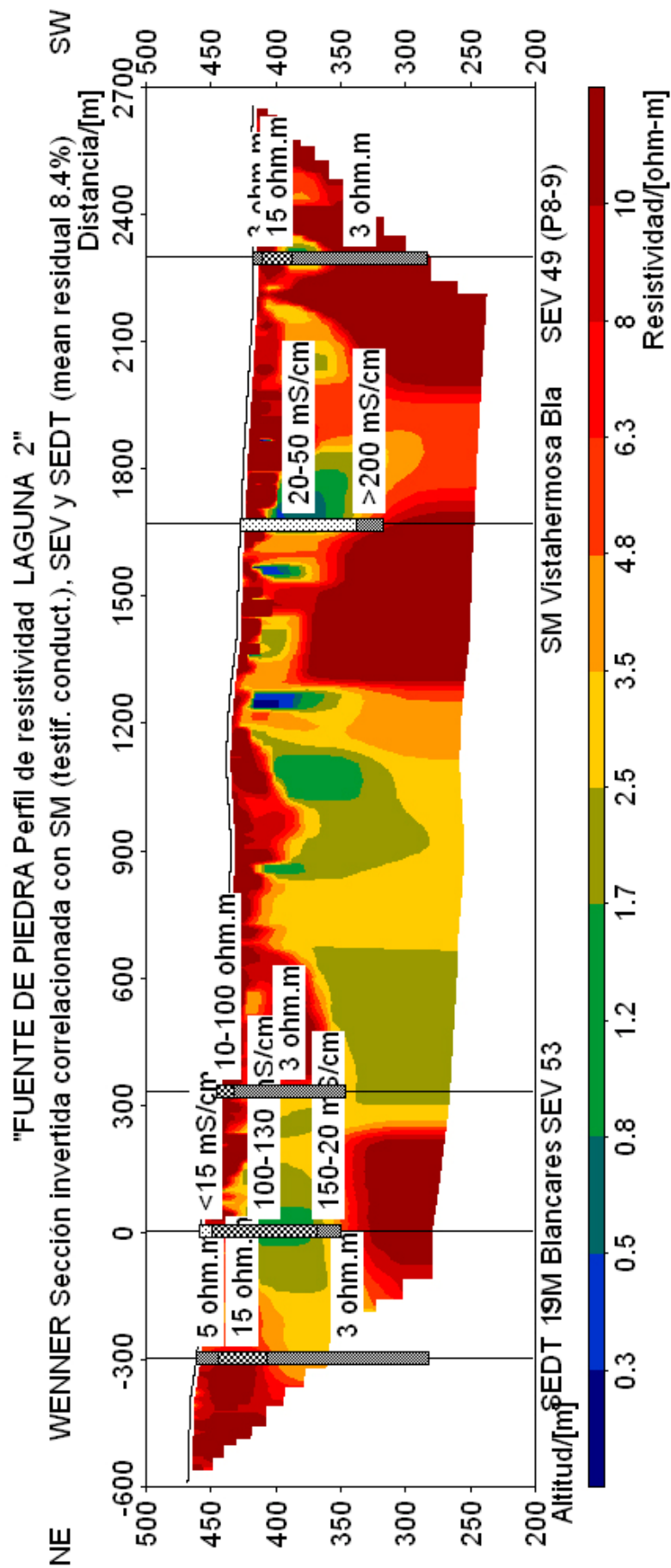


FUENTE DE PIEDRA, perfil resistividad LAGUNA 2 - 28/06/05
WENNER MODELO SECCIÓN INVERTIDA (mean residual 8.4%)

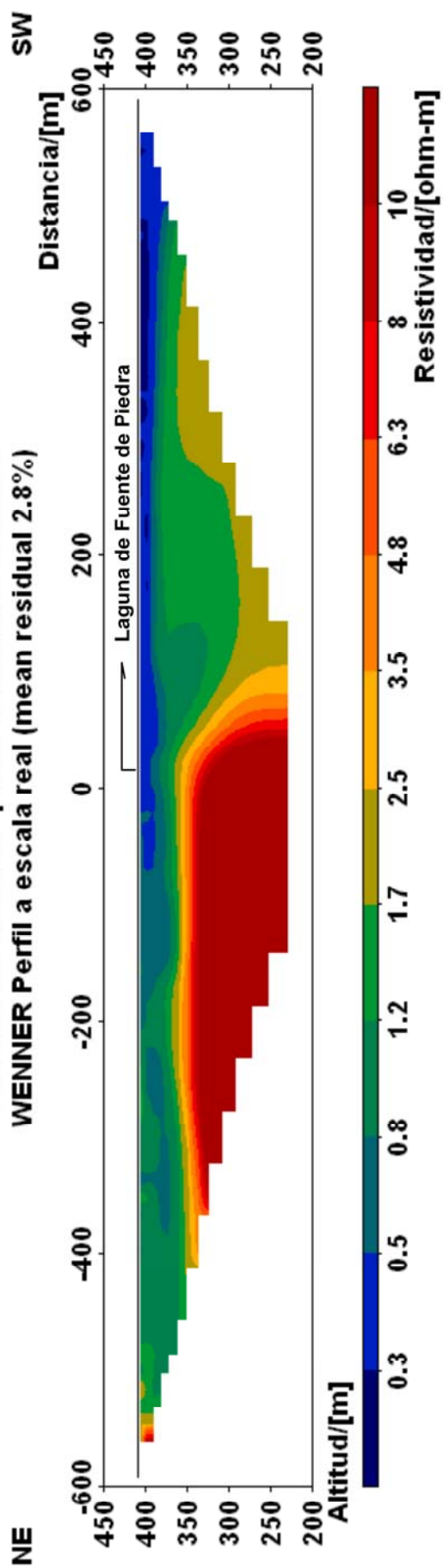


FUENTE DE PIEDRA, perfil resistividad LAGUNA 2 - 28/06/05
WENNER MODELO SECCIÓN INVERTIDA (mean residual 8.4%)

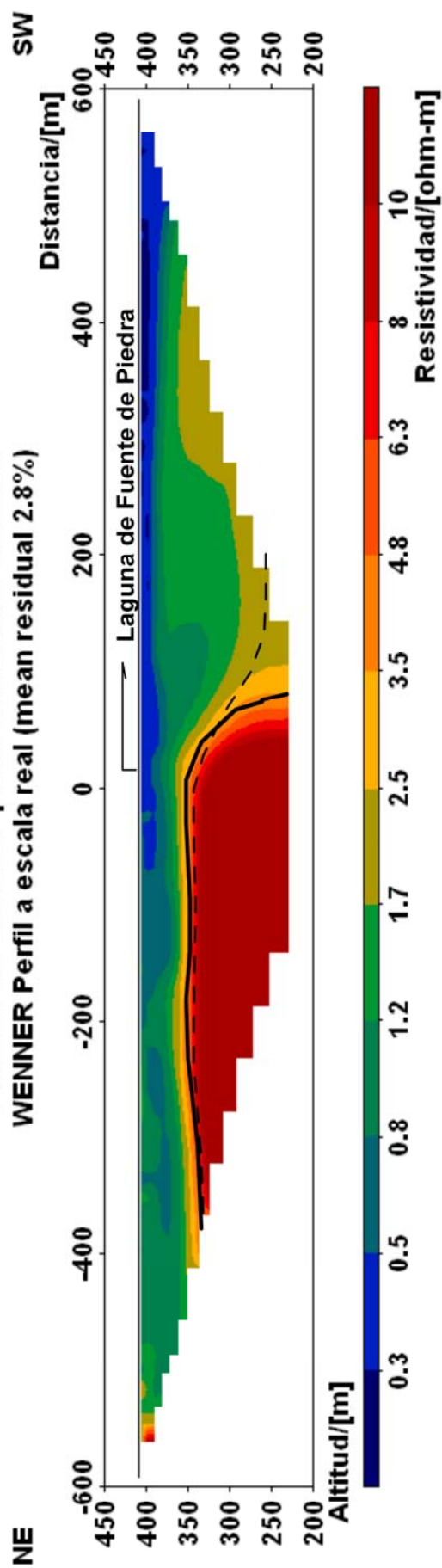


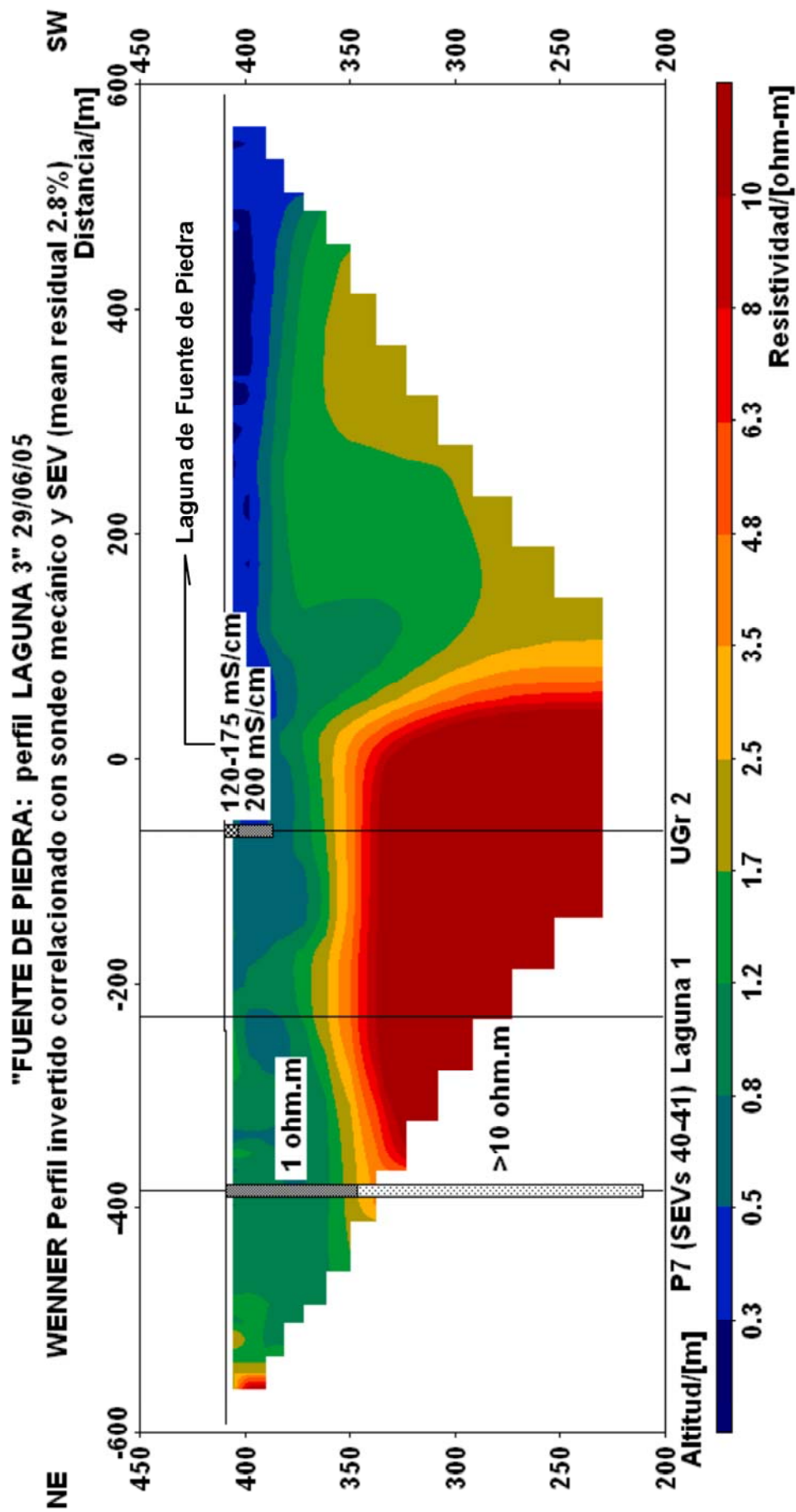


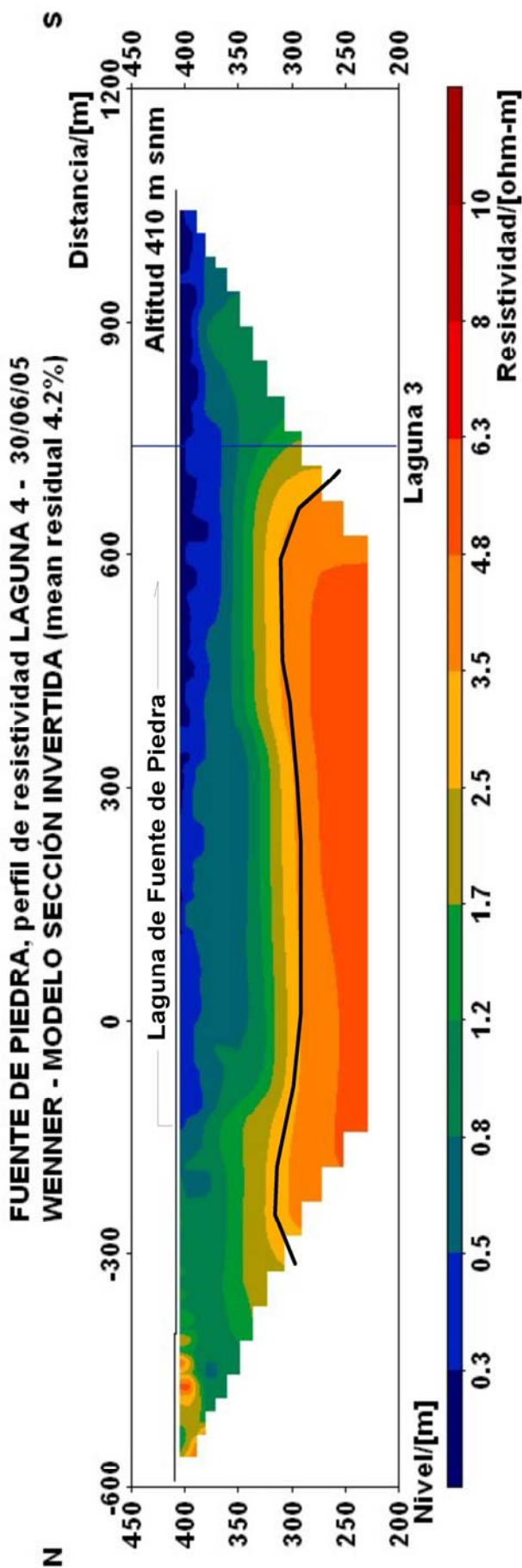
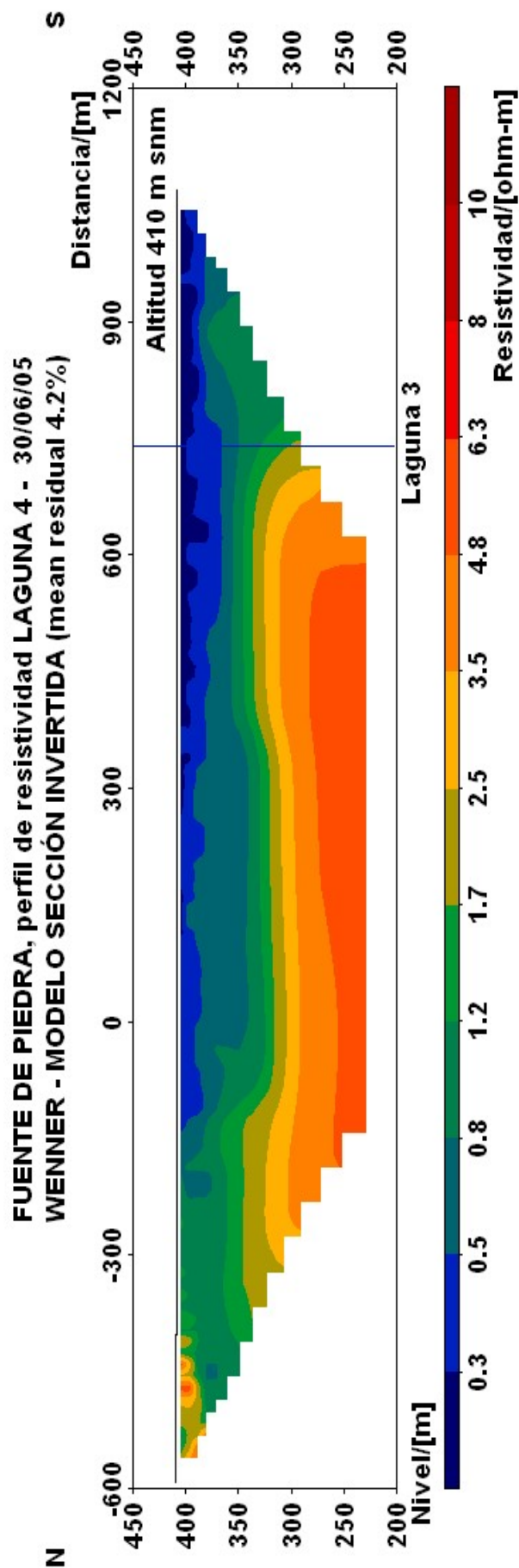
"FUENTE DE PIEDRA: perfil LAGUNA 3" 29/06/05
WENNER Perfil a escala real (mean residual 2.8%)

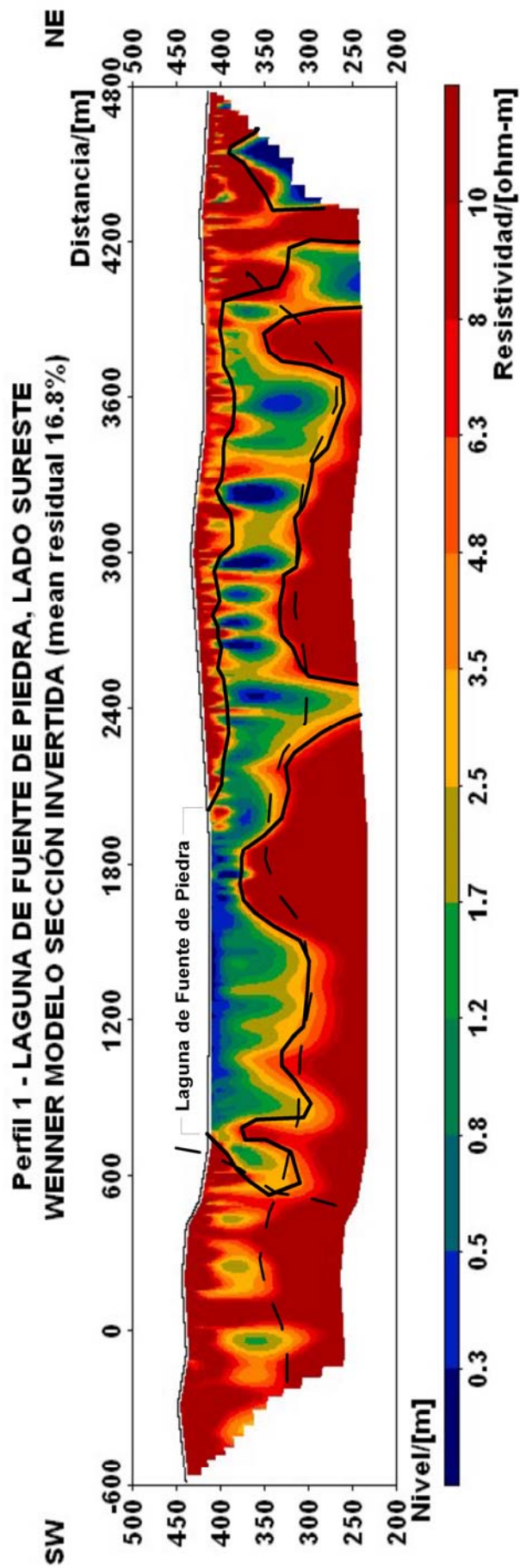
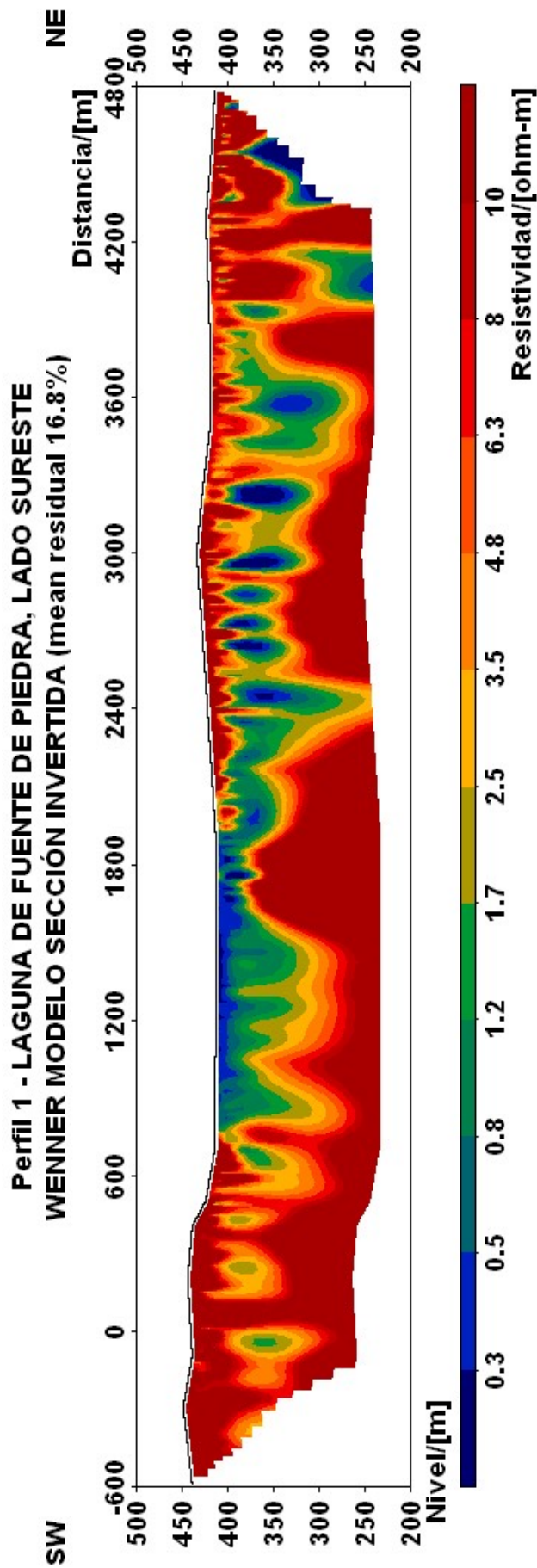


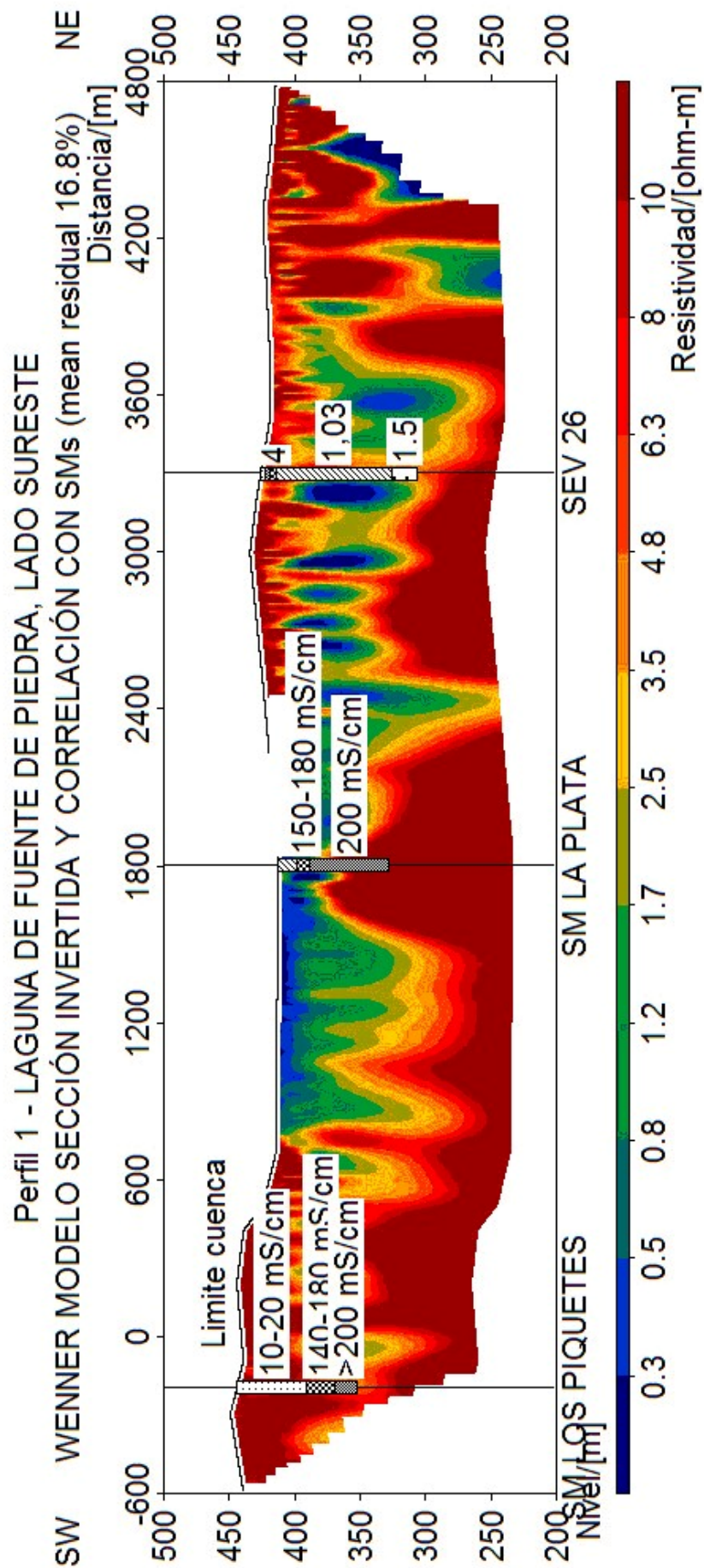
"FUENTE DE PIEDRA: perfil LAGUNA 3" 29/06/05
WENNER Perfil a escala real (mean residual 2.8%)

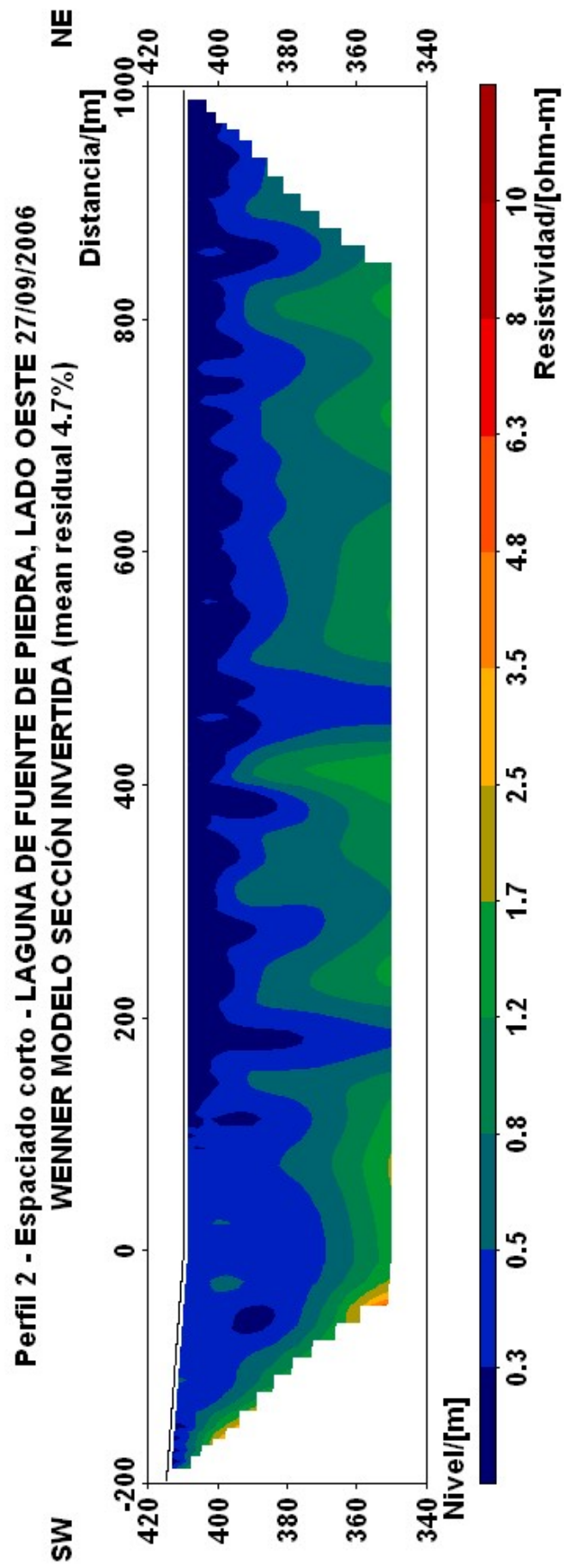






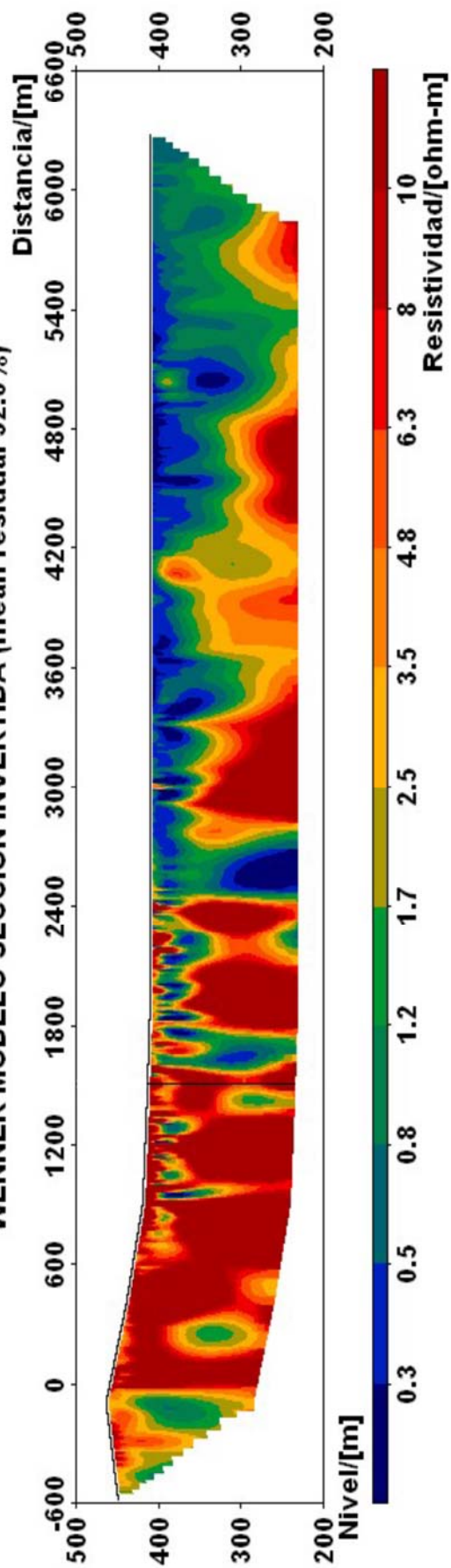






Perfil 2 - CANTARRANAS, LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA

WENNER MODELO SECCIÓN INVERTIDA (mean residual 32.6%)



Perfil 2 - CANTARRANAS, LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA

WENNER MODELO SECCIÓN INVERTIDA (mean residual 32.6%)

