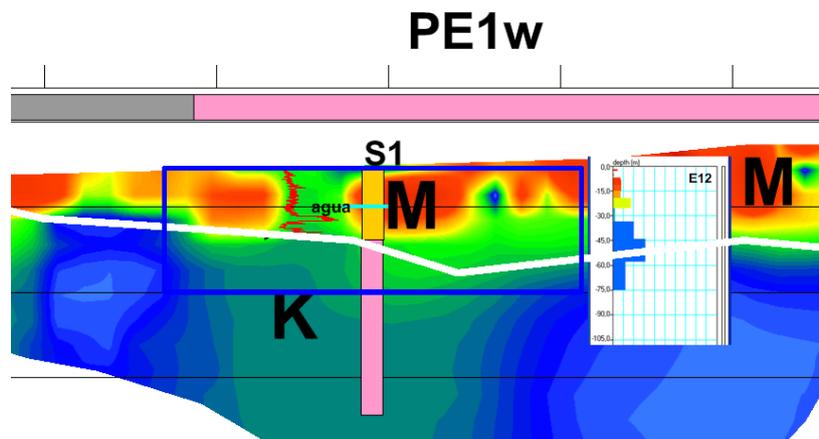


PROYECTO
FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE HUMEDALES RELACIONADOS
CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL EBRO

HUMEDALES-EBRO



INTERPRETACIÓN INTEGRADA DE SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA,
PERFILES DE RESISTIVIDAD Y TESTIFICACIÓN DE SONDEOS EN LAS
LAGUNAS DE ESTAÑA (HUESCA). 2010.

Juan Luís Plata Torres

Grupo de Geofísica del IGME
Tres Cantos
Mayo 2010



INDICE

1 INTRODUCCIÓN

2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS ANTERIORES

3 CAMPAÑA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA DE 2009

4 SECCIONES GEOELÉCTRICAS OBTENIDAS Y SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO A UTILIZAR EN LA INTERPRETACIÓN

5 CAMPAÑA DE TESTIFICACIÓN DE SONDEOS

6 ANÁLISIS CONJUNTO DE LOS DATOS DE LA TESTIFICACIÓN, PE Y SRM

7 PARÁMETROS PETROFÍSICOS DEDUCIDOS DE LA TESTIFICACIÓN Y PE

8 CARTOGRAFÍA GEOELÉCTRICA DE LA SUPERFICIE

9 INTERPRETACIÓN DE LAS SECCIONES GEOELÉCTRICAS

10 MODELO GEOLÓGICO A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTIVIDAD A VARIAS PROFUNDIDADES

11 SITUACIÓN GEOLÓGICA DEL VOLUMEN INVESTIGADO POR LOS SRM SEGÚN LA RESISTIVIDAD

12 PARÁMETROS DETERMINADOS POR LOS SRM

13 GEOMETRÍA DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DEDUCIDO DE LOS SRM Y DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTIVIDAD

14 RESUMEN Y CONCLUSIONES

ANEXO I Ficheros de Datos de Perfiles Eléctricos y Testificación Geofísica

ANEXO II PROCESO DE DATOS GEOELÉCTRICOS

ANEXO III MAPAS DE RESISTIVIDAD (ISOLÍNEAS CONTORNO LLENO)

ANEXO IV MAPAS DE RESISTIVIDAD A DIFERENTES PROFUNDIDADES CON CLASIFICACIÓN DE SRM $E_0(q)$ y $w(z)$

ANEXO V MAPAS IMAGEN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO A DIFERENTES PROFUNDIDADES

ANEXO DIGITAL

En los trabajos contemplados en este Informe han participado las siguientes personas:

- Felix M. Rubio Sánchez-Aguililla: proceso de inversión de los perfiles eléctricos.
- Cristina Pérez Bielsa: realización de la cartografía geológica y geología de sondeos mecánicos.
- Juan Luis Plata Torres: análisis e interpretación de los datos, confección de gráficos y redacción del Informe.

1 INTRODUCCIÓN

En el "INFORME DE LAS ACTIVIDADES GEOFÍSICAS EFECTUADAS EN 2008 EN LAS LAGUNAS DE ESTAÑA (HUESCA)" (abril de 2009, Sistema de Información Documental del IGME código **63764**), se recogen los trabajos efectuados por el Grupo de Geofísica del IGME para el Proyecto FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE HUMEDALES RELACIONADOS CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL EBRO 2008-2010.

Dichos trabajos, consistentes en la medición de 4 perfiles de tomografía eléctrica, con un total de 4350 m, y de 18 Sondeos de Resonancia Magnética SRM, tenían como objetivo proporcionar información geofísica para desarrollar un modelo hidrogeológico que permita determinar las relaciones entre el agua subterránea y las lagunas y establecer límites hidrogeológicos en su entorno. En particular, se trata de estudiar la continuidad en profundidad de los materiales cartografiados en la superficie (limos con cantos sueltos del Cuaternario, arcillas y yesos del Keuper, y dolomías y calizas del Muschelkalk) y el contacto entre las calizas del Cretácico Superior (Sinclinal de Estopiñán) y el Keuper.

El contenido y las principales conclusiones de estos trabajos se resumen en el capítulo siguiente de este Informe. En una primera interpretación de las secciones geoeléctricas se asignaron las bajas resistividades a terrenos del Keuper. Al comparar la información de los SRM con las secciones de resistividad, sin tener en cuenta el factor de integración volumétrica de las medidas de SRM, se llegó a la conclusión de que la resistividad baja debía asignarse al Muschelkalk con agua (a pesar de que se advertía de que considerar 40 ohm.m para las calizas hidratadas hacía dudar de esta asignación). Por otra parte, se establecieron una serie de conclusiones de permeabilidad basadas en la inversión con un modelo 1D de los SRM y en los valores del parámetro de tiempo de relajación T_1^* . En esta interpretación quedaron de manifiesto una serie de incongruencias y de dudas de asignación de litologías a resistividades y contenidos en agua, por lo que se recomendó la realización de nuevas mediciones geoeléctricas, así como la ejecución de varios sondeos mecánicos y su testificación geofísica. Estos nuevos trabajos y su interpretación conjunta con los anteriores es el objetivo del presente Informe, cuyo contenido se estructura de acuerdo con el siguiente esquema:

- Interpretación geológica (litológica) de las secciones geoeléctricas
- Verificación de la situación geológica y geometría del volumen investigado por los SRM
- Identificación de las rocas que contienen agua, definiendo la geometría del acuífero a lo largo de las secciones geoeléctricas
- Extrapolación de la geometría del acuífero a toda el área mediante mapas a diferente profundidad.

La metodología seguida en esta interpretación va a consistir en:

- Análisis de los datos de la testificación y de la columna litológica de los sondeos mecánicos, considerando además la resistividad de los perfiles eléctricos y los resultados de los SRM más próximos a los sondeos mecánicos.
- Correlación de la cartografía geológica de superficie con los valores de resistividad más someros en los perfiles eléctricos. Deducción de los rangos de resistividad de las litologías presentes.
- Interpretación integrada de las secciones geoelectricas, proponiendo los posibles modelos geológicos, tanto en los perfiles como en mapas de resistividad a varias profundidades.
- Análisis de la situación geoelectrica de los SRM y propuesta de un modelo de distribución geométrica del acuífero

Se presentará además una nueva síntesis de los parámetros deducidos de los SRM (porosidad o contenido en agua libre y permeabilidad relativa) corregidos de los efectuados en el anterior informe, al tener en cuenta la fiabilidad del modelo de inversión utilizado y del valor del tiempo de relajación T_1^* .

2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA CAMPAÑA GEOFÍSICA DE 2008

En el mencionado Informe de 2009 se recoge, en cuanto a los Sondeos de Resonancia Magnética:

- Una **descripción de las bases teóricas** de ambos métodos geofísicos, a la que se hará referencia en el presente Informe.
- Un **análisis de la medición de los SRM en campo**, a fin de garantizar la validez de los datos obtenidos, que pueden calificarse como de alta calidad.
- Un **análisis de los resultados de campo** (señal del agua $e(t)$ y curva del SRM $E_0(q)$), concluyendo que puede asegurarse la existencia de agua en el subsuelo en todos los emplazamientos, aunque en menor medida en el SRM E1 y E13 (en el mismo lugar) y en el E11, por el ruido electromagnético existente. Se aprecia una variación importante de la cantidad de agua detectada en los diferentes sitios, con independencia del tamaño de la antena utilizada, lo que es un indicador de la heterogeneidad del acuífero.
- Determinación de los parámetros del **proceso de inversión** (paso de los datos de campo a la distribución del contenido en agua y de T_1 con la profundidad, curvas $w(z)$ y $T_1(z)$), comprobando que ni el modelo utilizado de matriz del subsuelo ni la regularización del cálculo produjera distorsión en los resultados, que únicamente pueden verse afectados por no cumplirse las condiciones de bidimensionalidad del acuífero.
- **Interpretación** del significado hidrogeológico de los resultados de la inversión, mediante el estudio de la distribución geográfica y geológica de los tipos de SRM en que pueden ser clasificadas sus curvas $w(z)$ - $T_1(z)$, y el trazado de unos perfiles de correlación, cuya mayor ambigüedad reside en la asignación de la litología que pueda dar lugar a la radical diferencia en la permeabilidad con la profundidad, detectada por los SRM.

En cuanto a los Perfiles Eléctricos:

- Se efectuó una primera interpretación en términos geológicos, teniendo en cuenta una asignación teórica para la relación entre la resistividad y la litología.
- Posteriormente se incorporó la información suministrada por los SRM, y, asumiendo que la presencia de agua solamente era posible en materiales del Muschelkalk, se propuso una alternativa de interpretación, asumiendo resistividad muy baja para las rocas calizas.

Las principales conclusiones obtenidas de estos análisis pueden resumirse en las siguientes:

- En todos los SRM en los que existe información de resistividad, por su proximidad a un Perfil Eléctrico, la presencia de agua con altos valores del parámetro T_1 (relacionado con la permeabilidad) se corresponde con una baja resistividad, mientras que los tramos donde, aún detectándose la presencia de agua, T_1 es muy pequeño, se corresponden con terrenos resistentes. Los contenidos en agua no son muy distintos entre ambos tramos y, excepto en los SRM E2 y E14 y los de la zona de Ollas, se trata de valores pequeños, no superando una

media del 4-5 %. Se puso de manifiesto que era necesario aumentar la cobertura de información de resistividad para verificar este comportamiento en todos los SRM.

- Casi todos los SRM están emplazados sobre materiales del Cuaternario, dándose bastantes situaciones en las que hay dudas en cuanto a la asignación de litologías a los tramos con agua detectados. En los SRM E2, E6, E8, E9, E10 y E18 parece evidente que se trata de materiales del Muschelkalk, siendo dudoso para E12, E14, E16 y E17. La poca agua detectada en los SRM E1, E11 y E13, de dudosa inversión, parece corresponderse con terrenos cretácicos. En los SRM E3, E7 y E15, el agua parece encontrarse en materiales del Keuper, extremo este de gran interés en verificar, ya que puede hacer variar los criterios de asignación de otros emplazamientos. Es por lo tanto imprescindible disponer de puntos de control geológico fiables para poder hacer una interpretación más congruente de los datos geofísicos. En este sentido, se recomendó la realización de algunos sondeos mecánicos que permitan conocer la potencia de materiales cuaternarios, la litología real del subsuelo y la naturaleza de las anomalías extremas de resistividad localizadas.

Por su interés para la comprensión del presente Informe, se reproducen a continuación algunos de los comentarios y figuras más representativas de la interpretación hasta ahora efectuada, utilizando para ello la misma numeración de Figuras del Informe de 2009.

Sobre la posición y origen de la información de los SRM

En la interpretación de los SRM, así como en su integración con la información geoelectrónica y de sondeos mecánicos, hay que tener en cuenta que el volumen de terreno involucrado en la respuesta de un SRM es aproximadamente el de un cilindro de base con radio igual al menos una vez y media el diámetro de la antena utilizada, y con una profundidad igual al lado de dicha antena. Por otra parte, de ser cierta la hipótesis de que el agua puede estar contenida en cavidades cársticas, es evidente que su distribución 3D no puede determinarse con las mediciones realizadas.

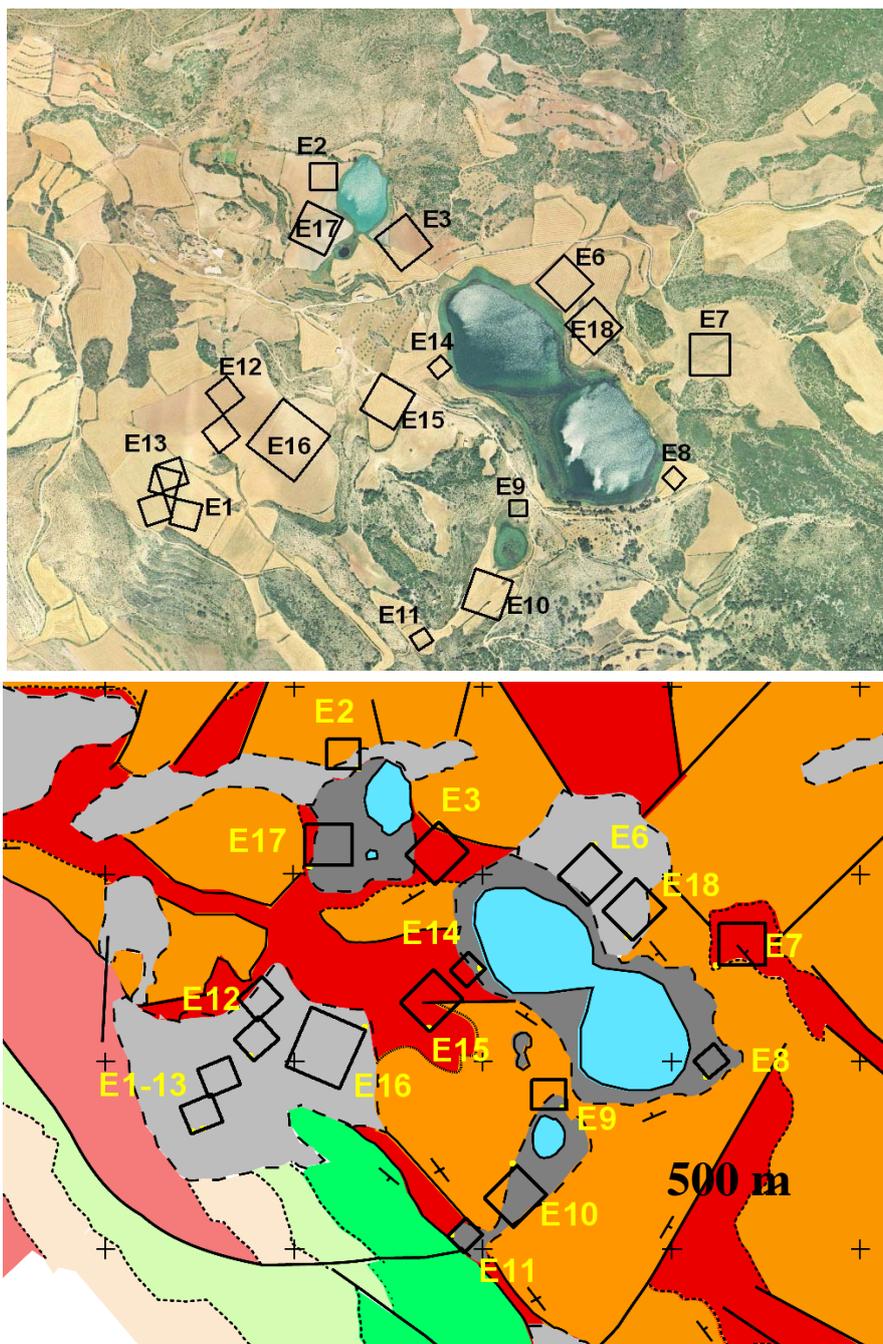


Fig. 24 Emplazamiento y extensión de las antenas de los SRM medidos entorno de las Lagunas de Estaña (Huesca), sobre fotografía aérea y mapa geológico. La dimensión de las antenas se ha dibujado a la escala de cada documento. El lado del cuadrado de las antenas es de 150 m (p.e. en E16), 100 m (p.e. en E6), 75 m (p.e. en E2) y 50 m (p.e. en E8). La distancia entre las cruces de referencia del mapa geológico es de 500 m.

Sobre la interpretación geológica de los Perfiles Eléctricos:

La primera interpretación está hecha con la hipótesis de que los materiales del Keuper no contienen agua, y que su comportamiento eléctrico sería de baja resistividad (además de impermeables por su contenido en arcilla); esta interpretación supone una potencia del Cuaternario superior a los 50 m (Figura 136), asumiendo que el Keuper es suprayacente a los materiales cuaternarios. Al incorporar el resultado de la inversión de los SRM, cuya característica general es la existencia de dos tramos con cambio brusco de la permeabilidad, siendo mucho menor la superior, se podría asignar al Muschelkalk lo que anteriormente se asignó al Keuper, asumiendo así valores muy bajos de resistividad para las rocas calizas (inferior a 40 ohm.m). La variación de la resistividad en materiales del Keuper estaría relacionada con el mayor o menor contenido en yesos u arcillas y en la hidratación de los yesos. La resistividad de las calizas triásicas estaría reflejando su grado de fracturación y contenido en agua. Cuando las calizas estén muy fracturadas y/o carstificadas, se pueden manifestar como materiales de baja resistividad; sin embargo los valores inferiores a 40 ohm.m aquí contemplados son, en principio, excesivamente pequeños para representar a calizas y dolomías, incluso saturadas de agua, lo que hace también dudar de esta asignación. Por otra parte, esta segunda interpretación supondría que el espesor de Cuaternario es inferior a la potencia mínima detectable en la sección geoelectrica, es decir, que su presencia no se manifiesta como una capa con resistividad diferenciada.

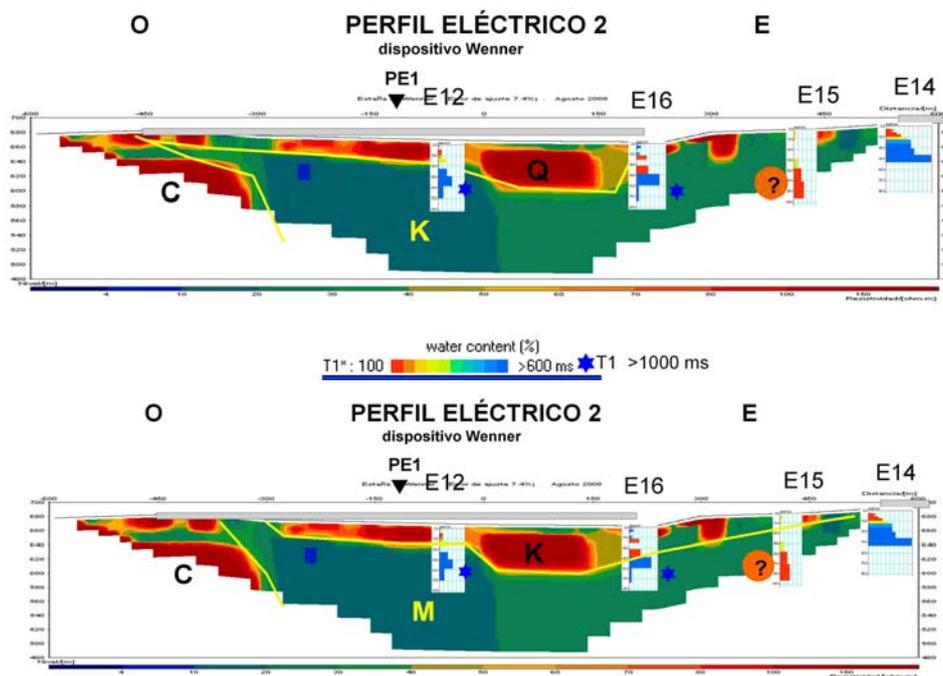


Fig. 136 Perfil Eléctrico 2: la parte superior es la primera interpretación efectuada y en la inferior se presenta otra posible interpretación teniendo en cuenta los resultados de los SRM. K: Keuper; M: Muschelkalk; Q: Cuaternario; C: Cretácico.

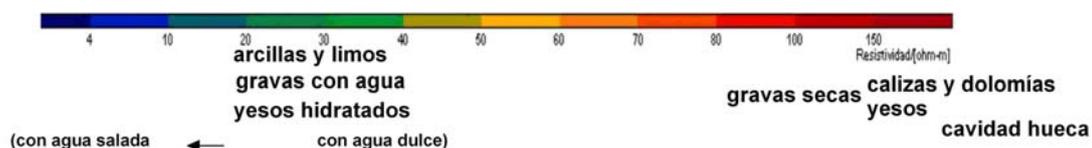


Fig. 11 Clasificación primaria de las rocas en la zona prospectada de acuerdo a su resistividad.

Sobre la calidad de los datos SRM y su inversión

Como conclusión del análisis detallado de los datos de campo de cada SRM, puede asegurarse la existencia de agua en el subsuelo en todos los emplazamientos, excepto en los E1-E13 (en el mismo lugar) y E11. A pesar del efecto del tamaño de la antena sobre la amplitud de la señal, resulta evidente que la cantidad de agua (máximo valor de la amplitud inicial E_0) varía notablemente con el emplazamiento, lo que indica la existencia de un acuífero muy heterogéneo (Figura 84).

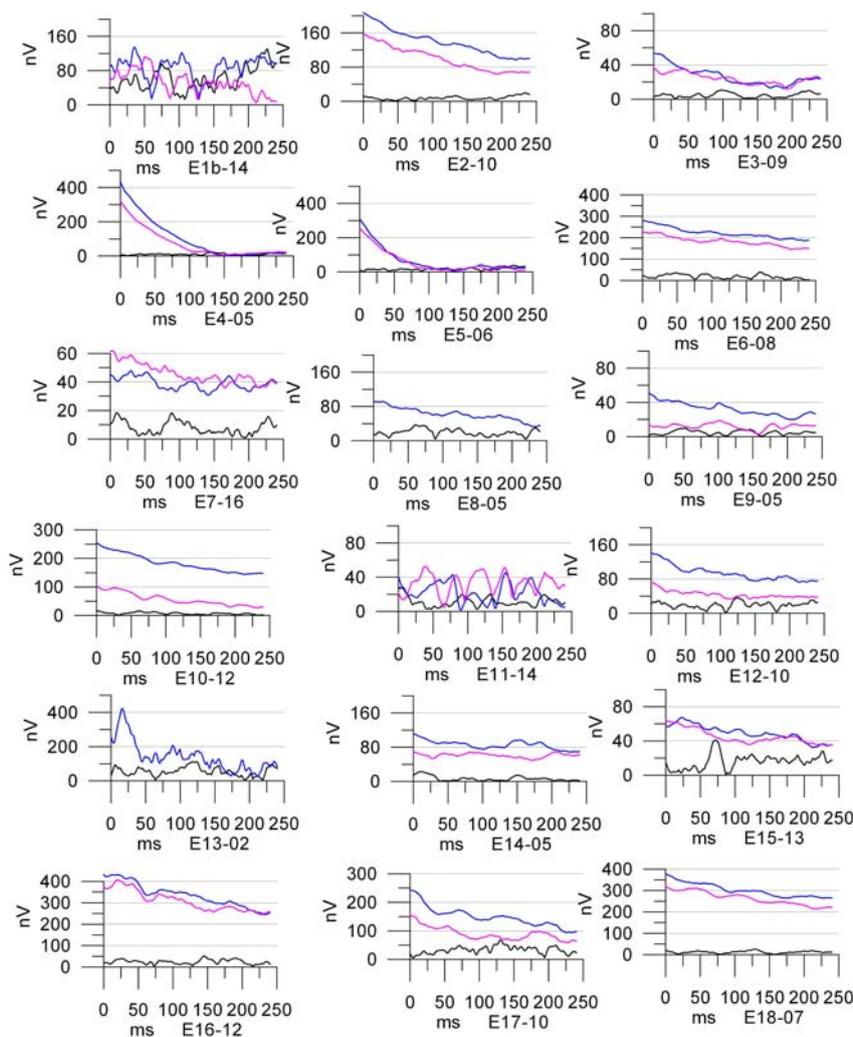


Fig. 84 Selección de las mejores curvas $e(t)$ de los SRM, con escala vertical variable. Señal del agua: curvas azul y rosa; ruido: curva en negro.

La calidad de los SRM E1-13 y E11 no permite la inversión de los datos. Es notable la aparente contradicción de que, a pesar de la mencionada buena recepción de la señal, la inversión pone de manifiesto la existencia de poca cantidad de agua, que sólo sobrepasa un máximo del 6 % en los SRM E2, E14, E16 y E17 (del 7 al 11 %), y tan baja como el 2 % en los SRM E3 y E7; son una excepción los realizados en la zona de las Ollas, donde el tiempo de relajación es mucho menor y los contenidos en agua son notablemente superiores (SRM E4 y E5, con 20-30 % de valor máximo). Esta circunstancia, unida a los elevados tiempos de relajación T_1 del resto de los SRM, se puede interpretar como una manifestación de que el modelo 1D utilizado en la inversión puede no ser adecuado para todos los lugares de este acuífero. Hay grandes probabilidades de que el agua se

encuentre de forma volumétrica, o al menos concentrada en fracturas de grandes dimensiones, por lo que su distribución en un modelo matemático formado por capas horizontales (el utilizado en la inversión matemática de los datos), dé lugar a una falsa porosidad muy baja.

En la zona de Las Ollas (SRM E4 y E5) el corto tiempo de relajación pudiera ser debido, además de a la diferente litología del acuífero que aquí es predominantemente detrítico, a la influencia del gradiente de cerca de 80 nT del campo geomagnético causado por la proximidad de ofitas, que no afectan al resto de la zona estudiada.

Por regla general, la distribución de agua en el subsuelo obtenida en la inversión presenta una división radical del mismo en una parte superficial con muy bajo valor del parámetro T_1 (poco permeable), y otra más profunda y muy permeable (Figura 118 y 142).

Del análisis de la clasificación en tipos de la curva $E_0(q)$ y de la distribución $w(z)$

La morfología de las curvas de Sondeos de Resonancia Magnética $E_0(q)$ informa de la geometría del acuífero, según se resume en la Figura 17, permitiendo apreciar se si trata de un acuífero somero o profundo (en virtud del momento de excitación para el que se alcanza el valor máximo) y de si el SRM ha localizado su final o no (curvas cerradas o abiertas).

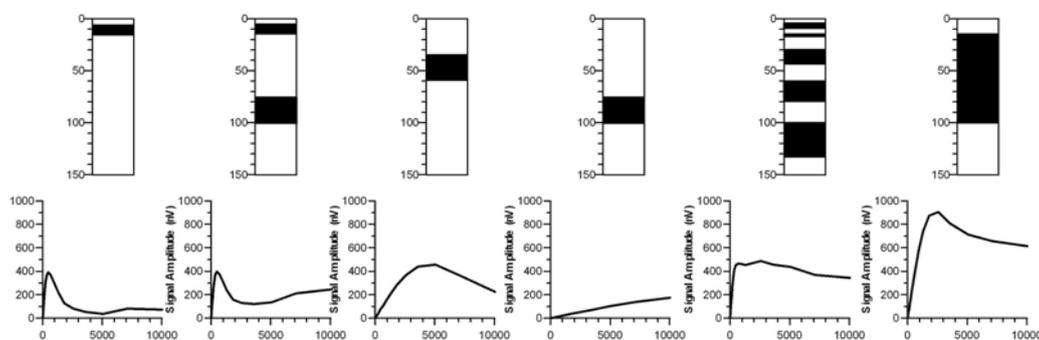


Fig. 17 Diferente morfología de la curva $E_0(q)$ resultado de un SRM, según la profundidad y potencia del acuífero.

Mediante el establecimiento de una clasificación por grupos de las curvas $E_0(q)$ de los SRM medidos, se puede hacer una distribución primaria del subsuelo según el tipo de acuífero, así como su seguimiento por correlación. Dicha clasificación se presenta en la Figura 116, de acuerdo a los siguientes tipos:

1. SRM E1 y E13: curvas sin señal de agua
2. SRM 11: curva de muy dudosa validez de su inversión
3. SRM E9 y E8: amplitud de señal inferior a 100 nV, detectando el fin del acuífero
4. SRM E7, E3 y E15: amplitud de señal inferior a 100 nV, sin detectar el fin del acuífero
5. SRM E14, E12, E17, E2 y E10, señal de hasta 200 nV, sin detectar el fin del acuífero
6. SRM E6, E5, E4, E18 y E16: señal de 250 a 400 nV, detectando el fin del acuífero

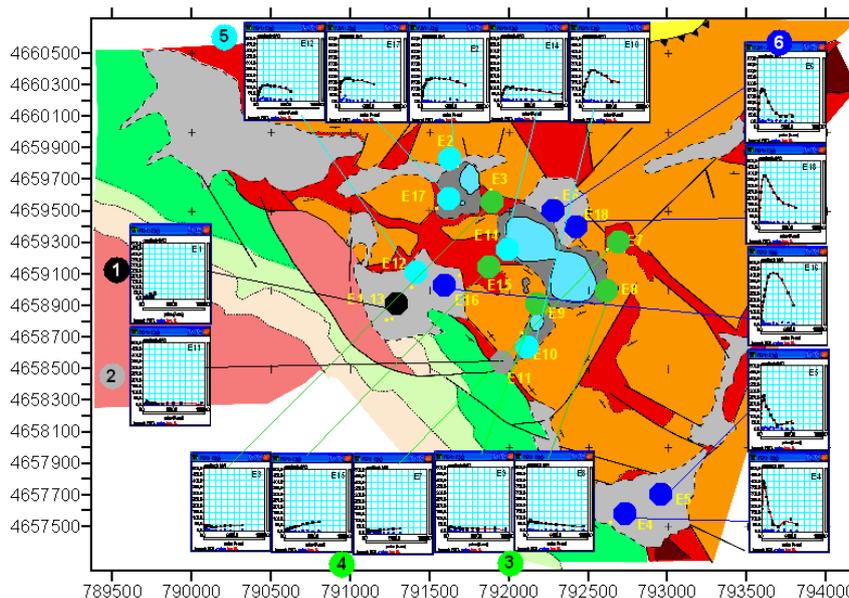


Fig. 116 Agrupación de los SRM según su clasificación por la morfología de su curva $E_0(q)$

De su distribución geográfica y geológica puede establecerse una cierta agrupación (Figura 117), de tal manera que el tipo 1 y el tipo 2 establecen un límite sur-occidental en el contacto con las calizas cretácicas, donde no se ha registrado la presencia de agua; los tipo 3 y 4, de bajo contenido en agua, encontrándose ésta muy superficial, se agrupan entorno de la Laguna Grande, excepto en el norte (SRM E6 y E18), con el tipo 3 situados sobre el Muschelkalk (E8 y E9); los tipos 5 y 6, de mayor amplitud de la señal, son más periféricos.

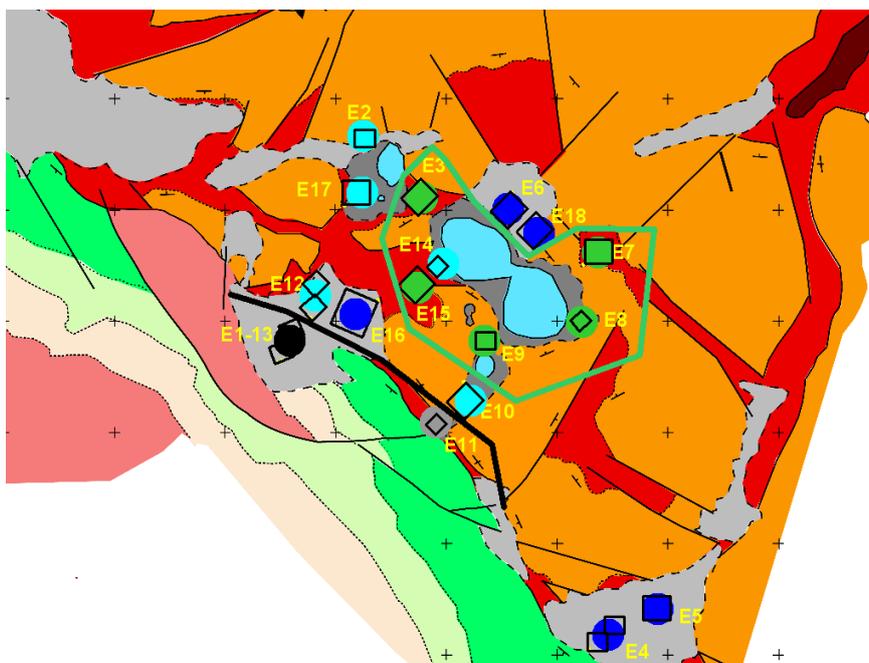


Fig. 117 Interpretación de la distribución de la situación hidrogeológica según la morfología de las curvas $E_0(q)$ de los SRM

Esta clasificación ha sido ligeramente revisada, como se presentará en el Capítulo 11 del presente Informe.

Por lo que respecta a una clasificación de acuerdo con la distribución en profundidad de la cantidad de agua encontrada en la inversión, o solución $w(z)$, junto con el valor de la constante de tiempo T_1 , indicador de la permeabilidad, se establecieron los siguientes grupos (Figura 142):

1. SRM E1 y E13: no detectada la presencia de agua, o encontrándose ésta en muy poca cantidad
2. SRM E15 y E3: lugares con muy poco agua
3. SRM E7 y E11: lugares con agua superficial en terrenos de alta permeabilidad, siendo ésta más pequeña a mayor profundidad
4. SRM E2, E16 y E18: mayor cantidad de agua con muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 45 m
5. SRM E10, E12 y E17: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 30 m
6. SRM E8, E6, E9, E14, E4 y E5: muy baja permeabilidad superficial, pasando a gran permeabilidad a partir de los 15 m

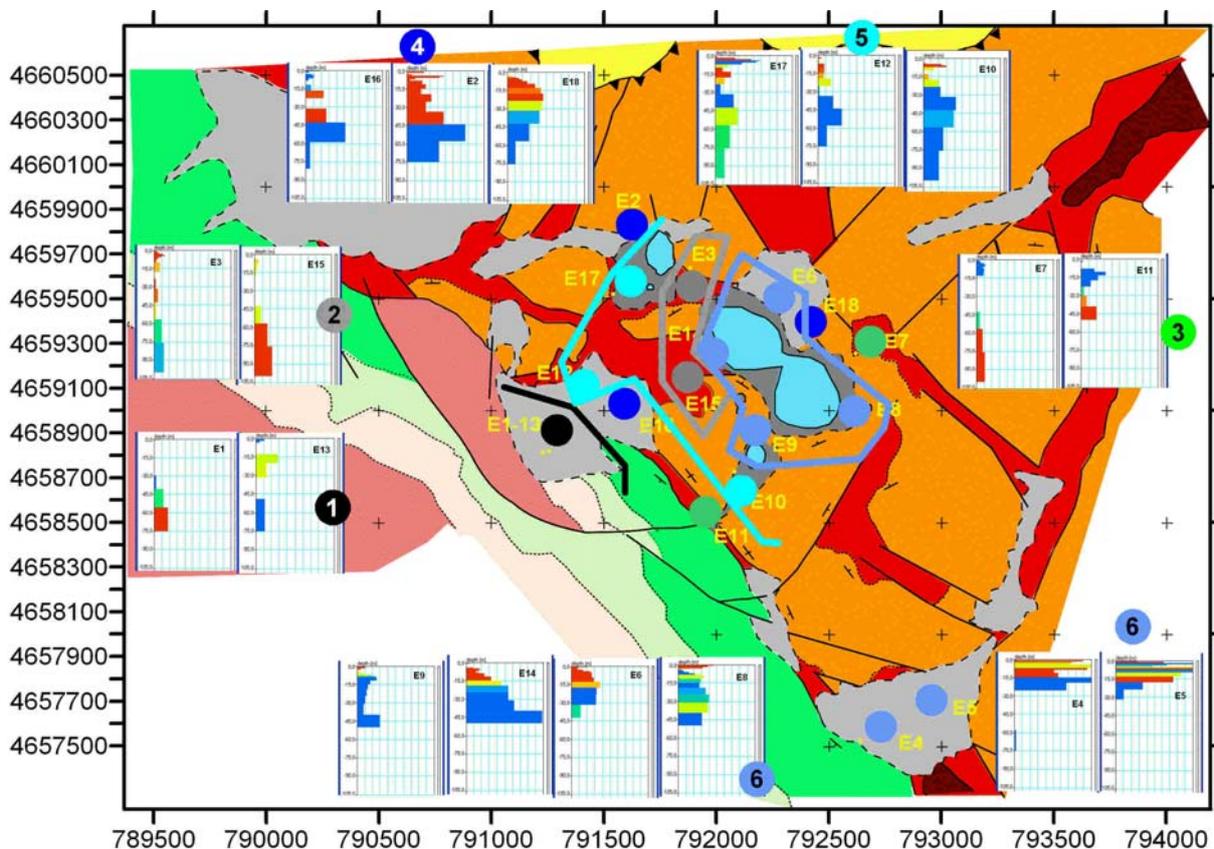


Fig. 142 Distribución de los SRM según su clasificación por distribución de agua y valor del parámetro T_1 (indicador de permeabilidad).

La interpretación que puede hacerse de esta agrupación por su relación con la geología y posición de las lagunas (Figura 142) es que el grupo 1 define el límite sur occidental de presencia de agua, junto al contacto con las calizas cretácicas. A este límite puede unirse el SRM E11, dada la poca fiabilidad de su inversión. El grupo 2 junto con el E7, lugares con muy poco agua, están medidos directamente sobre el Keuper, formando el E15 y E3 un pasillo de orientación Norte-Sur, que pasa entre las lagunas, donde la existencia de agua en los primeros 60 m es prácticamente nula. El tipo 6, en el que la zona de gran permeabilidad se sitúa entorno de los 15 m, forma el conjunto más próximo entorno de la Laguna Grande, discrepando el E18. El tipo 5, con gran permeabilidad a partir de los 30 m forma un grupo que bordea las lagunas a mayor distancia que el grupo 6, teniendo el borde norte de la Laguna Grande un comportamiento hidráulico distinto y caótico (están presentes los grupos 3, 4 y 6 a distancias muy próximas). La distribución del grupo 5, con cambio brusco de la permeabilidad a partir de los 45 m, es irregular. Los SRM E4 y E5 los consideramos fuera de esta correlación, por su distancia al entorno de las lagunas.

De acuerdo con esta interpretación, la profundidad del agua va disminuyendo (va siendo más somera) desde las calizas del Cretácico hacia las lagunas. La conexión hidráulica con el acuífero del sinclinal de Estopiñán no queda justificada, al no detectarse agua en determinados lugares, pudiendo actuar los materiales del Keuper como muro impermeable.

En su conjunto, las distribuciones de los SRM de acuerdo con las curvas $E_0(\mathbf{q})$ y $w(\mathbf{z})-T_1(\mathbf{z})$, parecen establecer una cierta zonación de comportamiento hidrogeológico entorno de las lagunas, excepto en su borde nororiental: la primera parte del subsuelo es de mucha menor permeabilidad que la más profunda, situándose su límite a mayor profundidad, pasando de 15 m a 45 m, según aumenta la distancia a las lagunas. El contacto con las calizas cretácicas parece suponer el fin de esta situación, no encontrándose agua a esas profundidades. La cantidad de agua (amplitud de la señal) aumenta con la distancia a las lagunas. Puede existir un pasillo de orientación norte-sur, que pasa entre la Laguna Pequeña y la Grande, donde la presencia de agua es también muy escasa en los primeros 60 m.

El intento de correlación de los resultados de los SRM en forma de perfiles (Figuras 122 y 123) corrobora en su conjunto los resultados del análisis de la distribución de acuíferos por su curva $E_0(\mathbf{q})$ y el resultado $w(\mathbf{z})$. Se puede establecerse la hipótesis de que existe un acuífero de muy alta permeabilidad, con probabilidades de tratarse fundamentalmente de agua volumétrica (contenida en fracturas o cavidades), bajo la Laguna Grande. La profundidad del inicio del agua en dicho acuífero coincide con el fondo de la laguna. Su cartografía puede establecerse en función de la distribución de los datos según se indica en la Figura 124. Bajo la Laguna Pequeña pudiera existir también un acuífero de estas características, sin conexión con el anterior y situado a mayor profundidad, lo que descarta la posibilidad de que sea el tributario de dicha laguna. En cualquier caso, debe entenderse que la correlación efectuada no significa forzosamente la existencia de una continuidad, ya que la

posible disposición del agua en zonas o muy fracturadas o incluso en cavidades, no permite definir su geometría con los pocos datos tomados.

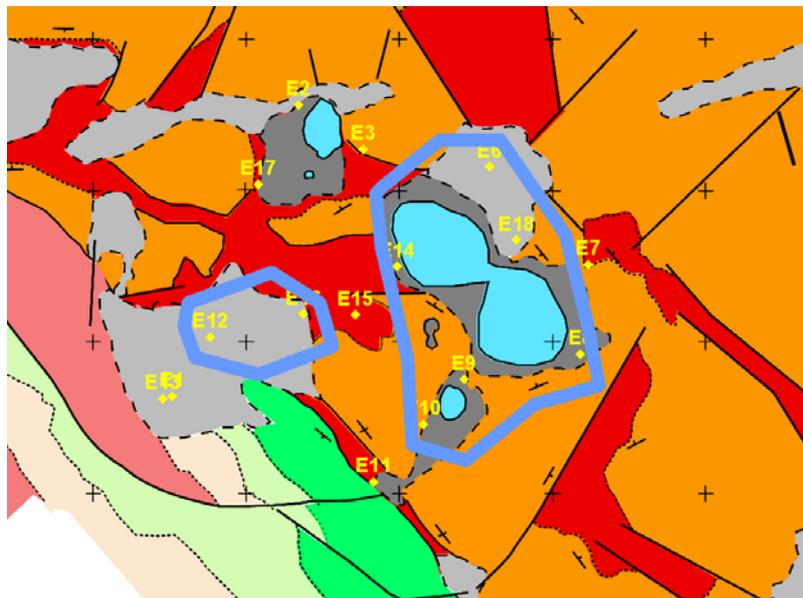


Fig. 124 Cartografía probable de un acuífero de alta permeabilidad, cuyo inicio en profundidad coincide con la base de la Laguna Grande.

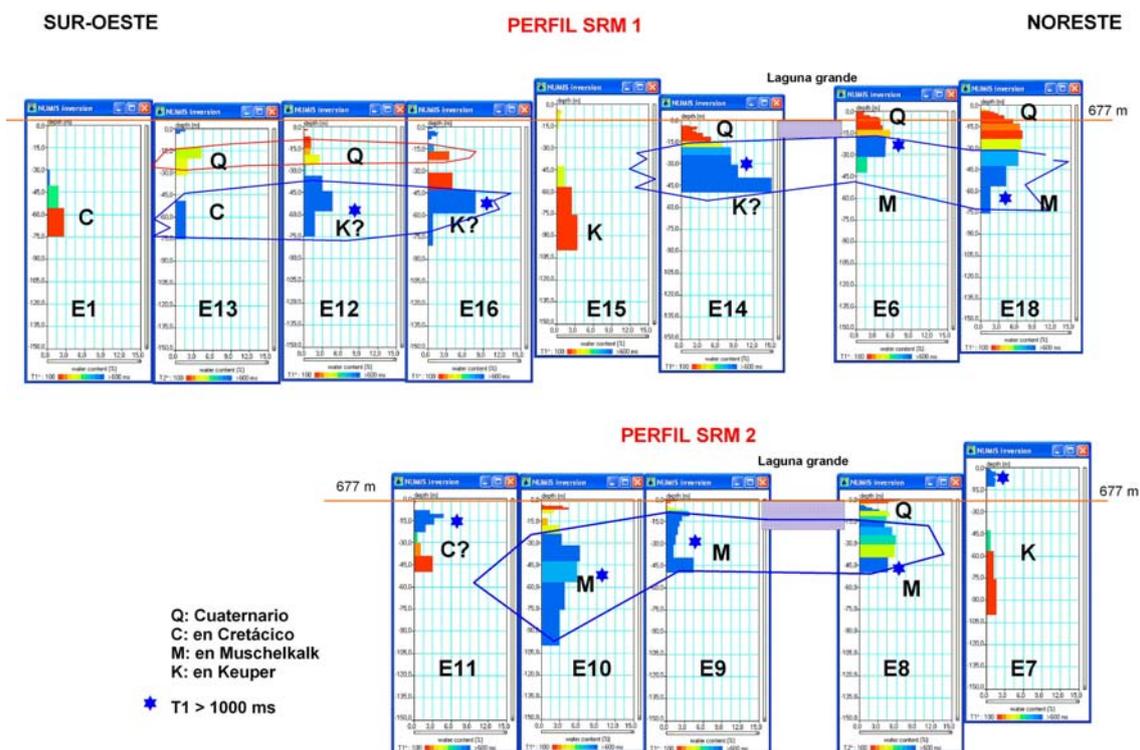


Fig. 122 Perfiles de correlación de SRM 1 y 2, en sentido transversal a las lagunas

Al oeste de la Laguna Grande existe también un acuífero similar, a mayor profundidad y sin aparente conexión con el anterior, siendo el área formada por los E15, E11 y E3 prácticamente seca. La

Laguna Grande y su acuífero subyacente parecen estar situados sobre terrenos calcáreos del Muschelkalk, recubiertos parcialmente por materiales cuaternarios que se han constituido en acuíferos superficiales de muy baja permeabilidad. Los SRM efectuados sobre afloramientos del Keuper (E17, E3, E15, E7 y E11) son en los que menos agua se ha detectado.

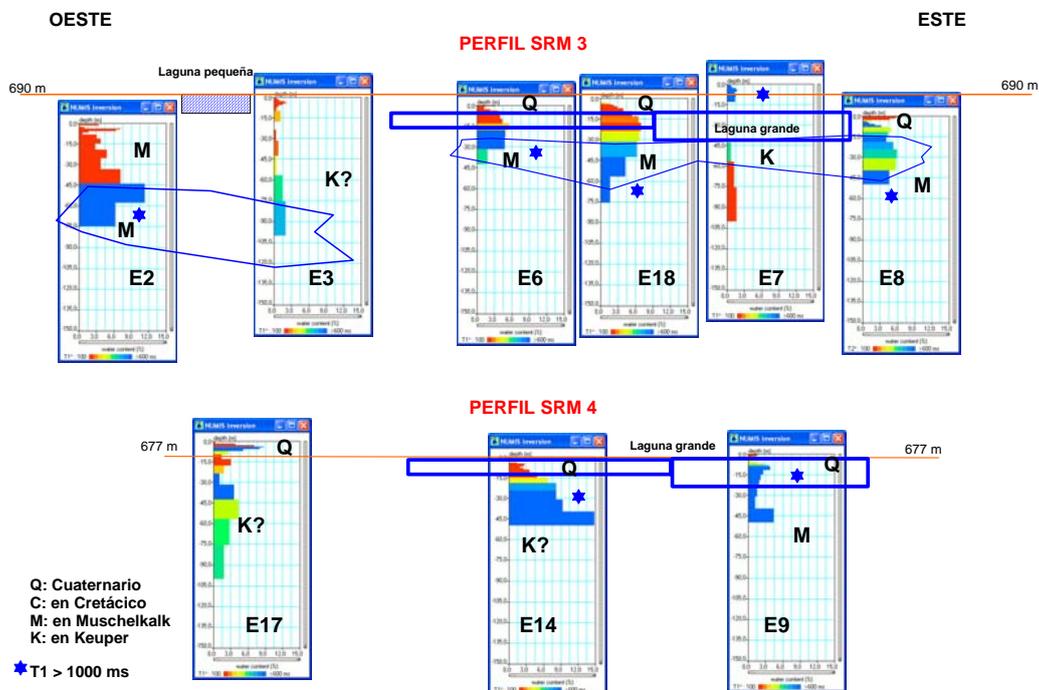


Fig. 123 Perfiles de correlación de SRM 3 y 4, en sentido longitudinal a las lagunas

En la Figura 140 se establece la distribución espacial de los máximos valores encontrados para la porosidad y T₁ (permeabilidad), junto con la litología posible en que se dan dichos parámetros.

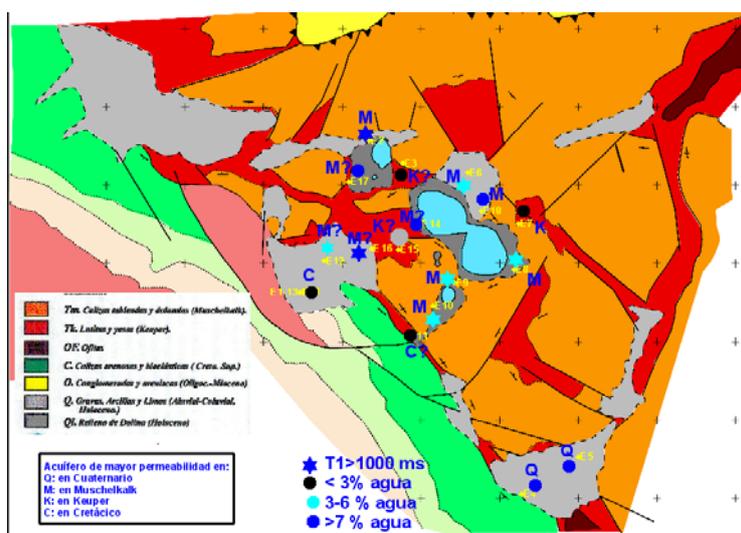


Fig. 140 Distribución espacial de la situación hidrogeológica expresada por la máxima porosidad y permeabilidad.

3 CAMPAÑA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA DE 2009

Los trabajos de campo se han efectuado en julio y agosto de 2009, con residencia en Benabarre del personal del IGME desplazado desde Madrid. El equipo de trabajo en campo ha estado formado por:

Juan Luis Plata Torres, investigador de Geofísica del IGME, responsable del equipo

Félix Manuel Rubio Sánchez-Aguililla, investigador de Geofísica del IGME

Pedro Ibarra, técnico superior del grupo de Geofísica del IGME

José María Llorente, operador de geofísica

Agustín González, operador de geofísica

A través de la oficina del IGME en Zaragoza se ha contado con la colaboración para los trabajos de campo de: Cristina Pérez Bielsa, Carlota Oliván, Victoria Lafuente, Jesús Causape y Javier Lambán.

Se han medido seis nuevos perfiles de tomografía eléctrica, con un total de 6585 m, todos ellos situados en los alrededores de las Lagunas de Estaña (Figura 3.1), complementando la cobertura efectuada en 2008 (4 perfiles con un total de 4350 m). Se denominan desde PE5 a PE10, siendo el PE5 una repetición del anterior PE3. Su situación ha sido elegida combinando los objetivos de cartografía de la resistividad del subsuelo con la posición de los SRM y de los nuevos sondeos mecánicos, estando en ocasiones limitada por las posibilidades logísticas que el terreno ofrece para extender los cables de las longitudes requeridas.

Se ha utilizado el sistema LUND ABEM, propiedad del IGME. Las características de los perfiles y dispositivos empleados se recogen en la Tabla 3.1. En todos los casos se ha utilizado un espaciado entre electrodos de 15 m, habiéndose medido con los dispositivos Wenner y Schlumberger, excepto el PE10. El PE5 es una repetición del PE3 medido en 2008, pero utilizando en esta ocasión la misma distancia entre electrodos de 15 m (5 m en 2008) a fin de hacerlo comparable al resto de las secciones, y añadiendo mediciones Schlumberger para verificar las numerosas anomalías detectadas en dicho perfil de 2008. Las coordenadas y cotas de puntos singulares se han tomado con GPS (sin corrección diferencial).

Para la inversión de los datos de campo y obtención de las secciones de resistividad finales se ha empleado el programa RES2DINV v. 3.46b de M.H. Loke. Durante el proceso de datos, se eliminaron los puntos de medida con un error superior al 5%, y en la inversión se ha tenido en cuenta el perfil altimétrico de la topografía. Los parámetros empleados en la inversión han sido los mismos para todos los perfiles, empleado el algoritmo "robust constrain". En el ANEXO I se describen los ficheros digitales con los datos de campo y los ficheros resultantes de la inversión.

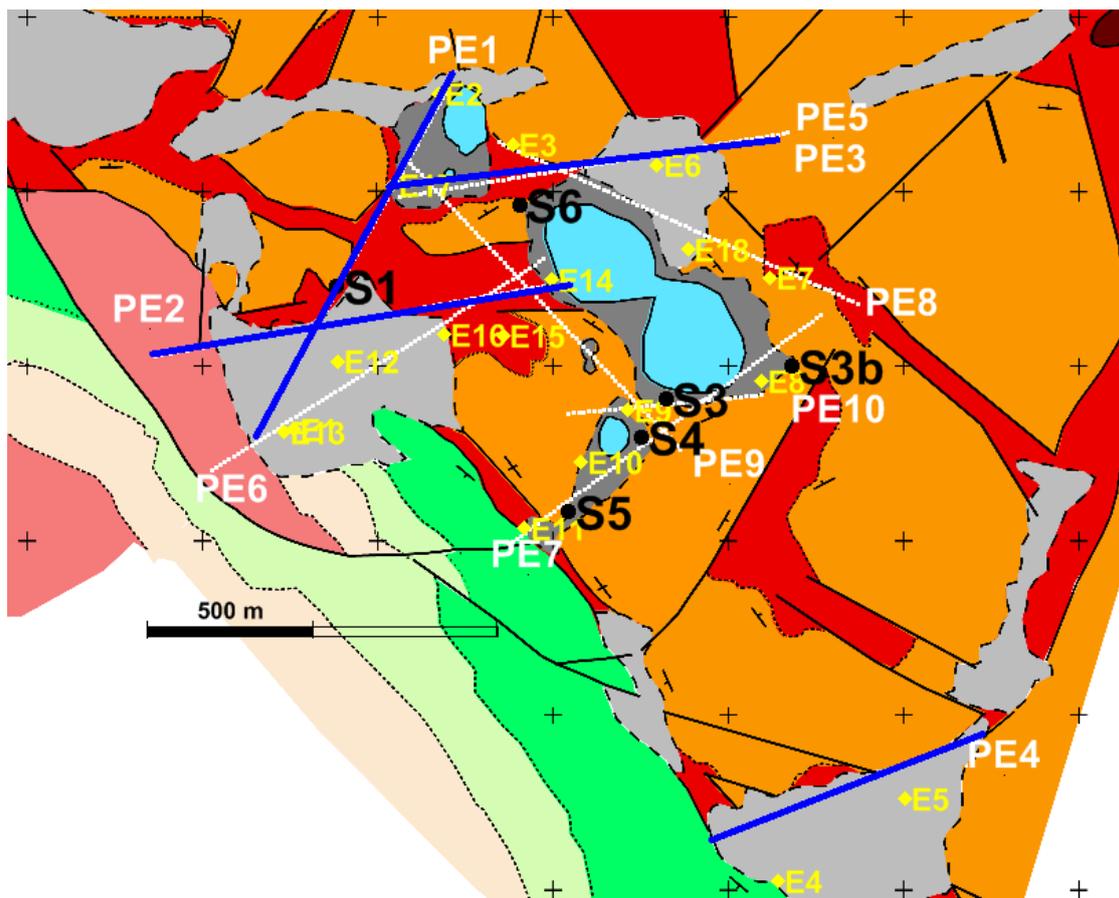


Fig. 3.1 Posición de los nuevos perfiles eléctricos (PEx en color blanco) junto a los medidos en 2008 (en trazo azul) y sondeos mecánicos Sx. Se han situado también los SRM (posición de una de las esquinas de la antena utilizada).

Perfiles Eléctricos en las Lagunas de Estaña								
Parámetros de medición					Coordenadas UTM H31			
Nombre	año	Dispositivos empleados	Esp. Interelec.	Longitud del Perfil	X (origen)	Y(origen)	X(Final)	Y(Final)
PE1	2008	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	295045	4656795	294417	4655814
PE2	2008	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	295278	4656174	294098	4656044
PE3	2008	Wenner	5 m	1100 m	294754	4656274	295816	4656516
PE4	2008	Wenner /Schlumberger	15 m	850 m	296402	4654762	295634	4654530
PE5	2009	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	294823	4656451	296003	4656562
PE6	2009	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	295267	4656252	294238	4655691
PE7	2009	Wenner /Schlumberger	15 m	1185 m	295081	4655423	296044	4656037
PE8	2009	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	295120	4656608	296171	4656043
PE9	2009	Wenner /Schlumberger	15 m	1200 m	294875	4656576	295620	4655663
PE10	2009	Wenner	15 m	600 m	295276	4655800	295867	4655815

Tabla 3.1 Parámetros de posición y medición de los perfiles eléctricos.

Para una mejor integración de toda la información, se ha considerado necesario poder disponer de los resultados de la inversión con el formato adecuado para poder crear secciones geoeléctricas por diversos métodos de interpolación, así como poder realizar clasificaciones de valores en diversos intervalos de colores (paletas de color), a fin de seleccionar el más adecuado. Por otra parte, dada la densidad areal de información de resistividad disponible, se han preparado mapas de resistividad a diferentes profundidades. En consecuencia se ha diseñado una metodología específica para este tipo de proceso de datos, que consta de las siguientes etapas:

- preparación de valores de distancia, profundidad, resistividad de cada celda de las secciones
- preparación de valores X,Y (UTM),cota, resistividad del conjunto de celdas de las secciones
- selección de la paleta de colores para mapas de isovalores e imágenes
- preparación de los ficheros de blanqueo de los mapas e imágenes
- selección de cotas y obtención de mapas de resistividad a diferentes cotas.

En el ANEXO II se explica detalladamente esta metodología. Es importante tener en cuenta la diferente visión de los resultados según el tipo de representación utilizado, ya que las características de distribución de colores no son las mismas en todos ellos.

4 SECCIONES GEOELÉCTRICAS OBTENIDAS Y SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO A UTILIZAR EN LA INTERPRETACIÓN

Ante la posible complejidad geológica del entorno donde se lleva a cabo esta prospección, los perfiles eléctricos se han medido en campo utilizando dos dispositivos básicos: el Wenner y el Schlumberger. Las características metrológicas de estos dispositivos pueden verse en el Informe de 2008. Cada tipo de dispositivo tiene sus ventajas y sus desventajas, ofreciendo diferencias de sensibilidad a los cambios laterales y/o verticales de la resistividad del subsuelo, y diferente relación entre la profundidad de investigación, la cobertura horizontal y la intensidad de la señal. 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. En la Figura 4.1 se da un ejemplo de estas diferencias, donde se muestra que un cuerpo conductor situado próximo a la superficie produce un “enraizamiento” en profundidad cuando se utiliza el dispositivo Schlumberger.

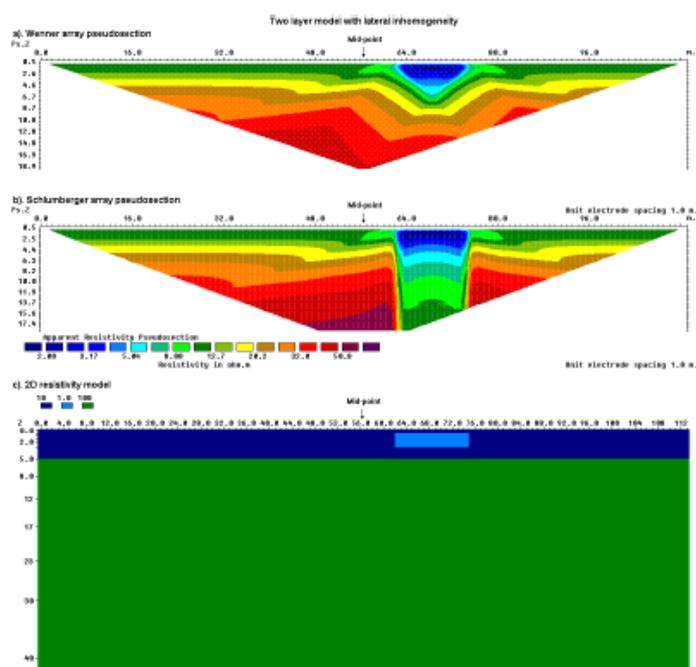


Figure 1.8. A 2-D two-layer model with a low resistivity prism in the upper layer. The calculated apparent resistivity pseudosections for the (a) Wenner and (b) Schlumberger arrays. (c) The 2D model. The mid-point for a conventional sounding survey is also shown.

Fig. 4.1 Modelo 2D de dos capas con un prisma de baja resistividad próximo a la superficie y basamento resistivo (Parte inferior). Sección obtenida para el dispositivo Wenner (superior) y Schlumberger (media) (Según Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys, M.H.Loke, Copyright,1996-2004)

El dispositivo Wenner es el más adecuado para investigar estructuras horizontales, es decir, cambios de resistividad con la profundidad en la vertical del centro del dispositivo. Comparado con otros dispositivos posee una moderada profundidad de investigación y es el dispositivo con mayor intensidad de señal, lo que puede ser un factor importante en áreas de alto ruido de fondo. Una desventaja de este dispositivo es la relativamente pobre cobertura horizontal (pérdida de información en los extremos del perfil).

El dispositivo Wenner-Schlumberger es moderadamente sensible a estructuras verticales (sobre todo profundas) y horizontales (para menor profundidad). La profundidad de investigación de este dispositivo es alrededor de un 10% mayor que para el dispositivo Wenner, con menor intensidad de la señal y mejor cobertura horizontal.

En la Figura 4.2 a 4.11 se muestran las imágenes finalmente obtenidas por el procedimiento descrito en el ANEXO II, con ambos dispositivos.

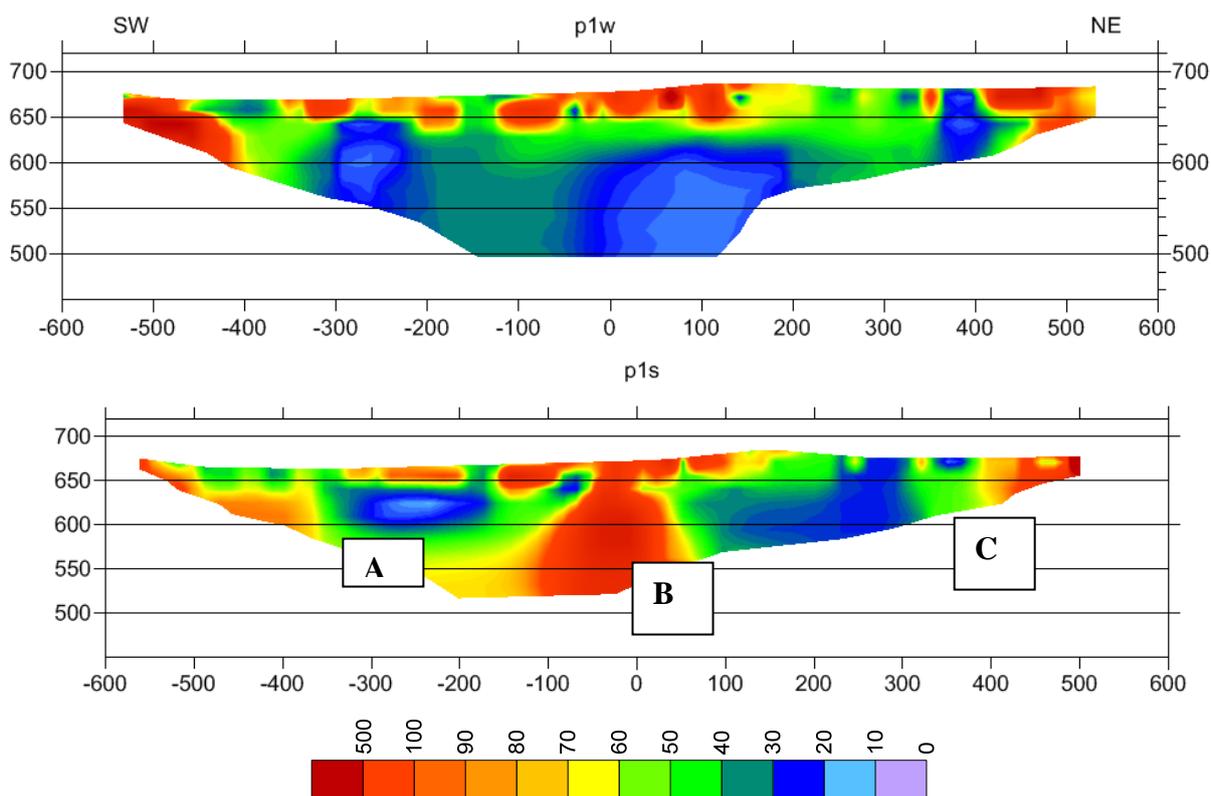


Fig. 4.2 Imagen de resistividad del perfil PE1 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior). Se incluye la paleta de colores aplicada, con valores en ohm.m.

La información proporcionada para el perfil PE1 por ambas secciones (Figura 4.2) es equivalente, salvo en tres zonas donde aparecen discrepancias: las estructuras conductoras A y C aparecen prolongadas a mayor profundidad en los datos tomados con dispositivo Wenner, siendo más probable que reflejen mejor la geología que las estructuras aisladas del dispositivo Schlumberger. En la zona B la diferencia es muy importante, no quedando en absoluto reflejada en la sección Wenner la existencia de una estructura tan resistiva y enraizada como aparece en la sección Schlumberger; esta diferencia no puede deberse a lecturas de mala calidad por algún defecto en los electrodos (ya que serían más puntuales y afectaría a ambas secciones), sino que es posiblemente motivada por la influencia de efectos laterales: la sección Schlumberger puede estar reflejando los efectos de rocas más resistivas no situadas en el plano vertical de la sección.

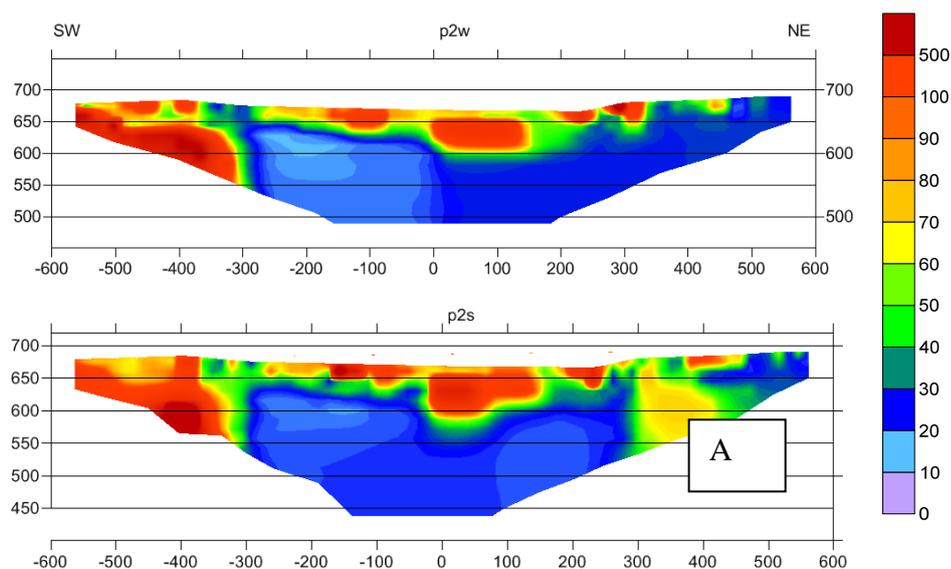


Fig. 4.3 Imagen de resistividad del perfil PE2 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior). Se incluye la paleta de colores aplicada, con valores en ohm.m.

En el perfil PE2 (Figura 4.3) ambos dispositivos dan información equivalente, con valores de resistividad algo superiores en el dispositivo Schlumberger, cuya mayor diferencia es la aparición de una estructura de mayor resistividad en la zona A.

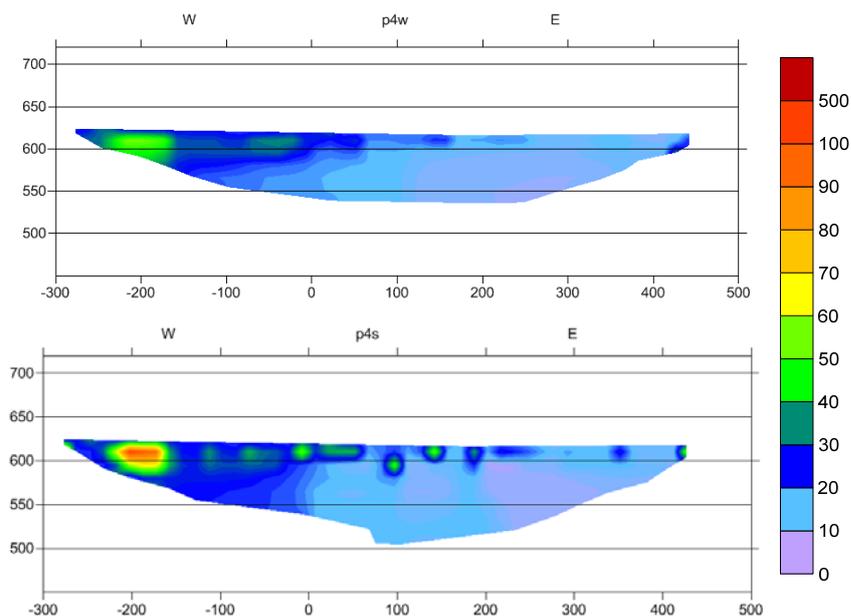


Fig. 4.4 Imagen de resistividad del perfil PE4 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior). Se incluye la paleta de colores aplicada, con valores en ohm.m.

En el perfil PE4 (Figura 4.4) la información es la misma en ambos dispositivos, siendo algo más ruidoso el Schlumberger (aparición de pequeñas anomalías muy puntuales), que presenta valores de resistividad ligeramente mayores.

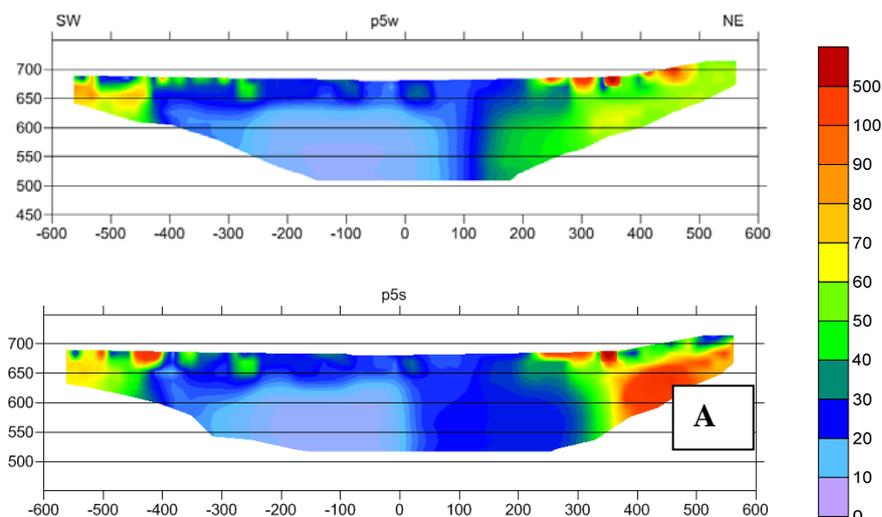


Fig. 4.5 Imagen de resistividad del perfil PE5 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior).

En las secciones del PE5 (Figura 4.5) solamente cabe mencionar la diferencia del sector A, donde nuevamente el dispositivo Schlumberger muestra una anomalía resistiva no visible en el Wenner. La diferencia en la posición de la transición de valores del resto del perfil se debe exclusivamente a los mayores valores de resistividad medidos con el Schlumberger, sin mayor significado.

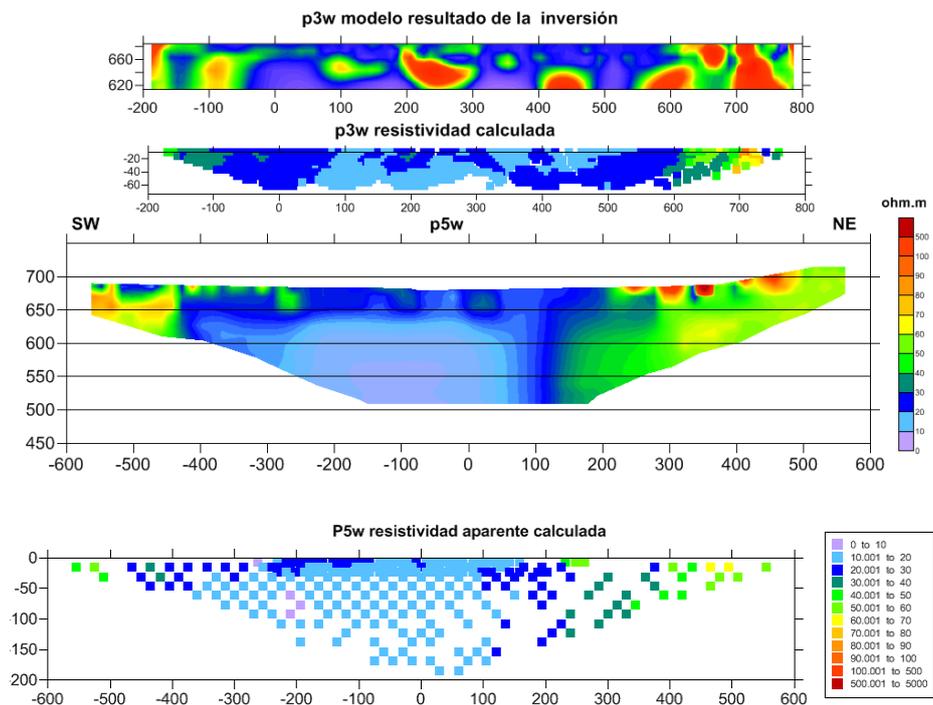


Fig. 4.6 Comparación del perfil PE3 (2008) y PE5 (2009), ambos medidos con dispositivo Wenner. Se muestran las secciones de resistividad aparente calculada y el resultado de la inversión. El PE3 sólo tiene una profundidad de investigación de unos 70 m, mientras que el PE5 tiene más 150 m.

Entre las mediciones Wenner del perfil PE3, registrado con espaciamiento de 5 m entre electrodos, y el PE5w, registrado con 15 m, aparecen notables discrepancias (Figura 4.6) en la porción central, siendo análoga la información para los extremos del perfil. Las anomalías de gran resistividad que se localizaron en el PE3w no están justificadas en el PE5w, ni tampoco se manifiestan en el PE5s. En principio, si existieran estos cuerpos, deberían de haberse medido también con un dispositivo de 15 m, dada su profundidad y extensión. En la Figura 4.6 se establece también la comparación entre la resistividad aparente medida en el PE3w y PE5w, de donde se deduce que las diferencias en los modelos son fruto de artefactos aparecidos en el proceso de modelización.

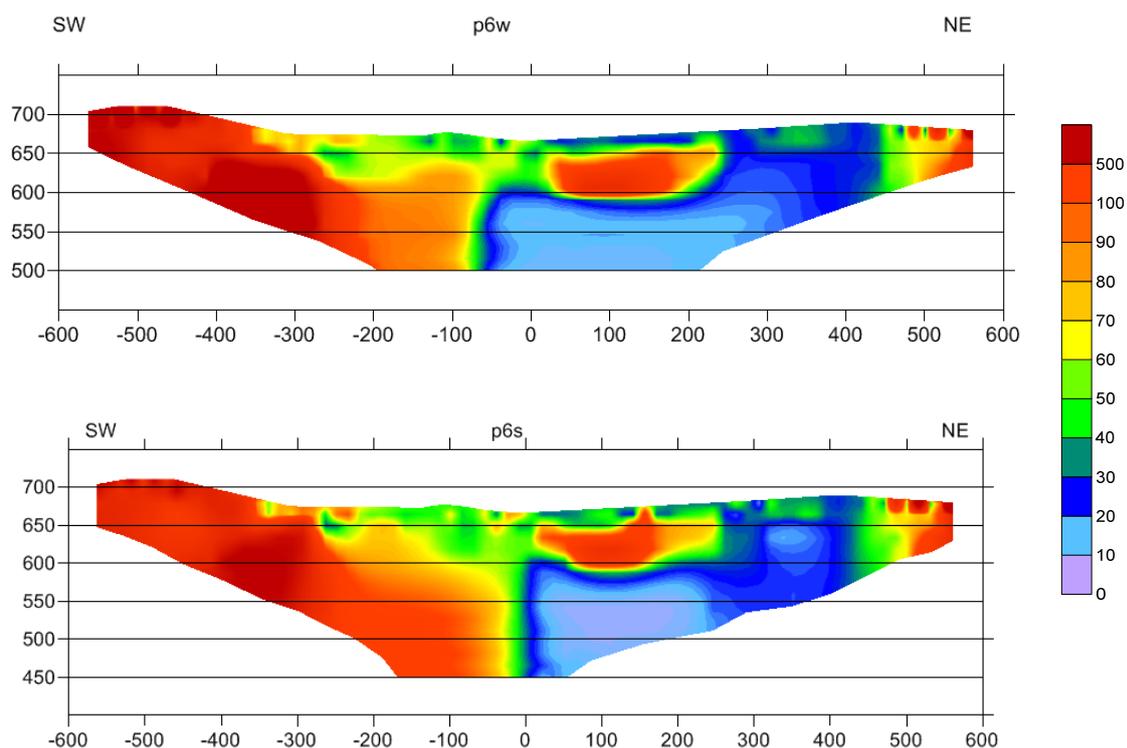


Fig. 4.7 Imagen de resistividad del perfil PE6 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior).

En el perfil 6 (Figura 4.7) la información de ambos dispositivos es totalmente equivalente, con la única diferencia de que, nuevamente, los valores de resistividad del PE6s son superiores a los del PE6w, lo que produce una aparente diferencia en la posición de la transición lateral entre conductor y resistivo, que para el Wenner resulta ópticamente más visible sobre la distancia -100, mientras que para el Schlumberger es más notable en la posición 0.

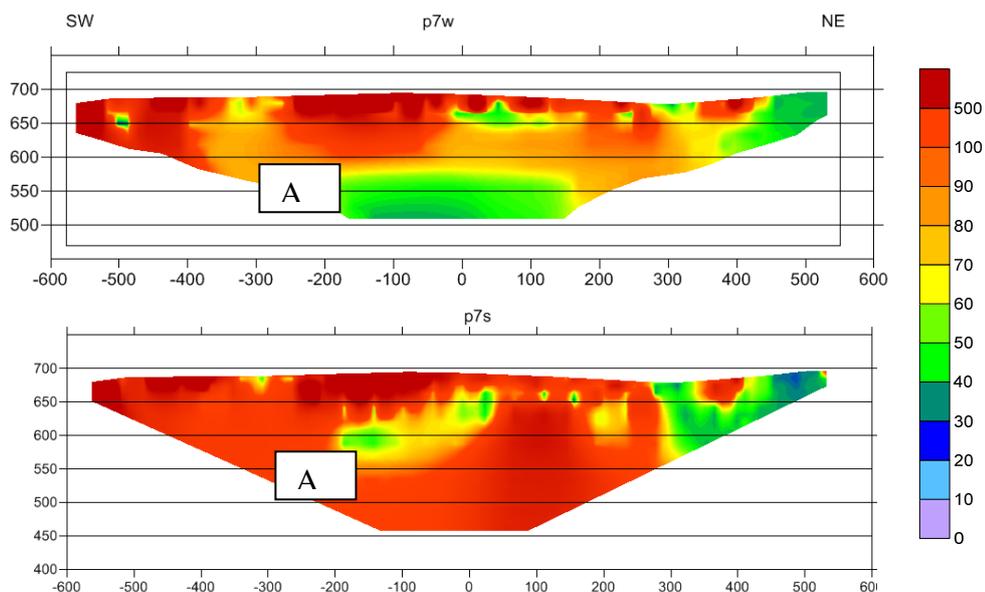


Fig. 4.8 Imagen de resistividad del perfil PE7 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior).

En el perfil PE7 (Figura 4.8) la porción NE (de 300 a 600 m), así como la distribución de la resistividad en los primeros 50 m de profundidad (entre 700 y 650 m) tiene prácticamente del mismo significado en ambos dispositivos; sin embargo, el resto de la sección ofrece una distribución bastante diferente. Aparte del efecto normal de que los valores de resistividad proporcionados por el dispositivo Schlumberger son mayores, la posición del conductor A es diferente en ambas secciones, apareciendo más somera y de menor extensión en PE7s. En principio, pensamos que la sección Wenner tiene menos ruido y puede estar reflejando mejor la disposición de las estructuras geológicas.

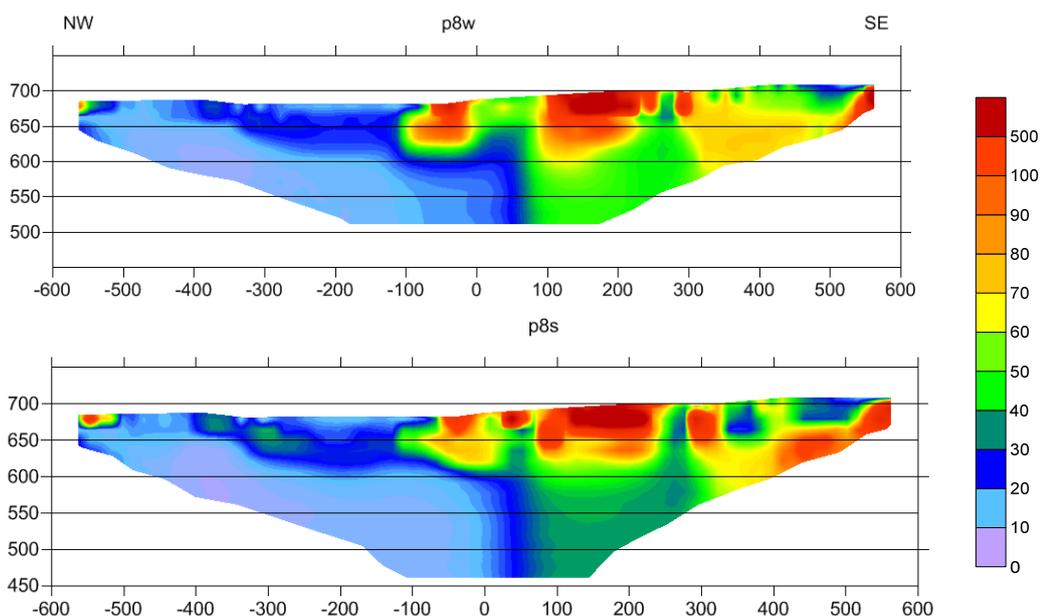


Fig. 4.9 Imagen de resistividad del perfil PE8 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior).

En el perfil PE8 (Figura 4.9) ambos dispositivos proporcionan la misma distribución de resistividad.

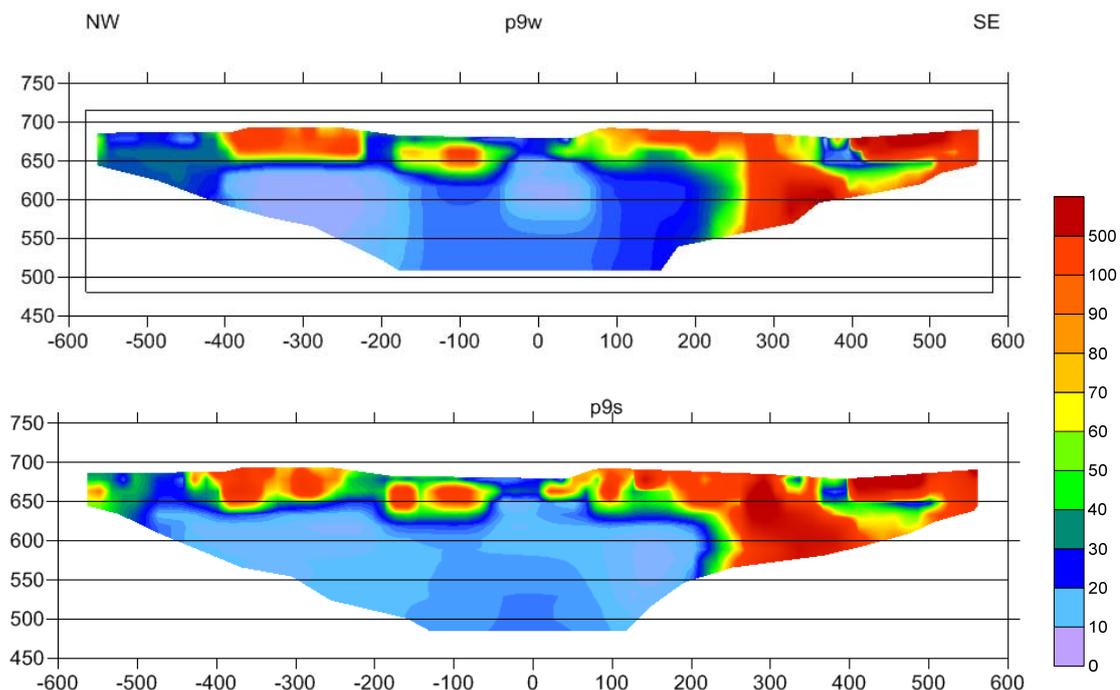


Fig. 4.10 Imagen de resistividad del perfil PE9 utilizando los dispositivos Wenner (parte superior) y Schlumberger (parte inferior).

En el perfil PE9 (Figura 4.10) ambos dispositivos proporcionan también la misma distribución de resistividad.

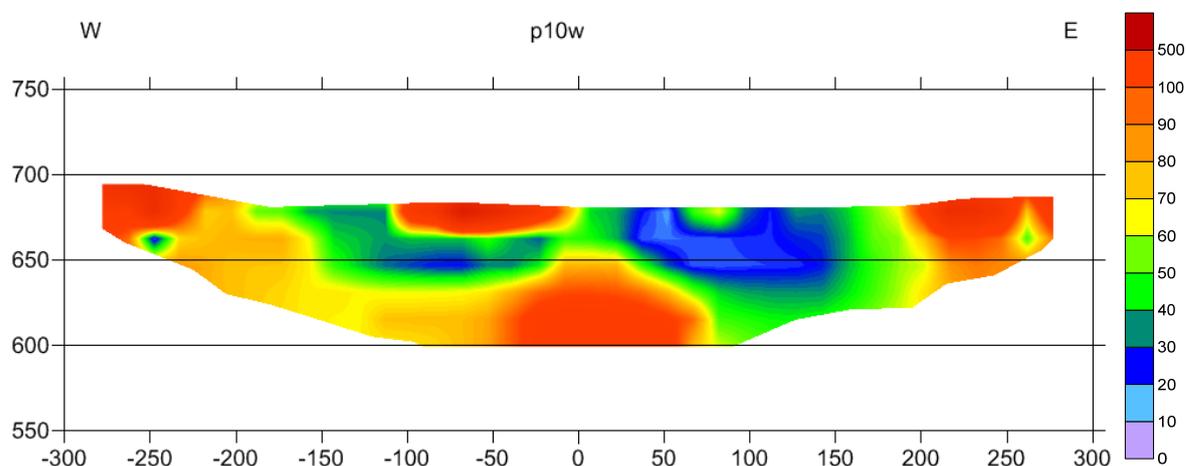


Fig. 4.11 Imagen de resistividad del perfil PE10, medido solamente con el dispositivo Wenner.

El perfil PE10 (Figura 4.11) está solamente medido con dispositivo Wenner.

A la vista de esta comparación, se ha decidido utilizar preferentemente las secciones Wenner para efectuar su interpretación, teniendo en cuenta las diferencias existentes en las Schlumberger allí donde se producen.

5 CAMPAÑA DE TESTIFICACIÓN DE SONDEOS

Como consecuencia de los resultados de los trabajos realizados en 2008, se han perforado 6 sondeos mecánicos para la obtención de datos de carácter hidrogeológico, así como para apoyo de la interpretación de la información geofísica; su posición se indica en la Figura 6.1 y los datos básicos (coordenadas, cota, características constructivas, nivel de agua y columna litológica simplificada) se recogen en la Tabla 5.1.

Una vez finalizada la perforación y acondicionamiento de los sondeos mecánicos, se llevó a cabo en noviembre de 2009 la testificación geofísica de 5 de ellos. Los datos fueron tomados mediante Asistencia Técnica contratada con la Compañía IGT. El detalle de la puesta en obra de esta campaña de testificación se encuentra recogido en el Informe efectuado por IGT ("Testificación Geofísica realizada para el IGME en las Lagunas de Estaña, Huesca. Diciembre 2009"; SID IGME nº por asignar), y los parámetros registrados se indican en la Tabla 5.1.

Se empleó el instrumento RG Micrologger II (SN 4082), registrándose los parámetros:

- Herramientas que miden propiedades de las rocas, con el objeto de permitir la diferenciación entre materiales del Keuper y del Muschelkalk, así como la evaluación de su contenido de agua:
 - Radiación gamma natural GN en cps: (sonda GCT SN 1479). El valor absoluto en cps del registro GN depende del tipo de sonda (volumen del detector), velocidad de registro y diámetro del sondeo, indicando el mayor o menor contenido en arcillas en sentido cualitativo.
 - Resistividad de la formación R en ohm.m: (sonda Induction probe SN 2052). Usada conjuntamente con la radiación gamma natural permite la identificación de los materiales calizos, así como diferenciar su contenido en agua (La sonda utilizada mide la conductividad de la formación Cf en mS/m, inverso de la resistividad).

- Herramientas de evaluación de la calidad del agua y medición del nivel piezométrico:
 - Conductividad del fluido C en mS/cm (sonda GCT SN 1479) a la temperatura ambiente
 - Temperatura del fluido T en °C. (sonda GCT SN 1479)

La velocidad de registro en bajada (sonda 1479) o en subida (sonda 2052) fue de 3 m por minuto en todos los sondeos. Los valores C de conductividad del fluido, leídos a la temperatura del agua T, se han corregido a 25 °C mediante la ecuación $C_{25} = 46.5 C / (T+21.5)$. El cálculo de salinidad S (g/l de ClNa equivalente) se ha hecho mediante la expresión: $S = 0.437001321 * C_{25}^{1.091302134}$, obtenida mediante calibración de la sonda con soluciones patrón. Los valores de conductividad del terreno Cf se han convertido a unidades de resistividad en ohm.m mediante $R = 1000/Cf$.

Los resultados de campo se presentan en las Figuras 5.1 a 5.5.

	UTM_X	UTM_Y	COTA 5000	COTA GEORREF	BROCAL	PROFUNDIDAD	testificación
S4	792252	4658797	677,4	678.4 brocal	0,12	35,5	GN,T,C (40 m)
S5	792044	4658583	679,96	680.74 suelo		33	GN,T,C, R
S3	792321	4658907	676,57	677.27 suelo	0,2	15	GN,T,C, R
S3b	792682	4659001	678,35		0,17	49,2	GN,T,C, R
S6	791904	4659464	692,47		0,12	40	no entubado
S1	791382	4659230	673,67			144	GN,T,C, R

	NIVEL agua	COLUMNA	ENTUBACION
S4	5,12	0-25 Muschelkalk, 25-35.5 Keuper	0-25 rejilla 25-35.5 ciego, todo tubo PVC diámetro 7,5 cm
S5	negativo	Muschelkalk	sin entubar
S3	4,05	0-6.5 Muschelkalk, 6.5-15 Keuper	0-6.5 rejilla, 6.5-15 ciego, todo tubo PVC diámetro 9 cm
S3b	6,95	todo Muschelkalk	todo rejilla, tubo PVC diámetro 7,5 cm
S6	14,29	0-35 Muschelkalk, 35-40 Keuper	0-35 rejilla, 35-40 ciego, todo tubo PVS diámetro 9 cm
S1	22,18	0-43 Muschelkalk, 43-144 Keuper	0-53 rejilla PVC diámetro 9 cm, 53-144 ciego PVC diámetro 5 cm

Tabla 5.1 Características de los sondeos mecánicos y parámetros testificados

El sondeo S4 no pudo registrarse con la sonda de resistividad debido a que imperfecciones en la entubación impidieron su utilización.

Los correspondientes ficheros con los valores registrados y calculados están recogidos en el ANEXO DIGITAL, en formato LAS-SIGEOF. Los ficheros de la sonda GCT SN 1479 contienen: profundidad m, temperatura del fluido T en °C, gamma natural (API cps), conductividad del fluido a temperatura T mS/cm, conductividad del fluido a 25°C mS/cm, salinidad en g/l de ClNa equivalente. Los ficheros de la sonda IND SN 2052 contienen: profundidad en m, gamma natural en cps, conductividad de la formación mS/m, resistividad de la formación ohm.m.

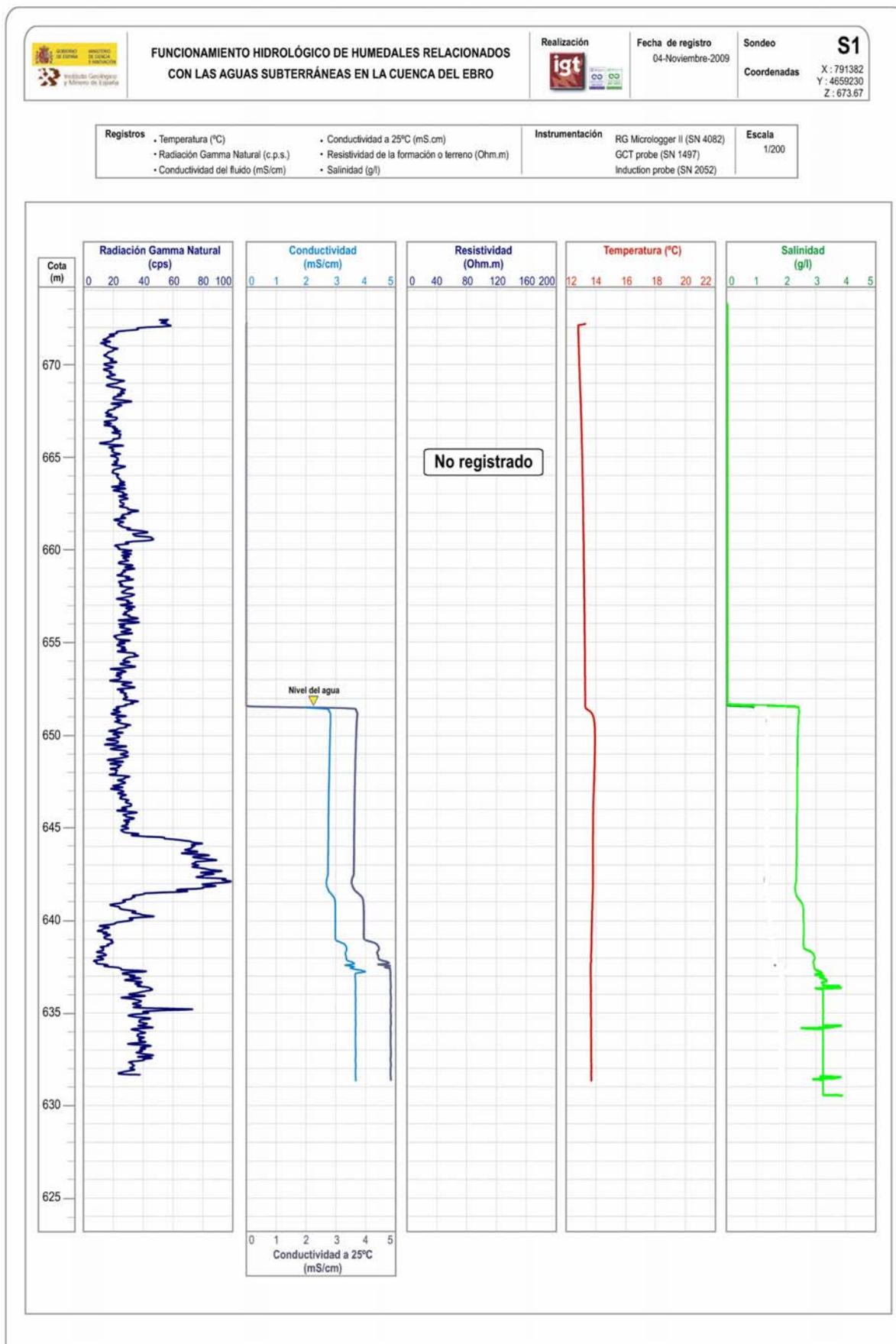


Fig. 5.1 Testificación del Sondeo mecánico S1.

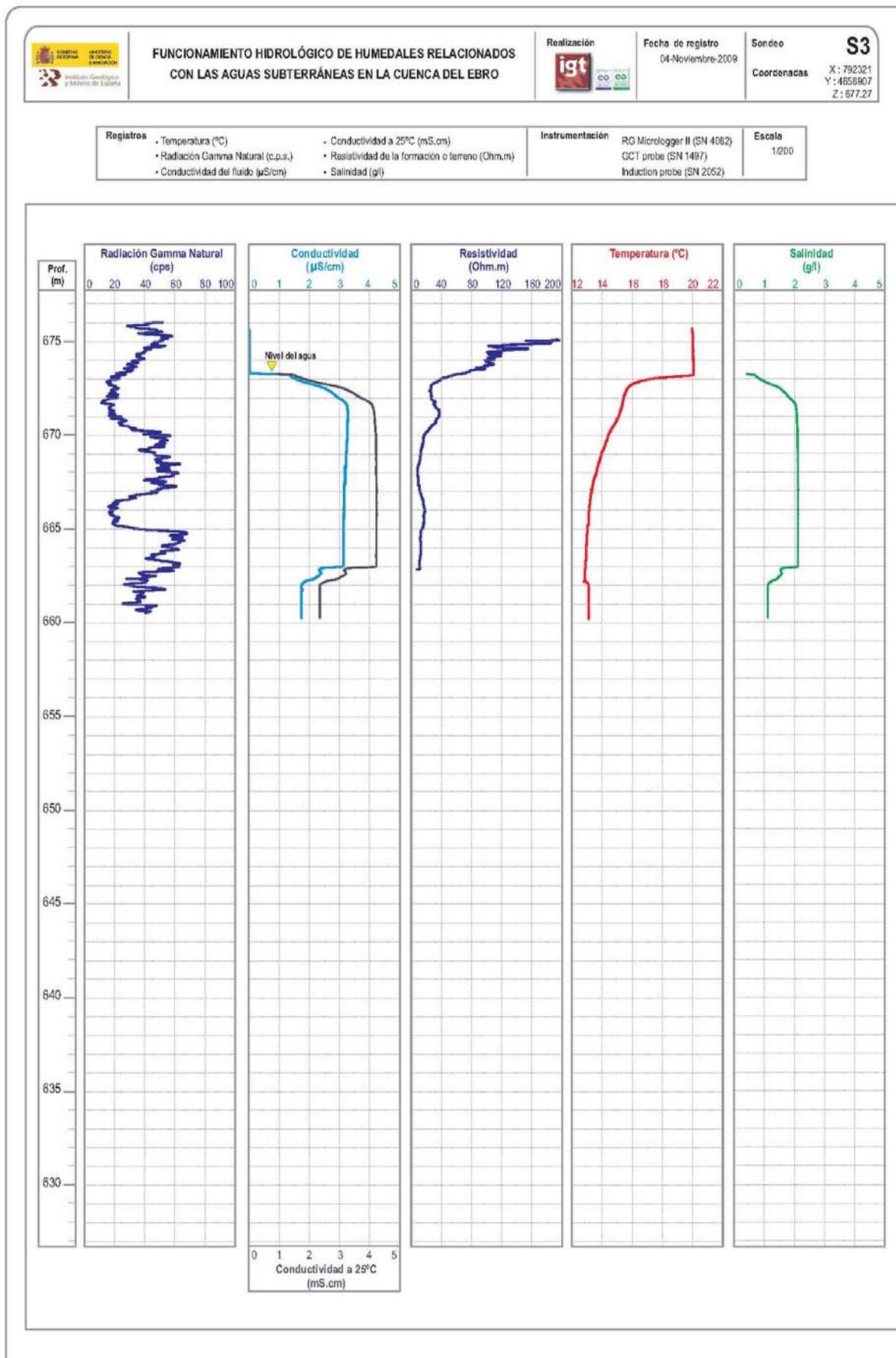


Fig. 5.2 Testificación del Sondeo mecánico S3.

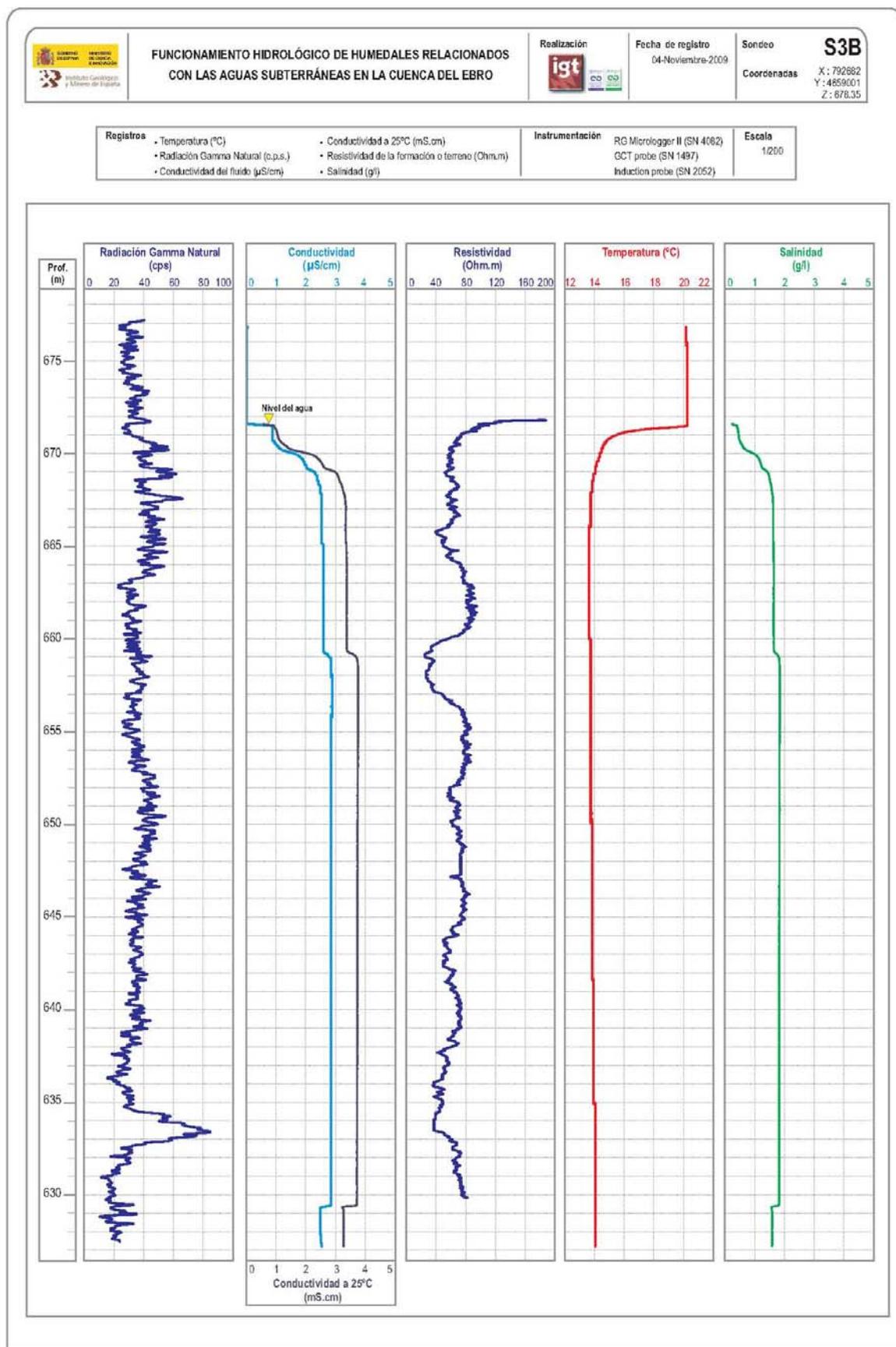


Fig. 5.3 Testificación del Sondeo mecánico S3b.

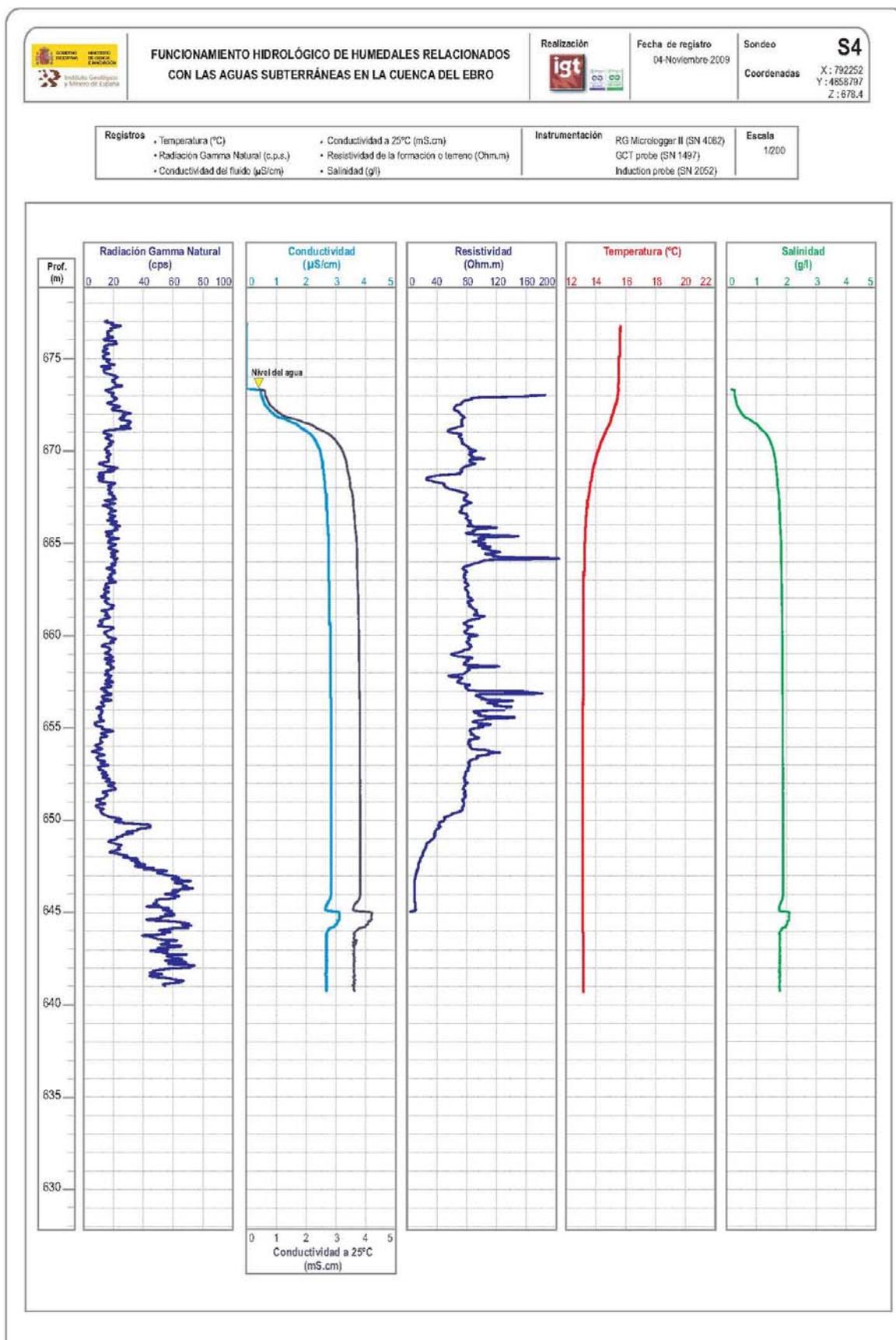


Fig. 5.4 Testificación del Sondéo mecánico S4.

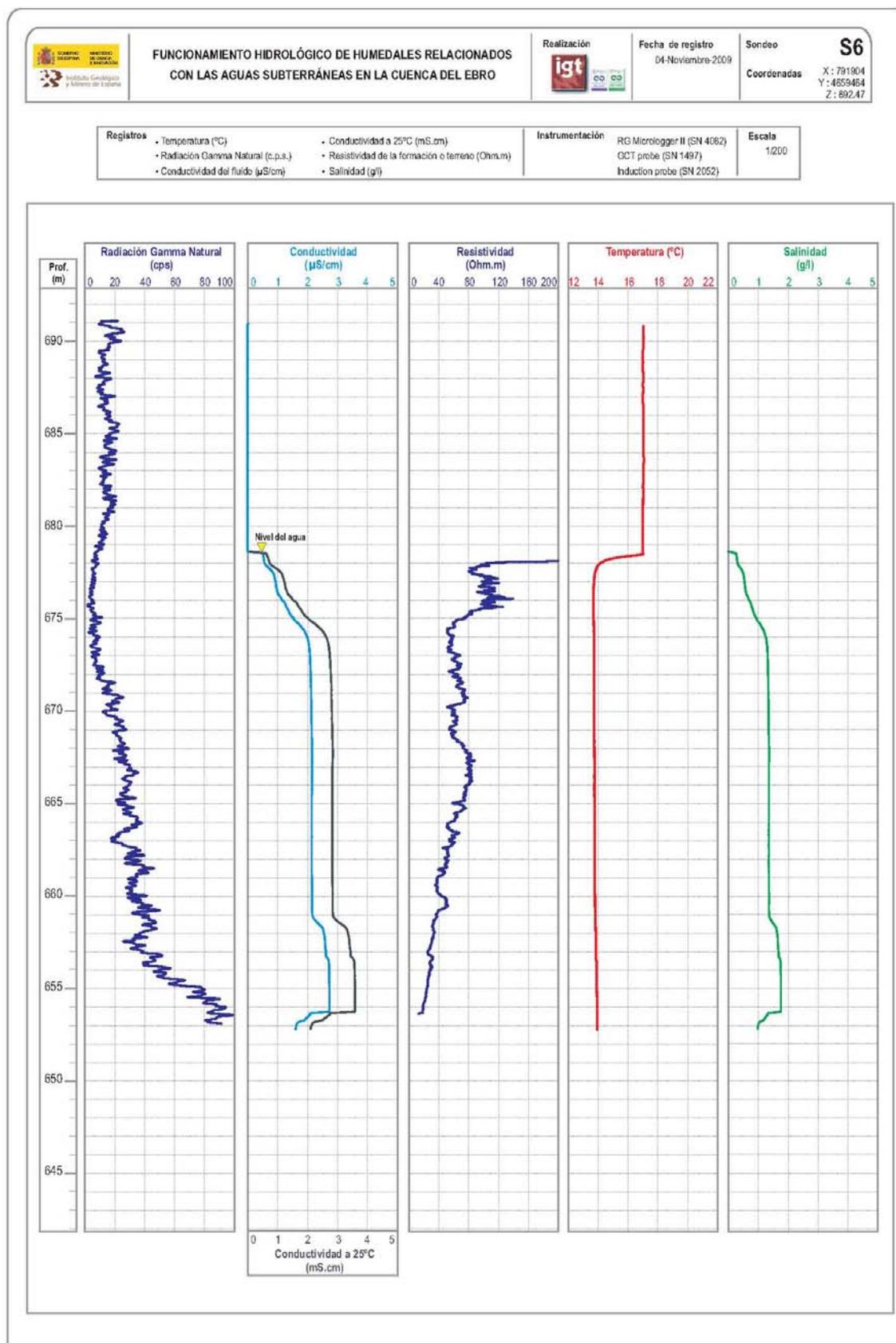


Fig. 5.5 Testificación del Sondeo mecánico S6.

6 ANÁLISIS CONJUNTO DE LOS DATOS DE LA TESTIFICACIÓN, PE Y SRM

Como se recuerda en el Capítulo 2 de este Informe (*Resumen de los resultados de la campaña geofísica de 2008*), para la interpretación de los Perfiles Eléctricos es necesario disponer de puntos de control para asignación de la resistividad a las diferentes litologías existentes, que se indican en la leyenda geológica de la Figura 6.1. La disponibilidad de sondeos mecánicos ha permitido conocer la columna geológica de algunos emplazamientos, cuya situación y relación con el resto de la información geofísica se indica en la misma Figura 6.1.

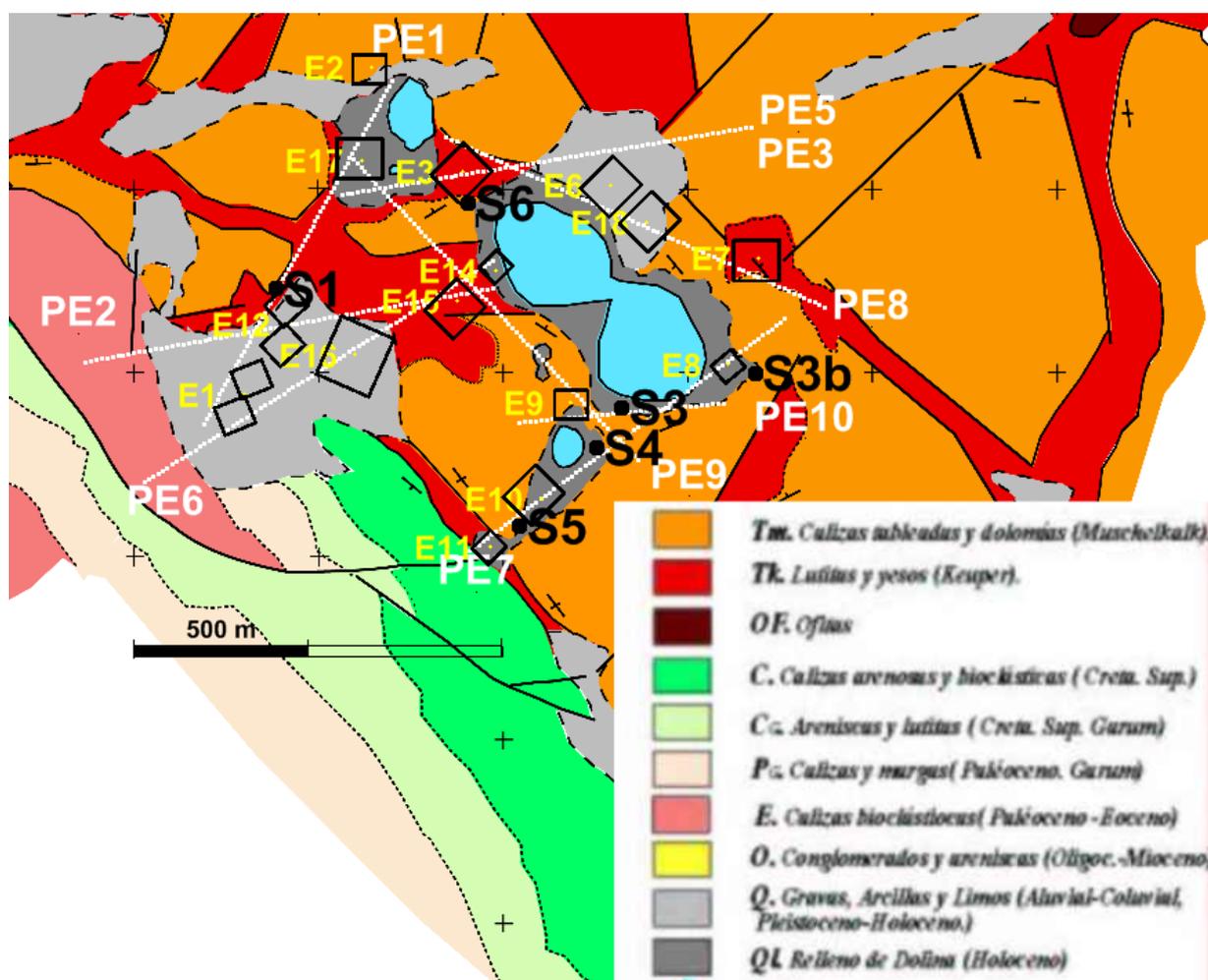


Fig. 6.1 Posición de sondeos mecánicos (Sx, puntos negros), perfiles eléctricos (PEX, líneas en blanco), SRM Ex (etiqueta amarilla y forma y dimensiones de la antena en cuadrados negros) y leyenda geológica.

La información hidrogeológica básica de los sondeos mecánicos se recoge nuevamente en la Tabla 6.1.

sondeo	COTA	PROFUNDIDAD	NIVEL agua	COLUMNA	testificación
S1	673,67	144	22,18	0-43 Muschelkalk, 43-144 Keuper	GN,T,C (40 m)
S3	677,27	15	4,05	0-6.5 Muschelkalk, 6.5-15 Keuper	GN,T,C, R
S3b	678,35	49,2	6,95	todo Muschelkalk	GN,T,C, R
S4	678,4	35,5	5,12	0-25 Muschelkalk, 25-35.5 Keuper	GN,T,C, R
S5	680,74	33	negativo	Muschelkalk	no entubado
S6	692,47	40	14,29	0-35 Muschelkalk, 35-40 Keuper	GN,T,C, R

Tabla 6.1. Información hidrogeológica básica de los sondeos mecánicos y parámetros testificados.

Al considerar de forma conjunta la información suministrada por cada uno de los métodos geofísicos contemplados hay que tener en cuenta el volumen del subsuelo de donde proviene la información obtenida por cada uno de ellos:

- La testificación de un sondeo mecánico sólo informa de las propiedades (resistividad y gamma natural) de las rocas de las paredes del sondeo en un radio de pocos cm y hasta la profundidad testificada.
- Los Sondeos de Resonancia Magnética integran la información del contenido en agua (porosidad eficaz) y permeabilidad de las rocas en un área de 75 a 225 m de radio entorno el punto central de la antena, y hasta una profundidad de 50 a 150 m (valores para antenas de 50 y 150 m de lado respectivamente).
- Los perfiles eléctricos proporcionan un valor de la resistividad de las rocas como resultado del paso de la corriente eléctrica por un volumen del subsuelo variable con la profundidad, según las dimensiones del dispositivo de electrodos de emisión y de medición; esto puede suponer la integración de la resistividad de un área de 25 a 600 m de radio entorno del punto central de atribución, para profundidades de 7 a 200 m; por lo tanto los valores asignados a un plano o sección vertical bajo los electrodos pueden estar afectados por rocas que realmente no se encuentran en dicho plano (efectos laterales). En casos de anisotropía en las estructuras geológicas, la dirección o rumbo del perfil también puede ser determinante en el valor de la resistividad medida.

Por lo tanto, de una forma muy esquemática, puede decirse que se trata de comparar la información correspondiente a una línea vertical (sondeo), un cilindro de 75 m a 225 m de radio (SRM) y un tronco de cono con base superior de 25 m de radio e inferior de hasta 600 m (PE).

6.1 Sondeo mecánico S1

El sondeo tiene 144 m de profundidad (Figura 6.2) pero, por deformaciones de la entubación, no pudieron ser testificados nada más que los primeros 40 m, ni se pudo utilizar la sonda de resistividad de la formación. Está emboquillado en las calizas del Muschelkalk, a pocos metros del contacto con el Keuper, al que corta a partir de los 43 m de profundidad hasta el final, por lo que la testificación ha registrado solamente valores dentro del Muschelkalk. La radiación GN se mantiene en el orden de 20-30 cps en los primeros 29 m, con una pequeña capa más arcillosa entre 13 y 13.25 m, presentando un claro pico de hasta 90 cps y de unos 3 m de potencia entre los 29.10 y los 32.40 m de profundidad; posteriormente los valores descienden a menos de 10 cps hasta los 36.5 m, volviendo a aumentar a más de 40 cps hasta el final (este último aumento de cps, así como las anomalías de las testificaciones de Temperatura y Conductividad puede ser debido al atasco de la sonda en la entubación). Presenta por lo tanto un Muschelkalk no homogéneo, con intercalaciones arcillosas de diferente potencia, que pueden constituir pantallas impermeables. El nivel del agua detectado tanto por el cambio de temperatura como de conductividad se sitúa en los 22.18 m. Los valores de estos parámetros son del orden de 13.8 °C y 3.6 mS/cm (a temperatura ambiente; 4.7 mS/cm a 25 °C).

El perfil PE1 pasa a menos de 20 m del S1, con dirección paralela al contacto Keuper-Muschelkalk, estando los electrodos sobre el Keuper (según la cartografía). El fin del Muschelkalk en el sondeo coincide perfectamente con un cambio neto de resistividad en la sección (Figura 6.3, por lo que puede deducirse que el Muschelkalk tiene resistividades (en la sección geoelectrica) entre 40 y 80 ohm.m en la parte saturada, mientras que cuando no contiene agua la resistividad es superior a 100 ohm.m. El Keuper se corresponde con valores inferiores a 40 ohm.m. La alta resistividad de los primeros 50-80 m de la sección PE1 pueden por tanto interpretarse como la ausencia de Keuper en esa zona o al menos que es de muy poca potencia, debiéndose la resistividad al Muschelkalk bien suprayacente o en contacto lateral muy próximo a los electrodos. Es evidente que la sección geoelectrica no tiene la resolución suficiente como para poder diferenciar la capa de arcilla de 5 m detectada por la testificación.

En la Figura 6.2 se ha incluido la interpretación del SRM E12, cuyo bucle de medición fue extendido sobre el cuaternario que cubre el Keuper (según la cartografía disponible) al Sur del S1. El centro de la antena está entre 50-150 m del sondeo. Si la situación reflejada por el sondeo mecánico fuera la misma que bajo el área cubierta por el SRM, podría establecerse una comparación directa de ambos resultados. Sin embargo, aunque es notable la coincidencia entre la anomalía de GN en el tramo de los 29 a 32 m y el tramo sin agua del SRM, la comparación de ambas informaciones daría como conclusión que el Muschelkalk apenas contiene agua, encontrándose ésta precisamente en el Keuper; es contradictorio que el SRM detecte agua durante más de 30 m en terrenos de alta permeabilidad (valor de T_1) que pertenezcan al Keuper. Aunque, según el esquema de trabajo que se contempla en este Proyecto, no se puede descartar la presencia de cavidades kársticas en los yesos del Keuper, única forma en que esta formación podría contener agua libre, en principio la imagen geoelectrica no evidencia la geometría de tales conductos.

Si se tiene en cuenta que la información del SRM proviene de un volumen grande entorno de la antena, cuya intersección con el perfil de resistividad se indica en la Figura 6.3, el resultado es muy diferente: son las rocas del Muschelkalk las que contiene agua. Esto pone de evidencia que no se pueden efectuar comparaciones puntuales, sino considerar el volumen de roca investigado por el SRM.

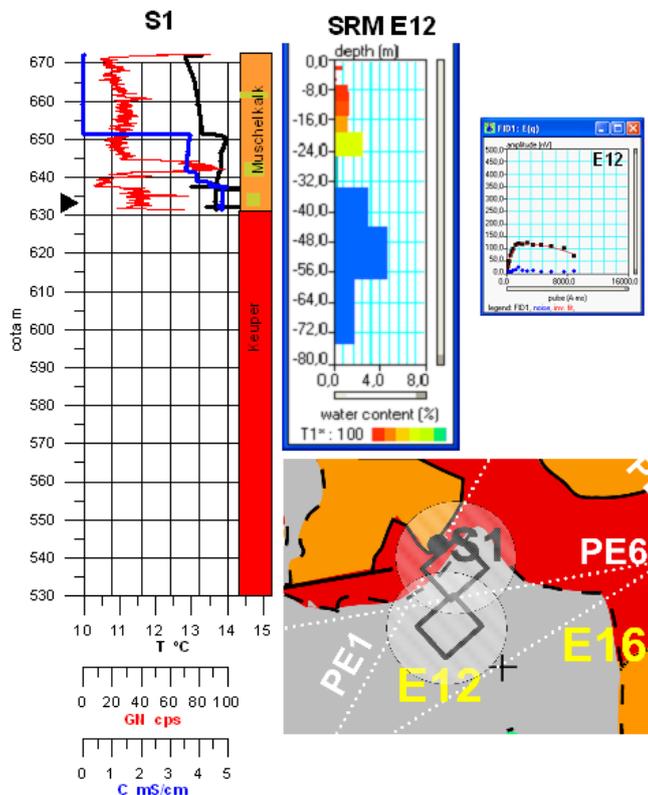


Fig. 6.2 Sondeo S1. Testificación geofísica y columna litológica. Resultado del SRM E12. El área sombreada entorno de la antena del SRM E12 indica el origen de la información suministrada por el mismo.

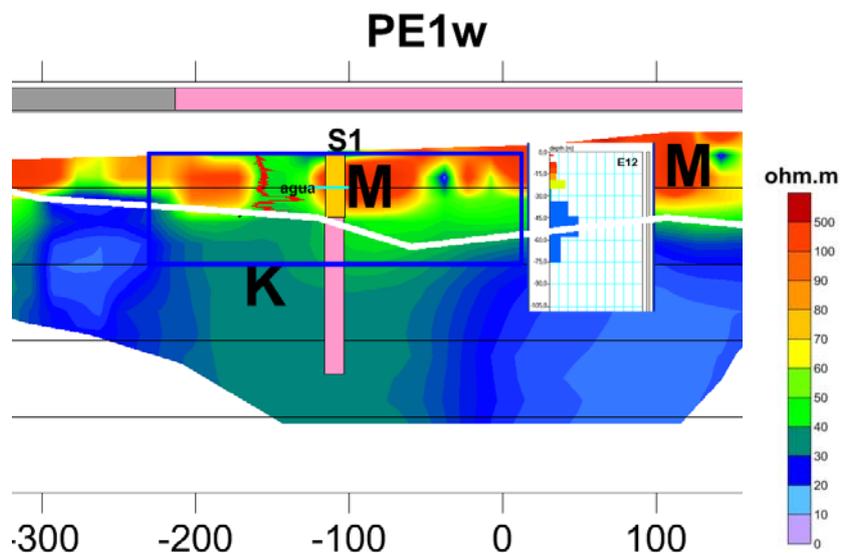


Fig. 6.3 Fragmento de la sección eléctrica PE1. El S1 está frente a la estación -113 m del PE1. El recuadro azul indica el volumen investigado por el SRM E12.

Sondeo mecánico S5

Tiene 33 m de profundidad; está emboquillado sobre Cuaternario (Figura 6.4) y toda su columna se desarrolla en el Muschelkalk; no ha encontrado agua ni ha sido testificado geofísicamente.

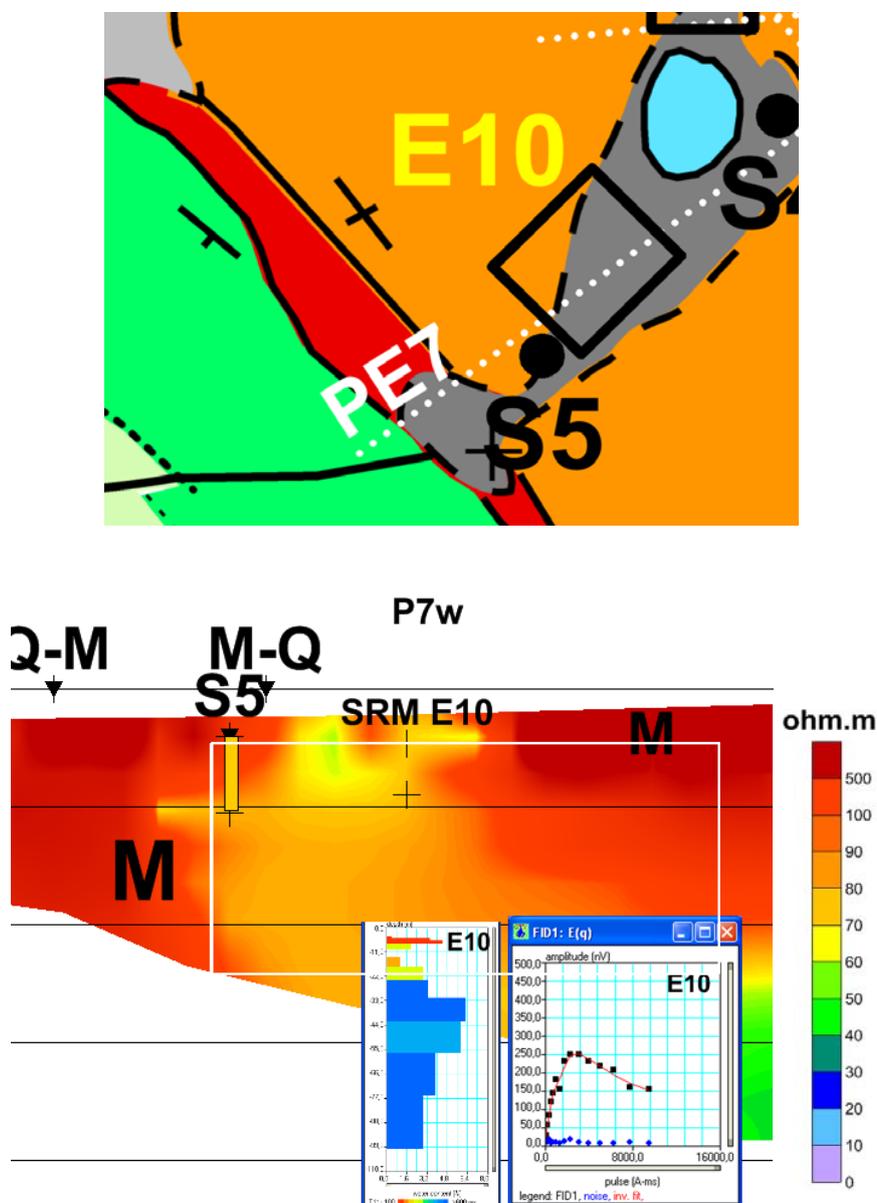


Fig. 6.4 Posición del sondeo S5 y PE7. Fragmento de la sección PE7 con proyección de la columna del S5 y volumen investigado por el SRM E10 (línea blanca)

Se encuentra a 30 m de la distancia -367 m perfil PE7, cuyos electrodos transcurren en esta zona sobre Muschelkalk; su proyección sobre la sección (Figura 6.4) permite identificar una resistividad superior a los 100 ohm.m llegando a más de 500 ohm.m en la parte más superficial (primeros 20 m) como perteneciente al Muschelkalk seco. La antena del SRM E10 cubre el sondeo S5, encontrando agua en terrenos permeables por debajo de los 20 m de profundidad en un acuífero cuyo fin no ha sido alcanzado por el SRM. Parte del volumen involucrado en la medición se corresponde con una resistividad entre 50-80 ohm.m, que puede interpretarse como de mayor fracturación, en claro contraste con la zona donde se ha perforado el S5.

Sondeo mecánico S4

Emboquillado en el Cuaternario, tiene 35.5 m de profundidad, encontrando el Keuper a los 25 m de profundidad y el nivel de agua a 5.12 m (Figura 6.5).

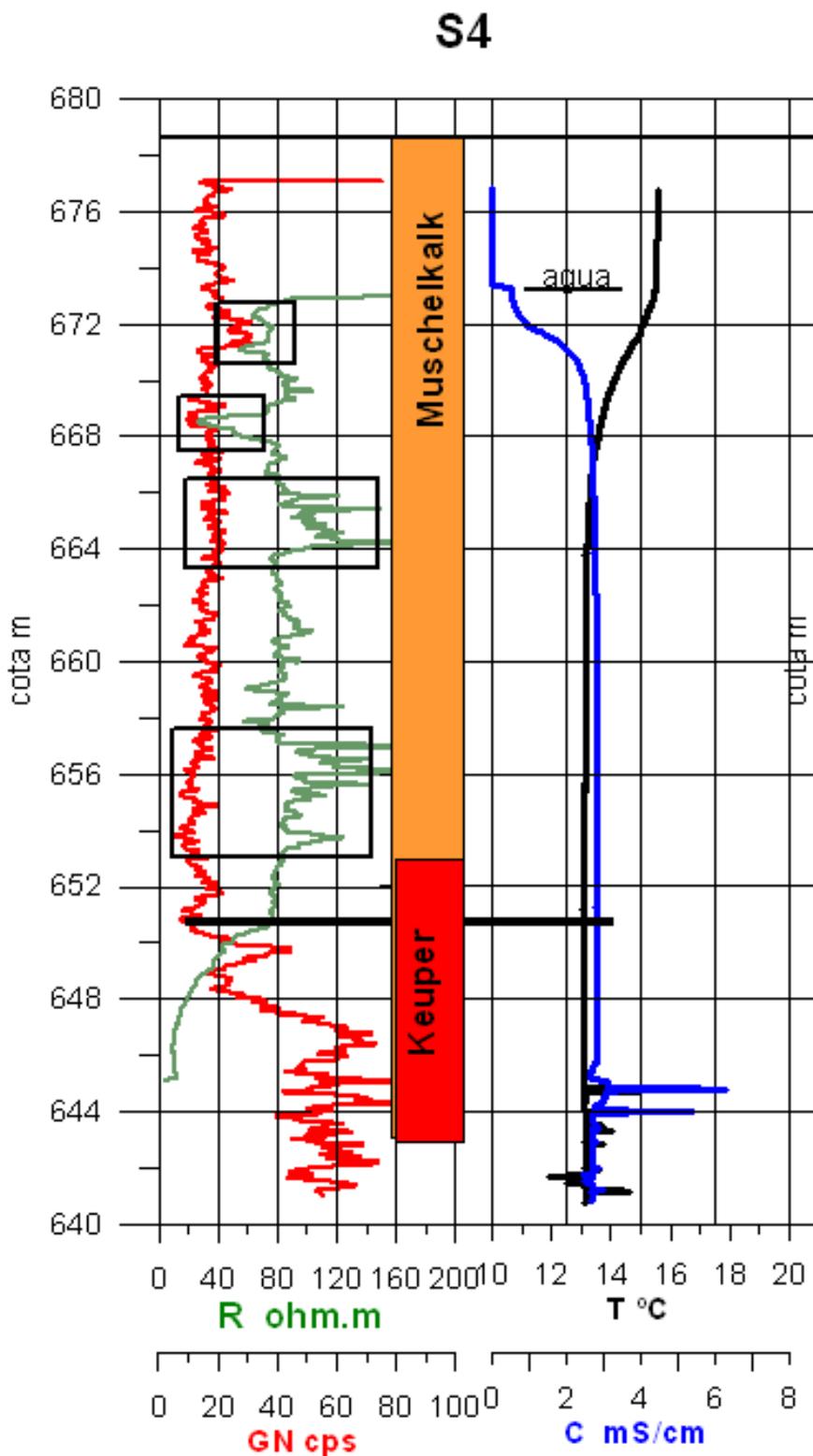


Fig. 6.5 Columna litológica y testificación del sondeo S4; se señalan mediante un recuadro las principales anomalías encontradas.

Ha sido testificado con todos los parámetros. En el Muschelkalk la radiación GN es del orden de 20 cps, pasando a valores superiores a partir de la cota 650, por debajo de la entrada en el Keuper (653.4 m, según recuperación del testigo), con aumento gradual hasta situarse en unas 120 cps. La resistividad tiene valores superiores a 200 ohm.m en el Muschelkalk seco, pasando a unos 80 ohm.m en el Muschelkalk saturado; a partir de los 650 m, algo por debajo de la entrada del sondeo en el Keuper; la resistividad disminuye de forma gradual hasta llegar a menos de 20 ohm.m. Se presentan algunas anomalías: sobre los 672 m se aprecia una ligera disminución de resistividad acompañada de un ligero aumento de radiactividad, lo que pudiera indicar una capa de mayor arcillosidad; entre 668-670 m la disminución de resistividad va acompañada de una disminución de la gamma natural, por lo que se corresponde con un cambio de litología no asociada a arcillosidad; el aumento de resistividad entre 664-666 no tiene manifestación en la radiactividad, mientras que el aumento que se produce a 653-657 m está acompañado por una ligera disminución de la gamma natural. Estas anomalías podrán ser mejor estudiadas cuando se disponga de la columna de detalle del sondeo, sin que sean significativas para la interpretación de las secciones geoelectricas, ya que éstas no tienen ese grado de resolución.

La conductividad del agua es algo inferior a la del sondeo S1, situándose en unos 3.8 mS/cm (a 25°C).

A pocos metros del sondeo mecánico S4 pasa el perfil eléctrico PE7 (Figura 6.5). El Muschelkalk comienza en una zona de más de 500 ohm.m (Figura 6.6), pudiendo corresponderse la presencia del agua a una disminución a menos de 100 ohm.m. El paso a terrenos del Keuper no es notable por el cambio de resistividad en las mediciones con dispositivo Wenner, pero puede correlacionarse con una bajada a valores inferiores a 60 ohm.m en la sección Schlumberger, lo que es más notable al utilizar los valores de resistividad asignados a las celdas del modelo (Figura 6.7).



Fig. 6.6 Mapa de posición donde se indica el segmento del PE7 (en línea blanca continua) representado en la Figura 6.7.

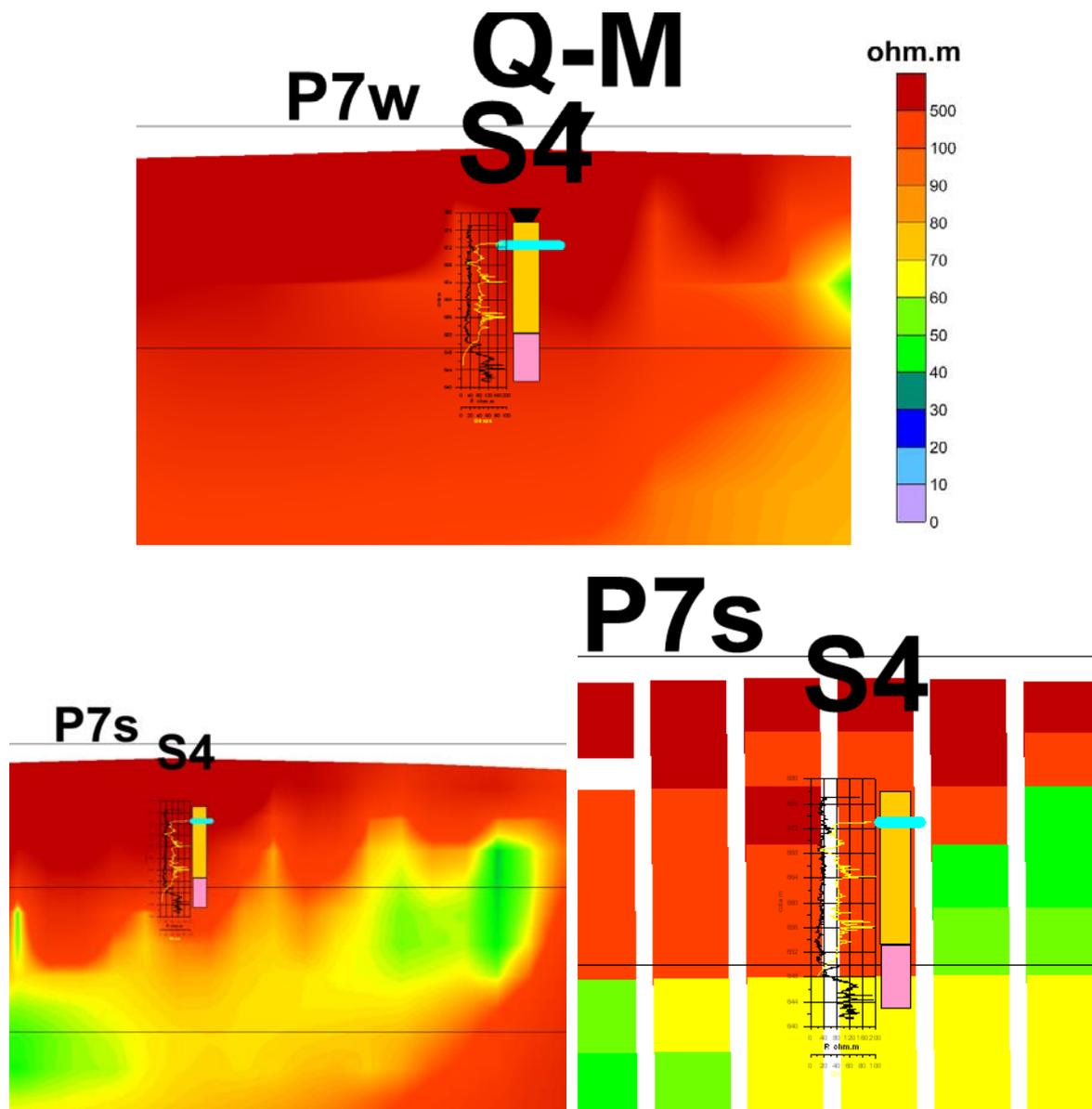


Fig. 6.7 Superior: sección geoelectrica PE7 dispositivo Wenner con posición del S4 y testificación de GN y resistividad. Inferior izquierda: detalle de la sección Schlumberger. Inferior derecha: detalle con representación de los valores en las celdas de modelización del subsuelo. La distancia entre líneas de referencia horizontales es de 50 m.

El SRM más próximo (el E9) se encuentra a más de 100 m de distancia, por lo que su volumen de investigación no incluye al S4.

Por lo tanto, en el sondeo S4 puede concluirse que en la testificación el Muschelkalk seco tiene valores de resistividad superiores a 200 ohm.m, que pasan a 80-120 ohm.m con el contenido en agua, y a menos de 40 ohm.m en el Keuper. En las secciones geoelectricas estos valores se corresponden con 100-500 ohm.m, 60 ohm.m y 70 ohm.m respectivamente, siendo más evidentes en las mediciones Schlumberger. El paso del Muschelkalk al Keuper presenta una gradación en la disminución de resistividad y aumento de la radiactividad.

Sondeo mecánico S3

De sólo 15 m de profundidad, está situado a pocos metros del borde sur de la Laguna Grande (Figura 6.9), emboquillado en Cuaternario. Atraviesa rocas del Muschelkalk hasta los 6.5 m de profundidad, pasando a Keuper hasta el final del sondeo (Figura 6.8). La conductividad del agua es de 4.3 mS/cm (a 25 °C).

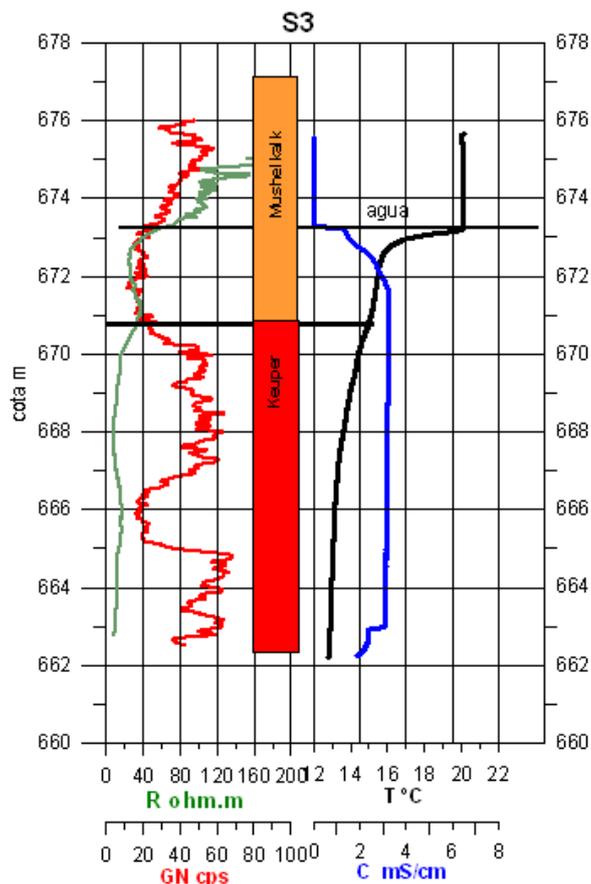


Fig. 6.8 Columna litológica y testificación del sondeo S3.

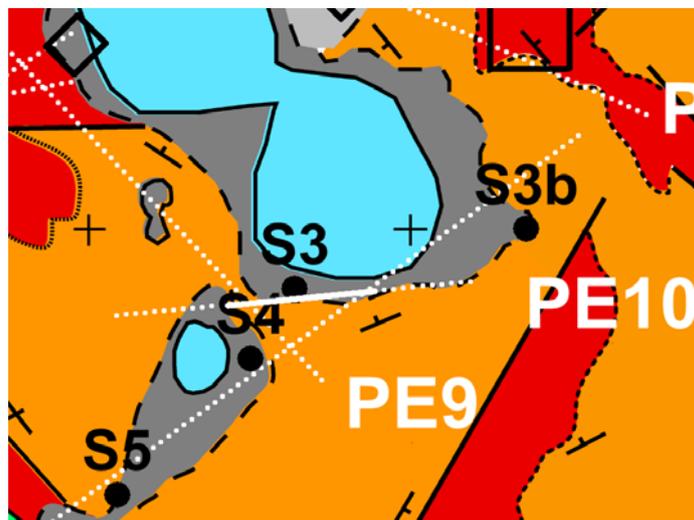


Fig. 6.9 Mapa de posición donde se indica el segmento del PE10 (en línea blanca continua) representado en la Figura 6.10.

Asumiendo que el nivel del agua de formación sea el mismo que el piezométrico, el Muschelkalk seco tiene una resistividad, según la testificación (Figura 6.8), superior a los 200 ohm.m, que disminuye a menos de 40 ohm.m en la zona saturada, y a menos de 20 ohm.m al pasar al Keuper. La radiación Gamma Natural presenta un pico de valores más altos en los primeros dos metros, que pueden representar alguna capa arcillosa; seguidamente las cps se sitúan en los valores característicos del Muschelkalk en esta zona (sobre los 20 cps), aumentando de nuevo al entrar en el Keuper; a los 666 m hay una capa de menor arcillosidad en el Keuper, que se correlaciona bien con un ligero aumento de la resistividad. Los valores de conductividad del agua en el interior de la entubación son análogos a los sondeos anteriormente comentados.

El Perfil Eléctrico más próximo al sondeo S3 es el PE10, estando sus electrodos a menos de 15 m del sondeo. El tramo seco del Muschelkalk (Figura 6.10) tiene una resistividad en la sección geoelectrica superior a 100 ohm.m, mientras que el resto de la columna del sondeo mecánico se encuentra entre los 40-60 ohm.m, sin diferenciación al pasar al Keuper. No obstante, debe tenerse en cuenta la menor resolución de la sección geoelectrica respecto de la testificación, así como los diferentes volúmenes del subsuelo involucrados, y en ese sentido puede asumirse que la disminución que se aprecia en la anomalía resistiva al Este del S3 corresponde al Muschelkalk, que tiene más de 100 ohm.m cuando está seco, disminuyendo a valores del orden de 70 ohm.m cuando se satura de agua; el Keuper vendría entonces representado por los valores de resistividad inferiores a 50 ohm.m. No hay ningún SRM cuya área de influencia incluya el sondeo S3.

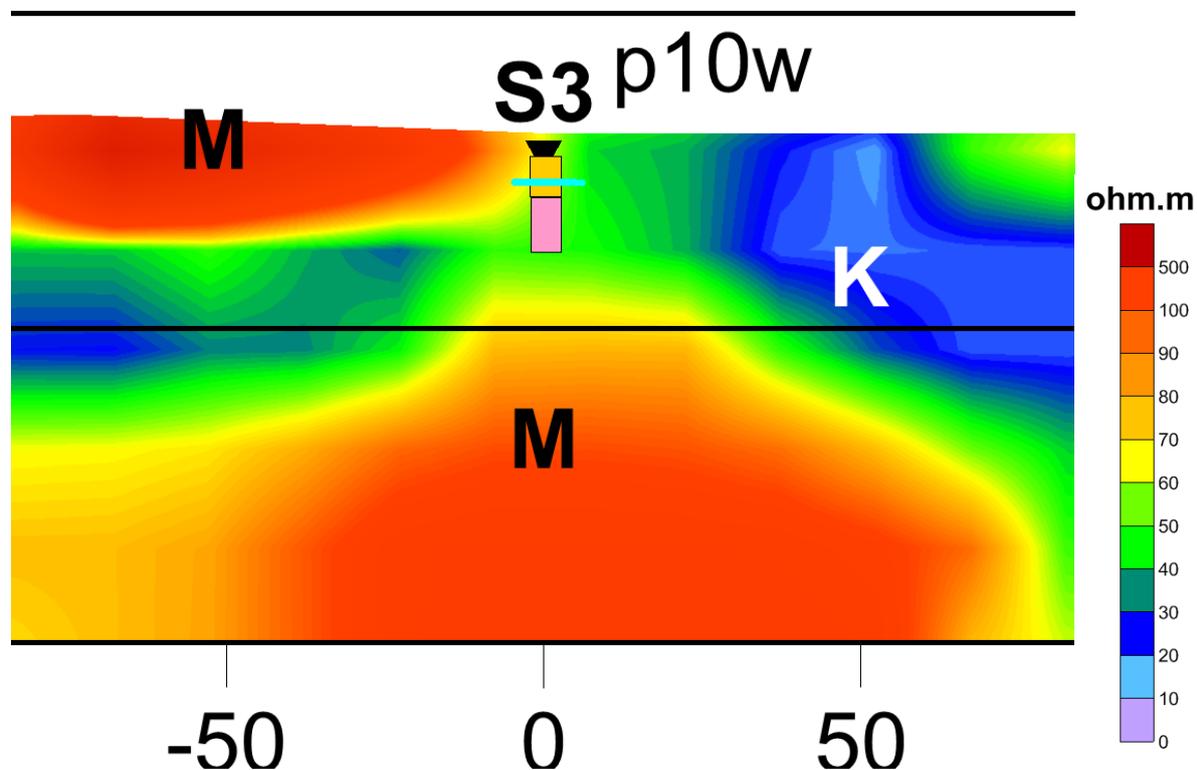


Fig. 6.10 Detalle del PE10 con información del sondeo mecánico S3. La distancia entre líneas de referencia horizontales es de 50 m.

Sondeo mecánico S3b

Situado al este de la Laguna Grande (Figura 6.11), tiene 49.2 de profundidad, no cortando nada más que materiales del Muschelkalk y encontrando el agua a los 6.95 m, de 3.4 mS/cm, que pasa a 3.7 mS/cm a la cota 659 m (Figura 6.12).

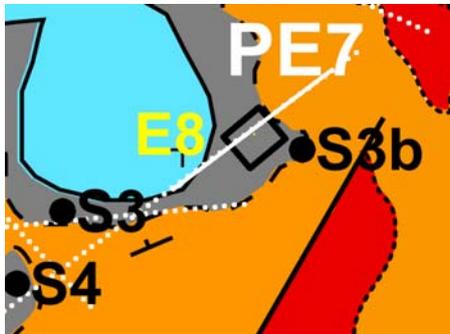


Fig. 6.11 Posición del S3b y SRM E8. Se indica el segmento del PE7 (en línea blanca continua) representado en la Figura 6.13.

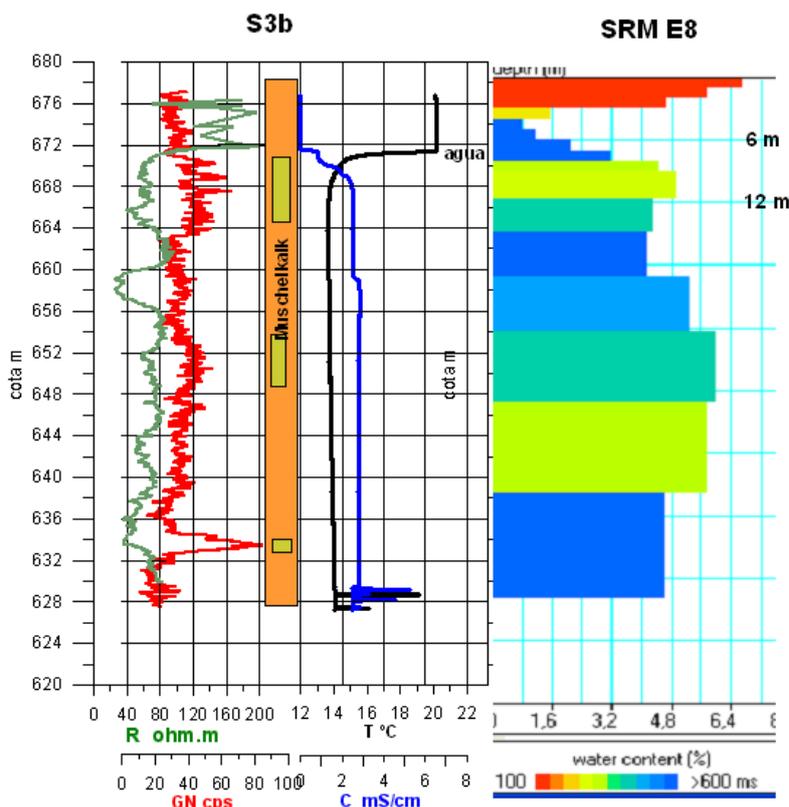


Fig. 6.12 Testificación del sondeo mecánico S3b, con indicación de su columna litológica e interpretación del SRM E8.

La resistividad de la testificación del tramo seco es del orden de 120-200 ohm.m, disminuyendo bruscamente a 50-80 ohm.m al saturarse en agua; en el resto de la columna la resistividad aumenta hasta 80 ohm.m o disminuye hasta 40 ohm.m según el grado de arcillosidad indicado por la radiación gamma natural, lo que supone una cierta heterogeneidad en la litología, cuyas mayores variaciones

se han indicado mediante recuadros en la columna de la Figura 6.12. Según la testificación de conductividad, la salinidad es la misma que en los sondeos anteriores.

El Perfil Eléctrico PE7 pasa a unos 60 m al norte del sondeo S3b; la correspondencia entre el resultado de la testificación y la distribución de resistividades en la sección geoelectrica es buena (Figura 6.13): el Muschelkalk seco se correspondería con valores superiores a 100 ohm.m, pasando al orden de 50-80 ohm.m al saturarse en agua, lo que se observa mejor al utilizar los valores de resistividad calculados en las celdas del modelo de inversión del PE. Las oscilaciones de la resistividad indicadas por la testificación también pueden ser visibles en la sección.

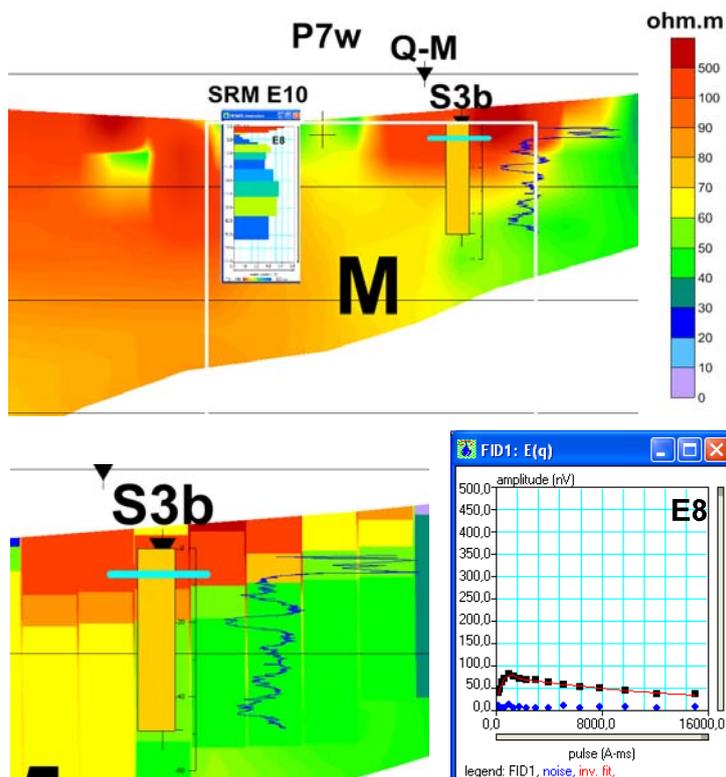


Fig. 6.13 Parte superior: Información litológica y testificación de resistividad del sondeo mecánico S3b sobre el perfil eléctrico PE7 y resultado de la inversión del SRM E8, cuya zona de influencia se indica por un recuadro en línea blanca. La distancia entre líneas de referencia horizontales es de 50 m. Parte inferior izquierda: Detalle de la sección PE7 utilizando los valores de resistividad en las celdas del modelo de inversión del PE. Inferior derecha: curva $E_0(q)$ del SRM E8.

El centro del SRM E8 se encuentra a unos 60 m del sondeo mecánico S3b; su antena, de 50 m de lado, está extendida sobre Cuaternario suprayacente al Muschelkalk. En los primeros 2 m se detecta agua en terrenos muy poco permeables (bajos valores del parámetro T_2^*) que pudieran corresponder a materiales del Cuaternario. Sobre unos 6 m de profundidad, en plena coincidencia con los datos aportados por el sondeo mecánico (Figura 6.12) se detecta otro acuífero, según su curva $E_0(q)$ es bastante potente, sin que el SRM haya detectado su fin (Figura 6.13); por otra parte, las variaciones en el tiempo de decaimiento T_2^* indican un litología heterogénea o diverso grado de fracturación, cuyos tramos de menor permeabilidad guardan una aceptable correspondencia con los de mayor radiación gamma y menor resistividad, teniendo en cuenta las diferentes resoluciones de cada técnica.

Sondeo mecánico S6

De 40 m de profundidad, se encuentra en el extremo norte de la Laguna Grande (Figura 6.14); emboquillado en el Muschelkalk, corta el Keuper a los 35 m, situándose el nivel piezométrico a 14.29 m de profundidad, con un agua de 2.8 mS/cm, que pasa a 3.6 mS/cm a la cota 659 m (Figura 6.15).

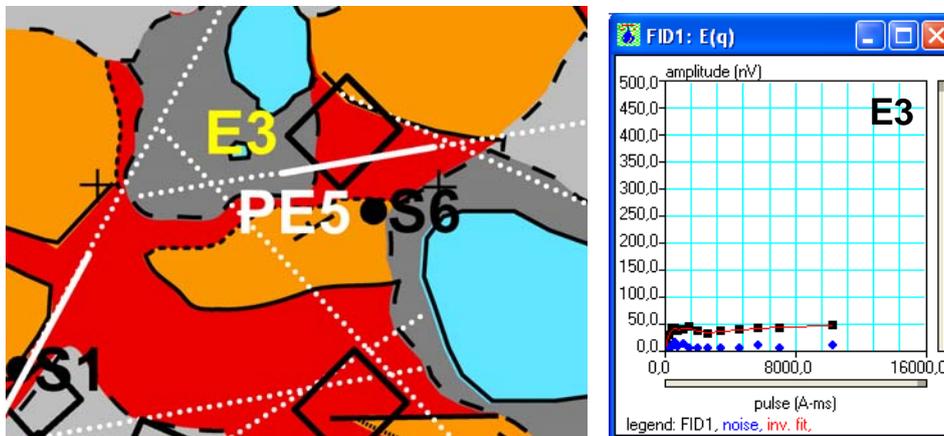


Fig. 6.14 Posición del sondeo mecánico S6, SRM E3 y perfil eléctrico PE5. Se muestra también la curva $E_0(q)$ del SRM E3. Se indica el segmento del PE5 (en línea blanca continua) representado en la Figura 6.16.

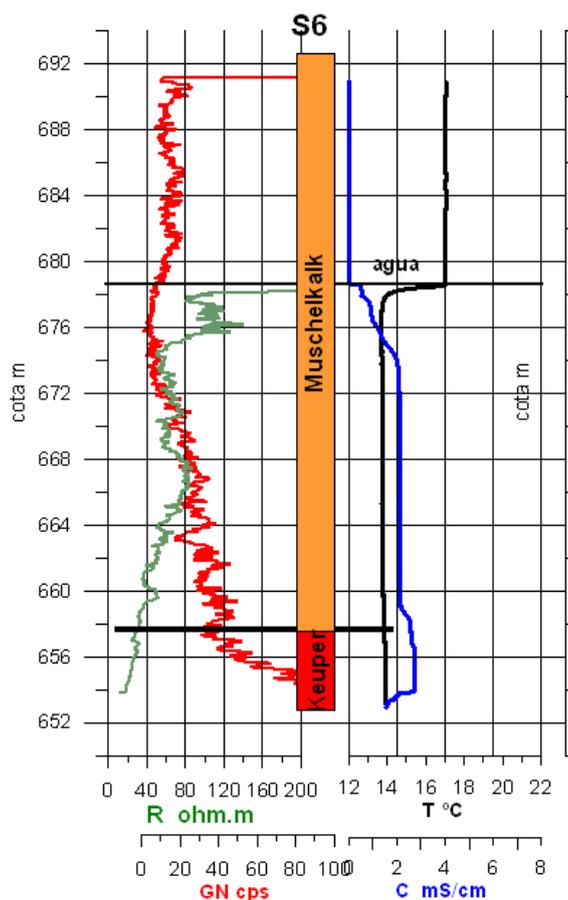


Fig. 6.15 Testificación del sondeo mecánico S6, con indicación de su columna litológica.

El tramo seco del Muschelkalk tiene resistividades superiores a los 200 ohm.m, que desciende bruscamente al tener agua, adoptando un valor medio de 60-80 ohm.m en el tramo saturado. Se

observan importantes variaciones de resistividad: en los primeros 2 m se miden 60-120 ohm.m que van asociados a una disminución de la radiación gamma; posteriormente se mantiene entorno a los 60-80 ohm.m durante 8 m (hasta la cota 668); a partir de esta cota la resistividad va progresivamente disminuyendo, sin que la aparición de materiales del Keuper a la cota 657.47 suponga un cambio neto de la misma, al igual que ocurre en el sondeo S4, lo que indica una gradación en el aumento del contenido en arcilla. En cualquier caso, los materiales del Keuper tienen menos de 20 ohm.m. La radiación gamma natural presenta una ligera disminución de las cps asociada al tramo resistivo entre los 678-676 m, manteniendo posteriormente un progresivo aumento asociado al mismo tipo de disminución de la resistividad, y experimentando un aumento neto al entrar en el Keuper. Otra posible interpretación a este progresivo aumento de la radiación asociado a la progresiva disminución de la resistividad es que se trata de una secuencia típica de deposiciones granodecrecientes, aunque en el contexto geológico en que nos encontramos haya posiblemente que interpretarla como un progresivo aumento de la arcillosidad o de la salinidad del agua con la profundidad, lo que detecta parcialmente la testificación.

La posición de este sondeo hace dudosa su correlación con los datos geofísicos más próximos, ya que el Perfil Eléctrico PE5 y SRM E3 se encuentran tras el contacto con el Keuper. El perfil eléctrico PE5 se sitúa a menos de 100 m del S6 (Figura 6.14) y transcurre por encima del Keuper, reflejando terrenos de resistividad inferior a 30 ohm.m (Figura 6.16), sin ninguna correspondencia con la columna litológica del S6 y su testificación.

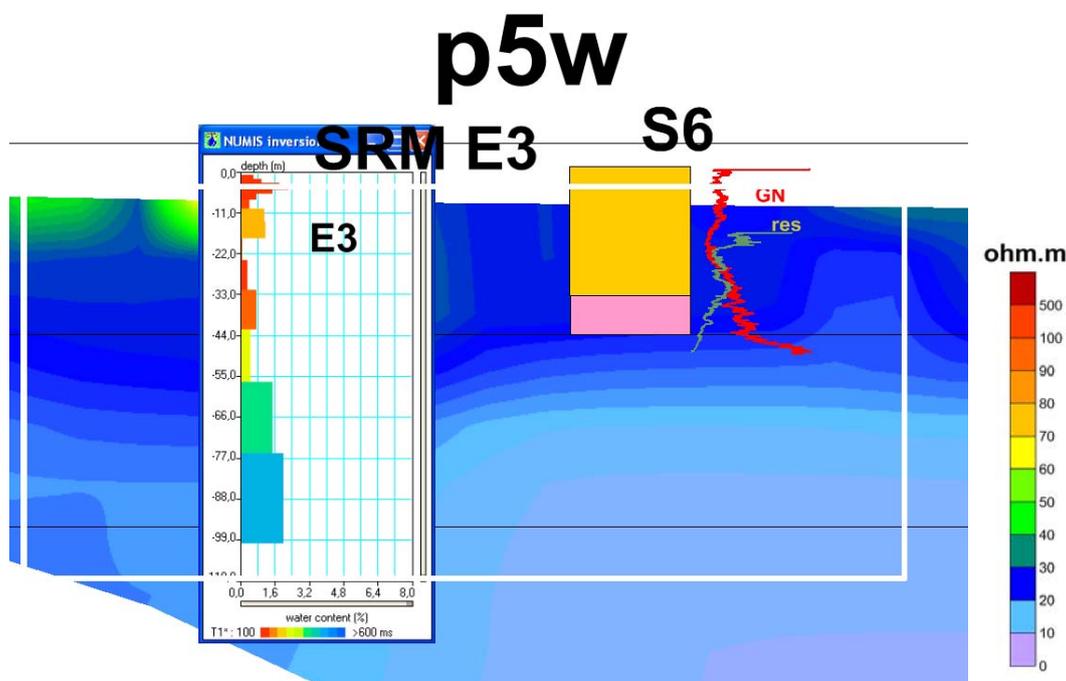


Fig. 6.16 Perfil eléctrico PE5 con la información del SRM E3 y testificación del sondeo mecánico S6 (en verde Resistividad y en rojo GN). La distancia entre líneas horizontales de referencia es de 50 m. El cuadrado de línea en blanco marca el volumen involucrado en la medición del SRM.

El centro del SRM E3 se encuentra a unos 150 m del sondeo S6 (Figura 6.14); en este SRM se utilizó una antena de 100 m de lado, por lo que la información que proporciona proviene de un

volumen de terreno que puede considerarse próximo al sondeo mecánico. No obstante, la antena está fundamentalmente extendida sobre materiales del Keuper y el SRM (Figura 6.16) muestra una escasa existencia de agua, sobre todo en los primeros 60 m, en tramos muy discontinuos y de muy baja permeabilidad, por lo que, a pesar de la corta distancia entre SRM y sondeo mecánico es evidente que no están reflejando la misma situación hidrogeológica.

7 PARÁMETROS PETROFÍSICOS DEDUCIDOS DE LA TESTIFICACIÓN Y PERFILES ELÉCTRICOS

La **radiación gamma natural** (Figura 7.1, se representan los valores medidos con la sonda 1407) presenta valores superiores a los 40 cps dentro del Keuper, mientras que en rocas del Muschelkalk se mantiene en el intervalo 10-40 (20-30 en el S1, 10-20 en el S4, 20-40 en el S3b, 20-30 en el S3, y 10-30 en el S6), valores que pueden estar afectados por el diámetro de cada sondeo (la radiación disminuye con la distancia de la sonda a las paredes del sondeo). La variación de los valores con la profundidad refleja la arcillosidad de los diferentes tramos dentro de cada sondeo.

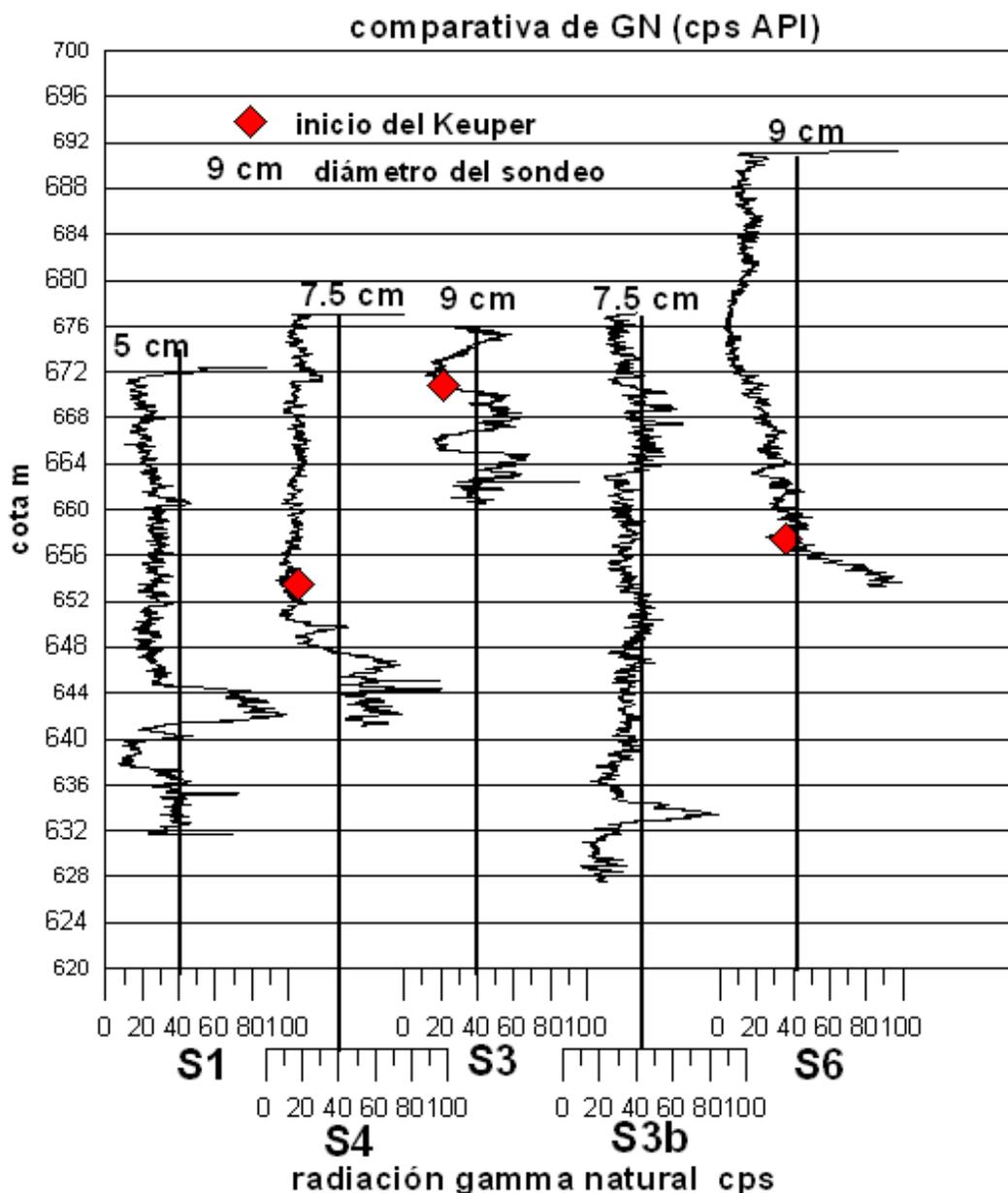


Fig. 7.1 Comparativa de valores de radiación gamma natural GN. Se indica la entrada en el Keuper y el diámetro de la entubación del sondeo.

La **resistividad de la formación** presenta (Figura 7.2) valores superiores a los 200 ohm.m para el Muschelkalk seco, pasando a valores entre 40-80 ohm.m cuando está saturado. En el Keuper, testificado solamente en sus tramos iniciales del contacto con el Muschelkalk, la resistividad se sitúa en el rango 20-40 ohm.m. La conclusión es que este parámetro petrofísico es válido para caracterizar la litología, con unos rangos que permitirían su diferenciación: el Keuper tiene menor resistividad que el Muschelkalk, con una clara diferencia dentro de esta unidad según este seca o saturada.

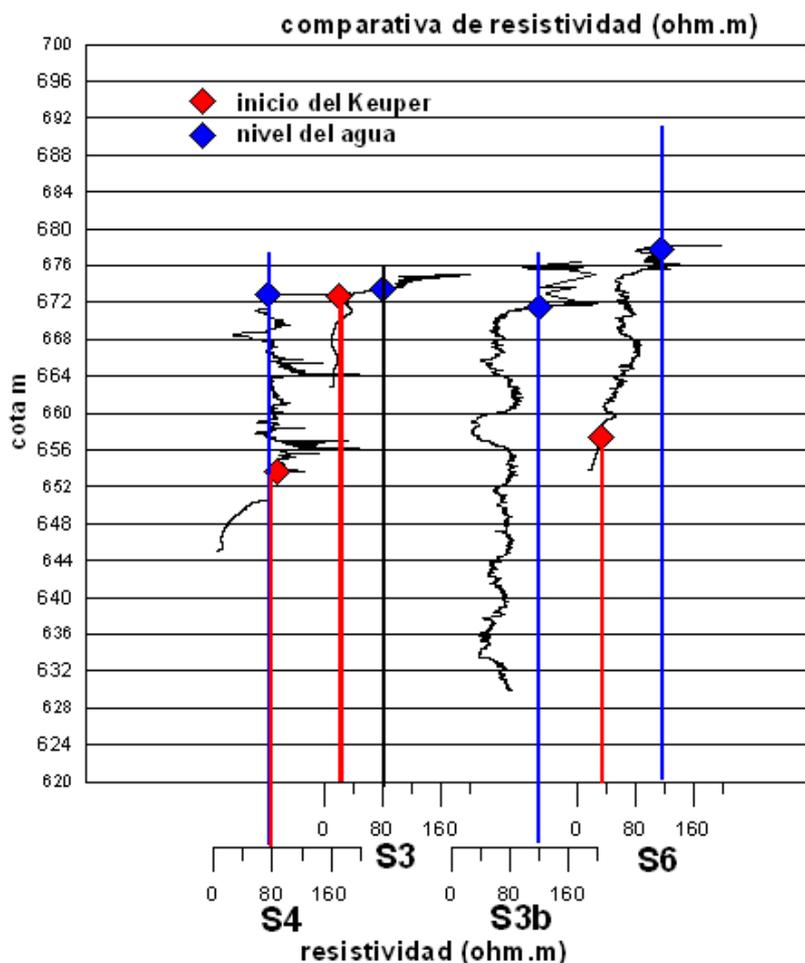


Fig. 7.2 Comparativa de valores de testificación de resistividad de la formación.

En el capítulo anterior se obtuvo una comparación entre los valores de resistividad de la testificación (paredes del sondeo) y la existente en las secciones de los PE más próximas, proyectando sobre ellos la situación de los sondeos mecánicos, que en ocasiones están bastante alejados. Para completar el análisis de la correspondencia entre la resistividad y la litología, se ha determinado el valor representativo de la resistividad medida en los PE interpolada a la posición de los sondeos mecánicos a partir de los mapas de resistividad a diferentes profundidades (que serán presentados en el Capítulo 10 de este Informe). Estos valores no son tan continuos como los dados por la testificación (una medida por cm), sino que están obtenidos de forma discreta a las profundidades de las celdas que se indican en la Tabla 7.1, resultado de la inversión según se especifica en el ANEXO II y construcción de los mapas de resistividad en el ANEXO IV.

Prof. m	cota S1	res S1	cota S3	Res S3	cota S3b	res S3b	cota S4	res S4	cota S5	res S5	cota S6	res S6
0	674	50	677	200	678	100	678	200	681	200	692	50
6	668	100	671	200	672	100	672	200	675	200	686	50
14	660	100	663	50	664	80	664	200	667	100	678	50
22	652	80	655	50	656	70	656	100	659	100	670	50
30	644	50	647	50	648	70	648	100	651	100	662	50
40	634	40	637	100	638	60	638	100	641	100	652	30
50	624	40	627	100	628	70	628	100	631	100	642	20
60	614	40	617	100	618	70	618	100	621	100	632	20
75	599	40	602	100	603	70	603	100			617	20
90	584	40	587	80	588		588	80			602	20
100	574	40	577	50	578		578	60			592	30
122	552	40	555	50	556		556	60			570	30
140	534	40	537	50	538		538	40			552	30
160	514	40	517	50	518		518	40			532	30

Tabla 7.1 Profundidad y cota correspondiente de los valores de resistividad tomados de los mapas de resistividad en la posición de los sondeos mecánicos.

Los logs de testificación y los “pseudo-logs” de resistividad medida en los PE e interpolada a la posición de los sondeos mecánicos están representados en la Figura 7.3 (en esta figura se ha limitado la escala de resistividad a 200 ohm.m por razones de grafismo).

El sondeo mecánico S1 (no testificado de resistividad) tiene en superficie una resistividad interpolada de 50 ohm.m, pasando a 100 ohm.m a los 6 m, manteniéndose así hasta los 22 m, donde entra en agua y baja la resistividad a 80 ohm.m; a partir de ahí la resistividad sigue disminuyendo de forma continua hasta los 50 m, donde vale 30 ohm.m, hasta el final. Esta distribución se corresponde perfectamente con los tramos de Muschelkalk seco y saturado, y Keuper.

El sondeo S3 tiene más de 500 ohm.m desde la superficie hasta los 6 m, en Muschelkalk. La resistividad baja a 50 ohm.m a los 14 m donde ya es Keuper, manteniéndose hasta los 30 m, donde aumenta de nuevo hasta 80-100 ohm.m y vuelve a disminuir a 50 ohm.m a los 100 m hasta el final de la información. La correspondencia cualitativa con la testificación es buena, siendo los valores dados por la sonda algo inferiores.

El sondeo S3b tiene en superficie y hasta los 6 m más de 100 ohm.m, bajando a 80-60 ohm.m a partir de los 14 m. Se trata de Muschelkalk seco y saturado, respectivamente. La correspondencia cualitativa y cuantitativa con la testificación es buena, teniendo en cuenta la diferente resolución de cada método.

En el sondeo S4 hay más de 200 ohm.m hasta los 14m; a partir de ahí la resistividad disminuye a 100 ohm.m manteniéndose en este valor desde los 22 m m a los 75 m, desde donde la resistividad disminuye gradualmente hasta 60 ohm.m en el final. La discretización de los valores hace que no sea coincidente el cambio de resistividad con el paso de Muschelkalk seco a saturado, siendo los valores,

al menos hasta la cota 600 m muy elevados para pertenecer al Keuper, al igual que se observó en la resistividad proyectando el sondeo sobre la sección PE7 (Figura 6.7). Los valores medidos se corresponden, al menos en los primeros 75 m, a los esperados para el Muschelkalk seco y Keuper.

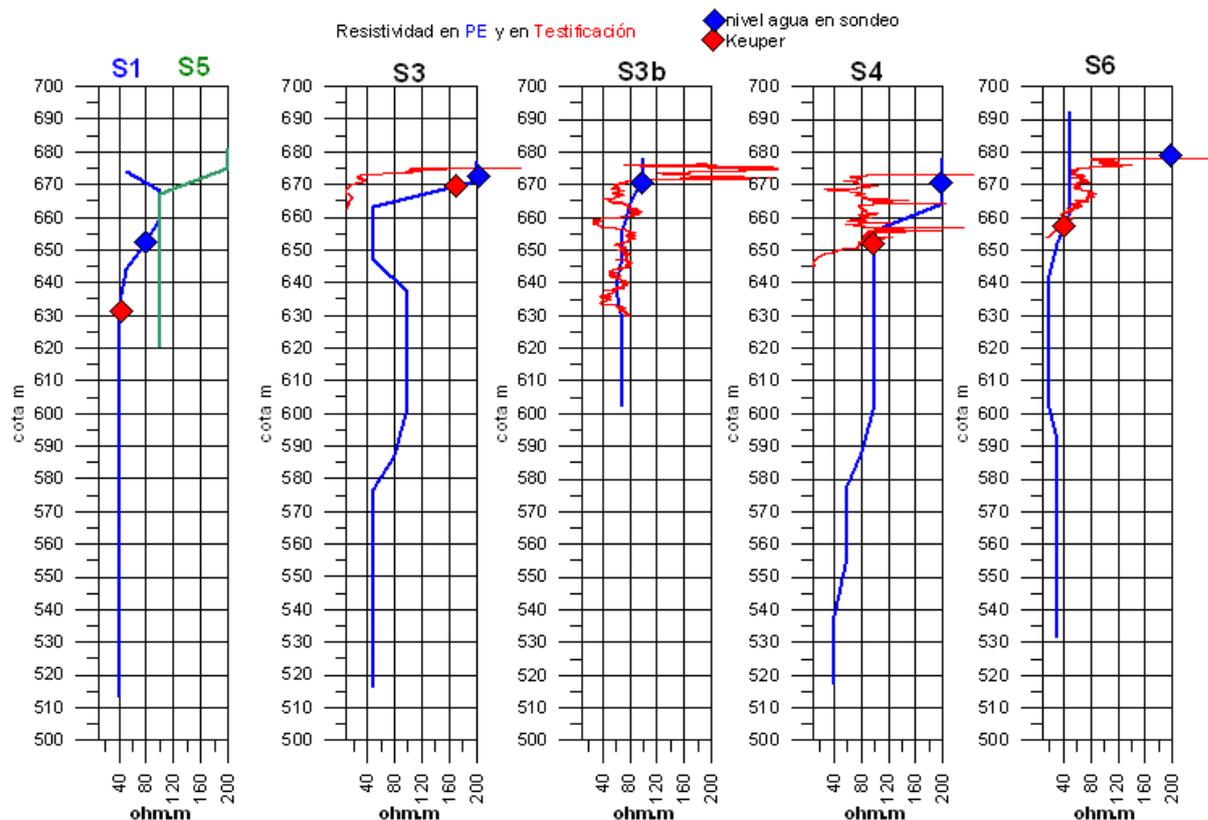


Fig. 7.3 Comparación de los valores de resistividad en la testificación y en las secciones geoelectricas.

El sondeo S5 solo corta Muschelkalk sin agua; tiene más de 100 ohm.m hasta el fin del sondeo.

El S6 tiene una resistividad de 60-40 ohm.m hasta los 14 m pasando a 10-20 ohm.m al entrar en Keuper, manteniendo esta resistividad hasta el fin del sondeo. Los valores superficiales no son representativos del Muschelkalk.

El conjunto de la información analizada se sintetiza en el Tabla 7.2. La resistividad de las secciones geoelectricas en la posición de los sondeos mecánicos proporciona un resultado congruente con el dado por la testificación: en todos los sondeos, la resistividad de los tramos secos es mayor que para los saturados, y el Keuper tiene siempre baja resistividad; sin embargo, en alguna sección el rango es diferente, lo que puede dificultar su comparación directa. Para el conjunto de la información obtenida el Muschelkalk seco tiene una resistividad superior a 100 ohm.m; cuando está saturado la resistividad toma valores de 40-80 ohm.m, y el Keuper siempre tiene menos de 40 ohm.m (Figura 7.4).

	S1 log	S5 log	S4 log	S3 log	S3b log	S6 log
M seco			>200	>200	120-200	>200
M saturado			80	40-80	50-80	60-80
K			20-40	<20		<20

	S1-PE1	S5 PE7	S4 PE7	S3 PE10	S3b PE7	S6
M seco	>100	>100-500	>-500	>100	>100	
M saturado	40-80	50-80	50-60	70	50-80	
K	<40		60	<50		

	S1 interp.	S5 interp.	S4 interp.	S3 interp.	S3b interp.	S6 interp.
M seco	100	>100	>100	500	>100	
M saturado	80		60		60-80	
K	30		40	50		<20

Tabla 7.2 Valores de resistividad deducidos: 1) de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos de acuerdo con la testificación (log); 2) de su posición en los perfiles de resistividad (PEx.), y 3) de la interpolación de la resistividad medida en los perfiles eléctrico a la posición del sondeo mecánico (Inter.)

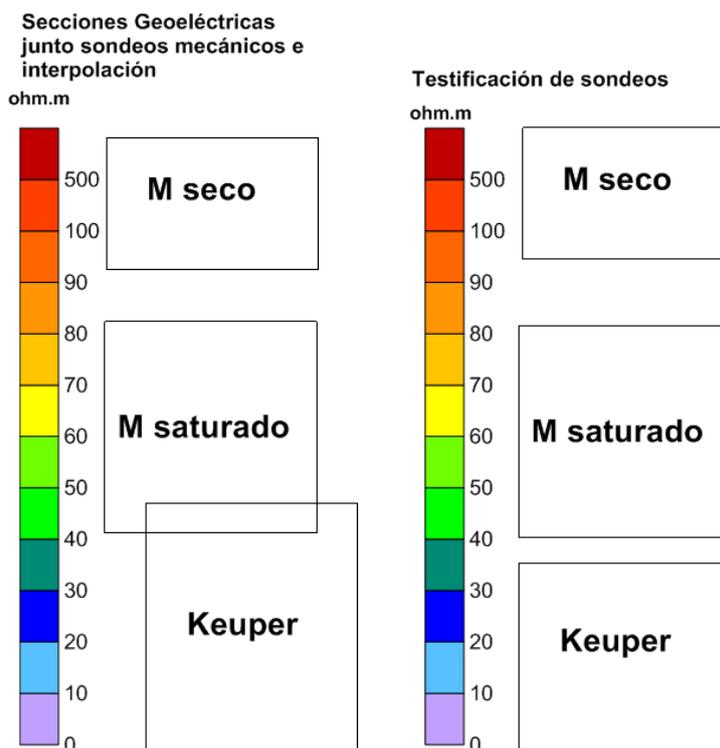


Fig. 7.4 Resumen de los valores de resistividad de la formación según el análisis conjunto de la información.

En conclusión respecto de los valores de resistividad (Figura 7.4), en los sondeos testificados se dispone de información fiable para la resistividad del Muschelkalk seco y saturado y en menor medida para el Keuper. La comparación de las columnas litológicas de los sondeos con la distribución de resistividad en las secciones eléctricas más próximas permite asignar valores de resistividad al Keuper. Aunque los valores de la resistividad determinada mediante Perfiles Eléctricos y Testificación no son idénticos (cosa normal en este tipo de determinaciones), son perfectamente comparables y del mismo orden de magnitud.

La **conductividad del agua** (corregida a 25 °C) (Figura 7.5) se sitúa entre 2.8 y 4.7 mS/cm, siendo de menor a mayor:

- sondeo S6: 2.8 mS/cm, que pasa a 3.6 mS/cm a la cota 659 m
- sondeo S3b: 3.4 mS/cm, que pasa a 3.7 mS/cm a la cota 659 m
- sondeo S4: 3.8 mS/cm en toda la profundidad
- sondeo S3: 4.3 mS/cm en toda la profundidad
- sondeo S1: 4.7 mS/cm en toda la profundidad

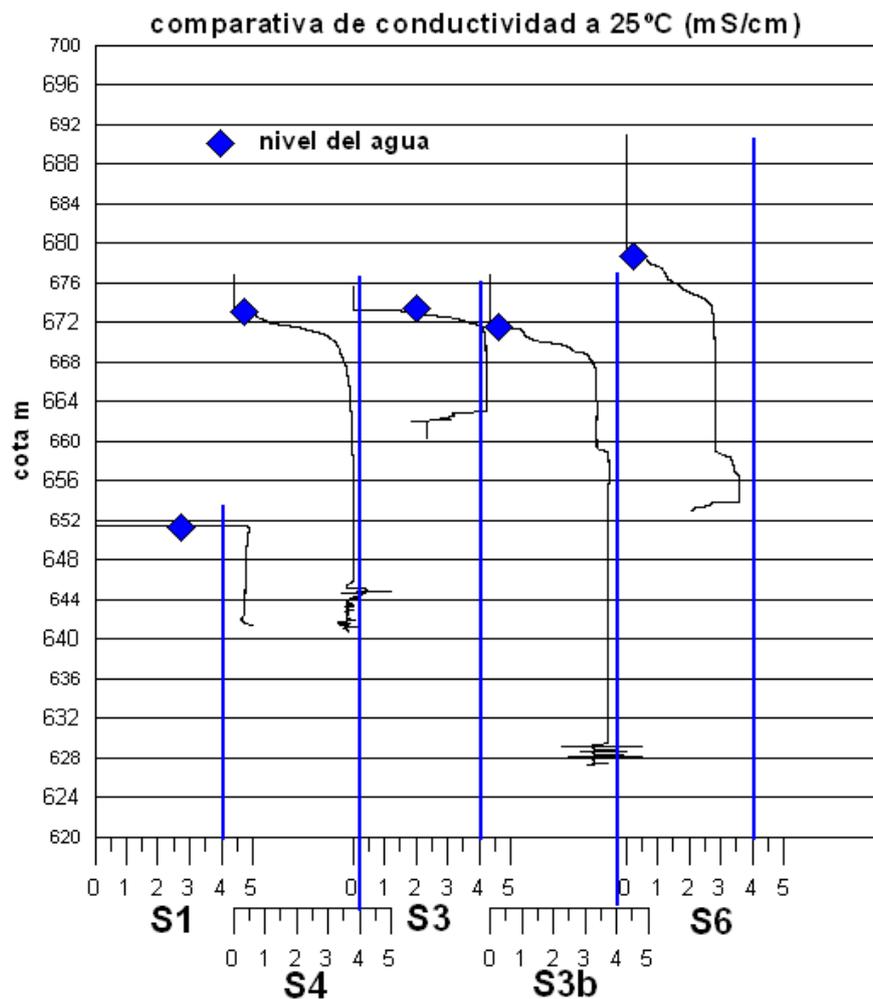


Fig. 7.5 Comparativa de valores de conductividad del agua en el interior del sondeo.

Estos valores de conductividad se han convertido a salinidad en g/l de ClNa equivalente, mediante la calibración de la sonda con soluciones patrón. Su comparación se representa en la Figura 7.6, donde se observa una variación de 4.7 a 2.8 g/l, siendo para cada sondeo:

- sondeo S6: 1.3 g/l, que pasa a 1.7 g/l a la cota 659 m
- sondeo S3b: 1.6g/l, que pasa a 1.9 g/l a la cota 659 m
- sondeo S4: 2.1 g/l en toda la profundidad

- sondeo S3: 2 g/l en toda la profundidad
- sondeo S1: 2.3 g/l en toda la profundidad

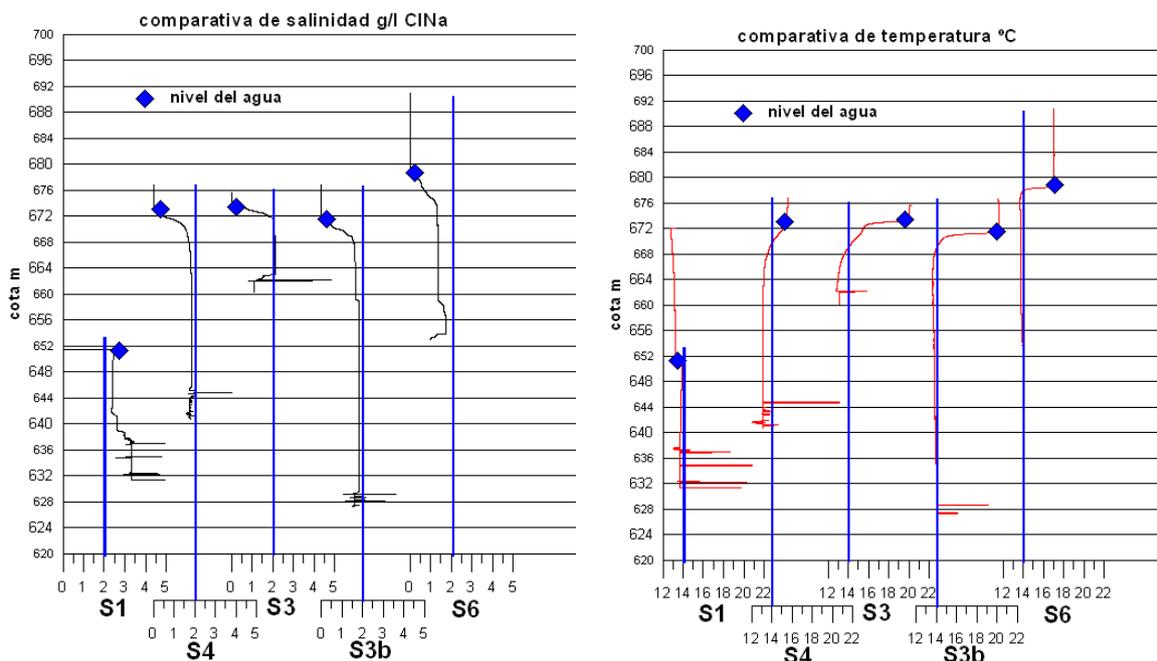


Fig. 7.6 Comparativa de valores de salinidad equivalente del agua en el interior del sondeo.

Finalmente, la temperatura (Figura 7.6) es del orden de 13.1 a 13.9 °C, sin que presente alteraciones a lo largo de los sondeos. Se observa que la variación entre los sondeos no tiene correlación con la temperatura externa:

Sondeo	Temp. Externa	Temp. agua
S1	12.8	13.9
S4	15.6	13.3
S6	17	13.8
S3	20	13.1
S3b	20.3	13.7

8 CARTOGRAFÍA GEOELÉCTRICA DE LA SUPERFICIE

En el Capítulo 7 se ha propuesto una relación entre la litología indicada por los sondeos mecánicos y la resistividad calculada en las secciones geoelectricas e interpolada a la posición de los sondeos. Otra forma de tratar de encontrar esta relación es comparando los valores de la resistividad superficial de las secciones con la cartografía geológica, cuando existe garantía de que todos los electrodos están sobre el mismo tipo de terreno. Expresado de otra forma: se trata de considerar los PE como “sondeos” horizontales. Por otra parte, la cobertura de la información obtenida mediante los perfiles eléctricos es suficiente para tratar de construir mapas de resistividad, cuyo reflejo de la distribución realmente existente dependerá, evidentemente, de que la complejidad de las estructuras permita una interpolación de las mediciones entre perfiles.

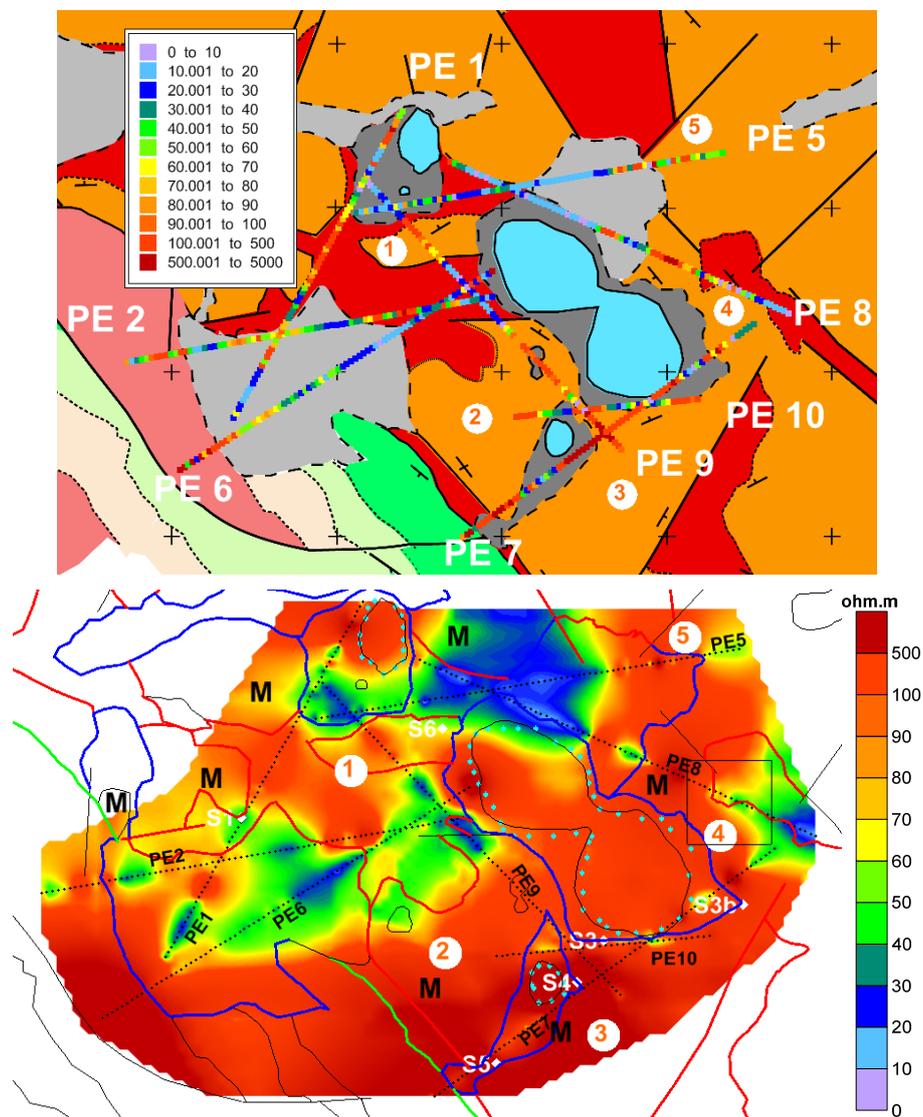


Fig. 8.1 Parte superior: resistividad cada 15 m (resultado de la inversión) en la superficie a lo largo de los perfiles. Parte inferior: mapa de distribución de la resistividad interpolada a toda la superficie cubierta por los perfiles. Se han superpuesto las líneas de los contactos geológicos. Los valores de resistividad siguen la codificación de color según la misma paleta en ambos mapas. Los números señalan los sectores en los que se han clasificado las zonas cubiertas por el Muschelkalk.

En las secciones geoelectricas, debido a limitaciones que imponen los sistemas de interpolación para construcción de mapas de isovalores, no se observa en general la resistividad de la primera capa de celdas del modelo, por lo que se va a recurrir a la utilización en planta de dichas celdas.

En la Figura 8.1 se representan los perfiles con un valor cada 15 m de la resistividad de la primera celda (primeros 7 m del subsuelo, aproximadamente), mediante su codificación en color; en la misma Figura 8.1 se muestra el mapa de resistividad obtenido interpolando los valores anteriores a una malla regular de 40 x 40 m para toda el área cubierta por los PE.

Las zonas cubiertas por terrenos del Muschelkalk tienen los siguientes valores de resistividad (Figura 8.1):

- sector 1: 60-150 ohm.m (PE9)
- sector 2: 65-140 ohm.m (PE9); 70-270 ohm.m (PE10); 126-183 ohm.m (PE7)
- sector 3: 98-800 ohm.m (PE9); 185-800 ohm.m (PE7)
- sector 4: 60-400 ohm.m (PE7), con zona anómala de 30-50 ohm.m al final del perfil
- sector 5: 50-115 ohm.m (PE5)

Puede por lo tanto considerarse que el Muschelkalk no saturado (en todos los sondeos el agua se ha encontrado por debajo de los 4 m, estando el punto central de las celdas a 3.5 m) presenta una resistividad comprendida en el rango 60-200 ohm.m, aunque en el sur de la Laguna Grande (sector 3) la resistividad es más elevada, llegando a 800 ohm.m.

En los tramos cartografiados como pertenecientes a materiales del Keuper (Figura 8.2), se aprecian los siguientes valores:

- sector 6: 3-29 ohm.m (PE8), pasando a valores en el rango 70-90 ohm.m cuando los electrodos pueden estar en el contacto Keuper-Muschelkalk.
- sector 7: 16-24 ohm.m (PE5); 6-27 ohm.m (PE8)
- sector 8: 23-55 ohm.m (PE1), que pasa a 78-140 ohm.m en la parte central del afloramiento; 11-34 ohm.m (PE2) en la parte oriental, pero muy variable, con valores de 30-140 ohm.m, en la primera mitad; 17-35 ohm.m (PE6), y 15-28 ohm.m (PE9).

En general el Keuper presenta valores en el rango 10-40 ohm.m, aunque el afloramiento comprendido entre el Cretácico y las lagunas tiene zonas de valores superiores (50-140 ohm.m), que podrían considerarse como pertenecientes al Muschelkalk.

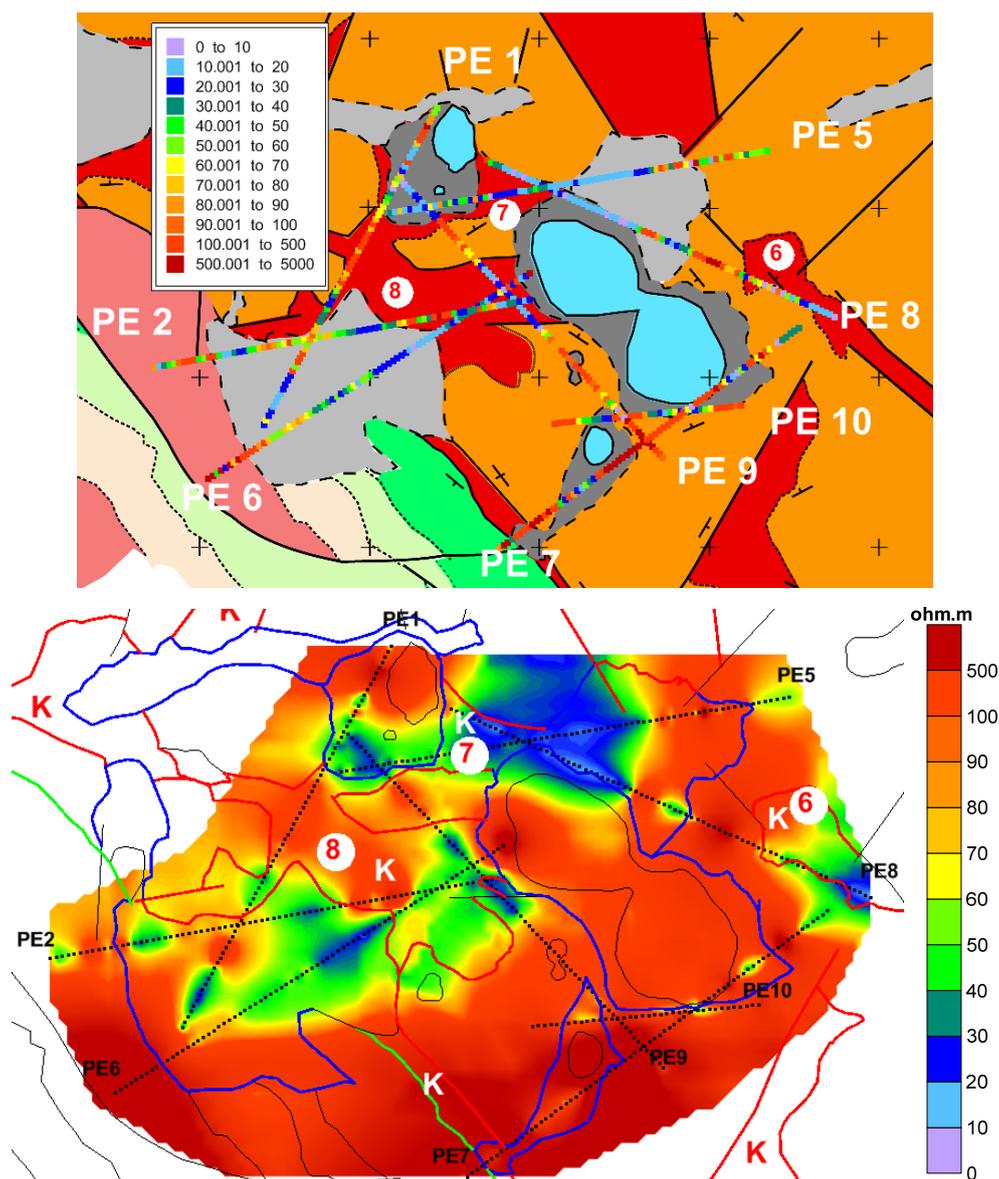


Fig. 8.2 Parte superior: resistividad cada 15 m (resultado de la inversión) en la superficie a lo largo de los perfiles. Parte inferior: mapa de distribución de la resistividad interpolada a toda la superficie cubierta por los perfiles. Se han superpuesto las líneas de los contactos geológicos. Los valores de resistividad siguen la codificación de color según la misma paleta en ambos mapas. Los números señalan los sectores en los que se han clasificado las zonas cubiertas por el Keuper.

La parte de los perfiles situada sobre materiales del Cuaternario presenta los siguientes valores (Figura 8.3):

- sector 9: 9-21 ohm.m (PE5 y PE8) en su parte occidental, pasando a 30-180 ohm.m en la oriental.
- sector 10: 8-50 ohm.m en general (PE1, PE5 y PE9), pasando a 60-930 ohm.m en la parte norte del PE6
- sector 11: 11-27 ohm.m (PE1), pasando a 50-275 ohm.m al norte de este perfil; 15-30 ohm.m en el norte del PE6, que pasa a 45-80 ohm.m en la parte central y finaliza con valores de 73-

280 ohm.m junto al Cretácico; 17-28 ohm.m (PE2), salvo la parte central que llega a 58-110 ohm.m.

- sector 12: 20-50 ohm.m (PE7), excepto el tramo central que tiene valores muy elevados de 600-4000 ohm.m

Por lo tanto los materiales cuaternarios presentan valores bajos de resistividad (10-30 ohm.m), con excepciones que pueden ser debidas a materiales del Keuper o del Muschelkalk cuando la potencia de Cuaternario sea inferior a la necesaria para cartografiar geoelectricamente su presencia. Los altos valores del barranco del sector 12 pueden ser debidos al Muschlealk.

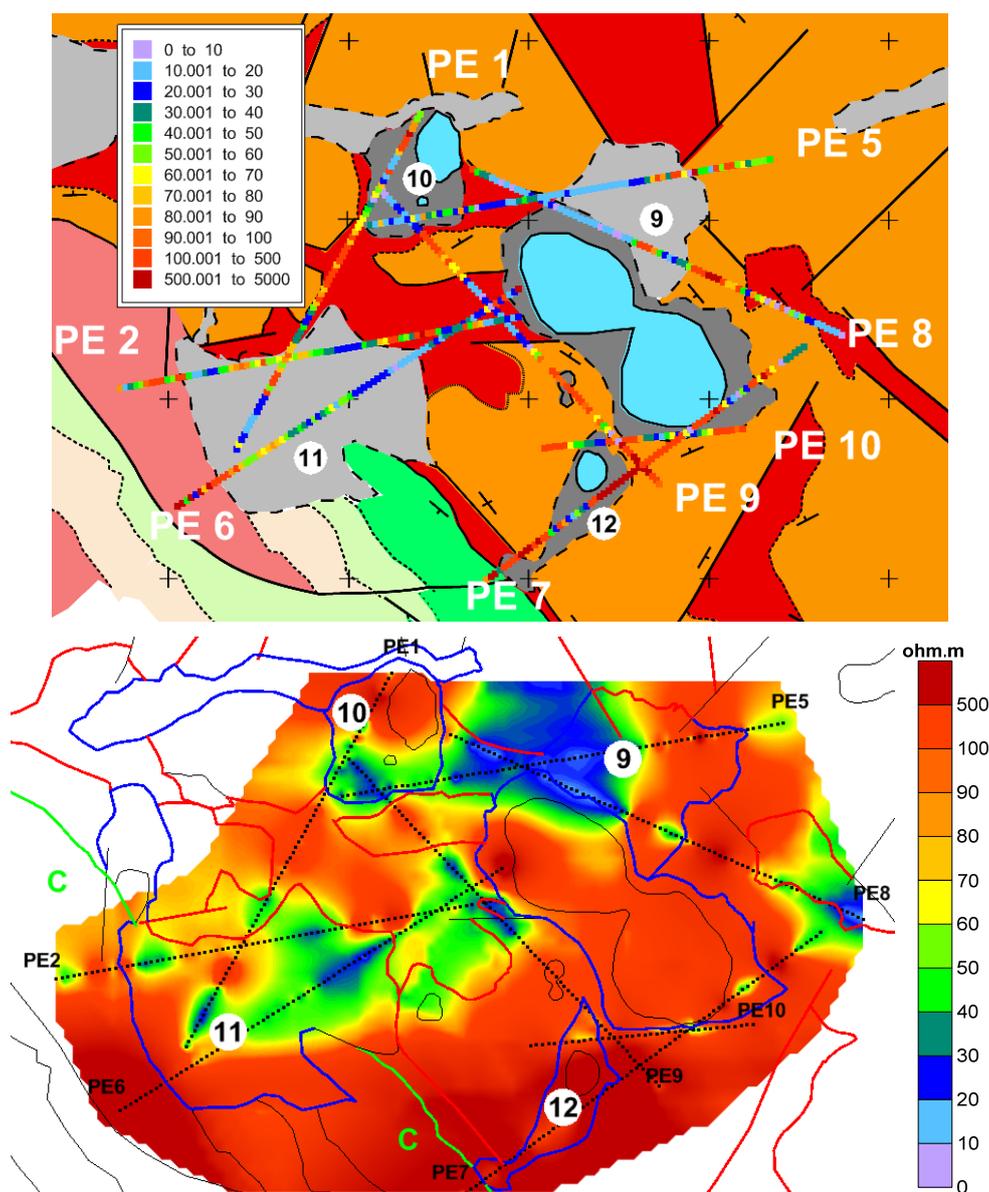


Fig. 8.3 Parte superior: resistividad cada 15 m (resultado de la inversión) en la superficie a lo largo de los perfiles. Parte inferior: mapa de distribución de la resistividad interpolada a toda la superficie cubierta por los perfiles. Se han superpuesto las líneas de los contactos geológicos. Los valores de resistividad siguen la codificación de color según la misma paleta en ambos mapas. Los números señalan los sectores en los que se han clasificado las zonas cubiertas por el Cuaternario.

Las porciones de perfil cuyas mediciones pueden atribuirse a materiales del Cretácico presentan valores de 48-150 ohm.m (PE2), 79-490 ohm.m (PE6) y 100-1600 ohm.m (PE7), pudiendo considerarse que son en general superiores a 100 ohm.m.

Este análisis permite proponer una posible clasificación de resistividad-litología de superficie, según se indica en la Figura 8.4.

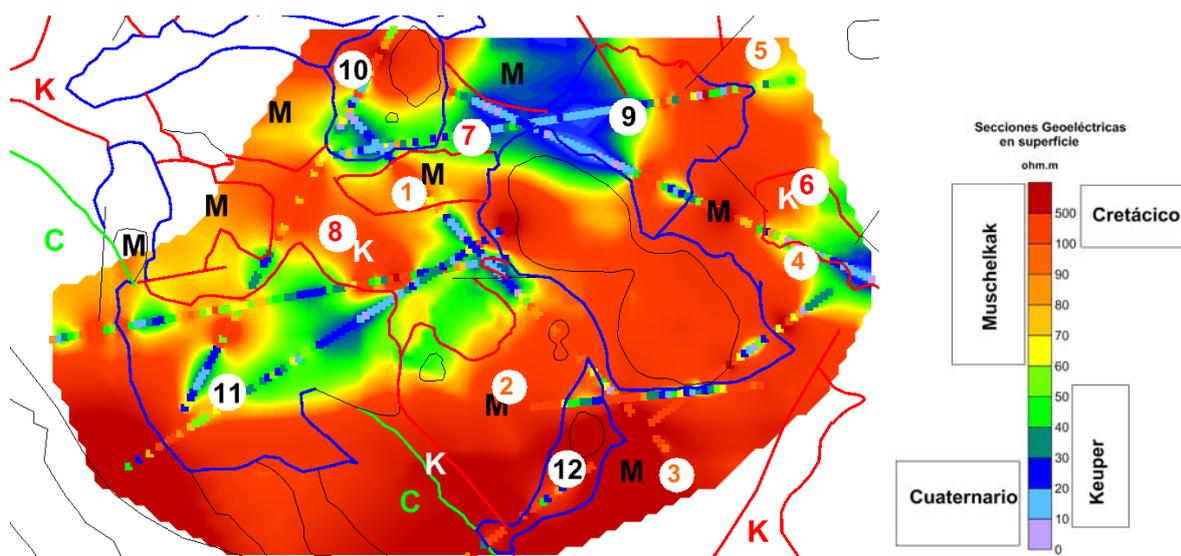


Fig. 8.4 Mapa de distribución de la resistividad interpolada a toda la superficie cubierta por los perfiles. Se han superpuesto las líneas de los contactos geológicos. Los números señalan los sectores en los que se ha clasificado las zonas cubiertas por los distintos pisos geológicos: 1-5 Muschelkalk; 6-8 Keuper y 9-12 Cuaternario. En la paleta de colores asignados a los valores de resistividad se sintetizan los rangos para cada piso.

Según esta clasificación, dentro de la zona cubierta por la información geoelectrica se puede establecer una hipótesis de la cartografía más probable bajo el recubrimiento del Cuaternario, así como proponer la revisión o modificación de algunos contactos geológicos en la superficie, como se muestra en la Figura 8.5.

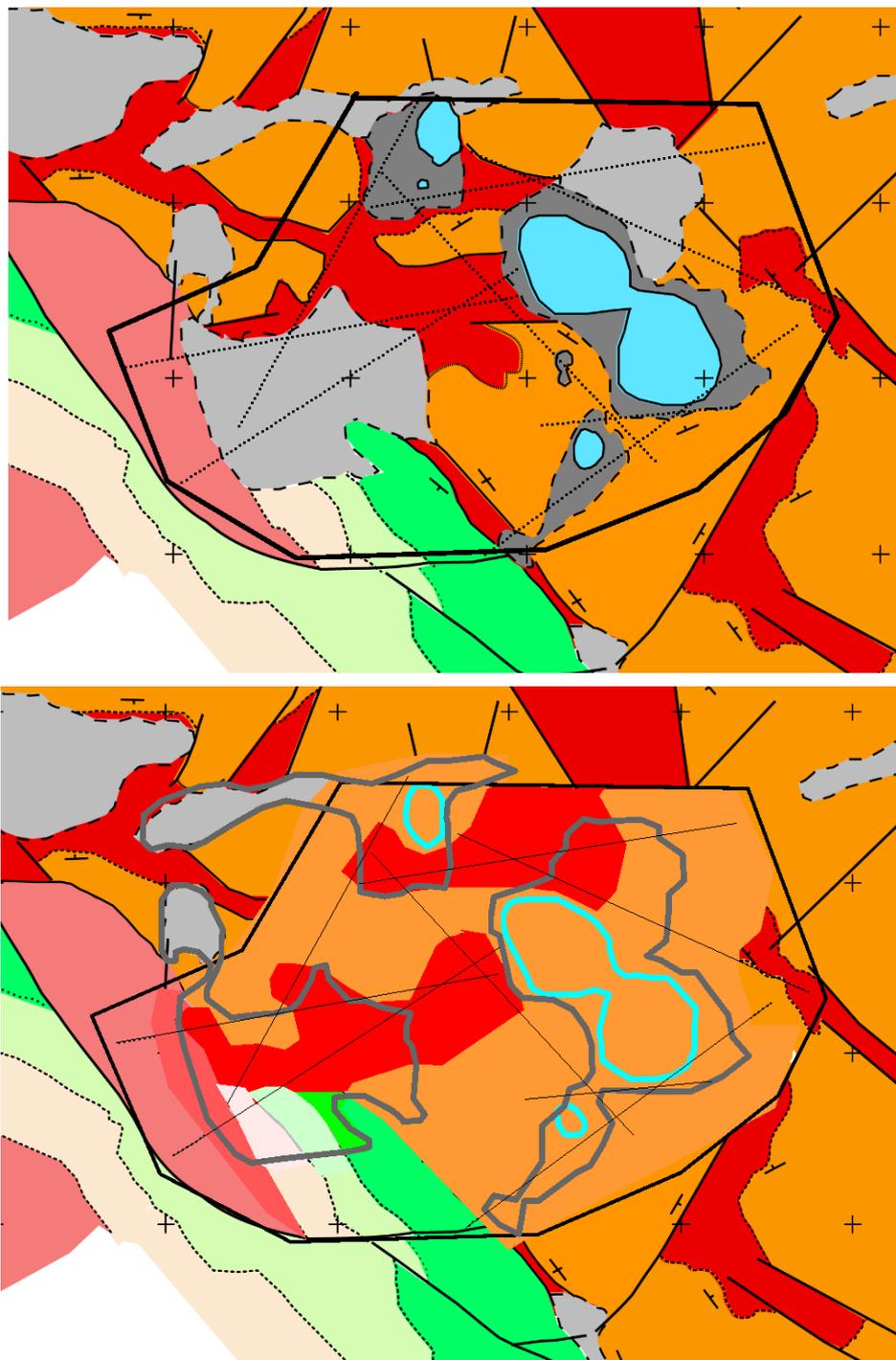


Fig. 8.5 Superior: cartografía actual. Inferior: hipótesis de la cartografía bajo el Cuaternario y posible modificación de contactos en otros sectores.

Para la interpretación de las secciones de resistividad se tendrá en cuenta este resultado junto con el anteriormente obtenido de relación resistividad-litología mediante la comparación de las columnas de los sondeos mecánicos y la situación geoelectrica del perfil más próximo, con lo que la asignación de resistividad es la indicada en la Figura 8. 6.

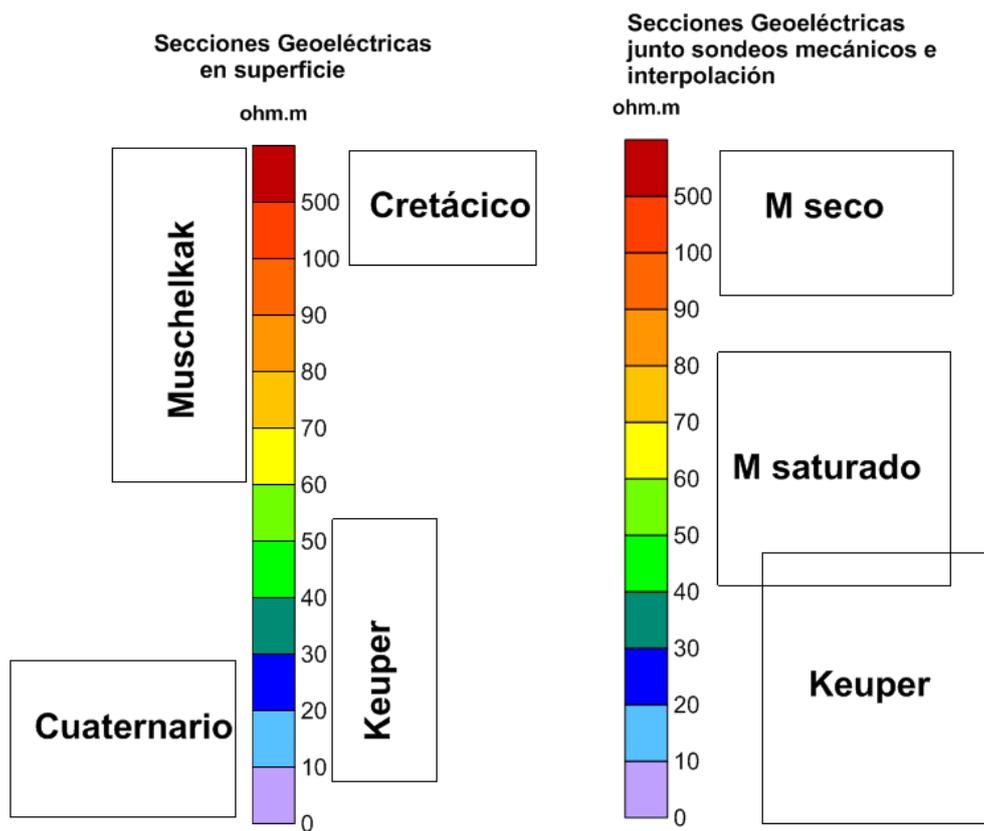


Fig. 8.6 Asignación de resistividad a los pisos geológicos según la información de resistividad superficial y según la información junto a los sondeos mecánicos.

9 INTERPRETACIÓN DE LAS SECCIONES GEOELÉCTRICAS

Una vez establecida la relación más probable entre la resistividad medida en los perfiles eléctricos y la litología, se va a tratar de deducir la morfología de las estructuras geológicas atravesadas por dichos perfiles. Como elementos de control se van a utilizar los sondeos mecánicos y la correspondencia entre la resistividad y la cartografía de superficie; puesto que las secciones presentadas en el Capítulo 4 no reproducen con fidelidad la resistividad superficial (por las razones expuestas en el ANEXO II), se recurrirá a la representación sobre la cartografía de la primera celda resultado de la inversión geoelectrica. Se considerará además para el control de la interpretación los cruces entre los diferentes perfiles, así como la posible profundidad del contacto entre Muschelkalk y Keuper derivada de la información de los SRM más próximos al trazado de los perfiles. La situación del conjunto de la información está representada en la Figura 9.1. La interpretación se llevará a cabo arrastrando de forma secuencial la información de unos perfiles a los que le cruzan, comenzando por el PE7, que es para el que se dispone de mayor cantidad de información de sondeos mecánicos.

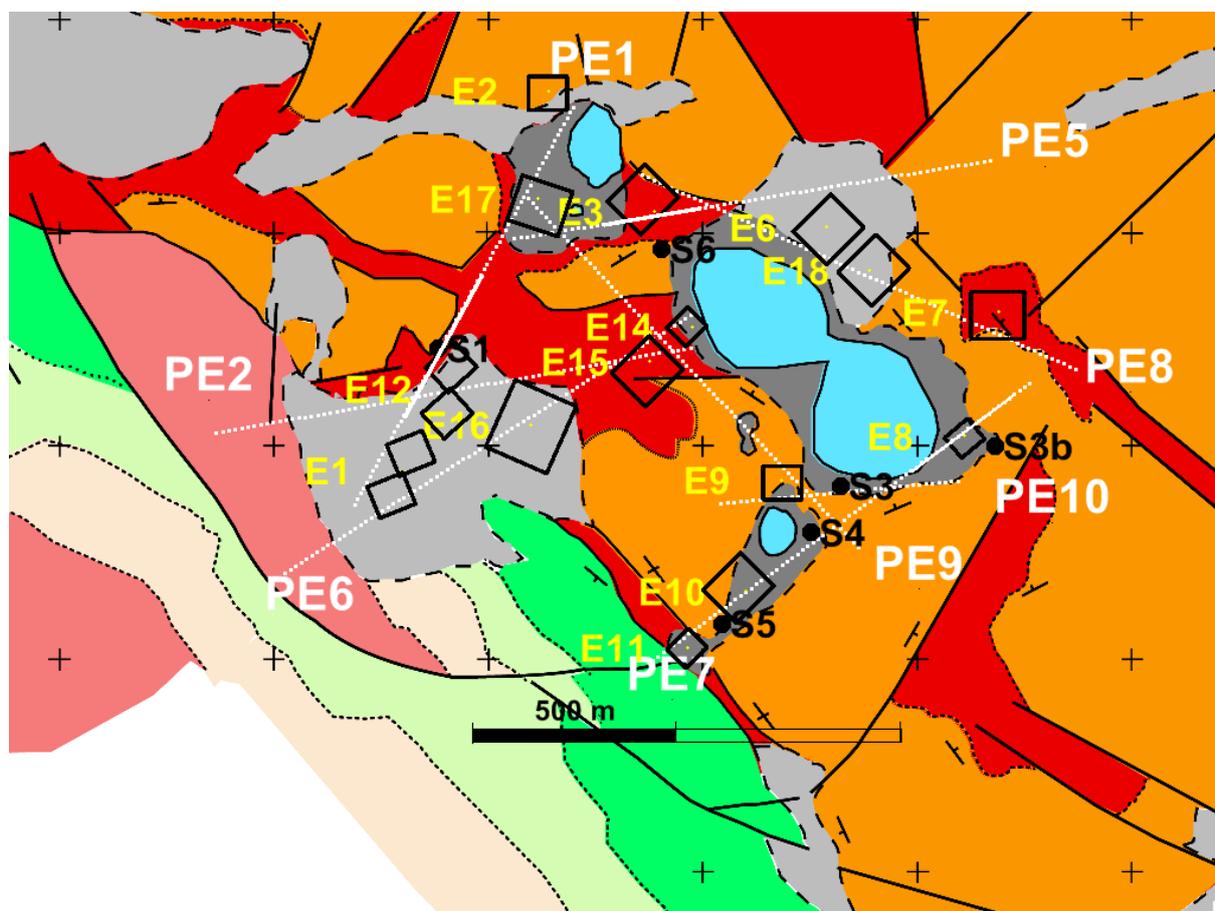


Fig. 9.1 Posición sobre la geología de los perfiles eléctricos PE, SRM y sondeos mecánicos S.

La lectura de las secciones y de los mapas de resistividad puede hacerse asimilando la escala de colores a la litología, según la Figura 8.6:

- Los colores azules corresponden a materiales del Keuper, siendo, en principio, los azules más claros de mayor contenido en arcillas, y por lo tanto, más impermeables.
- Los colores rojos corresponden a materiales del Muschelkalk sin agua; cuanto más pálido sea el color, hasta el amarillo, mayor contenido en agua pueden tener estas rocas.
- Los tonos del verde al naranja pueden interpretarse como Muschelkalk con agua.
- La gama de colores de transición entre uno y otro extremo de colores puede ser consecuencia de la limitación de crear cambios completamente rígidos en la inversión numérica de las mediciones, pero también pueden deberse a una transición en el contenido en agua, sin que sea posible asegurar la litología que representan. En especial, los colores verdes pueden en algún caso asignarse tanto al Keuper como al Muschelkalk.

La numerosa información que se pretende sintetizar en las figuras, junto con la reducida escala de presentación utilizada para adaptarla al formato del Informe hace que no sea legible parte de los datos sobre los que se apoya el trazado de la interpretación. Para una mejor observación se recomienda la versión digital de este Informe suministrada en el ANEXO DIGITAL.

Perfil PE7

Su extremo SO se encuentra sobre las calizas del Cretácico (Figura 9.2), atraviesa un corto afloramiento del Keuper, transcurriendo el resto sobre el Cuaternario y el Muschelkalk. La resistividad superficial (de los primeros 7 m del subsuelo) es superior a los 500 ohm.m sobre el Cretácico, situándose entre los 200-300 ohm.m sobre el Keuper (cartografiado); las zonas del Muschelkalk no cubiertas por el Cuaternario tienen resistividad entre 100-300 ohm.m, excepto en el extremo noreste, donde baja a 30-40 ohm.m. En las zonas cubiertas por el Cuaternario la resistividad disminuye a valores inferiores a 30 ohm.m, posiblemente debido a materiales del Cuaternario, pero adoptando valores muy elevados en algunas zonas (p.e. junto a la pequeña laguna del SO), lo que puede interpretarse como muy poca potencia del Cuaternario y que los valores de resistividad se deben a las rocas del Muschelkalk.

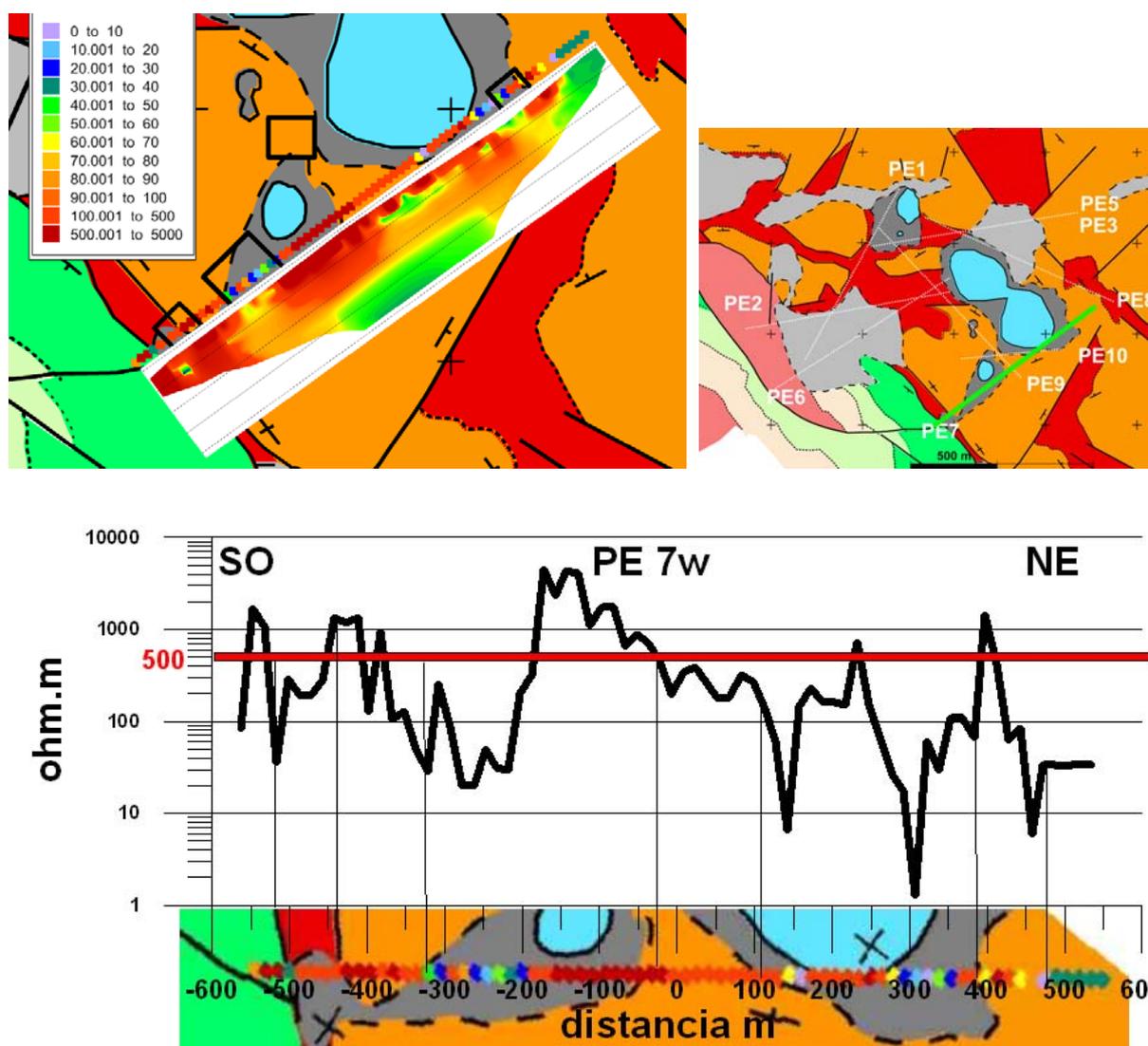


Fig. 9.2 Perfil eléctrico PE7. Parte superior: Posición del perfil (Wenner) sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte superior derecha indica en color verde el perfil que se está representando.

La resistividad en la superficie se mantiene al menos en los primeros 50 m de profundidad, siendo la tendencia general a una disminución de la resistividad a profundidades mayores. La alteración más significativa se produce en la porción central, donde antes de los 50 m aparece una anomalía conductora y, sobre todo, a partir de los 100 m de profundidad, ambas con importante discrepancia entre la sección obtenida con el dispositivo Wenner y el Schlumberger, en el que aparecen materiales de mayor resistividad en la parte más profunda del sector central, de dudosa asignación litológica.

En la alineación de este perfil se encuentran los sondeos mecánicos S5, S4, S3 y S3b, así como los SRM E11, E10 y E8 (Figura 9.3).

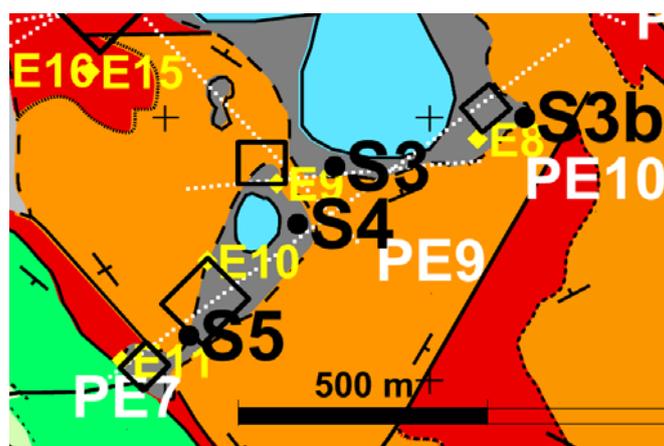


Fig. 9.3 Detalle de la posición del Perfil Eléctrico PE7 sobre la cartografía geológica y posición de sondeos mecánicos Sx y de SRM Ex.

La existencia de Keuper bajo el S4 y S3 pone de manifiesto la complejidad de las estructuras; su presencia no es evidente en la distribución de resistividad obtenida con el dispositivo Wenner en el S4, siendo sin embargo posible según la zona de menor resistividad obtenida con el dispositivo Schlumberger.

En la Figura 9.4 se establece una hipótesis de interpretación de la sección PE7, en la que hay que considerar que las distancias entre la posición de los sondeos y la sección pueden hacer que las profundidades de los contactos no sean las mismas en ambos sitios. Por otra parte, la resistividad en las celdas es a veces más significativa que la finalmente asignada por el proceso de interpolación que conlleva la preparación de mapas e imágenes, por lo que se incluyen ambos documentos. Todo el corte transcurre por materiales del Muschelkalk, que puede llegar a tener potencias superiores a los 100 m, y con un grado de fracturación bastante generalizado. Entre las distancias 0 y 300 m se intercala el Keuper con potencia decamétrica, existiendo también posiblemente por debajo de los 150 m de profundidad. La distribución de la resistividad parece estar reflejando la repetición de la serie estratigráfica.

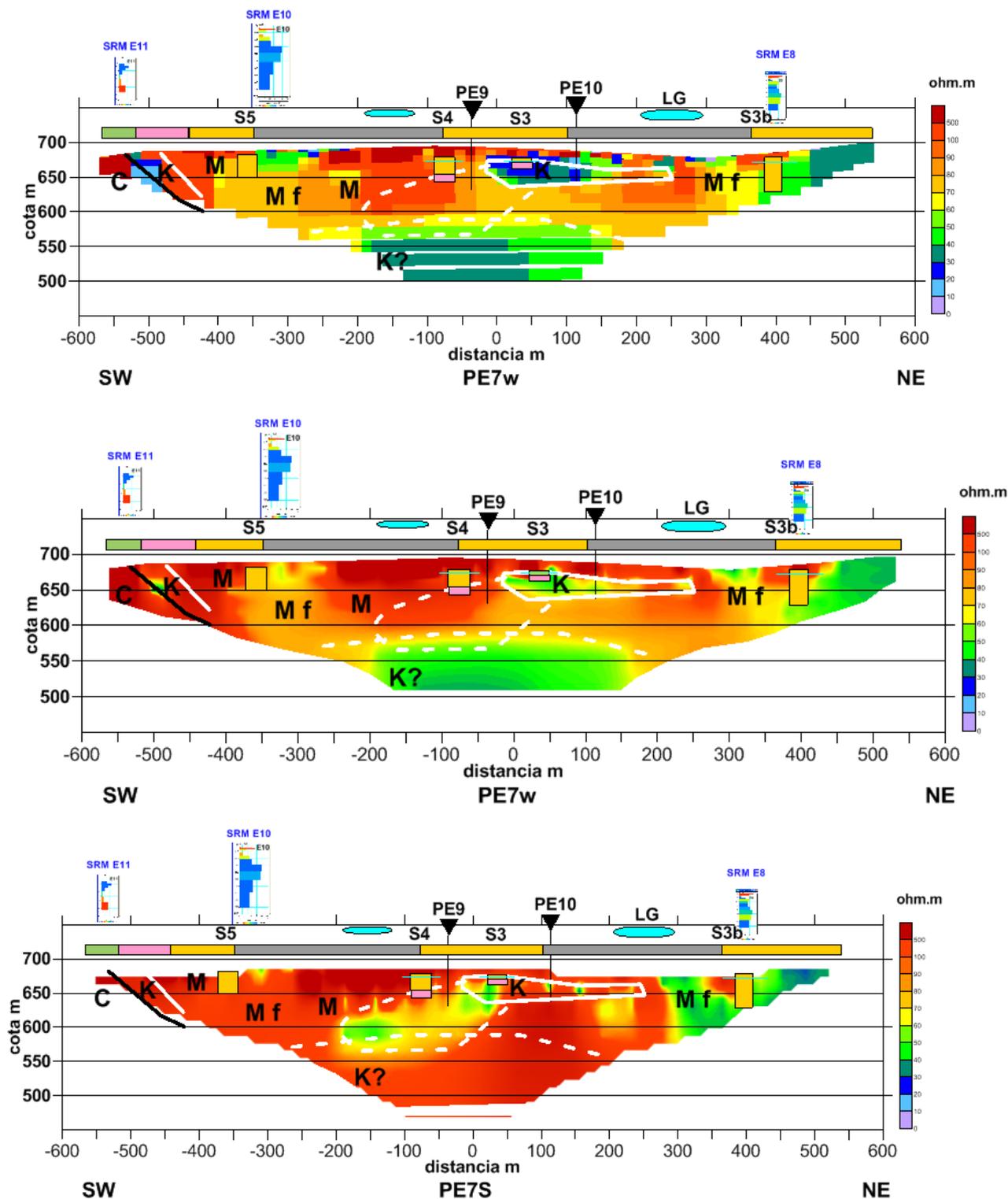


Fig. 9.4 Interpretación geológica del perfil PE7. Parte superior: dispositivo Wenner. Parte inferior: dispositivo Schlumberger. M: Muschelkalk; Mf: fracturado. K: Keuper. Línea blanca: contacto K/M. Línea azul: nivel freático aparente.

Perfil PE10

El perfil PE10 (Figura 9.5) transcurre por el sur de la Laguna Grande sobre calizas del Muschelkalk, cubiertas en algunas zonas por materiales del Cuaternario, que resultan perfectamente identificados por la resistividad superficial: entre 100-500 ohm.m para el Muschelkalk (seco) y entre 20-60 ohm.m para el Cuaternario, asignación que modifica ligeramente los límites de los contactos cartografiados .

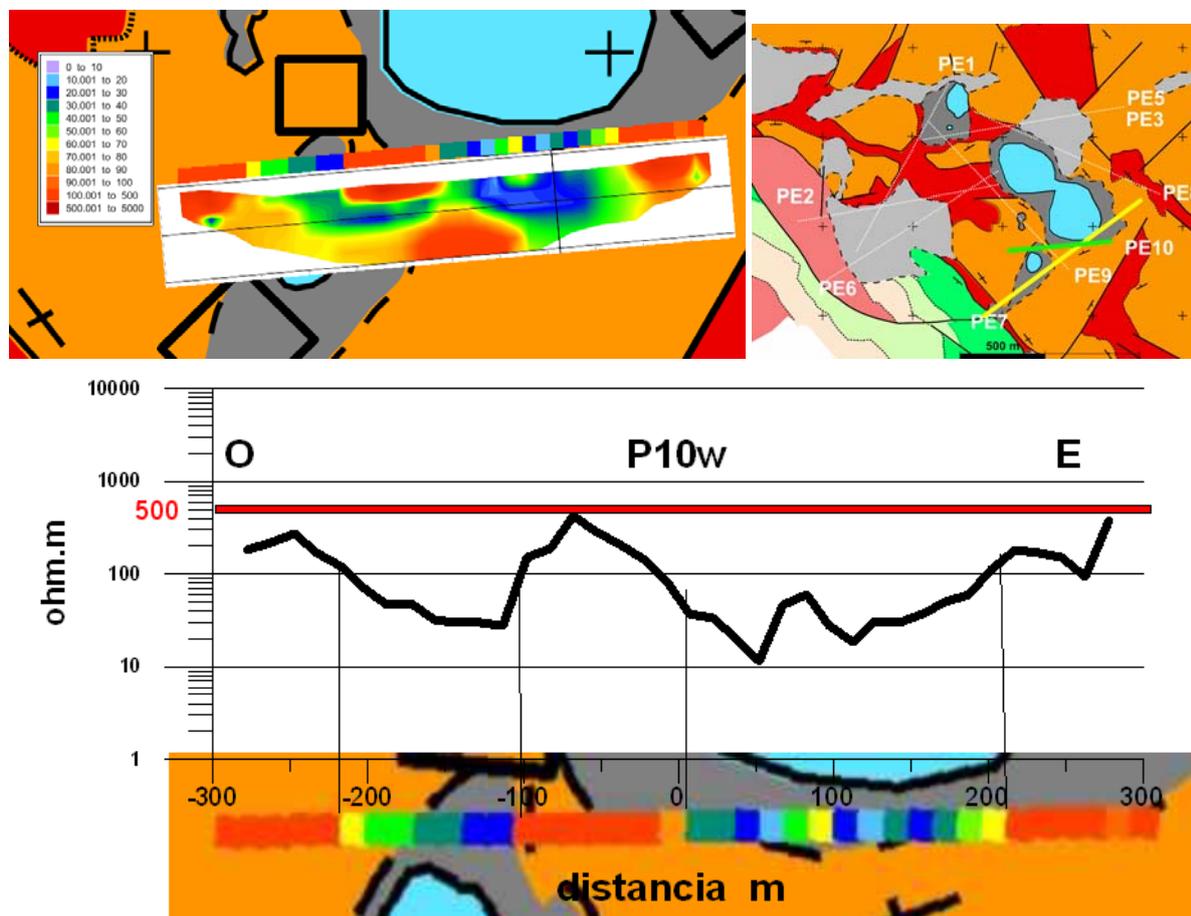


Fig. 9.5 Perfil eléctrico PE10. Parte superior: Posición del perfil sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte superior derecha indica en color verde el perfil que se está representando, y en color amarillo los anteriormente interpretados.

Sin embargo, las zonas de baja resistividad, coincidentes con la presencia en superficie de materiales cuaternarios, se prolongan en el subsuelo hasta profundidades superiores a 50 m, por lo que en realidad deben estar asociadas a la presencia de Keuper, siendo el espesor del Cuaternario inferior a los 7 m.

Los sondeos mecánicos S3 y S3b, así como el SRM E9 se encuentran en la alineación de este perfil, que se cruza con el PE7 (Figura 9.5). El cruce de las secciones PE7 y PE10 (Figura 9.6) (en el que hay una diferencia de unos 6 m en las cotas, debido a error de precisión GPS) muestra una distribución de resistividad muy diferente, siendo mucho más baja la resistividad en la imagen del

PE10. Comparando el valor realmente atribuido a las celdas en la inversión, la diferencia es menor, y consiste fundamentalmente en que el PE7 atraviesa el extremo de la masa conductora, probablemente debida a la existencia del Keuper, que es mucho más potente en la dirección del PE10 como se aprecia mejor al comparar la distribución de la resistividad en la superficie y a 22 m de profundidad (parte inferior de la Figura 9.6). Puede interpretarse esta diferencia como debida a la tridimensionalidad de las estructuras, lo que hace que la orientación del dispositivo de medida produzca estos efectos, que dificultan mucho la interpretación.

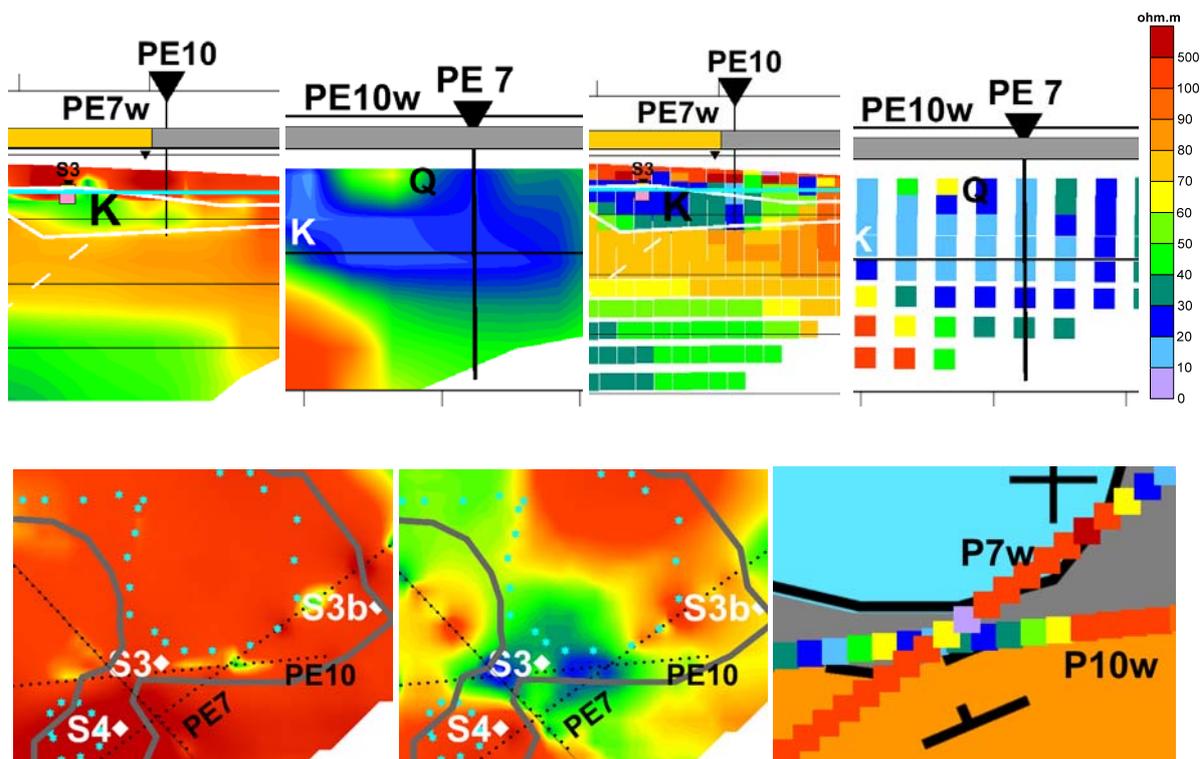


Fig. 9.6 Cruce de los perfiles PE7 y PE10. Parte superior: fragmento de 100 m de anchura de las imágenes y de las celdas de inversión en el cruce. Parte inferior: distribución de resistividad en la superficie y a 22 m de profundidad y celdas de inversión en la superficie.

En la Figura 9.7 se presenta una interpretación geológica del PE10. Se mantiene el estilo marcado por el corte PE7, donde después de una secuencia normal del Keuper suprayacente al Muschelkalk, vuelve a aparecer el Muschelkalk por encima de materiales del Keuper.

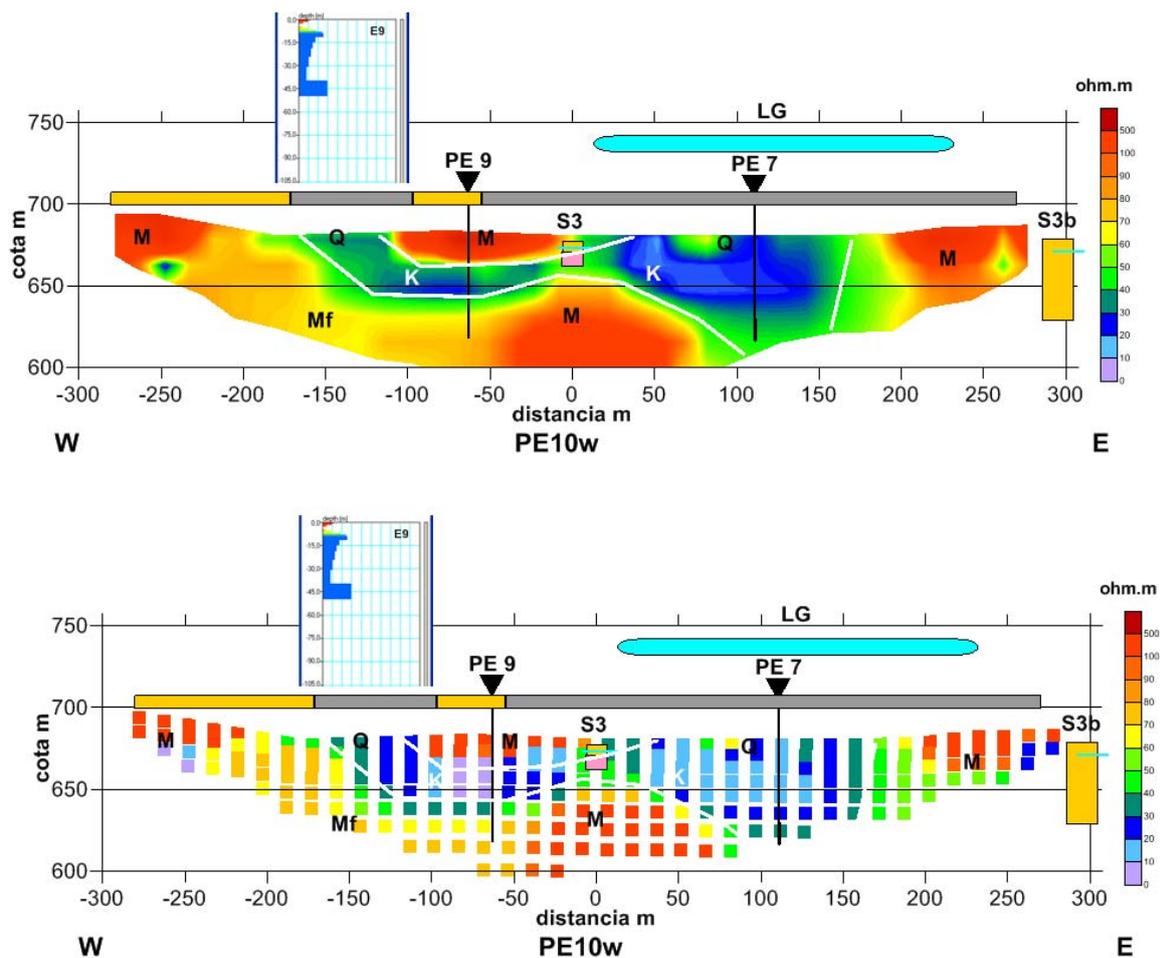


Fig. 9.7 Interpretación geológica del perfil PE10 en imagen de distribución de resistividad (parte superior) y en valores asignados a las celdas en la inversión (parte inferior).

Perfil PE9

Transcurre de NO a SE sobre Cuaternario, Keuper y Muschelkalk. La resistividad superficial (Figura 9.8 caracteriza muy bien estos tramos, con valores de 10-30 ohm.m sobre terrenos cuaternarios, 10-40 ohm.m en el Keuper y 90-400 ohm.m sobre el Muschelkalk, donde hay zonas con valores inferiores que posiblemente suponen una modificación del trazado de la cartografía de superficie. El extremo final del SE sobre el Muschelkalk tiene valores superiores a 900 ohm.m, lo que puede interpretarse como materiales no fracturados.

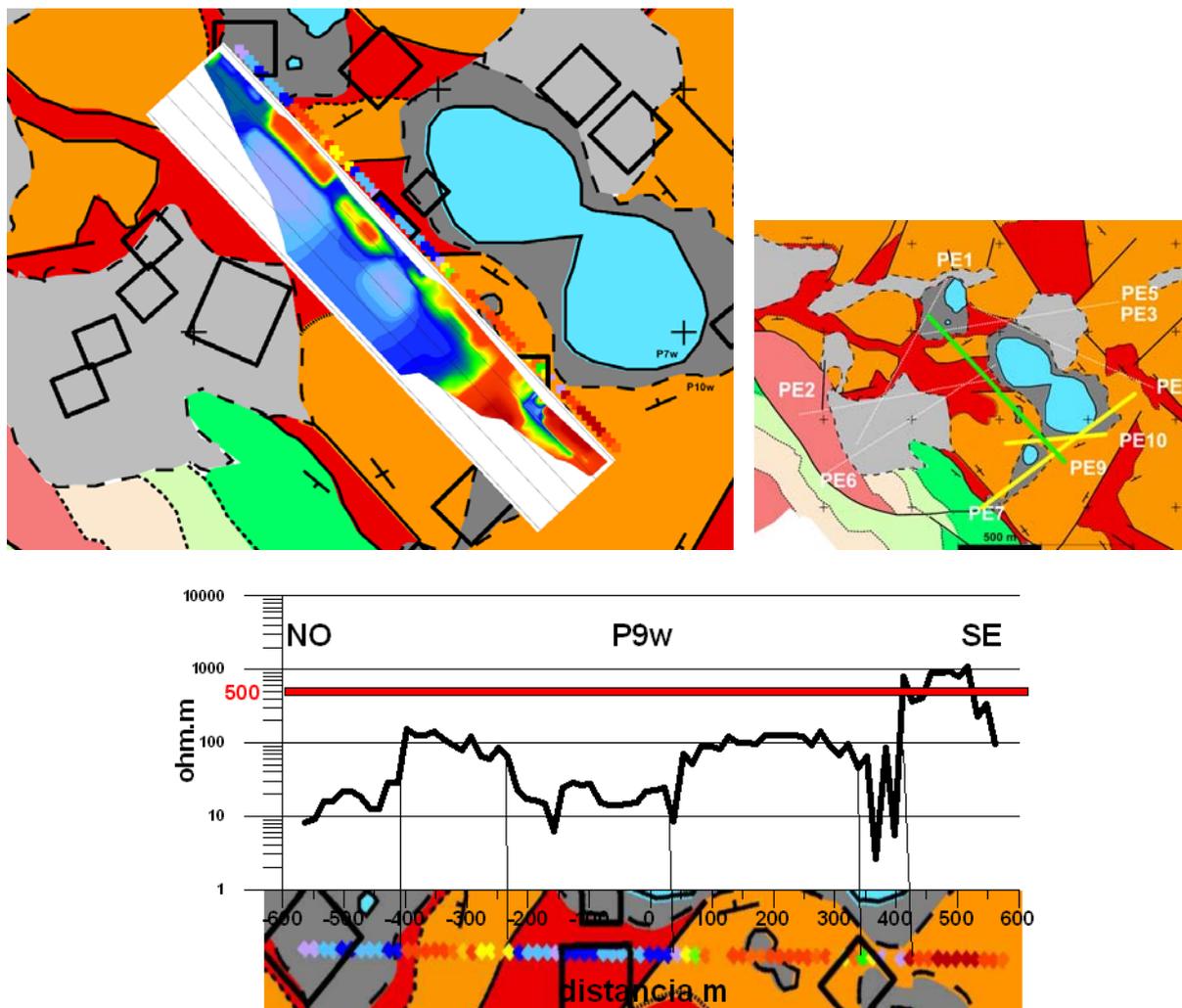


Fig. 9.8 Perfil eléctrico PE9. Parte superior: Posición del perfil sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte superior derecha indica en color verde el perfil que se está representando, y en color amarillo los anteriormente interpretados.

Este perfil se cruza con el PE10 y PE7. El cruce del PE9 con el PE7 (con una diferencia de unos 7 m en la cota, que es más elevada en el PE7, debido a errores-precisión de GPS) muestra (Figura 9.9) situaciones aceptablemente coincidentes: resistivo en los primeros 40-50 m de profundidad, situándose posteriormente un conductor de unos 25 m de potencia aparente, pasando de nuevo a

valores de mayor resistividad con la profundidad. En el cruce con el PE10 (Figura 9.9) se produce una situación similar, teniendo en cuenta que aunque en apariencia las primeras decenas de metros aparecen como resistivos en el PE10, mientras que son conductores en el PE9, la situación es aceptable situando el cruce 10 m hacia el Sur. La imprecisión en la asignación de valores de resistividad a posiciones concretas y el error de posicionamiento de las mediciones pueden justificar esta diferencia. En consecuencia, puede trasladarse la información entre estos perfiles.

Otros puntos de apoyo para su interpretación son los SRM E17, E14, E9 y E15 (más alejado), y el sondeo mecánico S4. También va a utilizarse el sondeo S6, aunque se encuentra a unos 150 m del perfil PE9.

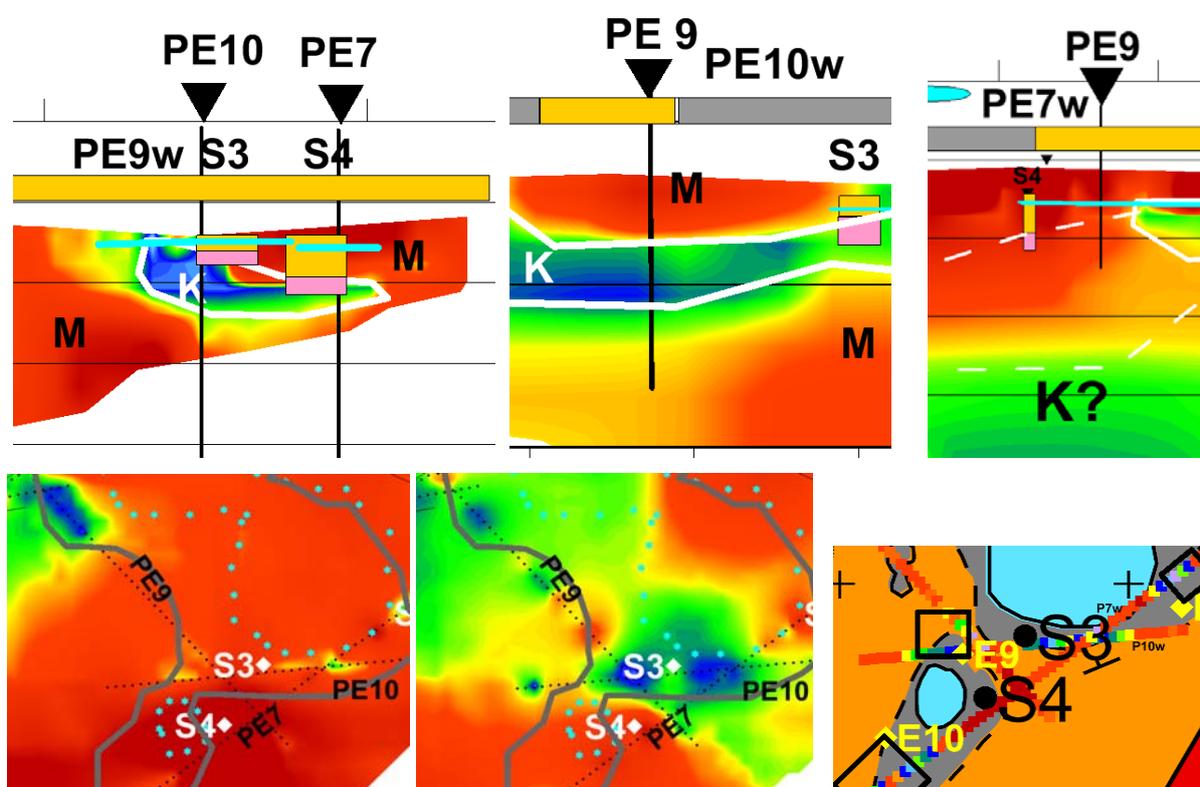


Fig. 9.9 Cruce del perfil PE9 con el PE7 y PE10. Parte superior: fragmento de 100 m de anchura de las imágenes en el cruce. Parte inferior: distribución de resistividad en la superficie y a 22 m de profundidad y celdas de inversión en la superficie.

Teniendo en cuenta toda esta información, se ha trazado la interpretación de este perfil recogida en la Figura 9.10. En el primer tramo oriental aparecen grandes potencias de Muschelkalk, con la intercalación de materiales del Keuper que ya aparecía en los perfiles PE10 y PE7, corroboradas además por los sondeos mecánicos S3 y S4. Hacia el NO, el Keuper se presenta desde aflorante hasta profundidades superiores a 150 m, intercalándose una capa, con apariencia discontinua, de Muschelkalk, cubierta por el Keuper entorno a las distancias -100 a -200. Esta situación está también ratificada por el sondeo mecánico S6 (a mayor distancia de este corte), y supone una inversión completa de la serie estratigráfica. La resistividad del tramo asignado a materiales del Keuper presenta una diferenciación, de tal forma que a partir de la distancia 100 m hacia el NO tiene una

resistividad inferior, con tramos de menos de 10 ohm.m, lo que puede interpretarse como una facies diferente, más arcillosa.

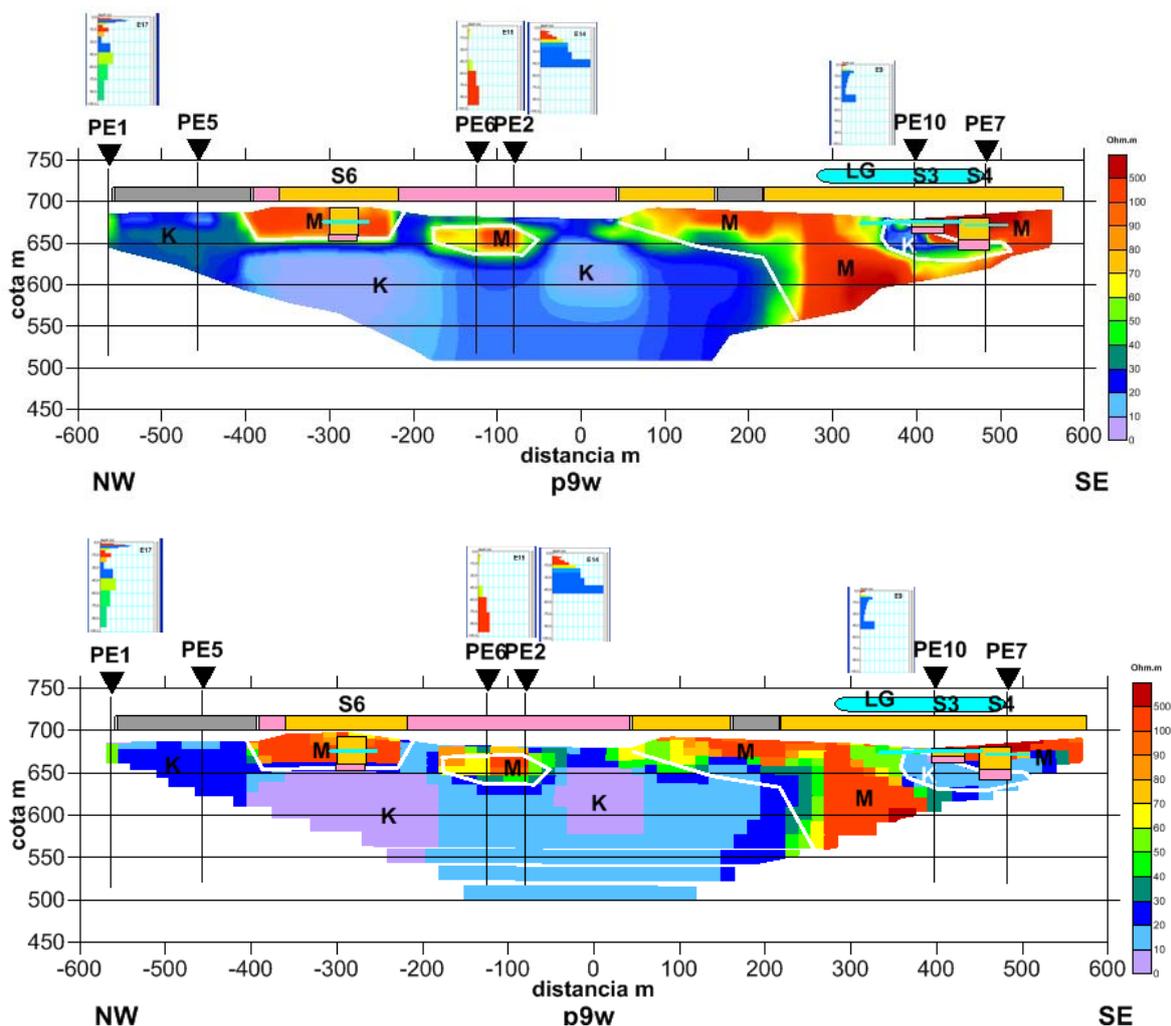


Fig. 9.10 Interpretación geológica del perfil PE9 en imagen de distribución de resistividad (parte superior) y en valores asignados a las celdas en la inversión (parte inferior).

Perfil PE6

Comienza en el SO sobre calizas del Eoceno, con resistividad superficial (Figura 9.11) del valores superiores a 500 ohm.m, extendiéndose hacia el NE más allá del contacto cartografiado con los materiales del Cuaternario (en -420 m) con valores superiores a 80 ohm.m. El perfil transcurre luego sobre el Cuaternario hasta la distancia 240 m, con valores de resistividad superiores a 50 ohm.m hasta la distancia -100 m, donde disminuyen por debajo de los 20 ohm.m al acercarse al contacto con el Keuper, por donde sigue presentando resistividades de este orden de magnitud, excepto al final, donde en el Cuaternario vuelven a aumentar por encima de los 100 ohm.m, posiblemente debido a la presencia del Muschelkalk.

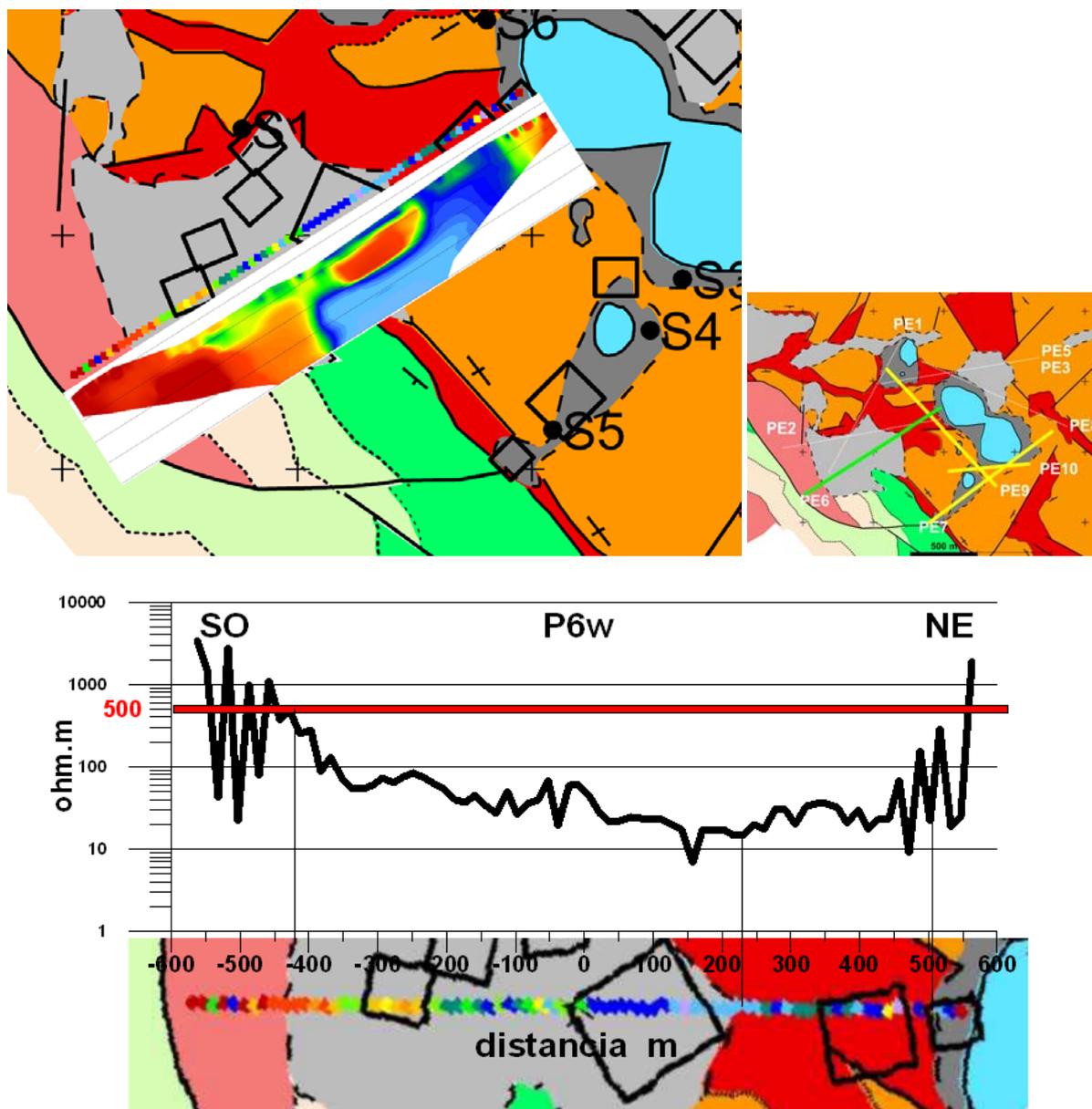


Fig. 9.11 Perfil eléctrico PE6. Parte superior: Posición del perfil sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte superior derecha indica en color verde el perfil que se está representando, y en color amarillo los anteriormente interpretados.

Las resistividades superficiales se mantienen en profundidad, prolongándose el resistivo del SO hacia el NE y apareciendo un nuevo resistivo entre las distancias 0 y 250 m completamente rodeado de materiales más conductores.

Esta sección se cruza con la PE9, con un error en la diferencia de cotas inferior a 2 m. La distribución de resistividad en ambos cortes (Figura 9.12) es bastante similar, aunque la sección PE6 no presenta el contraste vertical en profundidad tan acusado como la PE9, lo que nuevamente es una indicación de la influencia de la orientación del dispositivo en los valores medidos de resistividad, debido a los bruscos cambios laterales que se producen en estas estructuras. Esta circunstancia puede apreciarse bien en la comparación del mapa de resistividad superficial y a 14 m de profundidad: en la zona del cruce de perfiles: el PE9 transcurre paralelo al contacto entre materiales resistivos y conductores, mientras que el PE6 lo hace por materiales conductores; a 14 m de profundidad el resistivo está ya presente en el PE9.

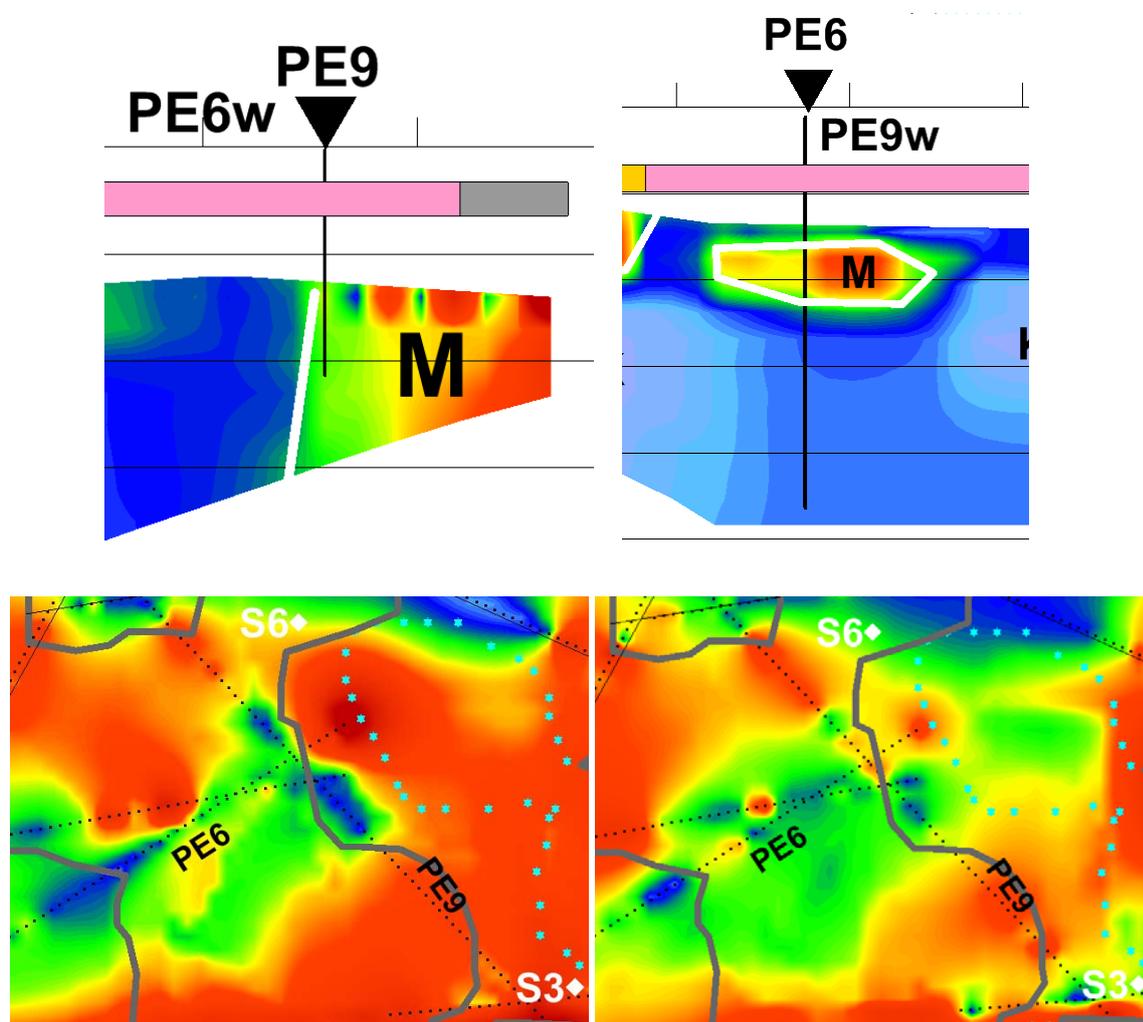


Fig. 9.12 Cruce del perfil PE6 con el PE9. Parte superior: fragmento de 100 m de anchura de las imágenes en el cruce. Parte inferior: distribución de resistividad en la superficie y a 14 m de profundidad.

En la alineación del PE6 se encuentran los SRM E1, E12, E16, E15 y E14. Una posible interpretación de esta sección es la presentada en la Figura 9.13.

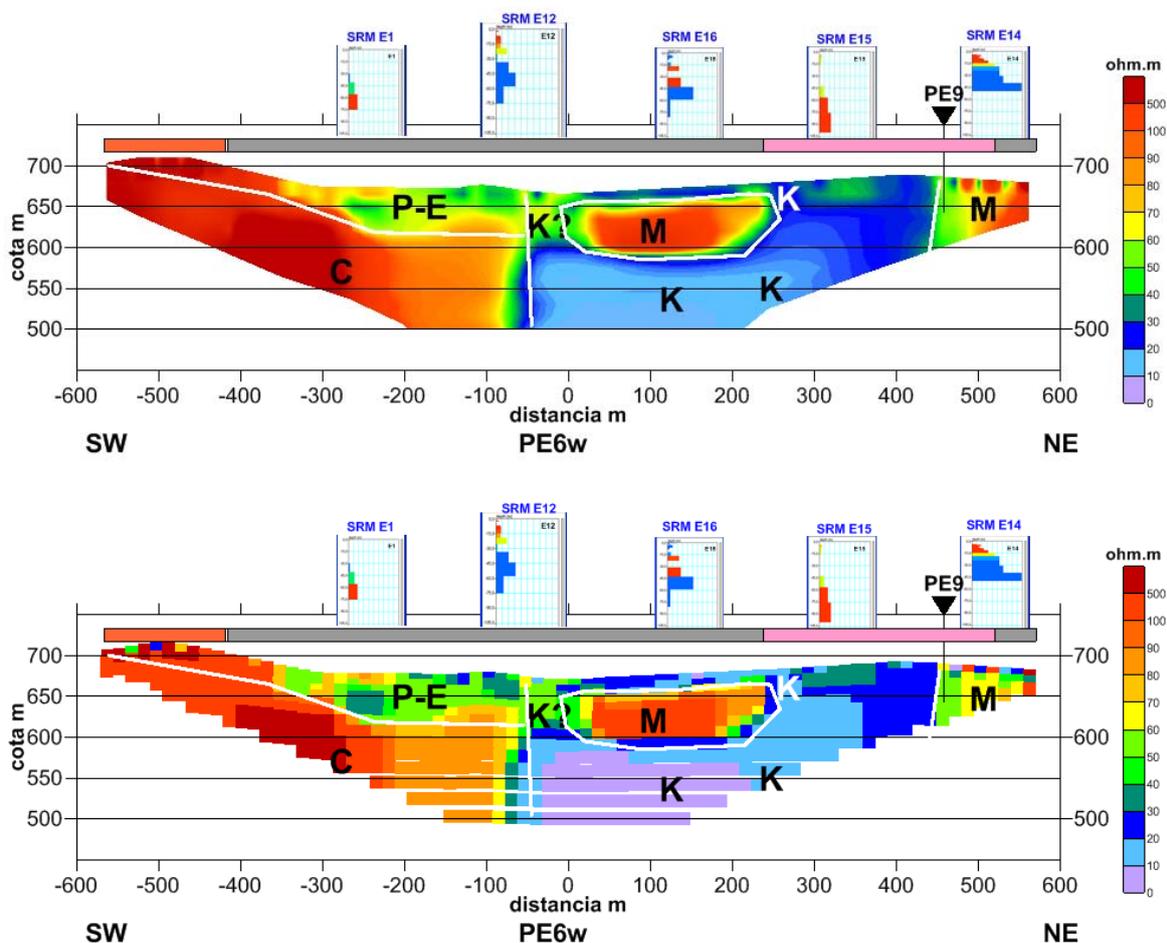


Fig. 9.13 Propuesta de interpretación del perfil PE6 en imagen de distribución de resistividad (parte superior) y en valores asignados a las celdas en la inversión (parte inferior). P-E: materiales del Paleoceno-Eoceno.

La menor resistividad de los primeros 50 m en el sector -50 a -400 se puede atribuir a la presencia de calizas y margas del Paleoceno, pudiéndose interpretar (sobre todo teniendo en cuenta las resistividades de las celdas de inversión) que todo el contacto de los materiales del sinclinal de Estopiñán se efectúa con el Keuper. El Muschelkalk aparece hacia el NE, rodeado del Keuper, situación ya observada en el PE9. En el extremo NE los materiales por debajo del Cuaternario hay que interpretarlos como pertenecientes al Muschelkalk. Por debajo de la cota 600, en el tramo de distancias 0-200 el Keuper presenta valores de resistividad inferior.

Perfil PE2

El perfil PE2 transcurre también desde las calizas del Eoceno en el SO hasta las lagunas (Figura 9.14); la resistividad superficial en el tramo de afloramientos del Paleoceno-Eoceno tiene valores entre 20-200 ohm.m, correspondientes a calizas y margas, aunque pasan a ser superiores a los 500 ohm.m en profundidad, posiblemente por la presencia de materiales cretácicos. La porción que transcurre sobre el Cuaternario cuaternarios (entre las distancias -400 y 100 m) tiene resistividad superficial entre 20 y 80 ohm.m, siendo superior en la parte central, aunque en profundidad disminuye en todo el tramo a valores inferiores a 20-30 ohm.m. El paso a materiales del Keuper se manifiesta por resistividad superficial inferior en general a 50 ohm.m, aunque con zonas donde llega a varios centenares y que se mantienen en los primeros 30-40 m de profundidad, disminuyendo posteriormente en todo el tramo a valores inferiores a 30 ohm.m.

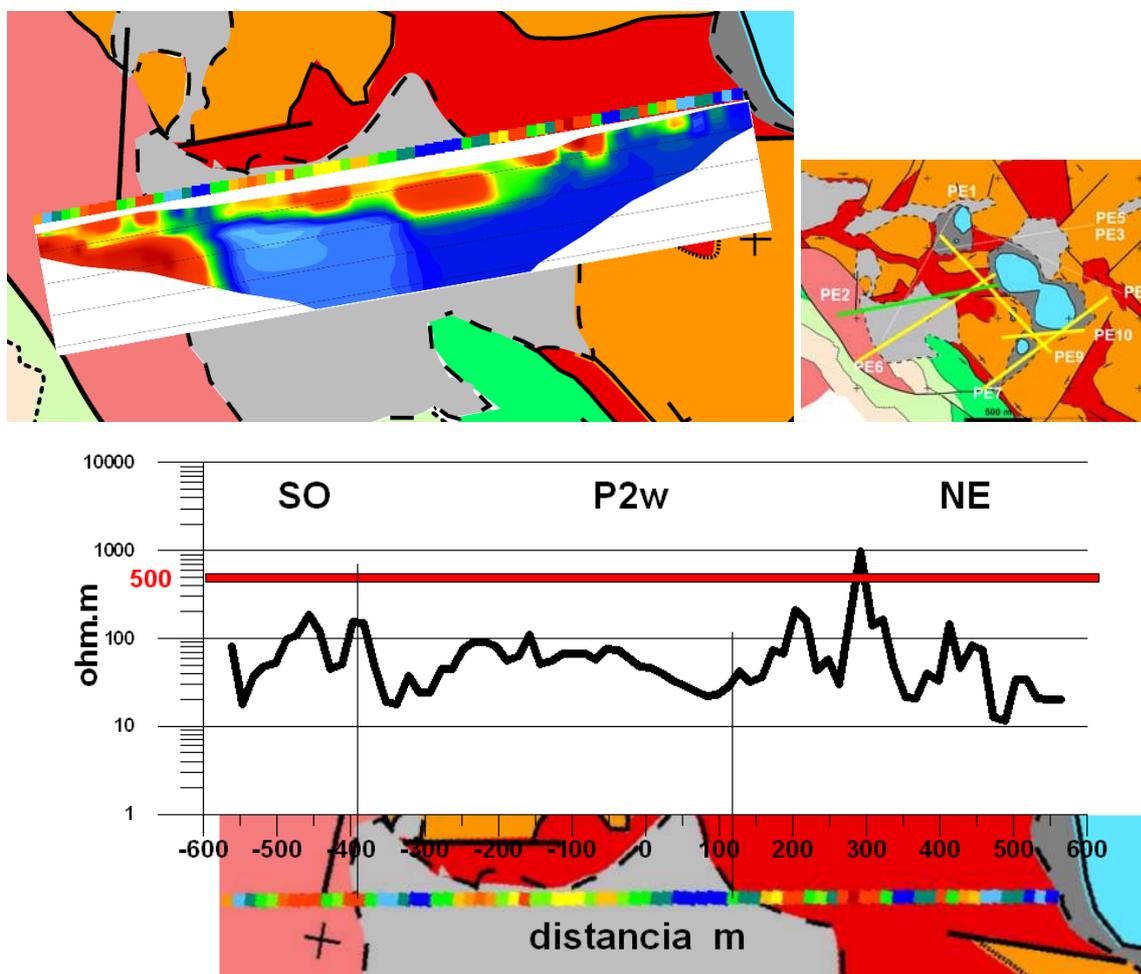


Fig. 9.14 Perfil eléctrico PE2. Parte superior: Posición del perfil sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte superior derecha indica en color verde el perfil que se está representando, y en color amarillo los anteriormente interpretados.

La resistividad superficial de este perfil presenta valores algo más heterogéneos que en otras secciones, aunque sigue caracterizando las diferentes rocas en su estado no saturado.

La sección se cruza con el PE6 y PE9, y tiene próximos los SRM E12, E15 y E14, estando el sondeo mecánico S1 alejado menos de 100 m. El cruce con ambos perfiles (Figura 9.15) se verifica sobre el Keuper mostrando todas las secciones distribuciones de resistividad concordantes, lo que permite traspasar la información entre ambas.

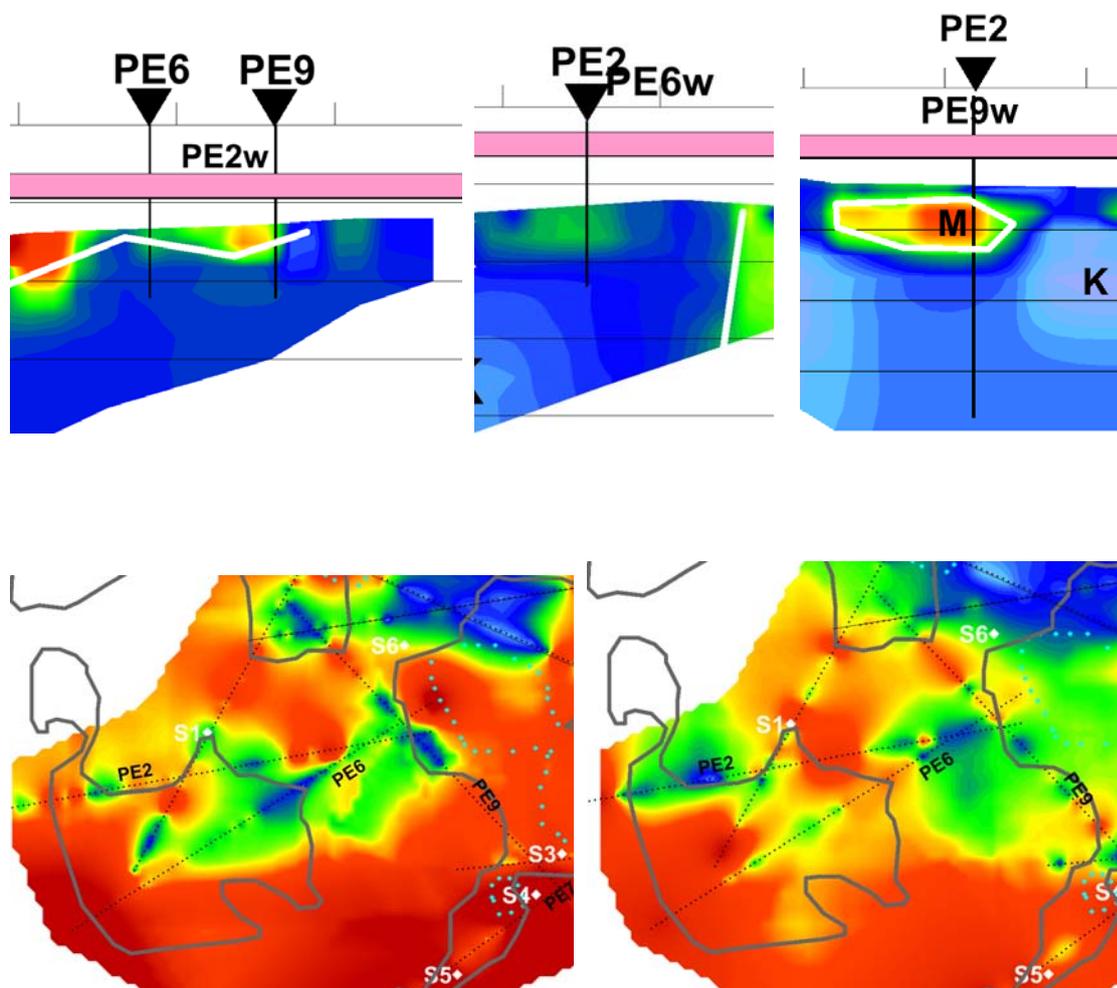


Fig. 9.15 Cruce del perfil PE2 con el PE6 y PE9. Parte superior: fragmento de 100 m de anchura de las imágenes en el cruce. Parte inferior: distribución de resistividad en la superficie y a 22 m de profundidad.

El sondeo mecánico S1, proyectado desde una distancia de unos 100 m y emboquillado en el Muschelkalk, corta el Keuper en coincidencia con el paso a resistividades inferiores a 30 ohm.m. Considerando el conjunto de la información, una interpretación que puede darse de la geología de esta sección es la mostrada en la Figura 9.16.

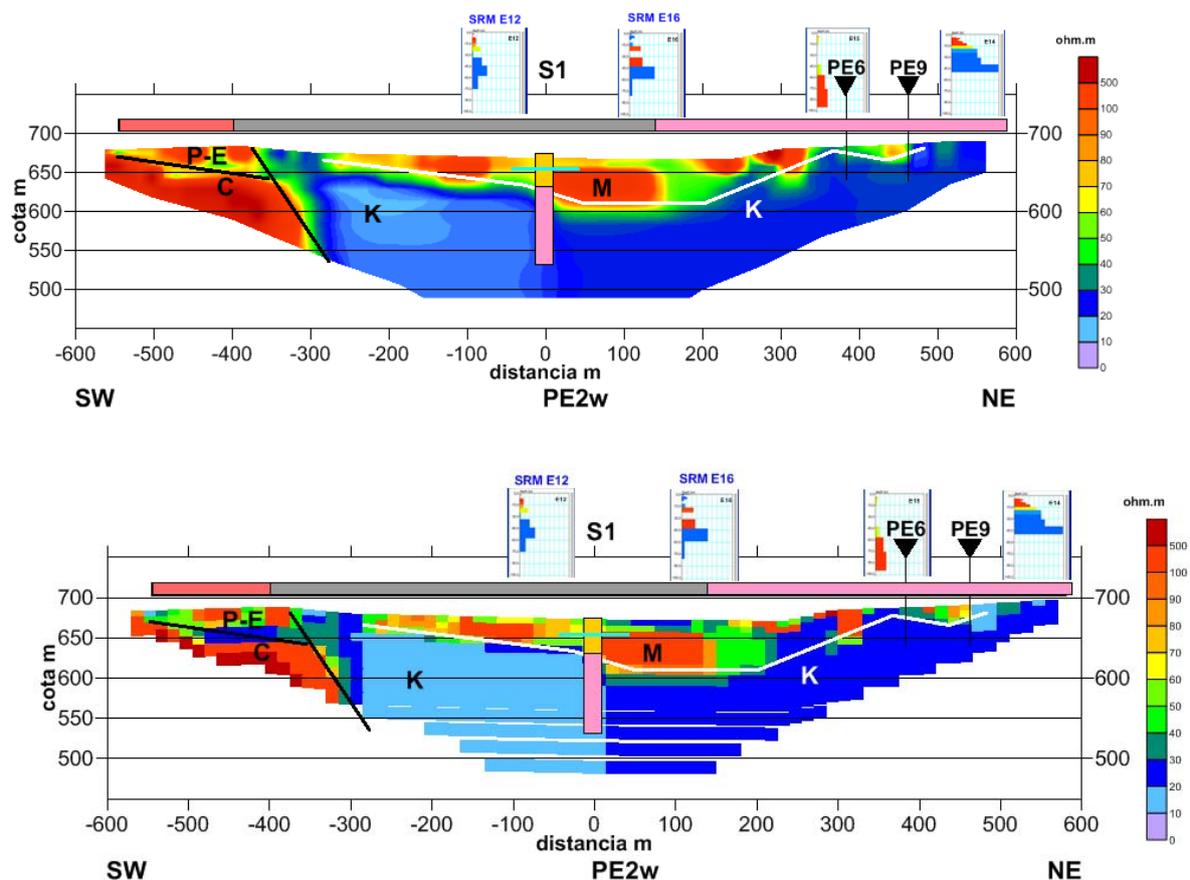


Fig. 9.16 Propuesta de interpretación del perfil PE2 en imagen de distribución de resistividad (parte superior) y en valores asignados a las celdas en la inversión (parte inferior). P-E: Paleoceno-Eoceno.

La situación es completamente análoga a la mostrada por el corte PE6, apareciendo también una diferenciación bastante neta entre la resistividad del Keuper, que es inferior en la mitad sur.

Perfil PE1

Se inicia en el SO sobre terrenos del Cuaternario junto a los afloramientos calizos del Cretácico, mostrando resistividades superficiales inferiores (Figura 9.17) a los 30 ohm.m en los primeros 200 m de distancia (posiblemente debidas a la presencia de margas del Paleoceno), que pasan enseguida a valores de más de 100 ohm.m en profundidad; sobre el resto del Cuaternario hay una resistividad superficial de 80-300 ohm.m (lo que indica la poca potencia de Cuaternario) hasta llegar a terrenos del Keuper, por donde transcurre el perfil desde los -200 a los 200 m con valores que en tramos son superiores a 100 ohm.m (cuando el límite cartografiado del Muschelkalk está muy próximo al perfil es difícil asegurar donde están los electrodos del perfil y cuál es la zona de mayor influencia en la resistividad). El paso al Cuaternario en la distancia 200 m vuelve a manifestarse por una disminución de la resistividad superficial, que sólo vuelve a tomar valores superiores a los 100 ohm.m al final del perfil. Estos valores de resistividad superficial se mantienen al menos en los primeros 50 m de profundidad, excepto en los primeros 200 m como antes se indicó. A mayor profundidad la sección muestra resistividades bajas (de 20 a 50 ohm.m), aunque el dispositivo Schlumberger presenta en este perfil una diferencia muy importante con las mediciones Wenner.

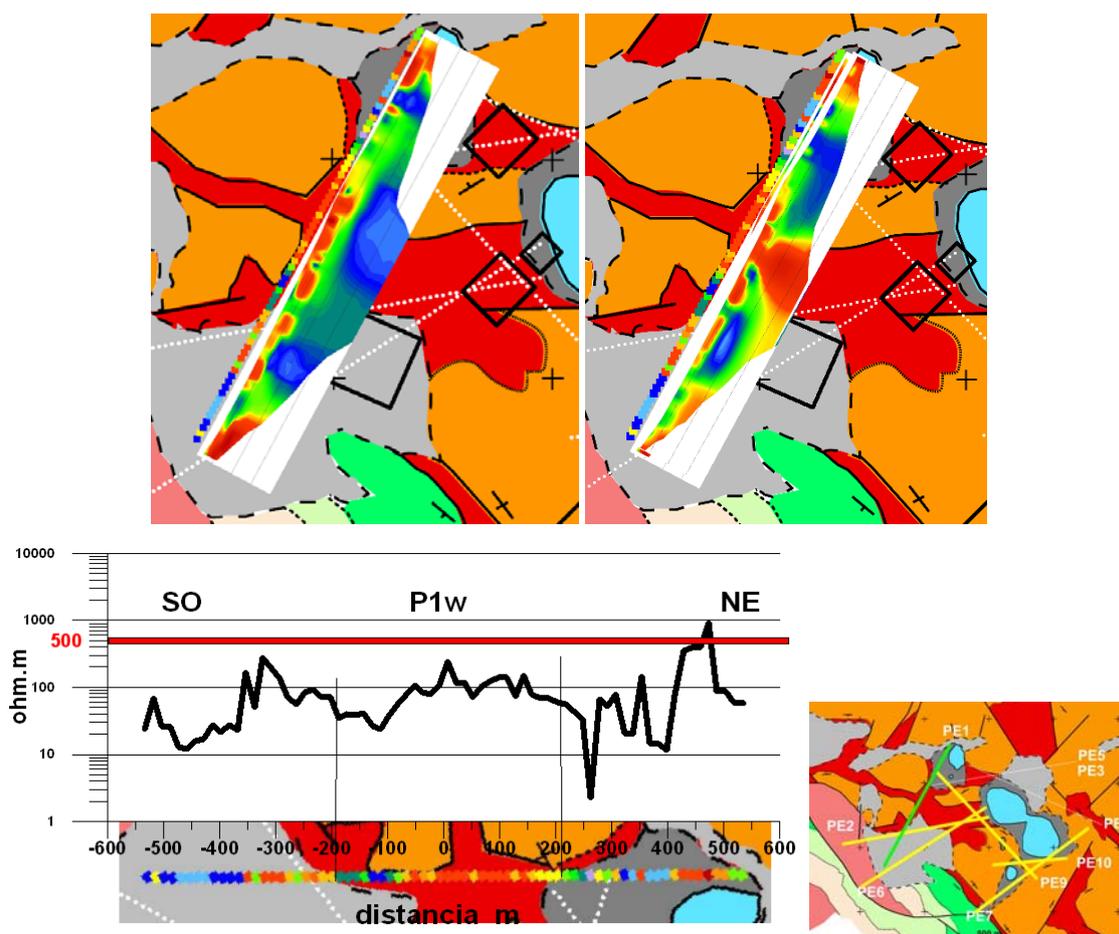


Fig. 10.17 Perfil eléctrico PE1. Parte superior: Posición del perfil sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad) para el dispositivo Wenner (izquierda) y Schlumberger (derecha). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte inferior derecha indica en color verde el perfil que se está representando, y en color amarillo los anteriormente interpretados.

A lo largo de este perfil se sitúan los SRM E1 (E13), E12, E17 y E2, además del sondeo mecánico S1, cruzándose con el PE2 y PE9, quedando su inicio muy próximo del PE6, como muestra la Figura 9.18.

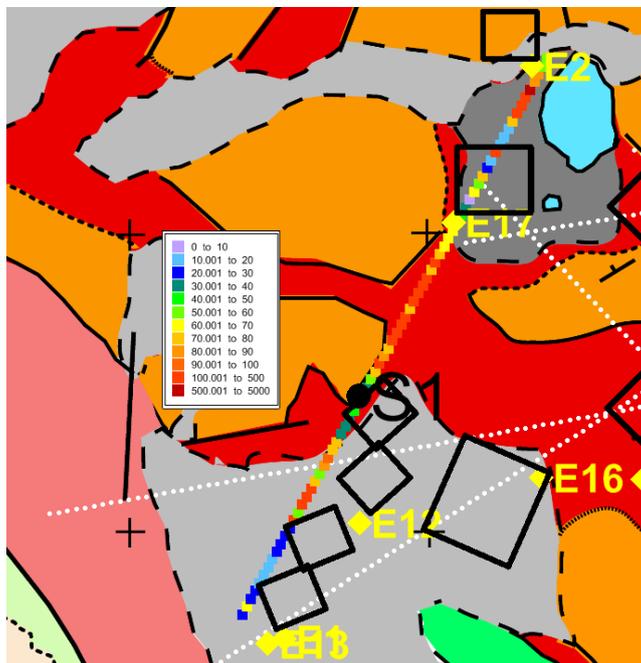


Fig. 9.18 Información sobre la alineación existente en el PE2.

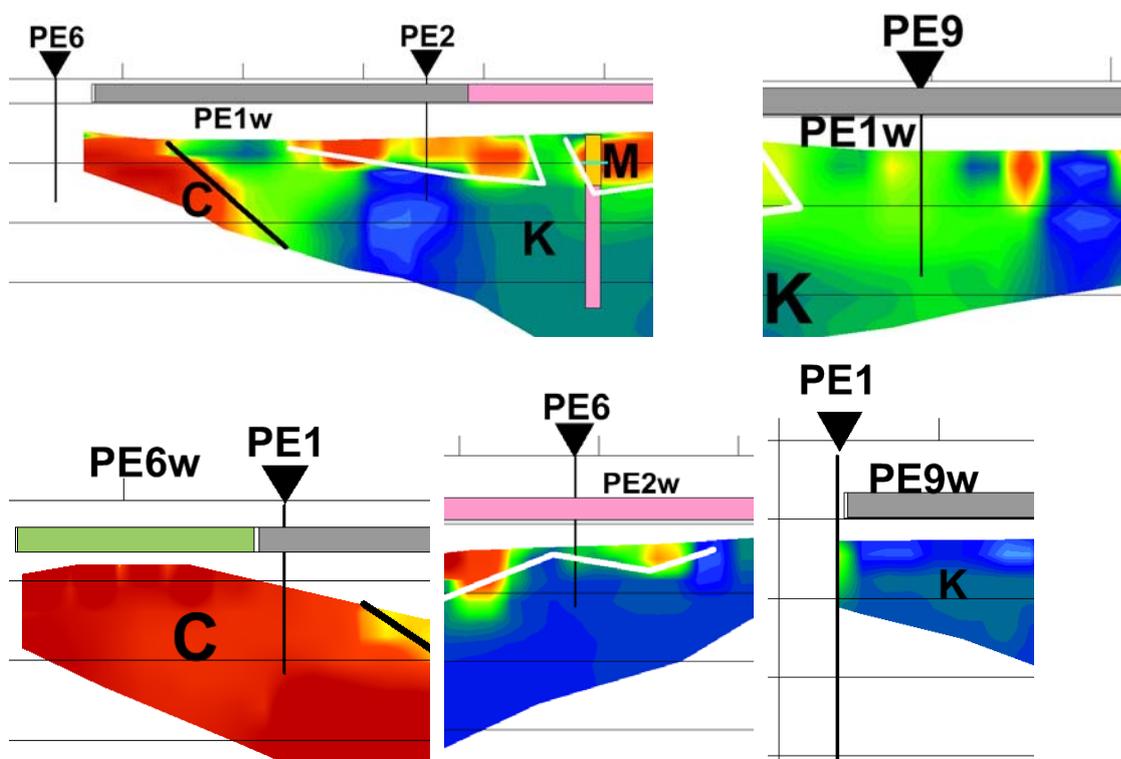


Fig. 9.19 Cruce del perfil PE1 con el PE2, PE9 y PE6. Parte superior: fragmentos del cruce del PE1. Parte inferior: fragmentos de los perfiles PE6, PE2 y PE9 en su cruce con el PE1.

La distribución de la resistividad en los cruces de perfiles (Figura 9.19) es muy coherente, tanto en su geometría como en los valores en ohm.m, lo que confirma la evolución espacial de las estructuras. Si se compara el mapa de resistividad en la superficie y a 40 m de profundidad en el área de los perfiles PE1, PE2, PE6 y PE9 (Figura 9.20) se aprecia cómo el Muschelkalk (valores de resistividad superiores a 100 ohm.m) se introduce por debajo del Keuper aflorante a lo largo del PE6 y PE2, mientras que es el Keuper el que se sitúa por debajo del Muschelkalk aflorante en el PE1. Estas evoluciones forman estructuras complejas de cartografiar, y deben de suponer un repetido plegamiento y/o cabalgamiento de la disposición estratigráfica original. Los altos valores de resistividad superficial y su continuidad en profundidad recomiendan revisar la cartografiada del Keuper en el trazado de este perfil, como ya fue comentado en el Capítulo 8, Figura 8.5.

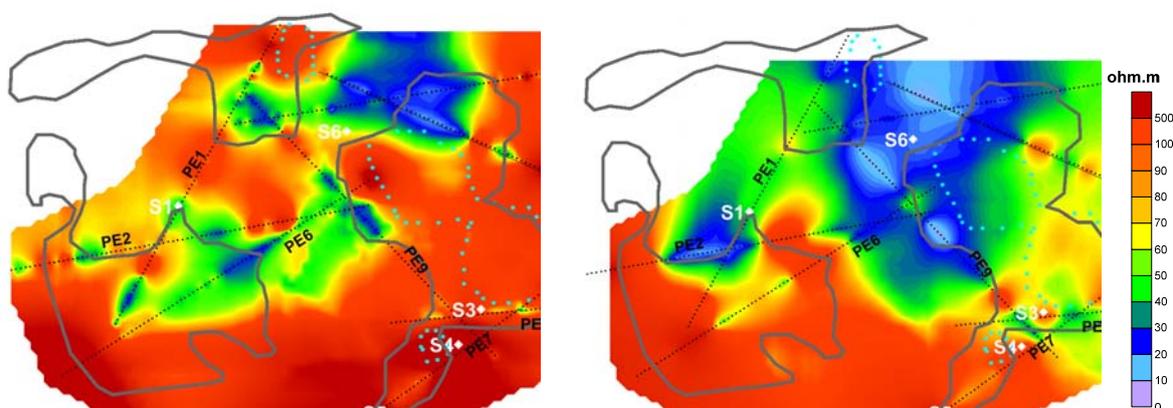


Fig. 9.20 Distribución de la resistividad en la superficie y a 40 m de profundidad en el entorno de los perfiles PE1, PE2, PE6 y PE9.

El sondeo mecánico S1, a pocos metros del perfil, está emboquillado en el Muschelkalk, pero no deja dudas de la presencia del Keuper suprayacente, lo que hace dudar de los valores de resistividad observados en las mediciones Schlumberger, que podría tratarse de un falso efecto de la inversión o una influencia muy elevada de la proximidad del Muschelkalk.

En consecuencia con esta información, una posible interpretación geológica de este perfil es la mostrada en la Figura 9.21. Al igual que en el corte PE6 hay duda de si los materiales que se apoyan sobre el Cretácico son del Muschelkalk o del Keuper, pudiendo ser el valor de resistividad en las celdas de inversión tanto debido a una potencia más importante de Cuaternario, como a la presencia del Keuper, como a la existencia de materiales margosos del Paleoceno. El resto de la sección mantiene una continuidad en superficie de materiales del Muschelkalk, suprayacente al Keuper, excepto en el extremo NE donde se ha seguido el criterio indicado en el PE6. La mayor resistividad del Keuper entre los -200 y -50 m no está presente en los otros perfiles hasta ahora interpretados.

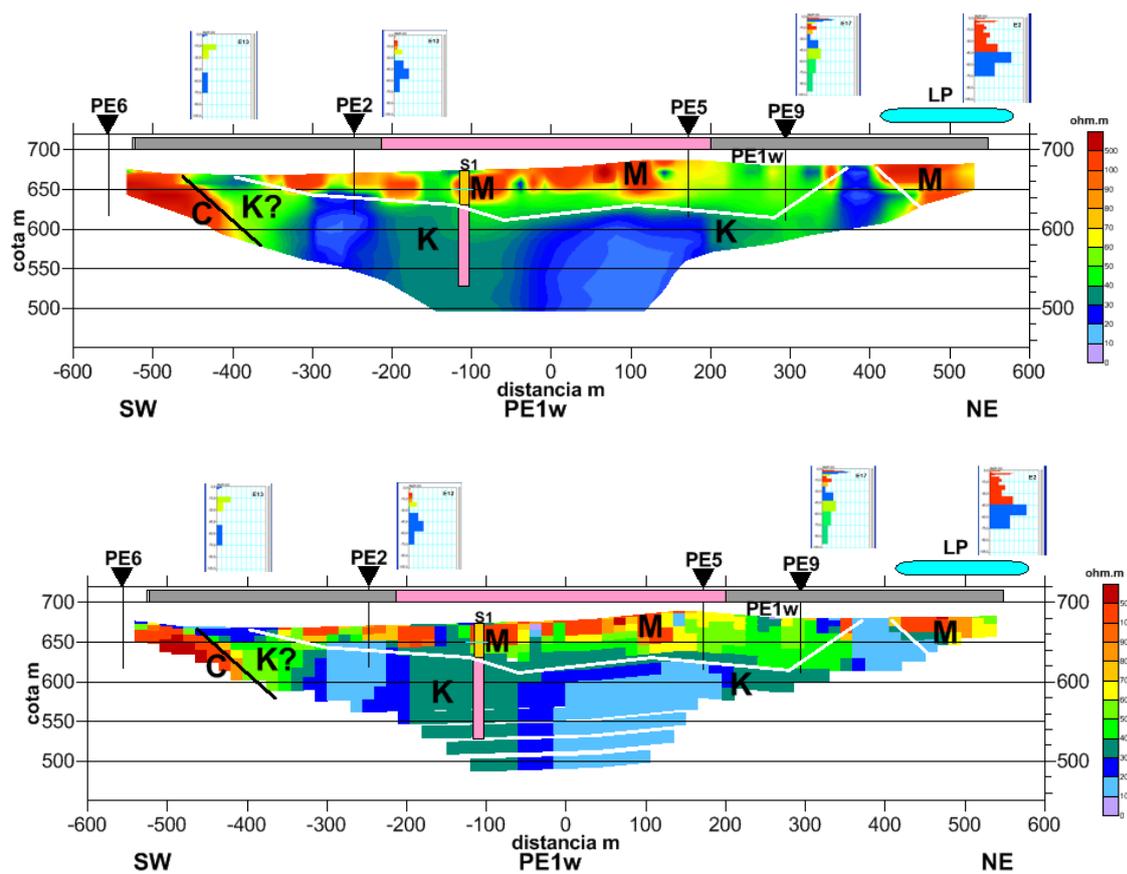


Fig. 9.21 Propuesta de interpretación del perfil PE1 en imagen de distribución de resistividad (parte superior) y en valores asignados a las celdas en la inversión (parte inferior).

Perfil PE5

Este perfil transcurre de Oeste a Este, pasando entre la Laguna Pequeña y la Laguna Grande. Su primera mitad está sobre el Keuper y la segunda sobre el Muschelkalk, ambos cubiertos parcialmente por el Cuaternario (Figura 9.22). Desde la distancia 400 a 600 m la resistividad superficial es superior a 100 ohm.m, correspondiendo a Muschelkalk; en el resto del perfil las zonas cubiertas por materiales cuaternarios tienen una resistividad superficial inferior a 50 ohm.m, siendo de 10-40 ohm.m de -250 a 200 m, y algo superior de -250 a -600 m.

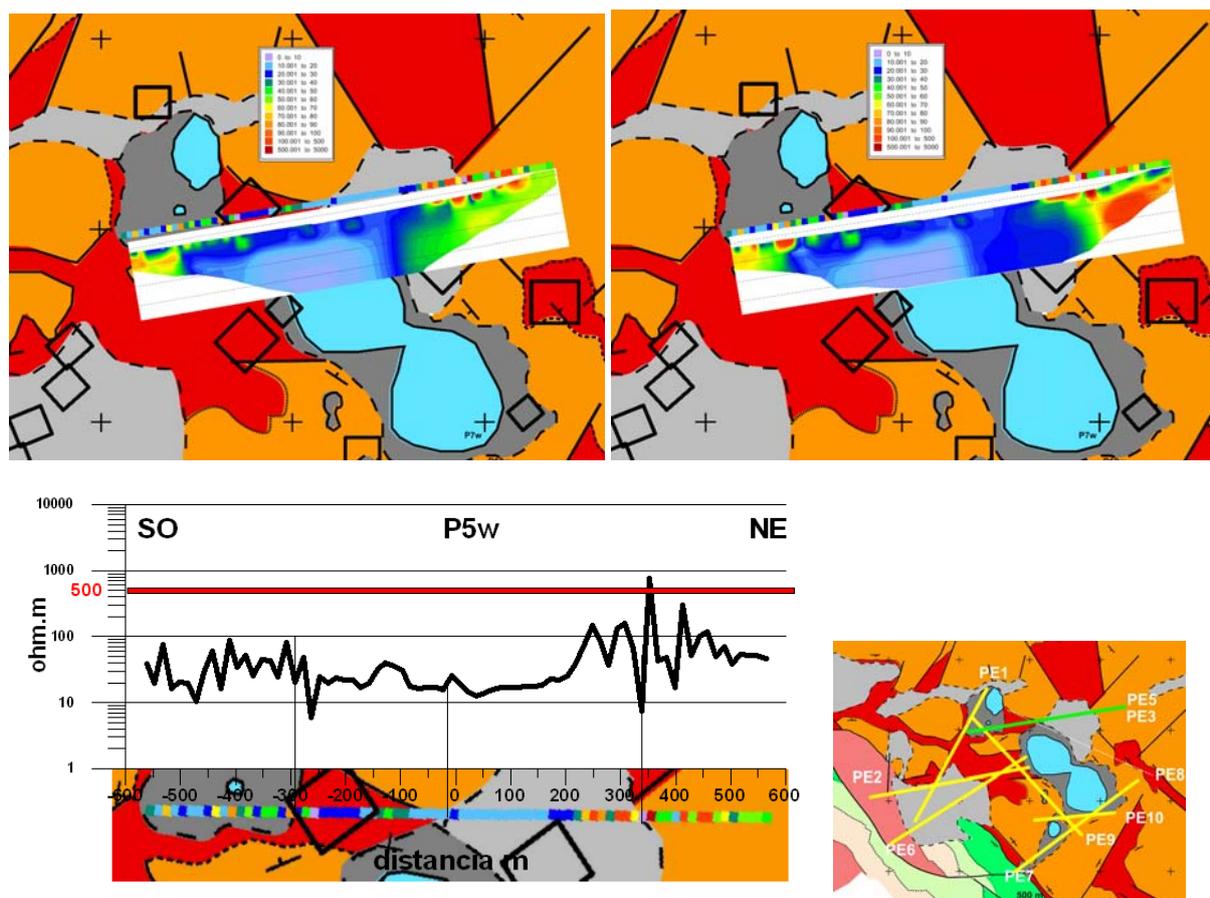


Fig. 9.22 Perfil eléctrico PE5. Parte superior: Posición del perfil sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad) para el dispositivo Wenner (izquierda) y Schlumberger (derecha). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte inferior derecha indica en color verde el perfil que se está representando, y en color amarillo los anteriormente interpretados.

A partir de unos 25 m de profundidad la resistividad cambia, siendo inferior a 20 ohm.m en casi toda la sección, excepto en ambos extremos, donde es superior a 50 ohm.m y con algunas diferencias para los límites entre las mediciones con dispositivo Wenner y Schlumberger.

El perfil PE5 tiene en sus proximidades los SRM E17, E6 y E3, así como el sondeo mecánico S6 (Figura 9.23). Su corte con los PE 1 y PE 9 se verifica con error en cota inferior a 1 m. El corte con el PE1 muestra una buena correspondencia de resistividad (Figura 9.24), permitiendo asignar al

Muschelkalk los valores superiores a 60 ohm.m. El corte con el PE9 también es aceptablemente coherente.

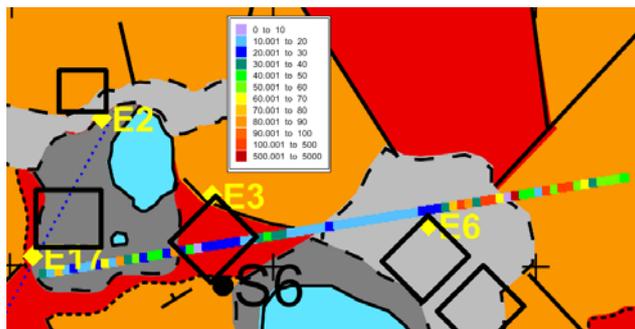


Fig. 9.23 Parte superior: Información sobre la alineación existente en el PE1.

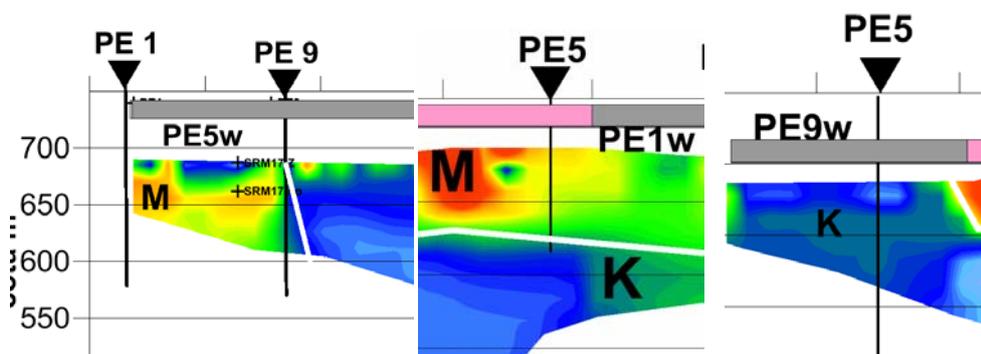


Fig. 9.24 Cruce del perfil PE5 con el PE1 y PE9.

A diferencia de los cortes anteriormente interpretados, el Muschelkalk sólo aparece en ambos extremos. La comparación entre la imagen de la resistividad en la superficie y a 50 m de profundidad (Figura 9.25) muestra claramente que se trata de una zona donde el Keuper está bordeado por materiales del Muschelkalk en superficie, pero en profundidad acaba siendo la base impermeable de las lagunas, y además explica su posible desconexión hidráulica, ya que permanece entre ambas desde la superficie.

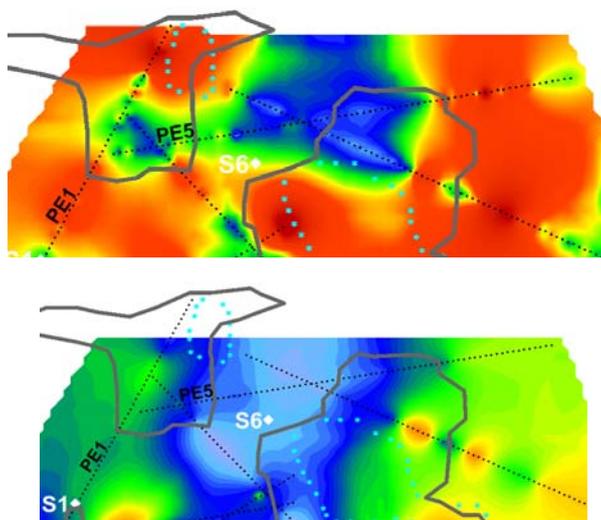


Fig. 9.25 Distribución de la resistividad en la superficie (superior) y a 50 m de profundidad (inferior) en el entorno del perfil PE5.

Una posible interpretación de esta sección es la mostrada en la Figura 9.26. La asignación a materiales del Muschelkalk del extremo NE está más justificada en las mediciones con dispositivo Schlumberger (Figura 9.22). El Sondeo mecánico S6 se encuentra unos 100 m al sur del perfil, estando emboquillado en Muschelkalk, mostrándose en este corte sólo para verificar la presencia del Keuper, que alcanza valores muy bajos de resistividad a profundidades superiores a los 150 m. Las pequeñas anomalías superficiales del extremo NE pueden ser debidas a la proximidad del Muschelkalk, mostrando claramente la imagen de valores en las celdas de inversión que son sólo valores muy puntales superficiales (sin descartar que se traten de ruido metrológico).

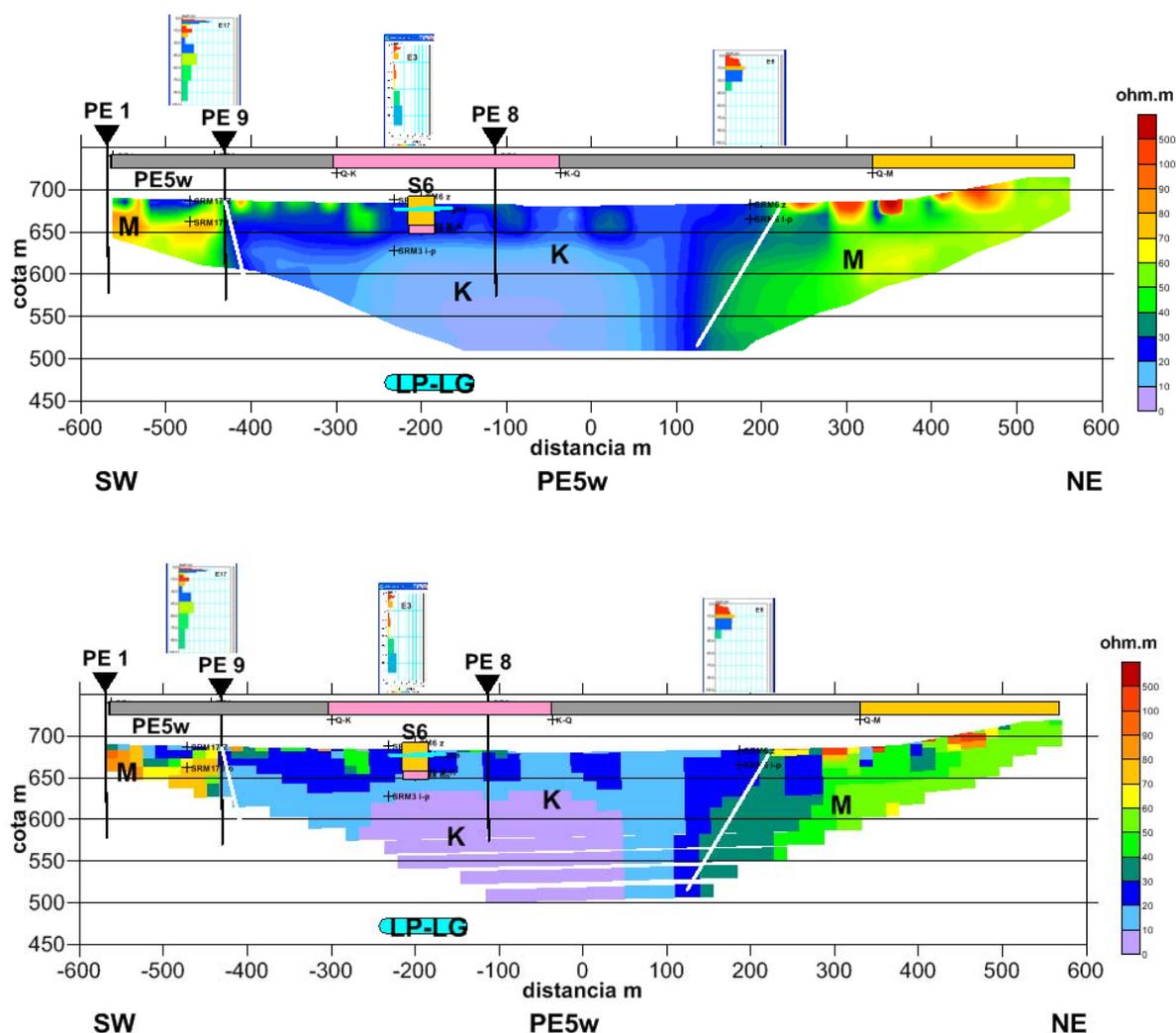


Fig. 9.26 Propuesta de interpretación del perfil PE5 en imagen de distribución de resistividad (parte superior) y en valores asignados a las celdas en la inversión (parte inferior).

Este corte pone de manifiesto que la zona entre las lagunas principales está constituida hasta gran profundidad por materiales del Keuper, que presenta unos valores inferiores a 10 ohm.m entre las distancias 50 a -300 m, desde unos 50 m de profundidad.

Perfil PE8

Se inicia junto a la orilla sur de la Laguna Pequeña y transcurre con dirección NO-SE por el lado norte de la Laguna Grande (Figura 9.27). Desde el inicio en el NO hasta la distancia -300 m los electrodos están sobre el Keuper, prácticamente en el contacto con el Muschelkalk, siendo la resistividad superficial variable de 100 a 10 ohm.m; es probable que los tramo con resistividad superior a 40 ohm.m se deba a la influencia de la presencia de materiales del Muschelkalk, muy próximos. A continuación los electrodos se sitúan sobre materiales cuaternarios hasta la distancia 100 m, con resistividad superficial muy baja (menos de 20 ohm.m), excepto en unos 100 m entre -100 y 0 m de distancia. La entrada en el Muschelkalk se caracteriza por un aumento de la resistividad, que toma valores superiores a 200 ohm.m hasta la distancia 250 m, a partir de donde nuevamente transcurre sobre el contacto Keuper –Muschelkalk, lo que da lugar a una sucesión rápida de variación de la resistividad superficial entre 5 y 100 ohm.m. Estos valores de la resistividad se mantienen al menos hasta los primeros 70-80 m de profundidad, pasando a mayor profundidad a resistividades inferiores, excepto en el extremo SE, donde pasa a valores superiores.

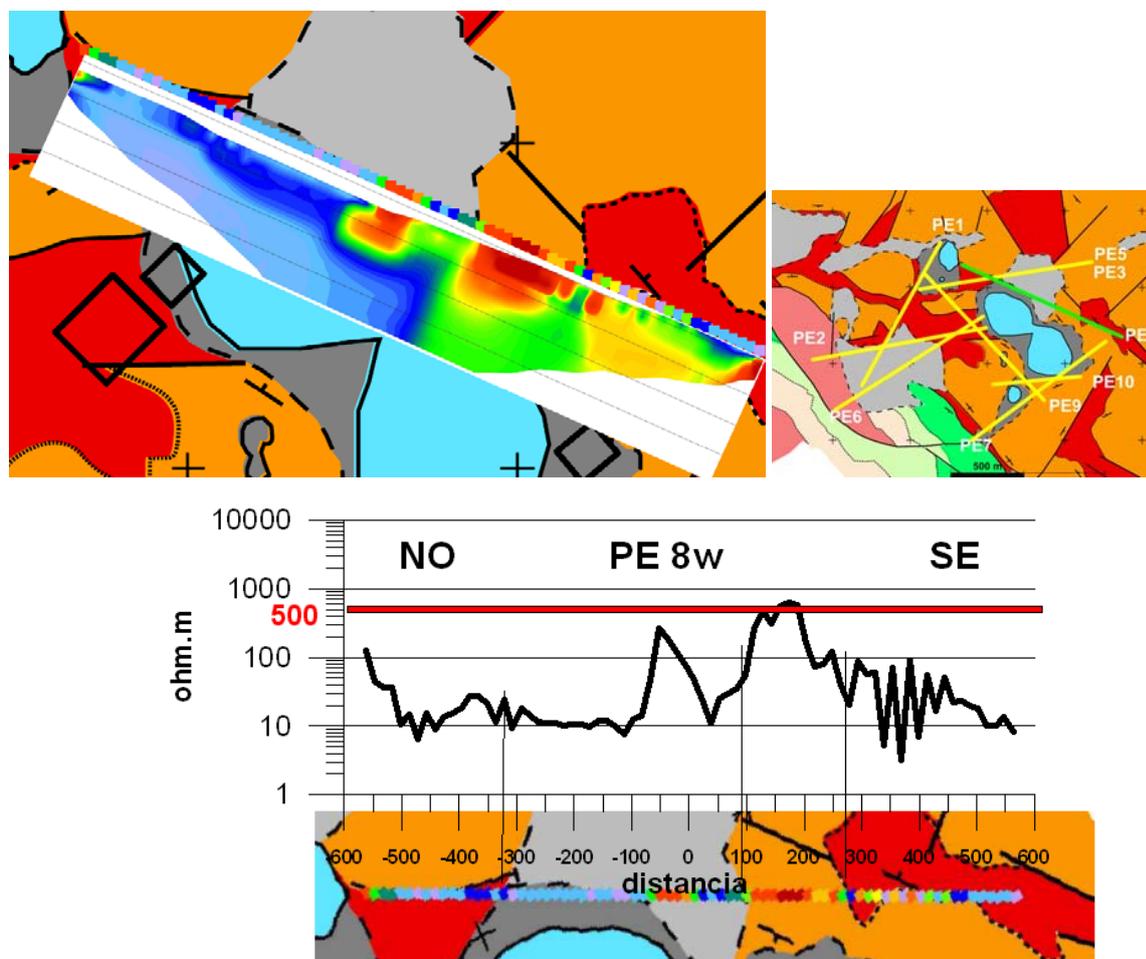


Fig. 9.27 Perfil eléctrico PE8. Parte superior: Posición del perfil sobre el mapa geológico con indicación de la resistividad superficial en ohm.m (codificada en color según la leyenda), con yuxtaposición de la sección geoelectrica (distribución de la resistividad hasta unos 200 m de profundidad). Parte inferior: perfil de resistividad superficial y su correspondencia con la posición geológica. El mapa icono de la parte superior derecha indica en color verde el perfil que se está representando, y en color amarillo los anteriormente interpretados.

Como puntos de control del perfil PE8 se cuenta con el cruce con el perfil PE5 y la proximidad de los SRM E3, E6, E18, E7 (Figura 9.28). El sondeo mecánico S6 se encuentra a unos 150 m de distancia y separado por un afloramiento de Keuper, por lo que su información sólo puede considerarse de forma relativa. El cruce de los perfiles PE8 y PE5 (Figura 9.29) es coherente en la distribución de valores de resistividad; puesto que el PE5 transcurre claramente sobre materiales del Keuper, cabe asignar también estos materiales al PE8.

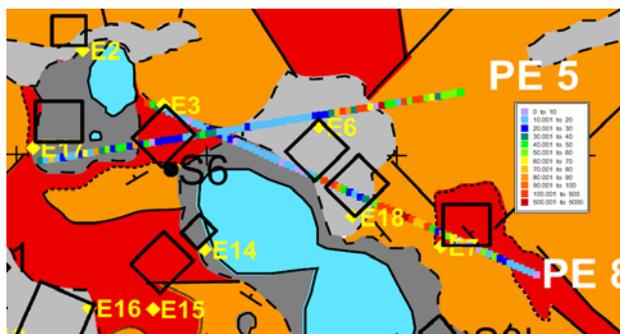


Fig. 9.28 Información sobre la alineación existente en el PE8.

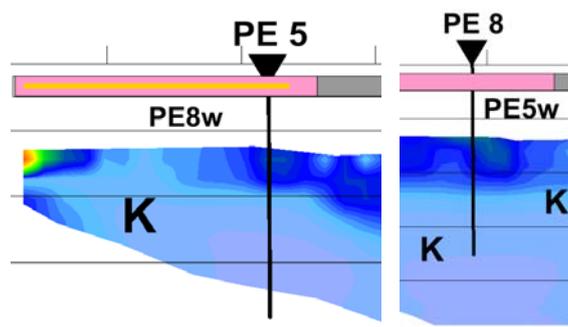


Fig. 9.29 Cruce del perfil PE8 con el PE5.

La distribución de resistividad en este corte es muy parecida a la del PE9, prácticamente paralelo por el lado sur de las lagunas. Entre ambos y la morfología del mapa de resistividad de esta zona entorno de las lagunas (Figura 9.30) se aprecia que el Keuper constituye el sustrato impermeable de las mismas, en un complicado sistema de inversión estratigráfica posiblemente debido a múltiples causas tectónicas, que dibujan formas realmente complicadas de interpretar geológicamente.

Una interpretación que cabe hacer de esta sección es la presentada en la Figura 9.31, en la que se observa la misma curiosa intercalación aparente del Muschelkalk en el Keuper sobre la parte central del corte, como ocurría en el PE9. La disposición de la resistividad del Keuper en esta imagen, junto con la que brinda su expresión por la resistividad en las celdas de inversión, hace pensar en que puede haber dos tipos diferenciados de materiales dentro de lo que hemos denominado Keuper, siendo el más moderno (situado a mayor profundidad) de menor resistividad y por lo tanto de naturaleza probablemente más arcillosa (o yesífera, aunque desconocemos el comportamiento eléctrico que pueda presentar esta roca, muy variable de acuerdo con su grado de hidratación). Este

hecho podría justificar un fenómeno añadido de diapirismo, parcial responsable de las imbricaciones observadas y de la complejidad de la estructura final resultante, así como de la gran potencia aparente que presentan estos materiales.

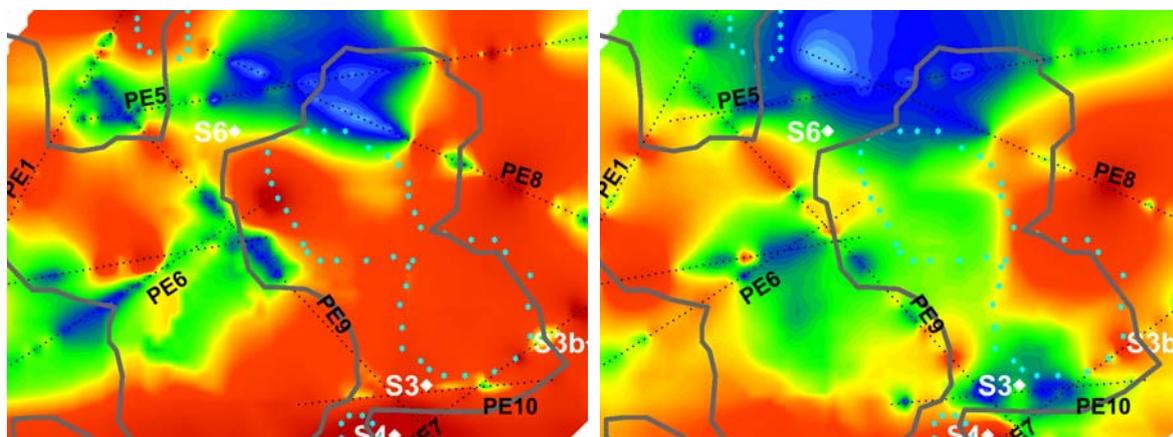


Fig. 9.30 Distribución de la resistividad en la superficie y a 22 m de profundidad en el entorno de las lagunas y perfil PE8.

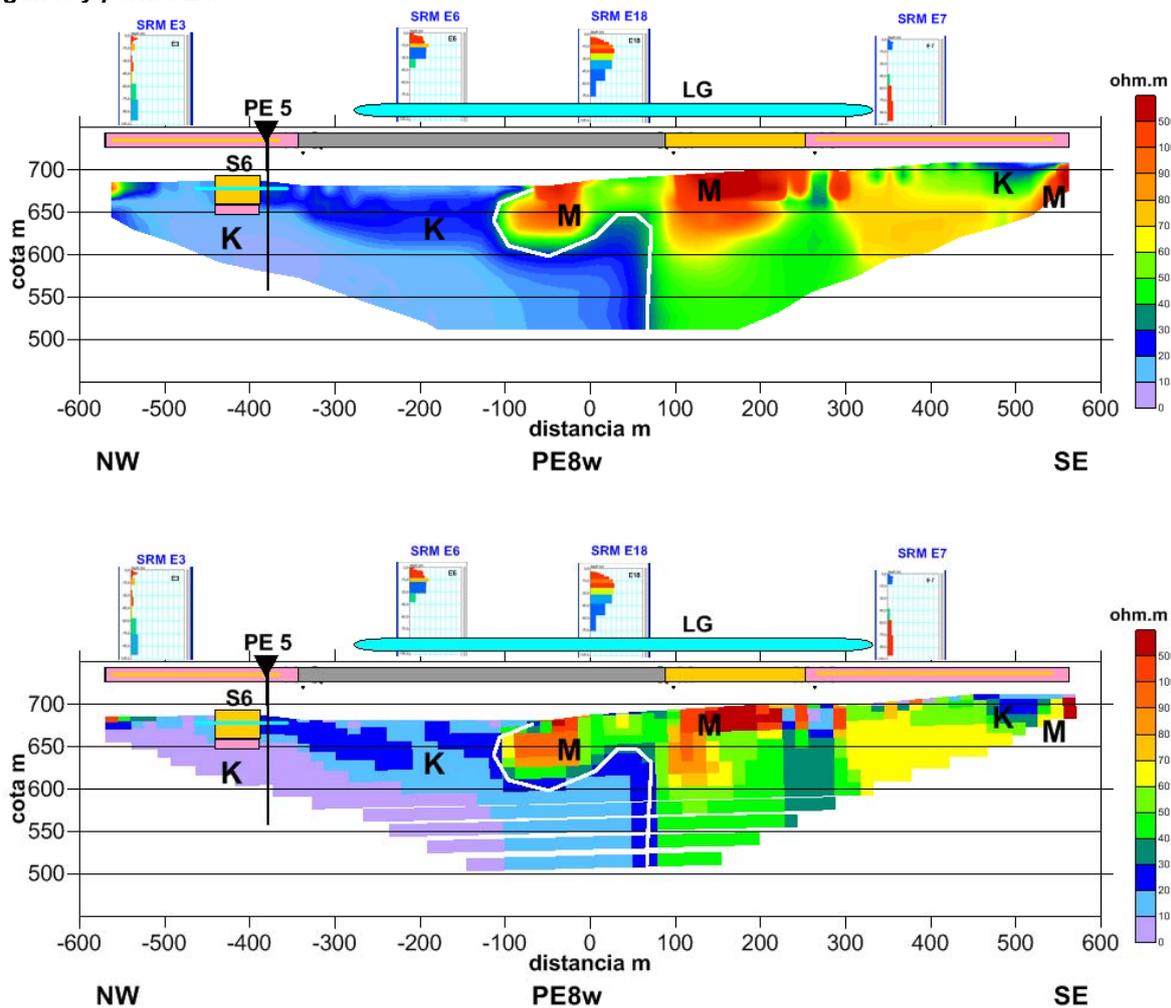


Fig. 9.31 Propuesta de interpretación del perfil PE8 en imagen de distribución de resistividad (parte superior) y en valores asignados a las celdas en la inversión (parte inferior).

Perfil PE4

Finalmente, el perfil de resistividad realizado en la zona de las Ollas presenta un caso aislado del resto del trabajo. Todo el está efectuado sobre materiales del Cuaternario, presentando baja resistividad, que disminuye en profundidad, excepto en el extremo suroccidental, donde es un poco más resistivo.

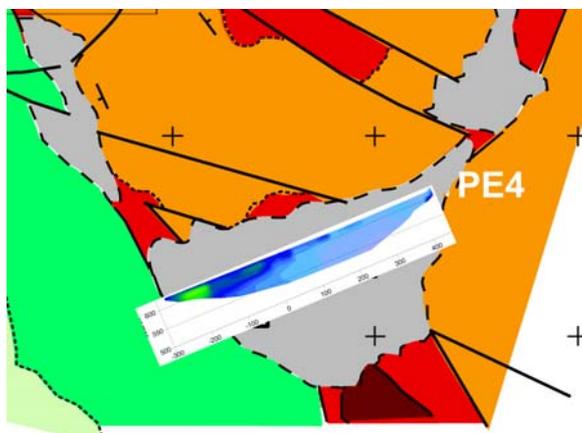


Fig. 9.32 Sección geoelectrica PE4 sobre la cartografía geológica de superficie.

A la vista de la distribución de resistividad, los dos SRM efectuados en esta zona (E4 y E5) pueden ser interpretados según un modelo 1D. Ambos detectan la presencia de agua desde la superficie hasta unos 20 m de profundidad, lo que indica, al haberse registrado con antenas de 75 y 100 m de lado, que han localizado bien el fin del acuífero. Por otra parte, el tiempo transversal de decaimiento T_2^* es sólo de 50 ms, y el tiempo de decaimiento longitudinal T_1^* es de 200 ms. Aunque estos tiempos podrían haberse vistos reducidos por la influencia del mayor gradiente del campo geomagnético en esta zona, son muy inferiores a los medidos en el entorno de las lagunas, indicando que se trata de materiales detríticos; es decir, el agua está contenida en el Cuaternario. Esto permite asignar a materiales del Keuper la zona inferior de la sección de resistividad, lo que no contradice la primera deducción que puede hacerse a partir de la cartografía de superficie (Figura 9.32). El extremo occidental puede asignarse a rocas del Cretácico, que en este caso podrían estarían saturadas y ser el origen del aporte de agua al acuífero Cuaternario. La topografía de la zona (valle cerrado) y la presencia del Keuper podrían suponer que este acuífero no tiene conexión con el triásico.

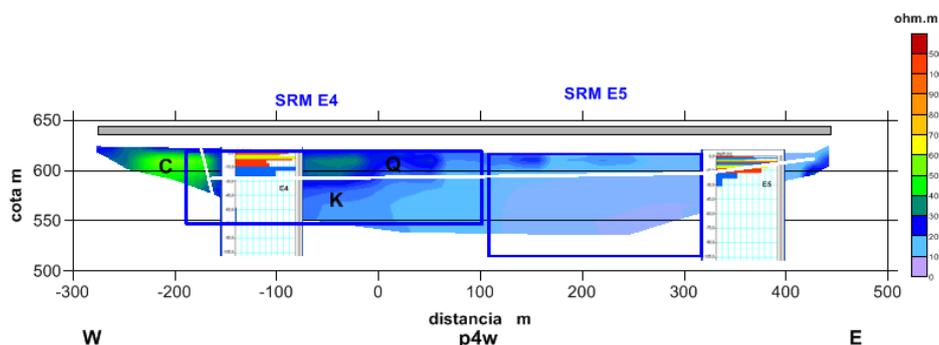


Fig. 9.33 Propuesta de interpretación del perfil PE4 en imagen de distribución de resistividad.

10 MODELO GEOLÓGICO A PARTIR DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTIVIDAD A VARIAS PROFUNDIDADES

Considerando el conjunto de los perfiles de resistividad se puede obtener una mejor visión de la geología del subsuelo en esta zona de Estaña. Las líneas generales del modelo geológico puede apreciarse en la Figura 10.1 para los perfiles trazados en sentido SO-NE. Comienzan en su extremo SO detectando las calizas del Cretácico (o del Paleoceno-Eoceno, en su caso), en contacto prácticamente vertical con el Keuper en el NE. Esta unidad se prolonga a lo largo de todos los perfiles, formando la base sobre la que reposa el Muschelkalk, presentando así una serie invertida. La potencia del Muschelkalk no sobrepasa el orden de los 50 m. El Keuper tiene dos facies diferentes, apareciendo la posiblemente más arcillosa en el borde sur occidental, y formando una estructura masiva menos arcillosa en la mitad del perfil PE1. Hacia el sur de la zona de las lagunas (PE 7) la disposición del Muschelkalk es más continua y potente.

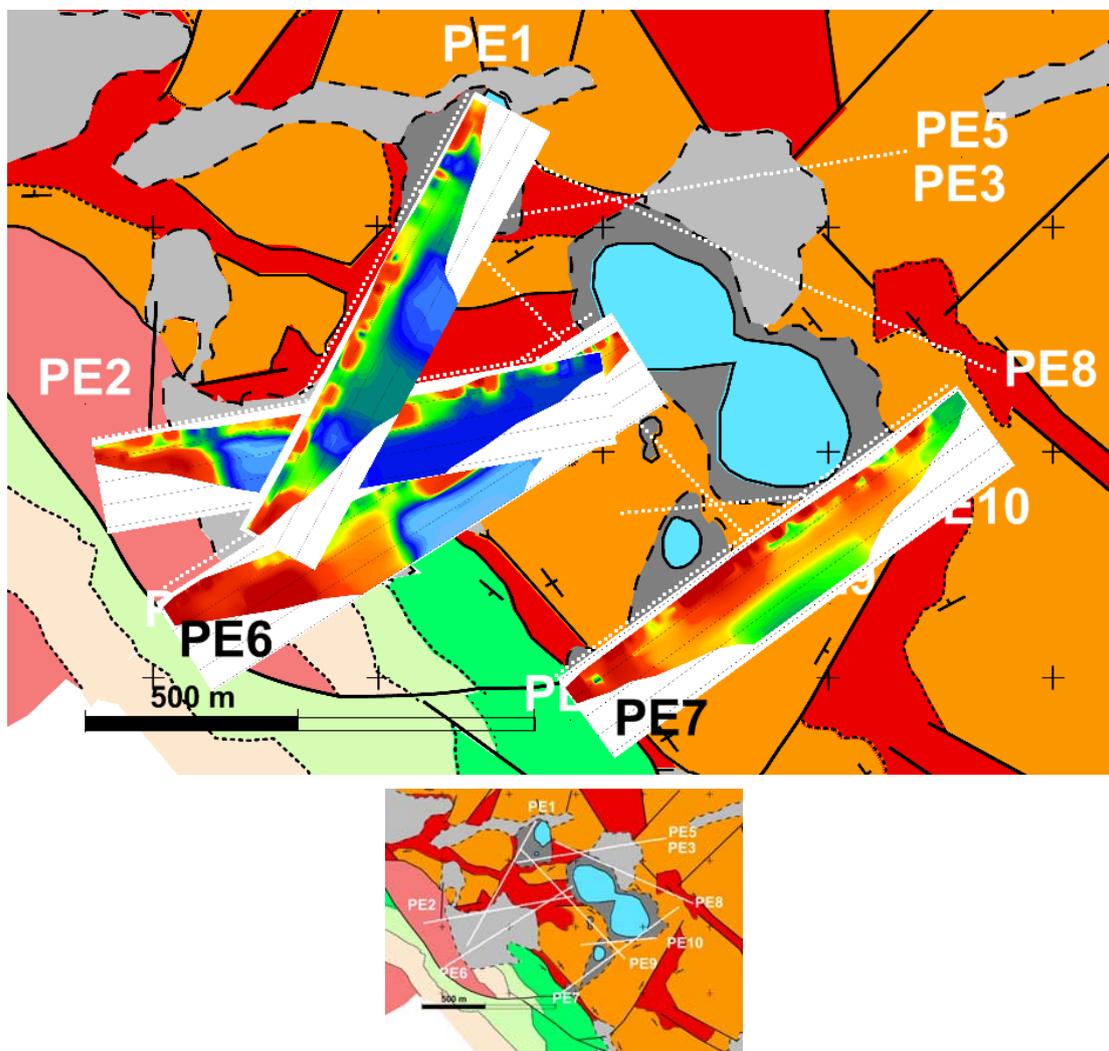


Fig. 10.1 Secciones geoelectricas de los perfiles transversales PE7, PE6, PE2 y PE1.

En la Figura 10.2 se muestran los perfiles apilados desde el Norte hacia el Sur, donde se pueden apreciar los detalles de cada uno de ellos.

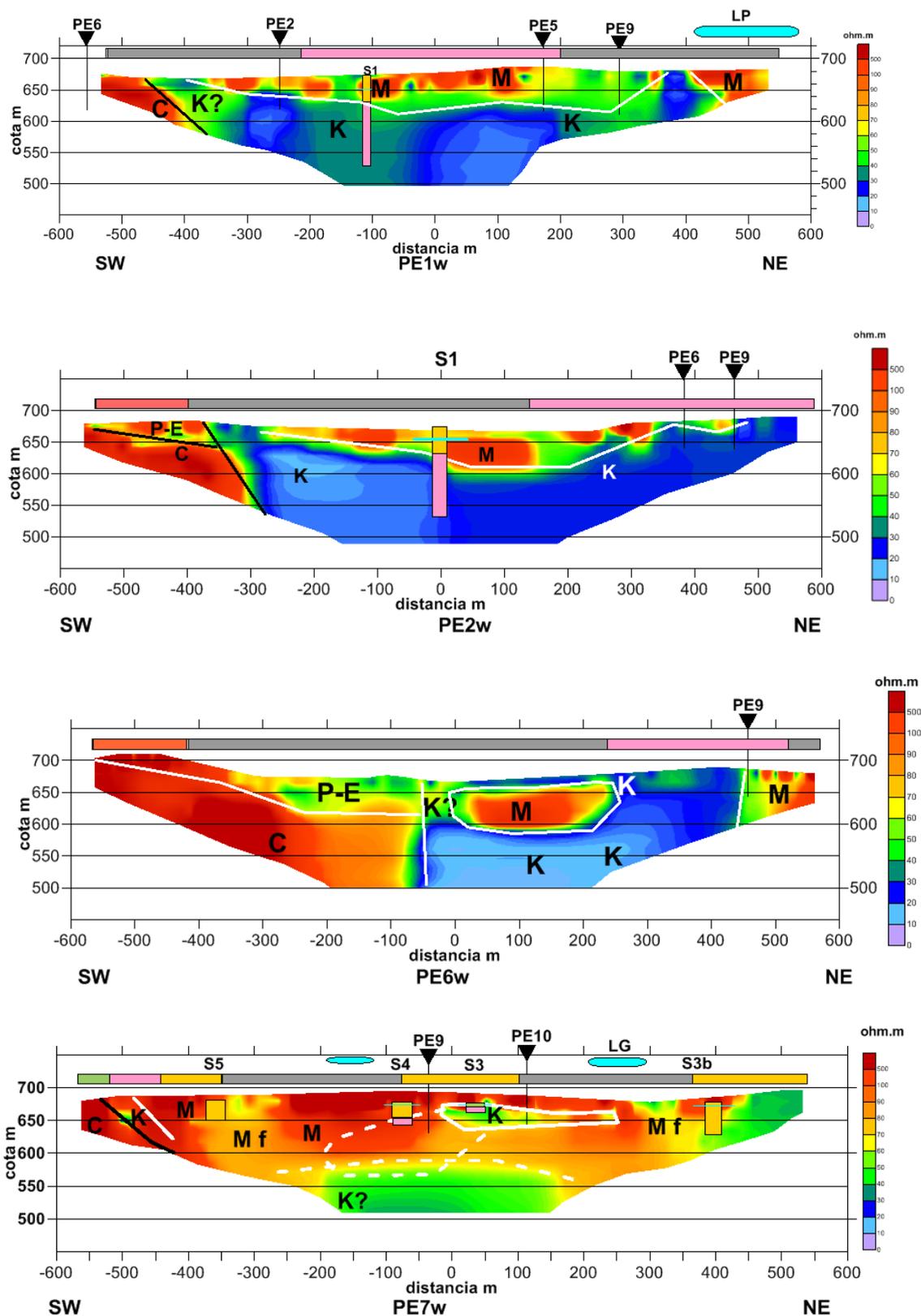


Fig. 10.2 Secciones geoelectricas interpretadas en términos litológicos. Perfiles PE7, PE6, PE2 y PE1. Se indica el cruce entre perfiles, posición de los contactos geológicos en superficie y columnas de sondeos mecánicos.

El Keuper aflora en el SO, manteniéndose con potencia pequeña bajo el Cuaternario en el PE6 y no pareciendo estar presente en el PE1. En cualquier caso, los materiales del Keuper permanecen por debajo del Muschelkalk, que no parece tener más de unos 75-100 m de potencia en el Sur (PE7 y PE6) que pasa a unos 50 m en el Norte (PE1). El Keuper puede presentar potencias superiores a los 150 m, y vuelve a aflorar en el extremo NE de los perfiles, esta vez infrayacente o en contacto casi vertical con el Muschelkalk (PE6 y PE1).

Los perfiles trazados bordeando las lagunas (PE9, PE8, PE5 y PE10) (Figuras 10.3 y 10.4) recogen esta misma situación, indicando que en más de la mitad occidental de los perfiles PE8 y PE5 aflora el Keuper al norte de la Laguna Grande, mostrando una gran potencia; el sector oriental de todos estos perfiles muestra la presencia de materiales del Muschelkalk también en toda la profundidad investigada.

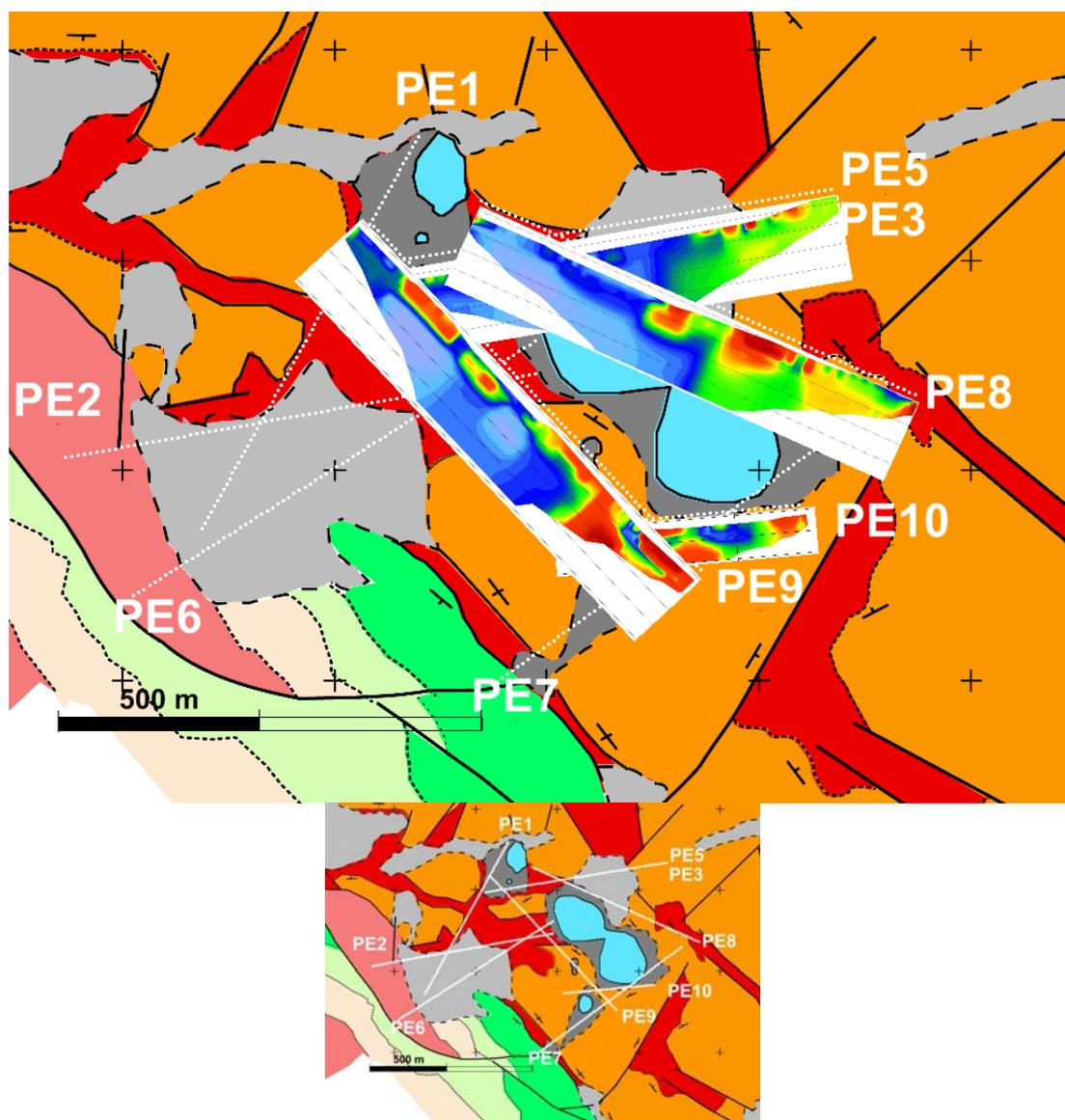


Fig. 10.3 Secciones geoelectricas de los perfiles que bordean las lagunas: PE9, PE8, PE5 y PE10

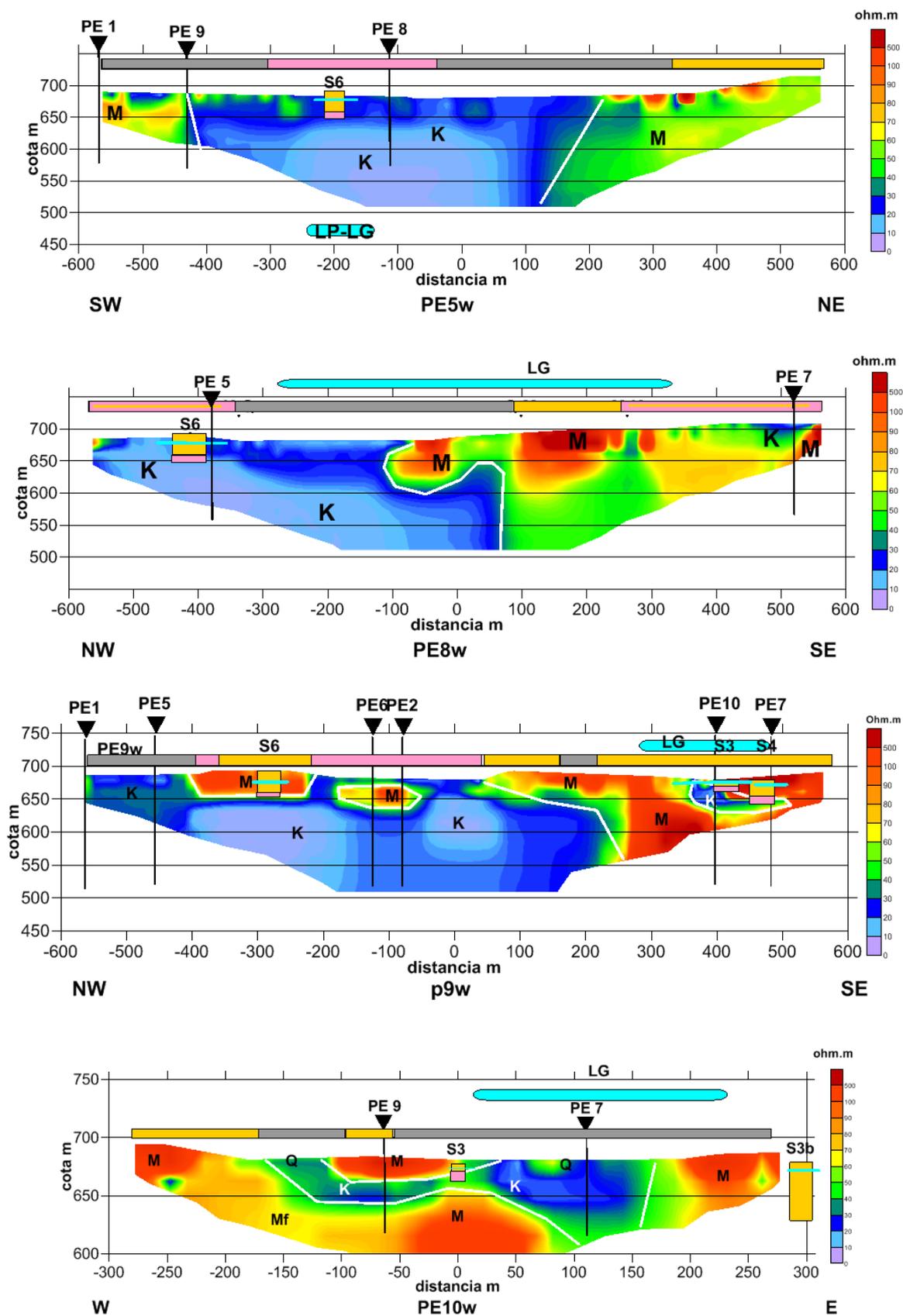


Fig. 10.4 Secciones geoelectricas interpretadas en términos litológicos. Perfiles PE9, PE8, PE5 y PE10. Se indica el cruce entre perfiles, posición de los contactos geológicos en superficie y columnas de sondeos mecánicos.

El perfil que pasa por el sur de las lagunas (PE9) indica la existencia Muschelkalk aflorante suprayacente a una gran potencia de Keuper, en contacto verticalizado con el Muschelkalk en el extremo SE, donde aparece de nuevo el Muschelkalk por debajo del Keuper, estructura que es ratificada por el corto perfil PE10. Por el norte, el PE8 y PE5 presentan la misma estructura; la información del sondeo mecánico S6 proyectada sobre estos perfiles evidencia el contacto entre Muschelkalk y Keuper entre la Laguna Grande y Pequeña, pasando los perfiles por el Keuper.

En la Figura 10.5 se presentan otras combinaciones de los perfiles, que permiten, junto con las anteriores, comprender, o al menos visualizar, la evolución espacial de las estructuras.

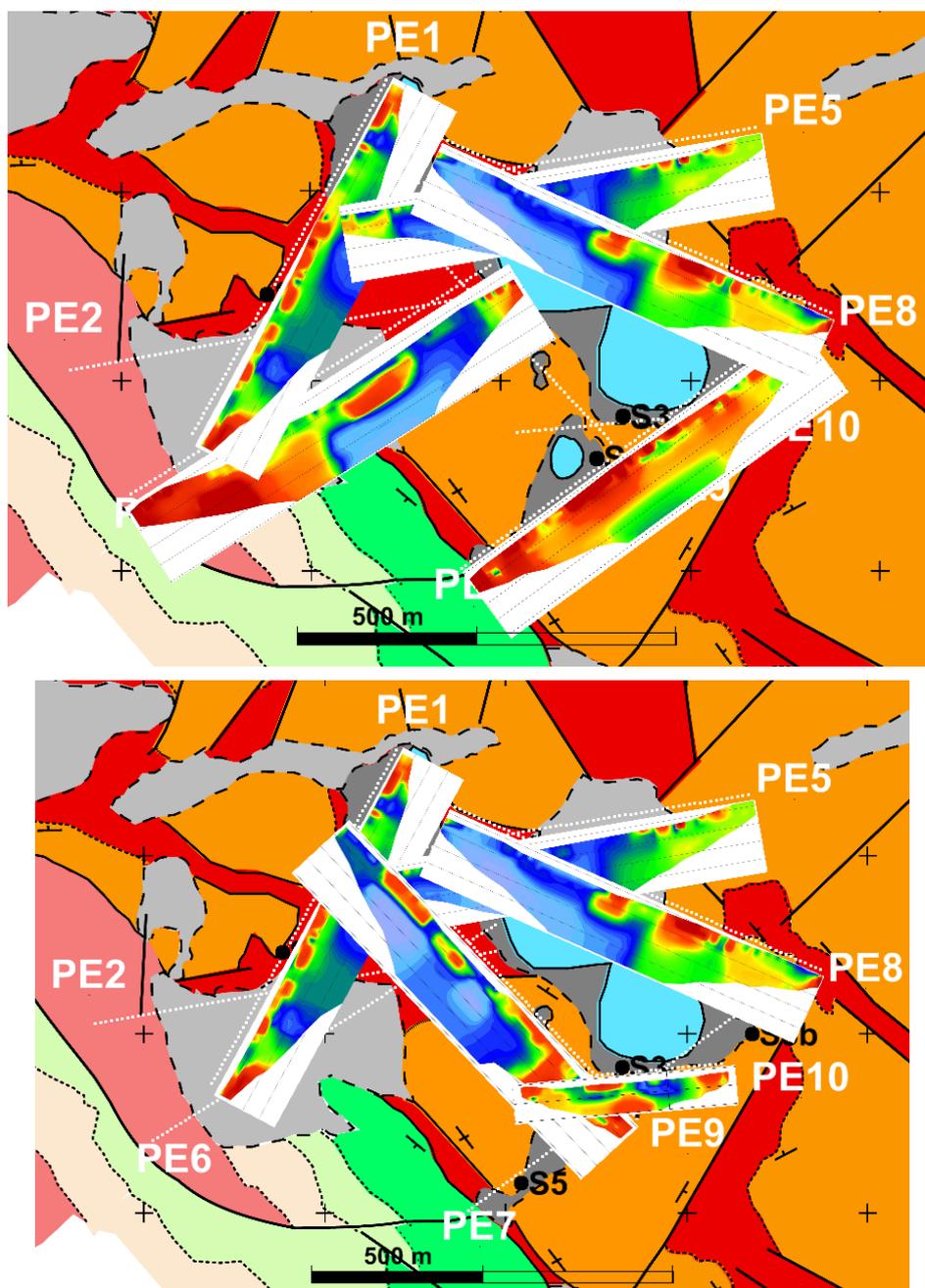


Fig. 10.5 Distintas presentaciones de las secciones geoelectricas de los perfiles sobre la cartografía geológica.

De este análisis e interpretación de las secciones se deduce que la distribución de la resistividad no está excesivamente apartada de un modelo 2D para la mayoría de los lugares medidos, lo que permite realizar una interpolación de la resistividad entre perfiles, habiéndose trazado mapas de distribución de la resistividad a diferentes profundidades. Aunque siempre se tendrá alguna incertidumbre de la representatividad de dicha interpolación, los mapas permiten comparar los valores de resistividad con otros datos que no están medidos exactamente sobre los perfiles eléctricos, como mejor método que proyectar su posición sobre las secciones de resistividad. Así se ha hecho para los SRM (Capítulo 11) y para los sondeos mecánicos (Capítulo 7). Estos mapas permiten además comprender mejor la evolución tridimensional de la geología de la zona.

La lectura de los mapas que se presentan en las Figuras 10.6 a 10.15 puede hacerse con el mismo criterio utilizado anteriormente de asignación de los valores de resistividad a la litología a través de la paleta de colores:

- Los colores azules y verdes corresponden a materiales del Keuper, siendo los azules de mayor contenido en arcillas, y por lo tanto, más impermeables.
- Los colores rojos corresponden a materiales del Muschelkalk; cuanto más pálido sea el color, hasta el amarillo, mayor contenido en agua pueden tener estas rocas.
- La gama de colores de transición entre uno y otro extremo de colores puede ser consecuencia de la imposibilidad de crear límites completamente rígidos en la inversión numérica de las mediciones, pero también pueden deberse a una transición real en el contenido en agua o arcilla.

El sistema de representación elegido para estos mapas es el de imágenes. En el ANEXO IV se reproducen los mapas en isolíneas con color lleno, superpuestos a la cartografía geológica de superficie. En este tipo de trazado es más visible la influencia lateral según la orientación de los perfiles.

En la superficie del terreno, a 0 m de profundidad (Figura 10.6), la interpolación de los valores de resistividad muestra una situación de las lagunas sobre terrenos resistivos tipo Muschelkalk. El Keuper o terrenos conductores aparece en dos zonas (dentro del área que estamos comentando): Norte: entre las Laguna Pequeña y la Grande, con extensión hacia el Noreste a valores de muy baja resistividad, y en una franja al Sur: desde la Laguna Grande hacia el Cretácico, con dirección NE-SO. En el extremo oriental del PE8 también se identifica la presencia de Keuper en una zona que denominaremos Este. Todos los sondeos mecánicos se sitúan sobre terrenos resistivos, como corresponde al Muschelkalk, excepto en el S1 donde la resistividad superficial es menor, quizá debido a la presencia de algunas arcillas, como indica su testificación GN. El S6 está en el límite del cambio de resistividad.

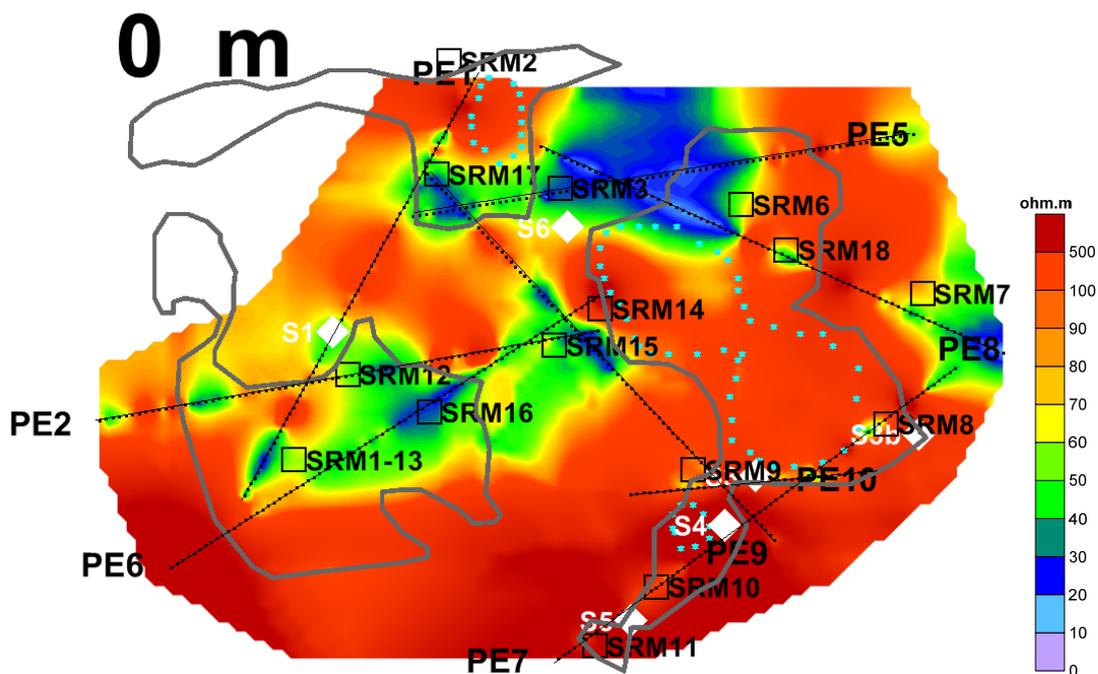


Fig. 10.6 Distribución de la resistividad en la superficie del terreno. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules y el Cuaternario por línea gris. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

A 6 m de profundidad (Figura 10.7) las zona conductoras Norte y Sur se conectan entre si, modificando algo sus límites de tal forma que parte del seno superior de la Laguna Grande queda en terrenos conductores. Todos los sondeos mecánicos permanecen en zona resistiva a esta profundidad, cortando Muschelkalk, excepto el S6, que se sitúa claramente en terrenos conductores, denotando que ya está cortando terrenos con agua. La zona conductora del Este disminuye su extensión.

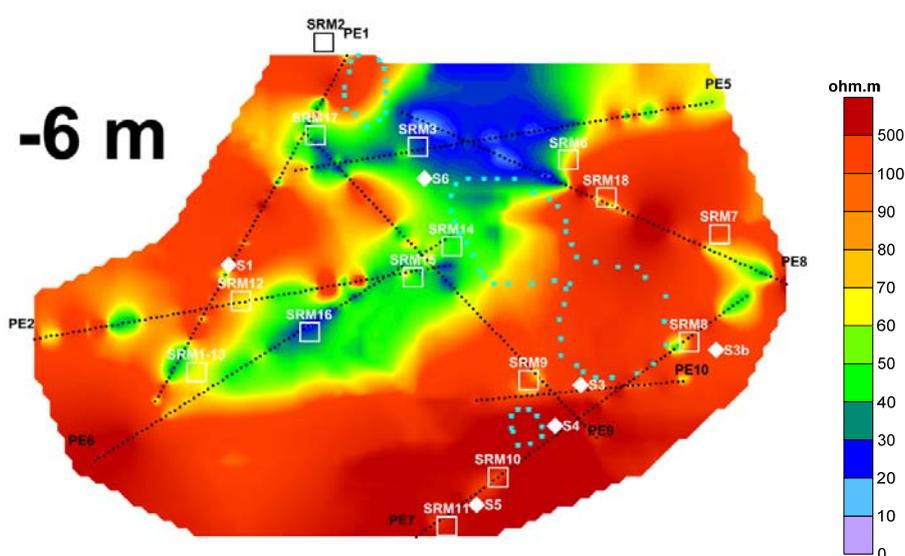


Fig. 10.7 Distribución de la resistividad a 6 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

A los 14 m de profundidad (Figura 10.8) la distribución de la resistividad es prácticamente análoga a la anterior, si bien parecen volver a separarse las denominadas zonas Norte y Sur (aunque el seno superior de la Laguna Grande está ahora completamente en terrenos conductores, posiblemente Muschelkalk saturado), crece la extensión hacia el este de la zona Norte de muy baja resistividad y aparece una nueva zona conductora en el S3, que efectivamente corta el Keuper a esta profundidad. El sondeo S6 permanece en zona conductora (Keuper), estando el resto de los sondeos en resistivo, cortando Muschelkalk.

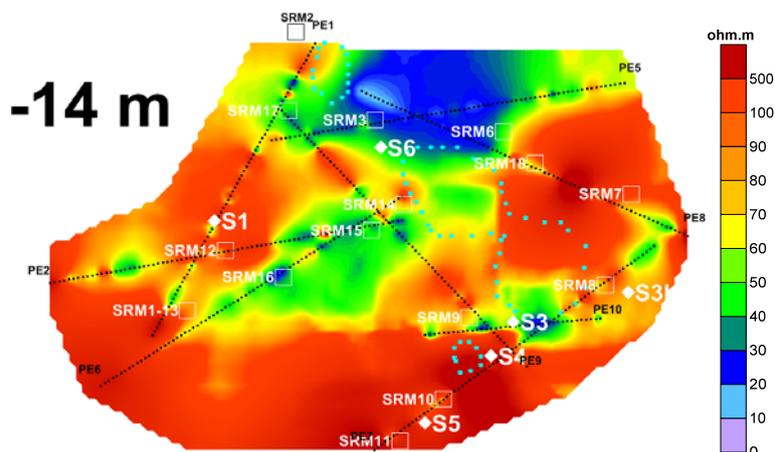


Fig. 10.8 Distribución de la resistividad a 14 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

A los 22 m de profundidad (Figura 10.9) toda la parte norte ya es conductora y conectada con la zona Sur, que se ha desplazado hacia el Este. La Laguna Pequeña pasa a estar en terrenos conductores. Aumenta la extensión de la zona conductora del S3, así como reaparece la mencionada zona Este y una nueva zona en el inicio del PE2, en el Oeste. Los sondeos S6 y S3 siguen estando en zona conductora (Keuper), y en el S3b disminuye la resistividad, en correspondencia con un aumento de la radiación GN que se inicia a esa profundidad. El resto de los sondeos permanecen en zona resistiva (Muschelkalk).

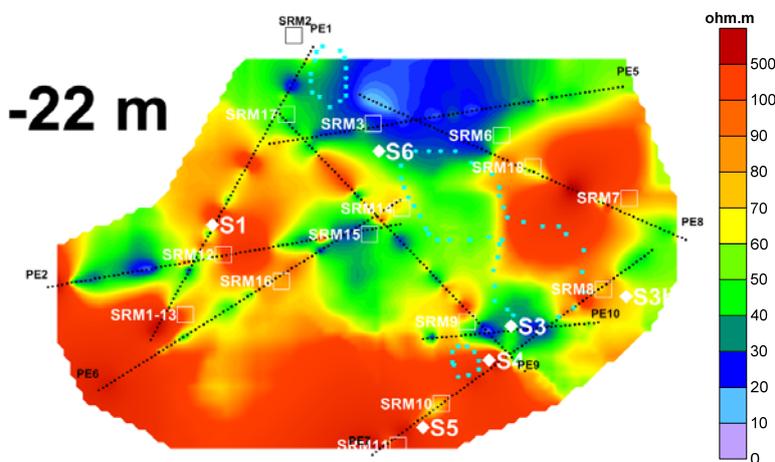


Fig. 10.9 Distribución de la resistividad a 22 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

A los 30 m de profundidad (Figura 10.10) la zona cubierta por terrenos conductores (Keuper y/o Muschelkalk saturado) aumenta, conectándose todas las anteriormente mencionadas y disminuyendo sensiblemente el valor de la resistividad. Esta expansión continúa progresivamente (Figura 10.11 para 40, 50 y 60 m de profundidad), de tal forma que a 50 m de profundidad los sondeos S6 y S1 (que ya han cortado el Keuper) están en terrenos muy conductores, mientras que el resto está en resistivos, a pesar de que el S4 también tiene Keuper.

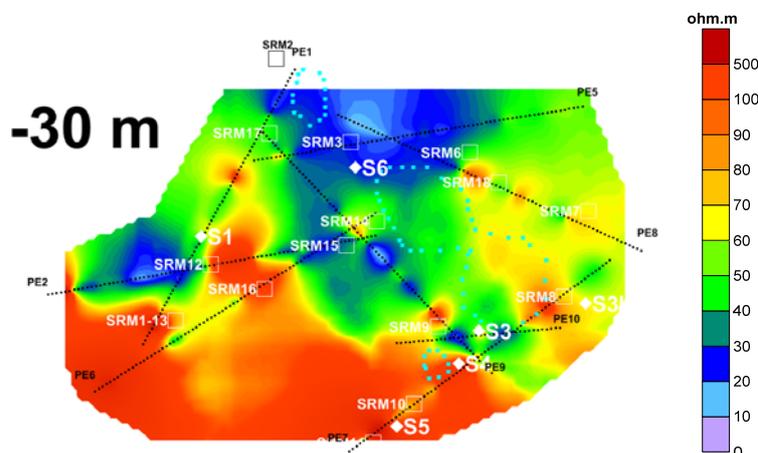


Fig. 10.10 Distribución de la resistividad a 30 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

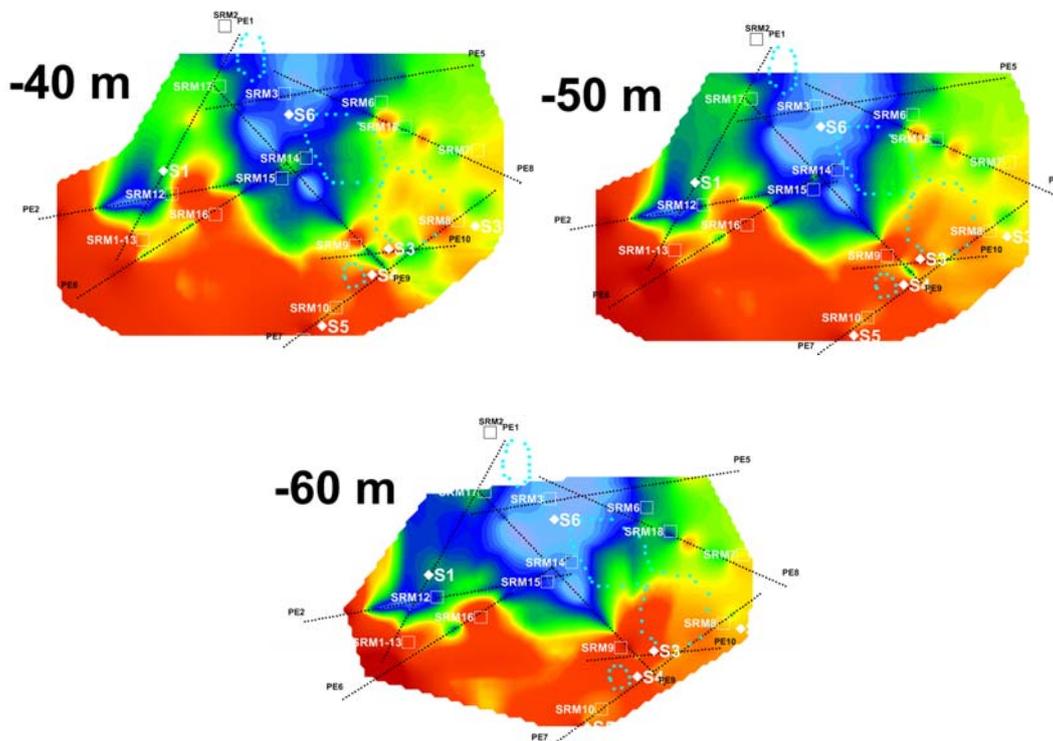


Fig. 10.11 Distribución de la resistividad a 40 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

Los límites entre zona resistiva y conductora varían poco hasta los 75 m de profundidad (Figura 10.12), permaneciendo el seno sur de la Laguna Grande en zona resistiva; a partir de los 90 m de profundidad (Figura 10.12) comienzan a aparecer terrenos de menor resistividad hacia el Sur (Figura 10.13 para las profundidades 100, 122 y 140 m), completamente conectados con los anteriores y de muy baja resistividad a partir de los 100 m de profundidad, hasta el final de la información a los 160 m (Figura 10.14), si bien al disminuir el área cartografiada (Figura 10.15) no puede verificarse si también evolucionan en el resto de la superficie investigada. Esta disminución de la resistividad puede interpretarse como debida a la existencia de un basamento muy arcilloso, impermeable, que supondría el límite inferior de acuífero, en caso de que el Keuper yesífero hubiera constituido una zona karstificada en algún momento. En cualquier caso, el basamento impermeable lo constituyen los materiales con resistividad inferior a 30 ohm.m.

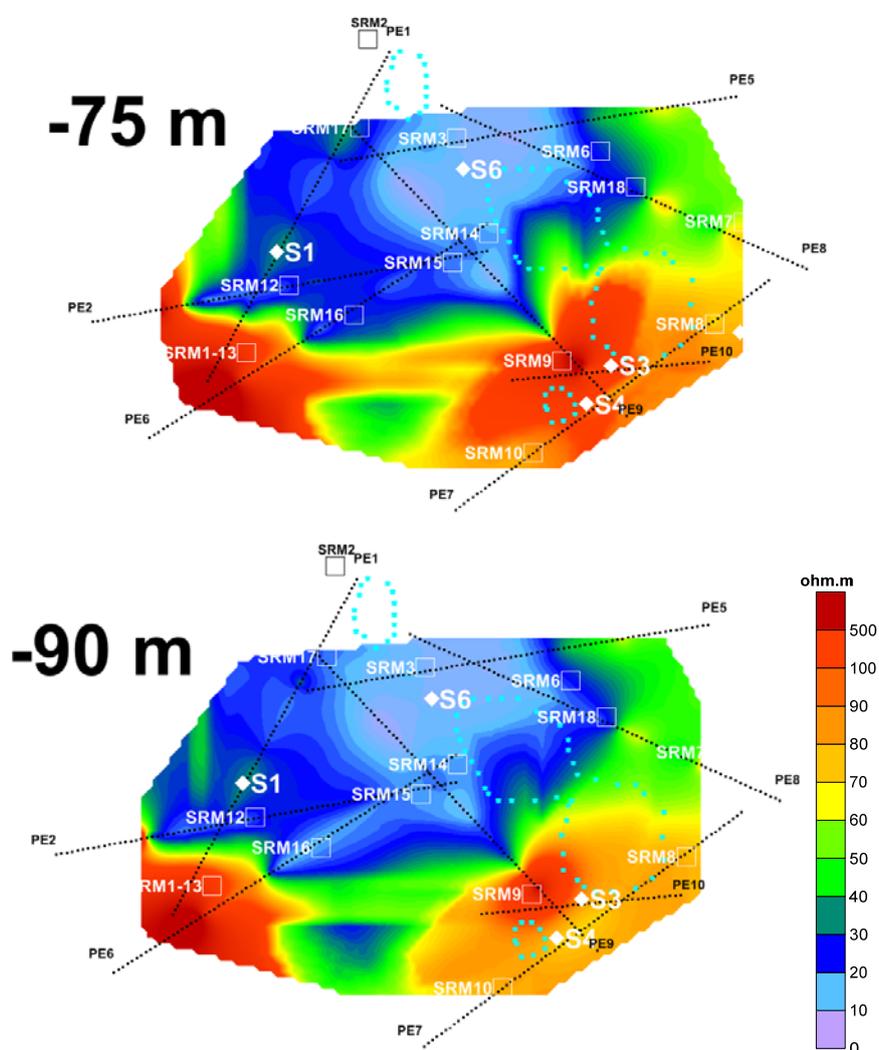


Fig. 10.12 Distribución de la resistividad a 90 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

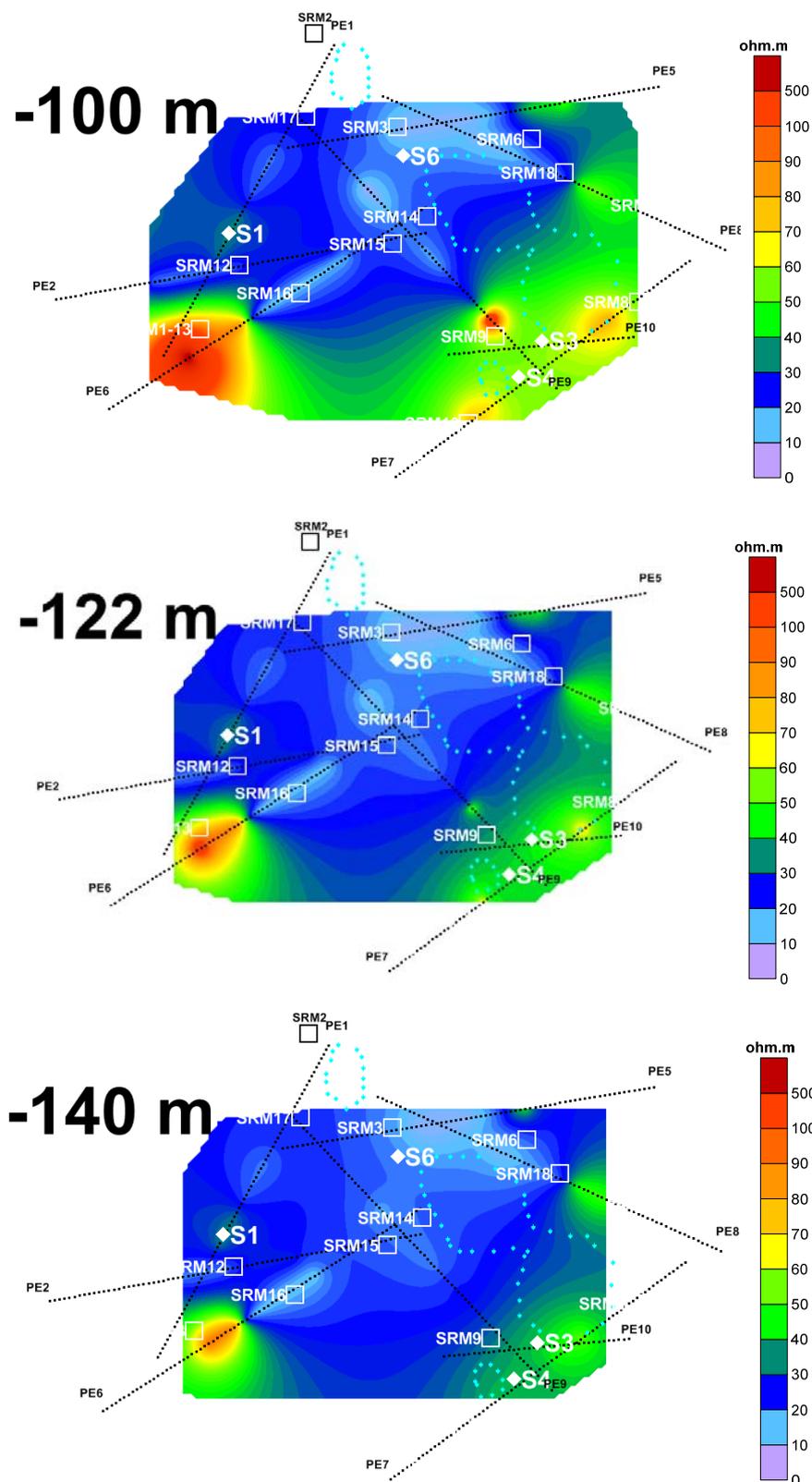


Fig. 10.13 Distribución de la resistividad a 140 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

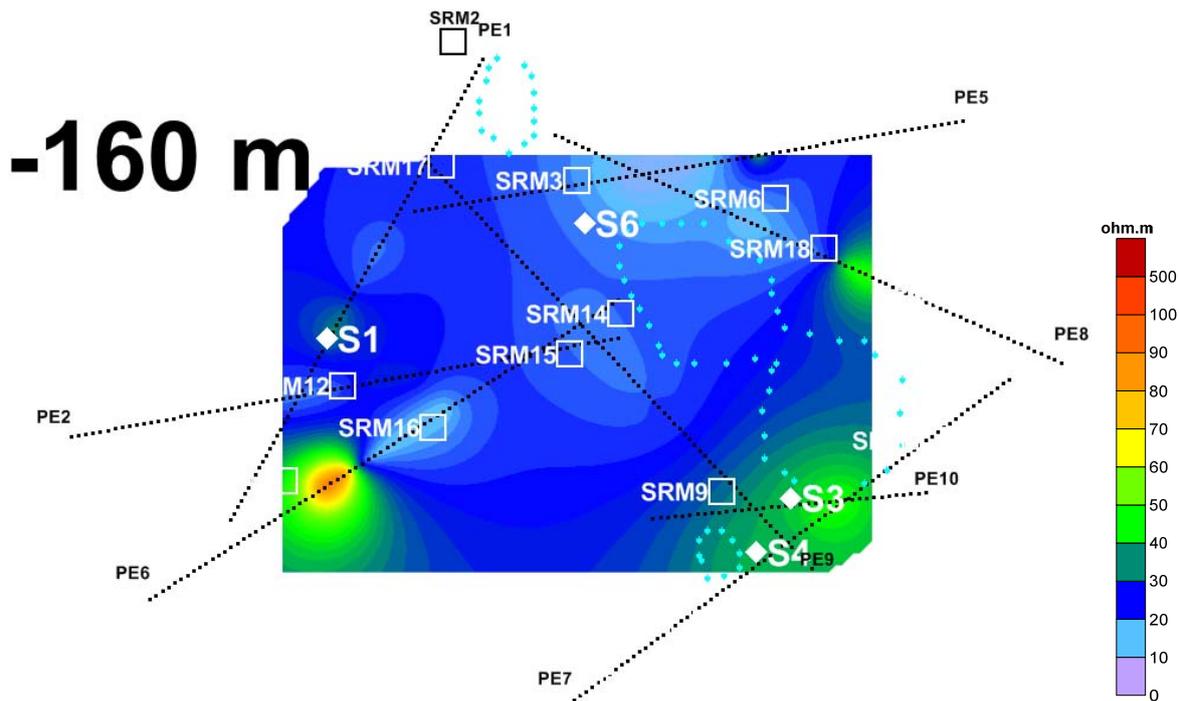


Fig. 10.14 Distribución de la resistividad a 160 m de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

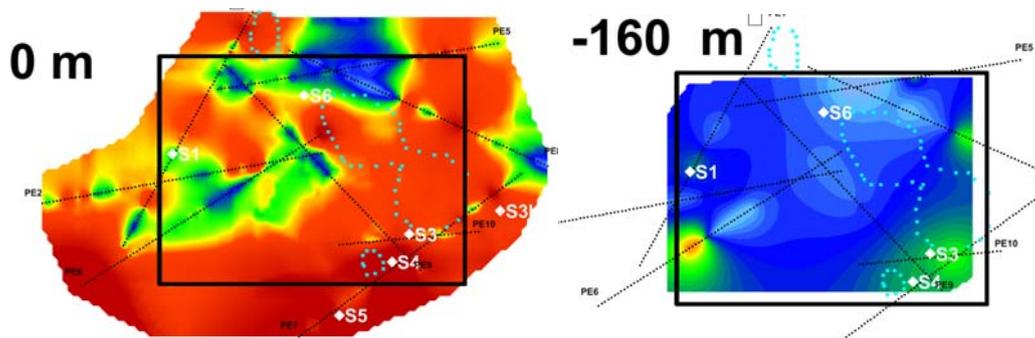


Fig. 10.15 Comparación del área cartografiada en la superficie del terreno y a 160 m de profundidad, como consecuencia de la variación de cobertura de los perfiles eléctricos con la profundidad.

11 SITUACIÓN GEOLÓGICA DEL VOLUMEN INVESTIGADO POR LOS SRM SEGÚN LA RESISTIVIDAD

En el capítulo anterior se ha mostrado la evolución de las estructuras geológicas con la profundidad mediante la correlación entre la litología y la resistividad. Se pretende ahora volver a analizar la situación hidrogeológica presentada en el “Informe de las actividades geofísicas efectuadas en 2008 en las lagunas de Estaña (Huesca)” (nº SID IGME 63764) a la luz de la nueva información de resistividad y de sondeos mecánicos. En el apartado 5 del mencionado Informe de 2008 se indica que la inversión o interpretación de las mediciones de un SRM consiste en convertir los valores de máxima amplitud inicial de la señal y de su tiempo de decaimiento en función del momento de emisión $[E_0(q)$ y $T(q)]$ en la distribución en función de la profundidad z del tanto por ciento de agua libre $w(z)$ (porosidad eficaz), de $T_2^*(z)$ (indicador litológico del tamaño medio de los poros o fracturación en rocas compactas, relacionado con la permeabilidad) y de $T_1(z)$ (indicador de la permeabilidad, menos afectado que T_2 por la heterogeneidad del campo magnético terrestre).

En un proceso de inversión estándar el terreno queda automáticamente dividido en tantas capas horizontales (modelo 1D), de extensión muy grande respecto del tamaño de la antena, como pulsos de emisión q se hayan utilizado en el SRM, hasta una profundidad máxima igual a las dimensiones de la antena empleada (lado del cuadrado). La potencia de cada capa es creciente con la profundidad y depende de la antena utilizada. En la Figura 18 del Informe 63764, reproducida en la Figura 11.1 (modificada de la antigua 18) se indica esta distribución para las antenas de 50 m y 150 m, para 16 pulsos de emisión.

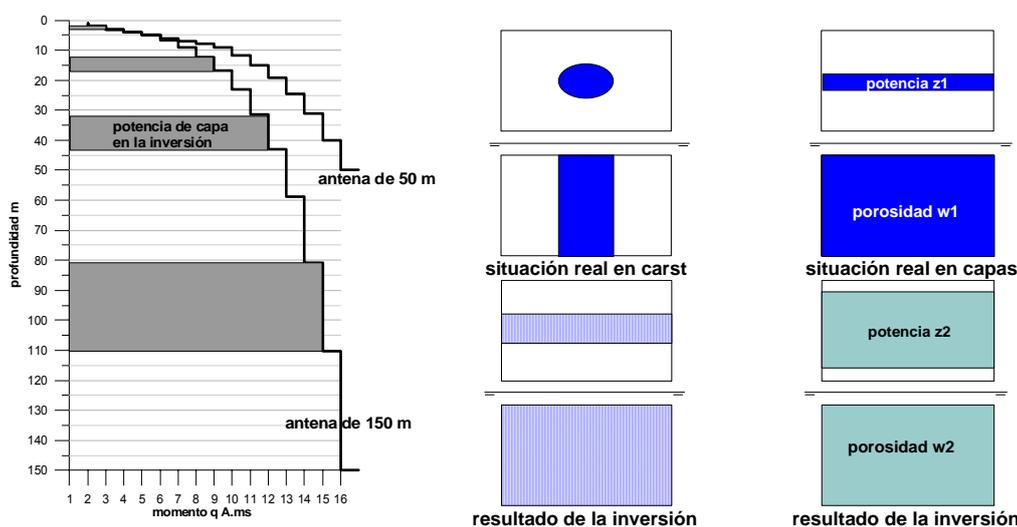


Fig. 11.1 (modificada) Izquierda: Resolución (potencia de las capas) obtenida en la inversión de un SRM en función del número de pulsos de emisión q y de las dimensiones de la antena. Centro: solución dada en la inversión de modelos 1D para la distribución del agua en caso de acuíferos cársticos. Derecha: equivalencia de soluciones y resultado de la resolución.

Al analizar los resultados de la inversión de un SRM hay que tener, por lo tanto, en cuenta que la resolución es decreciente con el aumento de la profundidad, y que el contenido en agua para las

capas más profundas puede encontrarse realmente condensado en sólo una parte del tramo obtenido como resultado de la inversión. Por el principio de equivalencia, el producto de la potencia de capa por su porosidad permanece constante ($w_1 z_1 = w_2 z_2$). Por otra parte, en el caso de acuíferos de porosidad secundaria (fracturación) y de acuíferos cársticos con cavidades, hay que considerar que la amplitud de la señal puede estar disminuida por la especial geometría de su concentración en el subsuelo, y los resultados de inversión en estos casos hay que considerarlos con precaución, ya que la distribución real no es la del modelo de inversión de capas horizontales saturadas, como se indica en el esquema del lado derecho de la Figura 11.1.

En un SRM la misma cantidad de agua y a la misma profundidad da lugar a un valor de la amplitud máxima inicial de la señal E_0 mayor cuanto mayores sean las dimensiones de la antena utilizada; sin embargo la morfología de las curvas $E_0(q)$, que expresan su variación con el momento de emisión q (profundidad de exploración), sólo depende de las condiciones hidrogeológicas del lugar de medición, conteniendo información de la profundidad y potencia de los acuíferos (ver Capítulo 2, Figura 17). No obstante, en caso de que el modelo hidrogeológico no sea de capas horizontales (modelo 1D), las mediciones $e(t)$, y en consecuencia la morfología de las curvas $E_0(q)$ puede quedar muy modificada según sean las dimensiones y posición del acuífero respecto de las de la antena, y por lo tanto ya no está garantizado que puedan interpretarse ni cualitativa ni cuantitativamente para establecer la geometría del acuífero. En función de los modelos geológicos deducidos en el Capítulo 9, las condiciones de la zona estudiada no parece que se aparten mucho, en general, de un modelo de capas horizontales (al menos, consideradas a la escala de las mediciones SRM), salvo en las situaciones en las que la antena se ha dispuesto sobre contactos casi verticalizados y sólo parte del volumen investigado está ocupado por el acuífero. La consideración de la situación geológica de cada SRM permitirá la verificación de la validez de la hipótesis utilizada en la inversión de los datos.

Por otra parte, el parámetro T_2^* se obtiene directamente de la curva $e(t)$ medida en campo con un valor cada 2 ms durante 240 ms, y por lo tanto ajustando una función a 120 observaciones, mientras que el valor de T_1^* es fruto del ajuste de una función a dos observaciones (máxima amplitud inicial E_0 de los dos pulsos emitidos), por lo que puede quedar mal determinado; el mejor criterio para decidir sobre su validez es que, por razones físicas del fenómeno de resonancia magnética, T_1^* tiene que ser mayor que T_2^* , lo que se ha observado que no se cumple en la mayoría de los sondeos efectuados.

A partir de las mediciones de campo de un SRM, es posible obtener estimaciones de algunos parámetros hidrodinámicos, y en particular de la permeabilidad k . La estimación de estos parámetros, precisa calibrar las medidas SRM con los resultados de un ensayo de bombeo efectuado en el mismo lugar que el SRM, para calcular un coeficiente C_p con el que puede obtenerse la permeabilidad mediante la expresión $k = C_p T_1^2 w$ o $k = C_p T_2^2 w$. Esta calibración está fuera del objetivo del presente estudio.

El análisis que se presenta ahora pretende, además de relacionar los valores de resistividad medidos en las secciones geoelectricas con la información de los Sondeos de Resonancia Magnética, verificar la validez del resultado de su inversión $w(z)$, $T_1^*(z)$ y $T_2^*(z)$ (distribución del contenido en agua con la profundidad y información sobre la permeabilidad) utilizando un algoritmo 1D. Para ello, se ha identificado sobre las secciones de resistividad el volumen investigado por los SRM. Además se han posicionado los SRM sobre los mapas de resistividad utilizando las coordenadas del centro de la antena, y para cada profundidad se ha evaluado el valor de resistividad representativo del área cubierta por la antena del SRM: se trata por lo tanto de valores discretos a las mismas profundidades para las que se han obtenido los mapas de resistividad. Esta técnica puede aportar algunas mejoras respecto de la proyección del SRM sobre la sección de resistividad. Para interpretar estos “pseudo-logs” de resistividad hay que tener siempre presente el diferente volumen del subsuelo involucrado en las mediciones SRM y PE, y que ambos métodos tienen la característica de proporcionar menos resolución con el aumento de la profundidad. Los mapas de resistividad a diferentes profundidades con indicación de la posición de los SRM codificados según su clasificación por la curva $E_0(q)$ y $w(z)$ se presentan en el ANEXO IV, teniendo en cuenta de esta forma la evolución simultánea de la relación entre la resistividad y los parámetros de los SRM.

En la Figura 11.2 y sus equivalentes en este Capítulo para el resto de los SRM se reproducen los valores de $E_0(q)$ para los dos pulsos emitidos (FID1 y FID2), el resultado de sus respectivas inversiones (FID1inv y FID2mod), el ruido $\rho(q)$, así como las funciones $T_1^*(q)$ y $T_2^*(q)$.

En la Figura 11.4, y sus equivalentes en este Capítulo para el resto de los SRM, se presenta el resultado de la inversión: valores de contenido en agua en % $w(z)$ y del parámetro $T_1^*(z)$ en función de la profundidad (codificado en color sobre el histograma $w(z)$) y el valor de la constante de tiempo $T_2^*(z)$. Se indica además la distribución de la resistividad interpolada en los mapas de resistividad al punto central de la antena del SRM, acompañado de un esquema de las litologías involucradas en el volumen de medición del SRM, de acuerdo con la interpretación efectuada de las secciones geoelectricas. Debido a la diferencia a veces importante entre la situación en el centro de la antena y la heterogeneidad de materiales dentro del volumen investigado, la resistividad en el centro de la antena no representa todas las litologías encontradas, cuya distribución con la profundidad puede observarse en los mapas de resistividad a diferentes profundidades.

Para el seguimiento detallado de este análisis y de su descripción es necesario observar las figuras correspondientes, lo que no siempre es posible con la escala a la que están presentadas, debiendo hacerlo en la versión digital de este Informe. A fin de no saturar de referencias el texto, se han eliminado las llamadas explícitas a las Figuras.

El **SRM E1** (medido también con el nombre E13) tiene una antena de 75 m extendida sobre el Cuaternario (Figura 11.2), suprayacente al Paleoceno-Eoceno y Cretácico, y en menor medida a materiales del Muschelkalk y del Keuper. El volumen medido por este SRM puede proyectarse tanto sobre el perfil eléctrico PE1 (posición -533 a -278) como sobre el PE6 (posición -338 a -83); en la Figura 11.3 se reproduce el fragmento de sección geoelectrónica que puede considerarse que es el investigado por el SRM (su resultado es la integración de toda esa parte del subsuelo). Según estos perfiles, en el área de influencia de este SRM se encuentran terrenos del Paleoceno-Eoceno, Cretácico y del Keuper en toda su profundidad, con una mínima presencia de rocas del Muschelkalk y del Cuaternario en la zona más superficial (Figura 11.3).

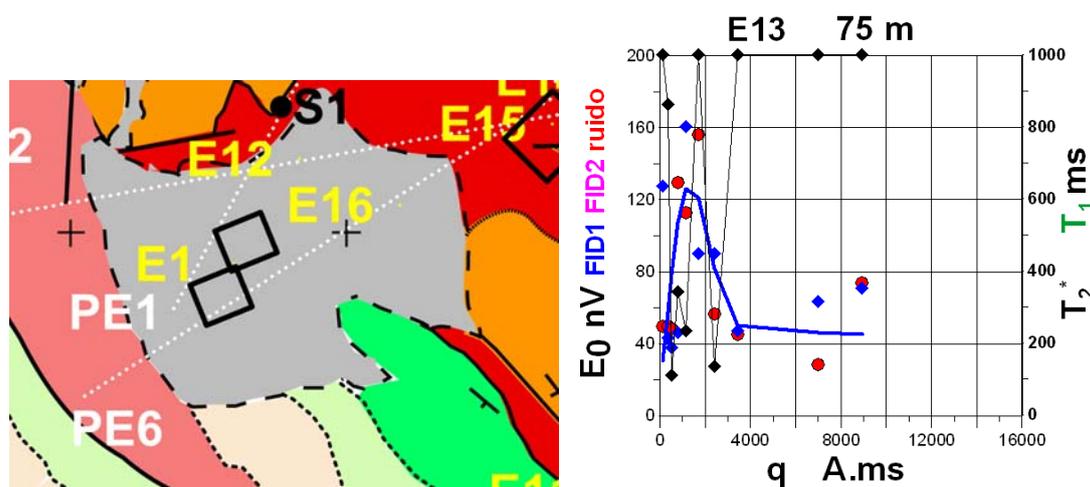


Fig. 11.2 Situación de la antena del SRM E1 (E13) y curva $E_0(q)$ y $T_2^*(q)$.

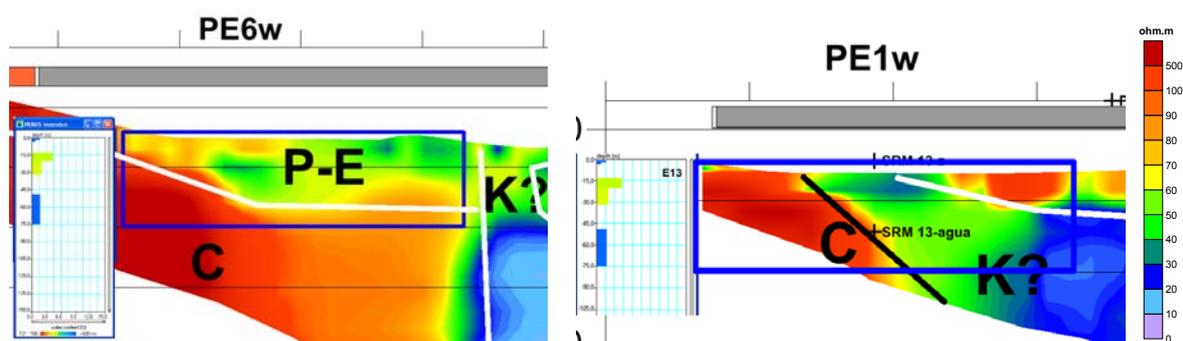


Fig. 11.3 Fragmento de los perfiles PE6 y PE1, con indicación (recuadro azul) del volumen involucrado en la medición del SRM E1-E13

La resistividad media interpolada a la posición del SRM según los mapas del ANEXO III es de 50-60 ohm.m en superficie, manteniéndose en 60-70 ohm.m hasta los 50 m de profundidad, donde alcanza ya más de 90-100 ohm.m (Figura 11.4). Estos valores, así como la situación obtenida por proyección sobre las secciones permiten interpretar que los primeros 40-50 m están representando mediciones que afectan principalmente al Keuper y materiales del Paleoceno-Eoceno, y posteriormente a calizas

del Cretácico. En cualquier caso, este SRM es de poca fiabilidad por la baja relación señal/ruido, y la única conclusión que puede obtenerse es que no detecta prácticamente la presencia de agua en el volumen investigado, sin que sea válida su inversión.

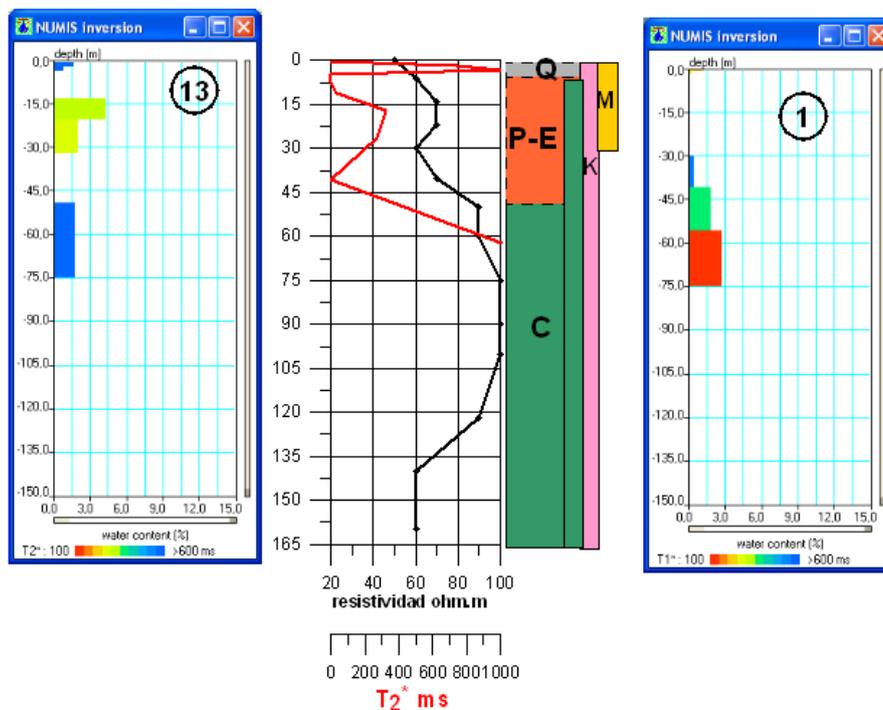


Fig. 11.4 Izquierda: Resultado del SRM E1 (distribución $w(z)$ y $T_2^+(z)$ (no se midió T_1^+)). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^+ . Derecha: estimación de las litologías más probables involucradas en el volumen medido. P-E: Paleoceno-Eoceno; C: Cretácico; Q: Cuaternario; K: Keuper; M: Muschelkalk. Se incluye la inversión del SRM E1, realizado en el mismo emplazamiento. Los resultados de la inversión no son fiables.

El **SRM E2** está situado al norte de la Laguna Pequeña, con una antena de 75 m sobre el Muschelkalk (Figura 11.5). Según la interpretación del perfil PE1 (Figura 11.6), todo el volumen investigado está formado por materiales del Muschelkalk.

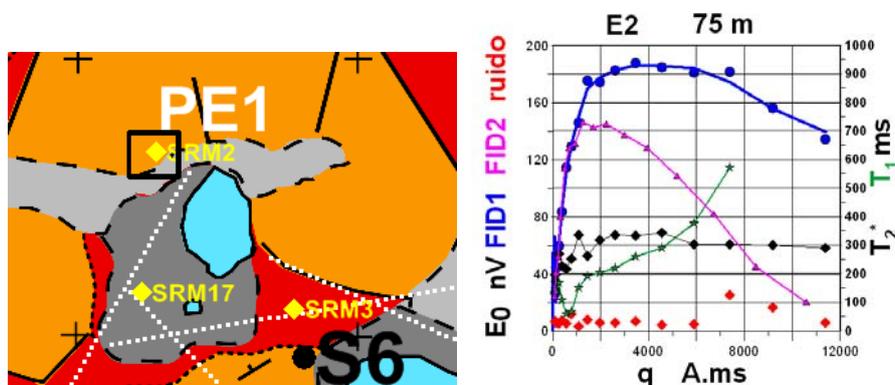


Fig. 11.5 Parte superior: Situación de la antena del SRM E2 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

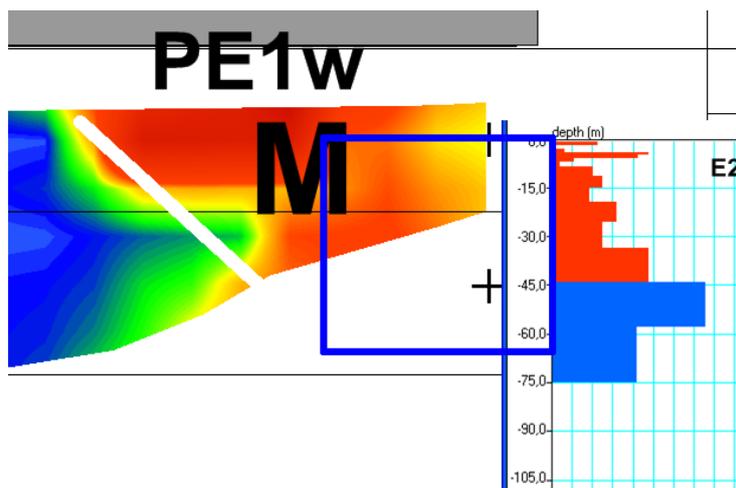


Fig. 11.6 Fragmento del perfil PE1, con indicación (recuadro azul) del volumen involucrado en la medición del SRM E2.

No se dispone prácticamente de valores de resistividad interpolados (Figura 11.7), por encontrarse este SRM en el límite de la zona cubierta por información geoelectrica. La inversión de este SRM puede considerarse fiable, determinando correctamente la geometría del acuífero, que presenta un aumento del contenido en agua con la profundidad. Aunque el valor del parámetro T_1^* no es aceptable para el primer tramo (por resultar menor que T_2^*), no puede descartarse que los primeros 45 m sean terrenos menos permeables, coincidentes con valores de resistividad superiores a 80-100 ohm.m en su proyección sobre el PE1 (posición 473 a 533), Figura 11.7; bajo esta profundidad la cantidad de agua aumenta, en terrenos de mayor permeabilidad, aunque T_2^* no presenta variación entre dichos tramos y se mantiene en 350 ms, valor característico de calizas fracturadas.

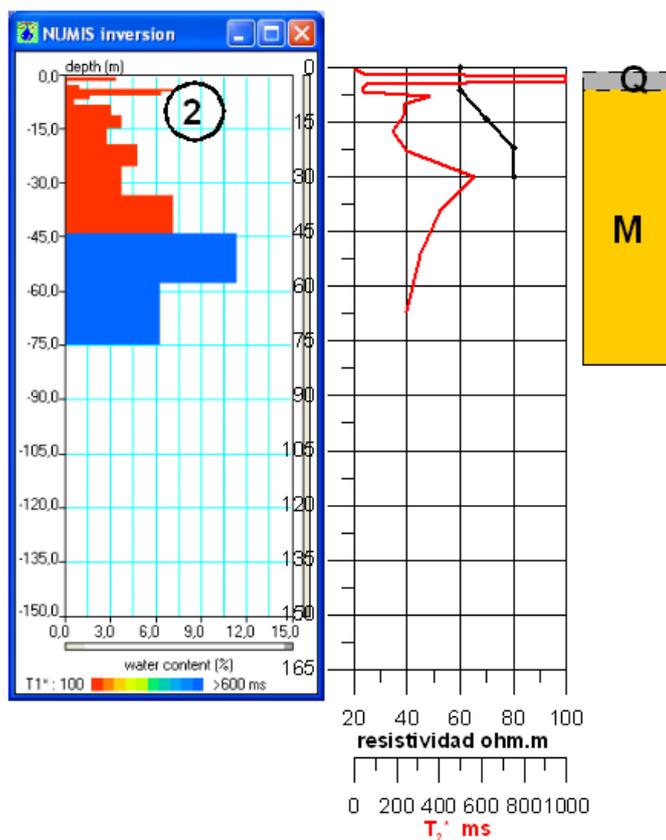


Fig. 11.7 Izquierda: Resultado del SRM E2 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable, excepto para los valores de $T_1^*(z)$.

El **SRM E3**, entre la Laguna Pequeña y la Grande, tiene una antena de 100 m, extendida sobre Keuper (Figura 11.8), aunque su área de influencia abarca terrenos del Muschelkalk, y detecta muy poca presencia de agua. Su volumen investigado proyectado sobre el PE5 (posición -382 a -127) y el PE8 (posición -560 a -412) (Figura 11.9), indica que está formado íntegramente por materiales del Keuper, aunque la inclusión lateral del Muschelkalk es evidente, como muestra el sondeo mecánico S6, a unas distancias de las secciones PE5 y PE8 de 75 y 125 m respectivamente, siendo estas calizas las responsables de la escasa cantidad de agua detectada, que da a la curva $E_0(q)$ un aspecto equivalente al de un acuífero profundo, siendo en realidad un “acuífero lateral”. No resulta por lo tanto posible la inversión de estos datos utilizando un modelo 1D.

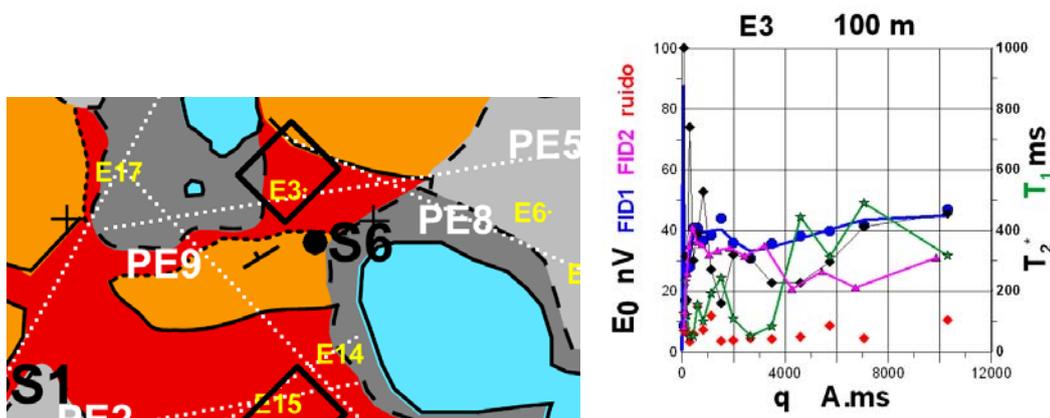


Fig. 11.8 Situación de la antena del SRM E3 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

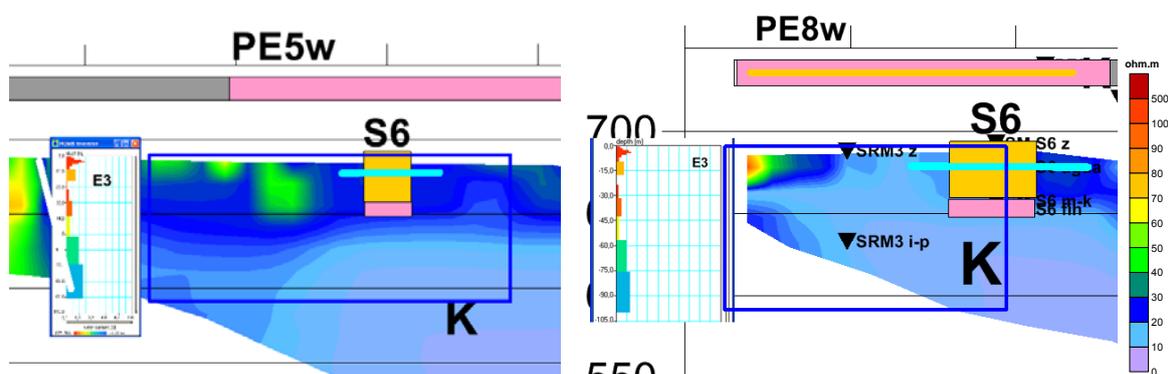


Fig. 11.9 Fragmento de los perfiles PE5 (izquierda) y PE8 (derecha) involucrados en la medición del SRM E3. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM. El sondeo S6 se ha proyectado sobre estas secciones, aunque se encuentra excesivamente alejado de las mismas.

La resistividad interpolada al centro de la antena del SRM E3 (Figura 11.10) es de 30 ohm.m desde la superficie hasta los 40 m, pasando a menos de 20 ohm.m hasta el final, corroborando que lo más probable que casi todo el volumen investigado por el SRM esté en Keuper. Este SRM ratifica que entre ambas lagunas no hay continuidad hidráulica debido a la presencia de materiales impermeables del Keuper.

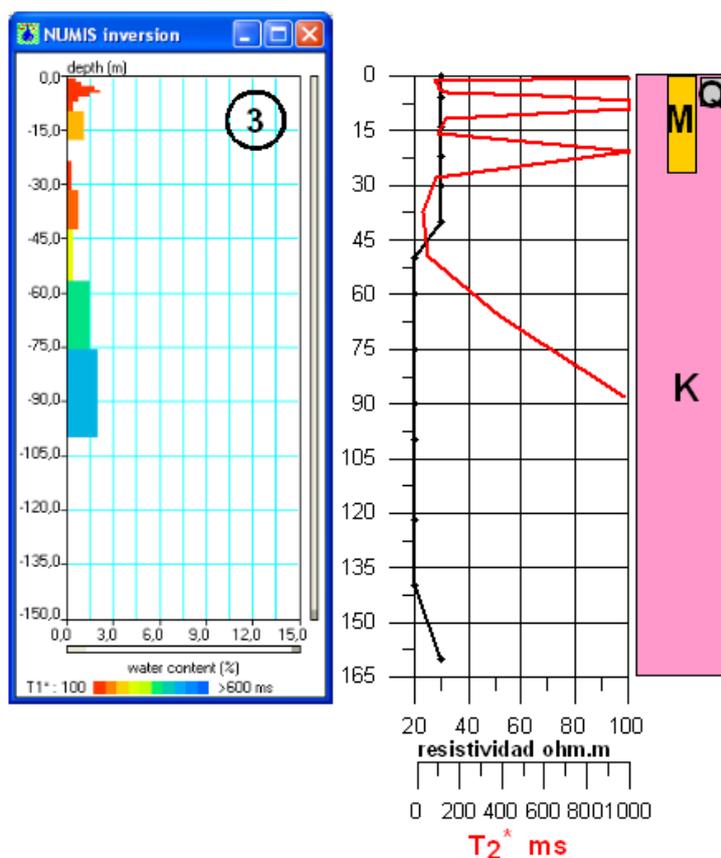


Fig. 11.10 Izquierda: Resultado del SRM E3 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión no es fiable.

El **SRM E6**, situado en el borde noreste de la Laguna Grande, tiene su antena de 100 m extendida sobre materiales cuaternarios que probablemente son suprayacentes al Muschelkalk (Figura 11.11); El volumen investigado comprende parte de la sección PE8 (posiciones -232 a -22 m) (Figura 11.12), que indica la existencia preferente de materiales del Keuper, aunque con la presencia del Muschelkalk.

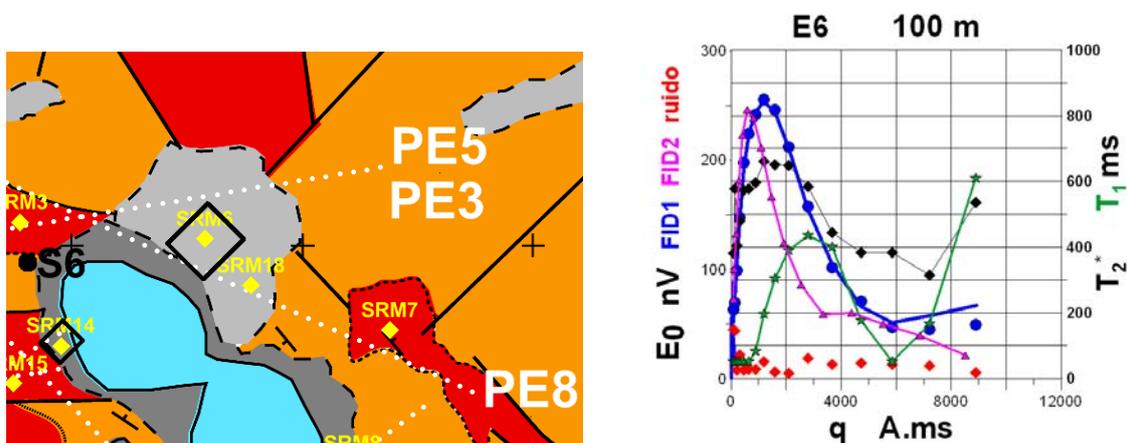


Fig. 11.11 Situación de la antena del SRM E6 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ $T_1^*(q)$.

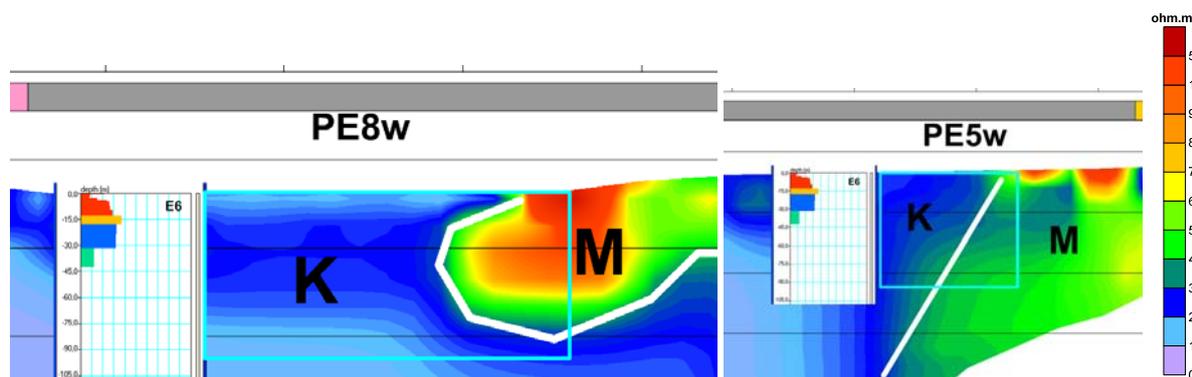


Fig. 11.12 Fragmento de los perfiles PE8 (izquierda) y PE5 (derecha) involucrados en la medición del SRM E6. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

Aunque más alejado del PE5, la proyección sobre este perfil (posiciones 113 a 232 m) indica una situación parecida, siendo los primeros 15 m de terrenos de resistividad superior a 100 ohm.m, que luego pasan a valores pertenecientes al Keuper y al Muschelkalk. Por lo tanto, aunque se explica y justifica la detección de agua libre en el resultado del SRM, su situación geológica no permite efectuar una inversión según un modelo 1D con garantías de fiabilidad. Los valores de T_1^* no son aceptables (por resultar inferiores a T_2^*), y el tiempo de relajación transversal medido T_2^* es de 650 ms, indicando la presencia del agua en rocas muy fracturadas.

Para la resistividad interpolada (Figura 11.13) en el SRM E6 se miden 60 ohm.m desde la superficie hasta los 60 m, presentando un ligero aumento de la resistividad en el tramo de 6 a 14 m; luego pasa a 20-30 ohm.m hasta el final de la información.

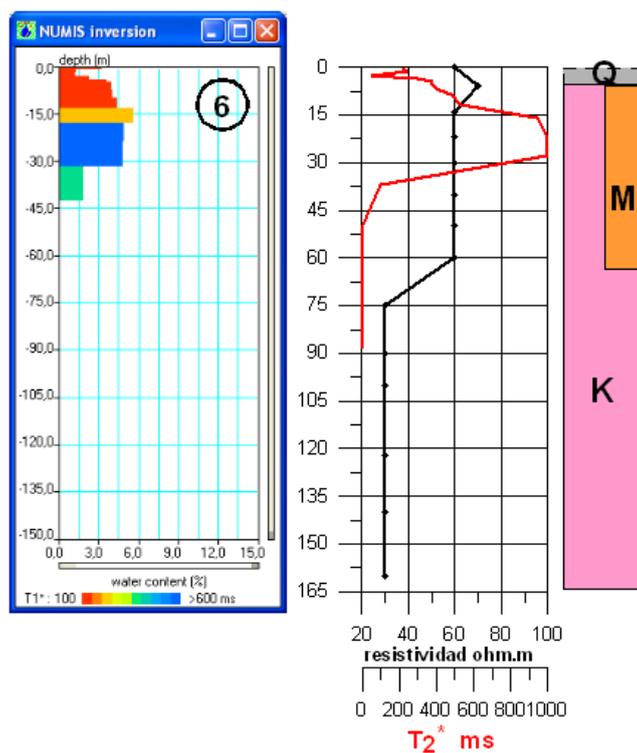


Fig. 11.13 Izquierda: Resultado del SRM E6 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión no es fiable.

El **SRM E7**, situado al noreste del seno inferior de la Laguna Grande, tienen una antena de 100 m sobre Keuper rodeado por el Muschelkalk, por lo que el volumen investigado puede estar informando del agua existente en este piso (Figura 11.14). Su proyección sobre el PE8 (posición 233 a 473) (Figura 11.15) indica que abarca un conjunto de terrenos de resistividad de unos 20-50 ohm.m en superficie, que aumenta a valores del orden de 60-80 ohm.m a mayor profundidad; en la imagen obtenida con dispositivo Schlumberger la distribución de la resistividad es del mismo estilo, con contraste mayor, y siendo también mayor el volumen ocupado por las bajas resistividades.

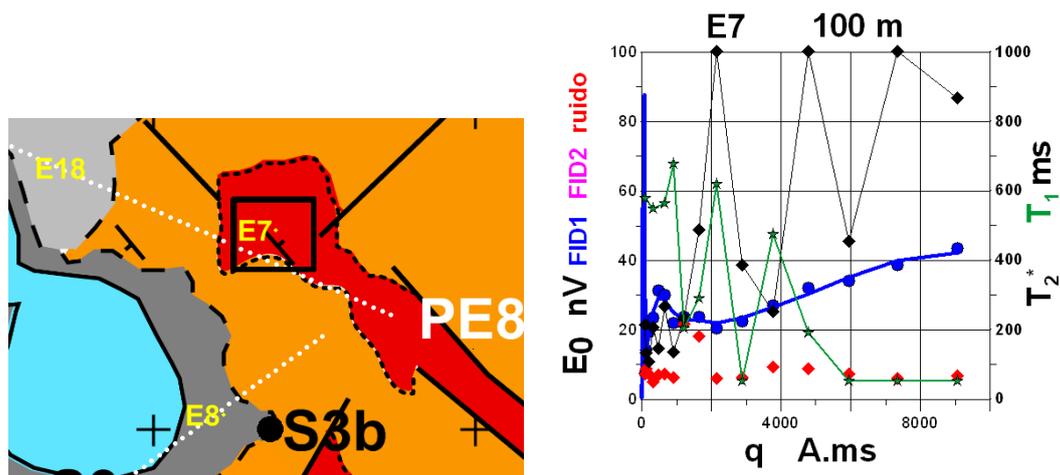


Fig. 11.14 Parte superior: Situación de la antena del SRM E7 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

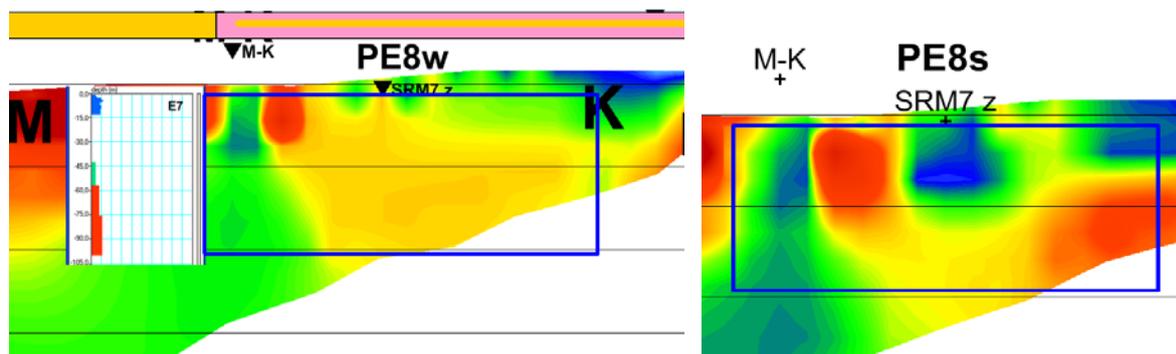


Fig. 11.15 Fragmento del perfil PE8 Wenner y Schlumberger involucrados en la medición del SRM E7. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

Cabe interpretar que la mayor parte de los materiales son del Muschelkalk, pero prácticamente secos, y el modelo geológico podría aceptarse para una inversión 1D, aunque con reservas.

La interpolación de resistividad a su centro (Figura 11.16) es de 60-100 ohm.m en superficie, que a partir de los 6 m pasa a más de 100 ohm.m hasta los 30 m, donde cambia bruscamente a 60-70 ohm.m hasta el final. En cualquier caso, el SRM no detecta prácticamente la presencia de agua, con valores medidos del parámetro T_2^* del orden de 400 ms, aunque caóticos y en general superiores a

T_1^* , que ratifica la dudosa fiabilidad cuantitativa de la inversión, obteniéndose valores no coherentes de $T_2^*(z)$, y con un modelo de distribución de acuífero profundo, cuando en realidad puede tratarse de efectos laterales.

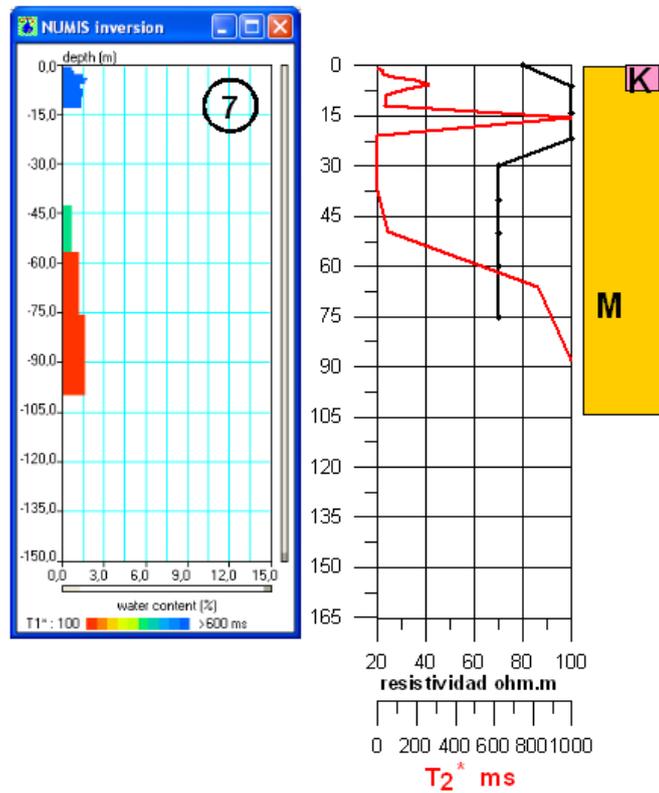


Fig. 11.16 Izquierda: Resultado del SRM E7 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión no es fiable.

El **SRM E8**, situado en el borde sureste de la Laguna Grande, con antena de 50 m de lado extendida sobre Cuaternario suprayacente al Muschelkalk (Figura 11.17). El perfil PE7 está sobre el área de este SRM (posiciones 263 a 398 m), mostrando (Figura 11.18) que la resistividad es elevada en toda su profundidad. El sondeo mecánico S3b indica que estas resistividades se deben a materiales del Muschelkalk, con buena coincidencia de la profundidad donde se detecta el agua en el sondeo y en el SRM.

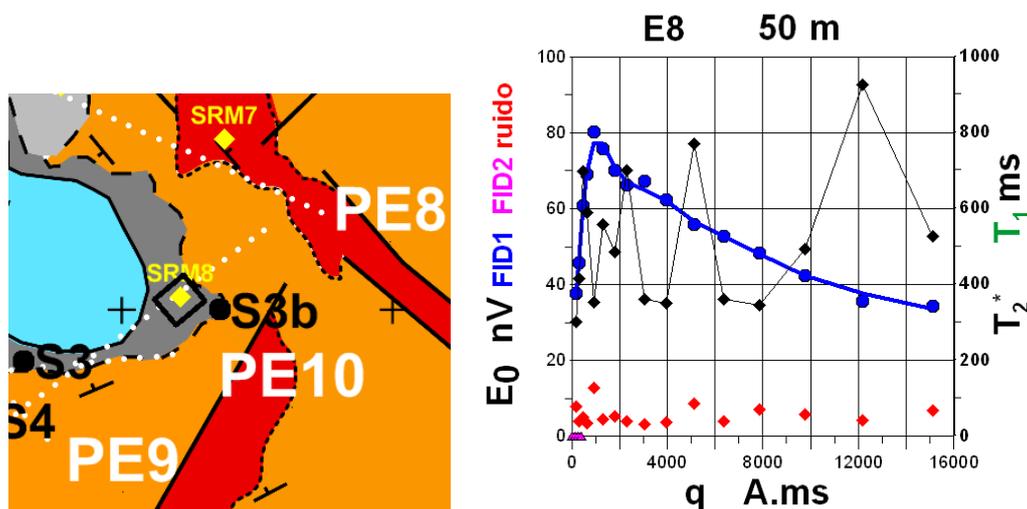


Fig. 11.17 Situación de la antena del SRM E8 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ (no se registró T_1^*).

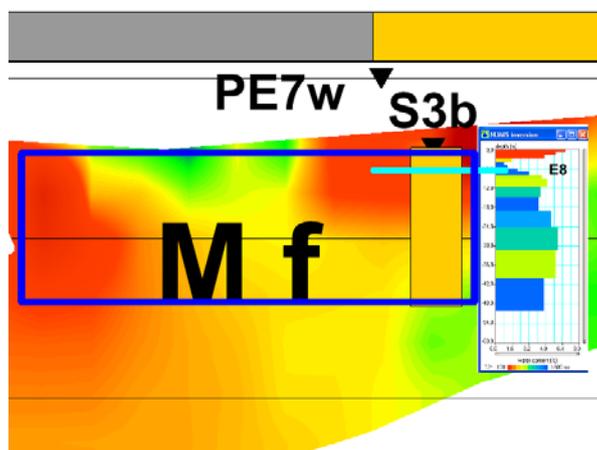


Fig. 11.18 Fragmento del perfil PE7 involucrado en la medición del SRM E8. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

La interpolación de las resistividades medias al centro de la antena del SRM E8 (Figura 11.19) tiene 100 ohm.m en superficie hasta los 14 m, donde baja a 60-70 ohm.m hasta el fin del SRM. La distribución de resistividad se corresponde bien con la información del SRM, permitiendo asignar al Muschelkalk el acuífero, que sigue existiendo a mayor profundidad que la detectada por los 50 m de antena utilizados, como indica la curva $E_0(q)$. A partir de unos 90 m de profundidad las resistividades interpoladas pueden corresponder a terrenos del Keuper. La inversión de este SRM puede considerarse de aceptable fiabilidad, dado que la geometría de su situación no se aparta

excesivamente de un modelo de capas horizontales. El tiempo T_2^* es del orden de 400-500 ms, lo que indica la existencia de fracturas. Se detecta la presencia de agua hasta unos 45 m de profundidad, sin que parezca haber llegado al fin del acuífero. La permeabilidad es pequeña en los primeros 3-5 m.

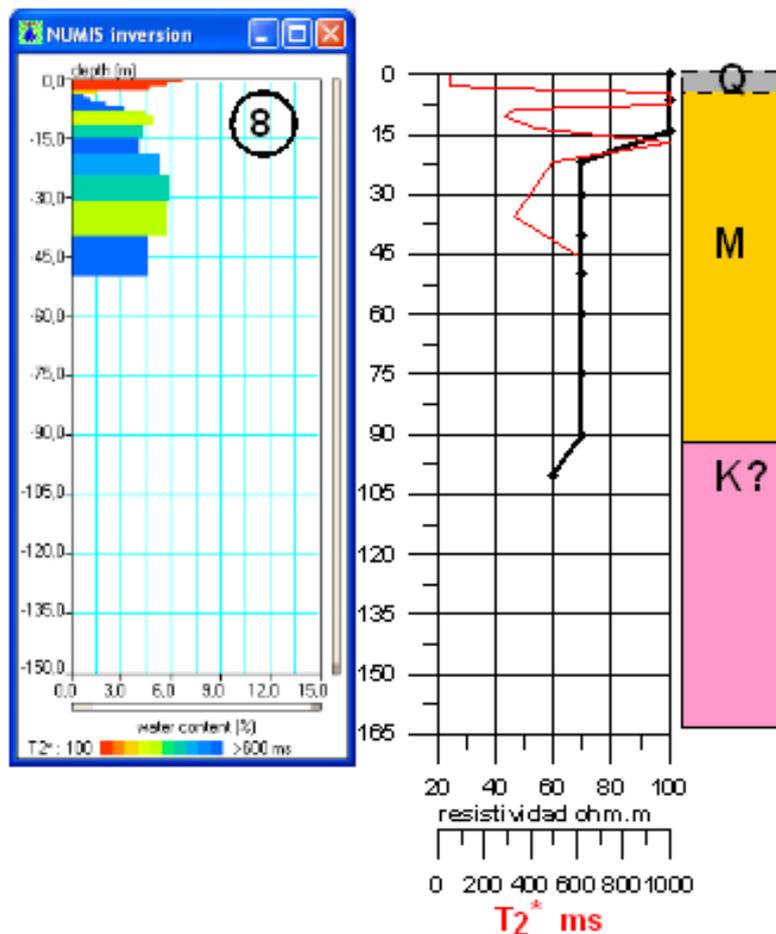


Fig. 11.19 Izquierda: Resultado del SRM E8 (distribución $w(z)$ y $T_2^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable.

El **SRM E9**, situado al suroeste de la Laguna Grande, con antena de 50 m sobre el Muschelkalk y extendida sobre el mismo perfil PE9 (posiciones 412 a 262, Figura 11.21), en zona de resistividad de 40-70 ohm.m, comprendiendo el volumen investigado una compleja zona, con existencia mayoritaria de rocas del Muschlealk, pero con presencia de una capa menos de 30 ohm.m, y que según los sondeos mecánicos S3 y S4 se trata de materiales del Keuper.

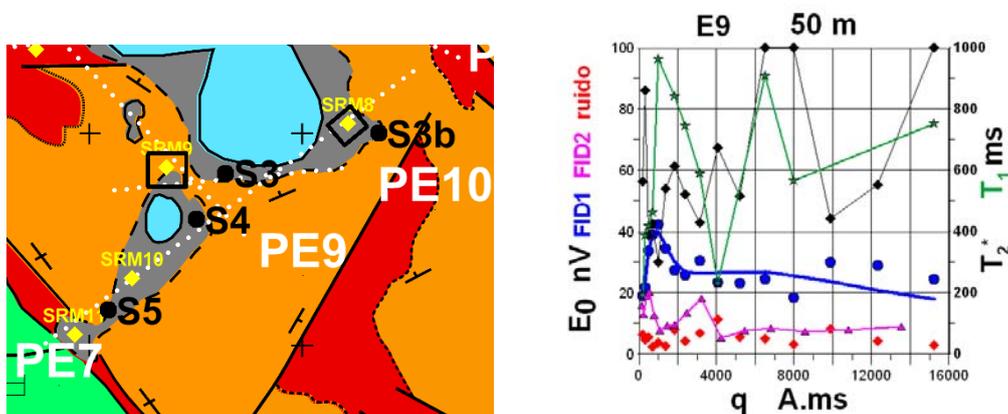


Fig. 11.20 Situación de la antena del SRM E9 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

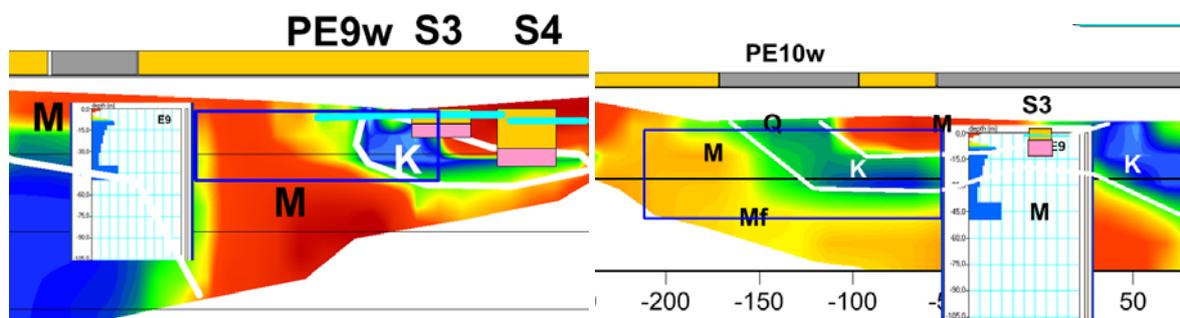


Fig. 11.21 Fragmentos de los perfiles PE9 y PE10 involucrados en la medición del SRM E9. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

Su proyección sobre el PE10 (posiciones -218 a -53 m, Figura 11.21) indica igualmente que el área de la antena comprende zonas de ambos pisos. Esta estructura se aparta algo de las condiciones ideales para la inversión con un modelo 1D, por lo que habría que tomar sus resultados con precaución.

La interpolación de valores ponderados al centro de la antena (Figura 11.22) indica en superficie 80-90 ohm.m, que se mantienen hasta los 14 m, a partir de donde disminuye a unos 60-70 ohm.m hasta los 30 m; aumenta a 90-100 ohm.m hasta los 90 m, y cambia bruscamente a 30 ohm.m hasta el final de la información. Se interpreta que el Muschelkalk se prolonga hasta los 100 m en que empezaría el Keuper. La inversión del SRM indica la presencia de agua a partir de los 8 m de profundidad, con un

tiempo de relajación T_2^* muy variable (entre 200 y 800 ms) indicando la posible existencia de fracturas. Los valores de T_1^* son muy erráticos, de poca fiabilidad.

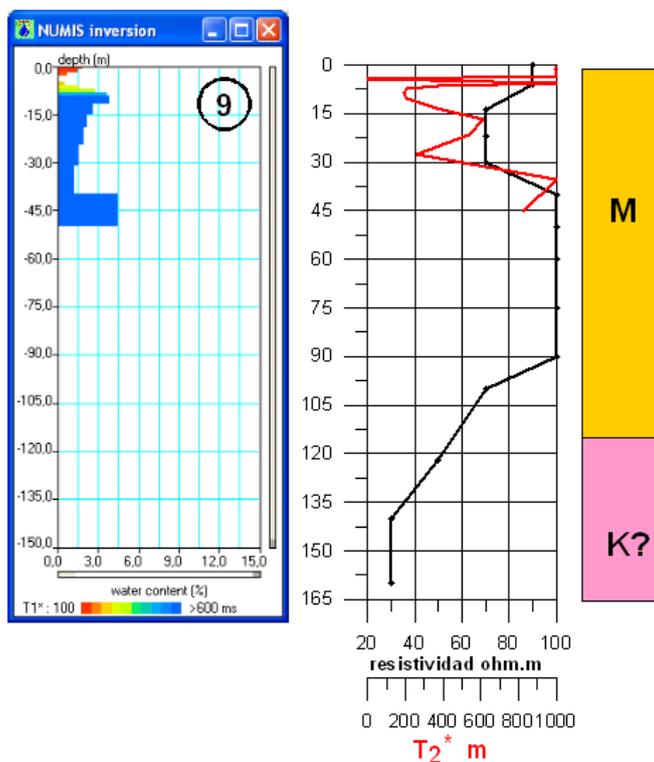


Fig. 11.22 Izquierda: Resultado del SRM E9 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable con reservas.

El **SRM E10**, situado en el Sur, dentro del barranco que une la Laguna Grande y la pequeña laguna en dirección al Cretácico, tiene una antena de 100 m de lado extendida sobre el Muschelkalk, parcialmente cubierto por materiales cuaternarios (Figura 11.23). El volumen investigado incluye parte de la sección PE7 (posición -412 a -172), que tiene resistividades superiores a los 200-500 ohm.m en esta parte del perfil (Figura 11.24), excepto precisamente bajo el área de la antena del SRM, donde se sitúa en valores de 60-80 ohm.m, por lo que debe de tratarse de una zona de mayor fracturación. La posible existencia de Keuper dentro de la profundidad investigada por este SRM queda limitada a la zona de afloramiento en el Sur, fuera del volumen afectado por el campo de excitación. El sondeo mecánico S5 está en el mismo perfil, y dentro del volumen involucrado por el SRM E10, y aunque corta el Muschelkalk no tiene agua, situándose en una zona de resistividades superiores a los 100 ohm.m; es bastante posible que algún metro por debajo del fin de este sondeo se hubiera encontrado agua.

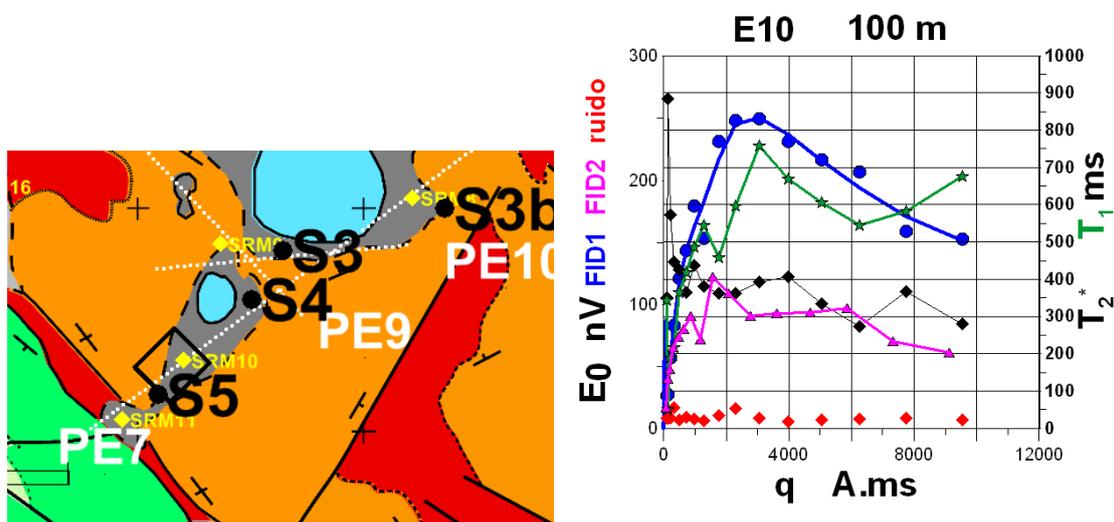


Fig. 11.23 Situación de la antena del SRM E10 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ $T_1^*(q)$.

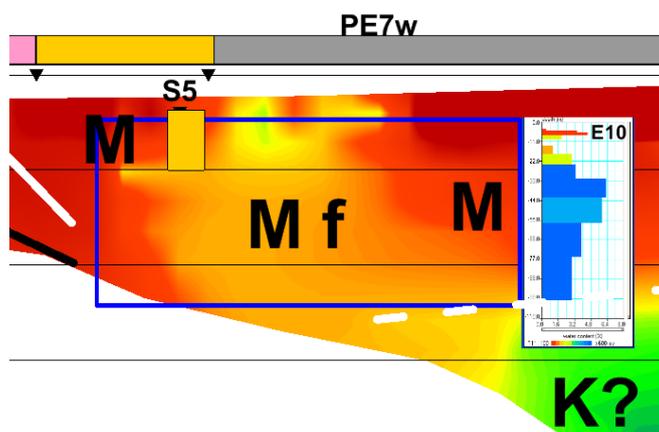


Fig. 11.24 Fragmentos del perfil PE7 involucrado en la medición del SRM E10. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

El modelo geológico es aceptable para efectuar una inversión fiable de este SRM. Los primeros 20-25 m son terrenos de poca permeabilidad, aunque con algo de agua, pasando a mayor profundidad a contener agua en zonas de mayor permeabilidad, sin que se haya llegado a detectar el fin de acuífero.

La resistividad promediada obtenida por interpolación al volumen investigado por el SRM E10 tiene un valor en superficie superior a 100 ohm.m (Figura 11.25), que se mantiene hasta los 22 m, a partir de donde baja ligeramente a valores de 70-80 ohm.m hasta el final. Toda la profundidad investigada por este SRM se corresponde a materiales del Muschelkalk, que pasa a estar saturado a partir de los 20-30 m. El parámetro T_2^* alcanza valores de 400 ms T_1^* del orden de 700 ms, indicando la existencia de fracturas.

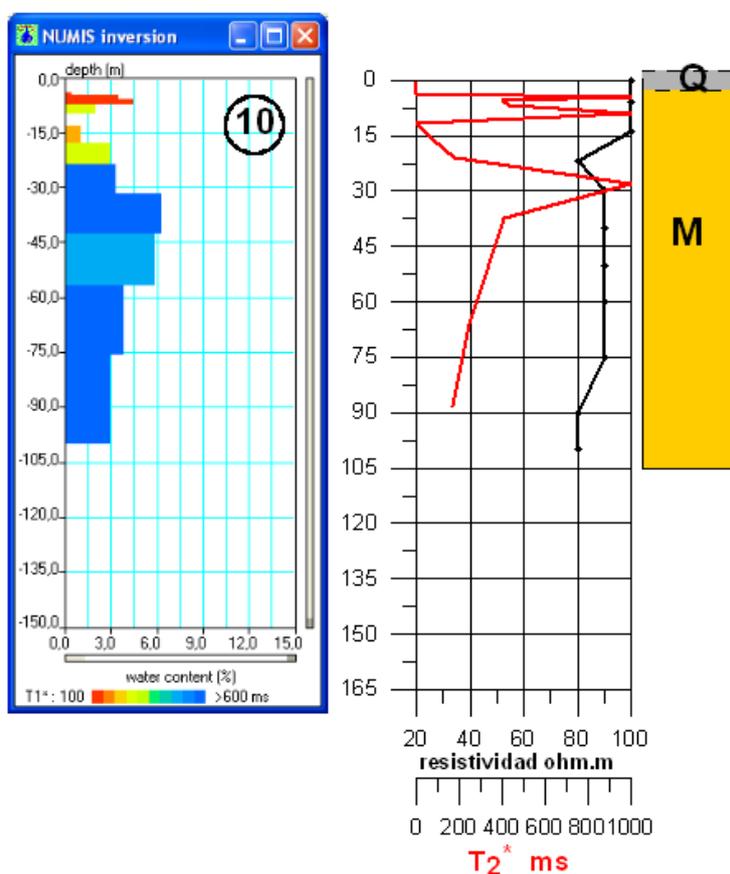


Fig. 11.25 Izquierda: Resultado del SRM E10 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable.

El **SRM E11**, situado en el Sur junto al Cretácico, con antena de 50 m sobre Keuper en contacto con el Cretácico, y cuya área de influencia recoge también materiales del Muschelkalk (Figura 11.26), presenta muy mala calidad de sus curvas $e(t)$ y $E_0(q)$, sin que sea evidente que haya detectado la presencia de agua. Su proyección sobre el PE7 (posición -562 a -412) lo sitúa en una zona de valores de resistividad superiores a 100 ohm.m en toda su profundidad (Figura 11.27), que se tratan de materiales del Muschelkalk y del Cretácico; este volumen incluye una pequeña anomalía conductora, que se ha interpretado como debida al Keuper en la zona donde la cartografía indica su afloramiento, aunque también podría interpretarse como una fractura en el Muschelkalk; en este caso, la escasa presencia del agua detectada podría relacionarse con dicha fractura, como pueden indicar los altos valores medidos del parámetro T_2^* , y que explicaría que el sondeo mecánico S5 sea seco.

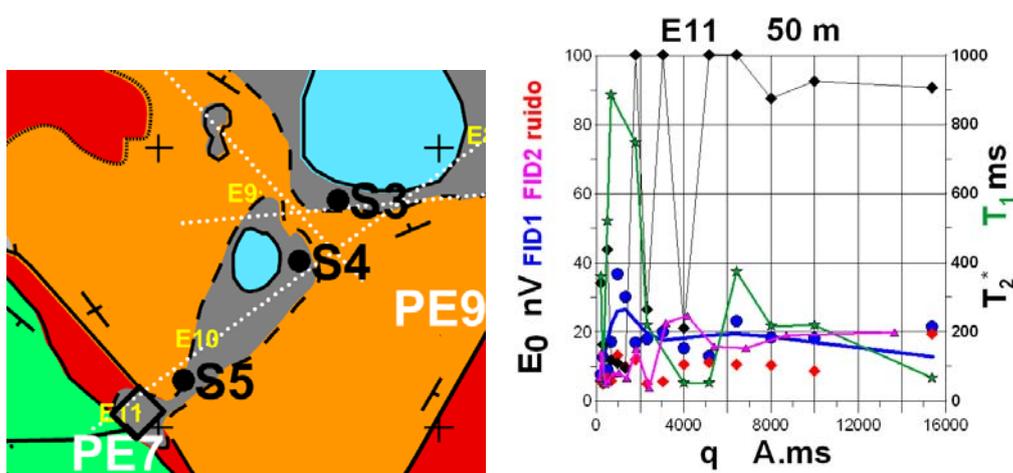


Fig. 11.26 Situación de la antena del SRM E11 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

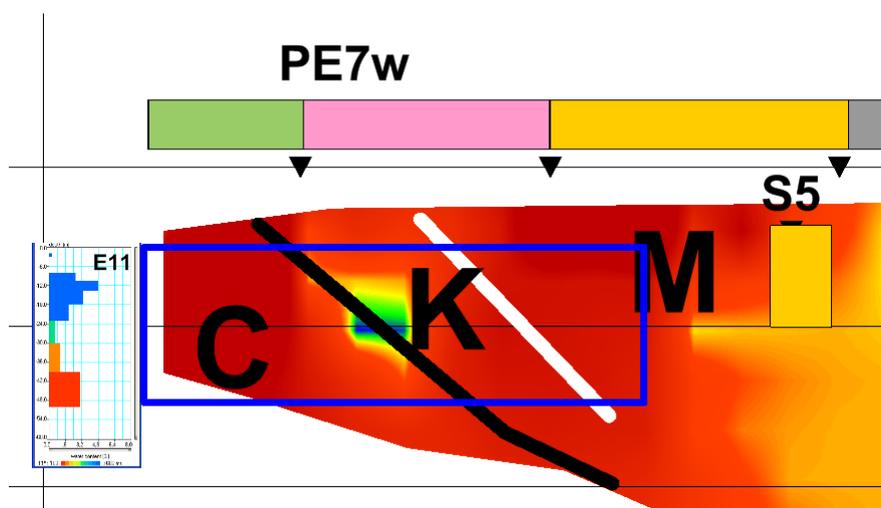


Fig. 11.27 Fragmento del perfil PE7 involucrado en la medición del SRM E11. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

La interpolación de resistividad a partir de los mapas a diferentes profundidades señala valores superiores a 100 ohm.m (Figura 11.28), por lo que dado el entorno geoelectrico, y puesto que en las

curvas de campo $e(t)$ no se detecta señal de decaimiento exponencial salvo en el inicio de tres momentos de excitación ($q=10, 11$ y 12), lo más probable es que este SRM pueda clasificarse como lugar sin prácticamente presencia de agua. Su situación geológica no es adecuada para la utilización de modelos 1D, por lo que en cualquier caso no es fiable su inversión.

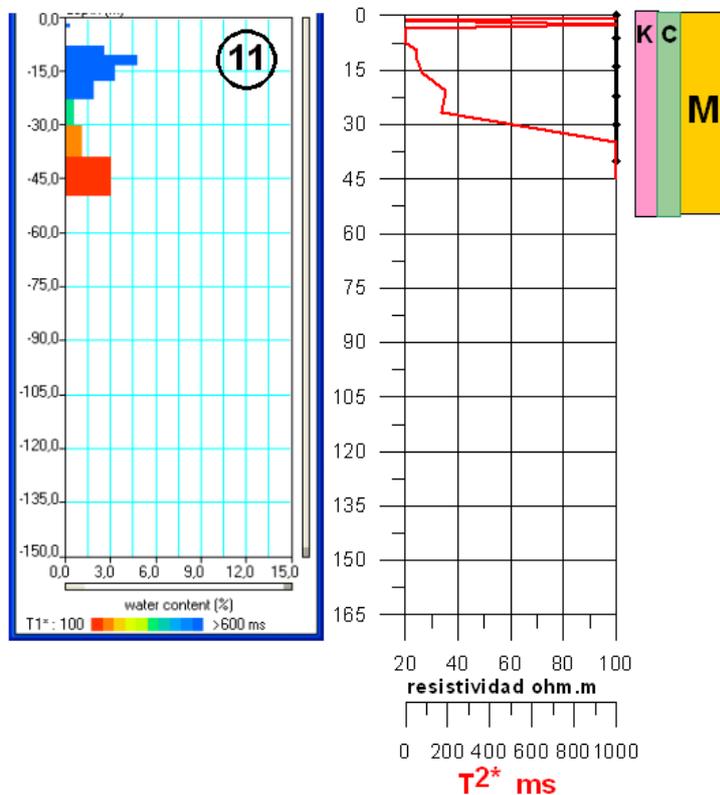


Fig. 11.28 Izquierda: Resultado del SRM E11 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión no es fiable.

El **SRM E12**, situado al Norte, entre las lagunas y el Cretácico, tiene antena de 75 m extendida sobre el Cuaternario, suprayacente al Keuper e incluyendo en su área de influencia algo del Muschelkalk. Su información proviene de un volumen que abarca el perfil PE1 (posiciones -293 a -53) y el sondeo mecánico S1, a pocos metros del perfil (Figura 11.29). La proyección de su volumen investigado sobre el PE1 (Figura 11.30) permite identificar los terrenos resistivos, pertenecientes al Muschelkalk, con la posición del acuífero. También está muy próximo al trazado del perfil PE2 (posiciones -113 a 98 m), donde la situación geoelectrónica es equivalente. Este modelo estructural es válido para ser utilizado en una inversión 1D del SRM.

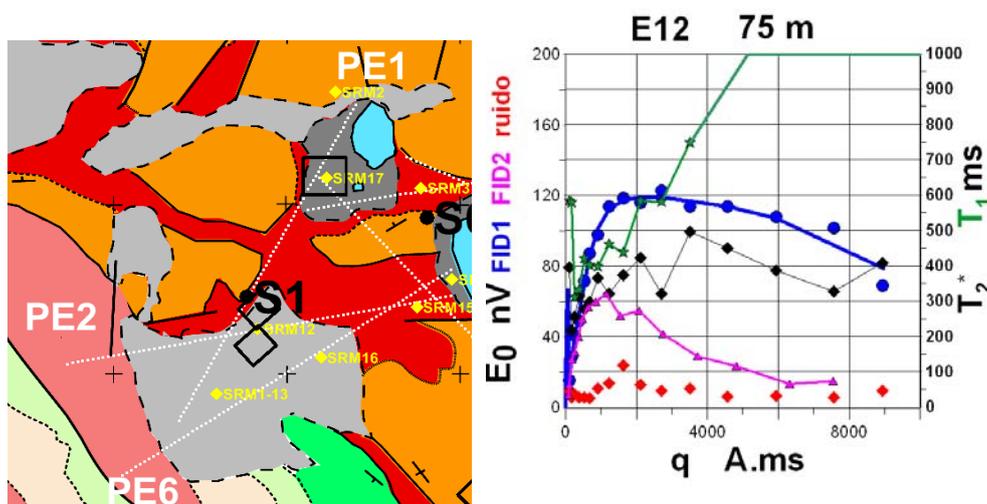


Fig. 11.29 Situación de la antena del SRM E12 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

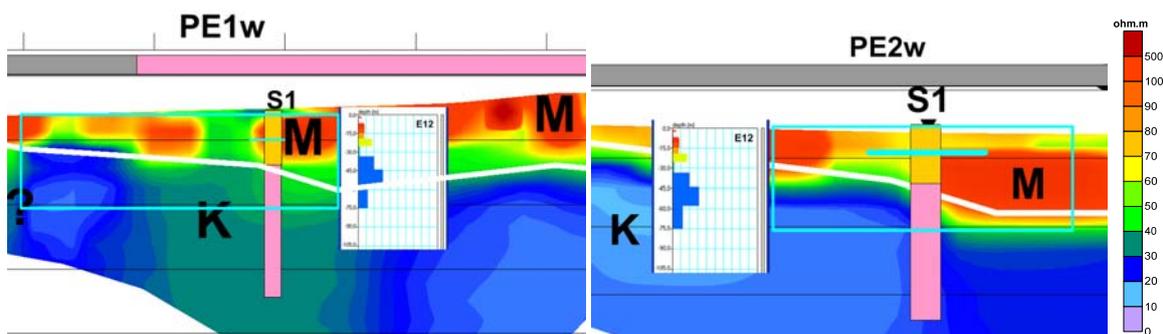


Fig. 11.30 Fragmentos de los perfiles PE1 y PE2 involucrados en la medición del SRM E12. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

La interpolación de valores promedios de resistividad al centro de la antena del SRM 12 a partir de los mapas de resistividad (Figura 11.31), permiten ver con mayor claridad que éste se encuentra en una zona de transición lateral de resistividad; tiene una resistividad superficial de 60 ohm.m, pasando a 70-80 ohm.m a los 6 m y a 100 ohm.m desde los 14 m hasta los 40-50 m, disminuyendo a 30 ohm.m hasta el fin del SRM. El tiempo T_2^* alcanza valores superiores a 450 ms a partir de los 30 m de profundidad, con T_1^* del orden de 600 ms, lo que indica la existencia de fracturas. La inversión de

este SRM puede considerarse válida, aunque se da algún contraste lateral de terrenos. El SRM no detecta prácticamente agua en los primeros 30 m del subsuelo, muy resistivos, pasando luego a valores de 50 ohm.m en la zona saturada.

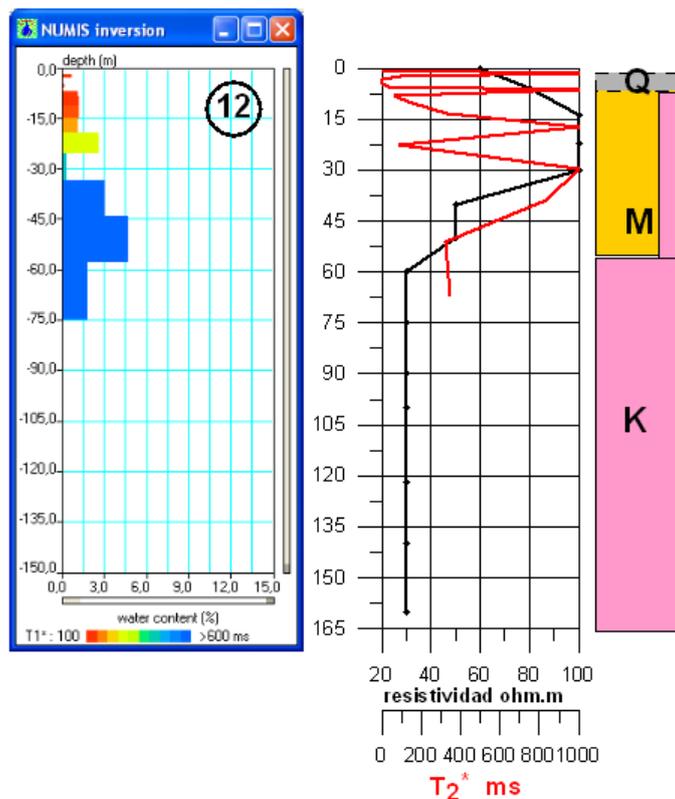


Fig. 11.31 Izquierda: Resultado del SRM E12 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable.

El **SRM 14**, situado en el borde occidental del seno superior de la Laguna Grande, con antena de 50 m sobre el Cuaternario posiblemente suprayacente al Keuper. La situación geoelectrica sobre el PE6 (posiciones 562 a 472 m, Figura 11.33) indica la presencia de materiales de resistividad entre 50-100 ohm.m en todo el volumen investigado, siendo materiales del Muschelkalk. Sin embargo la situación geoelectrica del final de perfil PE2 involucrada en la medición de este SRM (posiciones 563 a 518 m) muestra una menor resistividad, correspondiente a materiales del Keuper.

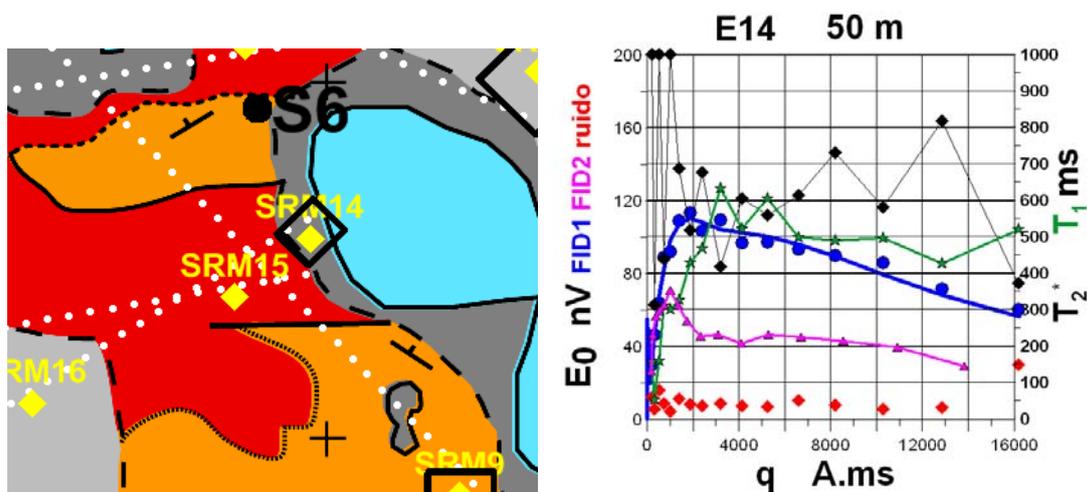


Fig. 11.32 Situación de la antena del SRM E14 y sus curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ $T_1^*(q)$.

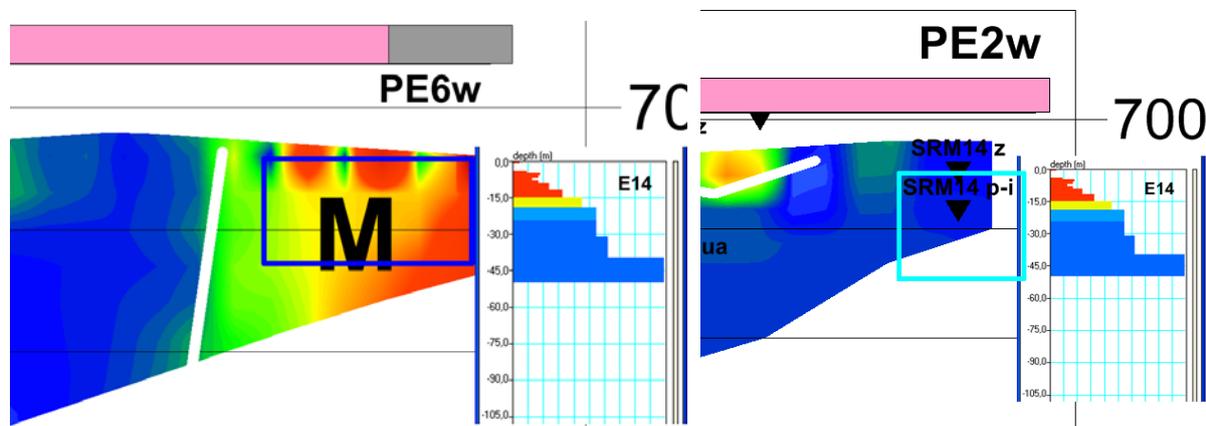


Fig. 11.33 Fragmentos de los perfiles PE6, PE2 involucrados en la medición del SRM E14. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

Su proyección sobre el perfil PE9 (posiciones -143 a -38 m) (Figura 11.34), algo más alejado, refleja muy bien la estructura resistiva donde se localiza el acuífero, igual que en el PE6. Se trata por lo tanto de la misma complejidad estructural que se refleja al final de estos perfiles para la interpretación del SRM E15, que resuelve bien la distribución de la resistividad interpolada.

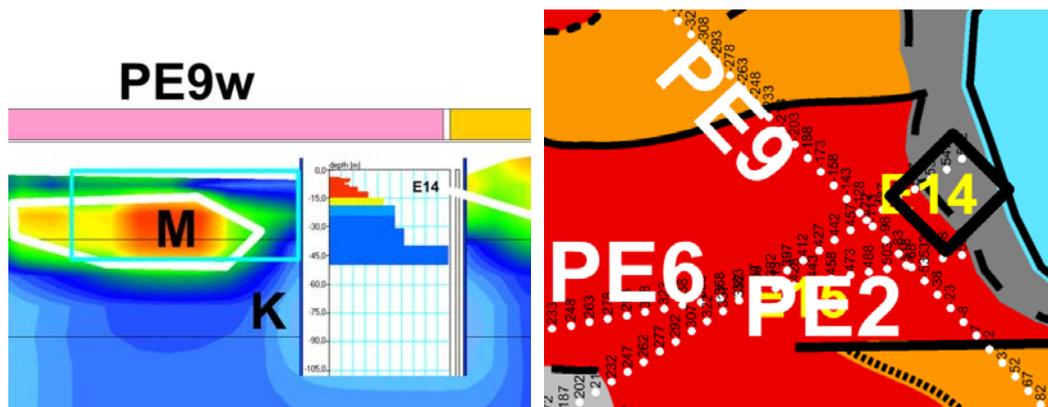


Fig. 11.34 Fragmento del perfil PE9 involucrado en la medición del SRM E14. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

La interpolación de las resistividad al centro de la antena del SRM E14 (Figura 11.35) es de más de 500 ohm.m en superficie, a los 6 m baja la resistividad a 50 ohm.m, subiendo de nuevo entre los 14-22 m a 70-80 ohm.m, lo que posiblemente corresponde a Muschelkalk fracturado y saturado; la resistividad continua disminuyendo a 20 ohm.m hasta el fin del SRM y hasta mayores profundidades, coincidiendo con el tipo de curva $E_0(q)$, que indica que se trata de un acuífero más profundo que lo investigado por el SRM. El modelo geométrico hace fiable la inversión de este SRM, que detecta la presencia de agua desde unos 3-4 m de la superficie, con baja permeabilidad, pasando a partir de los 15 m a mayor cantidad de agua, en terrenos de alta permeabilidad, con buena correspondencia entre la información geoelectrica y la del SRM, tanto en la existencia de agua como en la permeabilidad de los terrenos. El valor del parámetro T_2^* es de 600 ms, superior al encontrado para T_1^* , que no ha resultado correctamente evaluado en este SRM.

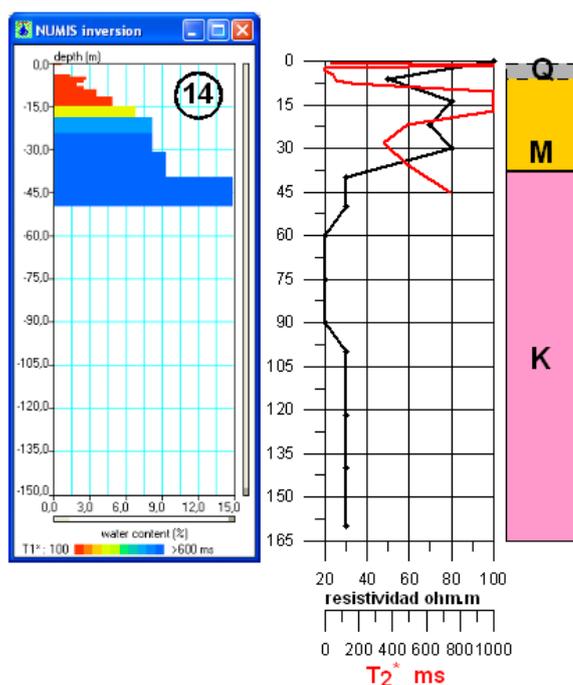


Fig. 11.35 Izquierda: Resultado del SRM E12 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable.

El **SRM E15** se encuentra al suroeste del seno superior de la Laguna Grande, con antena de 100 m extendida sobre el Keuper (y con una mínima inclusión de Muschelkalk en su área de influencia). El volumen investigado queda interceptado por los perfiles eléctricos PE2 (posición 323 a 563), PE6 (posición 277 a 517) y PE9 (posición -173 a 22) (Figura 11.37), que reflejan una compleja situación en la que bajo el Keuper se sitúa el Muschelkalk, cuyo volumen ocupado depende de orientación del corte. En el PE9 se sitúa como una capa horizontal en una pequeña porción del volumen investigado. La resistividad es de 60-70 ohm.m en la superficie de la sección PE2, disminuyendo a menos de 30 ohm.m hasta el final, mostrando la presencia de materiales del Muschelkalk, que es más evidente en la sección Schlumberger, con 70-100 ohm.m como promedio para todo el volumen debajo de la antena. La misma situación se deduce de su proyección sobre el PE6, donde aunque el Keuper ocupa gran parte del volumen, también existen materiales del Muschelkalk.

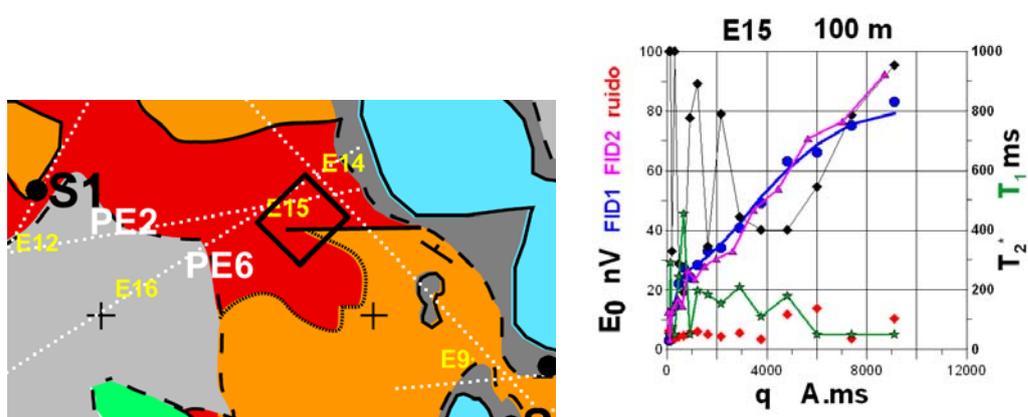


Fig. 11.36 Situación de la antena del SRM E15 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

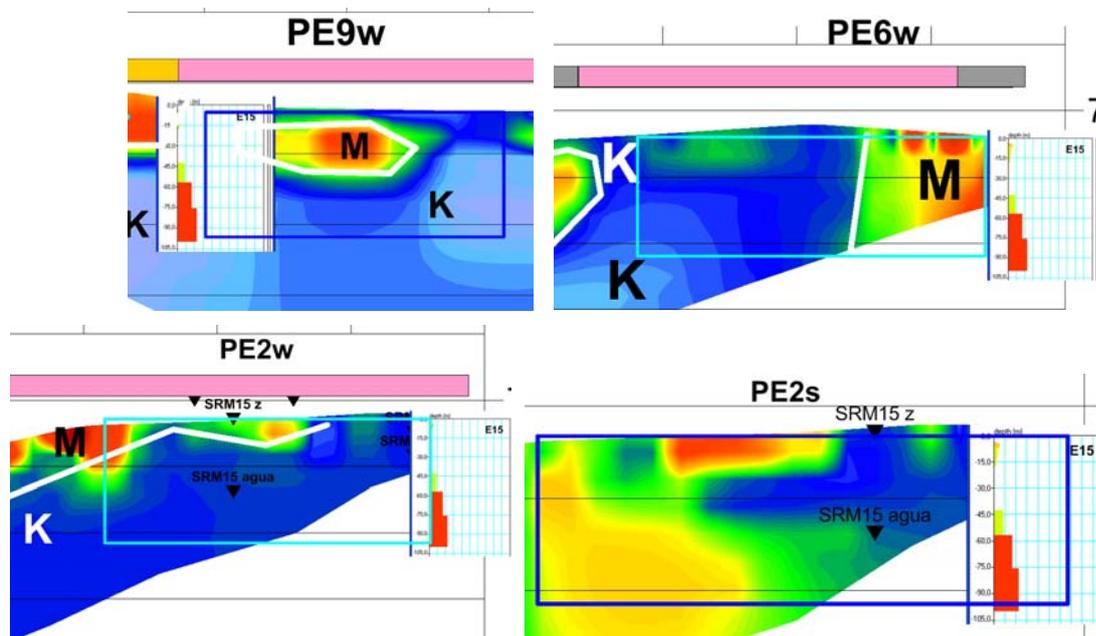


Fig. 11.37 Fragmentos de los perfiles PE9, PE6 y PE2 (Wenner y Schlumberger) involucrados en la medición del SRM E15. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

Los valores de resistividad interpolados al centro de la antena del SRM indican (Figura 11.38) una primera capa de 50-60 ohm.m en superficie; a partir de los 40 m de profundidad pasa a tener 30 ohm.m, y menos a partir de los 60 m, lo que si bien caracteriza la presencia del Keuper en toda la profundidad, refleja la presencia lateral de calizas. El parámetro T_2^* medido es muy caótico, con valores del orden de 400-800 ms, indicador de agua contenida en fracturas. El parámetro T_1^* no ha sido evaluado correctamente.

Es evidente que la situación hidrogeológica de este SRM no se ajusta a un modelo de capas 1D, por lo que los resultados de su inversión no pueden considerarse fiables en el sentido de definir la geometría del acuífero, aunque es indudable que detecta la presencia de agua libre en los terrenos del Muschelkalk.

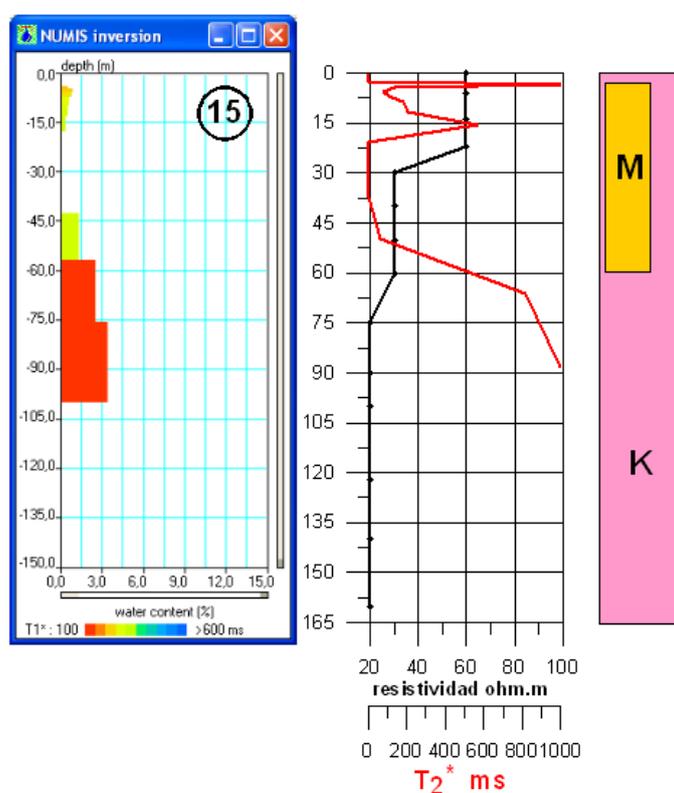


Fig. 11.38 Izquierda: Resultado del SRM E15 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión no es fiable.

El **SRM E16** está situado entre el Cretácico y las lagunas, con antena de 150 m, sobre Cuaternario suprayacente al Keuper, incluyendo su área de influencia terrenos del Muschelkalk (Figura 11.39). Sobre el perfil PE6 (posición -83 a 277 del PE6); bajo una capa superficial de terrenos conductores, a los 15 m de profundidad se pasa a terrenos de mayor resistividad (80-100 ohm.m) asignados al Muschelkalk, entrando de nuevo en el Keuper a partir de los 75 m de profundidad. El centro de la antena del SRM E16 se encuentra a unos 80 m del perfil PE2 (posición 53 a 278) (Figura 11.40), con una situación análoga a la descrita para el PE6. Dada la geometría de la estructuras en este lugar, puede darse fiabilidad al resultado cuantitativo de la inversión efectuada para este SRM.

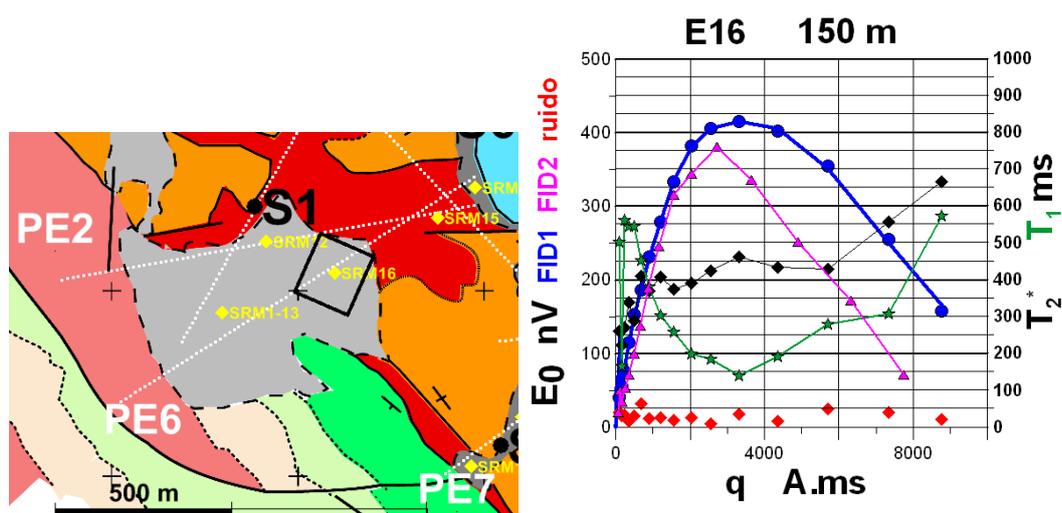


Fig. 11.39 Situación de la antena del SRM E16 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

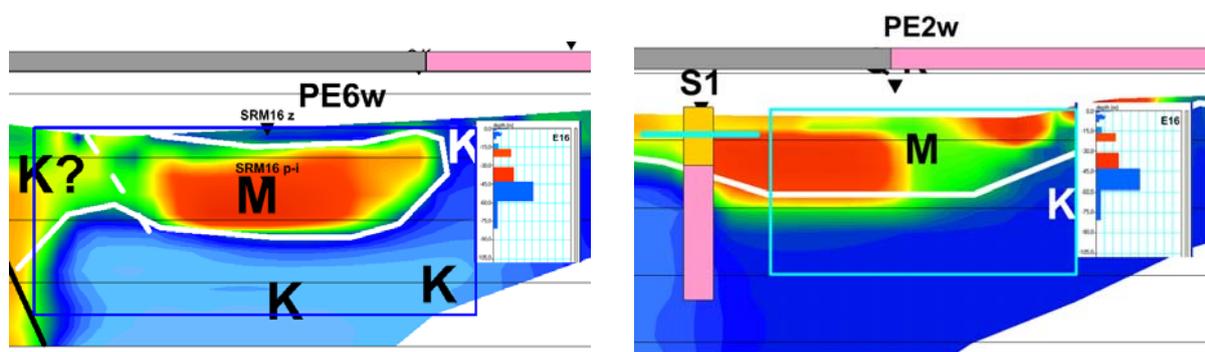


Fig. 11.40 Fragmentos de los perfiles PE6 y PE2 involucrados en la medición del SRM E15. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

La interpolación de la resistividad al centro de la antena (Figura 11.41) es de 30 ohm.m en superficie que pasa a 80-90 ohm.m a partir de los 22 m y a más de 100 ohm.m hasta los 50-60 m de profundidad, donde cambia bruscamente a valores de 20-30 ohm.m hasta el final. Esta distribución de resistividad está perfectamente correlacionada (con un margen de imprecisión de profundidades aceptable) con los tramos donde se ha detectado agua. El SRM E16, cuya penetración teórica sería de más de 100 m, parece haber encontrado el fin del acuífero, lo que queda manifestado por una

disminución de la resistividad tanto en la sección del PE6 como PE2, que pasa a terrenos más conductores e impermeables del Keuper.

El valor del tiempo T_2^* medido es de 300-400 ms, siendo posible la existencia de fracturas. El parámetro T_1^* no es válido.

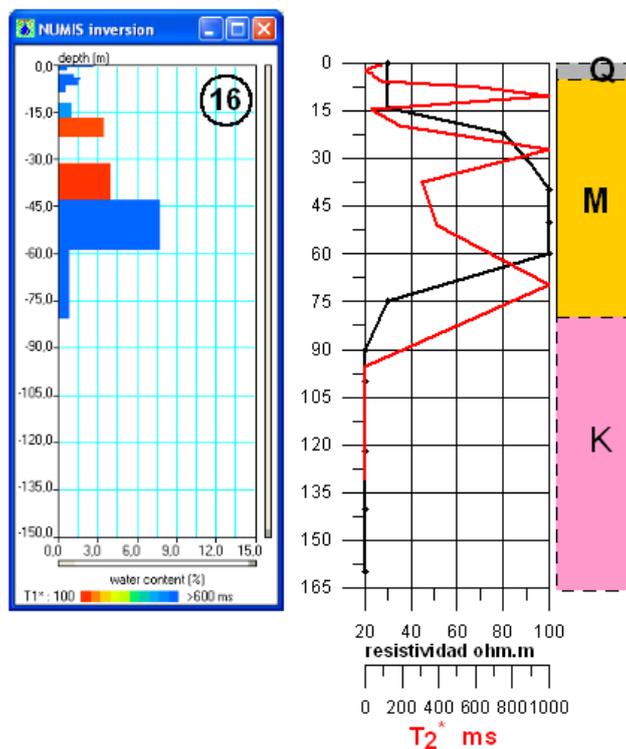


Fig. 11.41 Izquierda: Resultado del SRM E16 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable.

El **SRM E17** está situado al suroeste de la Laguna Pequeña, con antena de 100 m sobre cuaternario suprayacente al Keuper, incluyendo su área de influencia materiales del Muschelkalk (Figura 11.42). La proyección del volumen investigado por el SRM sobre el PE1 (posiciones 173 a 298 m) (Figura 11.43) indica la presencia de Muschelkalk, aunque involucra también materiales del Keuper.

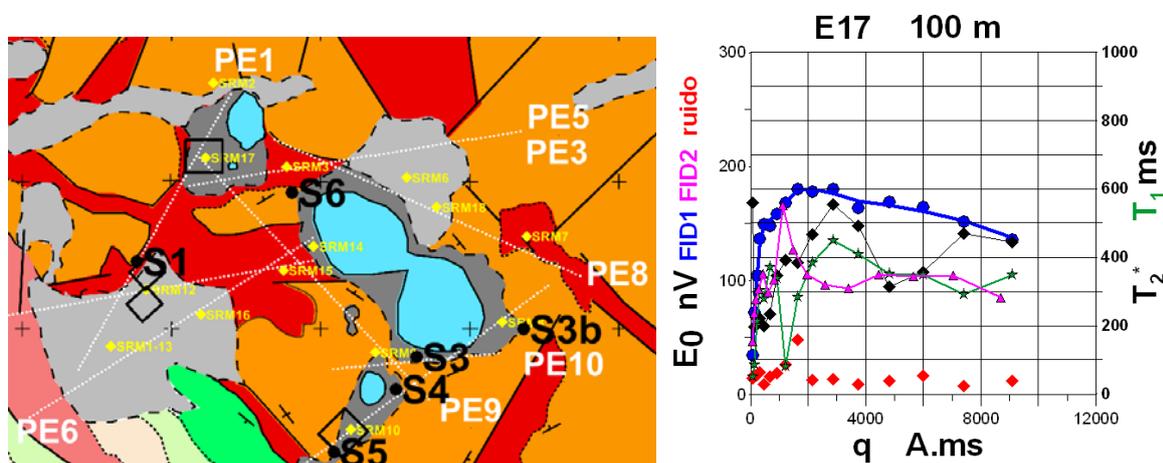


Fig. 11.42 Situación de la antena del SRM E17 y curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

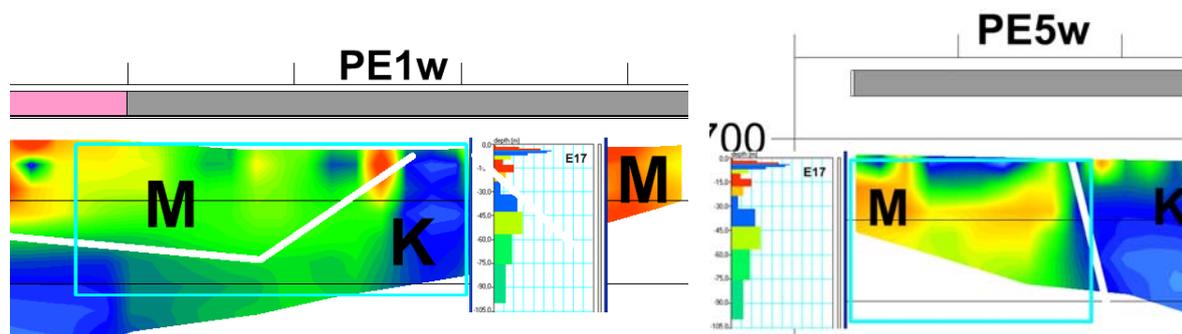


Fig. 11.43 Fragmentos de los perfiles PE1 y PE5 involucrados en la medición del SRM E17. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

El centro de la antena del SRM E17 está a unos 100 m del perfil PE5 (posiciones -562 a -412), cuya sección (Figura 11.43) coincide con la situación presentada por el PE1. Sin embargo, su proyección sobre el PE9 (posiciones -560 a -398 m) se localiza sin duda sobre terrenos conductores (Figura 11.44), asignados al Keuper, con resistividad inferior a 30 ohm.m. Esta contradicción es una de las grandes dificultades interpretativas de esta zona, que sólo podría resolverse con una densidad de información del mismo orden que la frecuencia de cambio de situación hidrogeológica existente. En efecto, los perfiles PE9 y PE5 muestran en su extremo occidental situaciones diferentes: uno finaliza en Keuper (PE9) y el otro en Muschelkalk (PE5); ambos finalizan muy próximos al PE1, que muestra en esa zona precisamente una transición entre ambos pisos.

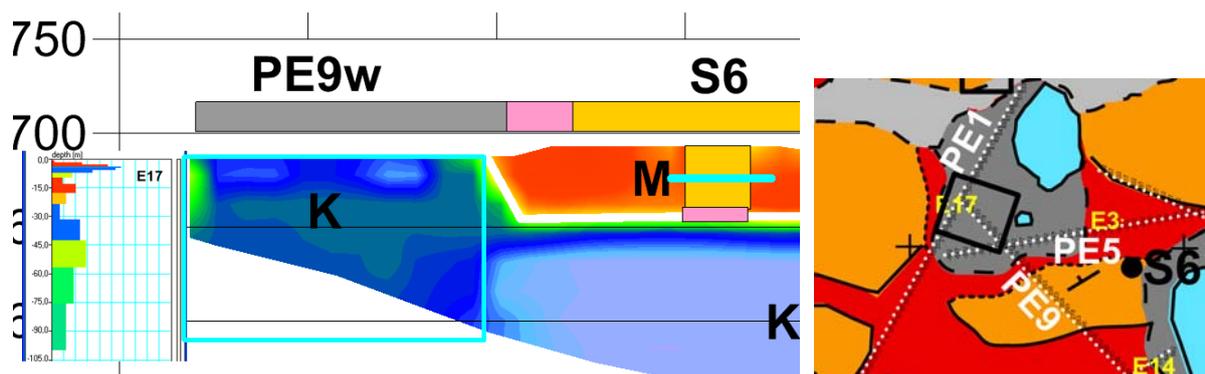


Fig. 11.44 Izquierda: Detalle de la información del SRM E17 sobre el perfil PE9. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM. Derecha: detalle de la situación del SRM E17 respecto de los perfiles PE5, PE9 y PE1.

La interpolación de resistividad, representativa del conjunto del entorno del SRM E17, permite interpretar la situación con mayor probabilidad de ser la correcta (Figura 11.45): la evolución de los mapas de resistividad a diferentes profundidades permite observar que al menos hasta los 70 m el volumen medido por el SRM E17 comparte ambos tipos de terrenos. Partiendo de 30-50 ohm.m en superficie, aumenta la resistividad con la profundidad hasta los 60 ohm.m a los 22 m, y disminuye de nuevo a partir de los 50 m, alcanzando valores de 30 ohm.m hasta el final.

El prolongado contraste lateral de materiales involucrado en la medición de este SRM hace que su inversión no pueda ser considerada con total fiabilidad, aunque tampoco resulte totalmente descartable. El parámetro T_2^* vale 500 ms, no siendo aceptable la determinación de T_1^* .

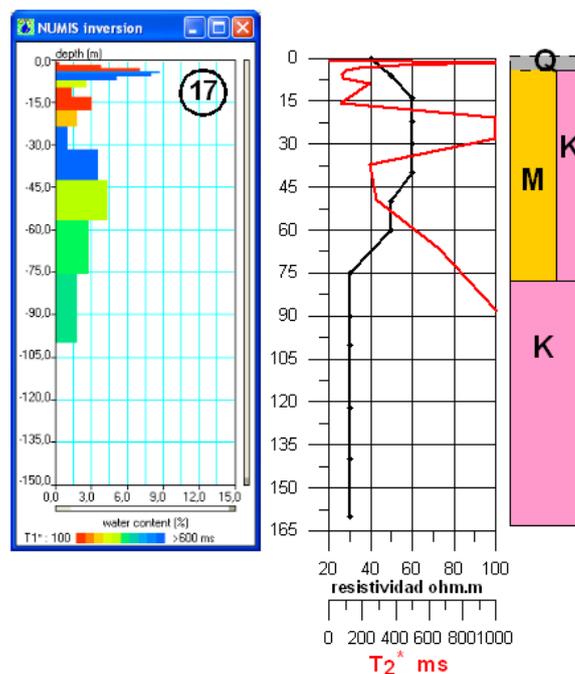


Fig. 11.45 Izquierda: Resultado del SRM E17 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable con reservas.

El **SRM E18**, próximo al borde norte de la Laguna Grande, tiene una antena de 100 m sobre materiales del Cuaternario probablemente suprayacente al Muschelkalk. Proyectado sobre el PE8 (posición -100 a 143), Figura 11.46, la distribución de resistividad indica la presencia casi total del Muschelkalk, pasando al Keuper a mayor profundidad, siendo por lo tanto un modelo apto para la inversión de los datos del SRM en 1D.

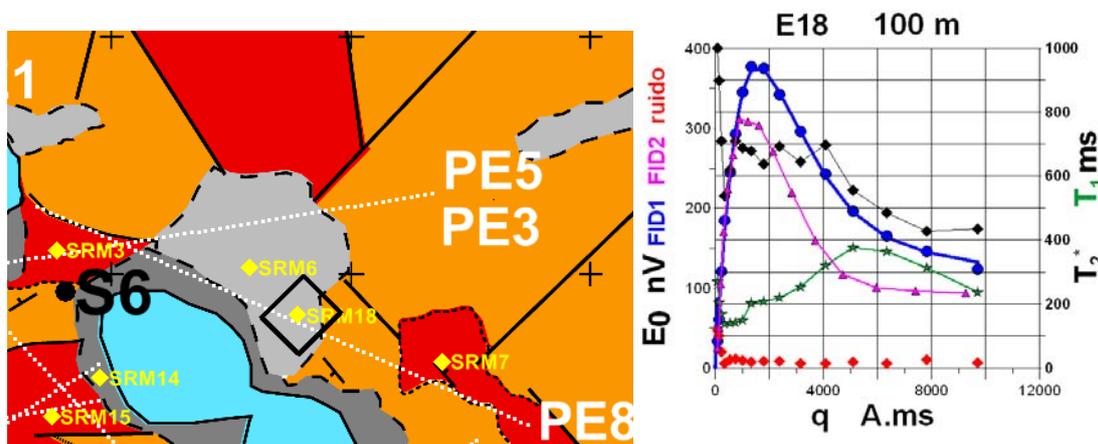


Fig. 11.45 Situación de la antena del SRM E18 y sus curvas $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1^*(q)$.

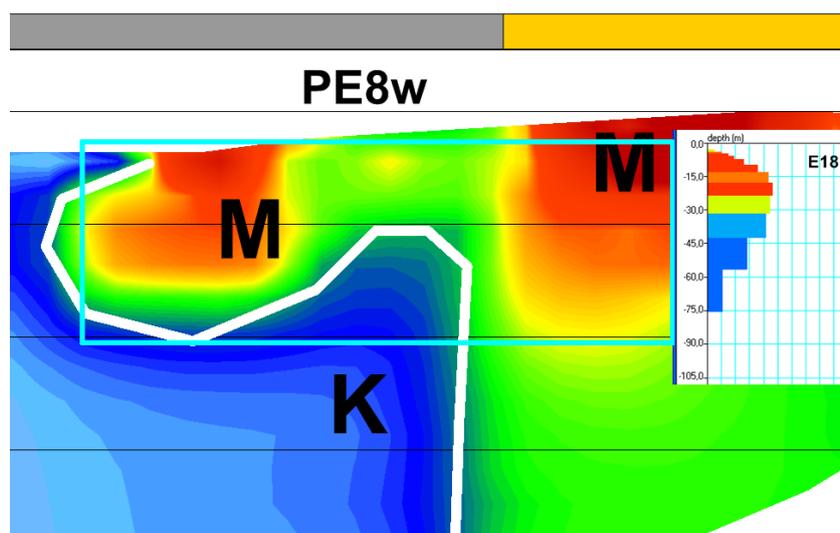


Fig. 11.46 Fragmento del perfil PE8 involucrado en la medición del SRM E18. El recuadro azul indica el volumen del subsuelo integrado en la medición del SRM.

La interpolación de valores de resistividad (Figura 11.47) es de 30-50 ohm.m en los primeros 6 m, probablemente debido a la presencia de materiales cuaternarios, aumentando a más de 100 ohm.m entre 6 y 14 m, donde pasa de nuevo a 50-60 ohm.m hasta los 30 m, cambiando bruscamente a menos de 30 ohm.m hasta el final. La base del acuífero, que según su curva $E_0(q)$ ha sido completamente determinada por el SRM, la constituyen materiales del Keuper. El parámetro T_2^* llega a alcanzar valores de 700 ms, que disminuye con la profundidad, aunque siempre superior a T_1^* , que por lo tanto no puede considerarse. Esto indica un aumento de la permeabilidad (fracturación) con la profundidad, y luego una nueva disminución, lo que podría justificar la disminución del contenido de

agua a partir de los 20 m, donde alcanza el máximo del 7 %. La variación de resistividad dentro de las calizas debe estar correlacionada con el grado de fracturación, como parece indicar la inversión del SRM, en la que tienen menor transmisividad (menor valor de T_2^*) los tramos de mayor resistividad, como se aprecia claramente en la Figura 11.47..

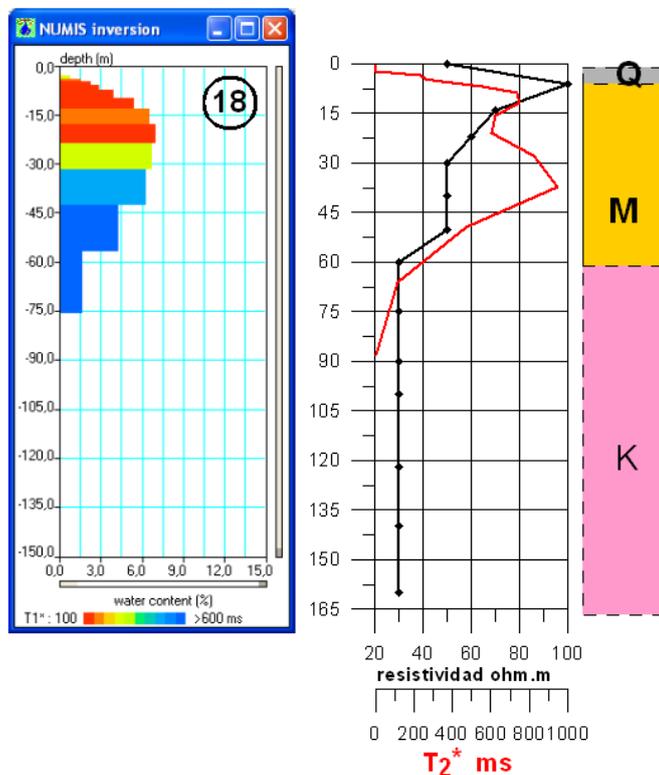


Fig. 11.47 Izquierda: Resultado del SRM E18 (distribución $w(z)$ y $T_1^*(z)$). Centro: resistividad deducida por interpolación y valor de T_2^* . Derecha: estimación de la litología más probable involucrada en el volumen medido. Q: Cuaternario; K: Keuper; C: Cretácico; M: Muschelkalk. El resultado de la inversión es fiable.

En definitiva, se ha encontrado que la situación o disposición de las capas de diferente litología es aceptablemente un modelo de capas horizontales, dentro del volumen investigado por el SRM, para los SRM E2 E8, E10, E12, E14, E16, E17 y E18, para los que el resultado de la inversión realizada con un modelo 1D resulta fiable en cuanto a la distribución del contenido en agua con la profundidad $w(z)$. Este resultado es dudoso para los SRM E4, E5, E7 y E9, y no es aceptable para el resto (E1, E13, E3, E6, E11 y E15).

12 PARÁMETROS DETERMINADOS POR LOS SRM

En el análisis cualitativo de los SRM efectuado en el Informe de 2008 se estableció que la morfología de las curvas $E_0(q)$ podía ser utilizada para clasificar cualitativamente los lugares de medición desde un punto de vista hidrogeológico (estimación relativa de la profundidad y potencia del acuífero). La clasificación que se estableció en 2008 tiene que ser ligeramente modificada a la luz de la verificación de la validez de la hipótesis de un subsuelo compuesto por capas horizontales que fue entonces asumida. De esta forma los SRM podrían agruparse, según la morfología del acuífero:

- 1/ MRS E1-13 y E11: curvas sin señal del agua.
- 2/ MRS E3, E7 y E15: curvas en teoría correspondientes a acuíferos profundos, pero que en realidad están reflejando casos en que el acuífero ocupa sólo una parte del volumen investigado por el SRM.
- 3/ MRS E12, E14 y E17: acuífero superficial potente con detección del final, excepto el E17 que no lo detecta.
- 4/ MRS E2, E10 y E16: acuífero más profundo que el tipo 3, sin detección de su final, excepto el E16, que si lo detecta.
- 5/ MRS E6 y E18: acuífero superficial con detección de su final, aunque el E6 puede estar distorsionado por el mismo efecto que los del grupo 2/
- 6/ MRS E4, E5, E8 y E9: acuífero superficial sin clara detección de su final. El E9 podría incluirse en el grupo 2/.

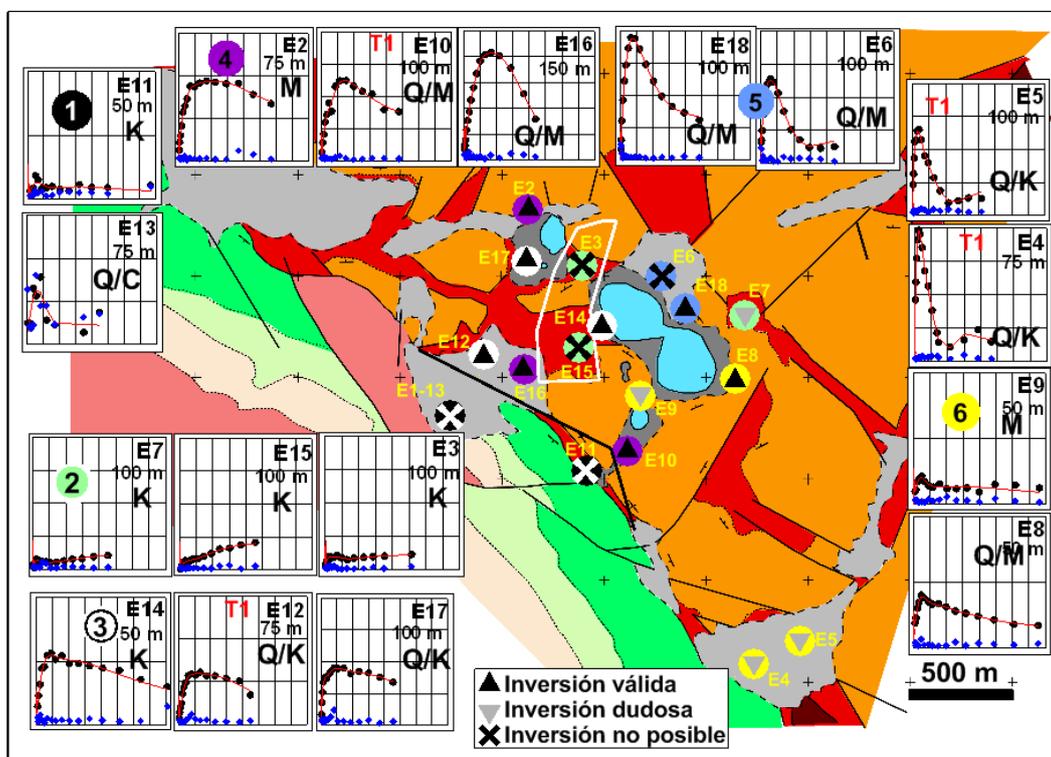


Fig. 12.1 Distribución geográfica de los SRM según su clasificación por la morfología de su curva $E_0(q)$ y posición de los diferentes grupos sobre la geología. Para cada SRM se indica las dimensiones de la antena utilizada y el tipo de litología sobre la que está extendida (Q: Cuaternario; K: Keuper; M: MUschelkalk), siendo en los casos en que hay recubrimiento de Cuaternario una suposición no siempre válida. La indicación T1 significa que se ha podido determinar correctamente el valor de dicho parámetro.

La profundidad del techo del acuífero y/o de la parte del acuífero con mayor contenido en agua va siendo mayor en el orden de los grupos 6-5-3-4. La distribución geográfica de estos grupos se muestra en la Figura 12.1. A pesar de la complejidad geológica de la zona, puede observarse cierta relación entre el tipo de curva y la litología donde está realizado el SRM. El grupo 1 (puntos negros de la Figura 12.1) se localiza en la inmediata proximidad de las calizas cretácicas, denotando la no existencia de agua o al menos que está más profunda de 75 m, definiendo por lo tanto un límite del acuífero triásico. El grupo 2 (puntos verdes de la Figura 12.1) corresponde a medidas efectuados sobre afloramientos del Keuper, informando de que aunque estos materiales no contienen agua el volumen investigado por los SRM detecta la presencia de calizas saturadas bajo o junto al Keuper en esos lugares. El tipo 3 (puntos blancos en la Figura 12.1) está medido sobre el Cuaternario que, probablemente, es suprayacente al Keuper (según la cartografía), y muestran la presencia de agua desde poca profundidad y al menos hasta los 100 m; esto puede interpretarse como que aunque el acuífero pueda comenzar en los materiales del Cuaternario, el Keuper o no existe en estos lugares, o es de muy poca potencia, habiéndose detectado el agua contenida en rocas del Muschelkalk que se encuentran por debajo. Los grupos 4, 5 y 6 (puntos morados, azules y amarillos respectivamente, en la Figura 12.1) están medidos sobre Muschelkalk, cubierto por el Cuaternario en algunos sitios, aunque el E16, E4 y E5 podrían estar sobre Keuper; muestran la presencia de agua de tal forma que el acuífero parece estar más superficial junto a las lagunas, aumentando su profundidad con la distancia a estas. En cualquier caso, dada la gran heterogeneidad y anisotropía encontrada, el pretender encontrar morfologías con carácter general o regional puede resultar bastante aventurado.

Desde el punto de vista cuantitativo, debido a la inconsistencia del sistema disponible para su medición, el parámetro T_1^* sólo ha resultado correctamente evaluado para los SRM E10 y E12, siendo aceptable para el E9, y posiblemente para el E4 y E5 si el tiempo de relajación no ha sido influido por el gradiente magnético en estos sondeos; esto hay que tenerlo en cuenta en la lectura del resultado de la inversión, que sólo será válida para la porosidad o cantidad de agua libre detectada con la profundidad $w(z)$, pero no para el tiempo de relajación $T_1^*(z)$. Para todos los casos es siempre válida la deducción cualitativa de la existencia o no de agua, así como el valor del parámetro T_2^* (también relacionado con la permeabilidad), ya que ambos parámetros están basados en las mediciones de campo o curva de campo $e(t)$, y no están afectados por las condiciones geométricas.

Teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por las observaciones anteriores sobre la validez de los parámetros determinados, se observa que dentro de las calizas del Muschelkalk la disminución de la resistividad se corresponde en general con un aumento del tiempo de decaimiento detectado en el SRM, lo que lleva aparejado un aumento de la permeabilidad. Este hecho unido a la baja porosidad calculada en la inversión de los SRM puede interpretarse como una validación de la hipótesis de la existencia de fracturas, como indica el alto valor del tiempo T_1 y T_2^* .

En la Tabla 12.1 se resumen los parámetros deducidos de la inversión de los SRM para los que es fiable el resultado de utilizar un modelo del subsuelo compuesto por capas horizontales (inversión

1D). Solamente para estos SRM son válidas las conclusiones obtenidas de tipo cuantitativo y cualitativo, excepto la apreciación de la existencia de agua, que es válida en cualquier caso, así como el valor medido para el parámetro T_2^* . Cuando es clara la presencia de dos tramos acuíferos diferenciados, la profundidad de la parte superior tiene dos cifras. La representación gráfica utilizada para la distribución $w(z)$ incluye, codificado en color, el valor del parámetro T_1^* , que sólo debe tenerse en consideración para los SRM E9, E10 y E12.

SRM	1D	T2 ms	T1 ms	profund. Sup.	potencia max	max. % agua	prof. Max %
1, 13	NO					0	
2	SI	350		5--10	>75	11	45
3	NO						
4	?	50	200	0	25	21	15
5	?	50	200	0	30	30	5
6	NO	650		5	35	5	15
7	?	400					
8	SI	500		0--5	>50	6	7--20
9	?	450	800	0--5	>50	4,5	7
10	SI	400	700	5--18	>100	6	40
11	NO					0	
12	SI	450	500	8--35	75	4,5	45
14	SI	600		5	50	15	45
15	NO	800					
16	SI	450		5--30	65	7,5	45
17	SI	500		2--30	>100	5	45
18	SI	700		5	65	7	20

Tabla 12.1 Resumen de los parámetros derivados de la inversión de los SRM con validez de la inversión utilizando modelos del terreno 1D. Los valores de los tiempos longitudinal T_1^* y transversal T_2^* se refieren a los medidos, y no a los obtenidos en la inversión.

Vista la poca fiabilidad del parámetro T_1^* en que se basó la clasificación efectuada en 2008, es preferible no utilizar dicho parámetro como discriminador de permeabilidad y clasificador de tipo de acuífero, aunque puede mantenerse la idea de que el acuífero no resulta de permeabilidad homogénea, sino que en todas las zonas la permeabilidad es mayor en la parte más profunda. Por lo que respecta a los valores cuantitativos de la cantidad y distribución del agua encontrada en la inversión, o solución $w(z)$, y manteniendo los grupos establecidos para la interpretación cualitativa de $E_0(q)$, su distribución sobre el mapa geológico se representa en la Figura 12.2.

La interpretación que puede hacerse de esta distribución por su relación con la geología y posición de las lagunas es la misma que la establecida para la función $E_0(q)$, con matizaciones cuantitativas cuando son posibles. El grupo 1 define el límite sur occidental de presencia de agua, junto al contacto con las calizas cretácicas. El grupo 2 representan lugares con muy poco agua, por estar ocupados fundamentalmente por materiales del Keuper, formando el E15 y E3 un pasillo de orientación Norte-Sur, que pasa entre las lagunas, donde la existencia de agua en los primeros 60 m es prácticamente

nula. Los grupos 3, 4, 5 y 6, pueden interpretarse como una indicación de la variación de profundidad del acuífero, que es más somero junto a las lagunas, excepto los E4 y E5 que suponen un caso aparte.

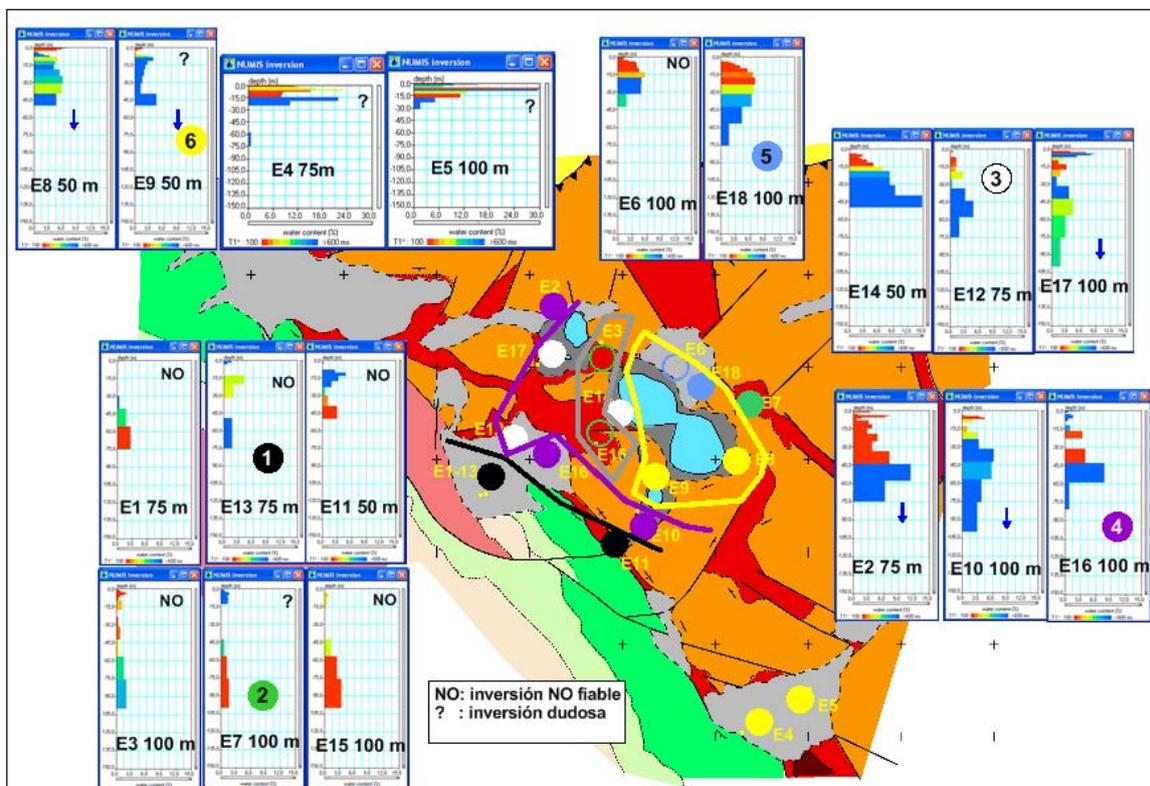


Fig. 12.2 Posición de los diferentes grupos sobre la geología, de acuerdo con la distribución de $w(z)$. La flecha azul indica la posibilidad de que el fin del acuífero no haya sido detectado por el correspondiente SRM. Las líneas amarilla y morada indican posibles zonaciones de profundidad del acuífero, creciente con la distancia a las Lagunas.

En la Figura 12.3 se representan de nuevo los gráficos $w(z)$ dispuestos según la posición geográfica del SRM. Las alineaciones SO-NE formadas por los SRM E16-E15-E14 y E1-E12-E17-E2 visualizan cómo la cantidad de agua aumenta hacia las lagunas, así como su proximidad a la superficie. Por el borde norte de las lagunas, SRM E3-E6-E18-E7 las medidas recogen la presencia de Keuper, manifestando poca presencia de agua (posiblemente debida al poco volumen de Muschelkalk integrado en la medición de dichos SRM), salvo en el E18. Con orientación NE-SO, por el lado oeste de las lagunas, la alineación E8-E9-E10-E11 vuelve a manifestar el aumento de la profundidad del acuífero hacia el sinclinal de Estopiñan, siendo mayor su potencia que en el lado norte, ya que no ha sido prácticamente detectado su final.

La variación del contenido en agua libre, porosidad secundaria en este caso, debe estar reflejando el grado de fracturación, que aumenta con la profundidad en todas las mediciones, volviendo a disminuir a mayor profundidad en el sector oriental. En casi todos los casos existe un primer tramo acuífero de menos de 5 m de potencia, separado del principal.

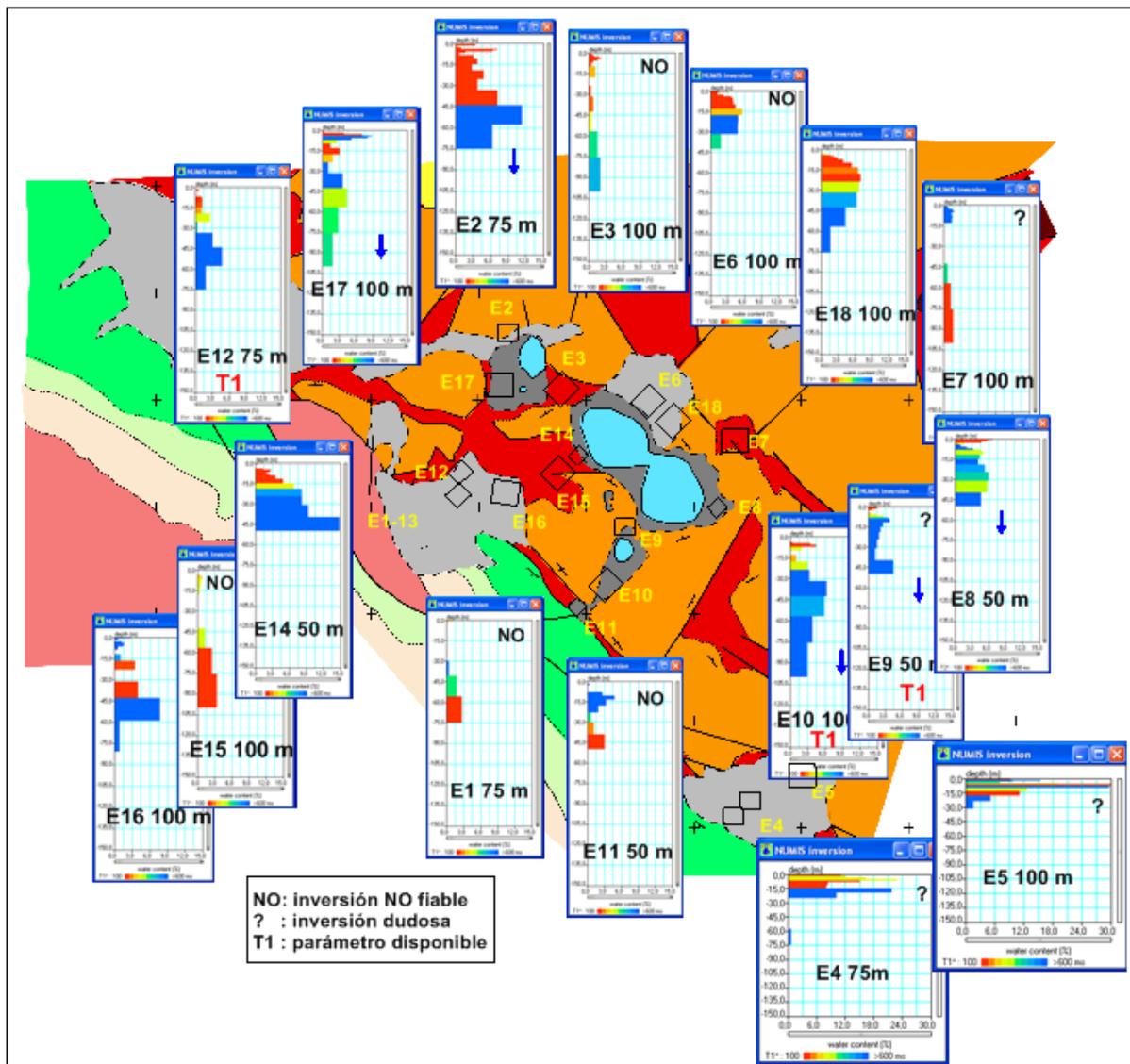


Fig. 12.3 Visualización de la interpretación de los SRM según su posición geográfica.

13 GEOMETRÍA DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DEDUCIDO DEL LOS SRM Y DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTIVIDAD

Una vez establecida la correspondencia entre la resistividad y la situación hidrogeológica en los lugares donde tanto los sondeos mecánicos como los SRM han detectado la presencia de agua, se puede hacer una clasificación de la resistividad en términos hidrogeológicos, como se propone en la Figura 13.1. La hipótesis finalmente establecida es que el agua está contenida en calizas fracturadas del Muschelkalk, no siendo evidente la existencia de cavidades, al menos de grandes dimensiones. El Keuper se considera acuitado, aunque en un origen pueda haber estado carstificado en sus tramos yesíferos.

Existen pocas dudas respecto de la asignación a zonas no saturadas de los tramos con resistividad superior a 200 ohm.m. Así mismo, valores inferiores a 10 ohm.m pueden clasificarse con seguridad como impermeables. En la generalidad de las situaciones, la zona saturada se ha localizado en el rango de 40 a 80 ohm.m, aunque no se puede descartar totalmente que valores de hasta 100-200 ohm.m puedan corresponderse con zonas que contienen un grado inferior de fracturación, con agua en algunas ocasiones. Así mismo, valores algo inferiores a 40 ohm.m pueden también contener agua. La clasificación que se ha hecho es por lo tanto indicativa de la generalidad de los casos, pudiendo haber excepciones.

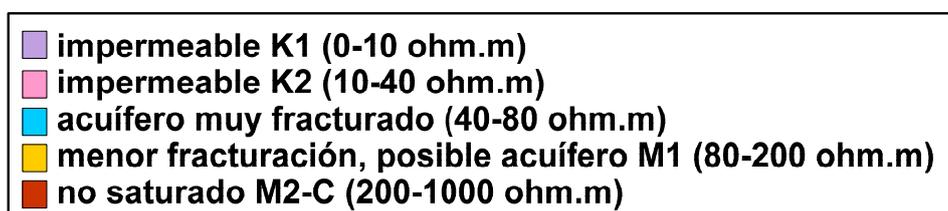


Fig. 13.1 Clasificación de rangos de resistividad en términos hidrogeológicos

Con esta clasificación se han vuelto a trazar las secciones geoeléctricas, utilizando en esta ocasión la representación de la resistividad de las celdas de inversión de los PE, ya que son las que proporcionan el detalle más fidedigno de los valores asignados en la inversión (menor distorsión por los procesos de interpolación). La lectura de las secciones puede hacerse siguiendo el código de color de la Figura 13.1. No obstante debe tenerse en cuenta que en ocasiones la transición entre valores de resistividad extremos genera lógicamente una zona de valores intermedios que puede carecer de significado. Junto a esta nueva representación se reproducen los perfiles de resistividad con la paleta de colores utilizada en el capítulo 9, a la que se ha superpuesto una trama indicativa de la litología más probable. Se incluyen también las funciones de distribución de agua para los SRM cuya inversión es fiable, y las curvas de campo $E_0(q)$ de los restantes sondeos. Por acuífero nos referimos en esta descripción al conjunto de rocas que presentan un rango de resistividad de 40 a 80 ohm.m. El término “permeabilidad” será utilizado como sinónimo de fracturación, deducida de la

mayor o menor resistividad. A las rocas supuestas no fracturadas o masivas se las denominará también “no saturadas”.

Todo el borde norte de la Laguna Grande, PE5 (Figura 13.2 es fundamentalmente un acuitardo, que se introduce entre la Laguna Grande y la Pequeña. El Muschelkalk aparece en contacto verticalizado con el Keuper mostrando dos zonas potencialmente acuíferas de los extremos oriental y occidental, que aparecen incomunicadas.

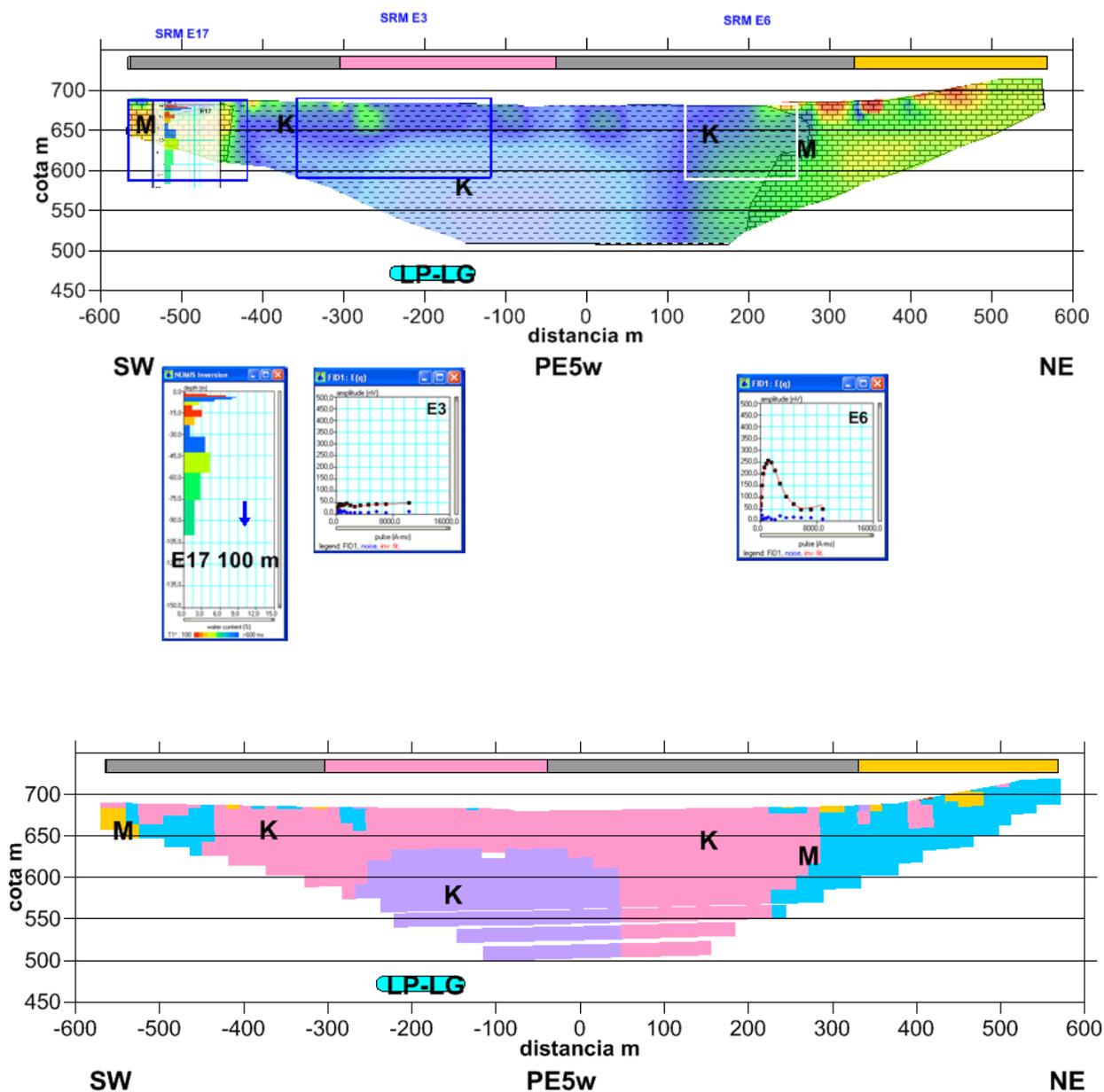


Fig. 13.2 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE5

Por el lado norte, pero a mayor proximidad de las lagunas, en el PE8 (Figura 13.3) sigue existiendo la misma estructura, aunque el Muschelkalk también se dispone suprayacente al Keuper. El acuífero de la porción meridional puede prolongarse a mayor profundidad que la investigada por los SRM, y parece estar fragmentado por zonas impermeables con disposición vertical, como la situada entre las posiciones 200-300 m (materiales del Keuper o intercalación de arcillas en el Muschelkalk ζ).

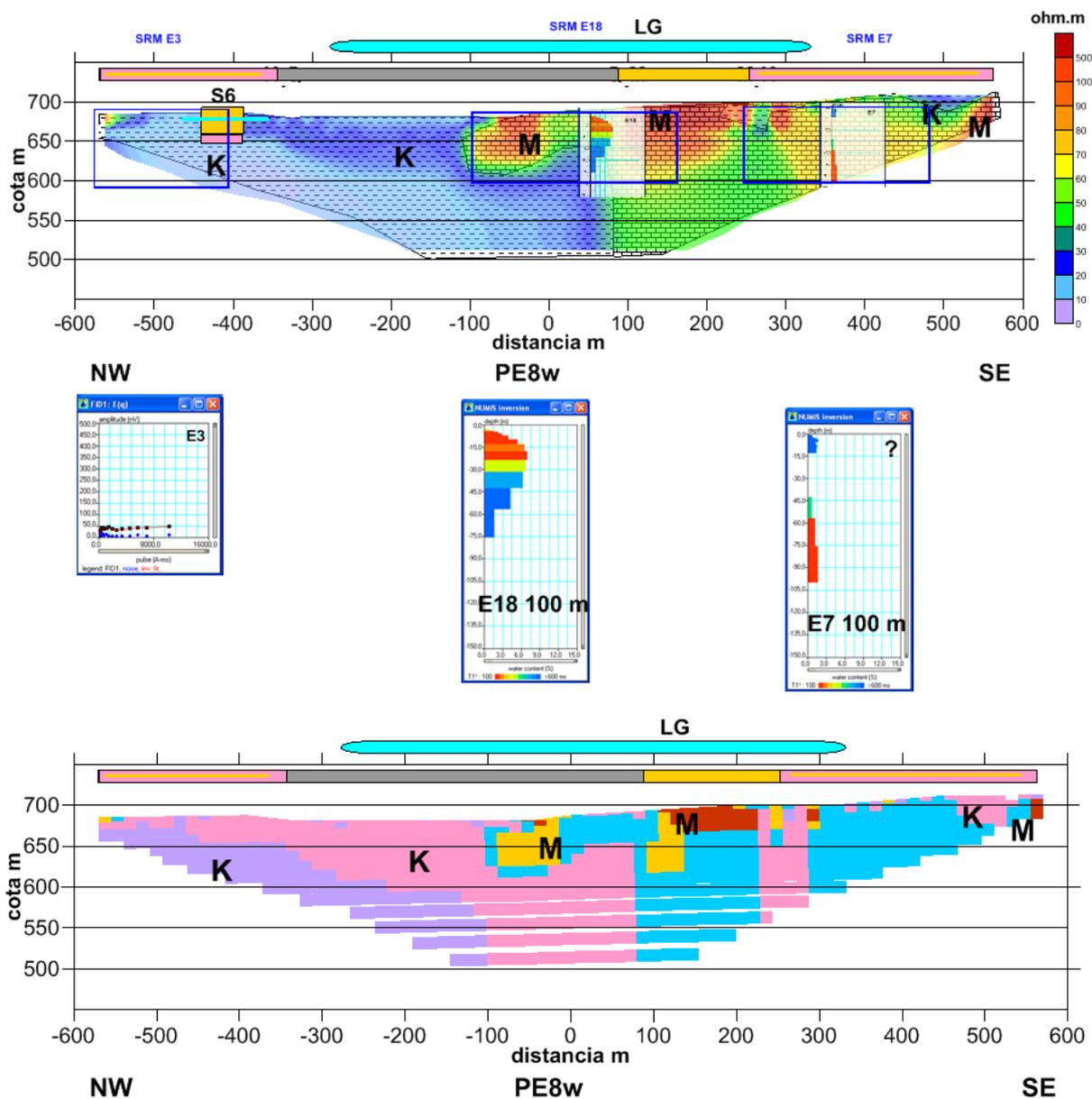


Fig. 13.3 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE8

Por el borde sur de las lagunas, el PE9 (Figura 13.4) tiene la misma estructura del PE8, apareciendo un notable aumento de la parte ocupada por Muschelkalk suprayacente al Keuper. La porción más oriental es muy compleja, dando lugar a la aparición de zonas de “acuífero vertical” (como en las posiciones 200-300 m) que pueden ser un efecto de la transición de valores, sin significado hidrogeológico. Las zonas potencialmente acuíferas aparecen como compartimentos incomunicados, con mayor contenido en agua en la zona del SRM E14 que en el SE, donde el acuífero puede alcanzar mayor profundidad que la detectada

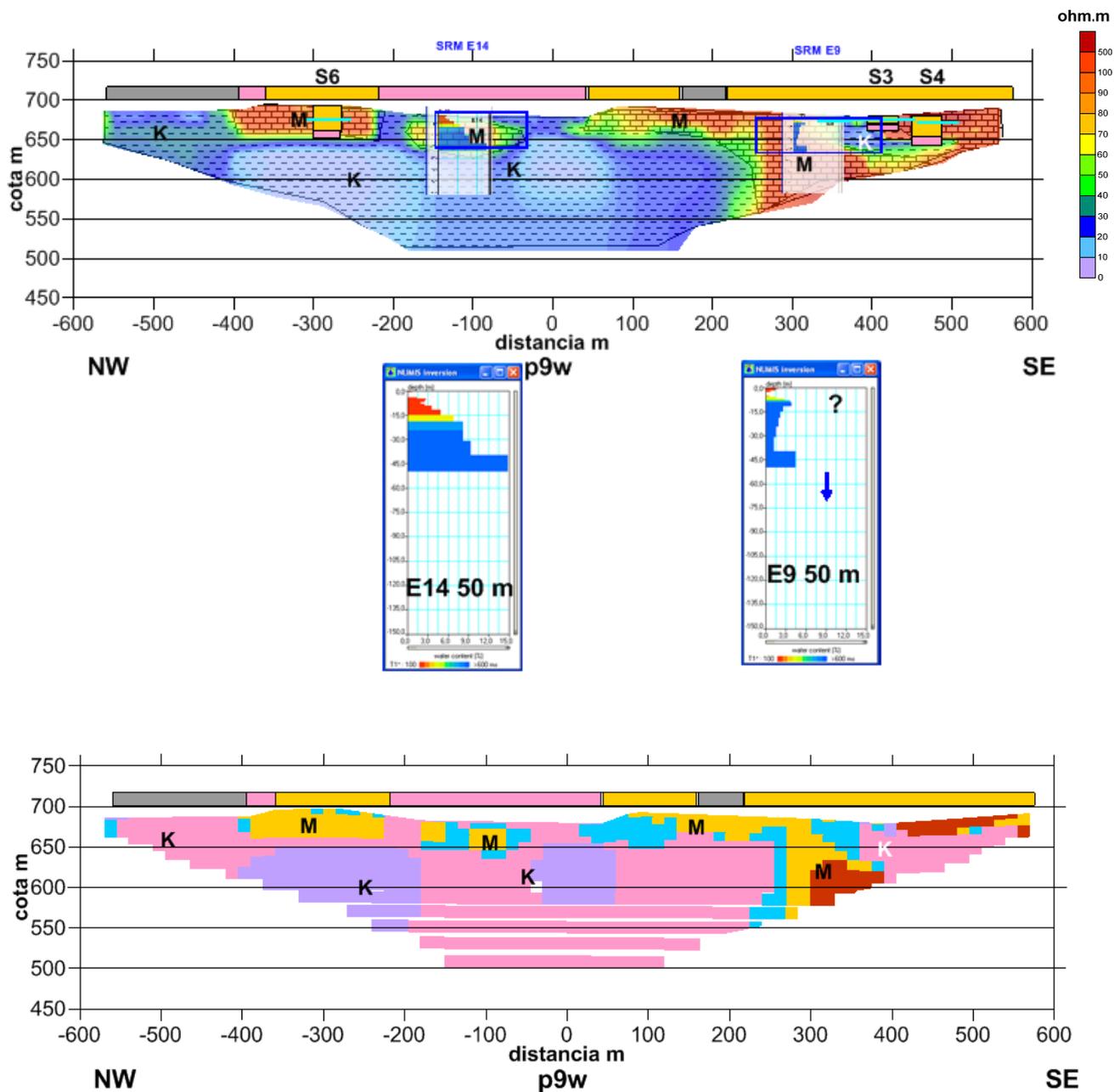


Fig. 13.4 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE9

La complejidad estructural aludida en el sector oriental del PE9 es recogida por el PE10 (Figura 13.5), que cierra el borde sur de la laguna grande. Presenta una estructuración hidrogeológica más compleja que la del borde norte, ya que además de encontrarse el Muschelkalk suprayacente y en contacto verticalizado con el Keuper, aparece también infrayacente. El sector oriental del acuífero, así como la porción central recogida por el sondeo mecánico S3, parecen incomunicadas con el resto del acuífero detectado por el SRM E9, separados por un Keuper impermeable.

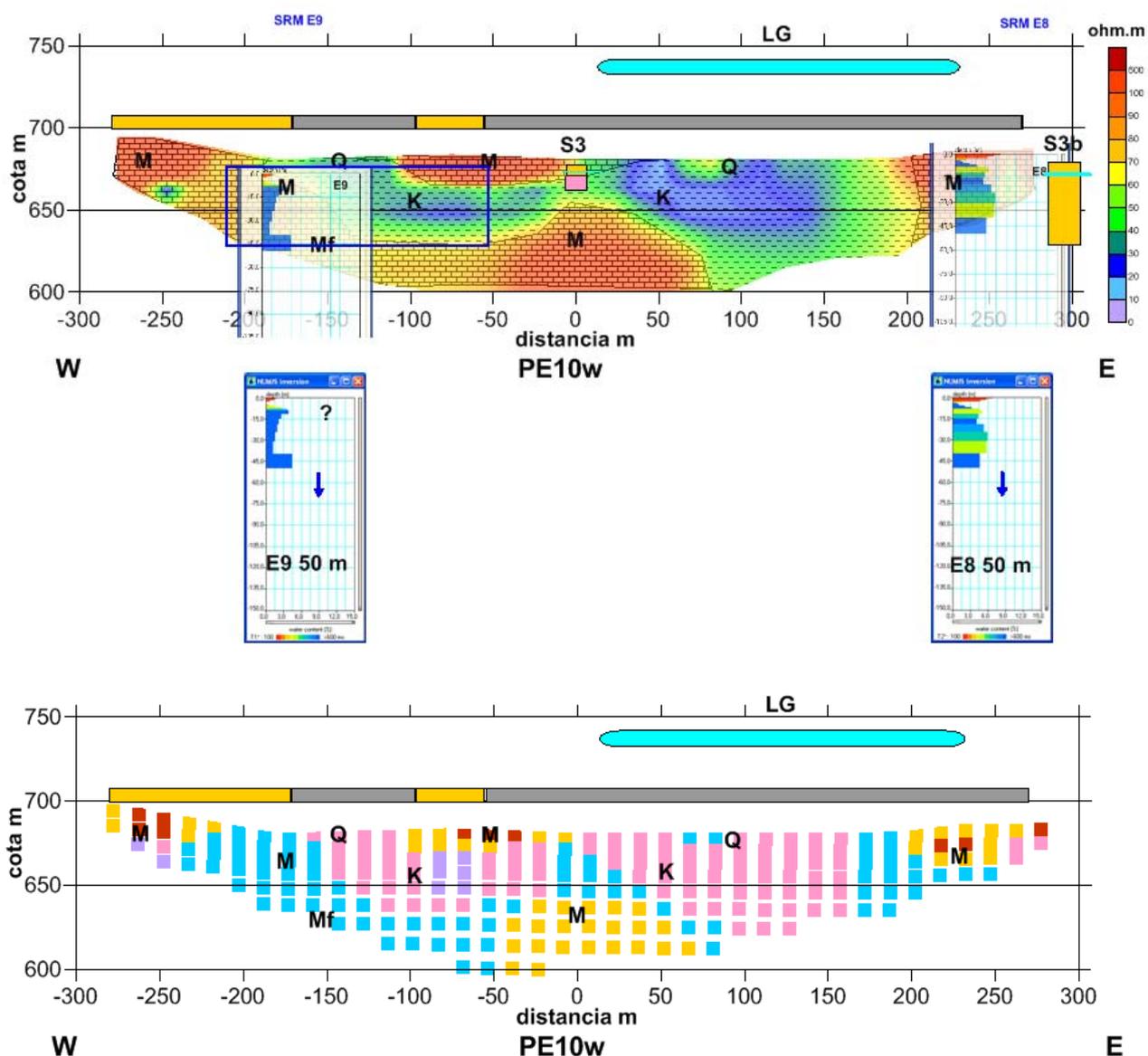


Fig. 13.5 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE10

En el perfil transversal PE7 (Figura 13.6) el acuífero aparece más continuo, aunque la zona entre las posiciones -300 y 300 es de ambigua interpretación, ya que la distribución de resistividad proporcionada por los dispositivos Wenner y Schlumberger difiere sustancialmente. En este esquema se ha adoptado por una mezcla de soluciones en la trama indicativa de litología, manteniendo la clasificación de resistividad Wenner en la asignación hidrogeológica. Cabe destacar en este perfil la mayor abundancia de calizas menos fracturadas, con una disposición de tal forma que el grado de fracturación aumenta con la profundidad (disminución de la resistividad), y el acuífero es más profundo que lo detectado por los SRM.

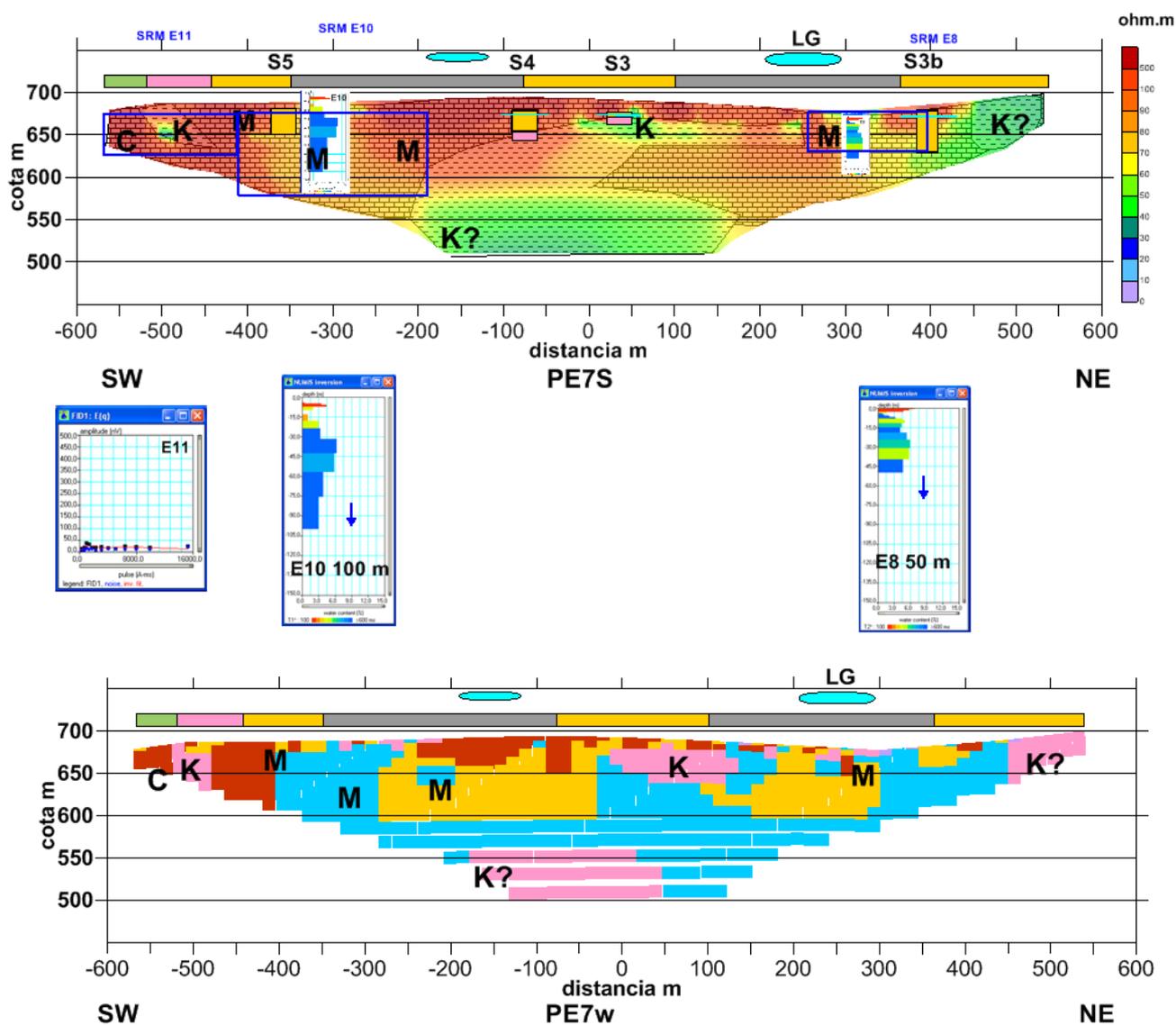


Fig. 13.6 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE7

La estructura reflejada por el siguiente perfil transversal hacia el Norte, PE6 (Figura 13.7), es la simétrica de la estructura de los perfiles PE6 y PE9, con un potente acuífero en el extremo meridional, que se prolonga en el Muschelkalk suprayacente al Keuper en el tramo central, y la presencia nuevamente de calizas saturadas en el extremo septentrional. El tramo entre -400 y -100 m, asignado a materiales del Paleoceno-Eoceno podría ser un punto de unión con el acuífero de Estopiñan; sin embargo, los materiales del Cretácico del extremo SO aparecen como rocas muy compactas e impermeables. La fragmentación del acuífero es notable en este perfil, sin aparente conexión entre la zona norte y el resto. La fracturación del tramo calizo del Muschelkalk aparece invertida respecto del PE7, apareciendo más fracturada la zona más superficial.

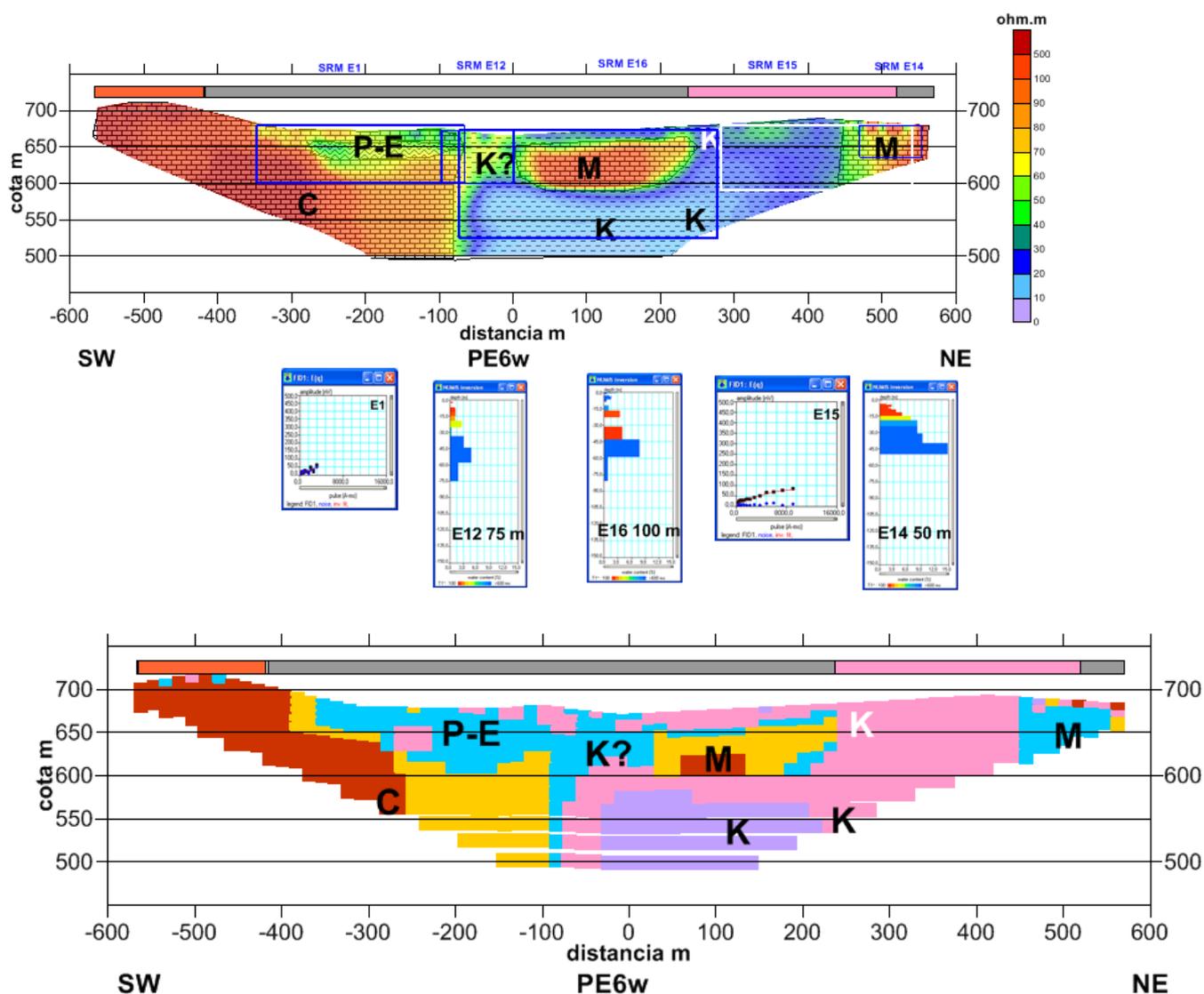


Fig. 13.7 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE6

La situación que presentan los perfiles PE2 (Figura 13.8) y PE1 (Figura 13.9) es muy similar a la del PE6, mostrando un acuífero superficial, limitado por un impermeable de gran potencia y extensión. El acuífero no parece tener contacto con las rocas del Cretácico, mostrándose sin embargo con mayor continuidad que en otros perfiles.

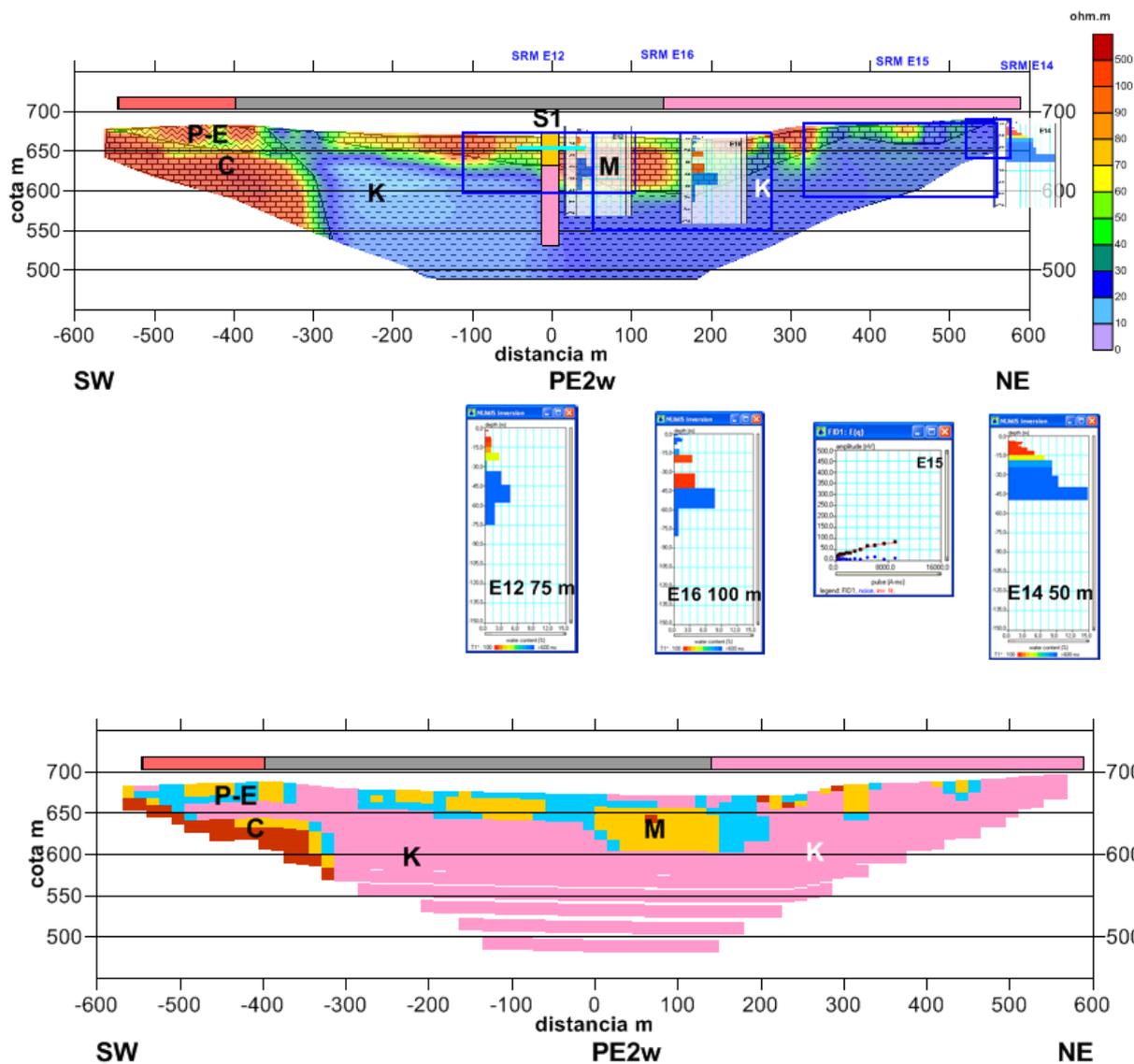


Fig. 13.8 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE2

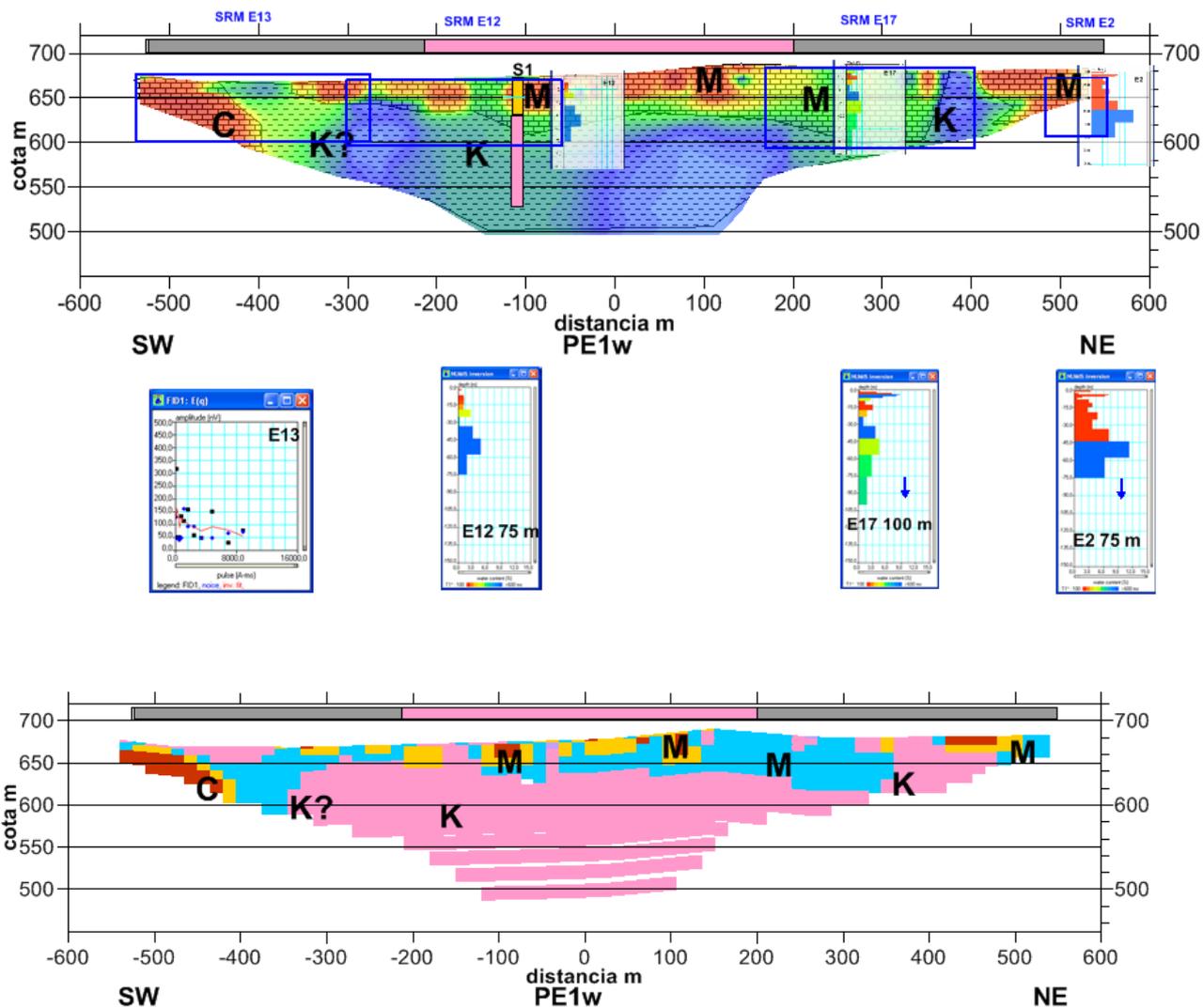


Fig. 13.9 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas en el PE1

Para obtener una visión de la evolución espacial del acuífero, así como de la conexión de las diferentes partes que se han observado en los cortes, se han trazado mapas a varias profundidades siguiendo el mismo criterio de clasificación de la resistividad. En este caso se ha seleccionado la presentación en forma de mapas de contornos a color lleno, ya que es la que produce la visión más adecuada (Figuras 13.10 a 13.23); no obstante, los mapas en forma de imagen se incluyen en el ANEXO V.

El borde sur de la zona estudiada está ocupado por materiales carbonatados no saturados, que presentan no obstante una cuña de rocas posiblemente más fracturadas en la mitad occidental. Esta cuña se abre progresivamente, de tal forma que a 30 m de profundidad todo el contacto entre el Triásico y Cretácico puede estar formada por rocas con cierto grado de fracturación. A partir de ese orden de profundidad, el contacto puede volver a estar ocupado por rocas masivas (no fracturadas).

En el flanco oriental el acuífero está escindido de norte a sur por rocas de menor fracturación, destacando un núcleo de rocas del Muschelkalk masivas (en la mitad oriental del PE8), enraizado hasta el orden de los 20-30 m de profundidad, a partir de donde sólo existen rocas saturadas, localizándose la base impermeable a partir de unos 100 m de profundidad.

El borde occidental está formado a unos 6 m de profundidad por rocas de menor fracturación, que a partir también de unos 30 m de profundidad son sustituidas por rocas saturadas, excepto en un sector (en la mitad sur del PE2), en el que son impermeables y pertenecientes al Keuper, así como en la parte norte de este borde. Ambos extremos impermeables acaban constituyendo una única base del acuífero a partir de unos 60 m de profundidad.

El borde norte está constituido en su parte central por rocas impermeables del Keuper, bordeadas por el acuífero, sobre todo en su parte oriental. Esta situación se mantiene en este flanco en toda la profundidad investigada, aunque posiblemente el acuífero desaparece a unos 100 m de profundidad.

La aparente compartimentación estanca de las rocas permeables que se observaba en los cortes, toma en su visión en planta un aspecto de mayor continuidad. El acuífero ocupa todo el sector central, limitado por los flancos antes comentados, quedando abierto en el borde norte y occidental, y en una pequeña porción del oriental, desconectado del anterior hasta unos 14 m de profundidad. Los materiales impermeables del Keuper van progresivamente invadiendo la zona, de tal forma que a partir de unos 30 m de profundidad puede hablarse de un acuífero oriental libre y otro occidental semi-confinado, comunicados por un canal, situación que se mantiene hasta al menos los 100 m de profundidad, a partir de donde es posible que todo el basamento sea impermeable.

Dicho basamento impermeable, presumiblemente del Keuper, presenta a partir de los 40 m una facies de menor resistividad (visible en el extremo norte del PE8), que va aumentando su cobertura con la profundidad al menos hasta los 90 m, a partir de donde comienza de nuevo a disminuir su sección aparente, que se prolonga hasta el fin de la profundidad investigada (160 m), configurando una estructura en forma de domo.

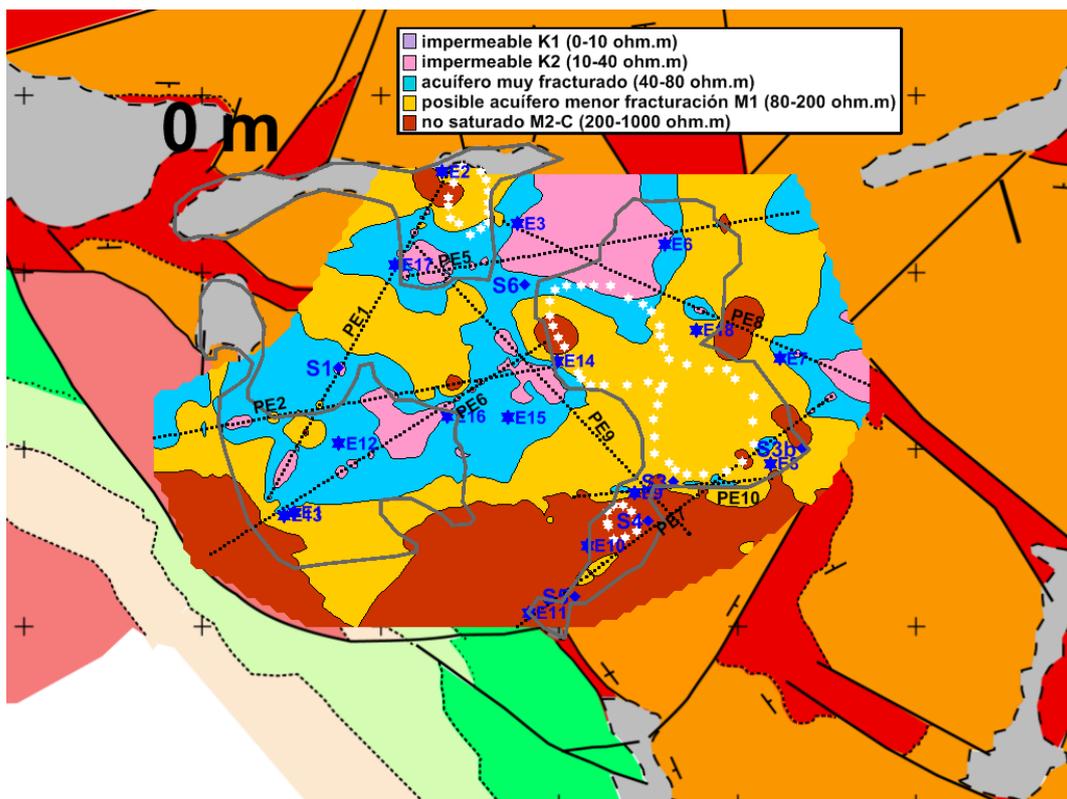


Fig. 13.10 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa de superficie.

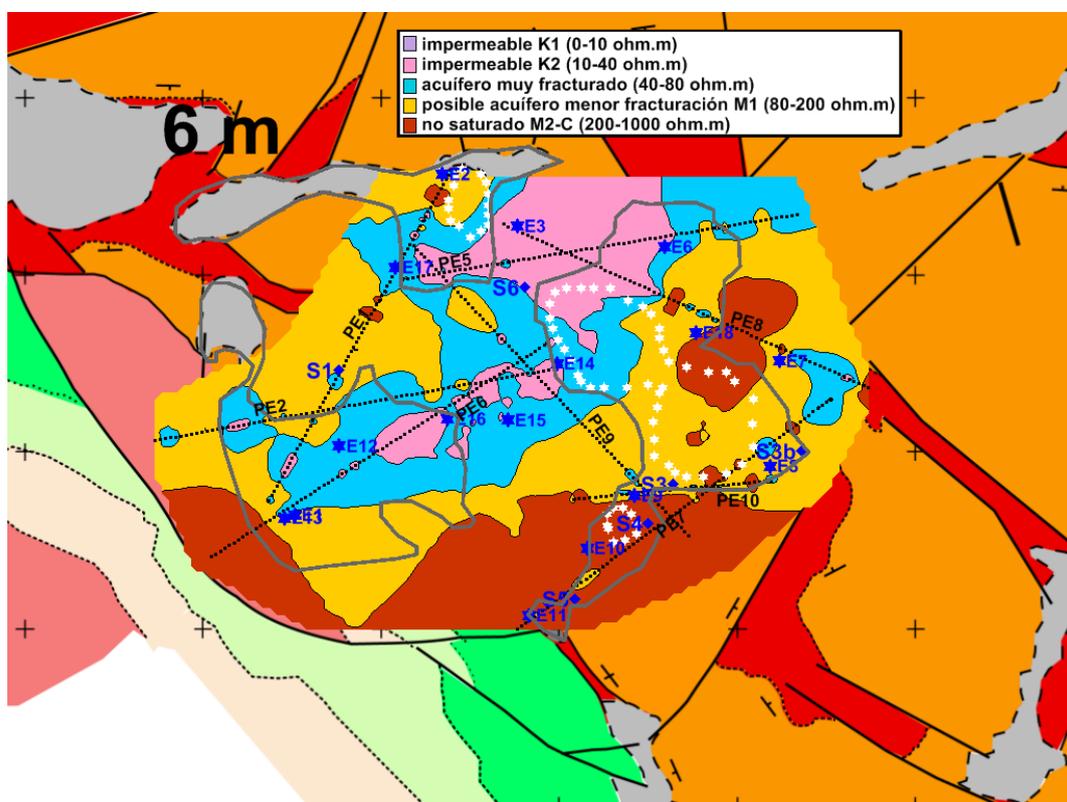


Fig. 13.11 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 6 m de profundidad.

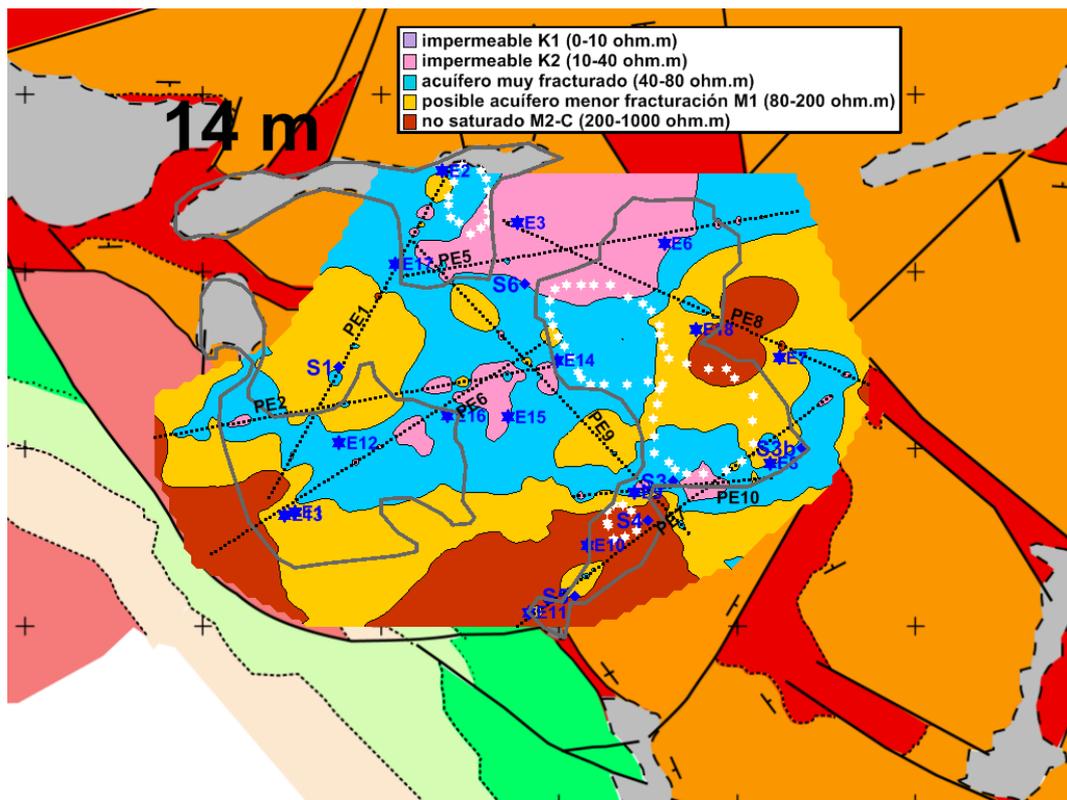


Fig. 13.12 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 14 m de profundidad.

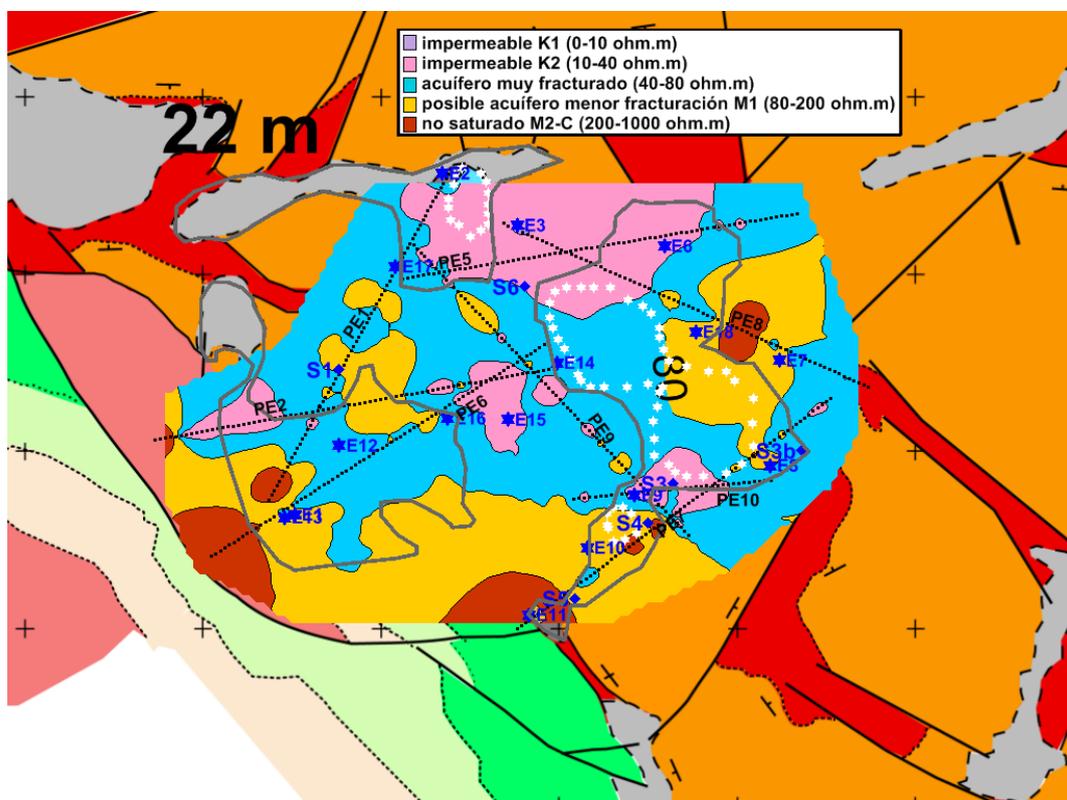


Fig. 13.13 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 22 m de profundidad.

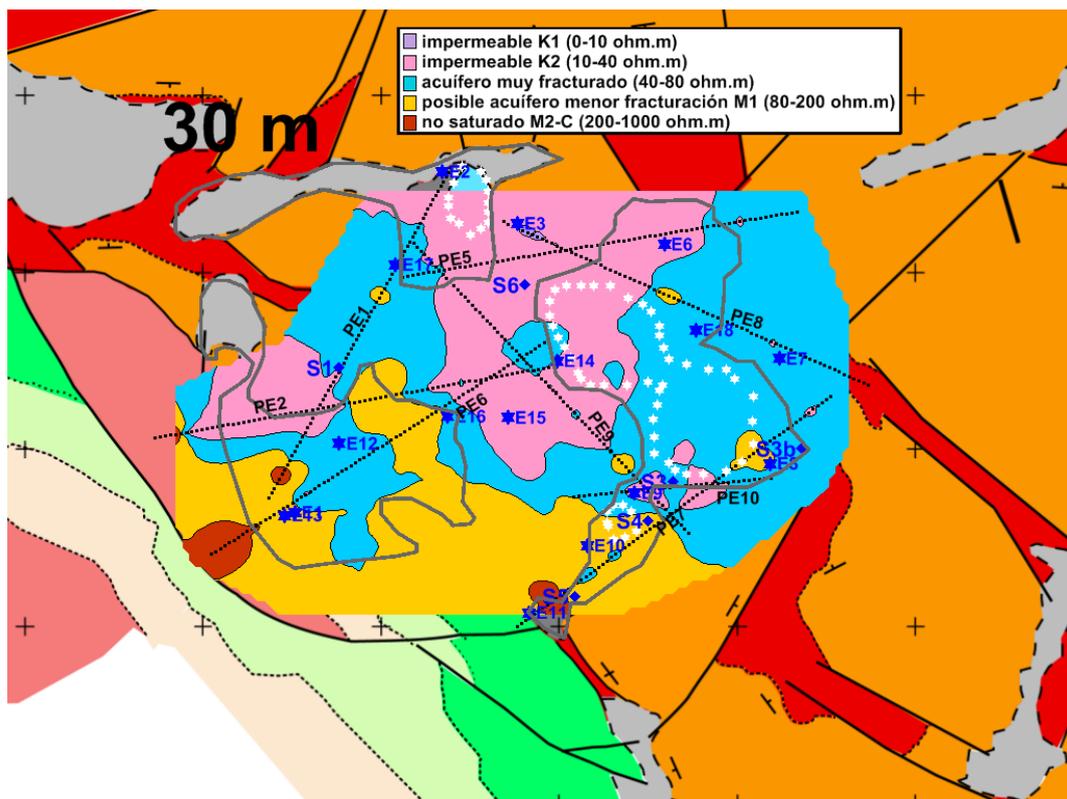


Fig. 13.14 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 30 m de profundidad.

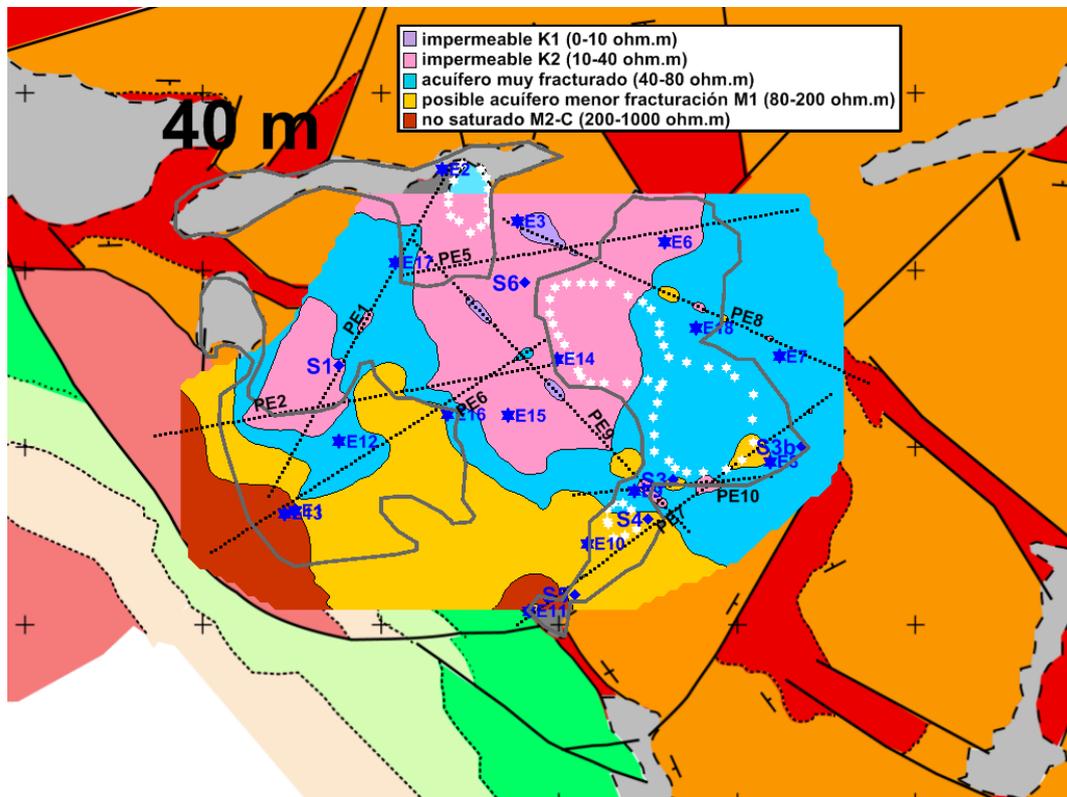


Fig. 13.15 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 40 m de profundidad.

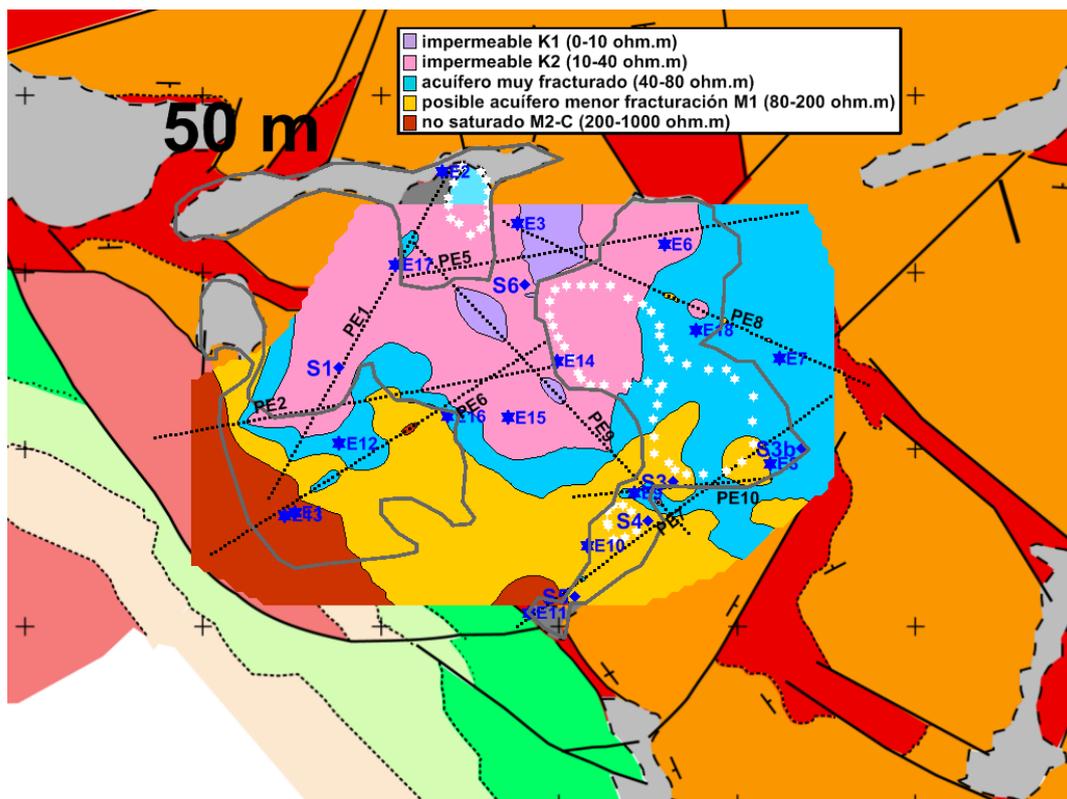


Fig. 13.16 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 50 m de profundidad.

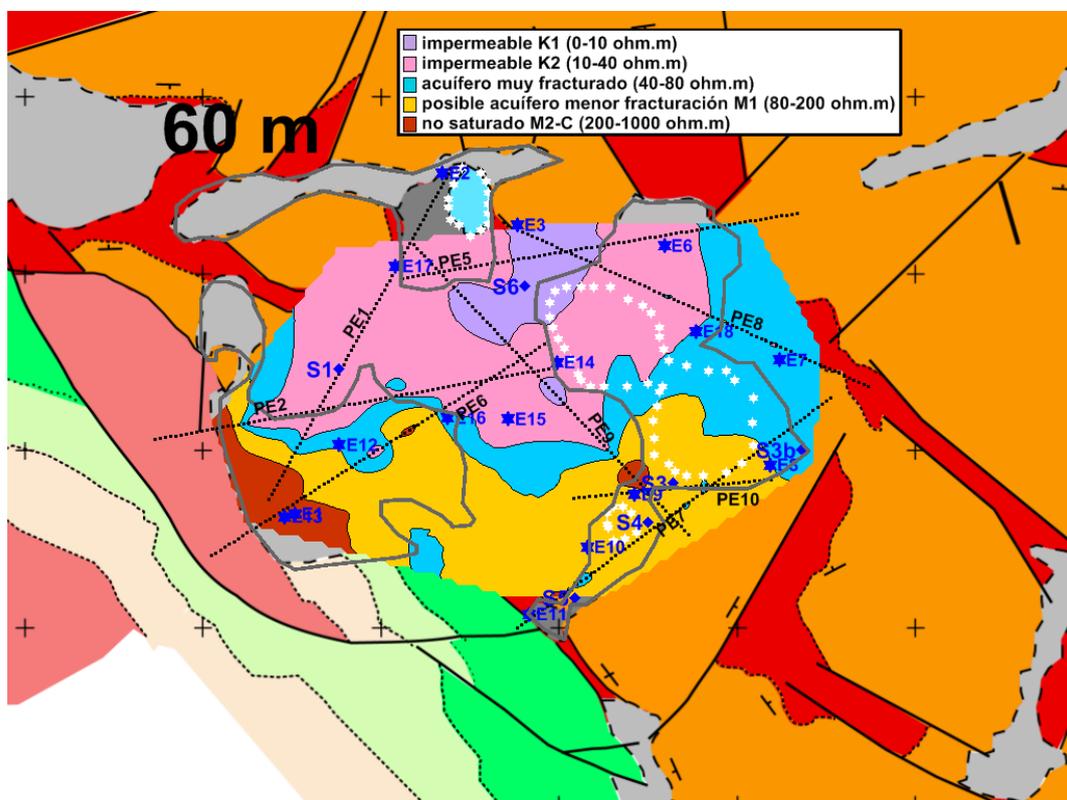


Fig. 13.17 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 60 m de profundidad.

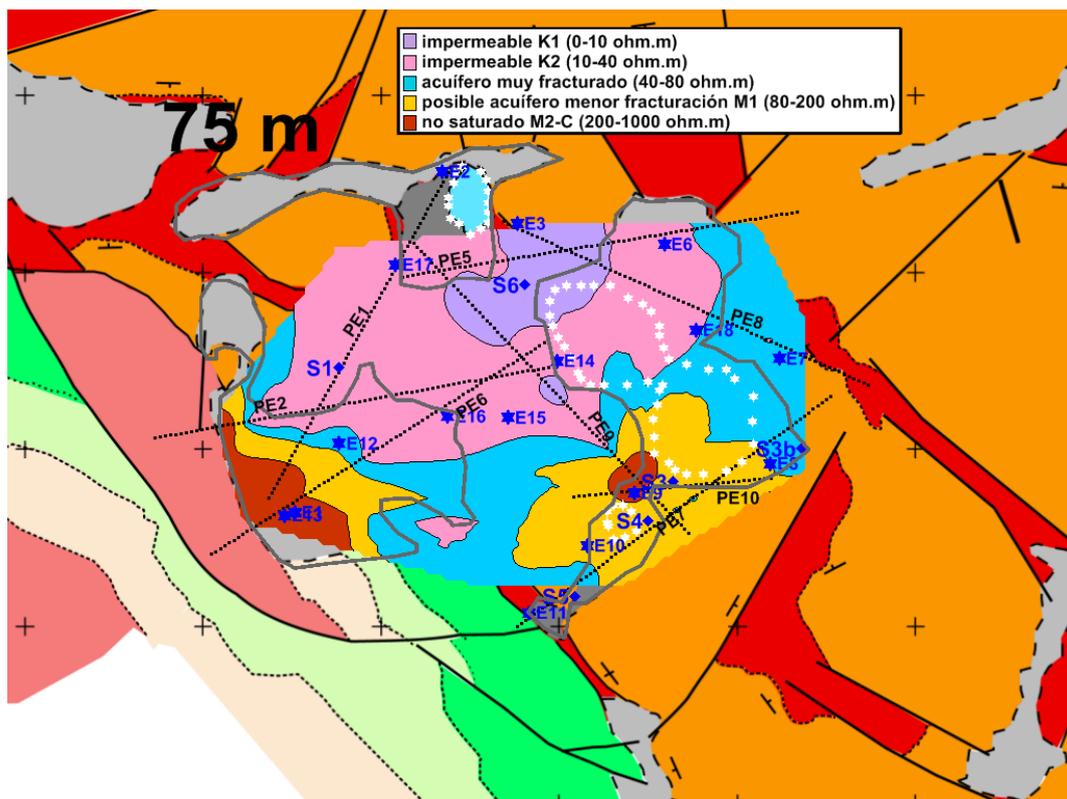


Fig. 13.18 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 75 m de profundidad.

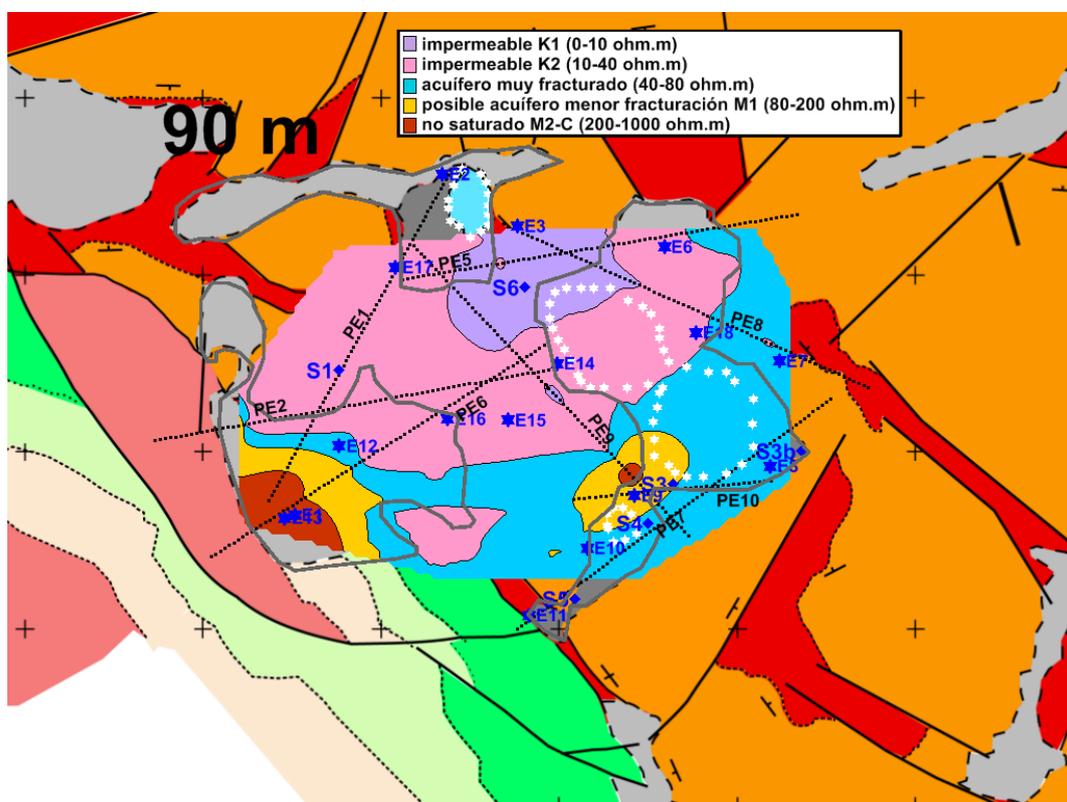


Fig. 13.19 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 90 m de profundidad.

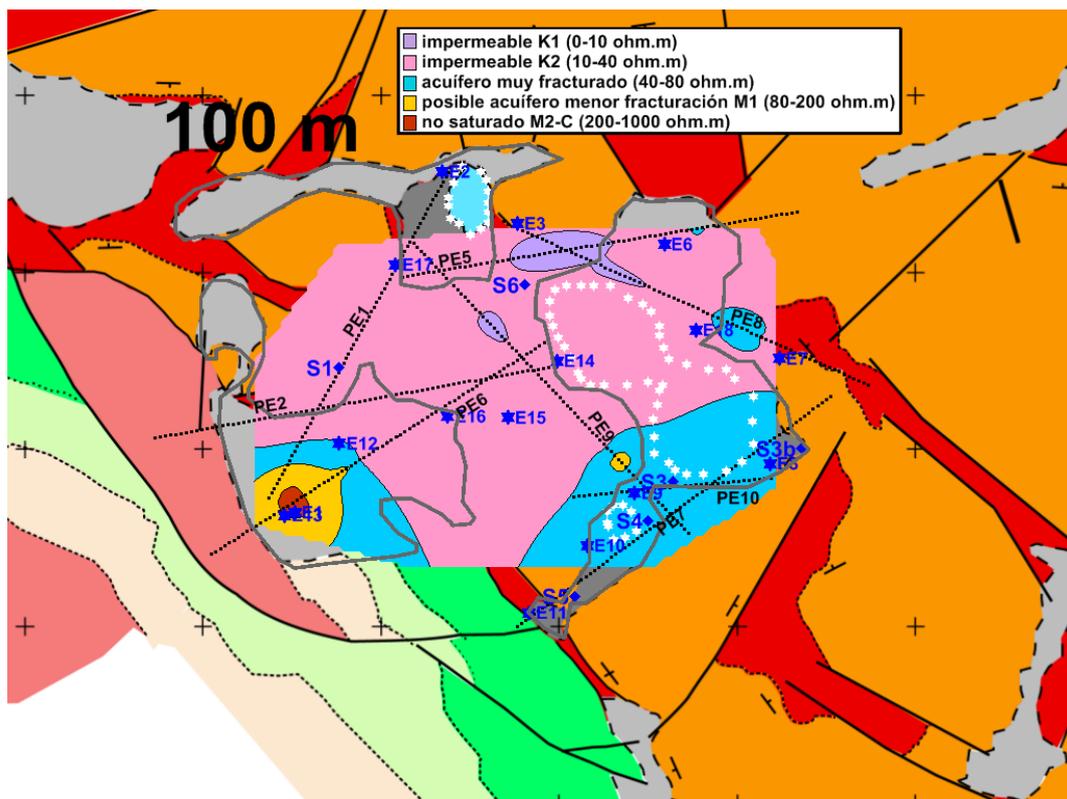


Fig. 13.20 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 100 m de profundidad.

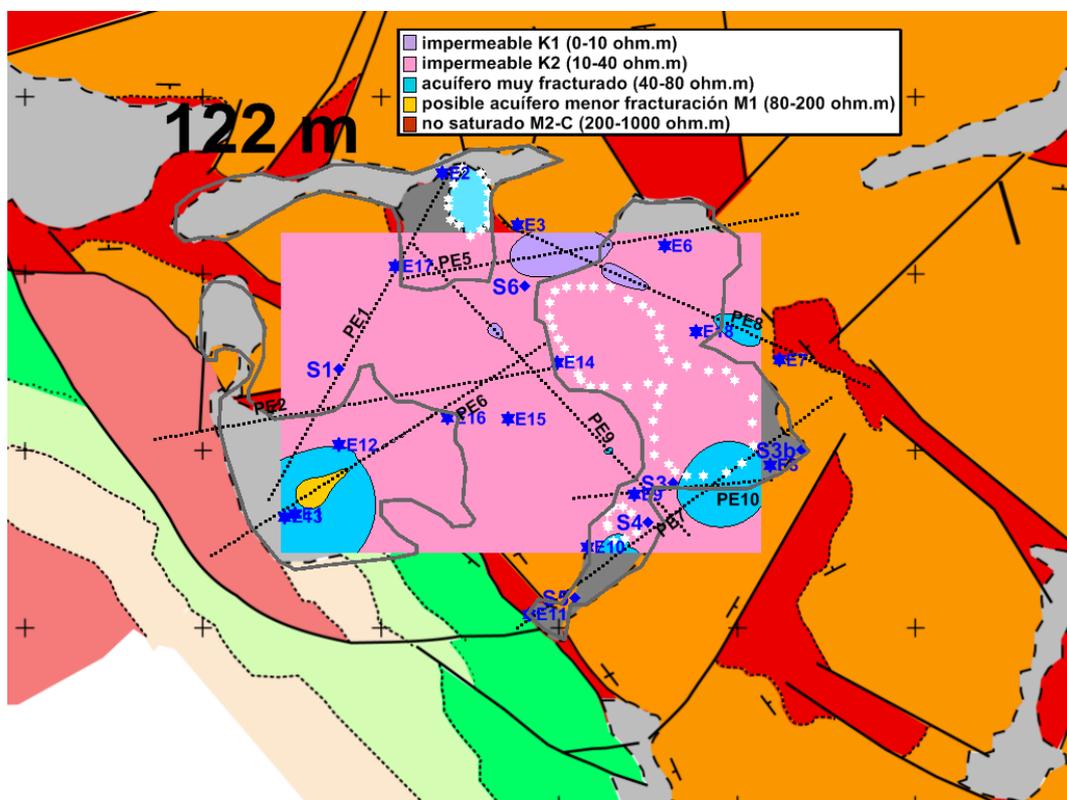


Fig. 13.21 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 122 m de profundidad.

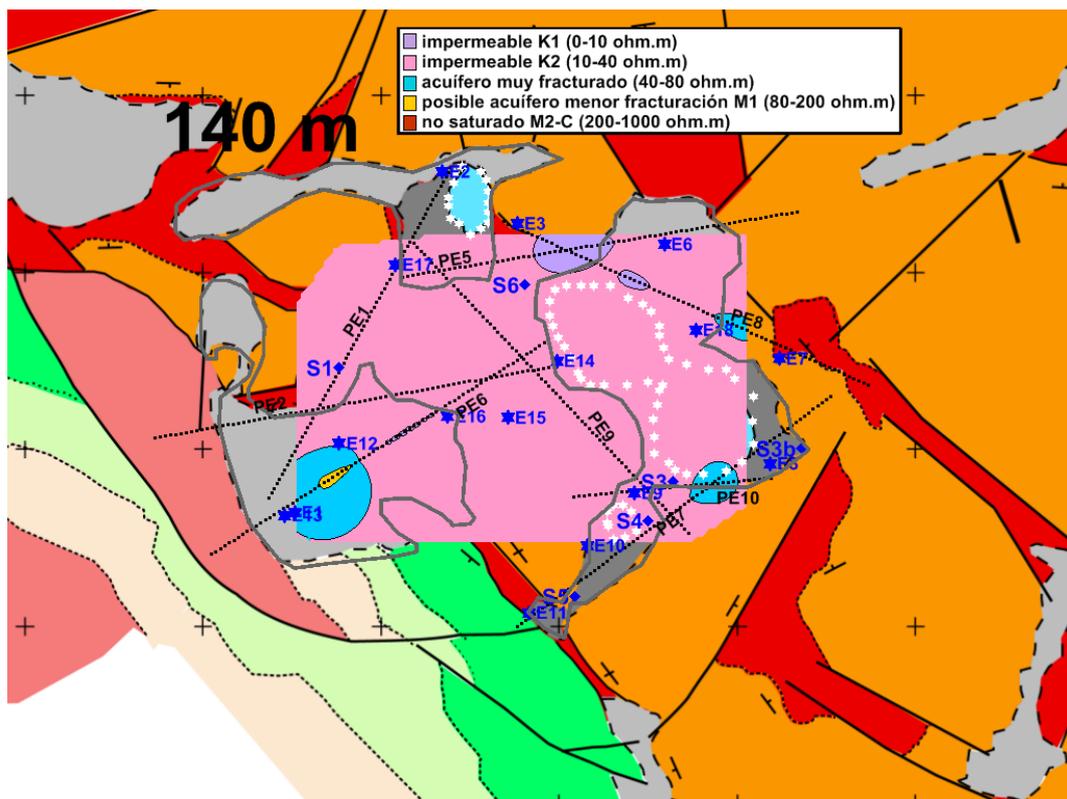


Fig. 13.22 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 140 m de profundidad.

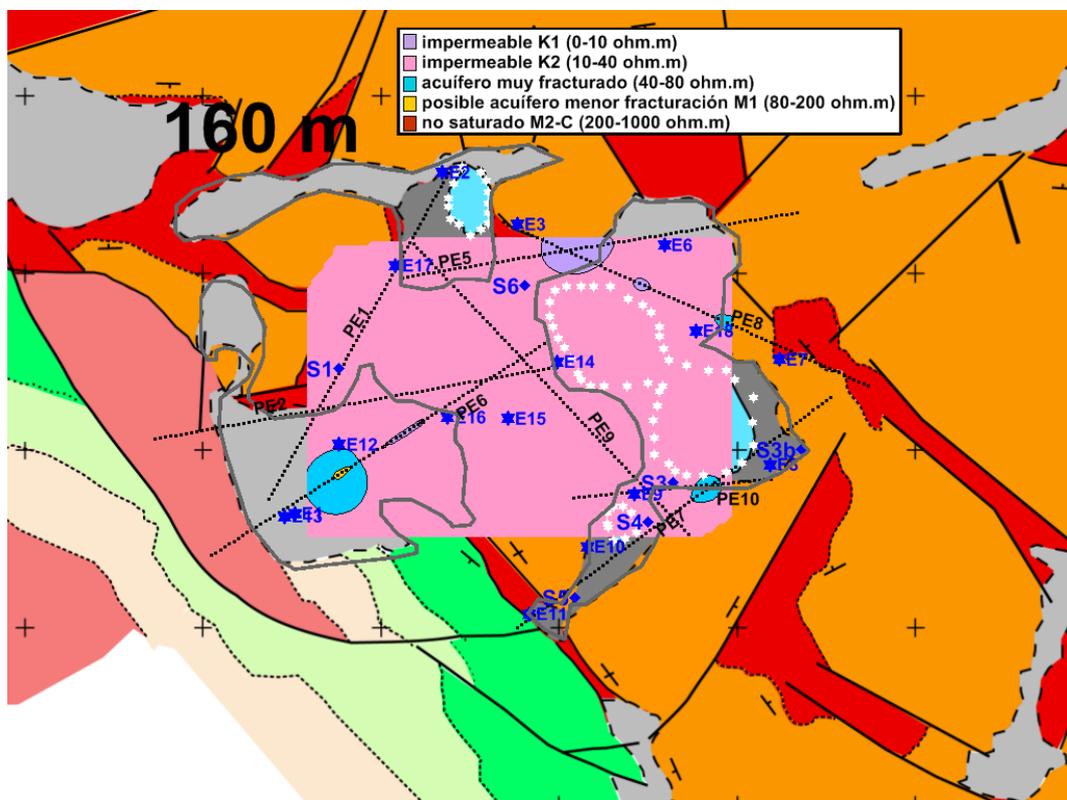


Fig. 13.23 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapa a 160 m de profundidad.

14 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las actividades geofísicas desarrolladas para el Proyecto FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE HUMEDALES RELACIONADOS CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL EBRO 2008-2010 en el entorno de las Lagunas de Estaña (Huesca) tienen por objetivo proporcionar información para desarrollar un modelo hidrogeológico que permita determinar las relaciones entre el agua subterránea y las lagunas y establecer límites hidrogeológicos en su entorno. En particular, se trata de estudiar la continuidad en profundidad de los materiales cartografiados en la superficie (limos con cantos sueltos del Cuaternario, arcillas y yesos del Keuper, y dolomías y calizas del Muschelkalk) y el contacto entre las calizas del Cretácico Superior (Sinclinal de Estopiñán) y el Keuper.

Analizados los objetivos y el entorno geológico, se decidió la utilización de dos métodos geofísicos complementarios:

- **Método de Perfiles Eléctricos** (que permite la identificación del tipo de rocas existentes y su posible contenido de agua), habiéndose medido diez perfiles con un total de unos 11000 m, distribuidos en dos campañas durante 2008 y 2009, con una profundidad de investigación del orden de los 150 m.
- **Sondeos de Resonancia Magnética (SRM)**, ya que es el único método geofísico que detecta directamente la presencia de agua, registrándose 18 SRM en 2008, con una profundidad de investigación variable de 50 a 100 m, debido a la imposibilidad logística de utilizar antenas de las máximas dimensiones en todos los emplazamientos.

Ambas campañas fueron efectuadas directamente por el IGME.

A estas mediciones hay que añadir la **testificación geofísica** (gamma natural, resistividad de la formación, temperatura y conductividad del fluido) de 180 m en 5 sondeos mecánicos efectuados durante 2009 mediante asistencia técnica con la empresa IGT.

En el "INFORME DE LAS ACTIVIDADES GEOFÍSICAS EFECTUADAS EN 2008 EN LAS LAGUNAS DE ESTAÑA (HUESCA)" (abril de 2009, Sistema de Información Documental del IGME código **63764**) se efectúa una descripción de los métodos geofísicos empleados, así como el análisis detallado de las mediciones SRM y su control de calidad. Un estudio específico del campo geomagnético permitió determinar que la presencia de ofitas no da lugar a anomalías que hayan podido distorsionar los registros de SRM, excepto en pequeña medida en la zona de las Ollas. En el mismo Informe se detalla la selección de parámetros de inversión de los SRM, efectuada en el supuesto de que el subsuelo esté constituido por capas horizontales (modelo 1D), ya que en esos momentos no se disponía de la información suficiente para verificar la estructura geológica en los emplazamientos de las mediciones. Los resultados obtenidos sobre la distribución de la porosidad eficaz y de un parámetro (tiempo de relajación) relacionado con la transmisividad fueron analizados e interpretados

tanto cualitativa como cuantitativamente, dando una primera visión de la geometría y propiedades hidráulicas del acuífero.

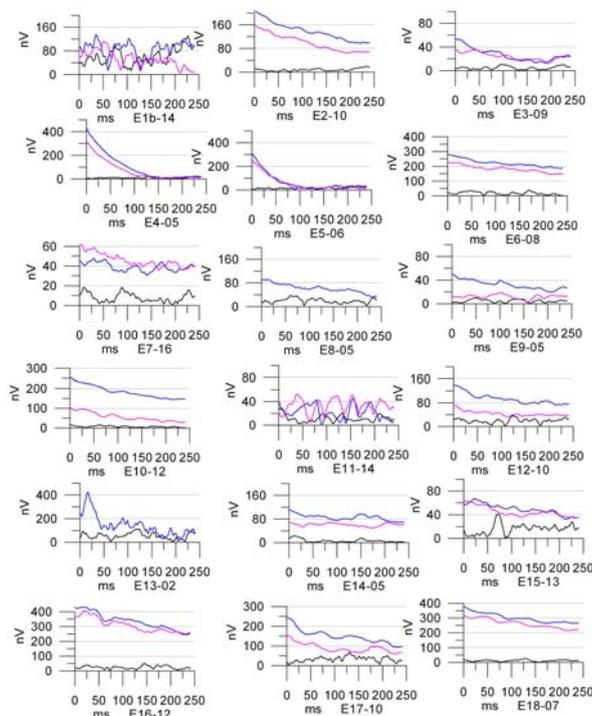


Fig. 84 Selección de las mejores curvas $e(t)$ de los SRM, con escala vertical variable. Señal del agua: curvas azul y rosa; ruido: curva en negro.

Del análisis cualitativo de los datos de campo ($e(t)$, $E_0(q)$) se extrajeron una serie de conclusiones, que siguen siendo esencialmente válidas:

- De los datos de campo $e(t)$ (Figura 84) puede asegurarse la existencia de agua en el subsuelo, dentro de la profundidad investigada en cada caso, en todos los emplazamientos, excepto en los localizados junto al sinclinal de Estopiñán, siendo así mismo nula o muy escasa en la zona comprendida entre la Laguna Grande y la Pequeña. Se aprecia una gran heterogeneidad del acuífero triásico, sin que pueda asegurarse su conexión hidráulica con el acuífero cretácico. Los tiempos de relajación T_2^* de la curva $e(t)$ son muy elevados, sugiriendo la existencia de agua en fracturas.
- De la distribución geográfica de los tipos de curvas de los sondeos $E_0(q)$ se deduce que la profundidad del agua va disminuyendo (va siendo más somera) desde las calizas del Cretácico hacia las lagunas.

Desde un punto de vista cuantitativo, los valores de porosidad en función de la profundidad $w(z)$ obtenidos en la inversión pusieron de manifiesto la existencia de poca cantidad de agua (entre el 2 y el 7 %), a excepción de la zona de las Ollas, donde el tiempo de relajación es mucho menor y los contenidos en agua son notablemente superiores (20-30 %). De la función $T_1(z)$ se dedujo una

gradación de la permeabilidad, que aumentaría con la profundidad; esta conclusión no es fiable, debido a que el parámetro T_1^* se ha comprobado que no ha resultado bien determinado en todos los SRM. La baja porosidad eficaz calculada, junto con los altos valores del tiempo de relajación T_2^* son índices de que el modelo 1D utilizado en la inversión puede no ser adecuado para todos los lugares de este acuífero. Si el agua se encuentra de forma volumétrica, o al menos concentrada en fracturas de grandes dimensiones, su distribución equivalente en un modelo matemático formado por capas horizontales (el utilizado en la inversión matemática de los datos), dará lugar a una falsa porosidad muy baja.

Al analizar la posición de los SRM sobre las secciones geoelectricas entonces disponibles, e intentar el trazado de unos perfiles de correlación entre los resultados de la inversión, se pusieron de manifiesto una serie de limitaciones para la interpretación:

- Se presentan bastantes situaciones en las que había dudas en cuanto a la asignación de litologías a los tramos en los que se ha detectado el agua, siendo aparente en algunos SRM la existencia de agua en materiales del Keuper.
- En la interpretación de los Perfiles Eléctricos de 2008 junto con la información suministrada por los SRM se tuvo que asumir una potencia de Cuaternario superior a los 50 m y una resistividad muy baja para las rocas calizas.

Para poder resolver las dudas planteadas y hacer una interpretación más congruente de los datos geofísicos, resultaba imprescindible la ejecución de sondeos mecánicos para disponer de puntos de control geológico fiables, así como ampliar la cobertura de los perfiles de resistividad. Una vez disponibles los nuevos PE (Figura 3.1), las columnas litológicas de los sondeos y sus diagráffas geofísicas, se ha procedido a una nueva interpretación conjunta, objetivo del presente Informe.

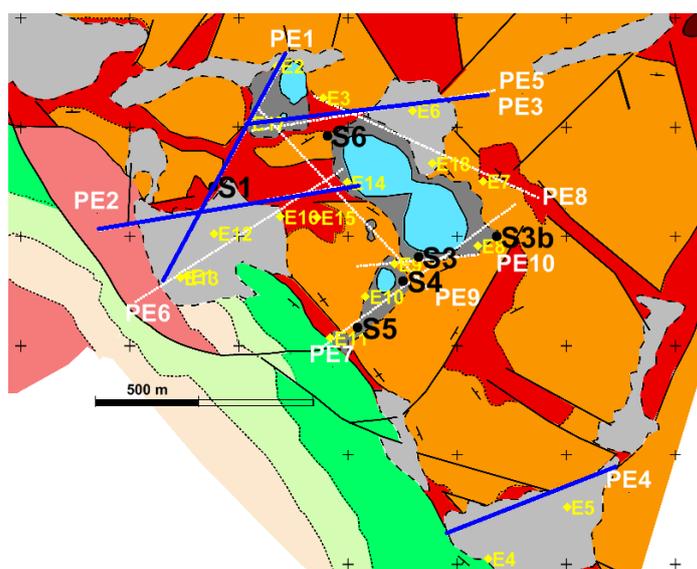


Fig. 3.1 Posición de los nuevos perfiles eléctricos (PEx en color blanco) junto a los medidos en 2008 (en trazo azul) y sondeos mecánicos Sx. Se han situado también los SRM Ex (posición de una de las esquinas de la antena utilizada).

Esta interpretación conjunta ha sido realizada con las siguientes etapas:

- Interpretación geológica (litológica) de las secciones geoelectricas
- Verificación de la estructura geológica en el volumen investigado por cada SRM
- Identificación de las rocas que contienen agua, definiendo la geometría del acuífero en las secciones geoelectricas
- Extrapolación de la geometría del acuífero a toda el área mediante mapas a diferente profundidad.

Para ello se ha seguido la siguiente metodología:

- Preparación de los datos geoelectricos

El resultado de la inversión de las medidas a lo largo de los Perfiles Eléctricos es una distribución del subsuelo en celdas a las que se les asigna un valor de la resistividad. Para una mejor integración de toda la información, se ha efectuado una georeferenciación X,Y,Z de todas las celdas, así como un estudio específico de la mejor distribución de la paleta de colores asignados a los diferentes rangos de resistividad, trazándose nuevas secciones y mapas de resistividad a diferentes profundidades.

- Deducción de los rangos de resistividad de las litologías presentes y diferenciación según su contenido en agua:

Realizada mediante el análisis de la testificación y de la columna litológica de los sondeos mecánicos, y mediante la comparación con la resistividad de los perfiles eléctricos y los resultados de los SRM más próximos a cada sondeo. Se ha efectuado además una correlación de la cartografía geológica de superficie con los valores de resistividad de las celdas más someras de los perfiles eléctricos.

- Interpretación de las secciones geoelectricas en términos de litología, proponiendo los posibles modelos geológicos, tanto en los perfiles como en mapas de resistividad a varias profundidades.
- Análisis de la situación geológica de los SRM para deducir la validez del modelo 1D y geometría del acuífero a lo largo de las secciones.
- Propuesta de un modelo de distribución espacial del acuífero.

En la interpretación de los SRM, así como en su integración con la información geoelectrica y de sondeos mecánicos, hay que tener en cuenta que el volumen de terreno involucrado en la respuesta de un SRM es aproximadamente el de un cilindro de base con radio de 75 a 225 m entorno el punto central de la antena, y hasta una profundidad de 50 a 150 m (valores para antenas de 50 y 150 m de lado respectivamente), y la resolución es decreciente con la profundidad, mientras que la información de un sondeo mecánico se refiere a las paredes del sondeo o línea vertical, teniendo resolución

centimétrica. La información de una sección de resistividad involucra también los efectos de rocas laterales a la misma, a mayor distancia del perfil cuanto mayor es la profundidad investigada.

El análisis conjunto de todos los datos permite deducir que la variación de la resistividad en la testificación es congruente con la mostrada por las secciones geoelectricas en la posición de los sondeos mecánicos, y puede establecerse una escala de correspondencia: el Muschelkalk seco tiene una resistividad superior a 100 ohm.m; cuando está saturado la resistividad toma valores de 40-80 ohm.m, y el Keuper siempre tiene menos de 40 ohm.m. Se han comparado también los valores de la resistividad superficial de las secciones con la cartografía geológica, lo que ha permitido ratificar las asignaciones anteriores, así como añadir la resistividad del Cuaternario (inferior a 30 ohm.m) y del Cretácico (superior a 200 ohm.m) (Figura 8.6).

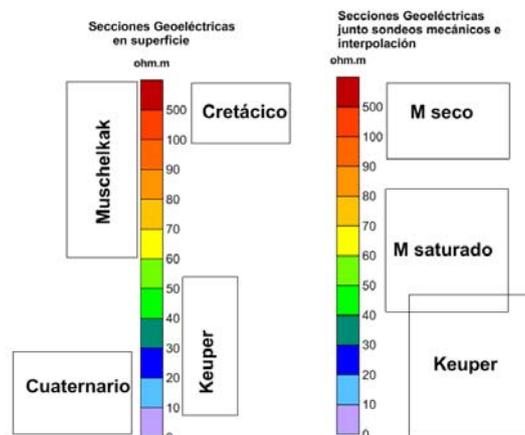


Fig. 8.6 Asignación de resistividad a los pisos geológicos según la información de resistividad superficial y según la información junto a los sondeos mecánicos.

A partir de los valores de resistividad en las secciones se han construido mapas de resistividad a varias profundidades, cuyo reflejo de la distribución realmente existente dependerá, evidentemente, de que la complejidad de las estructuras permita una interpolación de las mediciones entre perfiles. El mapa de resistividad superficial así obtenido ha permitido establecer una hipótesis de la cartografía más probable bajo el recubrimiento del Cuaternario, así como proponer la revisión o modificación de algunos contactos geológicos en la superficie (Figura 8.5).

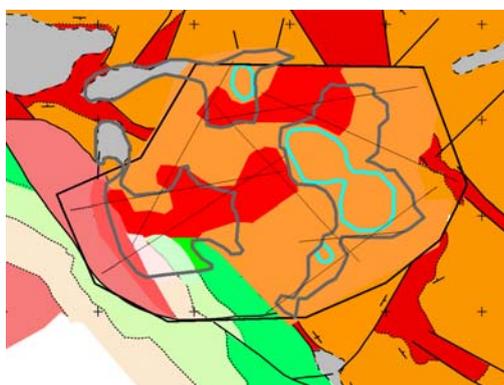


Fig. 8.5(parcial) Hipótesis de la cartografía bajo el Cuaternario y posible modificación de contactos en otros sectores.

Por otra parte, la comparación de los sondeos mecánicos y secciones de resistividad con la información de los SRM ha permitido verificar que la formación que contiene agua es el Muschelkalk, con una correspondencia muy buena con la distribución de resistividad, salvo pocas excepciones justificables por las diferencias de resolución y de volumen del subsuelo investigado por cada método. La comparación entre la columna del sondeo mecánico y la información del SRM solamente puede hacerse de forma directa cuando la geometría del subsuelo indicada por el sondeo se mantiene en el volumen investigado por el SRM, lo que no siempre ocurre en este entorno.

Una vez establecida la relación más probable entre la resistividad medida en los perfiles eléctricos y la litología, se ha procedido a efectuar una interpretación de las secciones, utilizando como control los sondeos mecánicos, la correspondencia entre la resistividad y la cartografía de superficie, la situación en los cruces entre los diferentes perfiles, así como la posible profundidad del contacto entre Muschelkalk y Keuper derivada de la información de los SRM más próximos al trazado de los perfiles. La interpretación se ha llevado a cabo arrastrando de forma secuencial la información de unos perfiles a los que le cruzan, comenzando por el PE7, que es para el que se dispone de mayor cantidad de información de sondeos mecánicos.

El conjunto de los perfiles de resistividad ofrece una visión de la geología del subsuelo en esta zona de Estaña. Los perfiles con sentido transversal (SO-NE, Figura 10.1) a las lagunas detectan en su extremo SO las calizas del Cretácico (o materiales del Paleoceno-Eoceno, en su caso), en contacto prácticamente vertical con el Keuper, que se prolonga con potencias superiores a los 150 m a lo largo de todos los perfiles, formando la base sobre la que reposa el Muschelkalk, presentando así una serie invertida. La potencia del Muschelkalk no sobrepasa el orden de los 50 m y aparece discontinuo, siendo en el sur de la zona de las lagunas más continuo y potente. El Keuper vuelve a aflorar en el extremo NE de los perfiles, en contacto casi vertical con el Muschelkalk, y tiene dos facies diferentes, apareciendo la posiblemente más arcillosa en el borde sur occidental.

Los perfiles en sentido longitudinal (Figura 10.3) recogen esta misma situación, indicando que en más de la mitad occidental aflora el Keuper al norte de la Laguna Grande, mostrando una gran potencia; el sector oriental de todos estos perfiles muestra la presencia de materiales del Muschelkalk también en toda la profundidad investigada. En el borde sur de la laguna grande se detecta una complicada estructura, apareciendo de nuevo el Muschelkalk por debajo del Keuper.

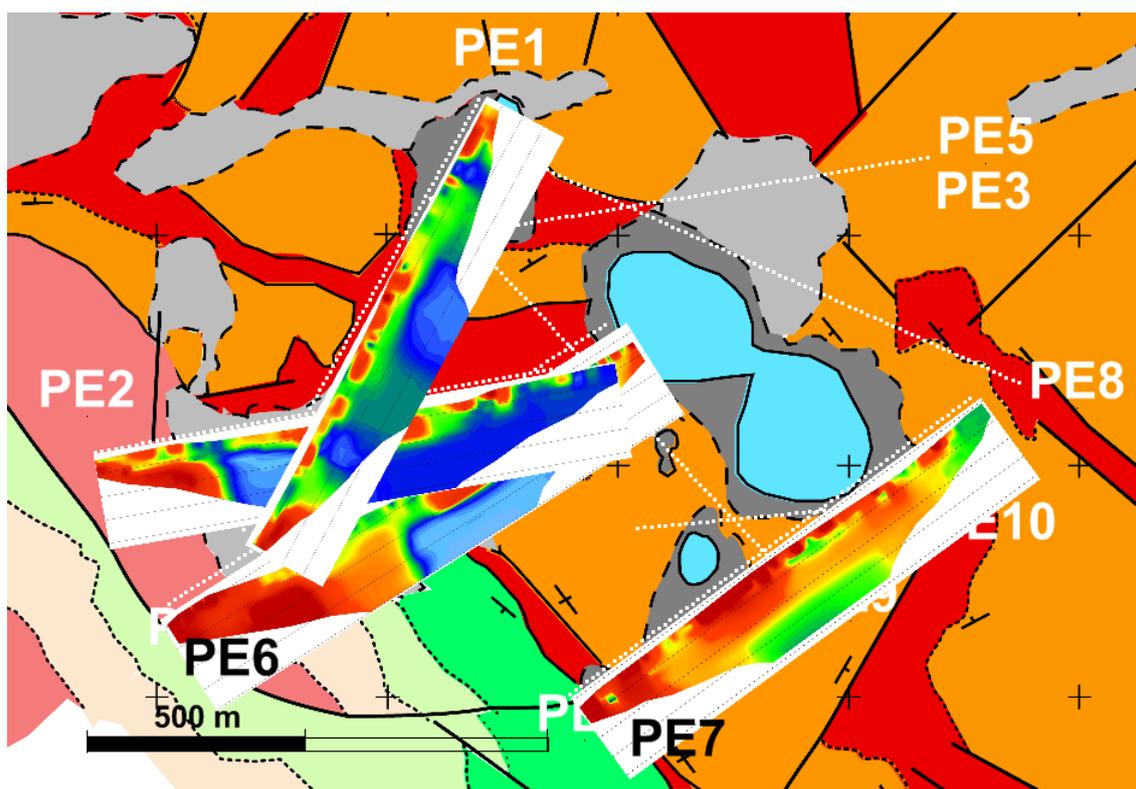


Fig. 10.1 Secciones geoelectricas de los perfiles transversales PE7, PE6, PE2 y PE1.

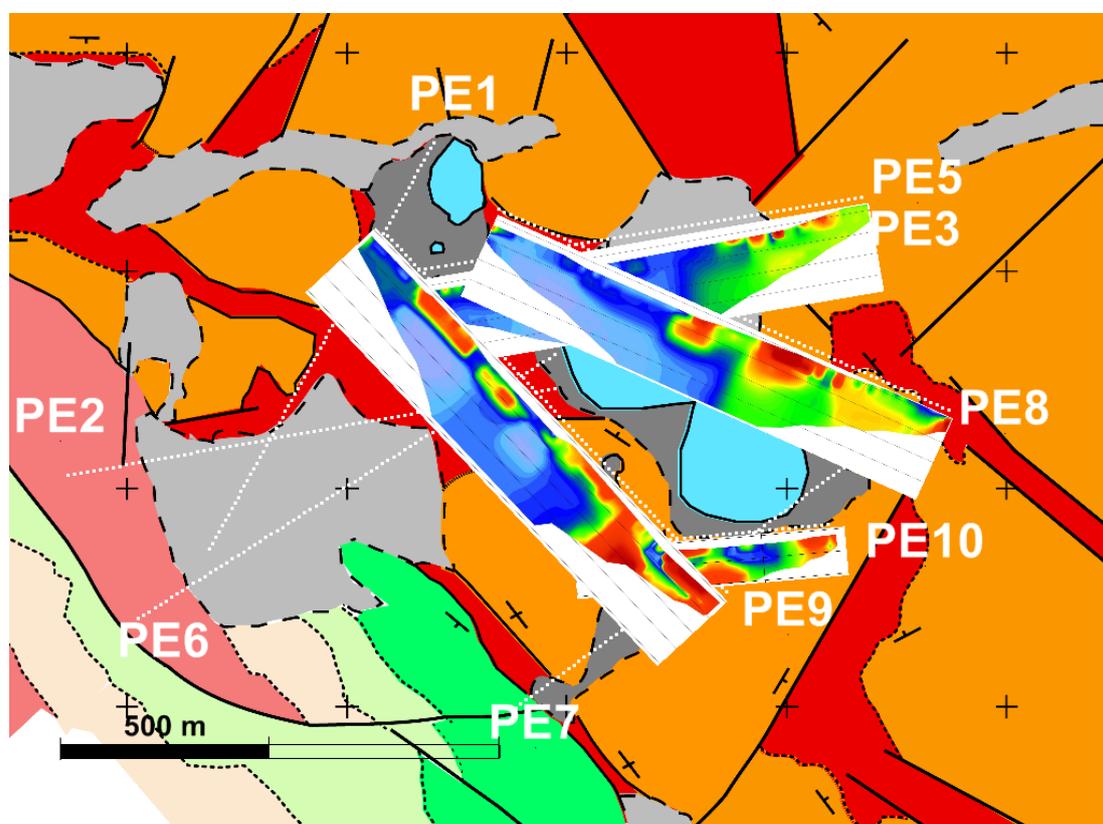


Fig. 10.3 Secciones geoelectricas de los perfiles que bordean las lagunas: PE9, PE8, PE5 y PE10

De esta interpretación de las secciones se deduce que la distribución de la resistividad no está excesivamente apartada de un modelo de dos capas horizontales para la mayoría de los lugares medidos, lo que permite realizar una interpolación de la resistividad entre perfiles y trazar mapas de distribución de la resistividad a diferentes profundidades. Aunque siempre se tendrá alguna incertidumbre de la representatividad de dicha interpolación, los mapas permiten comparar los valores de resistividad con otros datos que no están medidos exactamente sobre los perfiles eléctricos, como mejor método que proyectar su posición sobre las secciones de resistividad. Así se ha hecho para los SRM y para los sondeos mecánicos. Estos mapas permiten además comprender mejor la evolución tridimensional de la geología de la zona. En su análisis se aprecia una compleja evolución de los materiales del Triásico, de tal forma que a partir de unos 100 m de profundidad todo el sustrato es de baja resistividad, perteneciente al Keuper (Figuras 10.7-10.13).

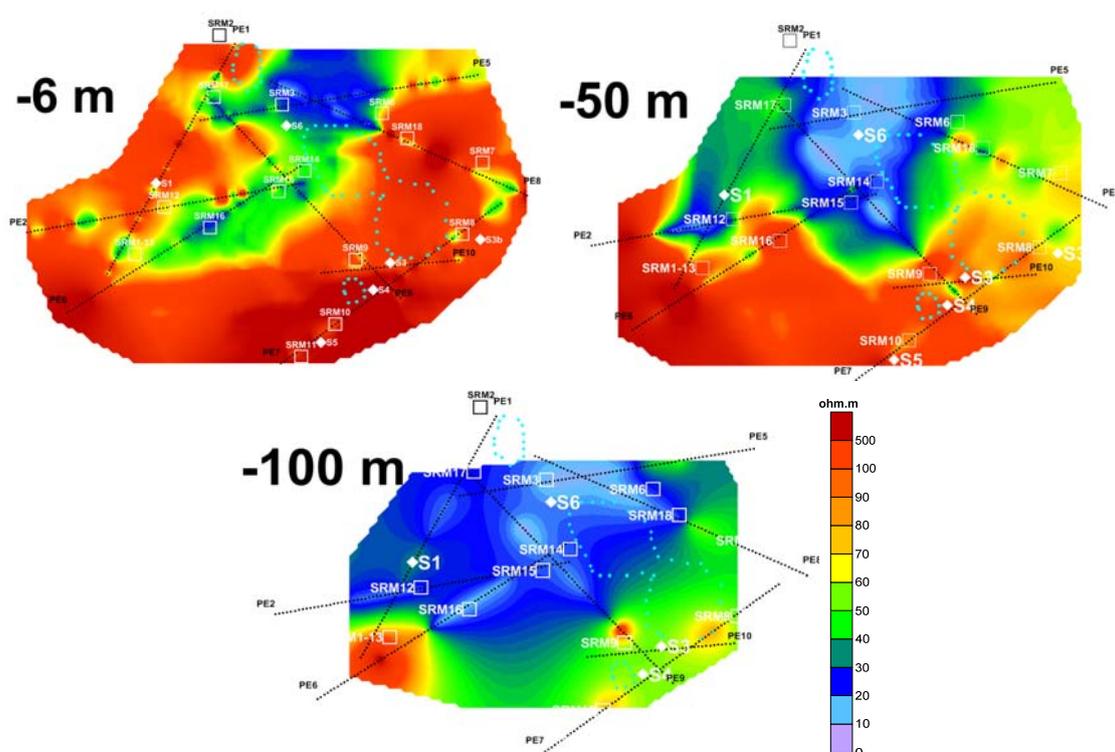


Fig. 10.7 - 10.11 y 10.13 Distribución de la resistividad a 6 m, 50 y 100 de profundidad. Se indica la posición de los perfiles, cuyos datos utilizados para la construcción del mapa quedan dentro del perímetro de la imagen. Las lagunas están representadas por puntos azules. Se indica también la posición de los SRM (cuadrados) y los sondeos mecánicos S (rombos).

Una vez establecida una hipótesis de las estructuras geológicas por la correlación entre la litología y la resistividad, se ha procedido a analizar la situación hidrogeológica de los SRM, revisando la efectuada en el Informe de 2008. De esta forma se podrá corroborar tanto la naturaleza de los materiales en los que está contenida el agua, como la validez de adoptar un modelo de capas horizontales en el volumen investigado por el SRM, que permita aceptar la interpretación cualitativa basada en sus curvas $E_0(q)$ y efectuar su inversión utilizando algoritmos 1D para obtener la distribución de agua $w(z)$.

Este análisis se ha realizado identificando sobre las secciones de resistividad el volumen investigado por los SRM y evaluando además la resistividad en el centro de la antena a través de los mapas de resistividad a diversas profundidades. Como conclusión del mismo, se ha encontrado que la situación o disposición de las capas de diferente litología es aceptablemente un modelo de capas horizontales dentro del volumen investigado por los SRM E2, E8, E10, E12, E14, E16, E17 y E18, para los que el resultado de la inversión realizada con un modelo 1D resulta fiable en cuanto a la distribución del contenido en agua con la profundidad $w(z)$. Este resultado es dudoso para los SRM E4, E5, E7 y E9, y no es aceptable para el resto, bien por no haberse detectado agua (E1, E13, E11), bien por ocupar las rocas saturadas una pequeña parte del volumen investigado por el SRM (E3, E6 y E15).

Debido a la inconsistencia del sistema disponible para su medición, el parámetro T_1^* sólo ha resultado correctamente evaluado para los SRM E10 y E12, siendo aceptable para el E9, y posiblemente para el E4 y E5 si el tiempo de relajación no ha sido influido por el gradiente magnético en esta zona; esto hay que tenerlo en cuenta en la lectura del resultado de la inversión, que sólo será válida para la porosidad o cantidad de agua libre detectada con la profundidad $w(z)$, pero no para el tiempo de relajación $T_1^*(z)$. Para todos los casos es válida la deducción cualitativa de la existencia o no de agua, así como el valor del parámetro T_2^* (también relacionado con la permeabilidad), ya que ambos parámetros están basados en las mediciones de campo o curva $e(t)$, y no están afectados por las condiciones geométricas.

La baja porosidad calculada en la inversión de los SRM junto con los altos valores de los tiempos T_1^* y T_2^* puede interpretarse como una validación de la hipótesis de la existencia de fracturas. Teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por las observaciones anteriores sobre la validez de los parámetros determinados, se observa que dentro de las calizas del Muschelkalk la disminución de la resistividad (que relacionamos con un aumento de la fracturación) se corresponde en general con un aumento del tiempo de decaimiento detectado en el SRM, lo que lleva aparejado un aumento de la permeabilidad.

De la distribución geográfica de los diversos tipos de curvas de sondeo $E_0(q)$ (Figura 12.1) se deduce que la profundidad del techo del acuífero y/o de la parte del acuífero con mayor contenido en agua va siendo mayor en el orden de los grupos 6-5-3-4. A pesar de la complejidad geológica de la zona, puede observarse cierta relación entre el tipo de curva y la litología donde está realizado el SRM. Los SRM E13 y E11 localizados en la inmediata proximidad de las calizas cretácicas, denotan la no existencia de agua o al menos que está más profunda de 75 m, definiendo por lo tanto un límite del acuífero triásico. Las curvas $E_0(q)$ de los SRM E7, E15 y E3 corresponde en teoría a acuíferos profundos, pero en realidad han sido distorsionadas porque el acuífero en esas posiciones ocupa sólo una parte del volumen investigado por el SRM; son medidas efectuados sobre afloramientos del Keuper y las curvas informan de que, aunque estos materiales no contienen agua, el volumen investigado por los SRM detecta la presencia de calizas saturadas bajo o junto al Keuper en esos lugares. Los SRM E14, E12 y E17 están medidos sobre el Cuaternario que, probablemente, es

suprayacente al Keuper (según la cartografía), y muestran la presencia de agua a poca profundidad, y al menos hasta los 100 m; esto puede interpretarse como que aunque el acuífero pueda comenzar en los materiales del Cuaternario, el Keuper o no existe en estos lugares, o es de muy poca potencia, habiéndose detectado el agua contenida en rocas del Muschelkalk que se encuentran por debajo.

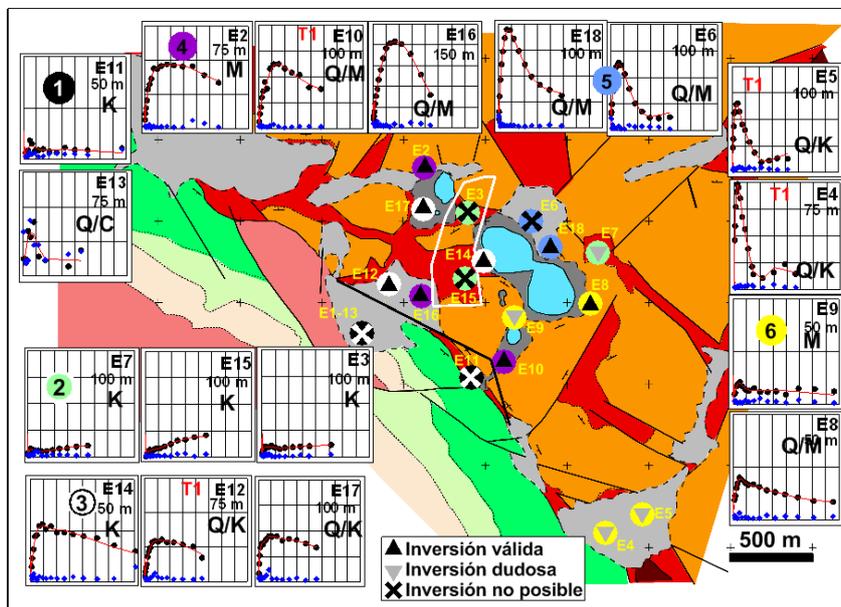


Fig. 12.1 Distribución geográfica de los SRM según su clasificación por la morfología de su curva $E_0(q)$ y posición de los diferentes grupos sobre la geología. Para cada SRM se indica las dimensiones de la antena utilizada y el tipo de litología sobre la que está extendida (Q: Cuaternario; K: Keuper; M: MUSchelkalk), siendo en los casos en que hay recubrimiento de Cuaternario una suposición no siempre válida. La indicación T1 significa que se ha podido determinar correctamente el valor de dicho parámetro.

Los SRM E2, E10, E16, E18, E6, E9, E8 están medidos sobre Muschelkalk, cubierto por el Cuaternario en algunos sitios, aunque el E16 podría estar sobre Keuper; muestran la presencia de agua de tal forma que el acuífero parece estar más superficial junto a las lagunas, aumentando su profundidad con la distancia a estas. En cualquier caso, dada la gran heterogeneidad y anisotropía encontrada, el pretender encontrar morfologías con carácter general o regional puede resultar bastante aventurado.

Vista la poca fiabilidad del parámetro T_1^* en que se basó la clasificación efectuada en 2008, es preferible no utilizar dicho parámetro como discriminador de permeabilidad y clasificador de tipo de acuífero, aunque puede mantenerse la idea de que el acuífero no resulta de permeabilidad homogénea, sino que en general la permeabilidad es mayor en la parte más profunda. Por lo que respecta a los valores cuantitativos de la cantidad y distribución del agua encontrada en la inversión, o solución $w(z)$, la interpretación que puede hacerse de la distribución geográfica del contenido en agua $w(z)$ por su relación con la geología y posición de las lagunas es la misma que la establecida para la función $E_0(q)$, con matizaciones cuantitativas cuando son posibles.

Las alineaciones SO-NE (Figura 12.3) formadas por los SRM E16-E15-E14 y E1-E12-E17-E2 visualizan cómo la cantidad de agua, así como su proximidad a la superficie, aumenta hacia las

lagunas. Por el borde norte de las lagunas, SRM E3-E6-E18-E7, las medidas recogen la presencia de Keuper, manifestando poca presencia de agua (posiblemente debida al poco volumen de Muschelkalk integrado en la medición de dichos SRM), salvo en el E18. Con orientación NE-SO, por el lado oeste de las lagunas, la alineación E8-E9-E10-E11 vuelve a manifestar el aumento de la profundidad del acuífero hacia el sinclinal de Estopiñan, siendo mayor su potencia que en el lado norte, ya que no ha sido prácticamente detectado su final.

La variación del contenido en agua libre, porosidad secundaria en este caso, debe estar reflejando el grado de fracturación, que aumenta con la profundidad en todas las mediciones, para volver a disminuir a mayor profundidad en el sector oriental. En casi todos los casos existe un primer tramo acuífero de menos de 5 m de potencia, separado del principal. La hipótesis finalmente establecida es que el agua está contenida en calizas fracturadas del Muschelkalk, no siendo evidente la existencia de cavidades, al menos de grandes dimensiones. El Keuper se considera acuitardo, aunque en un origen pueda haber estado carstificado en sus tramos yesíferos.

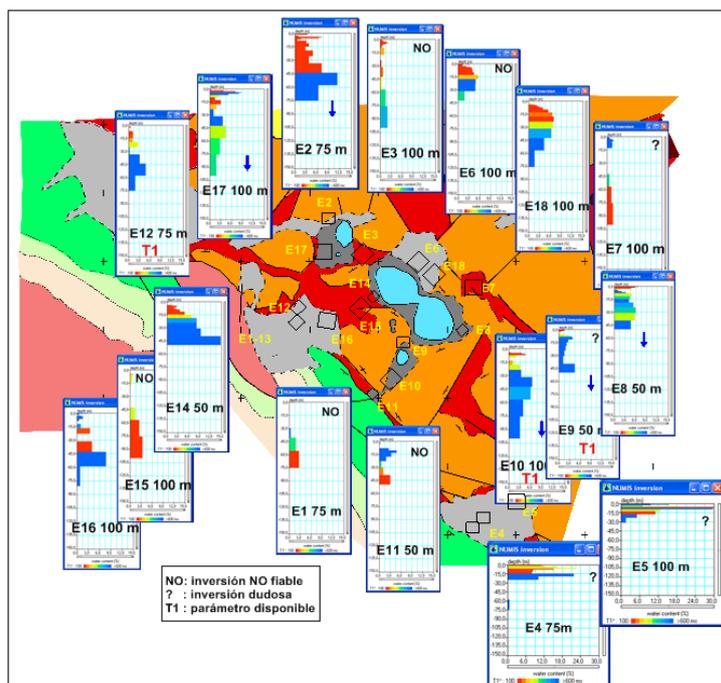


Fig. 12.3 Visualización de la interpretación de los SRM según su posición geográfica.

Una vez establecida la correspondencia entre la resistividad y la situación tanto de los sondeos mecánicos como de los SRM que han detectado la presencia de agua, se puede hacer una clasificación en términos hidrogeológicos de la resistividad. Existen pocas dudas respecto de la asignación a zonas no saturadas de los tramos con resistividad superior a 200 ohm.m. Así mismo, valores inferiores a 10 ohm.m pueden clasificarse con seguridad como impermeables. En la generalidad de las situaciones, la zona saturada se ha localizado en el rango de 40 a 80 ohm.m, aunque no se puede descartar totalmente que valores de hasta 100-200 ohm.m puedan corresponderse con zonas que contienen un grado inferior de fracturación, con agua en algunas

ocasiones. La clasificación que se ha hecho es por lo tanto indicativa de la generalidad de los casos, pudiendo haber excepciones.

Tras la descripción de la situación del acuífero a lo largo de cada una de las secciones geoelectricas, se han trazado mapas a varias profundidades para obtener una visión de la evolución espacial del acuífero, así como de la conexión de las diferentes partes (Figura 13.11 a 13.20). La aparente compartimentación estanca de las rocas permeables que se observaba en los cortes, toma en su visión en planta un aspecto de mayor continuidad. El acuífero ocupa todo el sector central como acuífero libre, limitado en sus flancos oriental y meridional por rocas carbonatadas y al norte por el Keuper, aunque quedando parcialmente abierto en el borde norte y occidental. Los materiales impermeables del Keuper van progresivamente invadiendo la zona, de tal forma que a partir de unos 30 m de profundidad puede hablarse de un acuífero oriental, semi-confinado, y otro occidental, libre, comunicados por un canal, situación que se mantiene hasta al menos los 100 m de profundidad, a partir de donde es posible que todo el basamento sea impermeable. En el borde sur de la zona, ocupado por materiales carbonatados no saturados, solo se presenta un cierto grado de fracturación sobre los 30 m de profundidad.

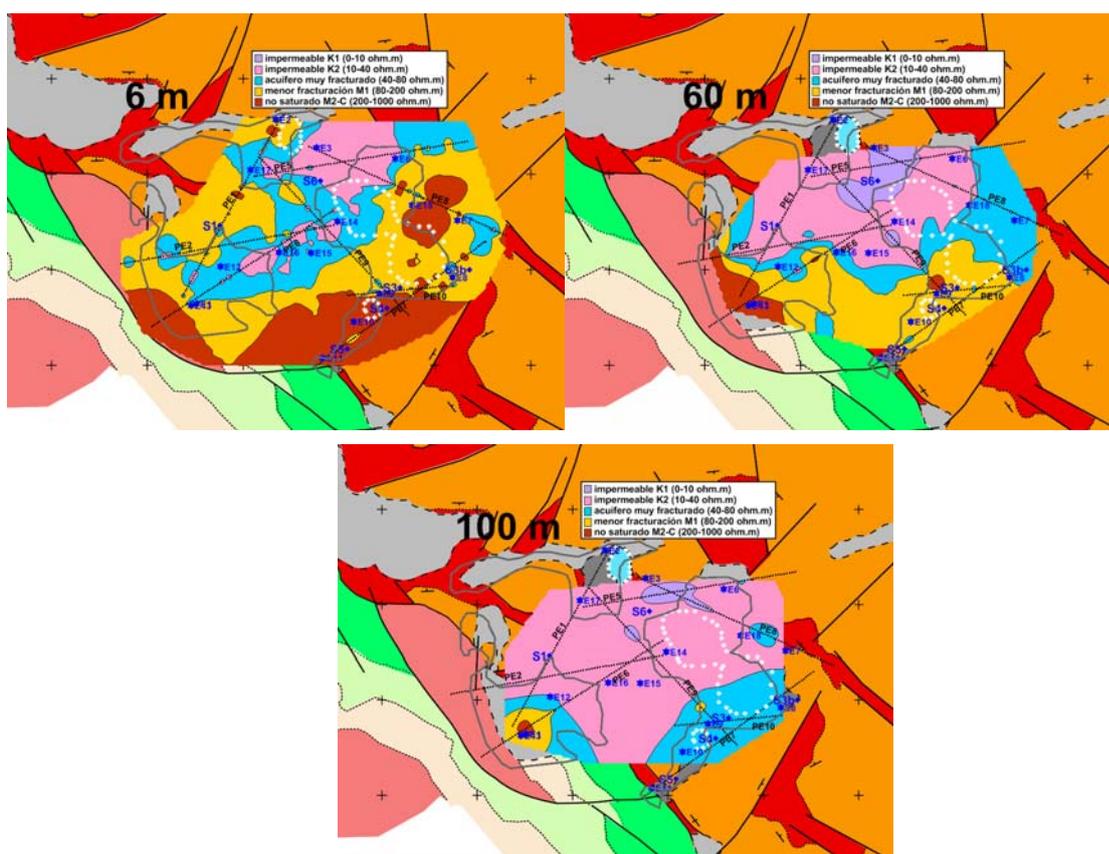


Fig. 13.11- 17- 20 Propuesta de distribución hidrogeológica de las rocas el conjunto de la zona investigada. La posición de las lagunas se indica en puntos blancos, los SRM con estrellas en azul, y los sondeos mecánicos con puntos azules. Mapas a 6, 60 y 100 m de profundidad.

ANEXO I

Ficheros de Datos de Perfiles Eléctricos y Testificación Geofísica

Ficheros de perfiles eléctricos

En el ANEXO II **RELACIÓN DE FICHEROS GENERADOS EN LOS PERFILES ELÉCTRICOS** del “INFORME DE LAS ACTIVIDADES GEOFÍSICAS EFECTUADAS EN 2008 EN LAS LAGUNAS DE ESTAÑA (HUESCA)” (abril de 2009, Sistema de Información Documental del IGME código **63764**), se especifica el formato de los ficheros que contienen los datos de campo de los perfiles eléctricos y de las interpretaciones de los perfiles mediante el programa Res2div medidos en 2008. El mismo formato es aplicable a los registrados en 2009, por lo que se remite al mencionado Informe para su consulta.

Los ficheros de todos los perfiles realizados tanto en 2008 como en 2009 están recogidos en el ANEXO DIGITAL de este Informe, además de haber sido depositados en el sistema SIGEOF del IGME.

Ficheros de testificación de sondeos

Son ficheros con formato LAS de acuerdo con las normas SIGEOF. Para cada sondeo existen dos ficheros, según la sonda con la que se ha efectuado el registro:

Tipo CGT: profundidad m , temperatura del fluido °C, gamma natural cps , conductividad del fluido a temperatura ambiente uS/cm, conductividad del fluido a 25°C uS/cm, salinidad equivalente en g/l.

Tipo ind: profundidad m, gamma natural cps , conductividad del terreno mS/m, resistividad del terreno ohm.m

Tienen la siguiente nomenclatura:

 51_GCT_20100621.LAS	380 KB	Archivo LAS
 53_GCT_20100621.LAS	147 KB	Archivo LAS
 53_IND_20100621.LAS	85 KB	Archivo LAS
 53B_GCT_20100621.LAS	460 KB	Archivo LAS
 53B_IND_20100621.LAS	291 KB	Archivo LAS
 54_GCT_20100621.LAS	336 KB	Archivo LAS
 54_IND_20100621.LAS	200 KB	Archivo LAS
 56_GCT_20100621.LAS	354 KB	Archivo LAS
 56_IND_20100621.LAS	232 KB	Archivo LAS

Estos ficheros se encuentran recogidos en el ANEXO DIGITAL de este Informe y han sido depositados en el sistema SIGEOF del IGME,

Tanto los ficheros originales de perfiles de resistividad como de testificación de sondeos han sido posteriormente modificados para adaptarlos a las necesidades gráficas y de interpretación efectuadas en este Informe. Los datos referentes a estos nuevos ficheros se recogen en el ANEXO II.

ANEXO II

PROCESO DE DATOS GEOELÉCTRICOS

ANEXO II PROCESO DE DATOS GEOELÉCTRICOS

II. 1 Explicación de la necesidad de este proceso

Para la inversión de los datos de campo y obtención de los perfiles de resistividad finales se ha empleado el programa RES2DINV v. 3.46b de M.H. Loke. Este software proporciona, a través de la aplicación ERIGRAPH, una salida gráfica de los modelos de resistividad obtenidos en la inversión (Figura II.1), cuya versión como imagen (mapa de bits) ha sido la utilizada en el Informe de 2009 para superponer sobre ellas otro tipo de información.

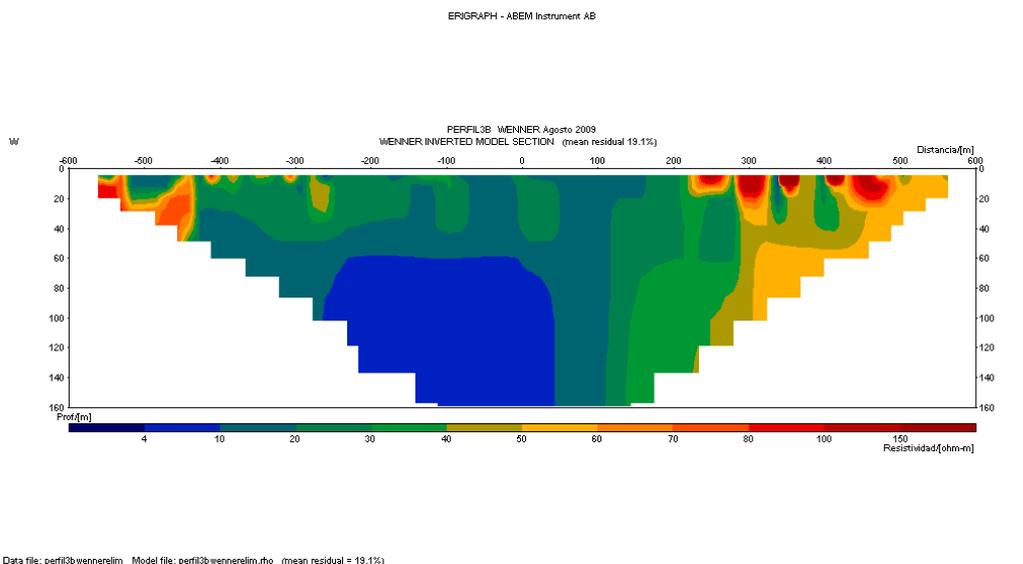


Fig. II.1 Ejemplo de imagen proporcionada por la aplicación ERIGRAPH para el resultado de la inversión de los perfiles de resistividad.

Para una mejor integración de toda la información actualmente disponible se ha considerado necesario poder trabajar con secciones en las que manejar libremente los datos, de tal forma que puedan crearse secciones geoelectricas por diversos métodos y utilizando la clasificación de valores en clases e intervalos de colores (paletas de color) más adecuados. Por otra parte, dada la gran cobertura de información de resistividad obtenida, se pretende trazar mapas de resistividad a diferentes profundidades. En consecuencia se ha diseñado una metodología específica para este tipo de proceso de datos, que consta de las siguientes etapas:

- Preparación de los valores distancia-profundidad-resistividad de cada sección.
- Obtención del perfil de resistividad superficial.
- Preparación de los valores X-Y-Z-resistividad del conjunto de perfiles
- Selección de la paleta de colores para mapas de isovalores e imágenes de resistividad.
- Preparación de los ficheros de blanqueo de los mapas e imágenes.
- Selección de cotas y obtención de mapas de resistividad a diferentes cotas.

II.2 Preparación de los valores distancia-profundidad-resistividad de cada sección

El programa RES2DINV permite obtener los ficheros con la información de la distribución de resistividad de la sección geoelectrica en formato X,Y,Z en código ASCII (texto o DAT). Pueden obtenerse los ficheros correspondientes a los datos Z de resistividad aparente medida (*_appres), resistividad aparente calculada (*-calappres), modelo de resistividad obtenido en la inversión (*-modres) y modelo de resistividad obtenido en la inversión incluyendo la topografía (*_topres). La resistividad puede expresarse en escala lineal o en escala logarítmica (sólo recomendable para grandes rangos de variación). Además de estos ficheros, se pueden obtener los correspondientes a los valores de la posición de los electrodos (*_xxx_post), la paleta de colores utilizada (fichero tipo LVL de SURFER), y un fichero del polígono de blanqueo que permite la eliminación gráfica por superposición a la malla generada con los datos (tipo BLN mapa base de SURFER). Un ejemplo de la denominación de estos ficheros se muestra en la Figura II.2.

Nombre	Tamaño	Tipo	Fecha de modificación
perfileschelim_appres	3 KB	Archivo BLN	15/01/2010 14:00
perfileschelim_appres	25 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_appres	2 KB	Archivo LVL	15/01/2010 14:00
perfileschelim_appres_post	5 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_calappres	3 KB	Archivo BLN	15/01/2010 14:00
perfileschelim_calappres	25 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_calappres	2 KB	Archivo LVL	15/01/2010 14:00
perfileschelim_calappres_post	5 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_modres	4 KB	Archivo BLN	15/01/2010 14:00
perfileschelim_modres	41 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_modres	2 KB	Archivo LVL	15/01/2010 14:00
perfileschelim_modres_post	5 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topres	4 KB	Archivo BLN	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topres	33 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topres	2 KB	Archivo LVL	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topres_post	5 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topreslinearx	4 KB	Archivo BLN	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topreslinearx	33 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topreslinearx	2 KB	Archivo LVL	15/01/2010 14:00
perfileschelim_topreslinearx_post	5 KB	Archivo DAT	15/01/2010 14:00

Fig. II.2 Ejemplo de ficheros generados por RES2DINV para ser utilizados en SURFER (perfil PE7 Schlumberger).

La posición X,Y de los valores de resistividad aparente es la correspondiente al punto de asignación según el convenio establecido para cada dispositivo electrónico; para la resistividad del modelo la posición viene dada por el punto central de las celdas en que queda dividido en subsuelo. La coordenada X se expresa por la distancia a partir del punto 0 del perfil según el convenio utilizado por ABEM para asignación de las mediciones (y por lo tanto tiene valores positivos o negativos según el lado considerado) e Y es la profundidad, adoptando el valor 0 para la superficie, excepto para los ficheros que incorporan la topografía, en los que Y se refiere a la cota en m. En la Figura II.3 se presenta un ejemplo del resultado de transportar este tipo de ficheros.

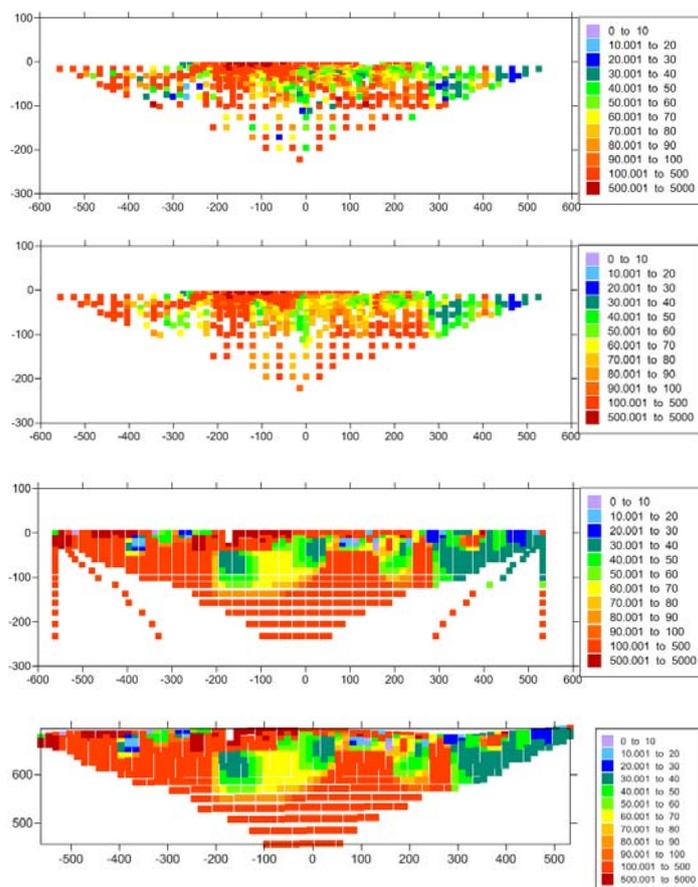


Fig. II.3 Ejemplo del contenido de los ficheros generados por RES2DINV. Desde arriba hacia abajo: resistividad aparente (*appres*), calculada (*calappres*), del modelo (*modres*) y del modelo con topografía (*topres*). Corresponden al perfil PE7 Schlumberger.

Estos ficheros pueden ser utilizados para trazar secciones de resistividad con la aplicación SURFER, para lo que hay que calcular previamente los valores interpolados a una malla regular. En este trabajo se ha utilizado el sistema de interpolación ponderando los valores por el inverso de la distancia (con potencia 2) y paso de 15x15 m (igual al espaciado entre electrodos), excepto para el perfil PE3, que fue medido con espaciado de 5 m y para el que la malla calculada es de 10x10 m.

II.3 Obtención del perfil de resistividad superficial.

A fin de poder superponer la información de resistividad al mapa geológico, se precisa disponer de las coordenadas UTM X,Y y del valor de resistividad correspondiente a las celdas más superficiales donde, por inversión, se ha obtenido un valor de resistividad. Para ello se dispone de los ficheros de topografía y de los ficheros tipo ***-topres** (Figura II.4). En los trabajos de campo solamente se miden las coordenadas X,Y,Z de los puntos inicial y final, junto con algunos intermedios, valores recogidos en los ficheros de topografía. En los ficheros tipo ***-topres** los valores están referenciados a su distancia dentro del perfil, con origen en el centro, organizados por filas; pueden leerse con la hoja de cálculo de Golden (Surfer o Grapher) y seleccionar solamente los valores correspondientes a la fila más superficial (mayor cota), creando los ficheros **pnd 1.dat** (n= nº del perfil, d= s o w según dispositivo; ficheros primera fila de cada perfil p1w 1, p2s 1, etc.).

"x-location", "z-location", "Resistivity"		
-532.500	672.959	23.9100
-517.500	670.959	69.5800
-502.500	668.959	26.2300
-487.500	667.097	25.8100
-472.500	666.186	12.7300
-457.500	666.086	11.9600
-442.500	665.986	15.7200
-427.500	665.886	17.1500
-412.500	665.786	27.3700
-397.500	665.686	21.1700
-382.500	665.586	27.4300
-367.500	665.486	23.0100
-352.500	665.386	168.3000
-337.500	665.323	50.7300
-322.500	665.509	275.0800
-307.500	665.909	194.2300
-292.500	666.309	135.7400

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	PUNTO	GPSX_H31	GPSY_H31	COTA_GPS	GPSX_H30	GPSY_H30	Posicion	perfil
2	1	295046	4656796	692	791722	4659841	600	1
3	1,3	295036	4656765	686	791713	4659809		1
4	1,14	294951	4656617	684	791640	4659655		1
5	1-2	294906	4656631	682	791601	4659566	300	1
6	2,12	294816	4656387	686	791521	4659416		1
7	2,19	294762	4656299	683	791473	4659325		1
8	C (2-3)	294746	4656277	671	791459	4659302	0	1
9	3-4	294571	4656031	675	791301	4659044	-300	1
10	4,11	294487	4655905	675	791226	4658912		1
11	4,17	294437	4655829	681	791182	4658833		1
12	F	294416	4655814	687	791162	4658816	-585	1

Fig. II.4 Ejemplo de fichero *_topres y de topografía

El cálculo de las coordenadas se ha hecho por interpolación lineal entre las coordenadas de los puntos extremos, empleando la hoja de cálculo Excel; para ello se han añadido las estaciones origen y final del perfil, con sus coordenadas UTM30 Xf- Yf, Xi-Yi y su posición (location) correspondiente en el perfil, teniendo en cuenta la orientación y dirección en que se ha medido el perfil (p.e. -585, 600 para p1w, Figura III.5).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	X-location	Z-location	Resistivity	distancia	x	y		inc x	inc y	D	fac x	fac y					
2	-585			0	791162	4658816		560	1025	1168	0,47945	0,87757					
3	-532,5	672,959	23,91	52,5	791187	4658862											
4	-517,5	670,959	69,58	67,5	791194	4658875											
5	-502,5	668,959	26,23	82,5	791202	4658888											
6	-487,5	667,097	25,81	97,5	791209	4658902											
64	382,5	677,552	14,13	967,5	791626	4659665											
65	397,5	677,734	11,74	982,5	791633	4659678											
66	412,5	677,916	76,76	997,5	791640	4659691											
67	427,5	678,098	349,61	1012,5	791647	4659704											
68	442,5	678,28	393,72	1027,5	791655	4659718											
69	457,5	678,462	396,69	1042,5	791662	4659731											
70	472,5	678,644	932,17	1057,5	791669	4659744											
71	487,5	678,826	86,55	1072,5	791676	4659757											
72	502,5	679,007	88,24	1087,5	791683	4659770											
73	517,5	679,273	59,47	1102,5	791691	4659783											
74	532,5	680,115	58,91	1117,5	791698	4659797											
75	600			1185	791730	4659856	de calculo										
76	600			1185	791722	4659841	real										

Fig. II.5 Ejemplo de preparación de fichero para cálculo de coordenadas X,Y UTM.

El cálculo se ha realizado por:

$$\text{incx}=\text{Xf}-\text{Xi} \quad \text{incy}=\text{Yf}-\text{Yi} \quad \text{D}=\sqrt{(\text{incx}^2+\text{incy}^2)} \quad \text{facx}=\text{incx}/\text{D} \quad \text{facy}=\text{incy}/\text{D}$$

Para cada punto la distancia se ha reducido al origen (p.e. sumando 585 para el perfil p1w). Las coordenadas se han calculado por:

$$\text{X}=\text{Xi}+\text{facx Distancia} \quad \text{Y}=\text{Yi}+\text{facy Distancia}$$

creándose los ficheros pnd 1.xls.

Debido a que los perfiles no están trazados en campo en una alineación recta perfecta y a que las distancias reales entre electrodos difieren de las teóricas por la influencia de la topografía, arbustos, etc, las coordenadas obtenidas pueden diferir ligeramente de las reales y el recálculo del último punto obtendrá diferentes valores de los dados por la topografía, como se indica en el ejemplo de la Figura II.5.

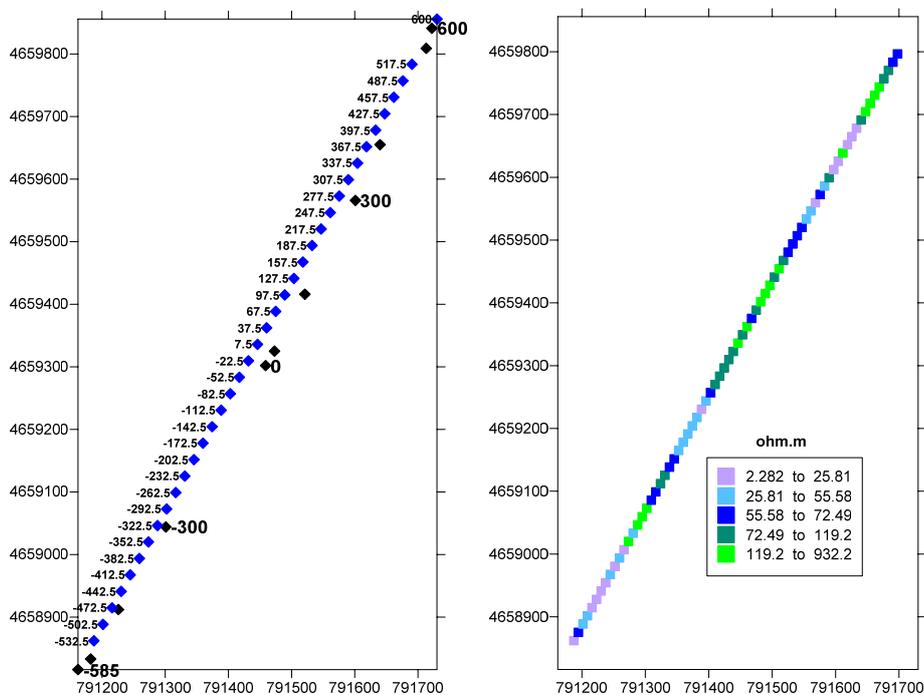


Fig. II.5 Izquierda: ejemplo de posición X,Y de puntos del perfil medidos por GPS (en negro) y el resultado de asignar coordenadas a todos los puntos por interpolación lineal entre los puntos inicial y final (en azul); sólo se ha representado uno de cada dos puntos. **Derecha:** ejemplo de representación de este tipo de datos utilizando el valor de la resistividad para asignación de colores, lo que permite observar en planta la distribución superficial de la resistividad.

II.4 Preparación de los ficheros de valores X-Y-Z-resistividad del conjunto de perfiles

Estos ficheros se precisan para la realización de mapas de resistividad a diferentes profundidades. Los ficheros *_topres, con los valores posición-cota-resistividad, están organizados por filas (valores de resistividad a la misma profundidad). Mediante su lectura con la hoja de cálculo de Golden (Grapher o Surfer) pueden prepararse de tal forma que cada fila pase a estar en un grupo de tres columnas de la hoja de cálculo, según el ejemplo de la Figura II.6, nombradas según la profundidad (0m, 7m, 15m,...). A este fichero se le han incorporado los valores posición(distancia)-X-Y de los ficheros pnd 1.xls generados en el proceso anteriormente descrito, lo que proporciona coordenadas a todas las columnas. Su grabación como ficheros Excel genera los ficheros pnw xyz.xls (esta operación solamente se ha realizado para los datos medidos con dispositivo Wenner). El resultado puede verificarse transportando los valores posición-z sobre los perfiles en Surfer.

La suma de todos estos ficheros forma el total xyz.xls, con el que pueden dibujarse los mapas de resistividad.

	X-location Z-0	Res0		X-location Z-7	Res-7		X-location Z-15	res-15		X-location Z-24	res-24
2	-532,5	672,959	23,91	-532,5	665,459	51,69	-532,5	657,584	432,49		
3	-517,5	670,959	69,58	-517,5	663,459	96,33	-517,5	655,584	426,59		
4	-502,5	668,959	26,23	-502,5	661,459	109,89	-502,5	653,584	494,7	-502,5	644,922 513,11
5	-487,5	667,097	25,81	-487,5	659,598	106,23	-487,5	651,723	501,95	-487,5	643,061 517,44
6	-472,5	666,186	12,73	-472,5	658,686	56,82	-472,5	650,811	401,49	-472,5	642,149 519,21
7	-457,5	666,086	11,96	-457,5	658,586	25,36	-457,5	650,711	119,25	-457,5	642,049 419,42
8	-442,5	665,986	15,72	-442,5	658,486	24,1	-442,5	650,612	45,04	-442,5	641,949 194,06
9	-427,5	665,886	17,15	-427,5	658,386	27,98	-427,5	650,512	34,93	-427,5	641,849 73,61
10	-412,5	665,786	27,37	-412,5	658,286	27,7	-412,5	650,412	29,21	-412,5	641,749 44,85
11	-397,5	665,686	21,17	-397,5	658,186	25,46	-397,5	650,312	29,24	-397,5	641,649 43,73
12	-382,5	665,586	27,43	-382,5	658,086	28,01	-382,5	650,212	30,61	-382,5	641,549 43,78
13	-367,5	665,486	23,01	-367,5	657,986	38,07	-367,5	650,112	46,1	-367,5	641,45 48,49

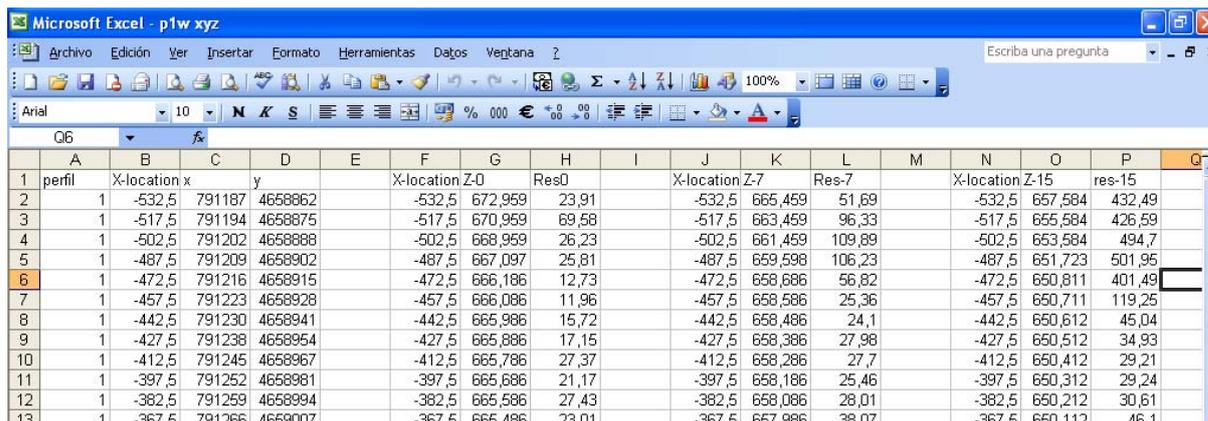


Fig. II.6 Ejemplo de creación de los ficheros tipo xyz. Parte superior: fichero *_topres ordenado de tal forma que cada fila de datos se dispone en tres columnas de la hoja de cálculo. Parte inferior: incorporación al fichero anterior de los valores X,Y para cada posición obtenidos en los ficheros pnd 1.xls

II.5 Selección de la paleta de colores para mapas de isovalores e imágenes de resistividad.

Las paletas de colores suministradas por RES2DINV son ficheros tipo LVL de SURFER, en los que para cada intervalo de valores ("level") se especifica el color mediante el código RGB, además de otros parámetros de sistema (Figura II.7).

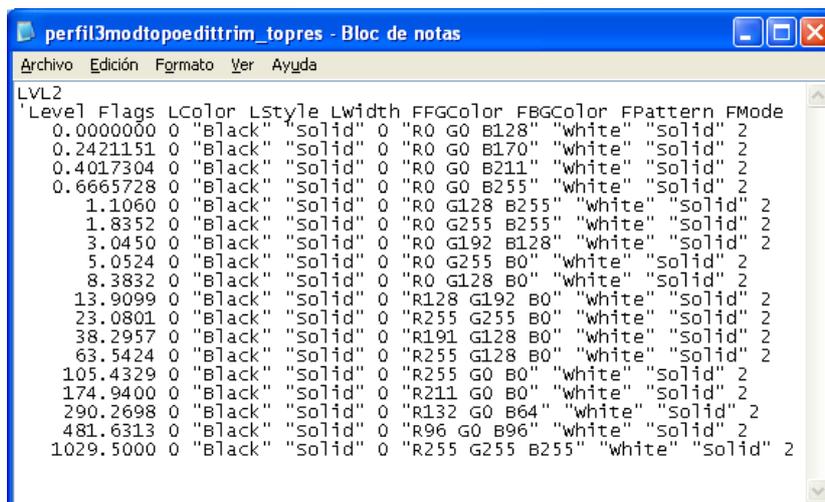


Fig. II.7 Ejemplo de fichero lvl de asignación de paleta de colores.

Esta paleta está formada por los 18 tramos de color reproducidos en la Figura II.8

1	R0 G0 B128	
2	R0 G0 B170	
3	R0 G0 B211	
4	R0 G0 B255	
5	R0 G128 B255	
6	R0 G255 B255	
7	R0 G192 B128	
8	R0 G255 B0	
9	R0 G128 B0	
10	R128 G192 B0	
11	R255 G255 B0	
12	R191 G128 B0	
13	R255 G128 B0	
14	R255 G0 B0	
15	R211 G0 B0	
16	R132 G0 B64	
17	R96 G0 B96	
18	R255 G255 B255	

Fig. II.8 Colores asignados a los 18 tramos de la paleta de RES2DINV

La asignación del rango de resistividad a cada tramo se realiza dividiendo automáticamente en 18 intervalos el rango de resistividades de cada sección, de tal forma que el intervalo sea constante en escala logarítmica. Así, por ejemplo, para la sección p7w, con un valor máximo de resistividad de 4798 ohm.m, los intervalos son los representados en la Figura II.9, que dan lugar a la visualización de la distribución de la resistividad en el subsuelo o sección de resistividad de la Figura II.10.

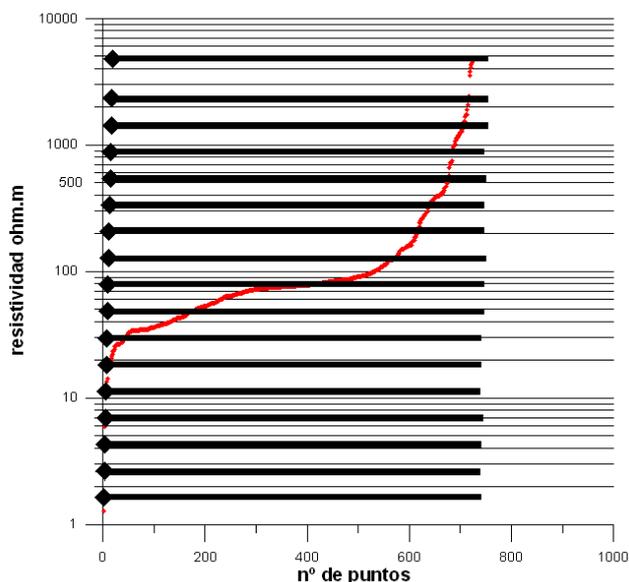


Fig. II.9 División del rango de resistividad de la sección p7w en 18 tramos para asignación de color:1.6-2.6-4.3-6.9-11.3-18.3-29.7-84.2-78.3-127.1-206.2-334.7-543.1-801.3-1430.2-2321-4796

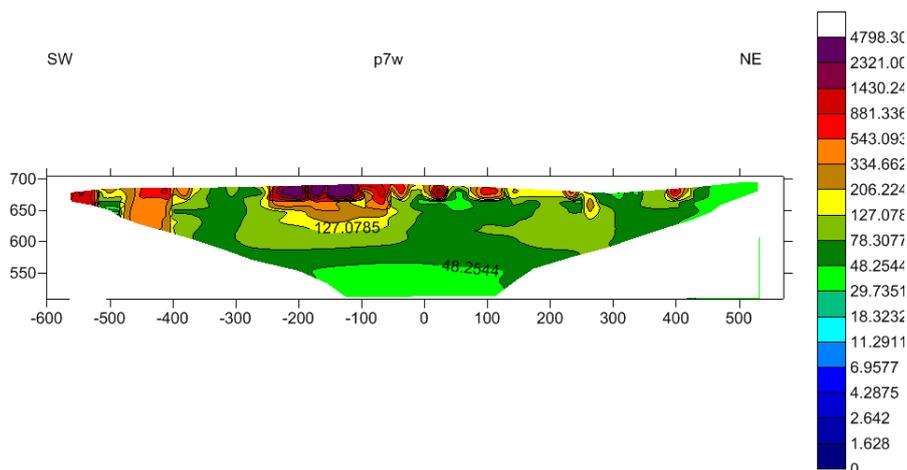


Fig. II.10 Sección de resistividad obtenida con la paleta de color de RES2DINV

Como resultado del propio terreno y de los parámetros de inversión, el rango de valores de resistividad obtenidos en los modelos de cada perfil es diferente, lo que da lugar a que las paletas sean diferentes para cada perfil e incluso para cada dispositivo, como se muestra en la Figura II.11 para algunas secciones.

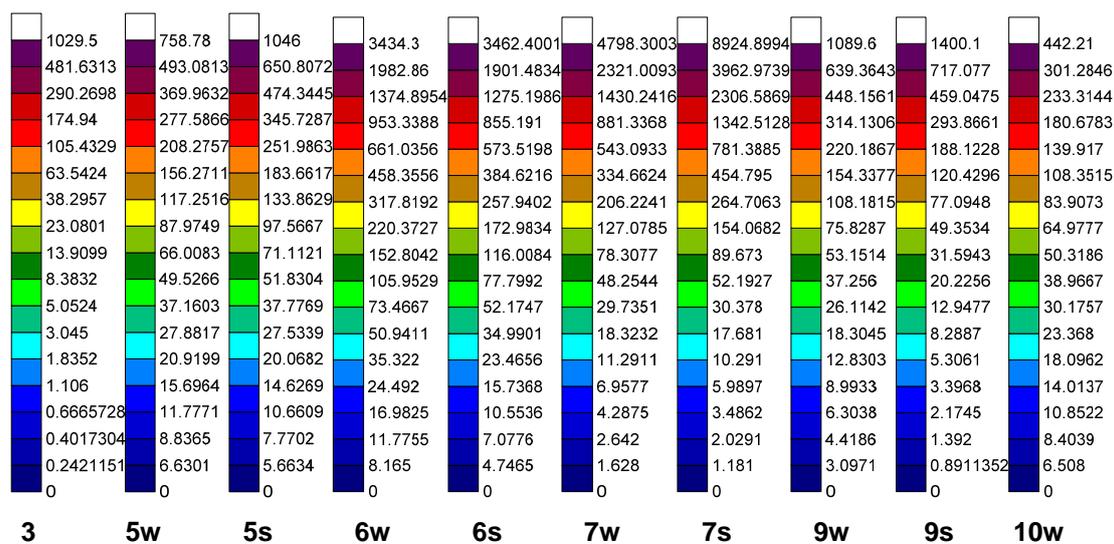


Fig. II.11 Paletas de colores de las diferentes secciones geoelectricas. El mismo color es asignado a diferentes intervalos según la sección. Por ejemplo, el amarillo puede representar el rango 23-38 ohm.m (perfil 3) o 87-117 ohm.m (perfil 5w) o 220-317 ohm.m (perfil 6w), etc.

La aplicación de estas paletas hace que la visualización de las diferentes secciones no sea comparable, al ser diferentes los valores de resistividad asignado a cada rango de color. Por otra parte, la distribución en intervalos iguales en escala logarítmica da lugar a resaltar diferencias de resistividad que no son las más adecuadas para las litologías de esta zona: no tiene sentido diferenciar entre 8 y 12 ohm.m ni entre 220 y 314 ohm.m.

Para diseñar la paleta de color más adecuada en el presente estudio de las lagunas de Estaña, se ha analizado la distribución de todos los valores de resistividad de todas las celdas de cada sección. Su

representación en orden de resistividad creciente en escala lineal (Figura II.12 izquierda) permite apreciar que sólo a unos pocos puntos se les ha asignado en el proceso de inversión resistividad superior a 500 ohm.m. En escala logarítmica (Figura II.12 derecha) se puede apreciar que la mayoría de los valores están entre 10 y 100 ohm.m.

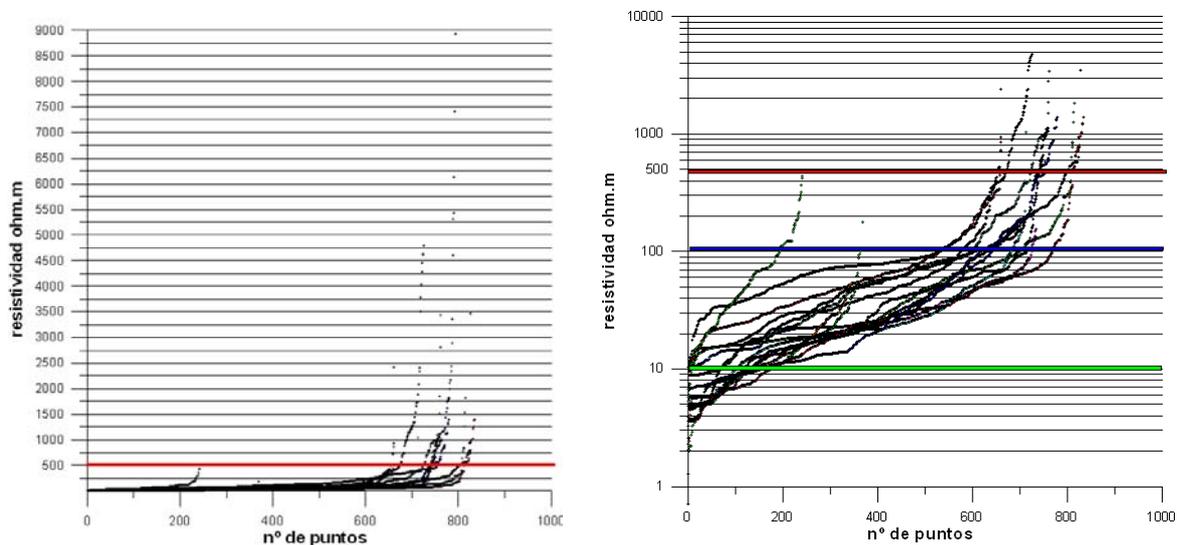
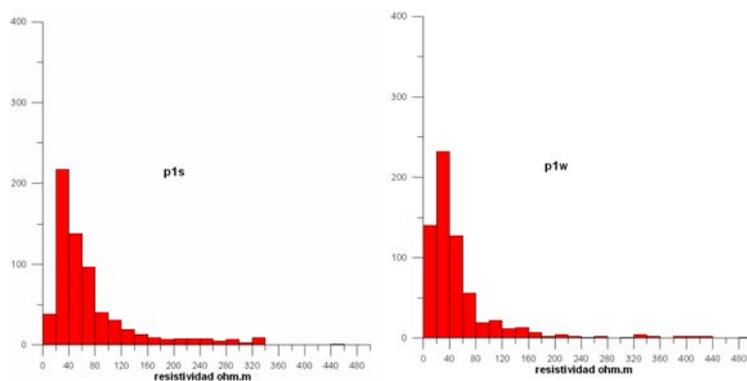
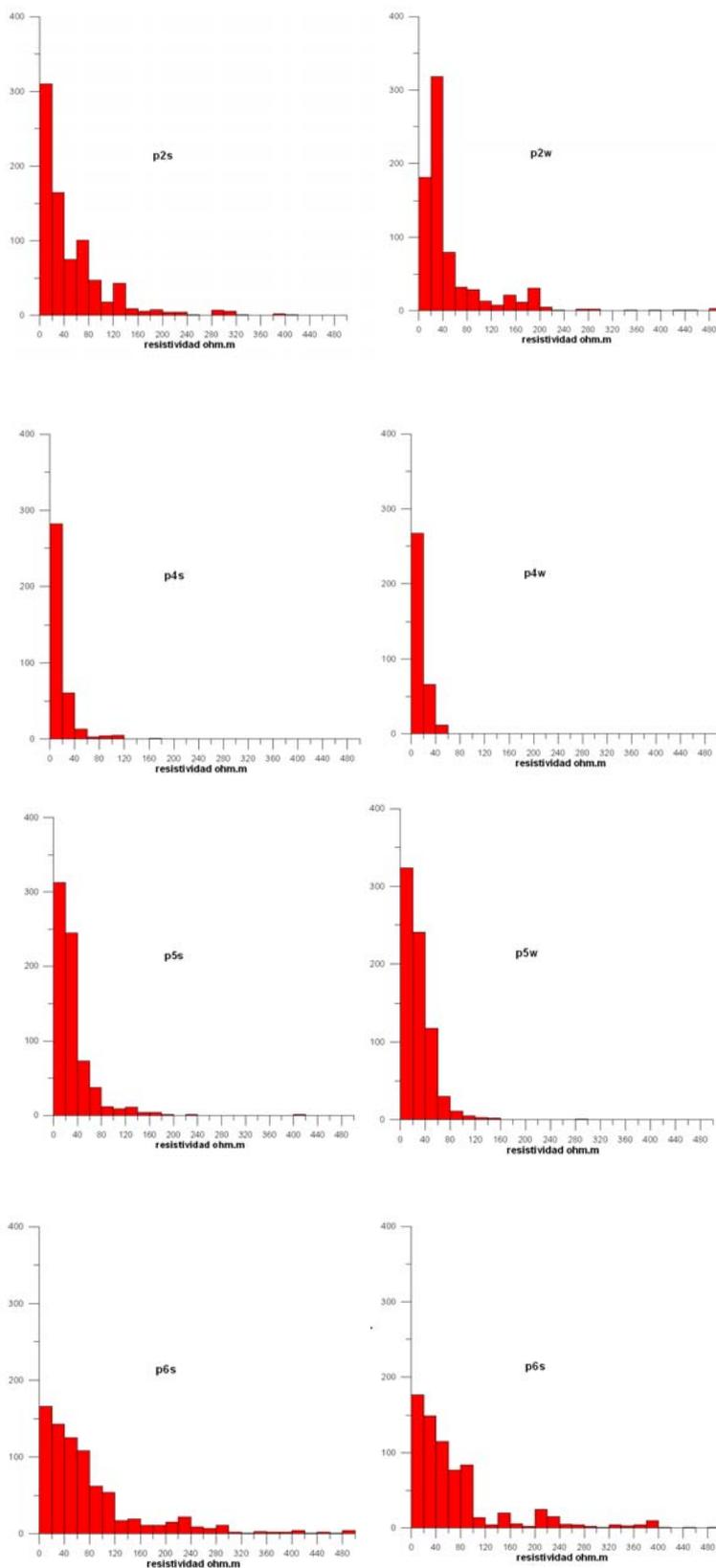


Fig. II.12 Representación en escala lineal y logarítmica de la distribución de valores de la resistividad de cada sección.

Analizando para cada sección el histograma de distribución de valores de resistividad en intervalos de 20 ohm.m (Figura II.13) se ha obtenido el máximo valor significativo para cada caso, que junto con el rango total está recogido en la Tabla II.1.





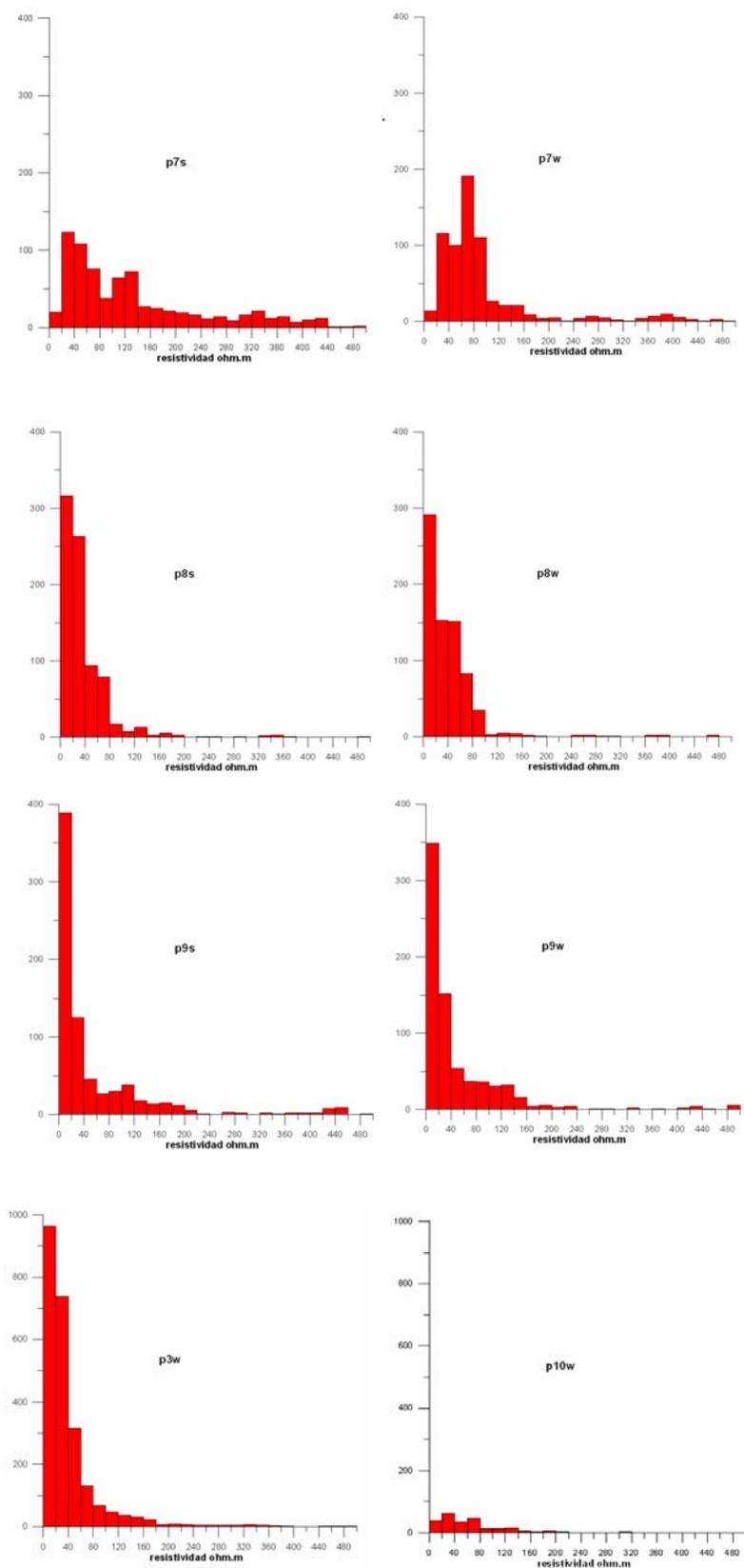


Fig. II.13 Histogramas de valores de resistividad asignados a las celdas en los modelos obtenidos en la inversión de las distintas secciones geoelectricas.

perfil	nº puntos	resistividad min.	Resistividad max.	Máximo valor representativo
1s	662	9	2412	200
1w	661	2	932	160
2s	816	5	1824	140
2w	755	10	977	200
3w	2421	0,1	1029	180
4s	370	2	176	60
4w	346	2	53	60
5s	714	4	1045	140
5w	737	5	758	100
6s	828	3	3462	240
6w	763	6	3434	240
7s	794	1	8924	400
7w	726	1	4798	180
8s	836	3	1398	140
8w	762	3	1114	100
9s	780	0.7	1400	200
9w	756	3	1089	160
10w	243	5	442	140

Tabla II.1 Valores máximo y mínimo de resistividad de cada sección y valor máximo significativo.

La distribución para el total de los valores medidos en el conjunto de los 10 perfiles es la indicada en la Figura II.14 en intervalos de 10 ohm.m; su clasificación en intervalos de 100 ohm.m es la de la Tabla II.2.

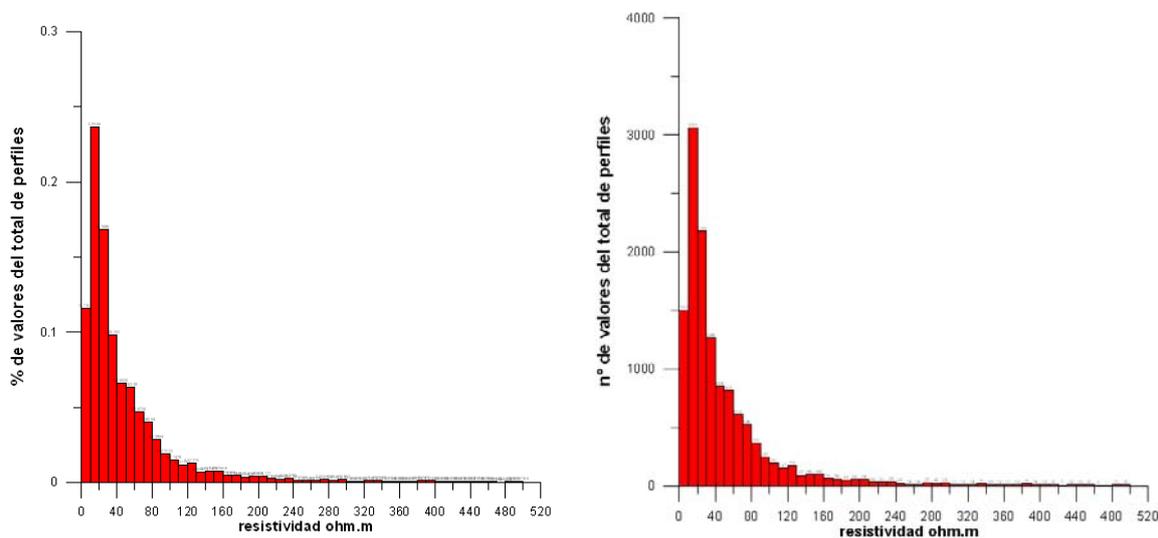


Fig. II.14 Histogramas de valores de resistividad asignados a las celdas en los modelos obtenidos en la inversión del conjunto de las secciones geoelectricas.

Rango resistividad	% de puntos
0-100	87
100-200	8
200-300	2
300-400	1
400-500	0.6
>500	1.4

Tabla II.2 Porcentaje de valores de resistividad distribuida por rangos de 100 ohm.m

Para una correcta clasificación de estos valores resulta por lo tanto suficiente con acotar el valor máximo a 500 ohm.m, adoptando como límite superior los valores de resistividad ≥ 100 ohm.m; el intervalo de 0 a 100 ohm.m debe ser sin embargo dividido con mayor detalle, siendo su distribución en intervalos de 10 ohm.m la indicada en la Tabla II. 3, para la que se ha preparado la paleta de 12 intervalos, denominada **paleta grid final 10-500NEW.Ivl** indicada en la Figura II.15.

Rango	% de puntos
0-10	11.6
10-20	23.7
20-30	16.8
30-40	9.7
40-50	6.6
50-60	6.3
60-70	4.7
70-80	4
80-90	2.8
90-100	1.9
100-500	12

Tabla II.3 Porcentaje de valores de resistividad distribuida por rangos de 10 ohm.m para el rango 0-100.

'Level	FBGColor
500	R192 G0 B0 A255
100	R255 G63 B0 A255
90	R255 G102 B0 A255
80	R255 G149 B0 A255
70	R255 G196 B0 A255
60	R255 G255 B0 A255
50	R112 G255 B0 A255
40	R0 G255 B0 A255
30	R0 G139 B116 A255
20	R0 G0 B255 A255
10	R87 G192 B255 A255
0	R192 G160 B255 A255

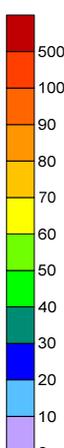


Fig. II.15 Paleta diseñada para la distribución de resistividades en el área de las lagunas de Estaña.

En la Figura II.16 se compara el resultado de aplicar esta nueva paleta con la originalmente asignada en el programa RES2DINV. Esta última tiende a resaltar más las diferencias entre los valores superiores a 100 ohm.m, mientras que la nuevamente diseñada produce el efecto contrario. Dada la distribución de resistividad medida y la litología existente parece más útil esta nueva forma de destacar la distribución de resistividad.

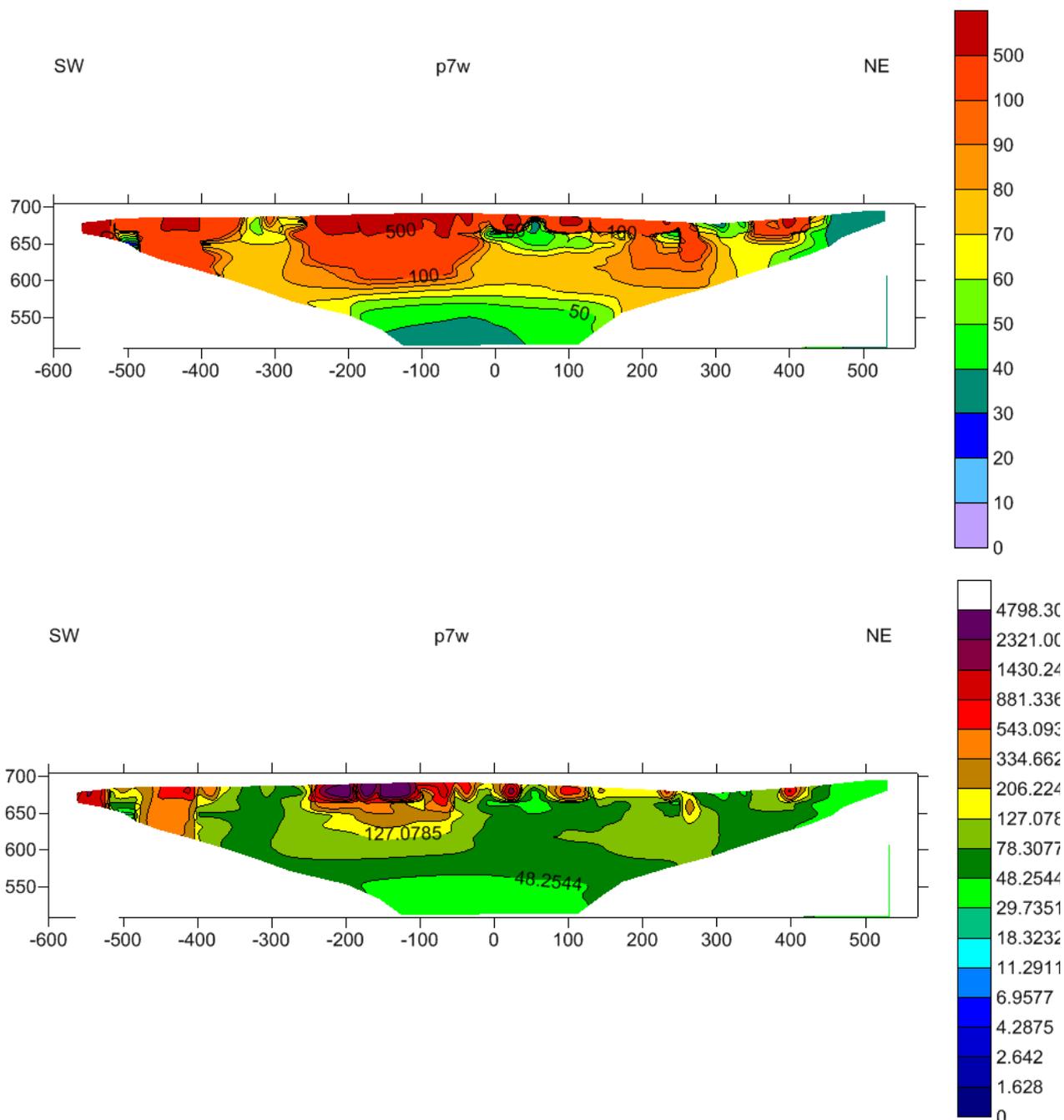


Fig. II.16 Comparación de aplicación de la nueva paleta diseñada (parte superior) con la obtenida en RES2DINV (parte inferior).

Esta misma paleta se ha preparado para las representaciones de valores por clases (classed-post) (Figura II.17), para dos tamaños del símbolo que se utilice para la representación del punto: **paleta clas post 500-10-02NEW.cls** para 0.20 cm, y **paleta clas post500-10-0.05.cls** para 0.05 cm.

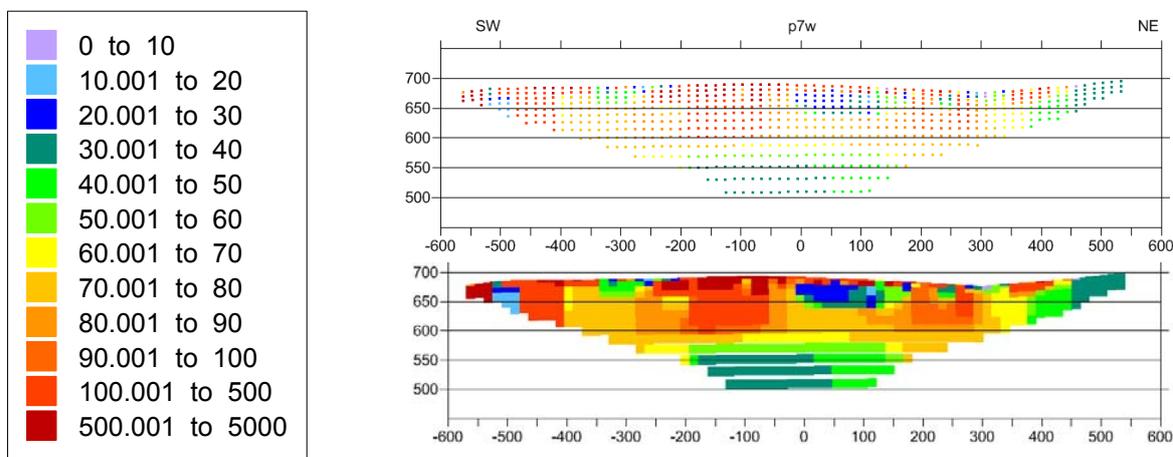


Fig. II.17 Paleta para representaciones tipo clas-post, y ejemplo utilizando los tamaños de símbolo de 0.05 y 0.2 cm.

Para la creación de paletas de imágenes hay que tener en cuenta que la adjudicación de color se establece, en este tipo de representación, para un valor en % respecto del máximo. Para la clasificación efectuada en el rango 0-500 ohm.m estos porcentajes son los indicados en la Tabla II.4, donde se muestra también la paleta creada **paleta imagen final 10-500bnew.CLR**

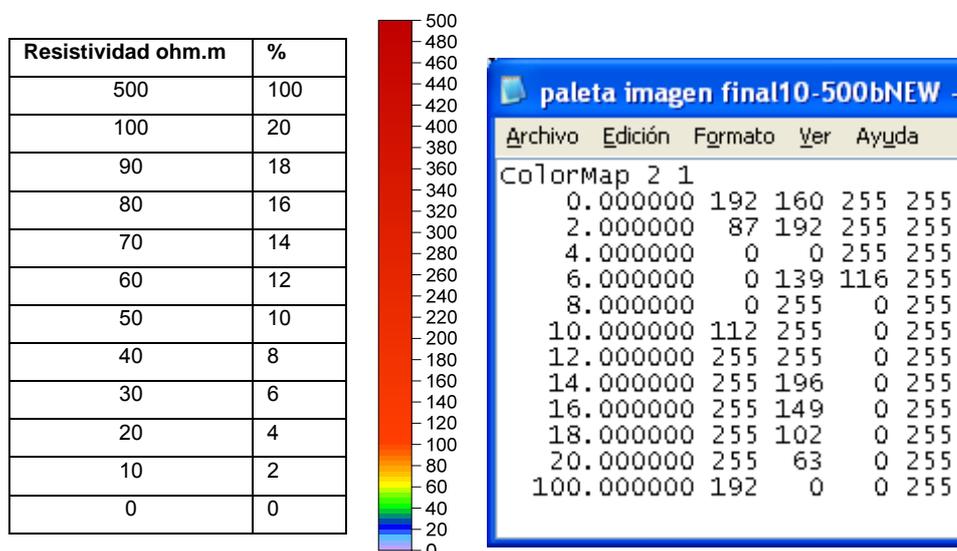


Tabla II.4 Izquierda: Valores porcentuales para la clasificación de la paleta de colores diseñada. Centro: paleta para imágenes. Derecha: asignación RGB a los intervalos definidos de valores porcentuales.

Es tipo de paletas puede utilizarse para cualquier otro rango de valores, pero entonces los colores ya no se corresponderán con los utilizados en la paleta para las mallas. Es por lo tanto necesario declarar en su aplicación el valor máximo y mínimo a los que debe aplicarse, como se indica en la Figura II.18

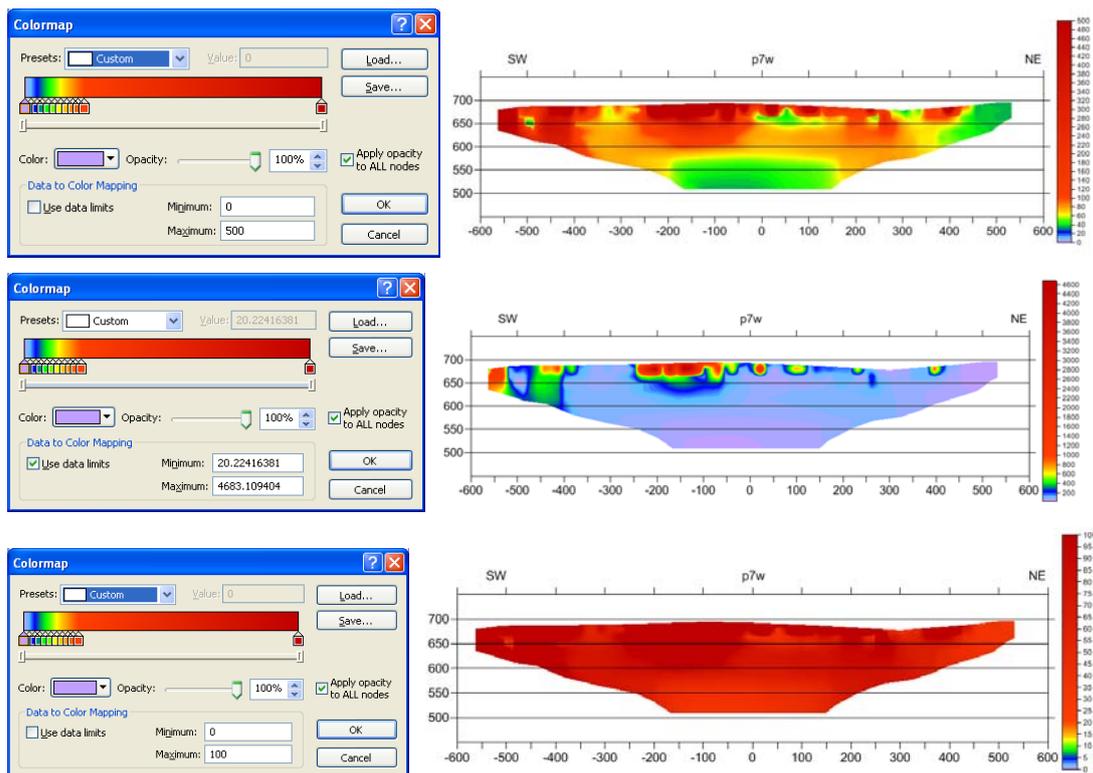


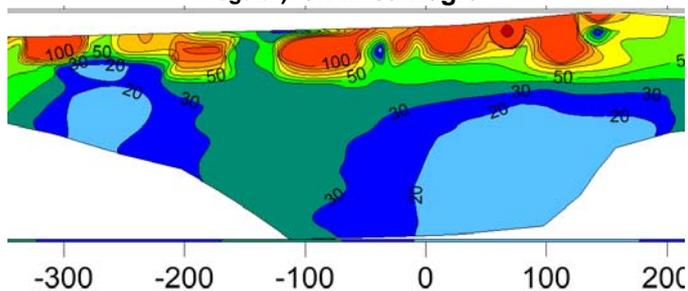
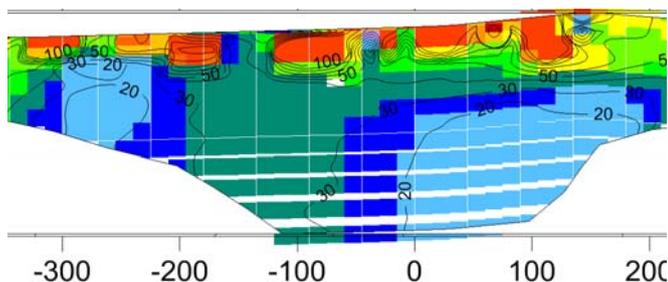
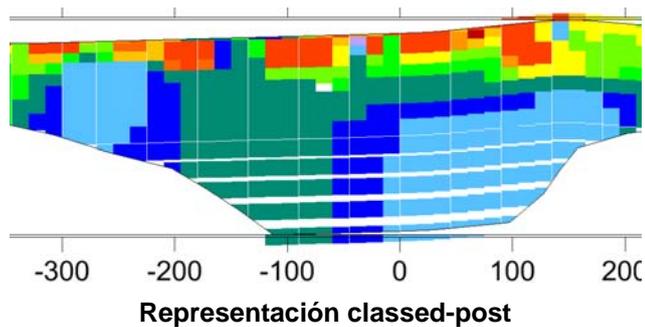
Fig. II.18 Ejemplo del resultado obtenido aplicando la misma paleta de imagen a los valores limitados al intervalo 0-500 ohm.m (parte superior), al intervalo total de los datos de 20-4682 ohm.m (parte central) y al intervalo 0-100 ohm.m (parte inferior)..

Esto es consecuencia de que el color que es aplicado a 40 ohm.m (8% de 500) será el mismo que se aplique a 374 ohm.m (8% de 4682) o a 8 ohm.m (8% de 100), según se recoge en la Figura II.19

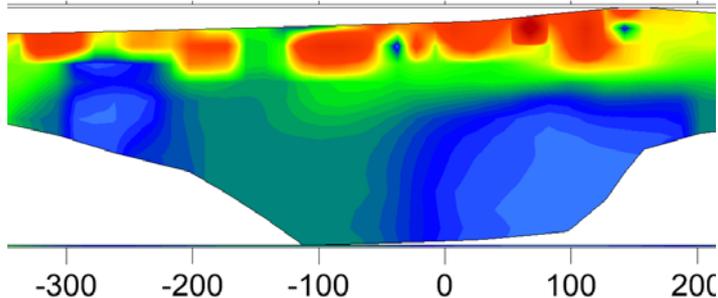
ohm.m	%	ohm.m	ohm.m	ohm.m	RBGColor
500	100	100	60	4682	R192 G0 B0 A255
100	20	20	12	936,4	R255 G63 B0 A255
90	18	18	10,8	842,76	R255 G102 B0 A255
80	16	16	9,6	749,12	R255 G149 B0 A255
70	14	14	8,4	655,48	R255 G196 B0 A255
60	12	12	7,2	561,84	R255 G255 B0 A255
50	10	10	6	468,2	R112 G255 B0 A255
40	8	8	4,8	374,56	R0 G255 B0 A255
30	6	6	3,6	280,92	R0 G139 B116 A255
20	4	4	2,4	187,28	R0 G0 B255 A255
10	2	2	1,2	93,64	R87 G192 B255 A255
0	0	0	0	0	R192 G160 B255 A255

Fig. II.19 Modificación de la asignación de color según la declaración de rango al que se aplica una paleta de imagen.

En este estudio se utilizará la misma paleta para la representación de los valores de resistividad de las secciones tanto en forma de asignación de color a los valores en las celdas (classed-post), como a los valores de distribución por intervalos obtenidos tras el paso a malla regular o de imagen (Figura II.20).



Representación en forma de imagen con paleta aplicada al intervalo 0-500



Representación en forma de imagen con paleta aplicada al intervalo 0-100

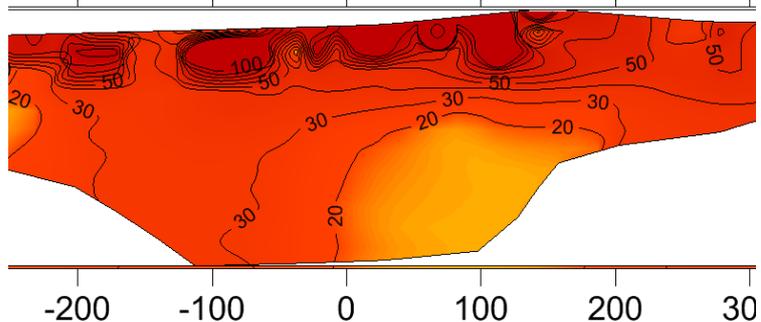


Fig. II.20 Ejemplos de tipos de representación con la misma paleta de colores.

Si se quisiera aplicar esta escala de colores al intervalo 0-100, habría que modificar la declaración de % en la paleta de imagen de tal forma que 90 ohm.m (18 % de 500) pasa a ser 90 % de 100 (Figura II.21), obteniéndose el resultado de la imagen de la Figura II.22.



Fig. II.21 Paleta obtenida con la misma escala de colores, pero diseñada para el rango 0-100 ohm.m

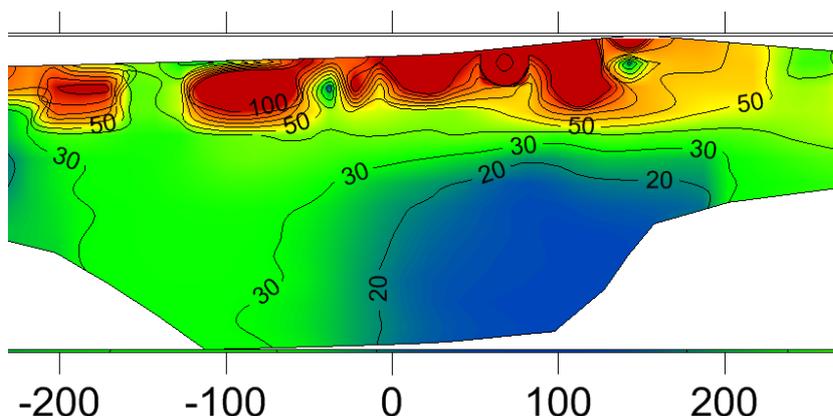


Fig. II.22 Aplicación de la paleta de la Figura II.20 a al rango 0-100m, con un resultado parecido a la paleta inicial diseñada para 0-500 ohm.m.

La utilización de las propiedades de las imágenes permite realizar un análisis adecuado a cada caso. Debe tenerse además en cuenta que la paleta de imagen adjudica el color a la celda correspondiente de la malla calculada en Surfer, efectuándose posteriormente una interpolación para asignar color al "pixel", por lo que la paleta resulta ser gradacional, a diferencia de adjudicar un color fijo a una celda o a un intervalo de valores de resistividad, como se ilustra en la Figura II.23.

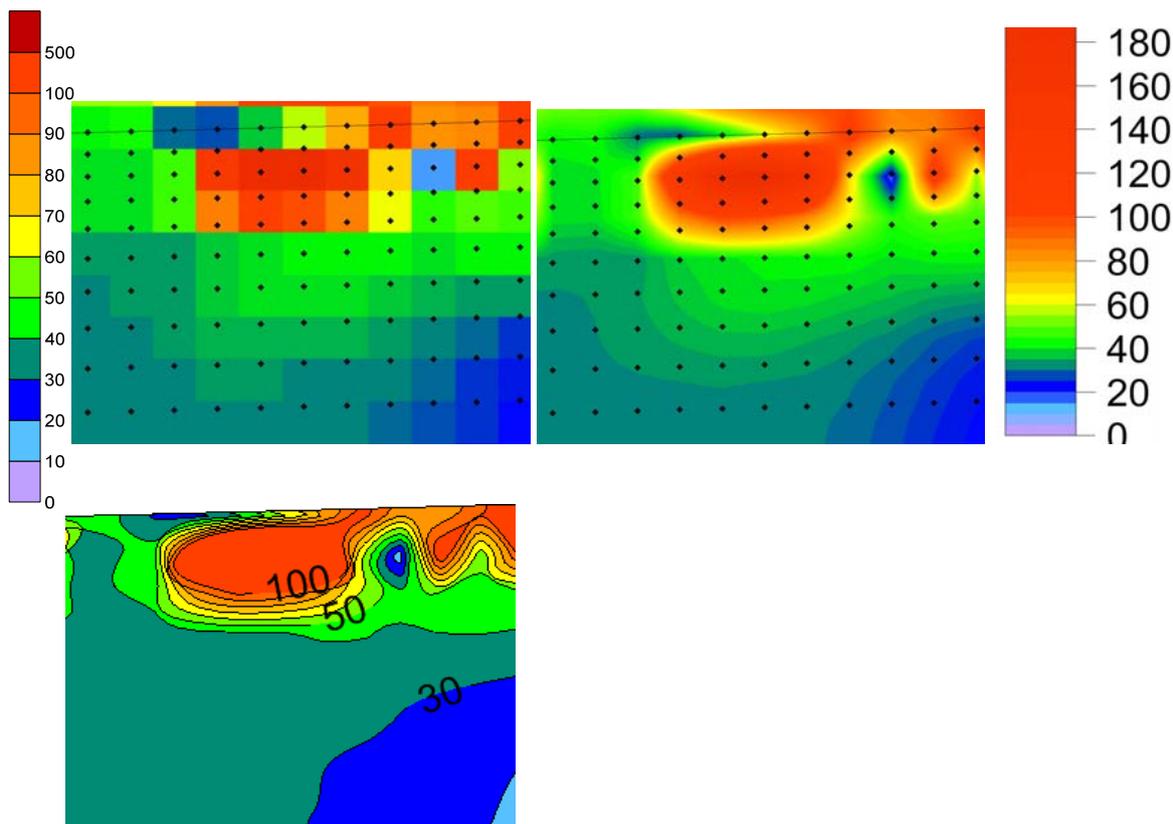


Fig. II.23 Ejemplo de las diferencias y del significado de asignación de una paleta de color a una representación de puntos clasificados (superior izquierda), , mapas de isovalores (inferior izquierda) e imagen (superior derecha).

Para realizar el estudio hidrogeológico se ha establecido la clasificación de resistividad de la Figura II.24, con la que se han preparado las consiguientes paletas (Figura II.25)

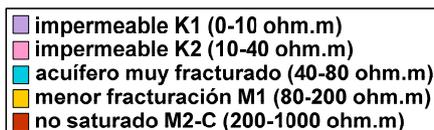


Fig. II.24 Clasificación de resistividades en rangos para el estudio hidrogeológico

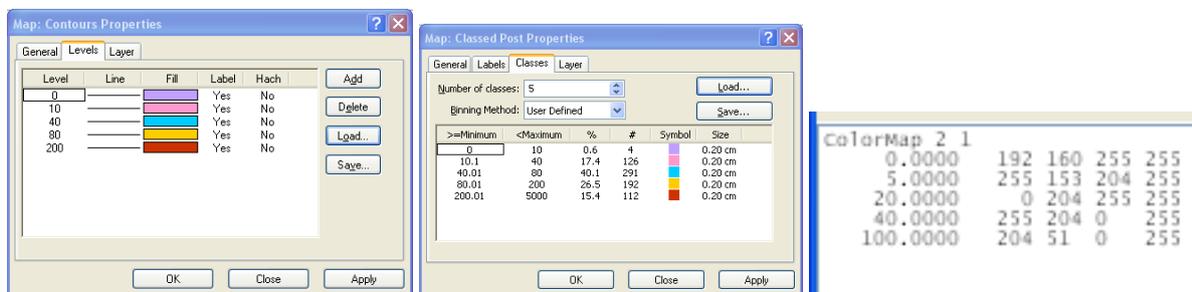


Fig. II.25 Izquierda: Paleta para trazado de isolíneas en color lleno a partir de valores en malla: paleta grid acuífero.ivl. Centro: Paleta para post de los valores en la malla de inversión: paleta clas-post acuífero.cls. Derecha: Paleta para imágenes: paleta imagen final acuífero (código RGB).

II.6 Preparación de los ficheros de blanqueo de los mapas e imágenes.

Los ficheros resultado de la inversión proporcionan los valores x,z,r de la resistividad r para el conjunto de celdas de centro x,z , expresando x como la distancia respecto del centro 0 del dispositivo y z la cota topográfica. Estos valores son los correspondientes a las celdas utilizadas, que tienen 15 m de anchura (distancia entre electrodos) y altura variable con la profundidad (Figura II.26)

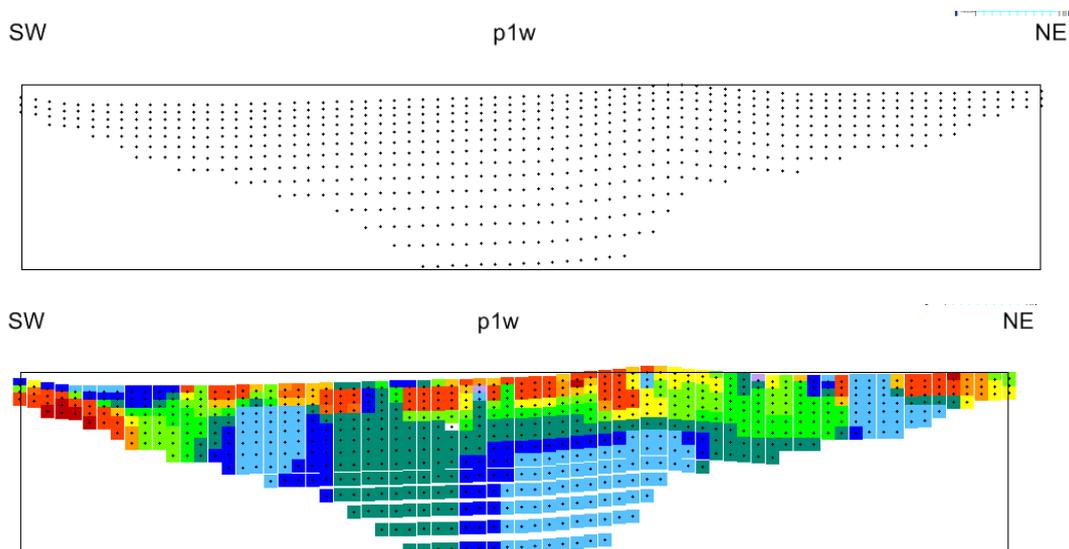


Fig. II.26 Parte superior: transporte de los valores x,y de los centros de las celdas resultado de la inversión. Parte inferior: asignación de la paleta de color clas-post a la resistividad r de cada celda.

Al obtener mallas regulares mediante Surfer, los valores de resistividad anteriores se recalculan a todos los puntos en el interior de un cuadrado limitado por los extremos (x_{max} , x_{min} , z_{max} , x_{min}) de las posiciones x,z y de dimensiones las elegidas en el proceso de paso a malla regular, que ha sido de 15 m (excepto en la sección P3w) (Figura II.27).

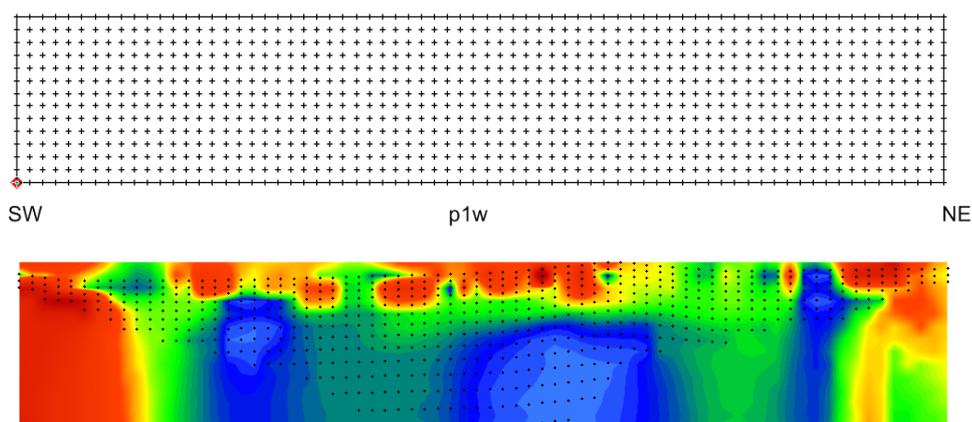


Fig. II.27 Parte superior: transporte de las posiciones x,y de los centros de las celdas resultado de la interpolación a malla regular. Parte inferior: imagen de resistividad con superposición de los puntos donde realmente se ha obtenido un valor de resistividad en la inversión.

Para el trazado de mapas de resistividad por líneas de isovalor, los valores extrapolados fuera del contorno de los valores obtenidos en la inversión son eliminados por un proceso de eliminación de dichos puntos de la malla o “blanqueo”. Las imágenes pueden crearse a partir de la malla

blanqueada; sin embargo, según el método de interpolación que se utilice el uso de dicha malla blanqueada supone la pérdida de la información de borde, de tal forma que para reproducir bien los datos la imagen obtenida de resistividad necesita ser blanqueada utilizando un sistema diferente, que consiste en superponer la figura de un polígono cerrado, limitado a los puntos de contorno, dándole el color blanco, lo que no permite ver el resto de los valores fuera de ese contorno.

Los ficheros de blanqueo proporcionados por RES2INV son dichos polígonos, y pueden ser importados en SURFER como mapa base tipo BLN, eliminando (tapando) así la parte de imagen que está fuera de su perímetro, definido por los puntos de contorno de los datos (Figura II.28).

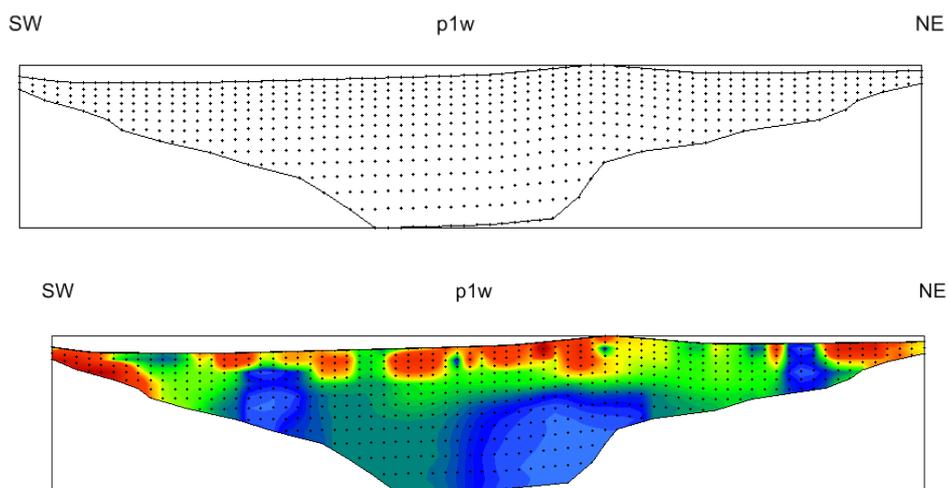


Fig. II.28 Ejemplo de aplicación de un polígono de blanqueo de imagen como mapa base.

La utilización de estos ficheros también produce en ocasiones la pérdida de información gráfica, por lo que es mejor utilizar como límite superior la posición de los electrodos, así como ampliar algo más el resto de la periferia, teniendo en cuenta el ancho y alto de las celdas utilizadas en la inversión, como se indica en la Figura II.29.

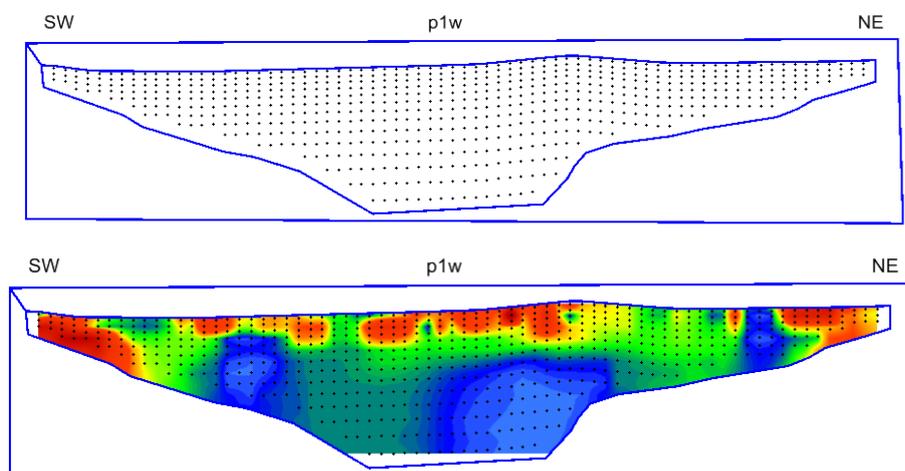


Fig. II.29 Ejemplo de ampliación del polígono de blanqueo y su efecto en la imagen.

Esto tipo de ficheros pueden construirse a partir del fichero de posición de electrodos suministrado por RES2INV o, si no se dispone de este fichero, tomando el de la primera fila de datos, aumentando la cota en 3.5 m (semi-altura de la primera fila de celdas); mediante digitalización de sus coordenadas x,y se forma el fichero de los puntos de contorno (nº 1a N en el ejemplo de la Figura II.30 para la sección p1w), cerrando (repetiendo) en el punto 1 inicial de electrodos; para formar el polígono, hay que añadir los puntos de un cuadrado exterior (puntos a, b, c, d en el ejemplo), cerrando de nuevo en el punto inicial de electrodos. Por lo tanto la secuencia de puntos en el fichero es: 1,2.....,k,...N,1,a,b,c,d,a,1.

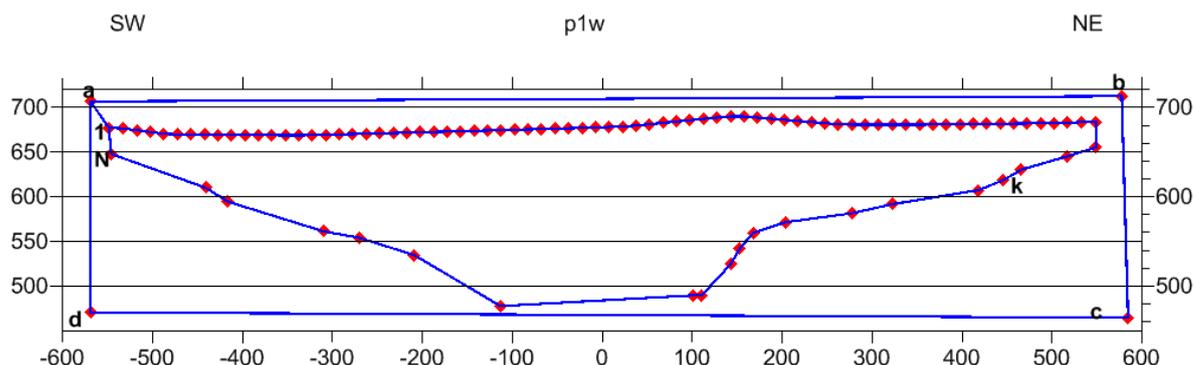


Fig. II.30 Ejemplo de construcción de un polígono de blanqueo de imágenes.

Si en vez de utilizar este sistema de blanqueo se utiliza el sistema de blanquear la malla surfer utilizando el polígono interno (puntos 1 a N) (generando así una malla tipo out, con la que crear la imagen), el resultado es que se pierde una banda de información, ya que se eliminan completamente las celdas que tienen parte fuera del polígono de blanqueo (Figura II. 31).

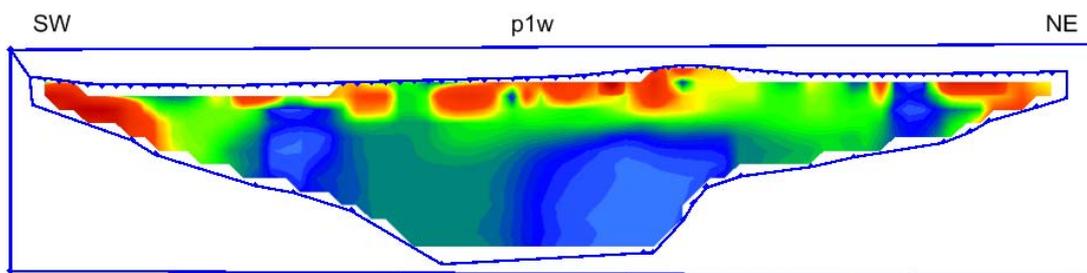


Fig. II.31 Ejemplo de pérdida de información al utilizar el fichero de valores en malla blanqueado o un polígono de blanqueo ajustado exactamente a los centros de las celdas.

II.7 Selección de cotas y obtención de mapas de resistividad a diferentes cotas

Según se indica en el capítulo 2 “Nociones generales del Método de Perfiles Eléctricos” del Informe GEOFISICA REALIZADA EN LAS LAGUNAS DE ESTAÑA (HUESCA)- 2008 (nº CID 63764), para la medición de los perfiles de resistividad se emite una corriente eléctrica de intensidad I por un par de electrodos y se mide la diferencia de potencial V a que da lugar la distribución de dicha corriente por el subsuelo en otro par de electrodos. Con los valores de I e V , junto con una constante que depende del tipo del dispositivo electródico utilizado (geometría o distancias entre electrodos), se calcula un valor de la resistividad, denominada resistividad aparente, que se asigna a una posición (en distancia y en profundidad), siguiendo diversos criterios según el dispositivo y sus dimensiones. En la primera etapa del proceso de datos, parte de estos puntos son eliminados por criterios de ruido, calculándose para el resto un nuevo valor de resistividad aparente en los mismos puntos de asignación. Por ejemplo, para el dispositivo Schlumberger la Figura II.32 indica la distribución de estos puntos de asignación de resistividad, o niveles, que es variable a lo largo del perfil (en función de las combinaciones utilizadas de distancias), y es variable con la profundidad, estando más separados los niveles (menor resolución) según aumenta la profundidad.

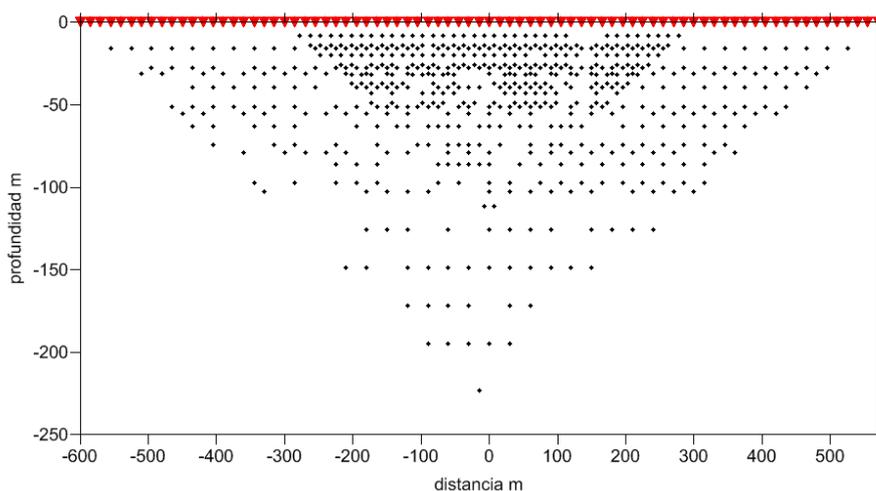


Fig. II.32 Puntos de asignación de la resistividad aparente medida con un dispositivo Schlumberger.

La inversión de los datos consiste en distribuir el terreno en celdas de anchura igual a la distancia entre electrodos y altura variable con la profundidad, asignando a cada celda un valor de resistividad, formando un conjunto cuya distribución sea capaz de reproducir mediante cálculos matemáticos los valores medidos. A diferencia de la distribución de los puntos de asignación de las mediciones, la distribución de las celdas es homogénea a lo largo del perfil, manteniéndose la variación de distancia entre niveles con la profundidad, como puede verse en la Figura II.33 para el mismo perfil anterior de la Figura II.32.

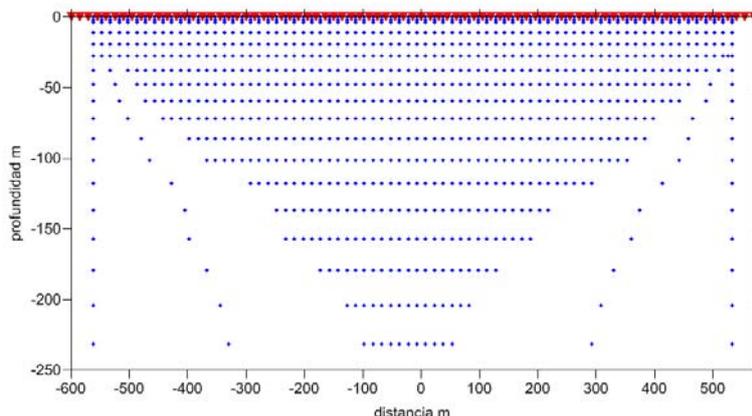


Fig. II.33 Distribución de los puntos centrales de las celdas a las que se asigna un valor de resistividad como resultado de la inversión para el perfil de la Figura II.32.

Finalmente, al introducir las cotas de los electrodos de medición sobre la superficie del terreno, se obtiene el modelo final de resistividad, que es el utilizado para su representación gráfica. Este modelo es el contenido en los ficheros de partida con los valores de la distancia, cota y resistividad de cada centro de las celdas que forman el modelo geoelectrico del subsuelo. En este modelo, aunque para cada nivel se mantiene la profundidad de cada punto de asignación respecto de la superficie, varía su cota a lo largo del perfil (Figura II.34).

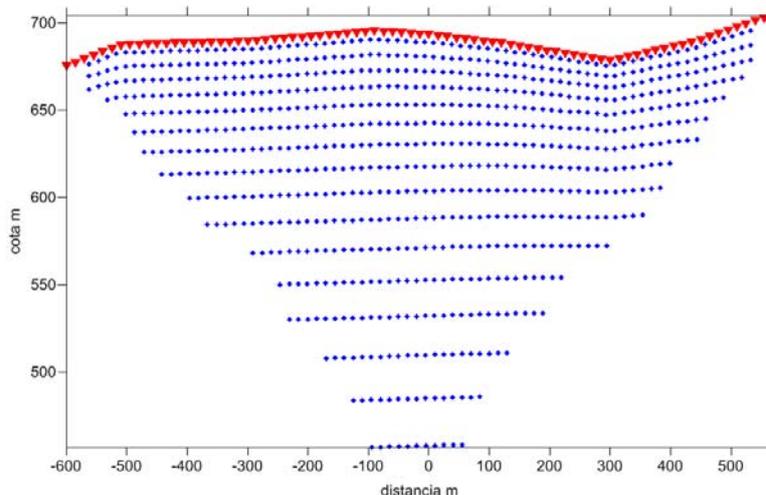


Fig. II.34 Distribución de los puntos centrales de las celdas una vez introducida la topografía (altimetría) de la superficie para el modelo de perfil de la Figura II.33.

Así, para el perfil P5w la Tabla II.5 indica, para la fila situada en la distancia 0 o centro del perfil (Figura II.35), la cota de cada nivel (valor de cota asignado en los ficheros de datos), la profundidad desde la superficie, la altura de cada celda, y la profundidad y cota de su techo (modelo de celdas de anchura igual a la distancia entre electrodos (15 m) y potencia (alto de celda) creciente con la profundidad y del orden de 7, 7, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 21 y 22 m respectivamente).

posicion	z	profund. desde sup	alto de celda	profund. techo de celda	cota techo celda
electrodo	680,8	0,0			
nivel 1	677,5	3,3	6,5	0,0	680,8
nivel 2	671,1	9,7	6,7	6,3	674,5
nivel 3	664,2	16,6	7,4	12,9	667,9
nivel 4	656,3	24,5	8,3	20,4	660,4
nivel 5	647,6	33,2	9,2	28,6	652,2
nivel 6	637,9	42,9	10,2	37,8	643,0
nivel 7	627,2	53,6	11,4	47,9	632,8
nivel 8	615,2	65,6	12,6	59,3	621,5
nivel 9	601,9	78,9	14,0	71,8	608,9
nivel 10	587,2	93,6	15,5	85,8	595,0
nivel 11	570,9	109,9	17,2	101,3	579,5
nivel 12	552,8	128,0	19,0	118,5	562,3
nivel 13	532,9	147,9	21,0	137,4	543,4
nivel 14	510,8	170,0	22,1	158,9	521,9

Tabla II.5 Datos de profundidad y cotas de las celdas para la fila central del modelo del perfil P5w.

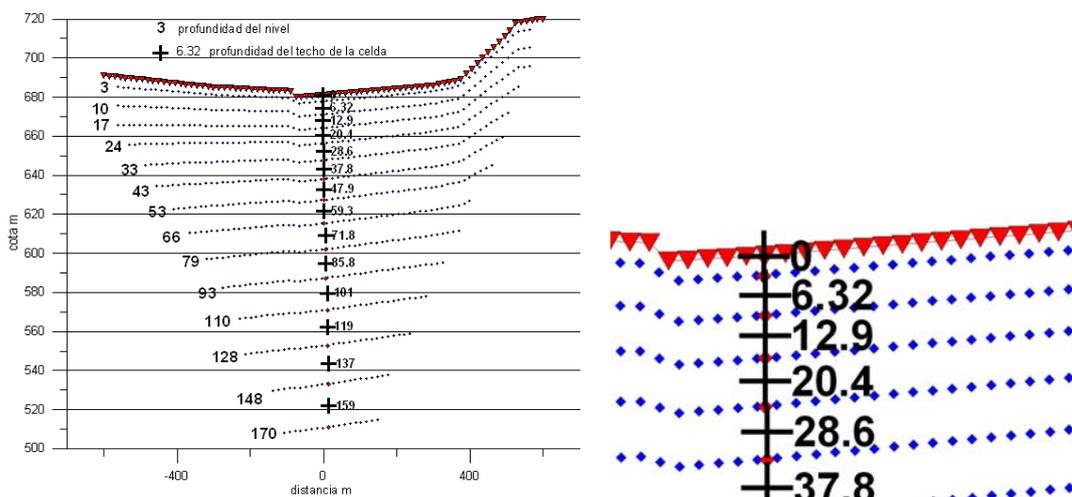


Fig. II.35 Izquierda: Perfil de la Figura II.34 con la posición de los valores referidos en la Tabla II.5. La línea superior (en rojo) indica la posición de los electrodos. Derecha: detalle de la posición de los electrodos y de los puntos centrales de las celdas.

Por lo tanto de lo que se dispone es de un conjunto de valores de resistividad a la misma profundidad respecto del nivel del suelo para cada perfil. Por otra parte, al ser la altimetría de cada perfil diferente (Figura II.36), si se quisieran trazar mapas de valores de resistividad a la misma cota, el número de puntos sería muy escaso, teniendo que agrupar a la misma “cota” todos los que se encuentran en un cierto rango, mínimo de unos 10 m, como indica la Figura II.36, para obtener un número suficiente de puntos con los que poder trazar mapas de valores de resistividad a la misma cota.

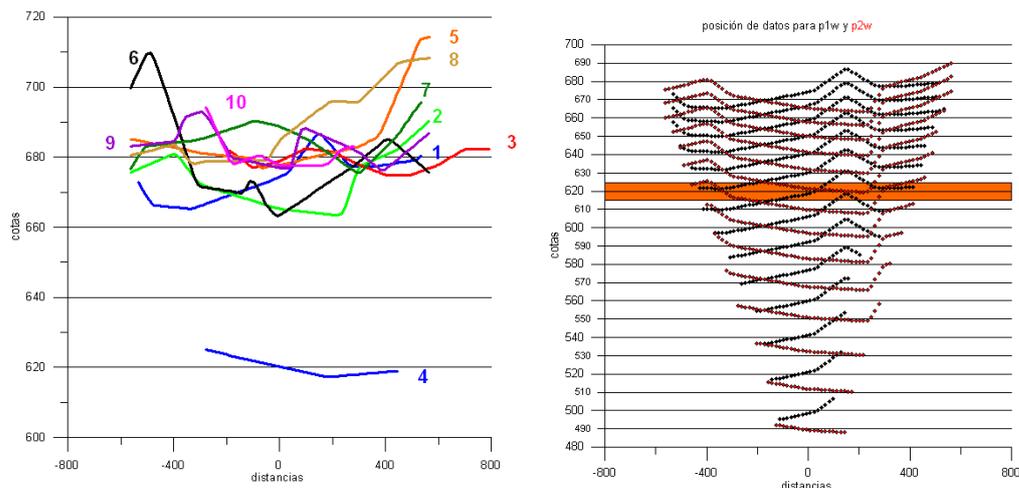


Fig. II.36 Izquierda: altimetría de superficie de los diferentes perfiles. Derecha: Ejemplo del reducido número de puntos que se encuentran a la misma cota, siendo necesario, para aumentarlo y disponer de una población suficiente para el trazado de mapas, la agrupación en intervalos de al menos 10 m de potencia.

En consecuencia, se ha optado por trazar mapas de resistividad a profundidad constante respecto de la superficie. La profundidad de los diferentes 14 niveles obtenidos en la inversión de estos datos no es exactamente la misma para todos los perfiles; la profundidad del primer nivel es más uniforme, aunque oscila entre 3 y 4 m. Para el conjunto de los perfiles, la Tabla II.6 resume las profundidades medias respecto del primer nivel:

perfil	nivel													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	7	15	24	33	44	56	68	82	97	114	133	153	176
2	0	8	16	24	33	44	56	68	82	98	114	133	153	176
5	0	7	14	22	31	41	51	63	77	91	108	126	146	168
6	0	7	15	21	30	39	50	62	75	89	105	123	142	164
7	0	8	17	26	36	47	59	71	86	101	118	137	157	180
8	0	7	14	22	31	41	52	64	78	93	109	128	148	171
9	0	7	14	21	30	40	51	63	76	91	108	126	147	169
10	0	7	14	22	31	41	53	65	78					
medias m	0	7,3	15	23	32	42	54	66	79	94	111	129	149	172
desviación m	0	1	2	3	3	3	4	5	4	5	3	6	4	8

Tabla II.6 Profundidad media de los niveles de información de resistividad, respecto del primer nivel, para los diferentes perfiles medidos.

Las desviaciones respecto del valor medio son mayores para los niveles más profundos (Figura II.37), no sobrepasando los 6-8 m, excepto para el perfil PE7, que presenta valores más desviados. En los

ficheros **Pw xyz** que se han generado el valor de profundidad de las diferentes columnas de cotas-resistividad (z-xx, res-xx) es el indicado en esta tabla, y por lo tanto es algo distinto para cada perfil.

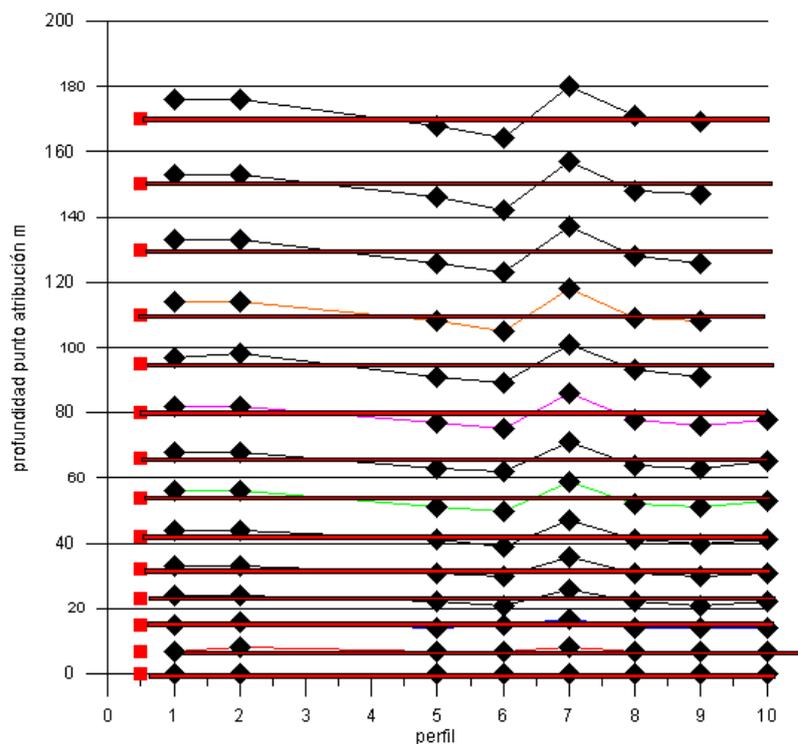


Fig. II.37 Profundidad media de los niveles de información de resistividad, respecto del primer nivel, para los diferentes perfiles medidos (valores en Tabla II.6)

Adoptando los valores medios redondeados, para el conjunto de los datos la profundidad del techo de cada nivel de celdas se recoge en la Tabla II.7.

posición	Prof. en sección	Prof. desde superficie	alto de celda	Prof. del techo de celda
electrodo		0,0		
nivel 1	0,0	3,0	6,0	0
nivel 2	7,0	10,0	7,5	6,0
nivel 3	15,0	18,0	8,0	13,5
nivel 4	23,0	26,0	8,5	21,5
nivel 5	32,0	35,0	9,5	30,0
nivel 6	42,0	45,0	11,0	39,5
nivel 7	54,0	57,0	12,0	50,5
nivel 8	66,0	69,0	13,0	62,5
nivel 9	80,0	83,0	14,5	75,5
nivel 10	95,0	98,0	15,0	90,0
nivel 11	110,0	113,0	17,5	105,0
nivel 12	130,0	133,0	20,0	122,5
nivel 13	150,0	153,0	20,0	142,5
nivel 14	170,0	173,0	20,0	162,5

Tabla II.7 Valores adoptados para la profundidad de los niveles de información.

Los mapas de resistividad se han trazado para los valores de las celdas a profundidad constante desde el suelo (cota variable). En el fichero **total xyz.xls** se encuentran los valores de las coordenadas X,Y UTM de cada punto de atribución, con los pares de valores asociados z(cotas) y r (resistividad) a cada nivel del modelo final del proceso de inversión, para todos los perfiles. Este fichero es el utilizado para el trazado de los mapas de resistividad a diferentes profundidades, tomando como valor de referencia (denominación de la profundidad del mapa) el de la profundidad del techo de las celdas de acuerdo con los valores medios anteriormente calculados: 0, 6, 14, 22, 30, 40, 50, 60, 75, 90, 100, 122, 140 y 160 m. Estos valores deben entenderse como una aproximación con un margen igual al indicado en la desviación de cada nivel.

Como la cobertura o número de celdas por cada nivel disminuye con la profundidad, la superficie cartografiada también lo hace, como se indica en la Figura II.38.

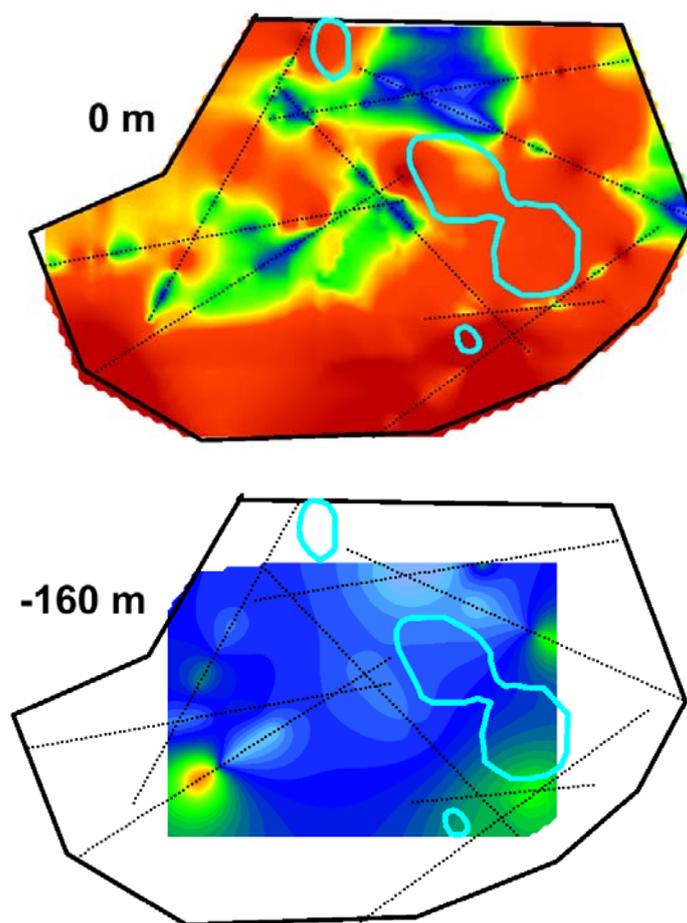
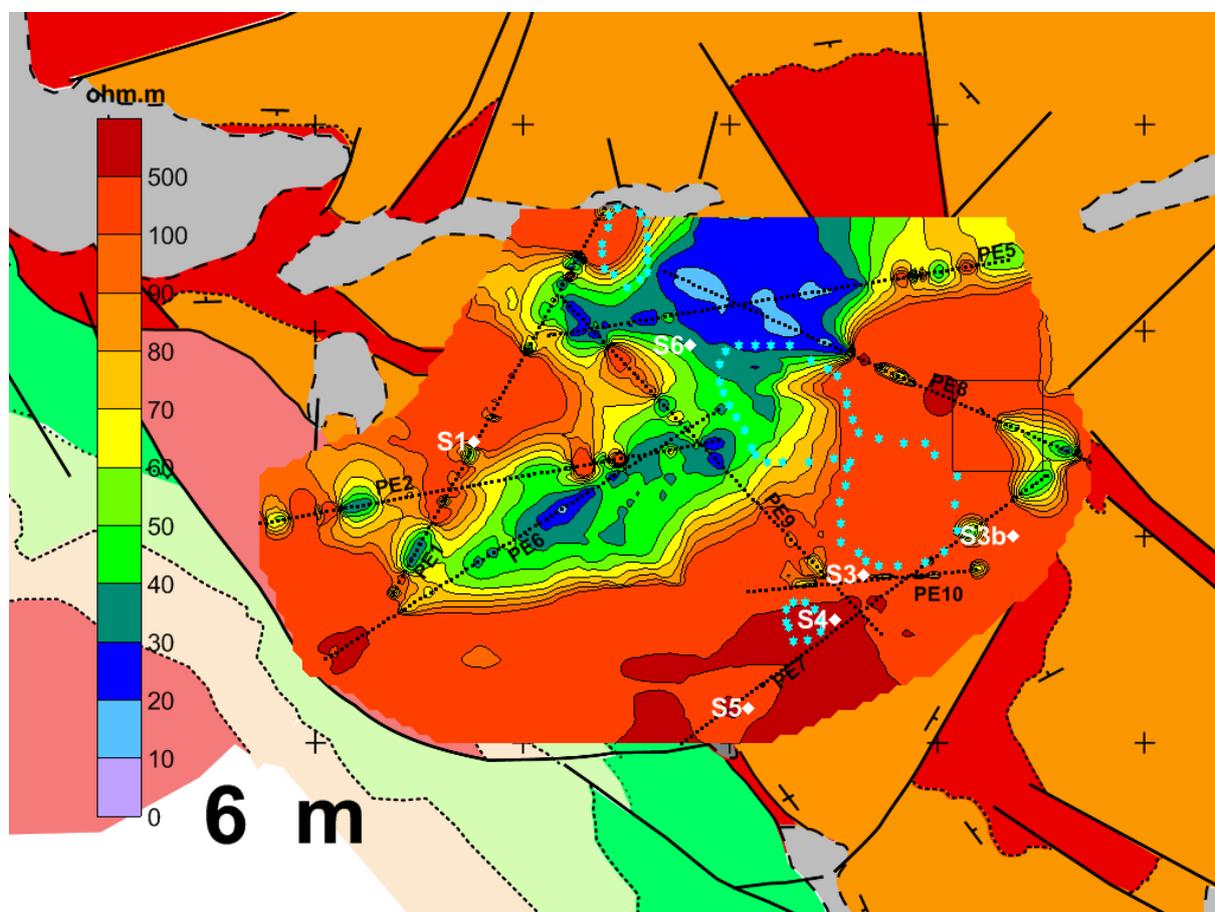
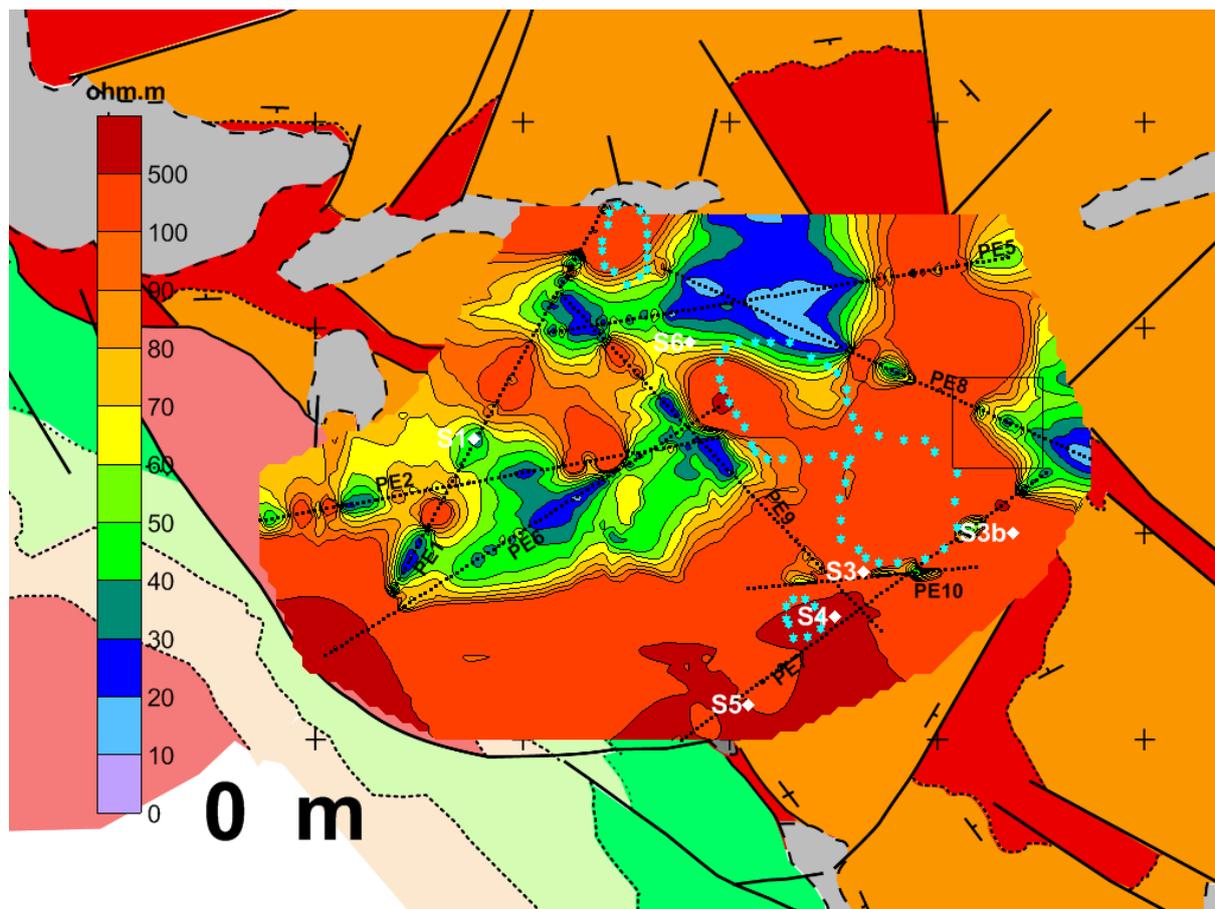
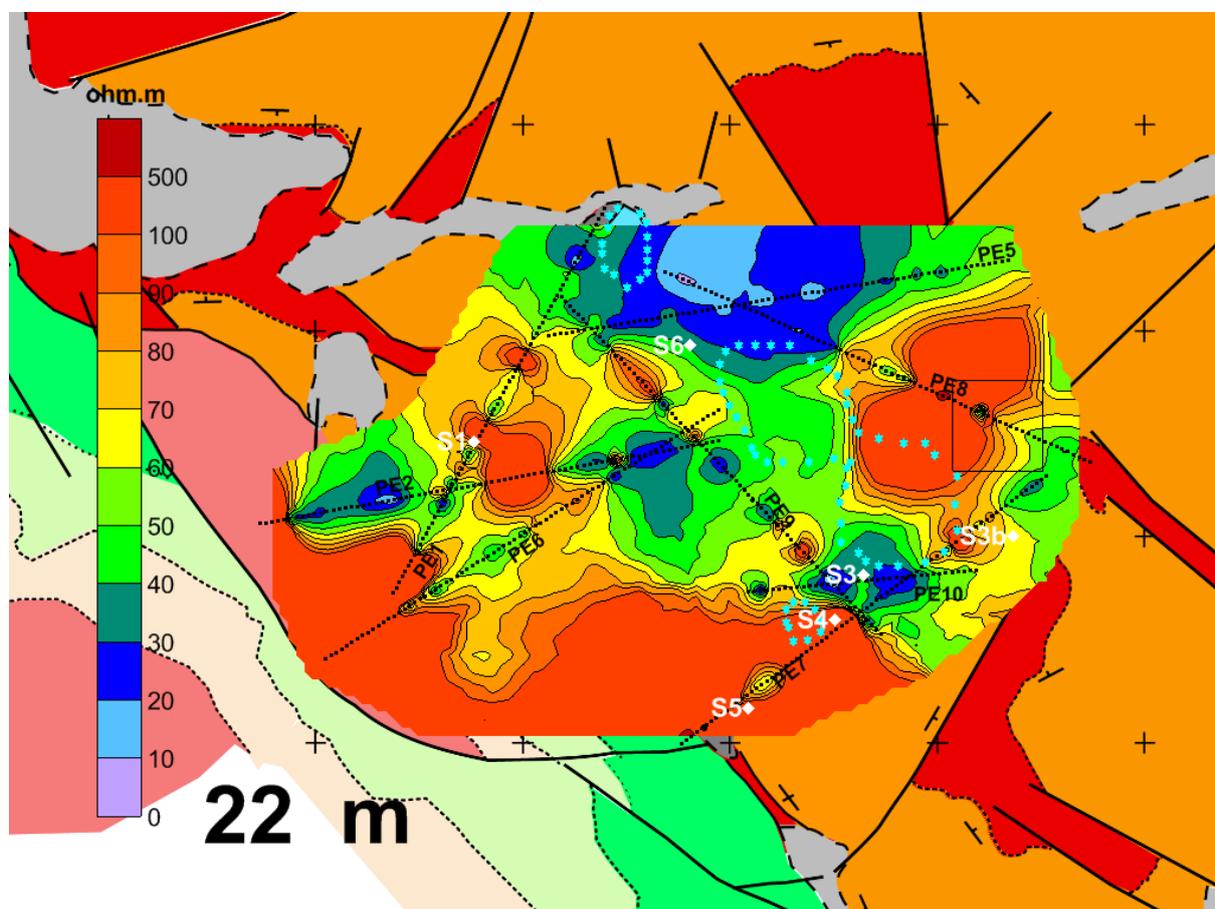
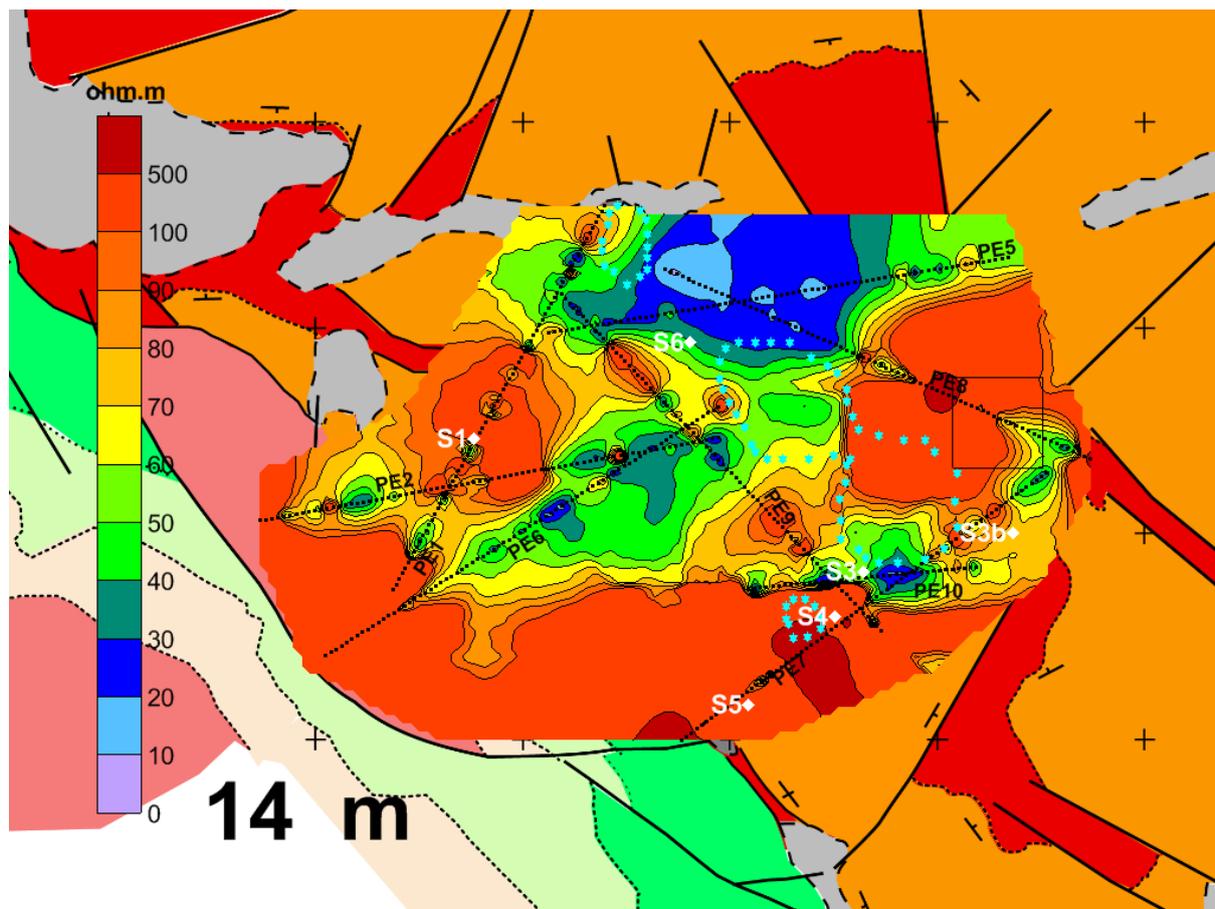


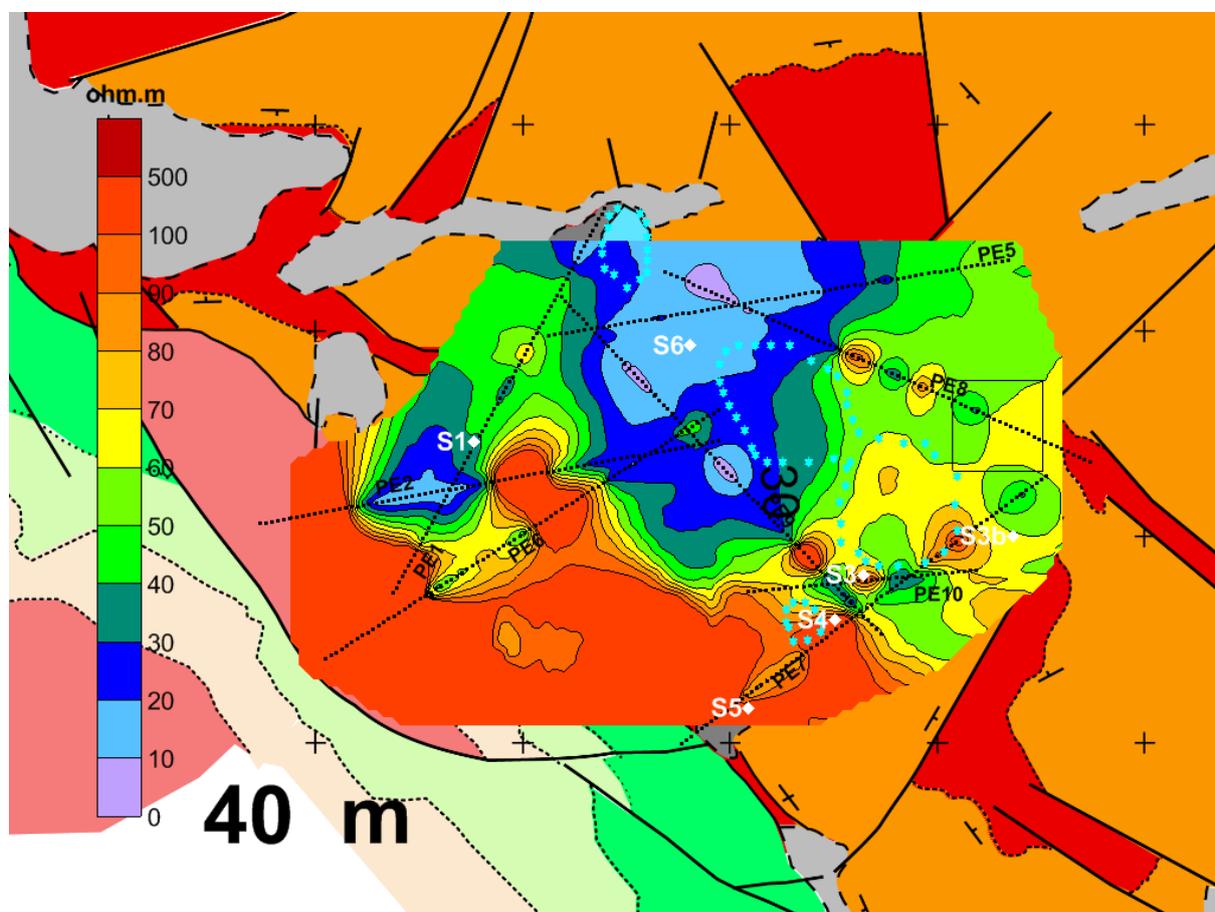
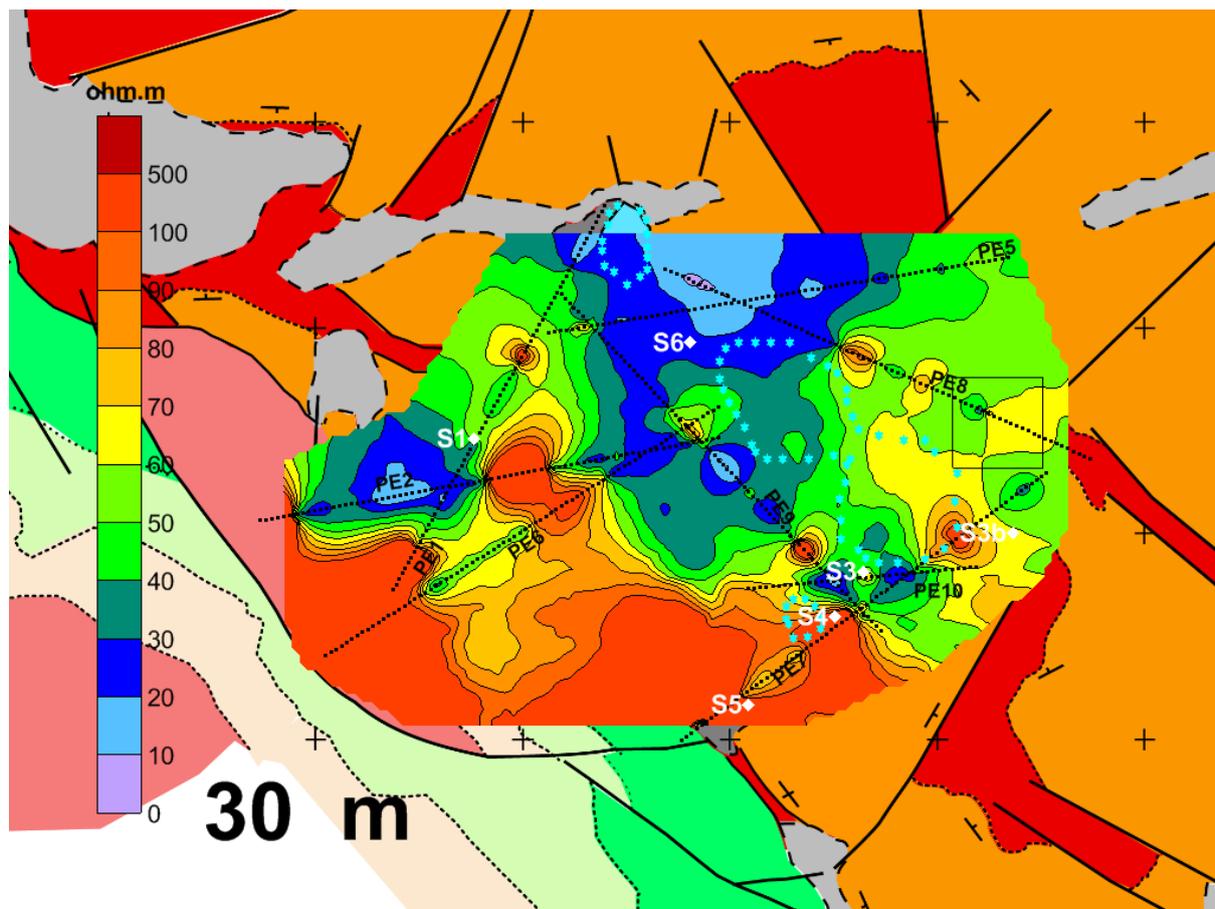
Fig. II.38 Mapas de resistividad en la superficie del terreno y a 160 m de profundidad, mostrando la disminución del área de la que se tiene información, como consecuencia de la cobertura variable con la profundidad obtenida en función de los dispositivos electrónicos.

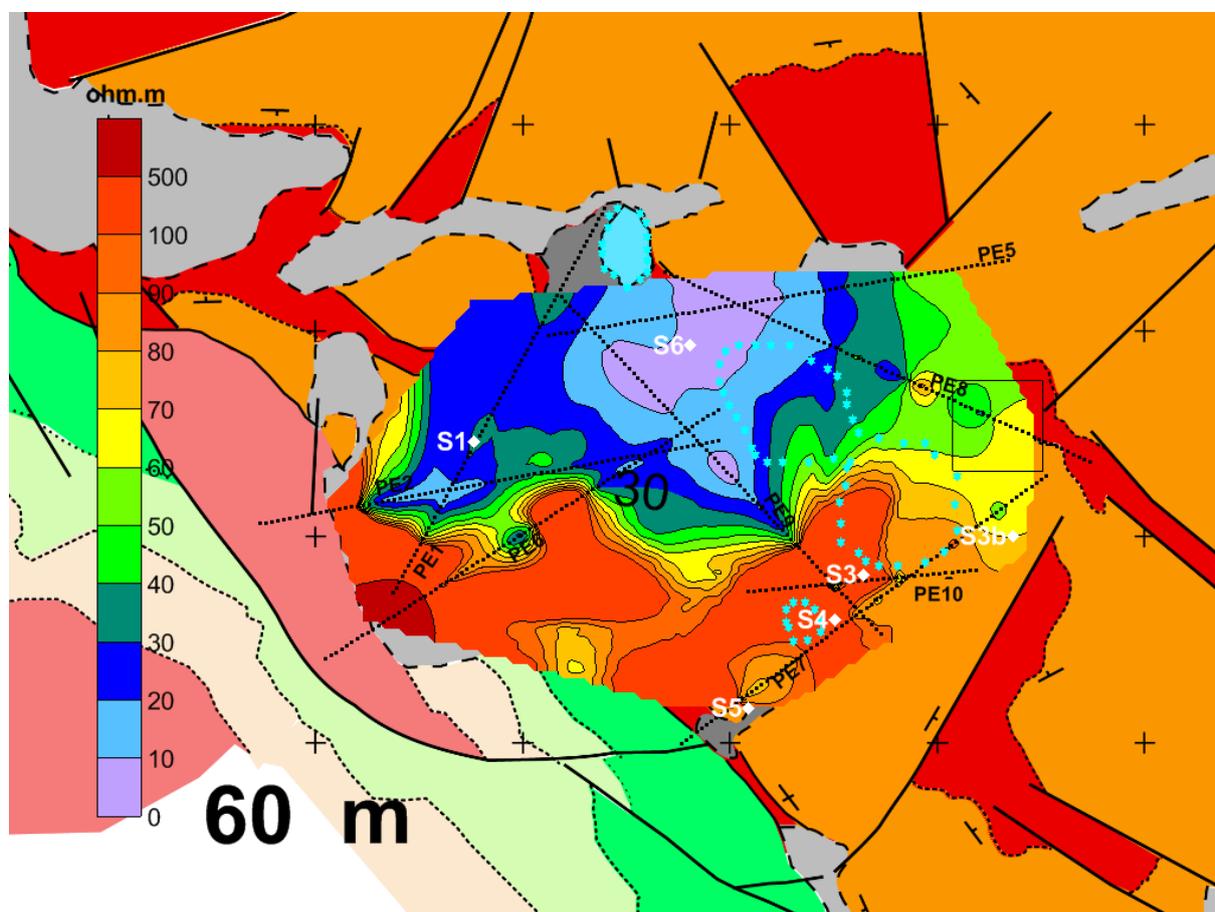
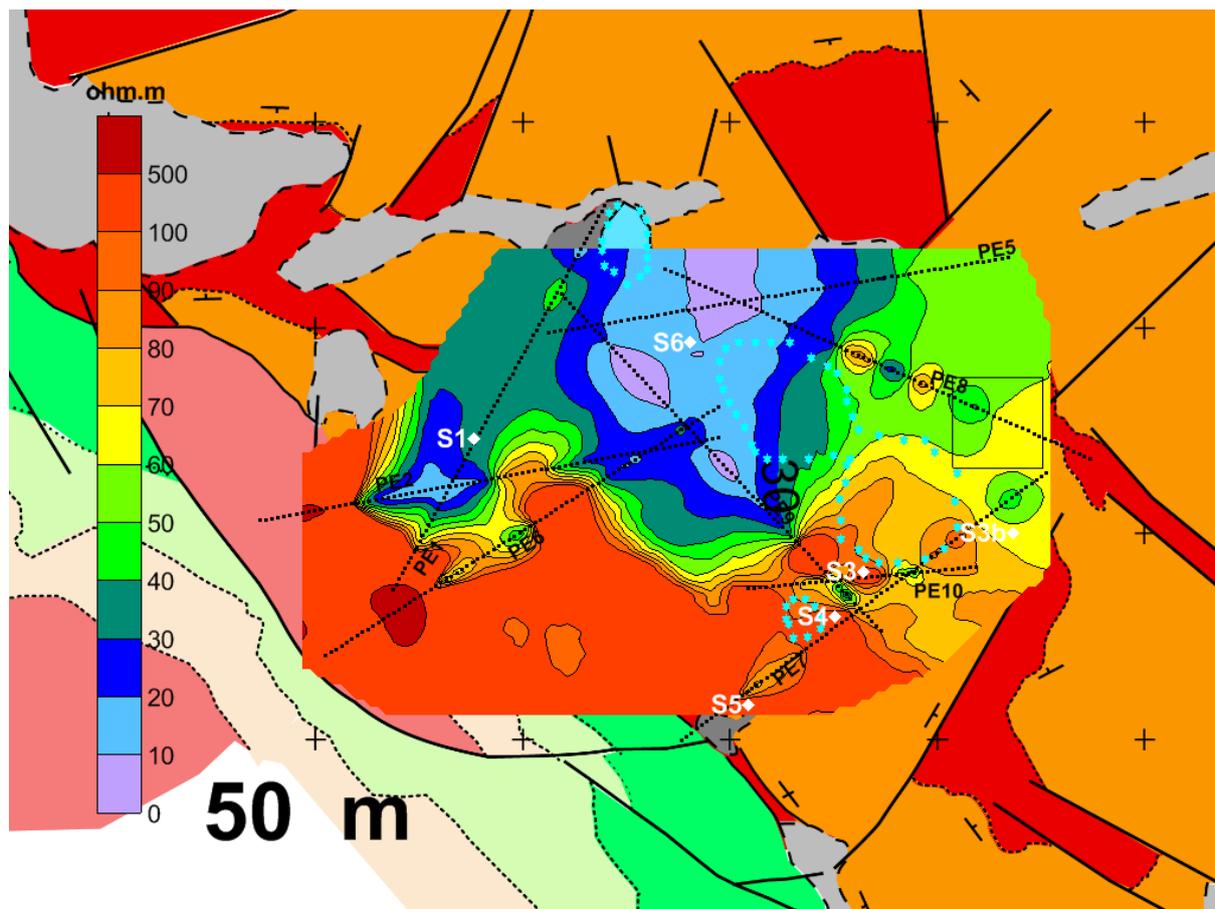
ANEXO III

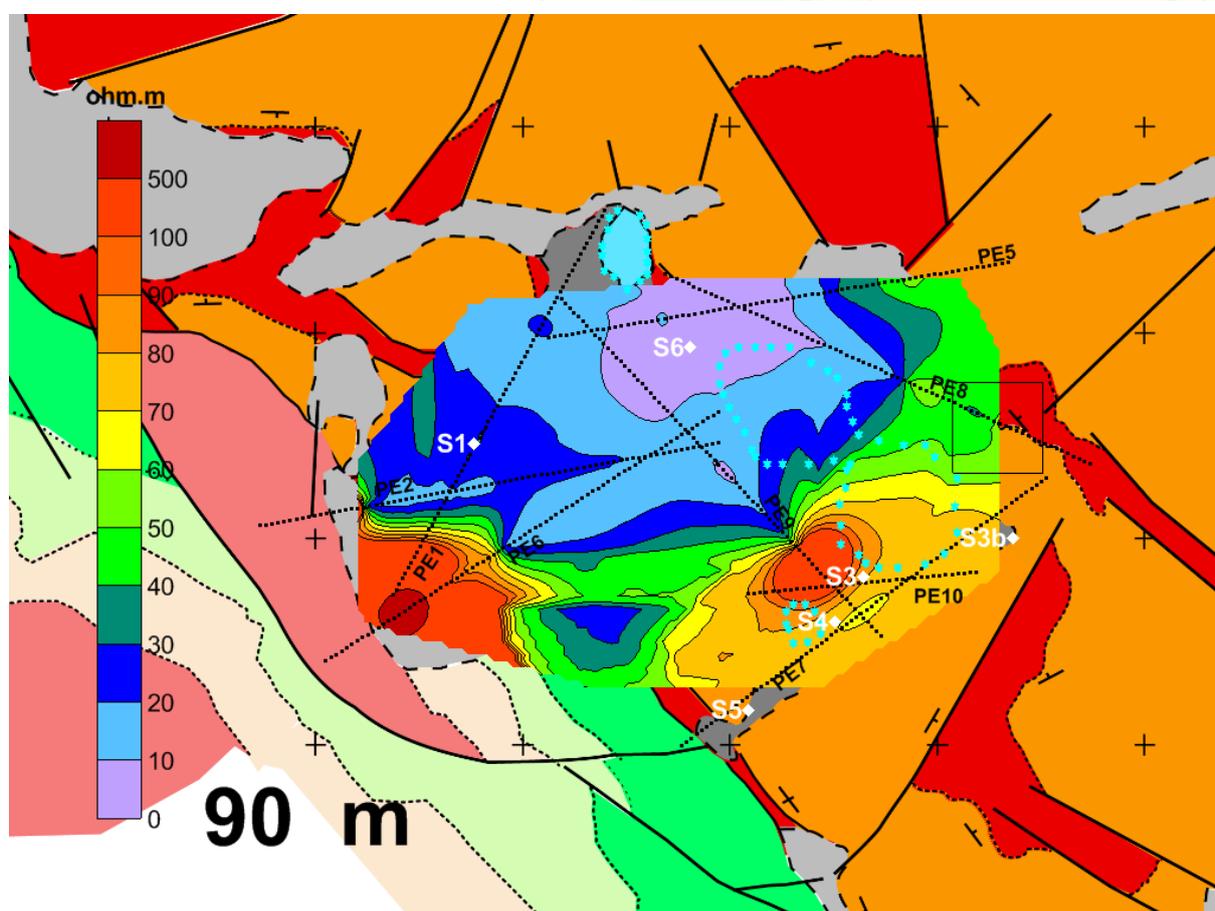
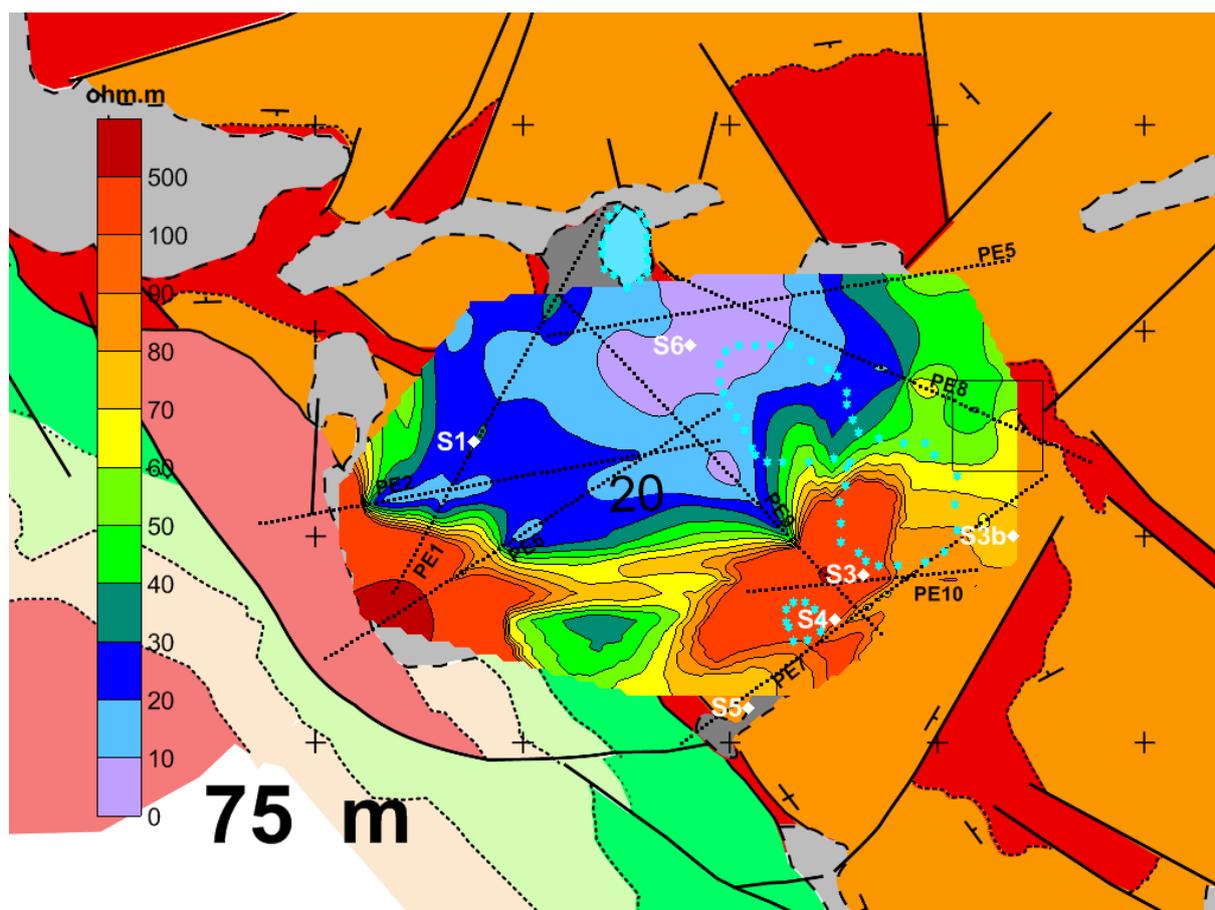
MAPAS DE RESISTIVIDAD (ISOLÍNEAS con CONTORNO LLENO)

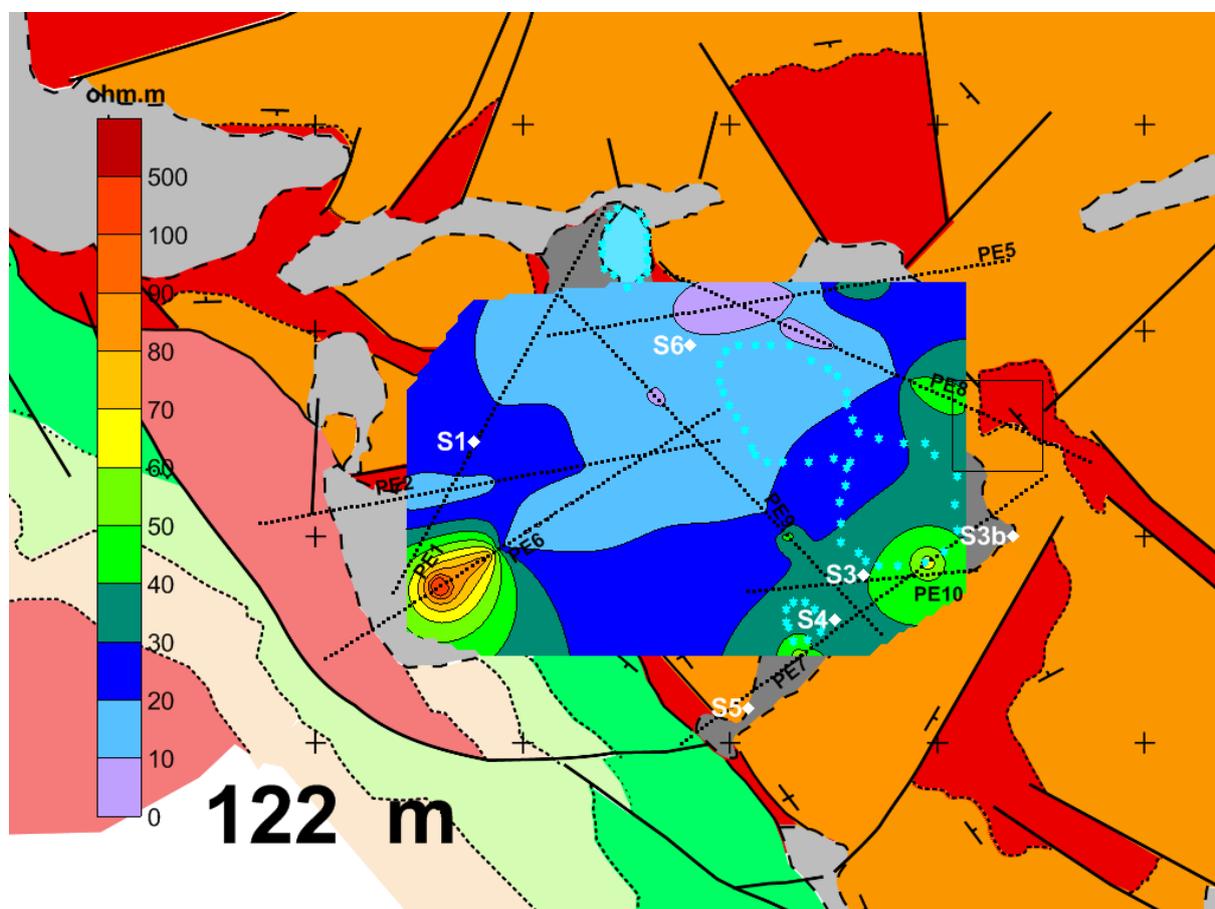
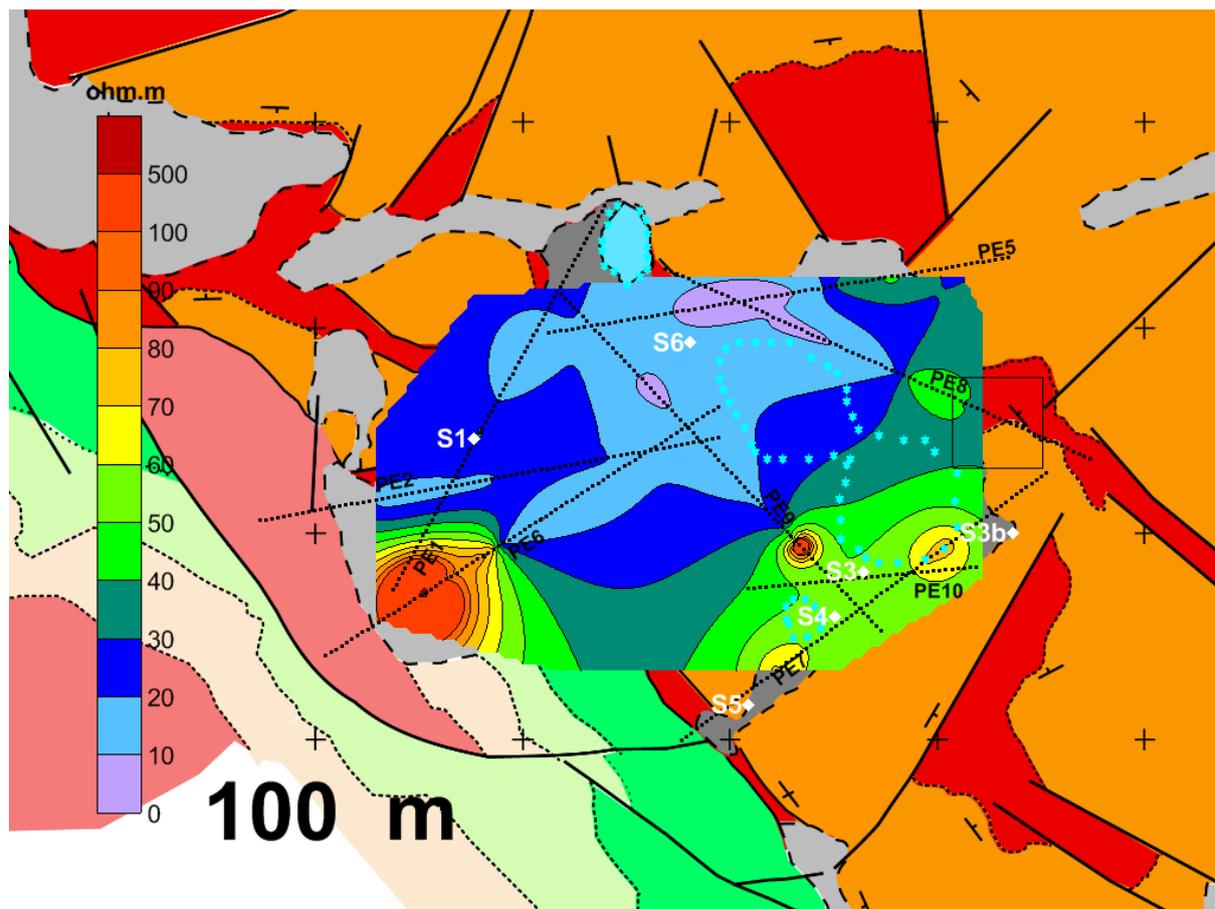


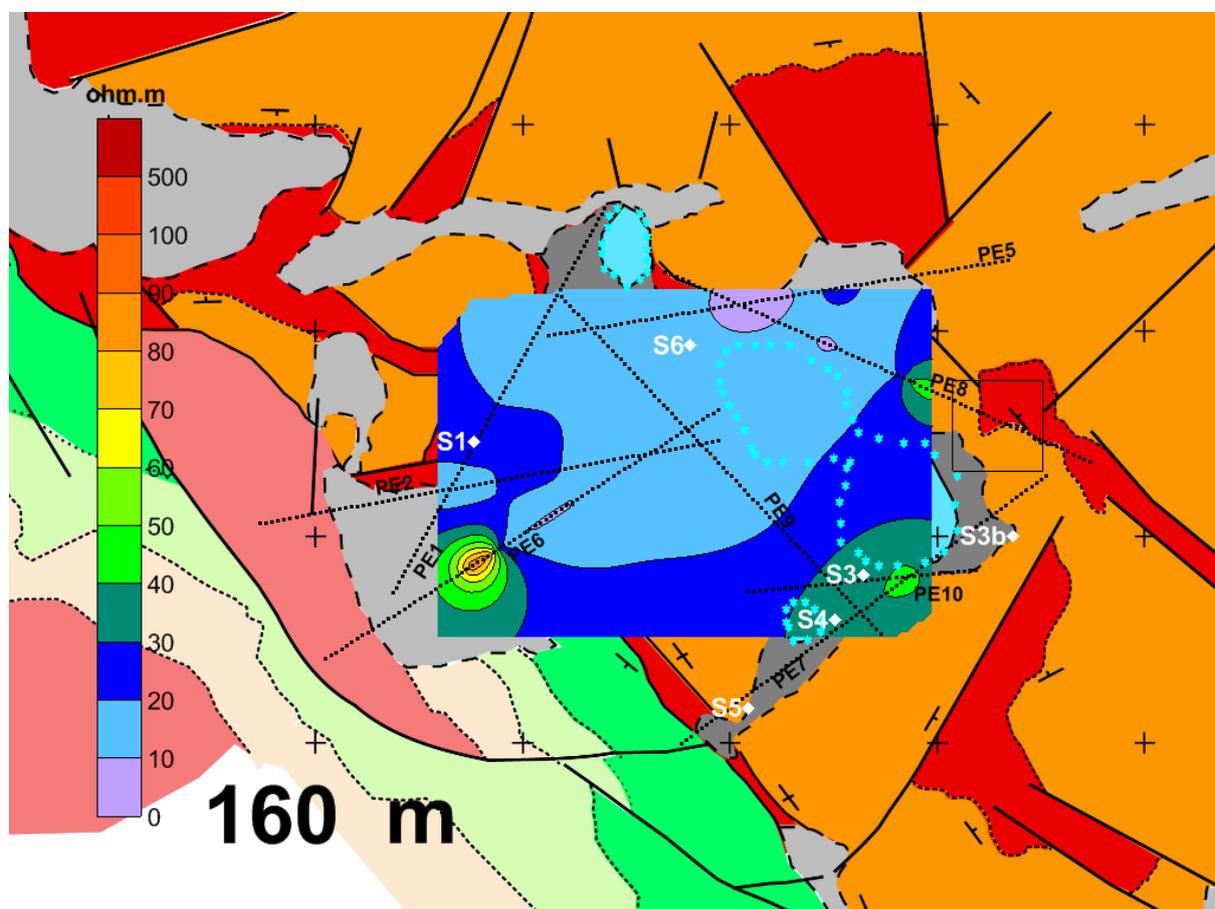
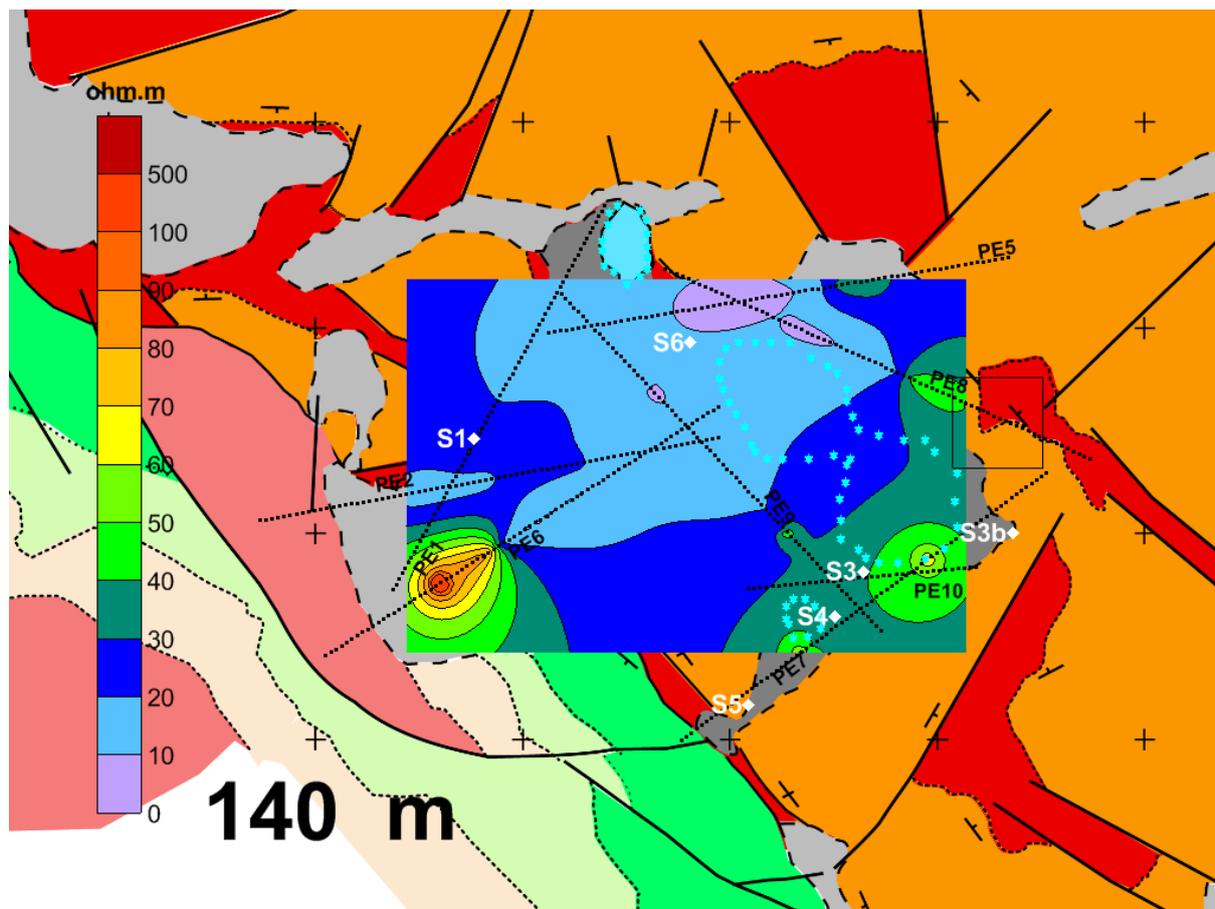






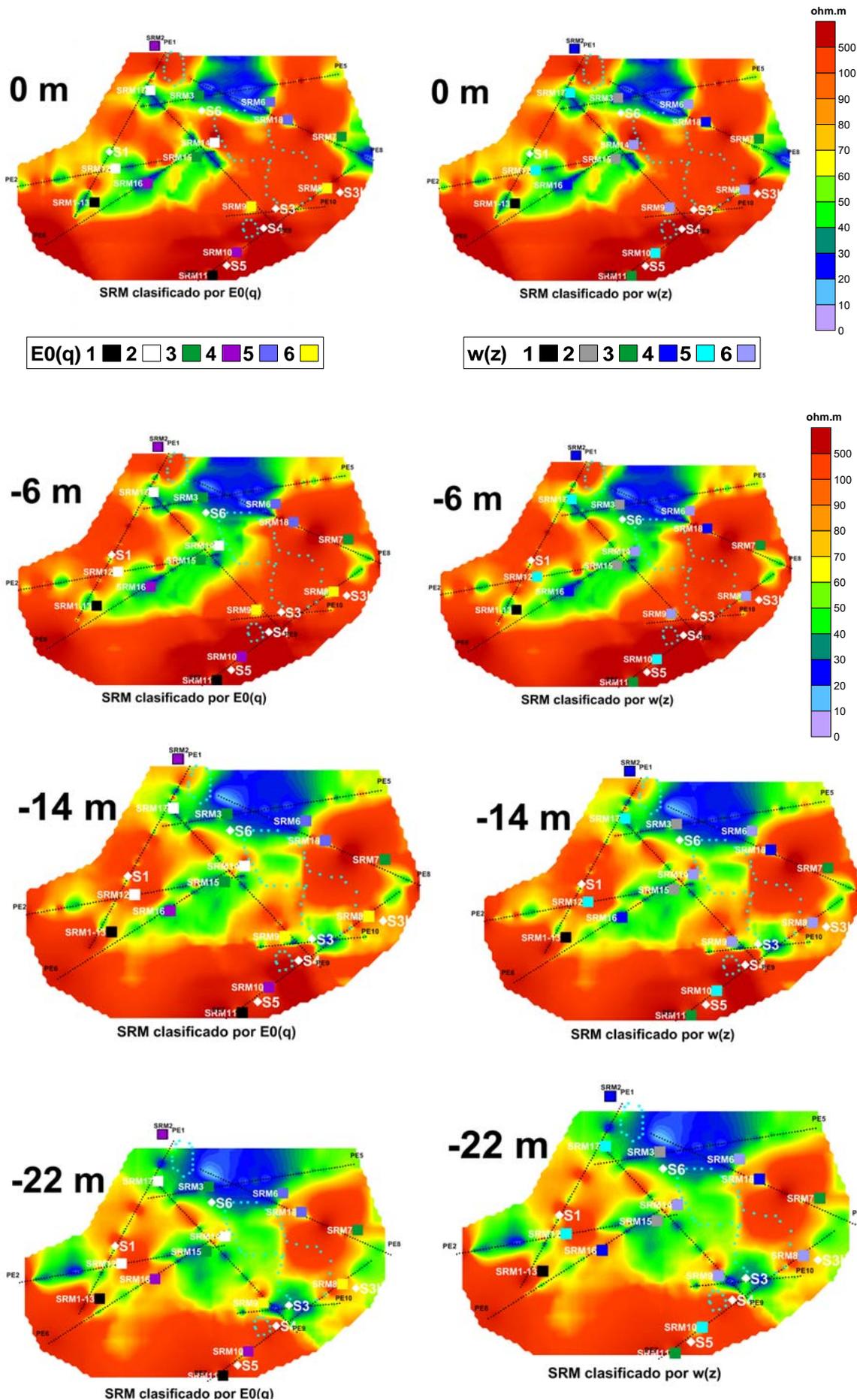


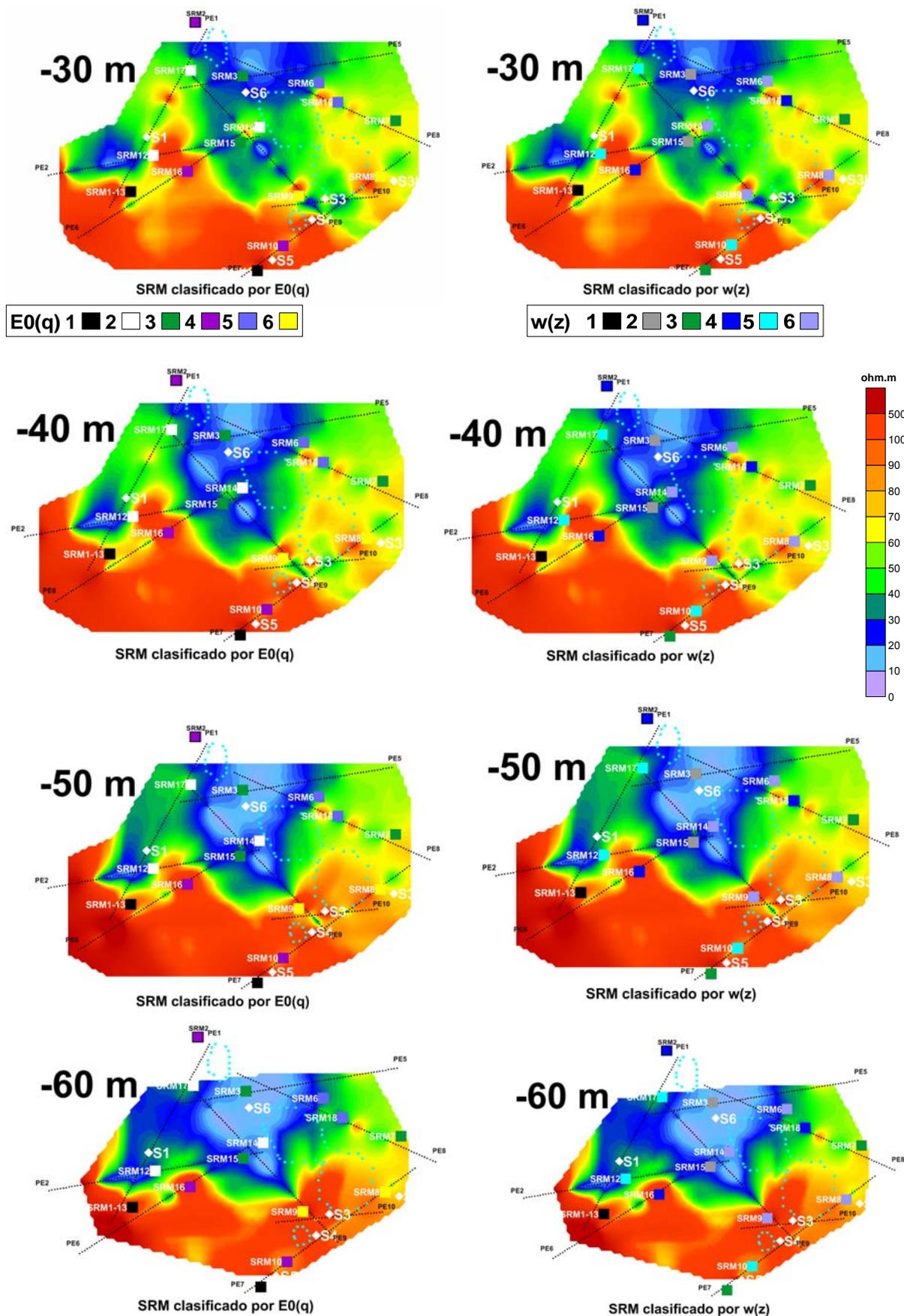


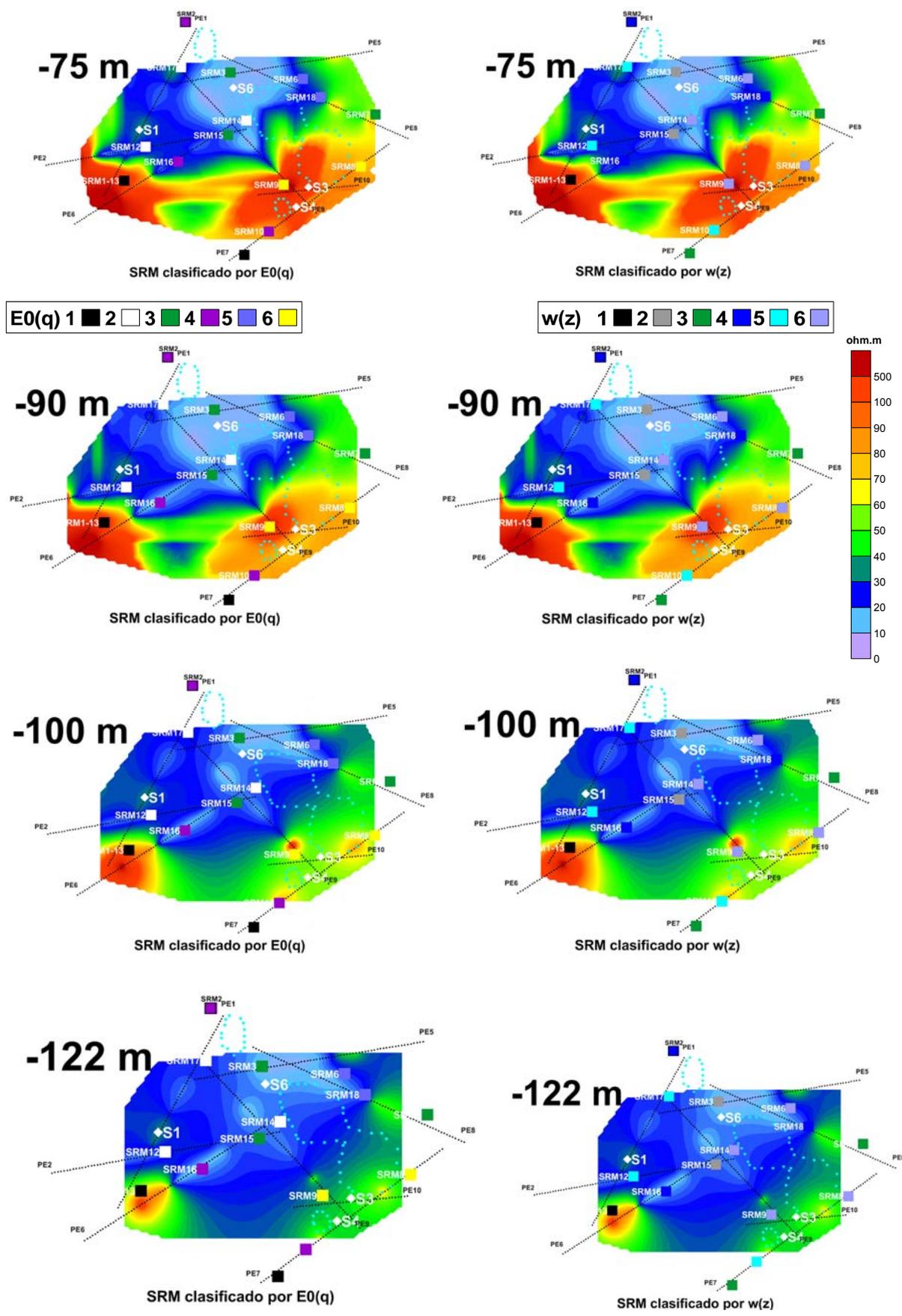


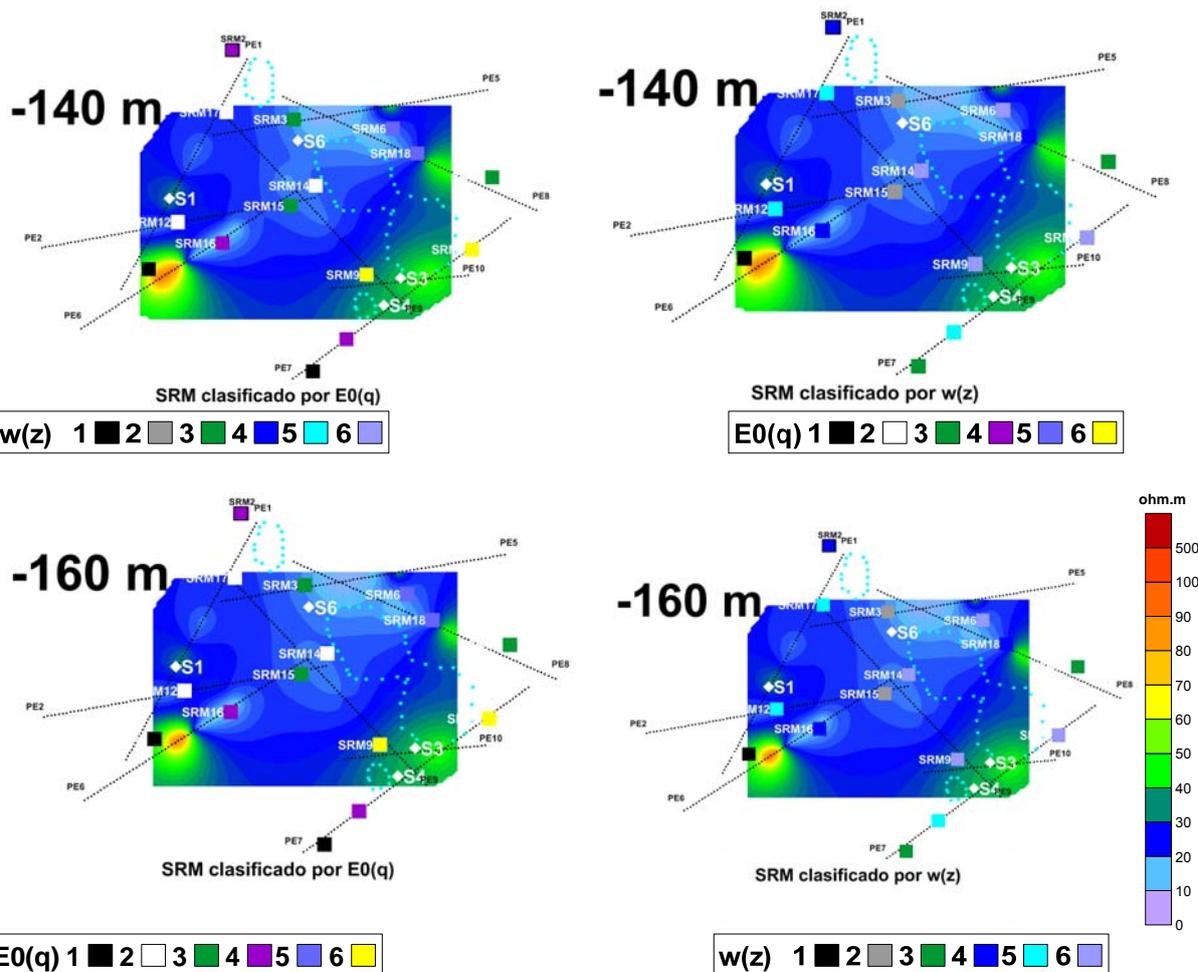
ANEXO IV

Mapas de resistividad a diferentes profundidades con indicación de la posición de los SRM codificados según su clasificación por la curva $E_0(q)$ y $w(z)$



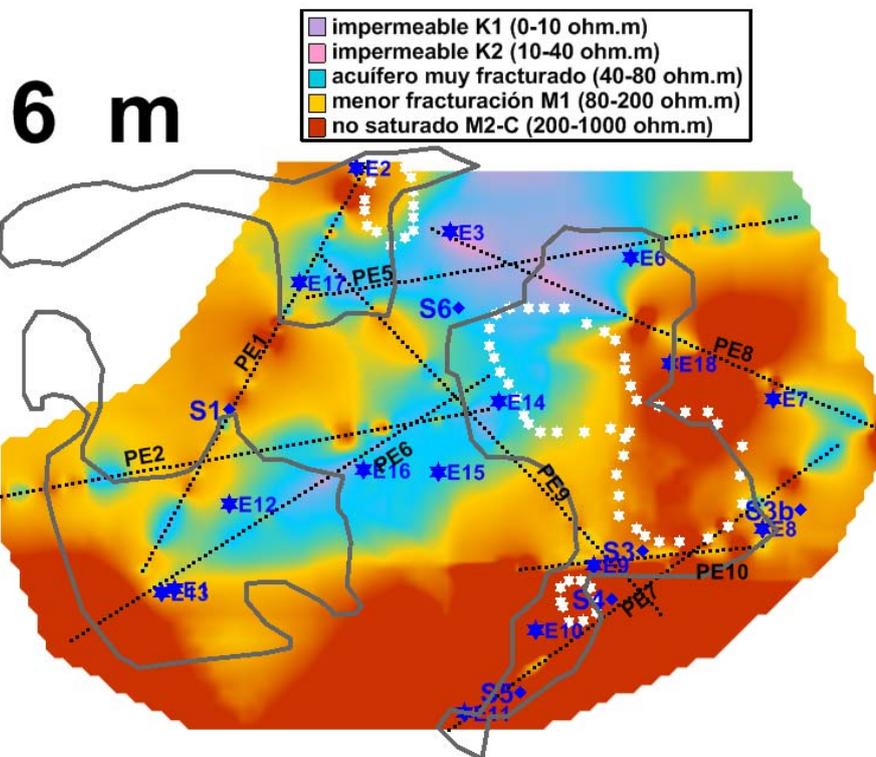
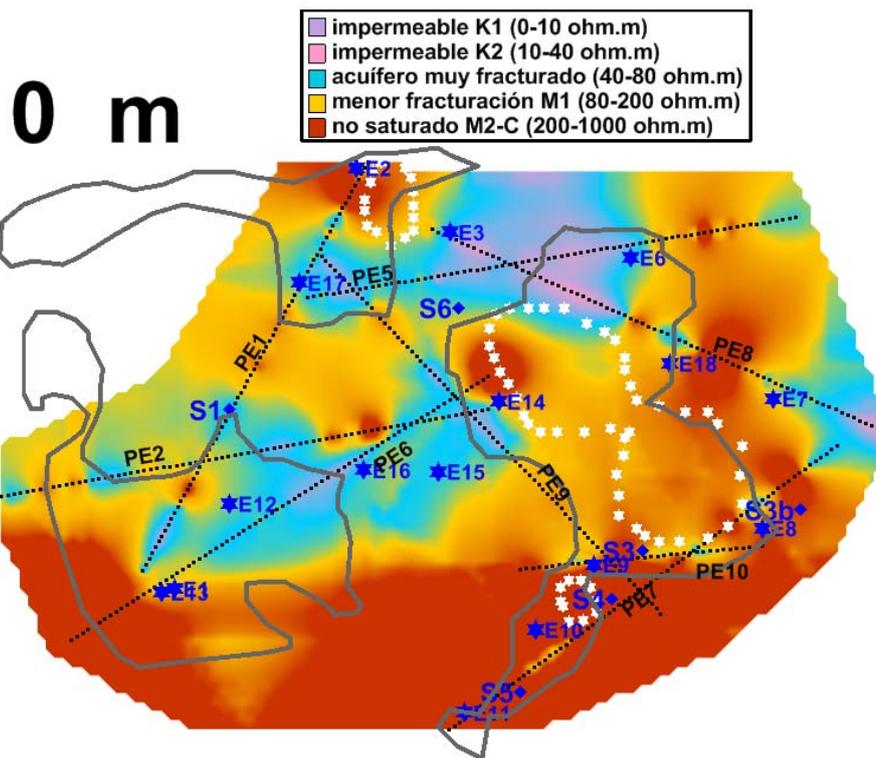




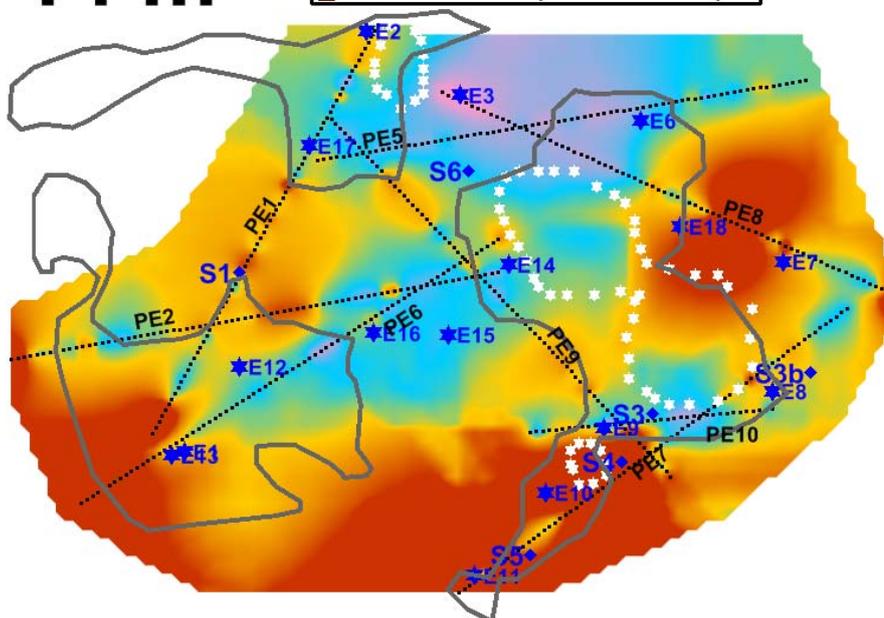
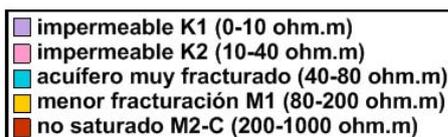


ANEXO V

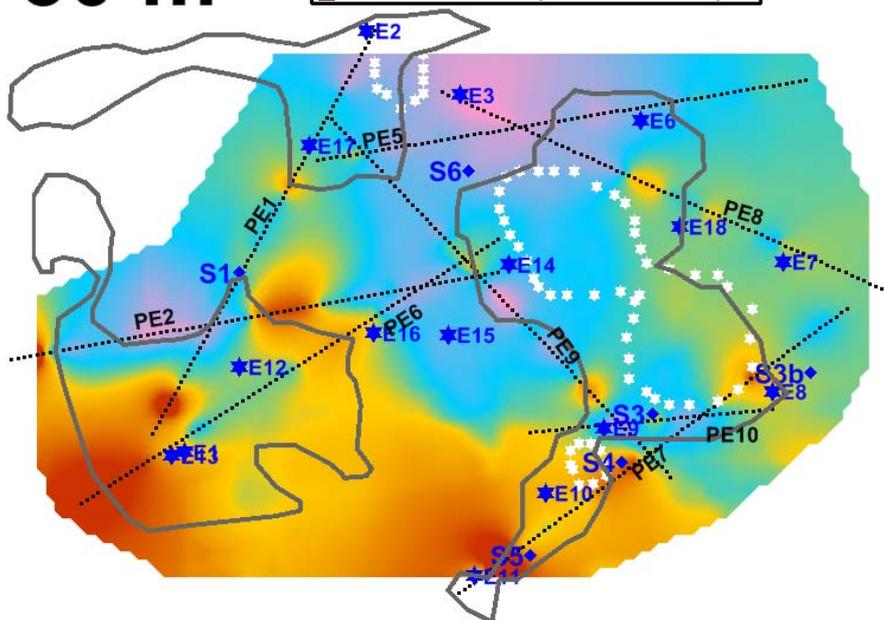
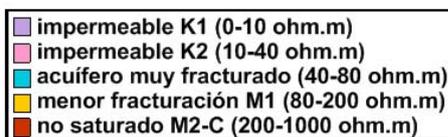
MAPAS IMAGEN DE LA DISTRIBUCION DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO A DIFERENTES PROFUNDIDADES

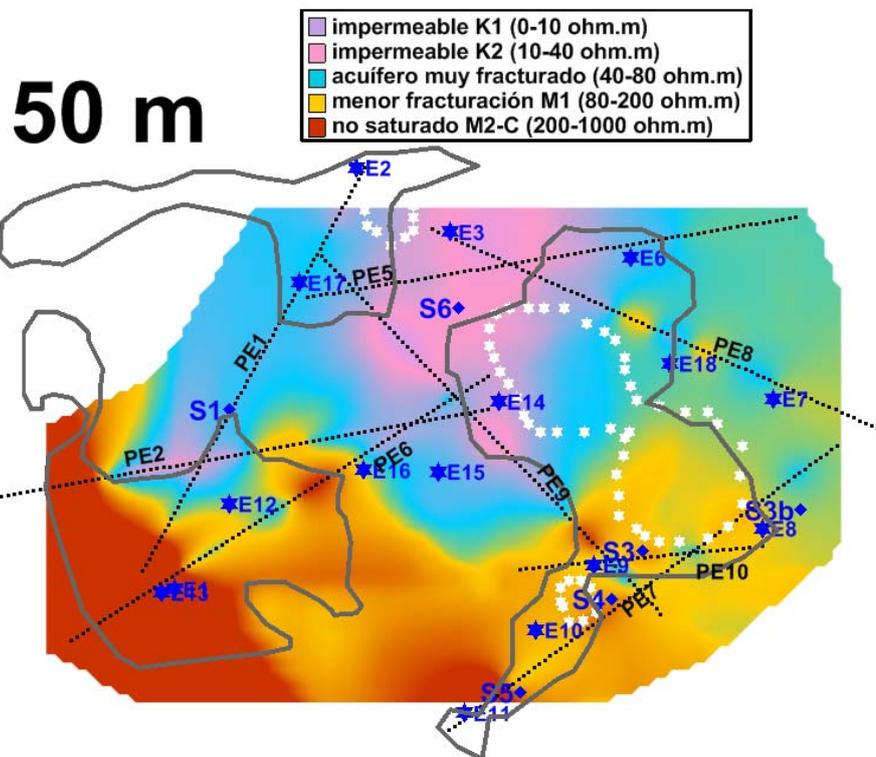
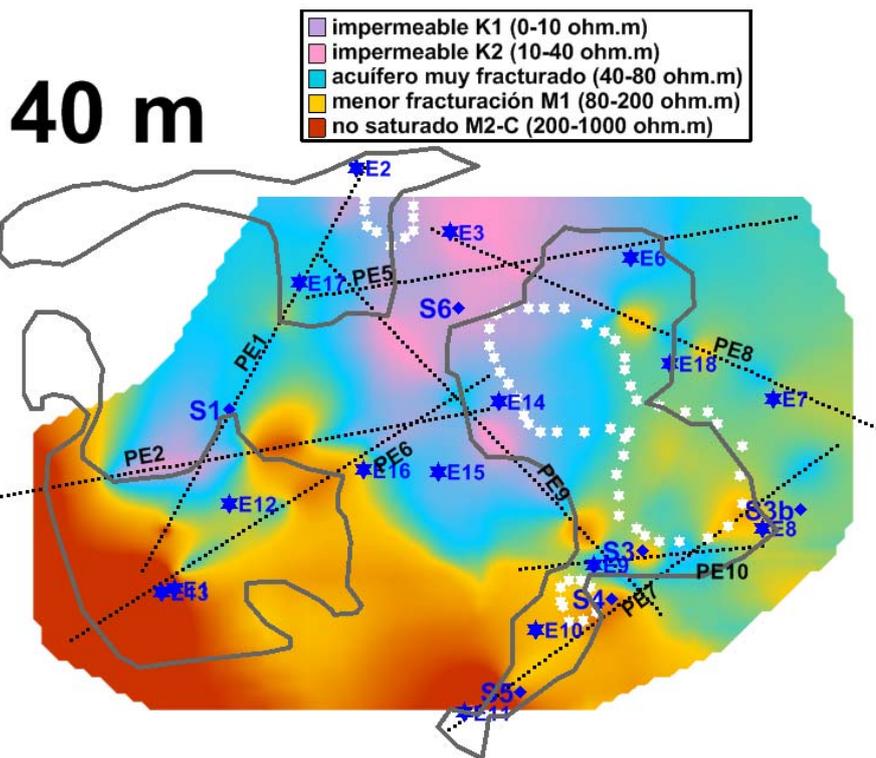


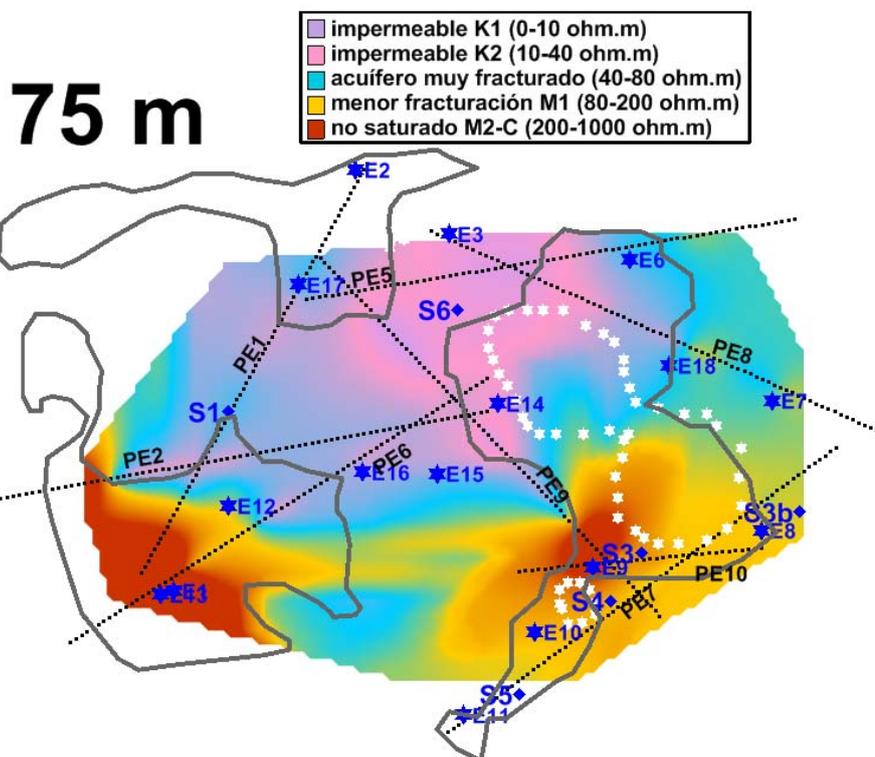
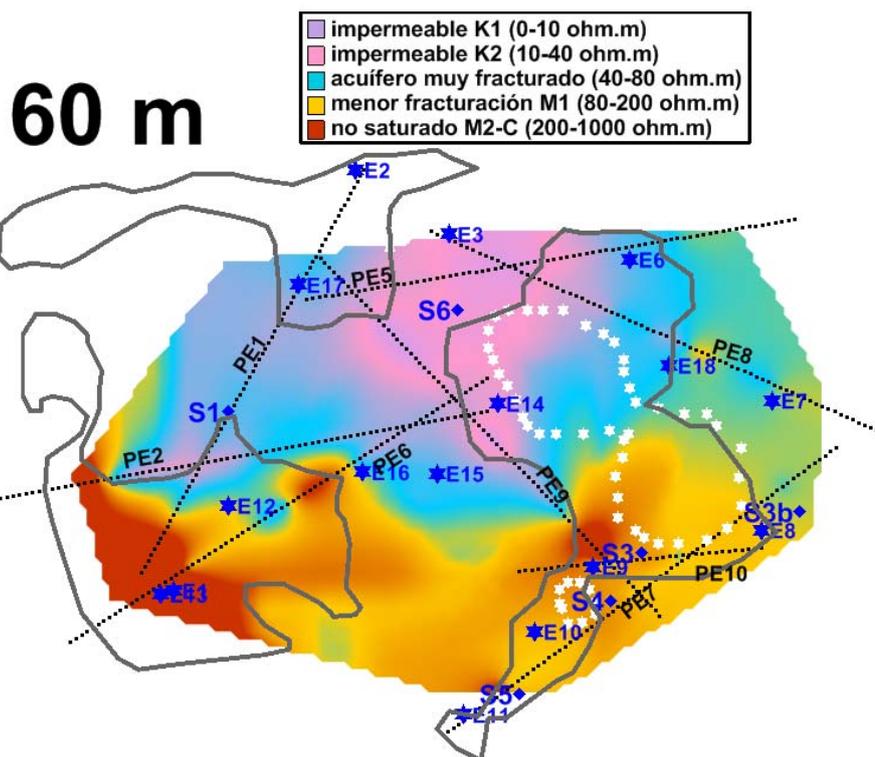
14 m



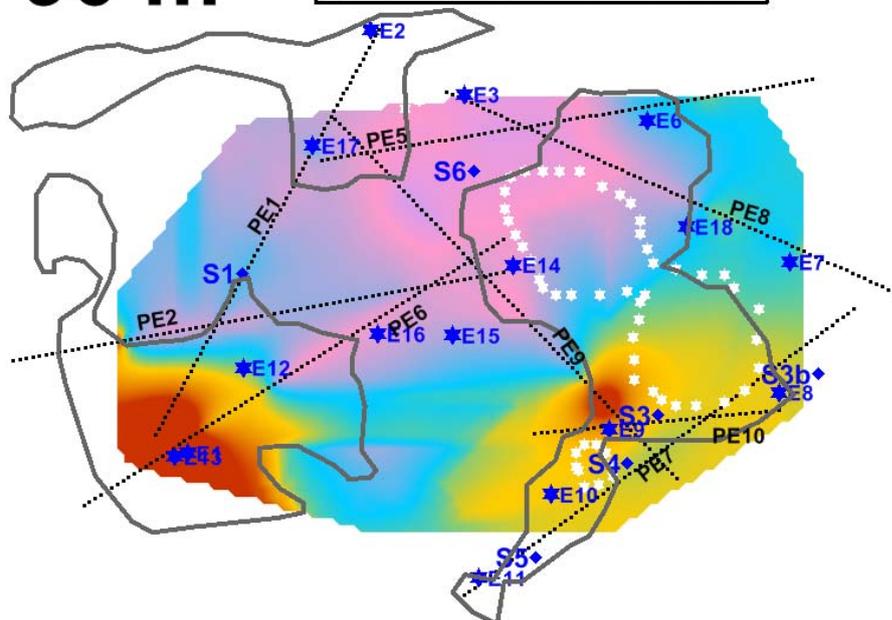
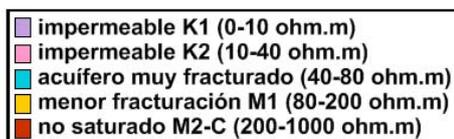
30 m







90 m



100 m

