

INDICE

1 ANTECEDENTES Y OBJETIVO.....	3
2 INTERÉS, JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DEL ESTUDIO PLANTEADO.....	3
3 CONSIDERACIONES SOBRE EL PROCESO DE MEDICIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS SRM.....	5
3.1 Fundamentos teóricos.....	5
3.2 Estimación de parámetros hidrodinámicos.....	10
3.3 Selección de parámetros de inversión.....	13
3.4 Presentación de los resultados.....	15
4 ZONA DE TRABAJO.....	19
5 CAMPAÑA DE SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA.....	21
5.1 Equipo de personal y material empleado.....	21
5.2 Ejecución de las mediciones.....	24
6 INTERPRETACIÓN DE LA CAMPAÑA.....	27
6.1 Cálculo de la matriz de coeficientes.....	27
6.2 Interpretación de las curvas de SRM.....	29
6.2.1 Análisis de las interpretaciones con información a priori.....	29
6.2.2 Interpretación general de la campaña.....	40
6.3 Determinación de la Permeabilidad/Transmisividad.....	46
6.3.1 Cálculo del coeficiente de calibración C.....	48
7 RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	55

ANEXOS

ANEXO I. Formato de los ficheros generados. (Se adjunta un CD con los mismos).

ANEXO II. Columnas de los sondeos mecánicos.

ANEXO III. Gráficos de las interpretaciones de los SRM de la campaña.

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVO

El SRM es una herramienta hidrogeofísica que permite la detección, de manera directa, de la presencia de agua en el subsuelo, evaluar su cantidad, y calcular determinados parámetros hidrogeológicos del acuífero (porosidad, permeabilidad y potencia). Sus principales restricciones son la limitada profundidad de investigación, hoy en día no superior a 150 m, y su alta sensibilidad a la presencia de ruido electromagnético en la zona de medida, que puede incluso llegar a impedir la medición.

El objetivo de este trabajo es la realización de una campaña de SRM en una zona determinada del acuífero Almonte-Marismas, con el fin de obtener valores de interés hidrogeológico (presencia y cantidad de agua, geometría del acuífero, porosidad, permeabilidad y transmisividad, etc.). La zona elegida es una zona de ensayo, y los resultados obtenidos permitirán evaluar la capacidad de esta metodología como fuente de datos para la realización del modelo hidrogeológico del acuífero.

2. INTERÉS, JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DEL ESTUDIO PLANTEADO

La correcta cuantificación de los parámetros hidrodinámicos de los acuíferos es esencial en la gestión de las aguas subterráneas, ya sea para la valoración de reservas de los acuíferos o para la evaluación de procesos dinámicos en régimen natural o influenciado, real o simulado.

El método clásico de evaluación de estos parámetros consiste en la realización de ensayos de bombeo, que requieren la existencia de pozos de bombeo y también de sondeos de observación de las adecuadas características y ubicación, no siempre disponibles. El coste económico de ensayos con esas características es elevado y, en todo caso, de una cuantía superior al método alternativo, basado en los Sondeos de Resonancia Magnética (SRM).

El método de SRM, que será explicado brevemente en el capítulo siguiente, es una técnica geofísica específica para su utilización en investigación hidrogeológica,

permitiendo la detección desde la superficie de la presencia de agua libre en el subsuelo. La calidad de los resultados obtenidos depende tanto de factores geográficos y geológicos (amplitud e inclinación del campo magnético terrestre, susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica de las rocas), como ambientales (ruidos electromagnéticos naturales y artificiales). Los datos deducidos en la inversión o interpretación de las medidas de campo permiten cuantificar la distribución de agua en función de la profundidad, adjudicando además a cada tramo un valor (Constante de Tiempo de la señal medida) relacionado con el tamaño de los poros de la formación.

La interpretación de las mediciones está afectada por el principio de equivalencia de resultados, ya que la señal teórica debida a una determinada cantidad de agua es la misma para una capa poco potente con gran contenido en agua por unidad de volumen, que para una capa de mayor potencia pero con menor contenido volumétrico en agua. La determinación de la profundidad de cada capa y la resolución vertical de la función de distribución (potencia de los diversos tramos acuíferos) pueden ser significativamente mejoradas con la utilización de información “a priori”, con lo que se consigue además dotar de mayor fiabilidad a la determinación del contenido en agua de cada tramo.

La relación entre la Constante de Tiempo y la permeabilidad viene determinada de forma empírica, basándose en la correspondencia entre diversas litologías y valores medios obtenidos de este parámetro: así, valores entre 300 ms [milisegundos] y 600 ms son característicos de gravas, mientras que valores entre 60 ms y 120 ms se consideran típicos de arenas finas. La instrumentación actualmente disponible permite la medición de dos Constantes de Tiempo, lo que posibilita realizar una estimación de la permeabilidad de las capas, aplicando algunos de los principios utilizados en las mediciones de resonancia magnética en la testificación de sondeos mecánicos. Esta mejora de la interpretación de los SRM, debido al cambio de escala y forma de efectuar las mediciones entre el método SRM y la testificación, requiere todavía un importante trabajo de desarrollo. Se precisa además de una fase de calibración en cada zona o para cada tipo de litología y granulometría, para lo que se utilizan los resultados obtenidos en ensayos de bombeo, permitiendo así llegar a determinaciones de permeabilidad, transmisividad y caudal específico con un grado elevado de fiabilidad, según las experiencias hasta ahora obtenidas por algunos grupos de trabajo.

Por lo tanto, la consecución del objetivo planteado en este estudio, que es evaluar la viabilidad del método de Sondeos de Resonancia Magnética (SRM) para la determinación de los parámetros porosidad, permeabilidad y potencia, en una zona determinada del acuífero Almonte-Marismas, viene condicionada por la calidad de los datos de campo y por la disponibilidad efectiva de parámetros hidrodinámicos previamente determinados, que permitan la calibración del método.

3. CONSIDERACIONES SOBRE EL PROCESO DE MEDICIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS SRM

3.1 Fundamentos teóricos

Para la mejor comprensión del resultado obtenido y de los comentarios técnicos realizados en este Informe, es necesario el conocimiento de una serie de cuestiones básicas sobre el método de SRM.

El fundamento de este método estriba en que toda partícula atómica cargada y en movimiento produce un campo magnético. Estos campos pueden orientarse en la dirección de otros de mayor magnitud; en estado normal, los campos magnéticos de las partículas del átomo están orientados en la dirección del campo magnético terrestre. Si por excitación externa son orientados en otra dirección, una vez cesada la excitación volverán a recuperar su orientación inicial, haciéndolo con un movimiento de precesión, que produce un nuevo campo magnético de “resonancia”. La frecuencia de la precesión depende de la intensidad del campo magnético terrestre y del índice giromagnético de la partícula (constante física para cada elemento, e igual a 0.04258 para el hidrógeno).

En los Sondeos de Resonancia Magnética se utiliza el campo magnético que producen los protones de hidrógeno en precesión. Para que esto sea posible tienen que suceder dos cosas: que existan protones de hidrógeno, y que estos sean previamente excitados por un campo magnético externo. El campo de excitación se introduce desde la superficie del suelo mediante una bobina por la que se hace circular una corriente eléctrica de frecuencia igual a la de precesión del hidrógeno. En la Naturaleza, y dentro

de las primeras decenas de metros del subsuelo, es el agua la que contiene prácticamente todo el hidrógeno presente, por lo que la medición de señal SRM es un indicador de la presencia de agua.

Para hacer un SRM en un lugar, se comienza por medir con un magnetómetro la intensidad de campo magnético terrestre B_0 , a fin de calcular la frecuencia de precesión de los protones de hidrógeno en ese sitio, mediante la ecuación $f=0.04258 B_0$.

Tras la extensión de un cable o antena, formando un bucle, sobre la superficie del suelo, se hace pasar por él una corriente eléctrica de la frecuencia anteriormente determinada y de gran intensidad durante un corto tiempo (pulso o momento de excitación q , medido en A.ms [Amperio por milisegundo]), creando un campo magnético de la misma frecuencia que la de precesión del hidrógeno, y de dirección distinta a la del campo magnético terrestre. Si existe hidrógeno en el subsuelo, sus protones entrarán en precesión al cortar la corriente emisora, perdiendo su excitación mientras que vuelven a orientarse a su posición de equilibrio inicial. En ello tardan un determinado tiempo, durante el cual el campo magnético generado por los protones induce en el bucle de cable extendido sobre la superficie una corriente eléctrica de la misma frecuencia de precesión. Lo que se mide es la amortiguación de dicho campo eléctrico con el tiempo $e(t)$, que es exponencial (Figura 1).

La intensidad máxima (inicial) E_0 de esta f.e.m. [fuerza electromotriz] inducida depende de la cantidad de protones presentes o cantidad de agua. El tiempo T_2^* (constante de tiempo de decaimiento) que tarda en amortiguarse, depende del tamaño medio de los poros donde está contenida el agua, de tal forma que es pequeño para las arcillas y grande para las gravas sueltas; no obstante, el tiempo de amortiguación también depende de la susceptibilidad magnética de las rocas y de su mineralogía, por lo que no existe una relación universalmente válida, necesitándose calibrar los valores en cada zona. El agua de formación y la contenida en las arcillas dan lugar a constantes de tiempo inferiores a 30 ms, por lo que quedan amortiguadas antes de iniciar la medición de $e(t)$ (se precisa este tiempo para la conmutación de los circuitos de tal forma que la antena pase de ser emisora a receptora).

Si antes de que se amortigüe la señal del primer pulso se emite un segundo pulso, es posible evaluar un segundo tiempo de decaimiento, y, en función de las amplitudes máximas de f.e.m. obtenidas para cada pulso y del intervalo de tiempo entre ambos se calcula un tiempo de relajación T_1^* que está relacionado, no ya con el tamaño medio de los poros, sino con la permeabilidad de la formación, siendo además menos dependiente de la heterogeneidad del campo magnético terrestre. Desde el punto de vista instrumental, la emisión de este segundo pulso exige disponer de dos unidades de convertidores. En general, el valor de T_1^* es del orden de $1.5 T_2^*$.

La profundidad de investigación alcanzada depende de la intensidad del pulso magnético emitido, por lo que para obtener información de mayor profundidad, se emite un nuevo pulso con mayor intensidad de corriente, y así sucesivamente (hasta 16 veces en una secuencia estándar). En cualquier caso, las dimensiones de la antena suponen un límite para la penetración, que es como máximo de un orden de magnitud igual al diámetro del bucle empleado. La información obtenida proviene además de una extensión de terreno de al menos una vez y media dicho diámetro a partir del punto central de aplicación. Este aspecto integrador de valores promediados de un gran volumen del subsuelo es preciso tenerlo en cuenta a la hora de apreciar los resultados obtenidos con un SRM, ya que la permeabilidad de una formación es un parámetro dependiente de la escala considerada.

El bucle o antena extendido sobre la superficie del suelo, además de medir el campo magnético de resonancia, mide también los campos electromagnéticos existentes de otros orígenes, que suponen un ruido externo no deseable. La señal de SRM es del orden de decenas o unos pocos centenares de nV [nanoVoltios], mientras que el ruido puede ser de varios miles de nV. A fin de mejorar la relación señal/ruido, la técnica empleada consiste en emitir el mismo pulso o momento varias veces, sumando la señal recibida (stacking). Si el ruido es aleatorio, esta suma tenderá a reducir su influencia. Además, una forma eficaz de disminuir el efecto del ruido es diseñar la antena en forma de doble bucle en “ocho”, aunque de esta manera, con la misma longitud de cable, la penetración disminuye, ya que el área eficaz de la antena es menor. Si la frecuencia de precesión está próxima a un armónico de 50 Hz [Hercios], la eliminación del ruido producido por las líneas e instalaciones eléctricas resulta más problemática.

El resultado de la medición de un SRM es, por tanto, una colección de n curvas $e(t)$ de decaimiento de la f.e.m. producida por la excitación de cada momento q emitido, en función del tiempo (en la Figura 1 sólo se presentan 10 de estas curvas, por simplificación; en una secuencia estándar se utilizan 16 momentos). En el mismo instrumento de medición se efectúa un cálculo del valor máximo inicial de cada curva, E_0 , y de la constante de decaimiento T_2^* . Las funciones $E_0(q)$ y $T_2^*(q)$ son el resultado final del proceso de medición. Si se ha medido con dos pulsos, se obtiene además una función $T_1^*(q)$.

La inversión o interpretación consiste en convertir los valores $E_0(q)$ y $T_2^*(q)$ en la distribución, en función de la profundidad, del tanto por ciento de agua $w(z)$ (porosidad), de $T_2^*(z)$ y de $T_1^*(z)$ (indicadores litológicos y de permeabilidad), (ver párrafo 3.4). Los cálculos del proceso de inversión se apoyan en una matriz numérica que tiene en cuenta el modelo geoelectrico del lugar, el tipo de antena utilizado y la inclinación del campo magnético terrestre. El proceso consiste, en síntesis, en calcular la respuesta teórica de un modelo del subsuelo formado por un conjunto de capas de potencia predeterminada, variándose la porosidad (y/o la constante de tiempo) de las mismas hasta encontrar la mejor coincidencia con los valores realmente medidos. La calidad de la inversión se estimada por un error de ajuste en % de las diferencias entre las medidas y la solución teórica.

En un proceso estándar, el terreno queda automáticamente dividido en tantas capas como momentos de emisión se hayan utilizado en el SRM, hasta una profundidad máxima igual a las dimensiones de la antena utilizada (lado del cuadrado, o de uno de los cuadrados en caso de utilizar una antena en forma de “ocho”). La potencia de cada capa es creciente con la profundidad (iguales en escala logarítmica) y depende de la antena utilizada. En la Figura 2 se indica esta distribución para las antenas de 50 m y 150 m, para 16 momentos de emisión. En caso de utilizar un número inferior de momentos, la profundidad máxima se mantiene, pero la potencia de cada capa se ajusta convenientemente. Es posible, no obstante, realizar una distribución distinta por selección manual de la misma, para lo que hay que disponer de criterios suficientes en los que apoyar dicha distribución. *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.

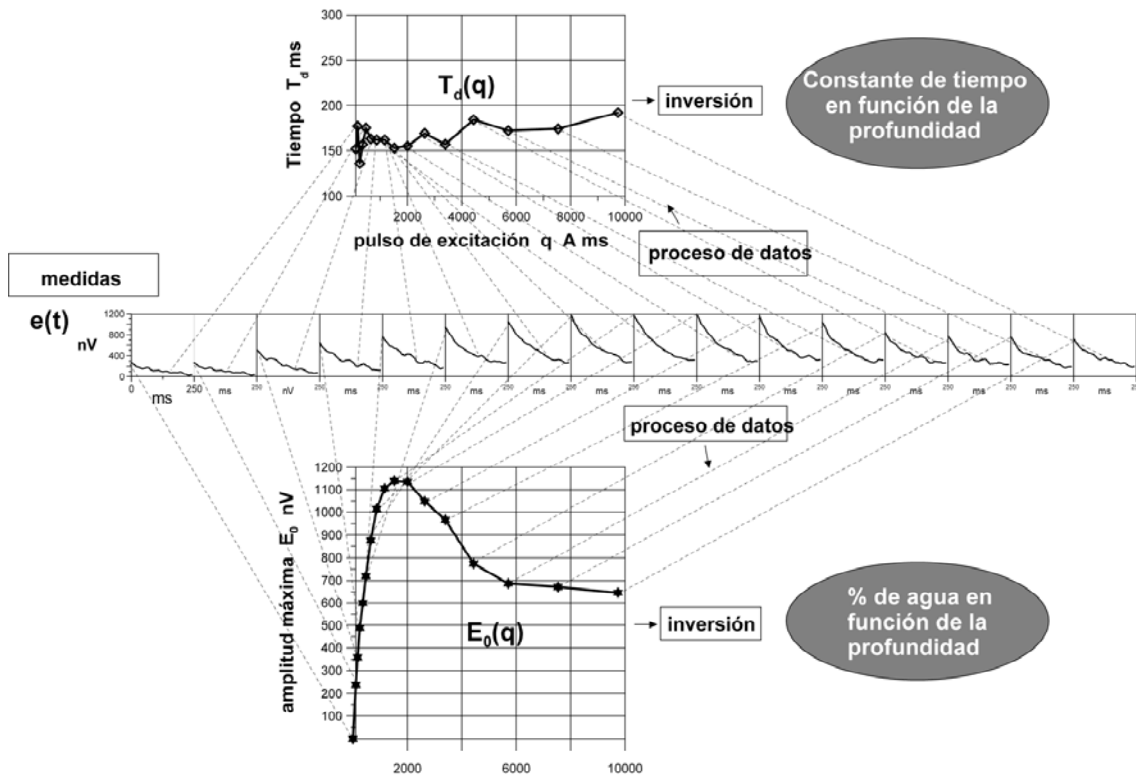


Figura 1: Esquema del registro y elaboración de los datos de un SRM

Otro aspecto a tener en cuenta del proceso de inversión, es que para realizar el ajuste entre las mediciones de campo y la respuesta teórica del modelo obtenido, es preciso utilizar un parámetro de regularización, que pondera dichas diferencias hasta conseguir un proceso de cálculo convergente. El valor de este parámetro puede tener gran influencia en el aspecto del resultado final: un parámetro de valor cero, dará como resultado una concentración del agua en pocas capas; un parámetro de valor 10000 dará una distribución suavizada del contenido en agua. *En cualquier caso, el valor integrado del producto de la potencia de cada capa por su contenido en agua, permanecerá inalterable (principio de equivalencia de las soluciones).*

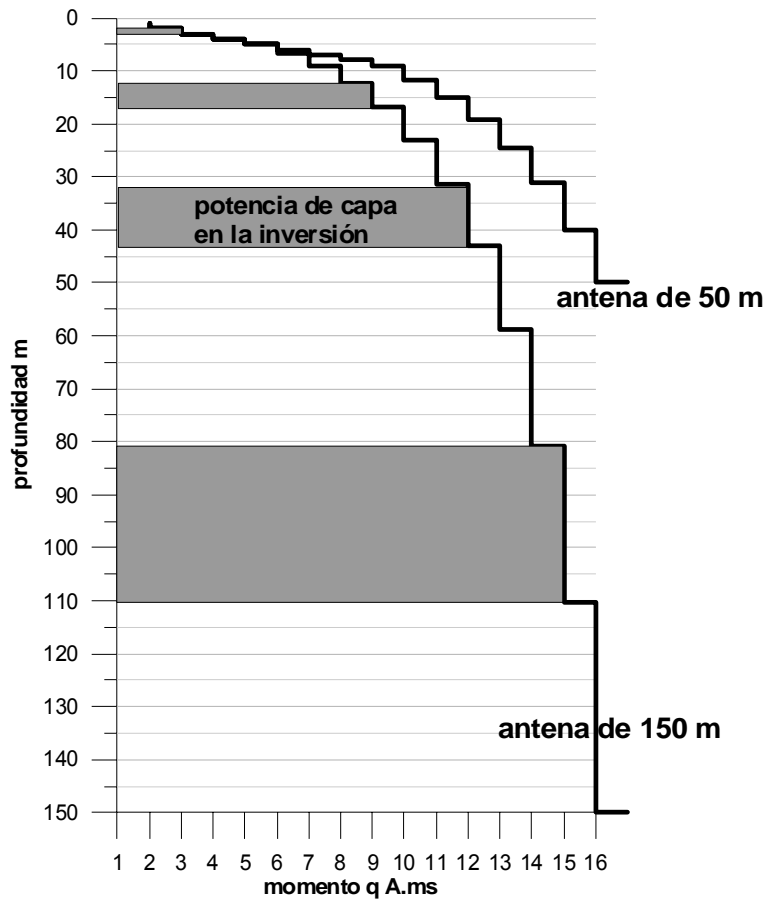


Figura 2. Resolución (potencia de las capas) obtenida en la inversión de un SRM, en función del número de momentos de emisión y de las dimensiones de la antena.

3.2 Estimación de parámetros hidrodinámicos

A partir de las mediciones de campo de un SRM, es posible obtener estimaciones de algunos parámetros hidrodinámicos, y en particular de la porosidad eficaz y de la permeabilidad.

Dada la secuencia de medición utilizada, la respuesta de un SRM se debe solamente al agua libre, estimándose a partir de E_0 la relación θ entre el volumen de agua que ha provocado la respuesta medida y el volumen total de subsuelo afectado por la medición. En rigor, para obtener la porosidad eficaz n_e a partir del valor θ de contenido en agua se precisa un factor de calibración C_θ , que puede ser obtenido por mediciones en laboratorio:

$$n_e = C_\theta V_{\text{libre}}/V_{\text{total}} = C_\theta \theta_{\text{SRM}} \quad [1]$$

Para acuíferos confinados, en zona saturada θ_{SRM} puede considerarse igual a n_e . El contenido en agua libre por metro cuadrado vendría dado por

$$V_{\text{libre}} = C_{\theta} \Sigma \theta_{SRM}(z) \Delta z \quad [2]$$

siendo $\theta_{SRM}(z)$ el contenido en agua calculado para una capa a la profundidad z y potencia Δz .

La permeabilidad hidráulica k (m/s) puede obtenerse así mismo mediante calibración, a partir de los valores de T_1^* o de T_2^* ($T_1^* \cong 1.5 T_2^*$), aunque es más fiable hacerlo con T_1^* , por su menor variación con la susceptibilidad de las rocas. Ambos tiempos representan un valor dependiente de la relación entre el volumen ocupado por los poros que contienen el agua libre y la superficie total de dichos poros. Se ha encontrado la siguiente relación empírica entre la permeabilidad y los valores de θ_{SRM} y T_d (nos referimos aquí tanto a T_1^* como a T_2^*):

$$k = C_k \theta_{SRM}^a T_d^b \quad [3]$$

donde a y b son constantes dependientes del tipo de rocas, cuyos valores empíricos actualmente más empleados oscilan entre $a=1-4$, $b=2$, y C_k es el factor de calibración, cuyo valor será distinto según la constante de tiempo utilizada. Para los cálculos θ_{SRM} se expresa en tanto por uno, y el tiempo T_d en milisegundos.

El valor obtenido para el coeficiente C_k a partir de mediciones de la permeabilidad k en laboratorio no ha demostrado ser representativo de las condiciones reales de ejecución de un Sondeo de Resonancia Magnética, posiblemente debido a las diferencias de volumen de roca considerado. Para su determinación debe, por tanto, utilizarse el valor de la transmisividad T_{eb} conocido a partir de ensayos de bombeo. La transmisividad T_{SRM} (m^2/s) vendría dada por $T_{SRM} = k \Delta z$ para cada capa, y para el conjunto de capas pertenecientes a un mismo acuífero, por

$$T_{SRM} = C_T \Sigma \theta_{SRM}^a T_d^b \Delta z = C_T F_i$$

[4]

donde se asume que se trata de litologías uniformes, por lo que el coeficiente C_T de todas las capas es único. De esta forma el factor de calibración se obtendrá por

$$C_T = T_{eb} / F_i \quad [5]$$

siendo obvio que los valores de T_{eb} y de F_i deben referirse al mismo acuífero. Una vez calculado este valor, podría utilizarse para calcular la transmisividad a partir de las mediciones de SRM efectuadas en otros lugares del mismo acuífero, aunque en esos sitios no se disponga de ensayos de bombeo, mediante:

$$T_{SRM} = C_T F_i \quad [6]$$

Cuando en una zona existe un conjunto de SRM donde se conoce el valor de T_{eb} puede calcularse un factor de conversión único para todo el acuífero (siempre que éste sea de transmisividad uniforme, para asumir que el valor del coeficiente es parecido), mediante:

$$C = \Sigma T_{eb} / \Sigma F_i \quad [7]$$

La utilidad de este sistema de calibración estriba en poder suministrar un valor más representativo para utilizar las mediciones de un SRM en la estimación de los valores de permeabilidad y transmisividad en un lugar donde no existan ensayos de bombeo, siendo de nuevo obvio que esto no tendrá sentido si las condiciones litológicas no son análogas a las de los lugares de calibración.

Los valores de C_T deducidos en algunos experimentos ya realizados son del orden de $1.5 \cdot 10^{-8}$ a $1.5 \cdot 10^{-10}$ cuando se emplea T_1^* , y $3.2 \cdot 10^{-8}$ a $6.1 \cdot 10^{-11}$ cuando se utiliza T_2^* , para todo tipo de litologías. En arenas y arcillas, tomando $a=1$ y $b=2$, se ha obtenido $C=1.65 \cdot 10^{-10}$.

3.3 Selección de parámetros de inversión

El proceso de inversión utilizado con los datos tomados en este Proyecto se ha llevado a cabo con el programa SAMOVAR v 4.041, facilitado por IRIS junto con la instrumentación NUMIS PLUS (Figura 3).

Este proceso consta de dos fases:

1/ obtención de los valores E_0 , T_2^* y T_1^* a partir de las curvas $e(t)$, para cada momento de emisión q

2/ conversión de las funciones $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ y $T_1^*(q)$ en $\theta_{SRM}(z)$, $T_2^*(z)$, $T_1^*(z)$ y $k(z)$, que es la fase de inversión propiamente dicha, y para lo que es preciso disponer de la matriz con el modelo geoelectrico del terreno.

Los valores obtenidos en la inversión es evidente que dependen de los valores de partida y del proceso de cálculo, y por ello es preciso puntualizar algunas cuestiones:

- finalizada la medición de un SRM en campo, el propio software de adquisición efectúa un cálculo previo de los valores E_0 , T_2^* y T_1^* a partir de las curvas $e(t)$ (contenidas en los ficheros srm.0q), proporcionando las correspondientes funciones $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ y $T_1^*(q)$ (ficheros con extensión denominada .inp e .in2). Estos valores son brutos, sin aplicar a las medidas más filtros que los propios del proceso analógico de detección síncrona de la señal.
- en la fase de proceso por SAMOVAR se parte de nuevo de las funciones $e(t)$, pero antes de calcular E_0 , T_2^* y T_1^* se someten a un filtrado digital, con la finalidad de eliminar el ruido en la medida de lo posible y calcular así mejores valores de partida para la inversión. De estos filtros, es forzoso seleccionar uno de estos dos:
 - . paso-banda, para dejar pasar sólo una banda de frecuencias entorno de la de resonancia

- . running average: suavizado por valores promediados en una ventana de n ms. Cuanto mayor es la longitud de la ventana, menores serán los valores de E_0 y en ocasiones, puede disminuir el valor de T_2^*

Un filtro opcional es el de Notch, en la banda de 50 Hz, para amortiguar el efecto de la inducción de líneas eléctricas. Cuando la señal es muy débil y su frecuencia es muy próxima a un múltiplo de la de inducción de líneas (1850, 1900 Hz), la aplicación del filtro Notch puede ser perjudicial, porque elimina también la poca parte de señal que hay, distorsionando aun más los resultados.

Otros parámetros del proceso de inversión son el factor de regularización y el número de capas. Ambos afectan al mayor o menor suavizado de la distribución de valores con la profundidad, y pueden dejarse a selección automática por el programa, a falta de criterios firmes en que justificar su valor. Finalmente, para calcular la transmisividad y la permeabilidad es preciso introducir un factor de conversión (constante C_T , denominada C_{px} en el programa), que por defecto es 7×10^{-9} .

En el proceso efectuado en este Proyecto, en cada caso se han aplicado los filtros y parámetros más adecuados, según el tipo de ruido encontrado, calidad de las curvas e información disponible. El criterio seguido ha sido el de elegir la longitud del filtro de running average o “time constant” con el que se obtiene la mejor relación señal/ruido y menor error de ajuste.

El factor de regularización se ha dejado en cálculo automático, ya que no se dispone de criterio para una selección manual del mismo. El factor C_T ha sido objeto de especial tratamiento, partiendo de los datos suministrados por ensayos de bombeo (a los que se ha dado preferencia como valor de referencia) para calibrar las mediciones de SRM.

Las matrices de inversión se han preparado partiendo de datos conocidos por campañas de Sondeos Eléctricos Verticales, promediando los valores para cada zona, aunque según la experiencia adquirida por el IGME, la exactitud del modelo inicial no es crítica para los resultados.

En el **ANEXO I** se suministra información sobre los formatos de los ficheros de las mediciones de campo y los obtenidos en el proceso de datos. Todos estos ficheros se encuentran en el CD que se adjunta con este informe

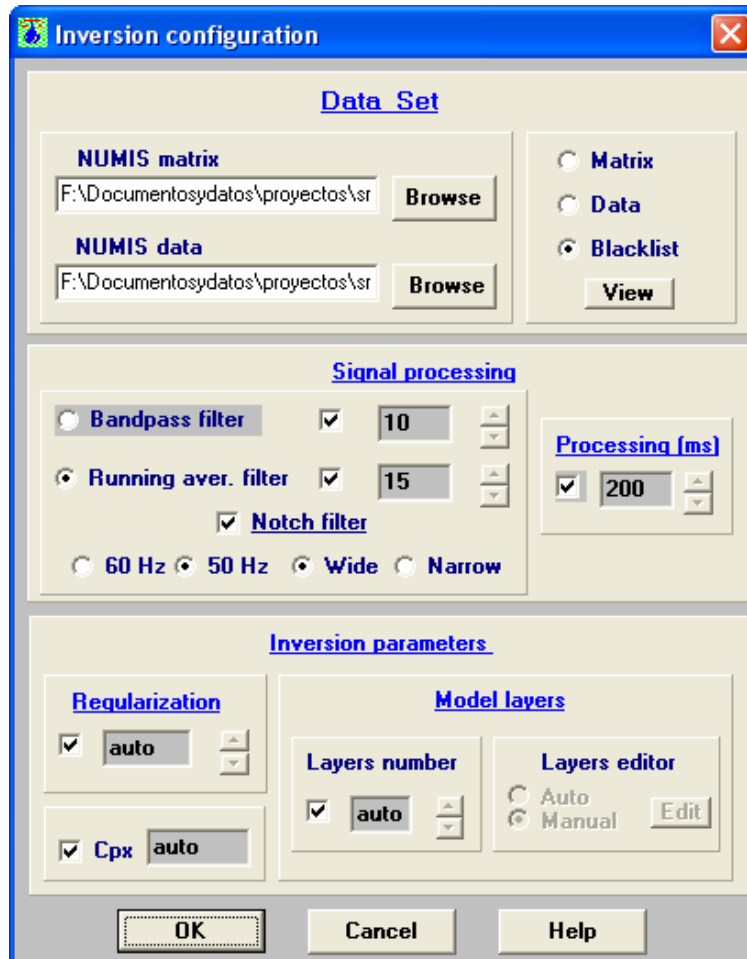
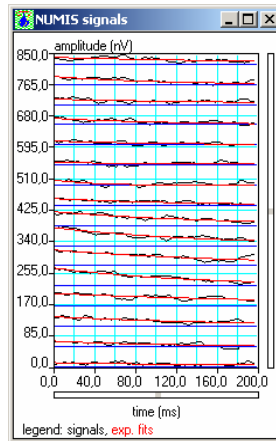


Figura 3: Consola de entrada de datos y parámetros de proceso en la inversión de un SRM mediante el programa SAMOVAR

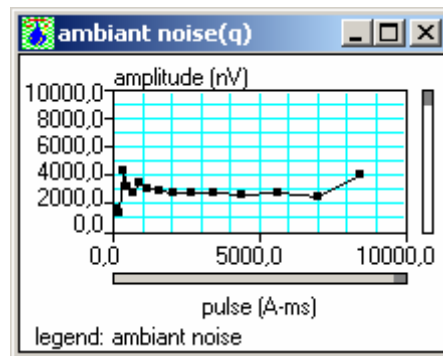
3.4 Presentación de los resultados

Los resultados de la medición e interpretación de cada SRM se presentan de forma gráfica y numérica. Los gráficos son los siguientes:

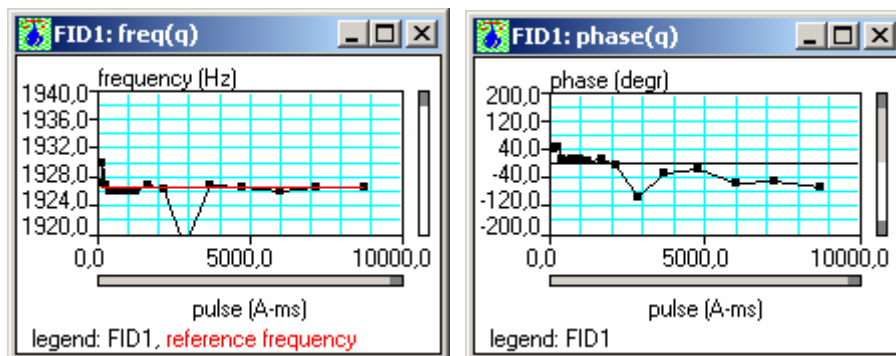
- Curvas $e(t)$ para cada momento q , con escala de amplitudes arbitraria, que no tiene más objeto que visualizar el aspecto de las curvas de campo tras la aplicación de los filtros de proceso.



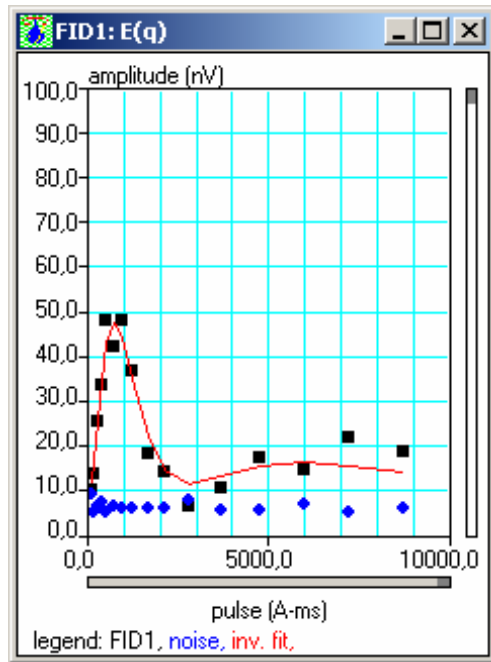
- Curvas de ruido ambiental en función del momento q aplicado, $N_{amb}(q)$.



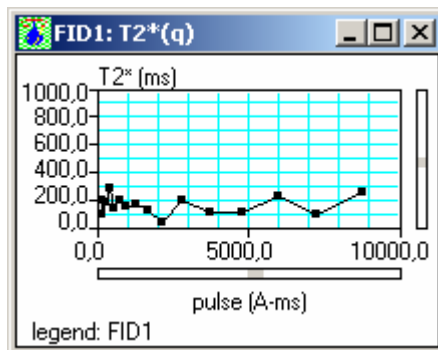
- Curvas de frecuencia (q) y fase (q). Dan indicación de la calidad de las mediciones.



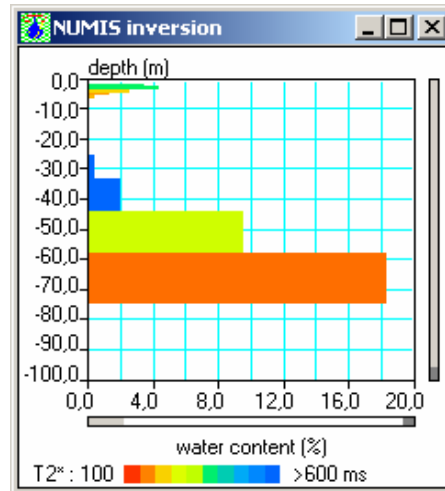
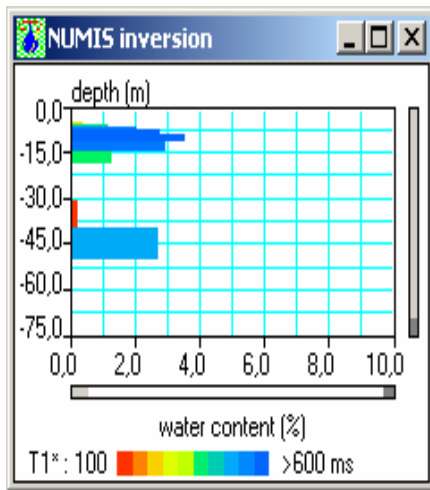
- Curvas $E_0(q)$ (valor FID1), junto con el ruido filtrado y sumado (noise) y la curva teórica correspondiente al modelo resultado de la inversión (inv.fit.). La diferencia entre los valores teóricos del modelo y los realmente medidos, se especifican cómo un tanto por ciento respecto del valor medido, siendo este % indicativo del error o desviación de la inversión.



- Curvas $T_2^*(q)$



- Gráfico de distribución de valores $\theta_{SRM}(z)$ en %, con escala superpuesta de color indicativa del valor del parámetro T_1^* de cada capa. Si no se ha medido con dos convertidores, sólo se calcula la constante de tiempo T_2^*

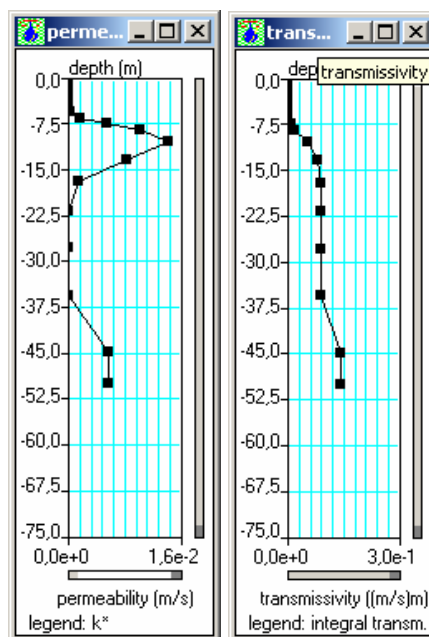


En la tabla 1 se indica la relación empírica entre el valor de T_2^* y la litología (tamaño medio de los granos), y a su vez con T_1^* , aceptando que este valor es aproximadamente $1.5 T_2^*$. Se indica también la gama de colores de representación que corresponde a cada constante. En el uso de esta información debe tenerse en cuenta que se trata de indicaciones aproximativas, basadas en aspectos generales del fenómeno físico de la resonancia magnética protónica, y no calibradas expresamente para la zona de trabajo.

T_2^* ms	color T_2^*	Litología	T_1^* ms	color T_1^*
<30		Arcilla	<45	
30-60	Rojo	arenas muy finas, arenas arcillosas	45-90	rojo
60-120	Rojo a naranja	arenas finas	90-180	naranja a naranja claro
120-180	naranja claro	arenas medias	180-270	amarillo
180-300	amarillo-a verde claro	arenas gruesas, arenas con grava	270-450	verde claro a azul
300-600	verde oscuro a azul	Gravas	450-900	azul claro a oscuro
>600		agua	>900	

Tabla 1 relación entre valores de las constantes de tiempo, la litología y el color de las escalas de representación

- Gráficos de distribución de la permeabilidad $k(z)$ m/s y de la Transmisividad $T(z)$ m^2/s , presentadas en gráfico independiente y con escalas variables para cada zona de trabajo. La transmisividad se representa acumulada.



En la cabecera de cada grupo de gráficos presentados en el ANEXO III, se indican los parámetros utilizados en el proceso.

4.- ZONA DE TRABAJO

La zona de estudio se encuentra dentro del acuífero Almonte-Marismas, en el denominado Sector IV que se sitúa al Oeste de la carretera H-612, entre el Arroyo de la Rocina y el límite del Parque Natural de Doñana, al sur de la zona de protección del arroyo de la Rocina, figura 4.

En esta zona, desde un punto de vista hidrogeológico, existen dos formaciones acuíferas. La superior es una formación aluvial, compuesta de arenas muy finas con una potencia que oscila entre 35 y 70 metros. La más profunda es una formación marina deltaica, compuesta por una sucesión de arenas, areniscas y niveles arcillosos, de espesor variable, y en donde resulta muy difícil definir las capas de agua saturadas.

Se dispone de un número importante de sondeos mecánicos con columna litológica, distribuidos en subsectores dentro de la zona, figura 4. Estos sondeos, como regla, aumentan de profundidad de Norte a Sur, pasando de 65-70 m a 110-120 m. Los caudales también van aumentando en el mismo sentido desde 20-40 L/s a 80-90 L/s. Los niveles freáticos en la zona están altos, en todos los casos desde 2-3 m hasta unos

10 m; en este sentido hay que destacar que las lluvias producidas unos días antes de la campaña y durante la misma pueden desvirtuar esta situación, pudiendo haber mucha agua en tránsito hacia el nivel freático.

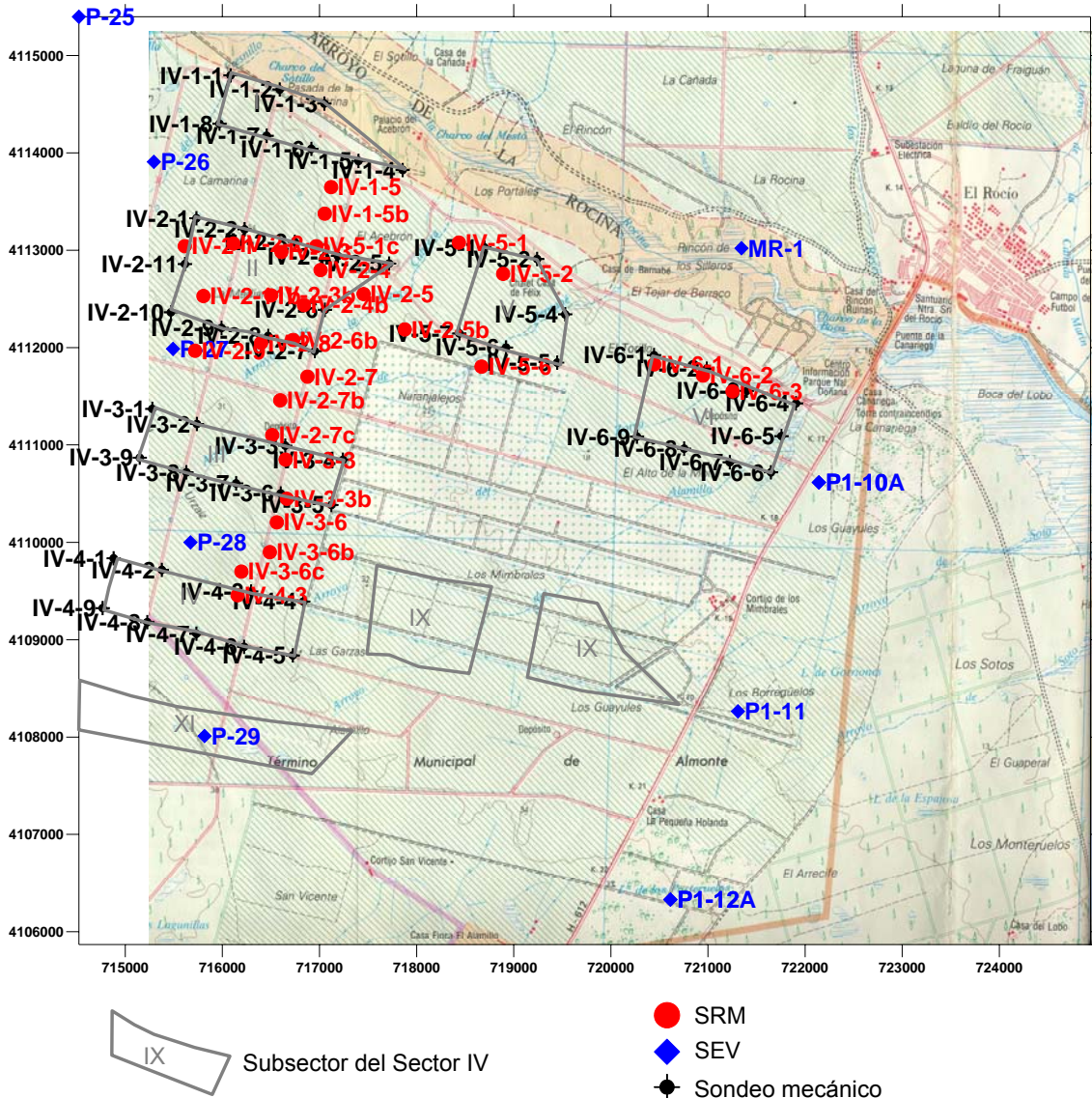


Figura 4. Plano de localización de la zona de trabajo. En él, se han situado los sondeos mecánicos distribuidos en subsectores, los SRM medidos en la campaña y los SEV empleados en la generación del modelo geoelectrico.

Mediante la correlación de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos existentes en la zona, se han confeccionado diversos perfiles geológicos e hidrogeológicos que muestran la complejidad existente en la misma. En la figura 5 se muestra el perfil v-1 del informe que el IRIDA confeccionó para el estudio de la zona regable del acuífero Almonte–Marismas, dentro del proyecto FAO (IRIDA, 1976), donde se presenta una interpretación hidrogeológica de este perfil cuyo tramo de Norte a Sur, entre los sondeos

mecánicos IV-1-5 y IV-4-3, coincide con un perfil de SRM medido en este estudio. En el perfil, se correlacionan los datos de estos sondeos siguiendo un esquema de terrenos muy permeables, permeables, semipermeables e impermeables; según éste, en la zona de trabajo existe un acuífero formado por terrenos permeables entre los 30-80 primeros metros, que aumenta su potencia hacia el Sur; este acuífero tiene intercalados un nivel semipermeable y otro más permeable, de espesor variable, y que están más profundos hacia el Sur; descansa sobre un tramo semipermeable de 60 m de espesor que se hunde hacia el sur, y que posee pequeñas intercalaciones de tramos permeables e impermeables; la base la constituye unos terrenos impermeables, que se han considerado la base del acuífero inferior deltaico, y que siguen la tendencia de que su techo se encuentra a mayor profundidad hacia el Sur. La mayoría de los sondeos mecánicos del tramo de interés del perfil V-1 del IRIDA alcanzan el impermeable de fondo, siendo este nivel el que se ha tomado como base del acuífero deltaico en este estudio.

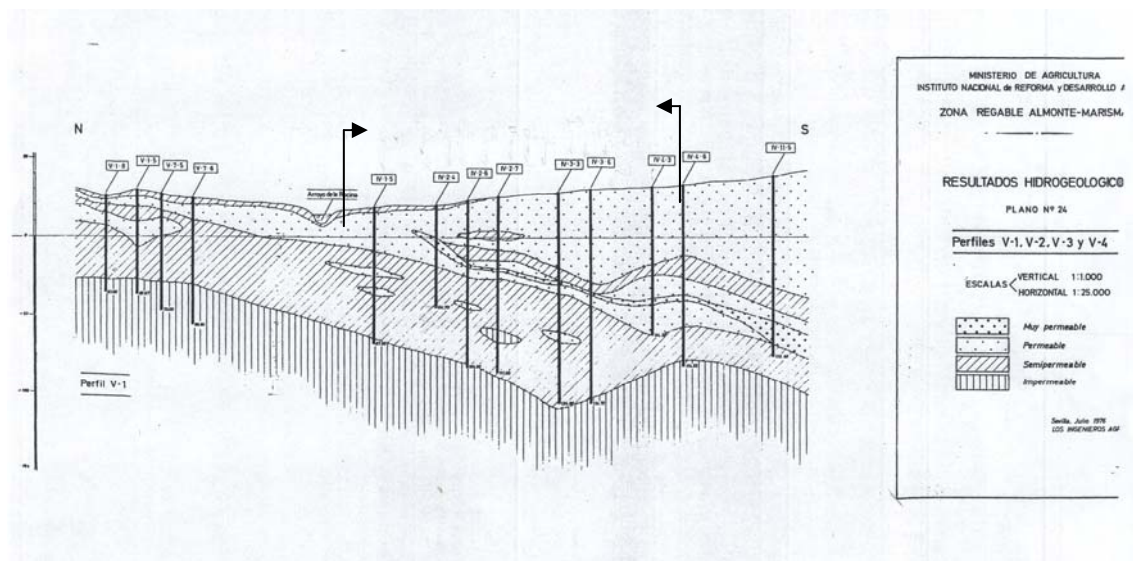


Figura 5. Perfil V-1 del proyecto FAO (1973-74). Las marcas señalan el tramo de perfil que coincide con el perfil P1 medido de SRM.

5.- CAMPAÑA DE SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA

5.1 Equipo de personal y material empleado

El personal que ha trabajado en la realización de este estudio ha sido el siguiente:

- D. Juan Luis Plata Torres. Doctor Ingeniero de Minas del Área de Geofísica del IGME. Planificación y Coordinación del estudio y de la campaña de campo. Operador del equipo.
- D. Félix M. Rubio Sánchez-Aguililla. Ingeniero de Minas del Área de Geofísica del IGME. Planificación y Coordinación del estudio y de la campaña de campo. Operador del equipo. Realización de este informe.
- D. Pedro Ibarra Torre. Ingeniero de Minas del Área de Geofísica del IGME. Operador del equipo y control de las medidas en campo.
- D. Carlos Mediavilla. Hidrogeólogo de la oficina del IGME en Sevilla. Planificación del estudio y control hidrogeológico.
- Dña Ana M. Rebollo. Hidrogeólogo de la oficina del IGME en Sevilla. Planificación del estudio y control hidrogeológico.
- D. Agustin Gonzalez Duran, Jose María Llorente y Angel Pelayo Cañamero. Operadores del Área de Geofísica del IGME. Labores de campo.
- Dos peones contratados en la zona.

El instrumento empleado en la realización de los SRM ha sido el NUMIS PLUS de Iris Instruments (Francia), mediante contrato de alquiler y formado por los siguientes elementos, figura 6:

- Unidades de control:
 - Dos convertidores DC/DC
 - Dos unidades de Condensadores (Sintonizadores)
 - Un Generador PMR (transmisor-receptor)
- Cableado de conexión entre unidades:
 - Dos cables de conexión de control entre los Convertidores y el Generador
 - Dos cables de conexión de energía entre los Convertidores y el Generador

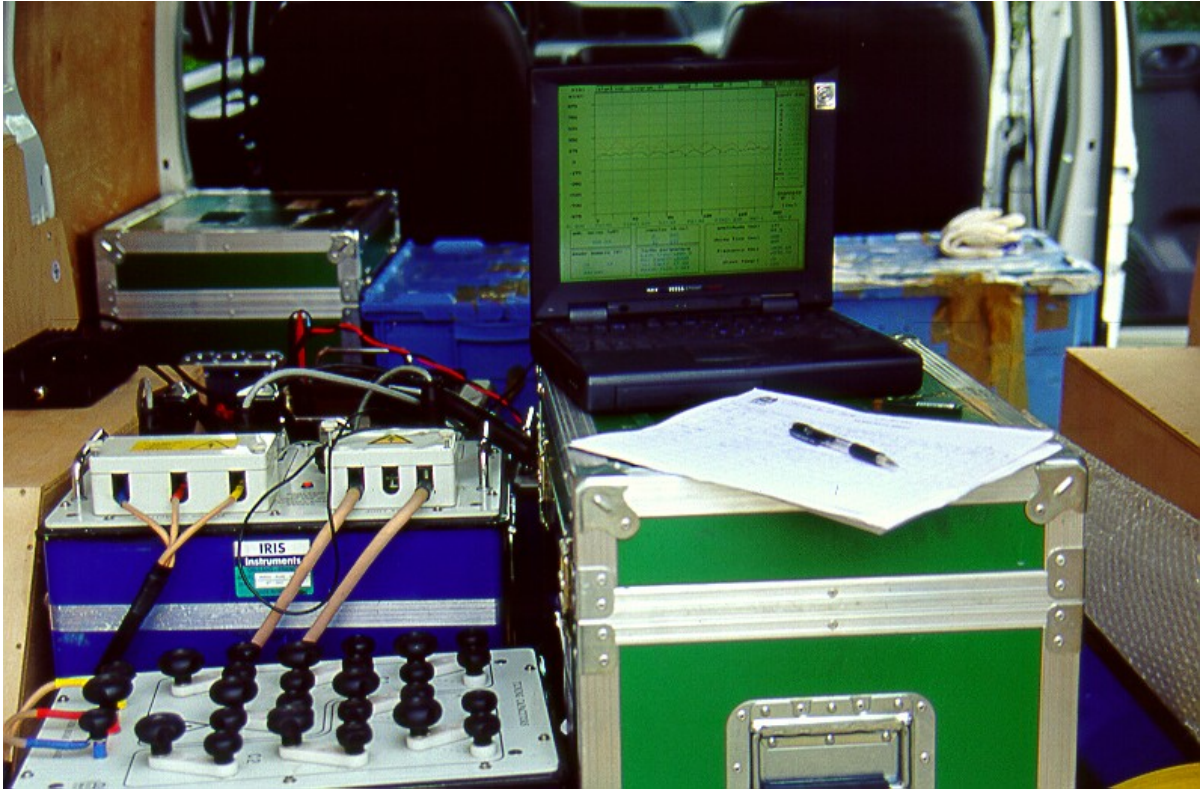


Figura 6: Equipo NUMIS PLUS instalado en el vehículo de campo

- Dos juegos de cables de conexión entre los Sintonizadores y el Generador
- Antena emisora-receptora:
 - Siete rollos de cable de antena de 100 m
 - Dos cables de conexión entre la antena y el Generador
 - Ocho unidades de conexión entre cables para la antena
- Sistema de comando:
 - Un ordenador PC Dell, con cable RS232, lector de CD independiente y software NUMIS de comandos.
- Instrumentación auxiliar:
 - Una unidad para test de ruido, con cable de conexión y antena pequeña
 - Una bobina compacta para verificación instrumental
 - Un magnetómetro de protones
- Sistema de alimentación de energía:
 - Cuatro baterías de 12 V 63 A tipo NPL65-121
 - Diez cables 4 mm para conexión de baterías, con 8 pinzas de cocodrilo
 - Dos cargadores de baterías
 - Una unidad de alimentación de 12 V para el PC

La instrumentación se instaló en un vehículo todo-terreno, disponiéndose de un segundo coche todo-terreno para servicio de línea y auxiliar de realización de los trabajos.

5.2 Ejecución de las mediciones

Los trabajos de campo se llevaron a cabo entre el 17 y el 28 de octubre de 2005. El primer día se procedió al desembalaje del material y a su instalación en el vehículo de campo.

El manejo de la instrumentación fue realizado por técnicos del Área de Geofísica del IGME, disponiendo de personal auxiliar complementario para la extensión y recogida de bucles. Simultáneamente a la medida con el equipo de SRM, técnicos de la oficina de Sevilla se encargaron de la localización de los sondeos mecánicos y de la medición del nivel piezométrico de los mismos.

Se han medido un total de 30 SRM distribuidos por la zona de la siguiente manera (Figura 7): 15 de ellos siguiendo un perfil Norte-Sur (P 1) de unos 4,5 km de longitud en la parte occidental de la zona de estudio, con una distancia entre SRM de 300 m. Otros 7 SRM al Oeste de los del perfil 1, que junto con algunos de ellos, forman una malla cuadrada de 500 m de lado (M 1), con el objetivo de simular una zona de modelado hidrogeológico. Por último, otros 8 SRM se han medido hacia el Este para, junto con alguno de los anteriores, formar un perfil Oeste-Este (P 2). En la tabla 2 se indican los SRM correspondientes a cada perfil y se muestran las principales características de los mismos.

Antes de proceder a la medición se procedió a escoger un primer lugar de medida, en él se realizaron pruebas de ruido y se seleccionaron los parámetros instrumentales: frecuencia de Larmor de la zona, sintonización de la unidad de condensadores, existencia y nivel de la señal, stacking, etc. Dado que la zona de ensayo no era excesivamente amplia estos parámetros fueron mantenidos en casi todas las mediciones.

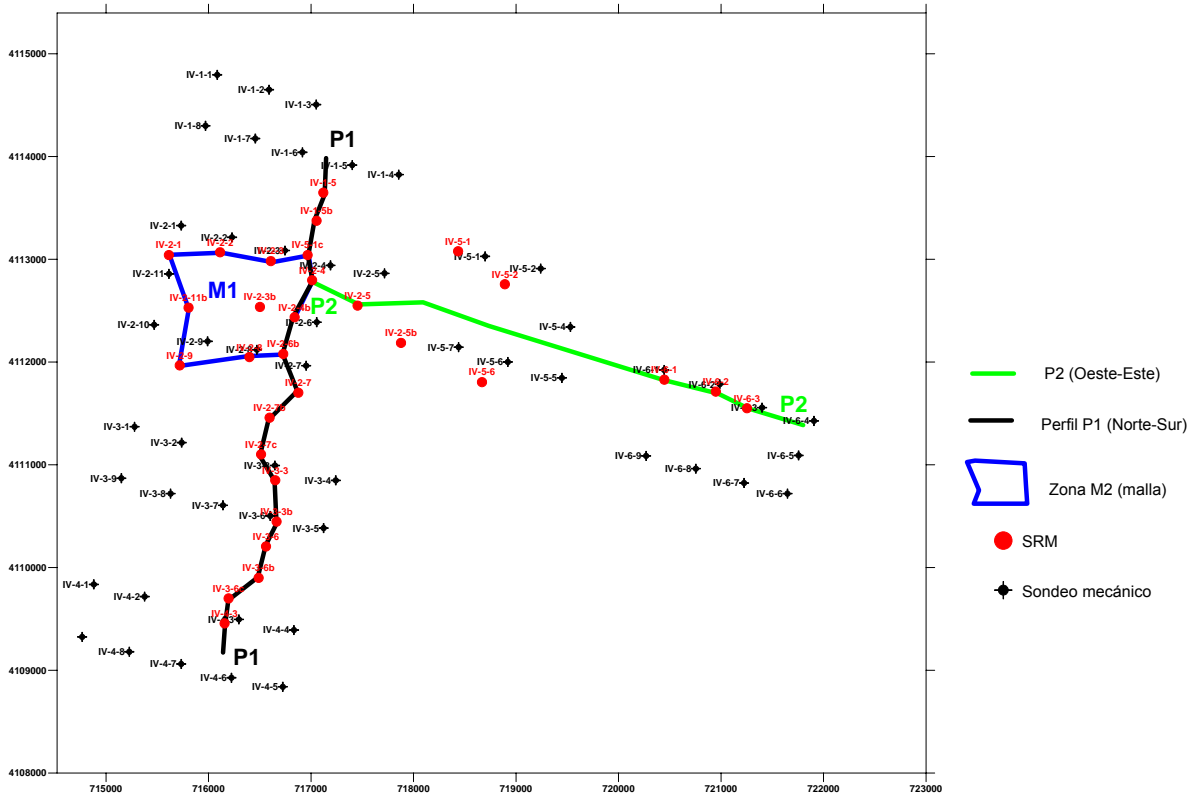


Figura 7. Posición de los SRM medidos y de los sondeos mecánicos. Situación del perfil Norte-Sur (P1), Perfil Oeste-Este (P2) y de la zona que simula la malla (M1).

Con la planificación de la campaña previamente establecida se efectuó un reconocimiento preliminar de los puntos, midiéndose los niveles de ruido con la bobina auxiliar prevista para estos efectos. Como resultado de esta medición preliminar, se apreció un nivel de ruido muy alto en los puntos de medida programados según la dirección Oeste – Este, especialmente en la zona localizada entre los arroyos de la casa Cabrero y arroyo de Bernabé, figura 4; en esta zona se realizaron pruebas midiendo cuando los pozos no estaban bombeando, e incluso, gracias a la colaboración de los propietarios de la finca, se consiguió realizar una medida con todos los motores eléctricos próximos parados, sin embargo, la existencia de un ruido cultural del que se desconoce su posible fuente, hizo imposible el poder realizar en ella ninguna medida. En el resto del perfil Oeste-Este, fue necesario cambiar ciertos parámetros de medida y emplear bucles en ocho para disminuir el nivel de ruido y poder medir curvas con suficiente calidad (tabla 2).

Campaña de SRM en Doñana 2005

SRM	FECHA	BUCLE	LADO	FREC.	C. MAG.	PULSOS	STACKS	RUIDO	S/N
Perfil Norte-Sur (P1)									
IV-2-4	18/10/2005	Cuadrado	150 m	1833.6	43042	16	36	2376	7.46
IV-1-5	19/10/2005	Ocho	75	1834	43055	16	48	1700	8.01
IV-1-5b	19/10/2005	Cuadrado	150	1833	43033	16	48	3657	7.17
IV-1-5C	19/10/2005	Cuadrado	150	1833	43030	16	48	2998	8.50
IV-2-4b	20/10/2005	Cuadrado	150	1834	43059	16	48	867	27.03
IV-2-6b	20/10/2005	Cuadrado	150	1834	43048	16	36	475	23.18
IV-2-7	20/10/2005	Cuadrado	150	1833	43019	16	36	354	30.37
IV-2-7b	20/10/2005	Cuadrado	150	1834	43052	16	24	320	40.49
IV-2-7c	21/10/2005	Cuadrado	150	1835	43066	16	24	317	39.47
IV-3-3	21/10/2005	Cuadrado	150	1834	43053	16	24	347	27.58
IV-3-3b	21/10/2005	Cuadrado	150	1834	43053	16	24	384	23.00
IV-3-6	21/10/2005	Cuadrado	150	1834	43044	16	24	509	25.50
IV-3-6b	21/10/2005	Cuadrado	150	1833	43035	16	24	528	33.05
IV-3-6c	24/10/2005	Cuadrado	150	1835	43067	16	24	284	46.61
IV-4-3	24/10/2005	Cuadrado	150	1834	43052	16	24	436	41.72
Malla (M1)									
IV-2-1	24/10/2005	Cuadrado	150	1833	43029	16	24	263	28.17
IV-2-2	24/10/2005	Cuadrado	150	1833	43030	20	24	466	20.86
IV-2-3	25/10/2005	Cuadrado	150	1834	43044	20	20/24	1448	8.22
IV-2-3b	28/10/2005	Cuadrado	150	1834	43054	16	20	629	21.89
IV-2-9	27/10/2005	Cuadrado	150	1833	43019	16	24	255	18.30
IV-2-11b	28/10/2005	Cuadrado	150	1834	43053	16	16	288	27.38
IV-2-8	28/10/2005	Cuadrado	150	1834	43050	16	16	313	30.88
Perfil Oeste-Este (P2)									
IV-5-6	25/10/2005	Ocho	75	1833	43018	16	24	2078	7.69
IV-5-2	26/10/2005	Ocho	75	1834	43055	16	36	1700	5.17
IV-5-1	26/10/2005	Ocho	75	1834	43043	16	48	4959	2.67
IV-6-2	27/10/2005	Cuadrado	150	1834	43058	16	36	1864	7.03
IV-6-1	27/10/2005	Ocho	75	1834	43043	16	30	338	7.55
IV-2-5b	25/10/2005	Ocho	75	1833	43041	16	60	6160	2.99

Tabla 2. Características de los SRM medidos en la campaña. (SRM= nombre del SRM; Fecha=fecha de medición; Bucle= tipo de bucle empleado; Lado=Longitud del lado del bucle en metros (m); Frecuencia= frecuencia de Larmor en Hertzios (Hz); C. mag.= Intensidad del campo magnético en nano Teslas (nT); Momentos= número de momentos medidos; Stacks= número de stacks empleados en la medición; Ruido= ruido ambiental medido en nanoVoltios (nV); S/N relación señal ruido.

6. INTERPRETACIÓN DE LA CAMPAÑA

6.1 Cálculo de la matriz de coeficientes

Para realizar la inversión de los datos es necesario calcular la matriz de coeficientes, en la que recogen todos los datos generales que son necesarios tener en cuenta a la hora de realizar la inversión de los datos de campo. El cálculo de esta matriz se efectúa con el programa NMR, que forma parte del software de procesado e interpretación suministrado con el equipo.

Uno de los datos necesarios para el cálculo de la matriz es un modelo geoelectrico de la zona; para obtenerlo se deben tener en cuenta todos los datos geológicos y geofísicos disponibles. Para esta campaña se ha contado con las campañas de SEV efectuadas en los años 60 para el proyecto que la FAO llevo a cabo en toda la cuenca del Guadalquivir. Estos SEV fueron realizados por la empresa PRAKLA, y se dispone de la interpretación realizada por esta empresa y también de la reinterpretación que de algunos de estos SEV realizo Astier en 1970.

Las coordenadas de los SEV que se encuentran dentro de nuestra zona de estudio, así como todas sus interpretaciones, se recogen en la tabla 3, su posición puede observarse en la figura 4.

A partir de las interpretaciones de estos SEV se ha generado un modelo geoelectrico representativo de toda la zona. En realidad, se han confeccionado dos versiones de este modelo geoelectrico: versión A, para cuando se emplea una antena cuadrada de 150 m de lado; versión B, para cuando se emplea una antena de dos cuadrados de 75 m de lado en forma de ocho:

Modelo general versión A:

De 0 a 2,5 metros una resistividad de 20 Ω .m

De 2,5 a 55 metros una resistividad de 240 Ω .m

De 55 a 150 metros una resistividad de 15 Ω .m

Modelo general versión B:

De 0 a 2,5 metros una resistividad de 20 Ω .m

De 2,5 a 55 metros una resistividad de 240 Ω .m

De 55 a 75 metros una resistividad de 15 Ω .m

SEV	INFORME	X UTM 30	Y UTM 30	COTA	ESPESORES	RESISTIVIDAD	Reinter. Astier 1970	
P1-10	35559	188993,7	4113425,0	15	???	???	1	???
							19	300
							40	20
							40	200
								C
P1-10A	35559	188993,7	4113425,0	15	22	250	1	???
					25	15	19	300
					70	140	40	20
						<10	40	200
								C
P1-11	35559	188012,4	4111130,0	20	35	340		
						30		
P1-12	35559	187196,7	4109244,0	30	25	600		
					100??	160		
						~ 30		
P1-12A	35559	187196,7	4109244,0	30	30	550		
					65	130		
						~ 20		
P-25	40070	181688,0	4118683,0	25	1,3	6000	1	???
					24,6	230	25	230
					101	50	20	20
						3	40	100
								C
P-26	40070	182365,0	4117146,0	25	2,5	34	1	???
					6,5	340	2	???
					6	48	8	300
					60	110	4	20
					130	34	30	250
						1,9		C
P-27	40070	182440,0	4115215,0	30	2,2	1700	2	???
					66	250	67	230
						17		C
P-28	40070	182494,0	4113219,0	35	0,55	340	3	???
					3	68	88	250
					105	270		C
						4,5		
P-29	40070	182513,0	4111224,0	37	1,5	7000	2	???
					39	480	28	500
						50	4	???
							66	200
								C

Tabla 3. Datos de los SEV empleados en el cálculo del modelo geoelectrico de la zona.

Se han calculado también dos matrices de coeficientes, denominadas 150oeste y 75oeste, una para cada tipo de antena empleada en la zona, cuyas características generales se encuentran recogidas en la tabla 4.

Matriz	150oeste	75oeste
Inclinación de campo magnético	55°	55°
Tipo de antena	Cuadrado 150 m lado	En ocho 75 m lado
Frecuencia de Larmor	1833 Hz	1833 Hz
Modelo geoelectrico	Modelo A	Modelo B
Máxima profundidad de investigación	150 m	75 m

Tabla 4 Características de las matrices calculadas para este estudio.

6.2 Interpretación de las curvas de SRM

Las curvas de campo de todos los SRM de la campaña, la descripción de los parámetros empleados en la inversión, y los diferentes gráficos resultado de la misma, pueden verse en el Anexo III.

6.2.1 Análisis de las interpretaciones con información a priori.

Como ya se ha mencionado, dentro de la zona de estudio existen numerosos sondeos mecánicos con columna litológica. Algunos de los SRM de esta campaña se han medido próximos a algunos de estos sondeos mecánicos, por lo que para su interpretación se ha tenido en cuenta esta información. Con estos SRM se ha realizado la denominada interpretación con información a priori, esto es, se introduce como modelo inicial en el programa de modelado la geometría de los tramos acuíferos proporcionada por los sondeos mecánicos, y el programa de inversión calcula para estas capas los valores de cantidad de agua y tiempo de decaimiento que proporcionan un buen ajuste con la curva de campo medida. Este tipo de interpretación permite resultados más fiables al eliminar la geometría de las capas como variable en la interpretación, y reduce

considerablemente los problemas de equivalencia propios de la interpretación por inversión en los métodos geofísicos.

Como ejemplo de la información disponible, en la figura 8 se muestra un perfil confeccionado con las columnas litológicas disponibles de los sondeos mecánicos en los que se ha medido un SRM próximo; todos ellos pertenecen al perfil P1 (Norte-Sur). En él, se puede observar la presencia de tramos de arenas finas con alguna intercalación de arcillas arenosas, que aumentan de potencia hacia el Sur, y que constituyen el acuífero superior aluvial. Un nivel de arcilla y fósiles, marcado en la figura, parece constituir el tránsito entre el acuífero superior y el acuífero inferior, más heterogéneo, formado por una sucesión de niveles de arenas, fósiles y arcillas de espesor variable, y en el que resulta bastante difícil determinar los tramos acuíferos. El acuífero aluvial superior queda bastante bien definido, siendo relativamente sencillo determinar los niveles arenosos acuíferos que lo constituyen. Sin embargo, el acuífero inferior deltaico presenta grandes dificultades a la hora de determinar los tramos acuíferos que lo constituyen. Por un lado el propio método pierde resolución con la profundidad, figura 3, y por otro lado se sospecha que la profundidad del sondeo mecánico es inferior a la del muro de este acuífero, resultando que es muy difícil precisar su geometría, aunque si se proporciona una estimación del contenido en agua en el mismo y de su evolución; en la interpretación de los SRM el criterio adoptado ha sido el de tomar como nivel final de referencia el del sustrato impermeable indicado en el perfil hidrogeológico del IRIDA, figura 5, interpolando ese valor para el SRM IV-2-4, y llevándolo hasta los 150 m en el SRM IV-4-3, ya que se piensa que la elevación del sustrato que se observa en esta zona en la figura 5 no es fiable.

A continuación se van a describir uno a uno los SRM medidos junto a sondeos mecánicos, interpretados con información a priori. Se va a comenzar con los pertenecientes al perfil P1 (Norte-Sur), y se continuará con los medidos en la zona M1. Los SRM del P2, medidos hacia el Este, son los descritos en último lugar, y como se han medido con un bucle más pequeño su profundidad teórica de investigación es inferior.

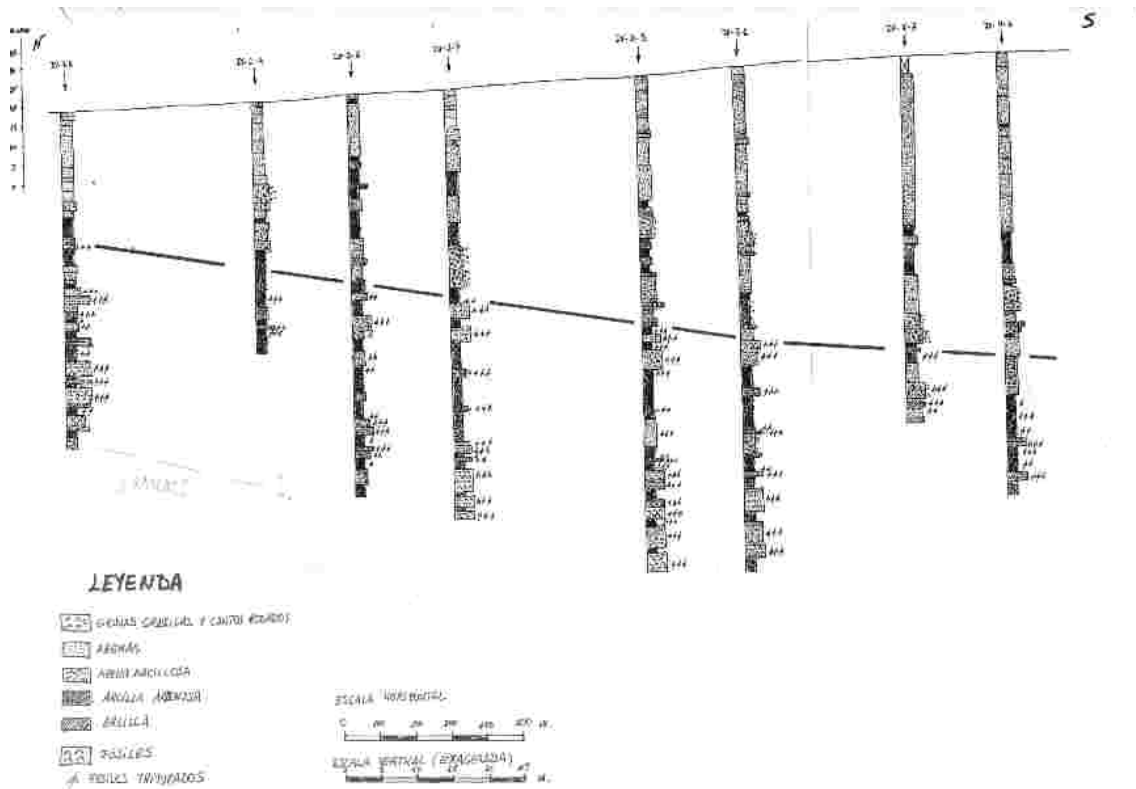


Figura 8. Perfil formado por las columnas de los sondeos mecánicos próximos a SRM del perfil Norte-Sur. La línea negra indica el posible techo del acuífero inferior deltaico.

Perfil P1 (Sólo los SRM medidos junto a sondeos mecánicos)

- SRM IV-1-5

Este SRM, se ha medido con un ruido ambiental alto, por lo que ha sido necesario emplear un bucle en ocho formado por dos cuadrados de 75 m de lado. Esta configuración de antena disminuye el ruido registrado y permite la medida del SRM en estas condiciones, aunque a cambio, disminuye la profundidad de investigación que en teoría no superará los 75 m.

La columna del sondeo mecánico finaliza a los 87 m, con los últimos tres metros en margas, ver anexo II, por lo que el empleo de la antena en ocho en este punto no afecta en exceso a la interpretación.

En la figura 9 se muestra el resultado de la inversión de este SRM junto con la columna del sondeo mecánico. Se observa bien el acuífero aluvial superior, formado por un tramo con un 15 % de contenido en agua y alta permeabilidad (se asocia al valor del

tiempo de decaimiento T_1^* , indicado por la escala de color). El tramo de transición se asocia con una alternancia de arcillas arenosas y arcillas, coincidente con lo indicado en la figura 8. El acuífero inferior coincide con tramos de fósiles en el sondeo mecánico; se observa un primer tramo muy permeable con un contenido en agua del orden de un 12% entre los 40 y los 65 m, seguido por un tramo hasta el final del sondeo, también permeable y con un contenido en agua del 7%.

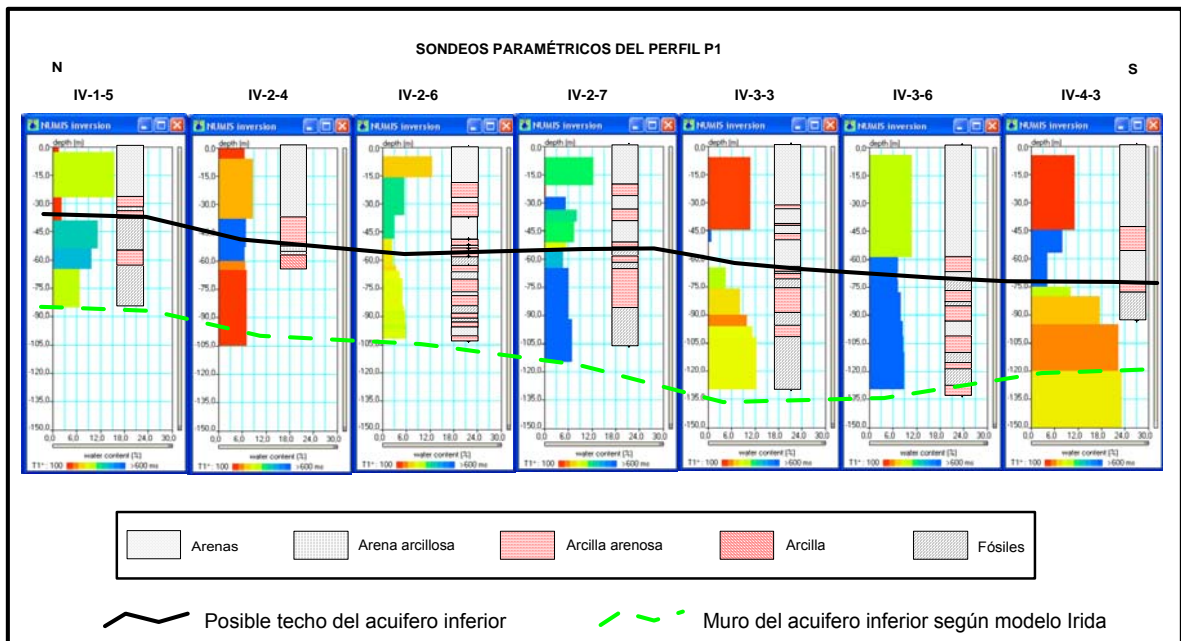


Figura 9. Perfil formado por los SRM paramétricos del perfil P1, interpretados con la información a priori proporcionada por los sondeos mecánicos próximos. En la figura se han representado (en negro) la posible línea de techo del acuífero inferior según el modelo de la figura 8, y (en verde) la línea que representa el muro del mismo acuífero o sustrato impermeable según el modelo establecido por el IRIDA, figura 5.

- SRM IV-2-4

En este caso, se ha tomado como acuífero superior los primeros 40 m donde la interpretación del SRM muestra un tramo no muy permeable con un contenido en agua del 9%, figura 9, y que se corresponde con el tramo arenoso indicado en el sondeo mecánico. A continuación se entra en un tramo continuo permeable y con un contenido en agua del 6-7 % que se correlaciona con unas arcillas arenosas en el sondeo mecánico y que marca la transición al acuífero inferior, que viene representado por un tramo poco permeable con un 7% de contenido en agua, hasta una profundidad de 105 m, que corresponde al valor interpolado en este punto del techo del sustrato impermeable indicado en la figura 5.

- SRM IV-2-6

En este caso, figura 9, el acuífero superior lo forman dos tramos, el primero de permeabilidad media y un contenido en agua del 12%, seguido de un tramo más permeable y con un contenido en agua del 6%, que se corresponde con tramos arenosos arcillosos en el sondeo mecánico. Sigue un tramo de unos 25 metros de potencia, con escaso contenido en agua, que marca la transición entre el acuífero superior y el inferior. Éste viene caracterizado por un tramo permeable hasta los 105 m, muro del acuífero según el modelo de la figura 5, y un contenido en agua que no alcanza el 6%.

- SRM IV-2-7

En la interpretación del SRM, figura 9, el acuífero aluvial superior viene representado por dos tramos: uno más superficial de unos 15 m de potencia, de permeabilidad media y un contenido en agua del 12%, y un segundo entre los 27 m y los 50 m, igual de permeable y que alcanza un máximo contenido en agua del 8%; entre estos dos tramos se encuentra un tramo impermeable sin agua, que se correlaciona con un tramo arcilloso en el sondeo mecánico.

La zona de transición y comienzo del acuífero inferior se corresponde con un tramo menos permeable entre los 50 y 55 m de profundidad con un menor contenido en agua (5%). El acuífero inferior viene representado por tramos permeables y con un mayor contenido en agua con la profundidad.

- SRM IV-3-3

En este caso la interpretación a priori se ha tomado hasta los 130 m, profundidad a la que se encuentra el impermeable de fondo según el perfil hidrogeológico de la figura 5. El acuífero superior viene definido por un tramo hasta los 45 m de profundidad de permeabilidad baja, y un contenido en agua del 11%, figura 9. Continúa con un tramo sin agua que se interpreta como la zona de transición entre el acuífero superior e inferior, y que curiosamente coincide con un tramo arenoso entre arcillas en el sondeo mecánico. El acuífero deltaico inferior se manifiesta con tramos de permeabilidad media

y que aumentan de contenido en agua con la profundidad, llegando hasta el valor del 12%.

- SRM IV-3-6

La interpretación de este SRM es diferente a la de los otros SRM paramétricos de este perfil. Comienza con un tramo de 60 m de potencia, permeable y con un contenido en agua del 11%, figura 9, que se correlaciona con el acuífero superior. Continúa hasta los 75 m con un tramo permeable con un contenido en agua que supera por poco el 6%, que se corresponde con niveles de arcillas, arenas y fósiles en el sondeo mecánico, y que se correlaciona con la zona de transición. A partir de aquí y hasta el final, se observa un tramo permeable que aumenta ligeramente su contenido en agua con la profundidad hasta alcanzar un valor del 9%, que se interpreta como el acuífero deltaico inferior.

- SRM IV-4-3

Este SRM es el último de los paramétricos del perfil Norte-Sur. Como en el caso anterior el acuífero superior viene representado por un tramo poco permeable y con un 11% de contenido en agua que alcanza los 45 m de profundidad, figura 9, la base de este tramo la constituye un tramo permeable con 8% de contenido en agua y unos 12 m de espesor, que coincide con un tramo arcilloso en el sondeo mecánico. Por debajo hasta los 75 m, se encuentra un tramo sin agua que coincide con un nivel de arenas entre tramos arcillosos en el sondeo mecánico. A continuación se entra en varios tramos de permeabilidad baja-media, con un aumento de contenido en agua con la profundidad, alcanzando el último tramo un valor del 24 %, y que se correlaciona con el acuífero deltaico inferior, siendo este SRM el que más contenido en agua presenta de este acuífero. Este SRM se ha interpretado hasta los 150m de profundidad, ya que se sospecha que en esta zona la profundidad del sustrato impermeable esta a mayor profundidad que la indicada en el perfil de la figura 5; la cantidad de agua encontrada en este SRM parece confirmar esta hipótesis, de hecho las interpretaciones de los últimos SRM del perfil indican una cantidad mayor de agua mayor que se puede encontrar a mayor profundidad a medida que nos desplazamos hacia el Sur.

Zona M1 (SRM al Oeste del perfil P1) (Sólo SRM medidos junto a sondeos mecánicos)

En la interpretación de estos sondeos paramétricos se ha tenido en cuenta las interpretaciones de los SRM paramétricos del perfil P1. En todos los casos como los sondeos mecánicos no han alcanzado el impermeable de fondo se ha tomado como criterio para generar el modelo de interpretación a priori el siguiente: se ha seguido la geometría de las capas indicada en la columna litológica del sondeo; cuando ya se ha superado la profundidad del sondeo mecánico se han tomado las capas que corresponderían a la interpretación estándar; por ejemplo, si la columna llega hasta los 80 m se ha seguido las capas indicadas en la misma hasta esa profundidad, y las tres últimas capas se han considerado entre 80 y 100 m, entre 100 y 120 m, y entre 120 y 150 m.

En la figura 10 se muestran las interpretaciones de estos SRM, y además se ha añadido el SRM IV-2-4 del perfil P1 como referencia en la interpretación.

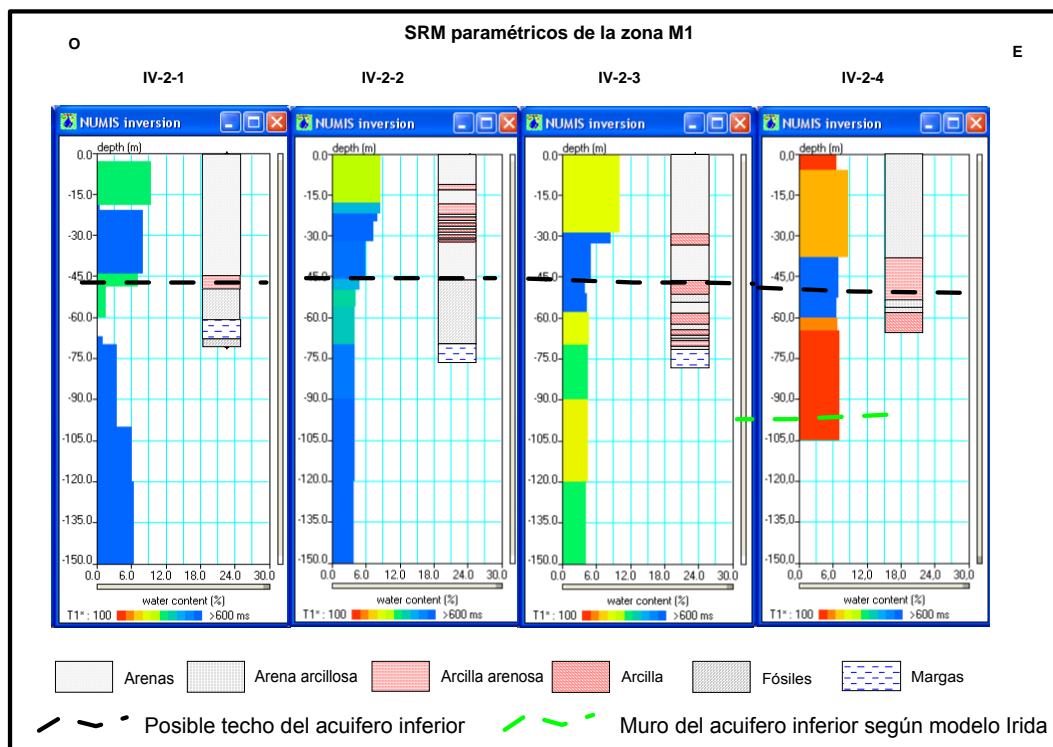


Figura 10. SRM paramétricos situados en la zona M1 interpretados con la información a priori proporcionada por los sondeos mecánicos próximos. En la figura se han representado (en negro) la posible línea de techo del acuífero inferior según el criterio adoptado en el perfil P1 y (en verde) la línea que representa el muro del mismo acuífero o sustrato impermeable según el modelo establecido por el IRIDA, figura 5.

- SRM IV-2-1

Este SRM muestra dos tramos que constituyen el acuífero aluvial superior. Los 20 primeros metros constituyen el primer tramo con una permeabilidad media y una cantidad de agua próxima al 9%. El segundo, entre los 20 y los 43 m, mucho más permeable y la misma cantidad de agua que el anterior.

Hasta cerca de los 70 m se observa un tramo sin agua que coincide con la aparición de tramos de fósiles en el sondeo mecánico que, según el criterio seguido en la interpretación del perfil anterior, pertenecen al acuífero inferior deltaico, por lo que en la figura 10 se ha situado el techo de este acuífero inferior dentro de este tramo. El acuífero inferior muestra presencia de agua en materiales muy permeables; hay que hacer notar que la distribución de estas últimas capas con agua no corresponden con la geometría indicada por el sondeo mecánico, sino que se ha adoptado siguiendo una distribución parecida a la que realiza el software de inversión de manera automática, como ya se ha explicado con anterioridad, por lo que sólo se puede indicar la existencia de agua sin poder definir de una forma más precisa su geometría y distribución.

- SRM IV-2-2

Este SRM también muestra al acuífero superior con dos tramos, el primero de características muy similares a las del SRM anterior, y el segundo, como en el SRM IV-2-1, más permeable que el primero, pero con un menor contenido en agua que disminuye con la profundidad, figura 10.

Se ha marcado el techo del acuífero inferior en el primer tramo con fósiles de la columna litológica, siguiendo el criterio ya establecido. El acuífero inferior muestra una cantidad constante de agua, alrededor del 4%, en materiales permeables. La distribución de las últimas capas sigue la pauta indicada en el SRM anterior.

- SRM IV-2-3

La interpretación de este SRM, figura 10, sigue la misma pauta que los anteriores, solo diferenciándose en la menor permeabilidad de los materiales del acuífero inferior. Se ha

correlacionado con la interpretación adoptada para el SRM IV-2-4 del perfil Norte-Sur, indicando en éste la línea que indica el posible techo del acuífero inferior, y la marca del sustrato impermeable, figura 10.

Perfil P2 (al Este del Perfil P1) (Sólo SRM medidos junto a sondeos mecánicos)

Los SRM realizados en esta parte de la zona de trabajo al existir un ruido ambiental mayor han tenido que ser medidos todos menos el IV-6-2, con un bucle en forma de ocho formado por dos cuadrados de 75m de lado, lo que disminuye su profundidad de investigación y dificulta su correlación con los SRM medidos en el perfil P1 y la zona M1.

- SRM IV-5-1

La interpretación de este SRM, figura 11, muestra el acuífero superior hasta los 22 m, compuesto de dos tramos: uno poco permeable hasta los 16 m con un 9% de contenido en agua, seguido de uno menos potente (6 m) más permeable y un 17 % de contenido en agua. Continúa un tramo sin agua hasta los 30 m, que marca la transición entre el acuífero superior e inferior. Este último comienza con un tramo de permeabilidad media y 7% de contenido en agua, seguido de un tramo permeable hasta el final del SRM con un contenido en agua del 6%.

- SRM IV-5-2

Este SRM está situado próximo al anterior y dentro del mismo sector, por lo que se han correlacionado ambas interpretaciones, figura 11. En este sondeo se muestra el tramo acuífero superior con unos 17 m de potencia, permeabilidad baja-media y un contenido en agua del 9%. La transición de los dos acuíferos se muestra con un tramo poco permeable con un 4 a 5 % de contenido en agua que llega hasta los 30m. El acuífero deltaico viene representado por un tramo de permeabilidad media y un contenido en agua del 9%.

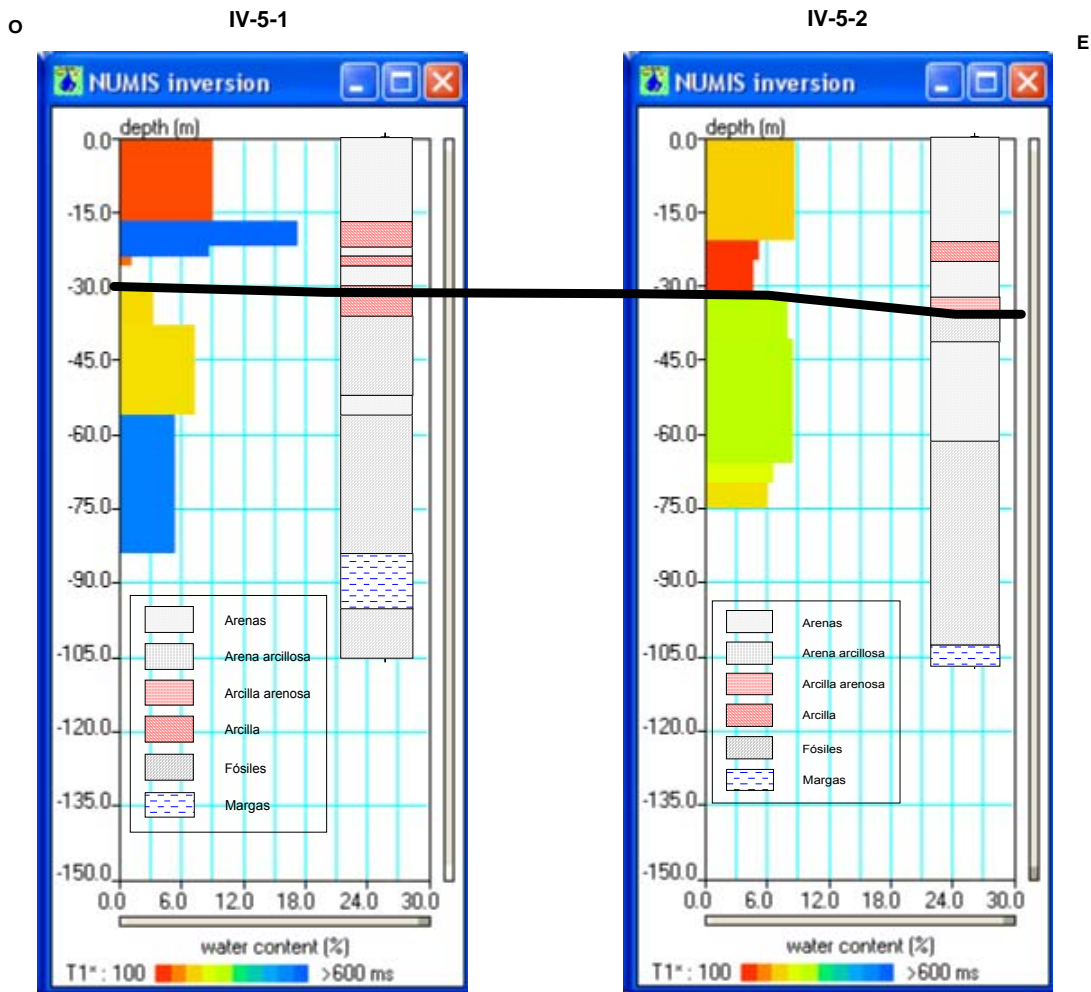


Figura 11. SRM paramétricos IV-5-1 y IV-5-2 situados en el perfil P2 interpretados con la información a priori proporcionada por los sondeos mecánicos próximos. En la figura se han representado (en negro) la posible línea de techo del acuífero inferior.

- SRM IV-6-1

Este SRM está situado más al Este que los anteriormente comentados y dentro del subsector 6, figuras 4 y 7. Su interpretación con información a priori, figura 12, muestra un primer tramo permeable de unos 25 m de potencia y un contenido en agua del 9%, que se corresponde con el tramo arenoso del acuífero superior. Un tramo poco permeable hasta los 35 m de profundidad, que se correlaciona con un tramo arcilloso en el sondeo mecánico, indica la transición al acuífero inferior. Éste se representa por un tramo permeable hasta el final del SRM y un contenido en agua del 12% en promedio.

- SRM IV-6-2

Este SRM se sitúa al Este del anterior y dentro del mismo subsector. Su interpretación, figura 12, muestra un tramo acuífero superior poco permeable y con un 9% de contenido en agua. Continúa un tramo muy permeable pero con muy poco contenido en agua que se corresponde con un tramo arcilloso en el sondeo mecánico, y que finaliza en un tramo muy permeable y con contenido en agua del 16-17%, que se corresponde con un tramo arenoso situado encima del primer nivel fosilífero que ya pertenece al acuífero profundo. Este primer tramo con fósiles viene indicado en el SRM por un nivel poco permeable y escaso contenido en agua. Sobre los 60 m se entra claramente en un tramo muy permeable y con un contenido en agua en promedio del 12 %, que llega hasta la profundidad del sondeo mecánico, 100m (Este SRM se ha realizado con un bucle cuadrado de 150 m de lado).

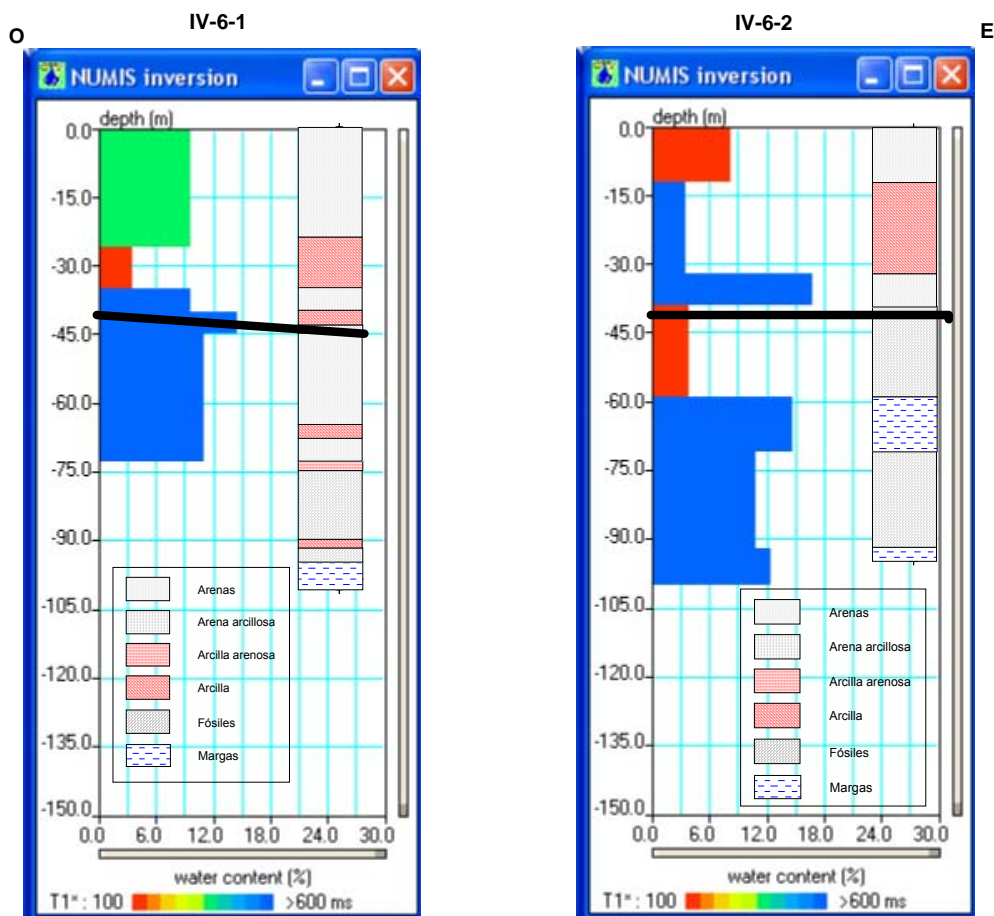


Figura 12. SRM paramétricos IV-6-1 y IV-6-2 situados en el perfil P2 interpretados con la información a priori proporcionada por los sondeos mecánicos próximos. En la figura se han representado (en negro) la posible línea de techo del acuífero inferior.

En conclusión: con las interpretaciones a priori de los SRM ha quedado bien definido el acuífero superior, que aumenta de potencia hacia el Sur, mientras que se mantiene o disminuye ligeramente hacia el Este; la transición entre el acuífero aluvial y el deltaico inferior viene indicada normalmente por un tramo con nulo o poco contenido en agua, y una permeabilidad baja. El acuífero deltaico inferior ha quedado peor definido; dadas las características del método no es posible conseguir una buena definición del mismo, si bien se ha obtenido una idea de su cantidad de agua, que aumenta hacia el Sur; aunque para el muro del acuífero se ha tomado como referencia el nivel de sustrato impermeable indicado en el perfil hidrogeológico del IRIDA, figura 5, las interpretaciones indican que existe agua por debajo de este nivel y que el sustrato impermeable debe de encontrarse en muchos puntos a mayor profundidad.

6.2.2 Interpretación general de la campaña

Perfil P1 (Norte-Sur)

Este perfil consta de 15 SRM, figura 7, que han sido medidos con una calidad bastante buena, que aumenta a medida que nos desplazamos hacia el sur.

En la figura 13 se muestran las interpretaciones de los SRM de este perfil y en la figura 14 se muestra un perfil formado con las interpretaciones de contenido en agua ($\theta_{SRM}(z)$) de todos los SRM del perfil. En las dos figuras se han incluido las columnas litológicas de los sondeos mecánicos con ensayos de bombeo y junto a ellas se ha puesto el resultado de la interpretación con información a priori de los SRM próximos. Se ha obtenido una buena definición del acuífero aluvial superior, que los SRM interpretados sin información a priori muestran con una cierta heterogeneidad, con alternancias de niveles con diferentes contenidos de agua, con un promedio del 10-11%, aumentando su potencia hacia el sur; los niveles con menor contenido en agua se corresponden normalmente con tramos más arcillosos; en la figura 12 se ha representado una línea que intenta indicar el límite inferior de este acuífero aluvial. El acuífero deltaico inferior muestra su techo a mayor profundidad a medida que nos desplazamos hacia el sur. Siguiendo el criterio establecido con los SRM interpretados con información a priori, se ha representado la separación del acuífero aluvial superior y el deltaico inferior, indicado por la línea negra de la figura. Como se aprecia, normalmente esta línea se

representa en zonas con baja permeabilidad y escaso o nulo contenido en agua, aunque este criterio es difícil de seguir en la zona donde se han medido los SRM IV-3-6 y IV-3-6b, así como en el SRM IV-2-7c, utilizando en ellos como guía la información disponible de los sondeos mecánicos. En el acuífero inferior delático, se observa un contenido en agua muy variable, que aumenta hacia el final del perfil. Hay que recordar, que el método de SRM es resolutivo en la determinación del techo y muro de una capa con agua hasta una profundidad aproximadamente igual a la mitad del lado del bucle empleado, en nuestro caso, con un bucle cuadrado de 150 m de lado, es resolutivo en los primeros 75 m; por debajo de esta profundidad, pierde resolución distribuyéndose el agua existente en capas cada vez más potentes. Es posible que en los SRM situados más al Norte se pueda obtener información de la totalidad del acuífero delático, pero a medida que nos desplazamos hacia el Sur solo es posible determinar la existencia de agua, sin alcanzar la resolución necesaria para definir el muro del acuífero, e incluso sin poder alcanzarlo con la profundidad teórica de investigación empleada.

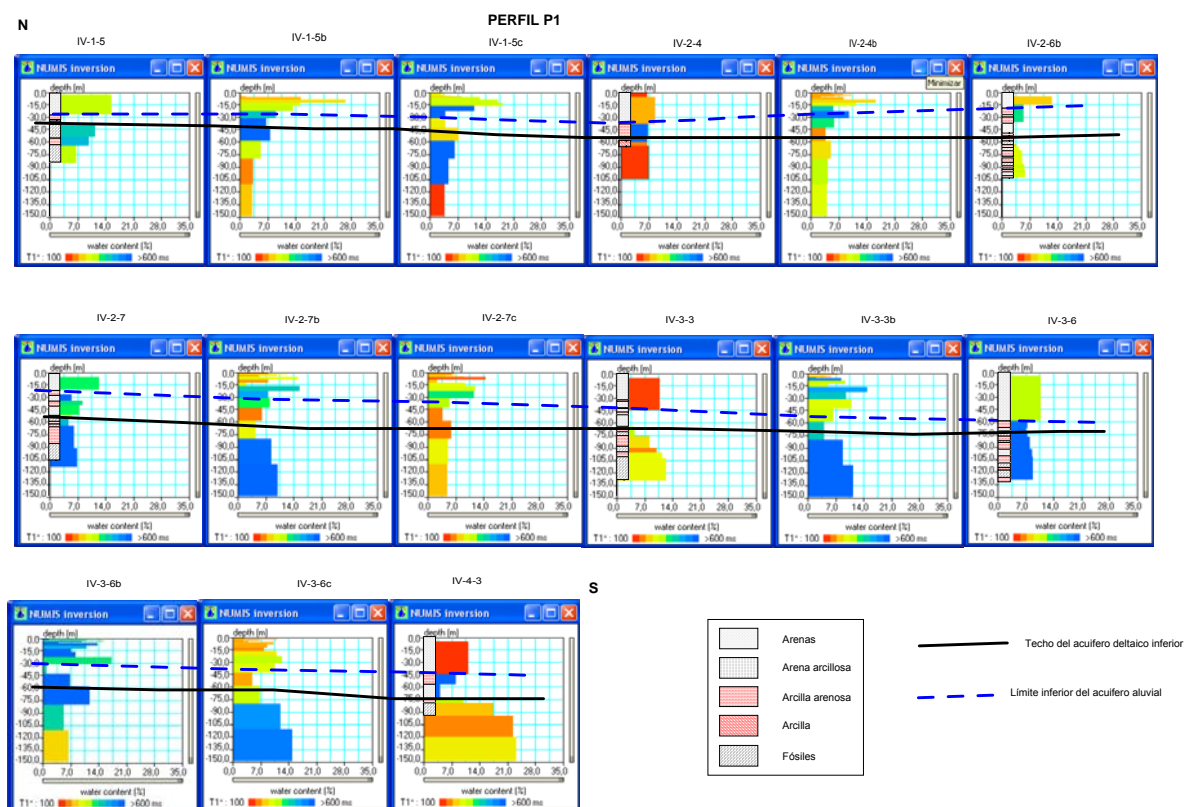


Figura 13. Interpretaciones de los SRM del perfil P1. Se incluyen las columnas litológicas de los sondeos mecánicos paramétricos.

En la figura 14 se ha representado las curvas de contenido en agua resultado de las interpretaciones de los SRM del perfil P1, formando el perfil dibujado a escala y nivelado con las cotas de los SRM. En él se han incluido las columnas litológicas de los sondeos mecánicos con ensayos de bombeo sobre los que se ha superpuesto la interpretación con información a priori de los SRM próximos. La línea continua indica la separación entre el acuífero superior aluvial y el deltaico más profundo

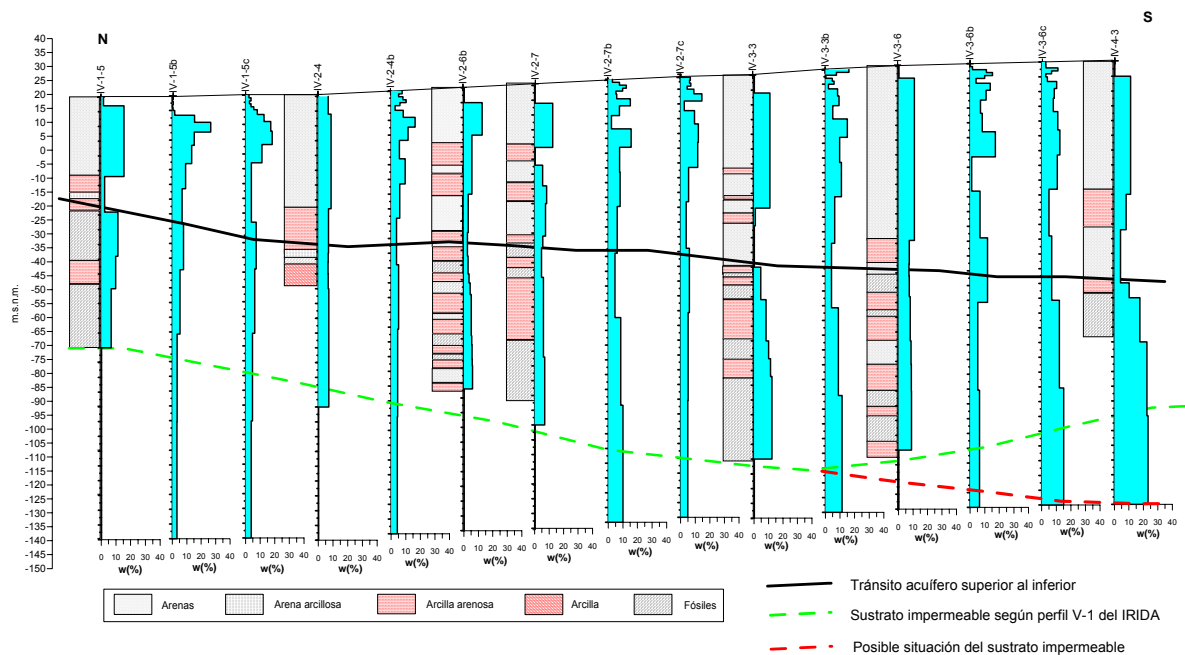


Figura 14. Perfil de correlación de las interpretaciones de contenido en agua ($\theta(\%)$) en función de la profundidad de los SRM del perfil P1.

Zona M1

La situación de los SRM que forman esta malla puede observarse en las figuras 4 y 7. En la tabla 5 se recoge la forma y tamaño del bucle empleado en su medición, además de si se encuentran próximos a un sondeo mecánico del que se disponga de columna litológica.

Se ha establecido una correlación con la interpretación de estos SRM, figura 15, y apoyándose en la información procedente de los sondeos mecánicos próximos se ha representado una línea que marca en esta zona el muro del acuífero aluvial y que establece la transición al acuífero deltaico más profundo.

SRM	Bucle	Sondeo Mecánico
IV-2-1	Cuadrado 150m	Si
IV-2-2	Cuadrado 150m	Si
IV-2-3	Cuadrado 150m	Si
IV-1-5c	Cuadrado 150m	No
IV-2-11b	Cuadrado 150m	No
IV-2-3b	Cuadrado 150m	No
IV-2-4	Cuadrado 150m	Si
IV-2-4b	Cuadrado 150m	No
IV-2-9	Cuadrado 150m	No
IV-2-8	Cuadrado 150m	No
IV-2-6b	Cuadrado 150m	Si

Tabla 5. SRM situados al Oeste del perfil Norte-Sur, forma y tamaño de bucle empleado en su realización e indicación de los se encuentran junto a un sondeo mecánico de columna conocida.

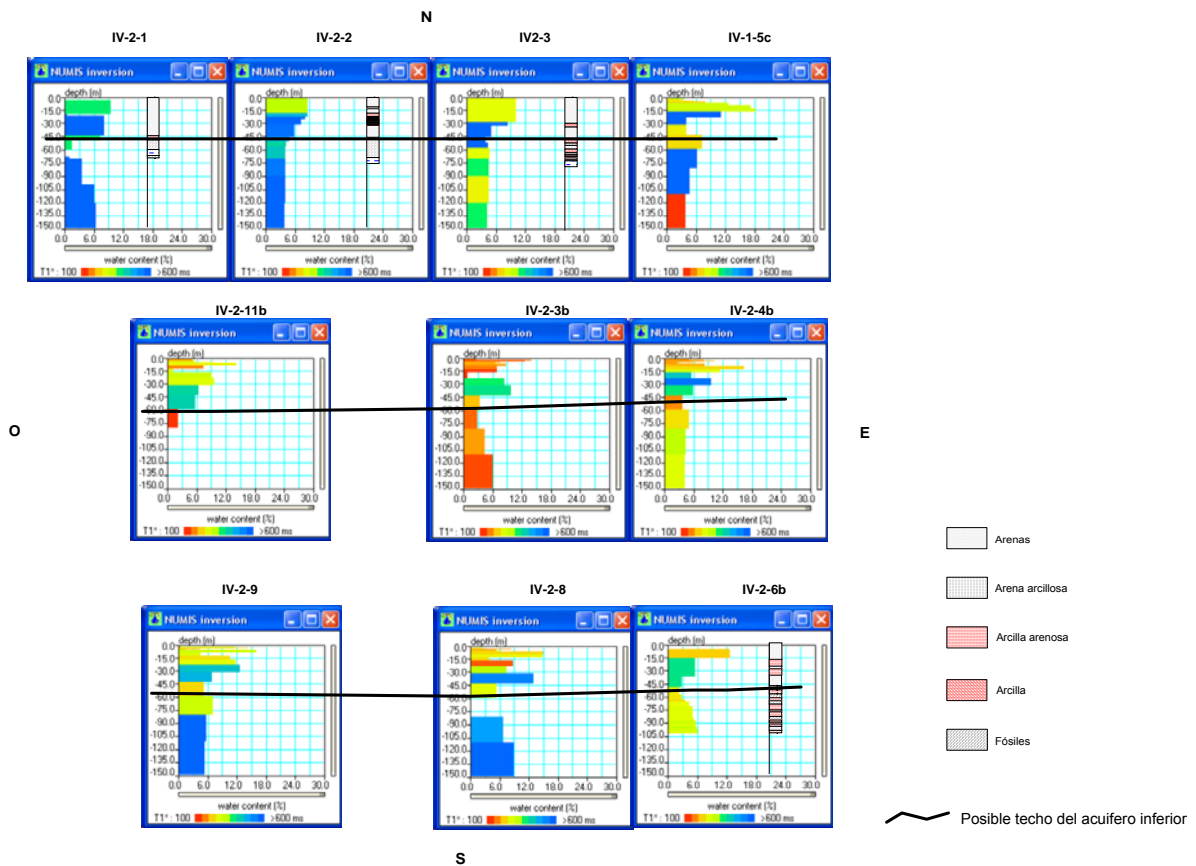


Figura 15. Interpretaciones de los SRM de la zona M1, posicionados en la figura según su distribución en la zona de trabajo. Se incluyen las columnas litológicas de los sondeos mecánicos paramétricos y se ha representado la línea que marca el muro del acuífero aluvial.

Se ha cartografiado el heterogéneo acuífero superficial aluvial, con un promedio de contenido en agua del 10-12% y compuesto de alternancias de tramos más permeables y

menos permeables. El paso del acuífero aluvial al inferior deltaico viene determinado en las interpretaciones de los SRM por un tramo poco permeable y con escaso contenido en agua. Como en el caso del perfil P1 no es posible determinar la geometría del acuífero deltaico, pero en la mayoría de los SRM se observa la presencia de agua en materiales bastante heterogéneos en profundidad, sobre todo en los SRM IV-2-1, IV-2-3b, IV-2-8 y IV-2-6b que son los que superan el valor de 6% de contenido en agua, en el otro lado se encuentra el SRM IV-2-11b, que no detecta la presencia de agua a partir de los 75 m aunque en su medición se empleó una antena cuadrada de 150 m de lado.

Perfil P2

Este perfil está compuesto por una serie de SRM medidos hacia el Este de la zona de trabajo, figura 7. Como ya se mencionó con anterioridad en el apartado 5.2, a medida que nos desplazamos hacia el Este el ruido ambiental fue aumentando impidiendo el realizar la medida de los SRM previamente planificados. Los SRM medidos en esta parte de la zona de trabajo al tener un ruido ambiental mayor, han tenido que ser medidos, con la excepción del IV-6-2, empleando un bucle en forma de ocho formado por dos cuadrados de 75 m de lado, lo que disminuye su profundidad de investigación y dificulta su correlación con los SRM medidos en la parte occidental de la zona de trabajo.

El modelo geoelectrico empleado en la interpretación de estos SRM es el mismo que el empleado en la parte Oeste de la zona de trabajo, si bien las matrices calculadas se han ajustado al tipo y tamaño de la antena empleada.

En la figura 16 se han representado los SRM que forman el perfil, en ella, se han unificado las escalas para poder comparar los resultados de las interpretaciones. Con una línea negra se indica el posible techo de la formación deltaica, obtenida a partir de la información proporcionada por la interpretación de los SRM próximos a los sondeos mecánicos y arrastrando esta información al resto. Según se aprecia, en la parte oriental de la zona la formación aluvial se presenta con tramos acuíferos menos potentes que en la parte occidental, unos 20 m de promedio; se observa una clara separación entre el acuífero aluvial y el deltaico indicada por la existencia de tramos poco permeables y con poco o nulo contenido en agua. El contenido en agua del acuífero aluvial parece mayor

en los SRM situados más al sur, IV-2-5b y IV5-6, alcanzando una porosidad máxima del 24 %, si bien mantiene la alternancia de tramos más permeables y menos permeables. En cuanto al acuífero inferior deltaico, todos los SRM indican la presencia de agua en materiales permeables, aunque dada la profundidad de investigación alcanzada en ellos no se pueda definir bien la geometría del mismo.

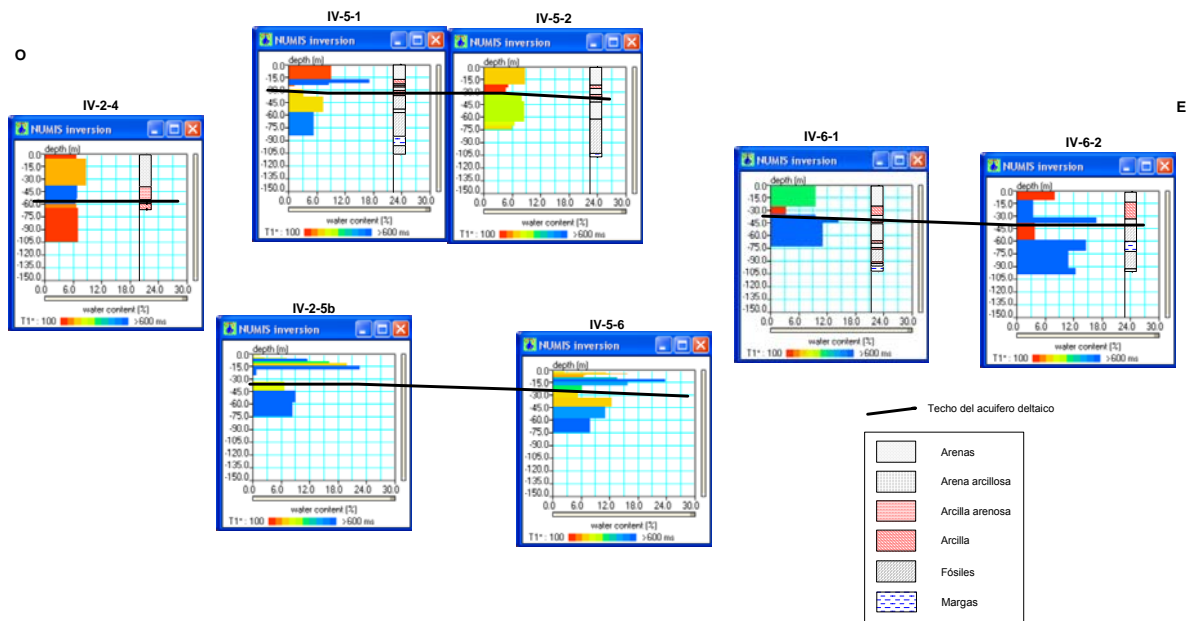


Figura 16. Interpretación de los SRM del perfil P2, posicionados en la figura según su distribución relativa en la zona de trabajo. Se incluyen las columnas litológicas de los sondeos mecánicos paramétricos y se ha representado la línea que marca el muro del acuífero aluvial

En conclusión, los SRM situados al Oeste se han medido con un menor ruido ambiental, obteniéndose medidas con una relación señal/ruido alta y curvas de campo de muy buena calidad. Estas condiciones varían hacia el Este donde aumenta el ruido, obligando a medir con antenas en forma de ocho para mejorar la relación señal/ruido y obteniéndose curvas de peor calidad. Con la interpretación de los SRM y ayudándonos de la información de los sondeos mecánicos, donde se disponía de ella, se ha cartografiado la formación aluvial que forma el acuífero superior de la zona, que se mantiene o disminuye ligeramente en potencia hacia el Este aumentando hacia el Sur, y que muestra una alternancia de capas con más o menos permeabilidad y un valor promedio de porosidad (contenido en agua) del orden del 10-12%. Se ha determinado el paso de la formación aluvial a la deltaica en casi todos los SRM, que en general se produce en zonas con capas de poca permeabilidad y escaso contenido en agua. Se ha observado la existencia de agua en el acuífero deltaico en casi todos los SRM del perfil

Norte-Sur, y en todos los SRM según nos desplazamos hacia el Este. Dada la limitación del método no es posible determinar de una manera más precisa la geometría de este acuífero profundo ya que se pierde resolución con la profundidad, y la información que proporciona de las capas más profundas es la de una distribución mas grosera, con grandes espesores de las últimas capas, 30 y 45 m, englobando en ellas la información de todo ese tramo.

6.3 Determinación de la Permeabilidad/Transmisividad.

Como ya se mencionó en el apartado 3.2, a partir de las mediciones de campo de un SRM es posible obtener estimaciones de algunos parámetros hidrodinámicos, en particular de la porosidad eficaz, de la permeabilidad y de la transmisividad.

Dentro de la zona se posee información de valores de transmisividad procedentes de ensayos de bombeo realizados en algunos sondeos durante la campaña de la FAO (año 1973-1974) obteniéndose los valores que se muestran en la tabla 6.

DATOS ENSAYOS DE BOMBEO		
SONDEO	Transmisividad descenso (m²/s)	Transmisividad ascenso (m²/s)
IV-1-5	-	2,40E-05
IV-2-4	6,00E-04	6,90E-04
IV-2-6	1,07E-03	6,08E-04
IV-2-7	8,03E-04	8,80E-04
IV-3-4	2,90E-03	3,30E-03
IV-3-6	5,30E-03	4,80E-03
IV-4-3	5,30E-03	4,30E-03
IV-4-6	3,47E-03	3,62E-03

Tabla 6. Datos de los ensayos de bombeo de los sondeos mecánicos, obtenidos en la campaña de la FAO (1973-74)

De la observación de los cortes formados por estos sondeos mecánicos, figuras 5 y 8, y de la situación de las rejillas indicada en la tabla 7, se deduce que en todos los sondeos las rejillas se han situado en tramos arenosos del acuífero superficial y en tramos permeables del acuífero deltaico, no superando nunca los 130 m de profundidad. En la determinación del factor de calibración C_T se debe de tener en cuenta que todos los

Sondeo Mecanico	Situación de las rejillas	Bucle empleado en SRM
IV-1-5	22-26 m 40-56 m 71-82 m	75 metros (En ocho)
IV-2-4	19-39	150m (Cuadrado)
	52-54	
	58-60	
IV-2-6	37-53 m 57-63 m 66-70 m 84-88 m 95-97 m	150m (Cuadrado)
IV-2-7	30-35 m 40-50 m 55-59 m 61-65 m 72-74 m 92-96 m 99-107 m	150m (Cuadrado)
IV-3-6	29-59 m 67-75 m 83-85 m 93-101 m 109-115 m 118-126 m	150m (Cuadrado)
IV-4-3	30-44 m 46-48 m 56-74 m 79-89 m	150m (Cuadrado)

Tabla 7. Situación de las rejillas en los sondeos mecánicos donde se han realizado los ensayos de bombeo.

SRM próximos a sondeos mecánicos con datos de ensayo de bombeo han sido medidos con un bucle cuadrado de 150 m de lado, excepto el IV-1-5 que se midió con un bucle en ocho de 75 m de lado, por lo que la profundidad teórica de investigación alcanza los 150 m. El hecho de que los sondeos mecánicos no alcancen esta profundidad, la mayoría se detiene en un paquete margoso alrededor de los 100 m de profundidad que se interpretó en el PIAS como la base del acuífero deltaico, figura 5, hace suponer que se han podido estudiar los dos acuíferos, el aluvial y el deltaico. En el caso del sondeo IV-1-5, el límite margoso se indica hacia los 83 m, por lo que los teóricos 75 m de profundidad de investigación del SRM pueden ser una aceptable información del acuífero. La situación de las rejillas indica que los ensayos de bombeo han

proporcionado un valor de transmisividad que corresponde a la suma de las dos formaciones acuíferas existentes. En este trabajo se han obtenido valores del coeficiente de calibración para el conjunto de los dos acuíferos.

6.3.1 Cálculo del coeficiente de calibración C_T

A partir de las interpretaciones con información a priori efectuadas en los SRM paramétricos se va a proceder al cálculo del coeficiente de calibración C , ver apartado 3.2.

En la tabla 8, se muestran los valores calculados de F_i ($\theta(z).T_1^2$) y C_i (T_{eb}/F_i) para cada uno de los SRM. A partir de ellos se ha calculado el valor del coeficiente de calibración general C_T .

SRM	Teb m2/s	Fi	Ci	FixCi	C_T	Fix C_T	Teb m2/día
iv-1-5	2,40E-05	1053734,77	2,278E-11	2,40E-05	9,22E-10	9,72E-04	2.0736
iv-2-4	6,00E-04	1724269,47	3,741E-10	6,45E-04		1,59E-03	51.84
iv-2-6	6,08E-04	462543,588	1,31E-09	6,08E-04		4,27E-04	52.5312
iv-3-6	8,80E-04	2565519,48	3,274E-10	8,40E-04		2,37E-03	432
iv-4-3	5,00E-03	4958436,99	1,018E-09	5,05E-03		4,57E-03	414.72
iv-2-7	4,80E-03	2150537,11	2,23E-09	4,80E-03		1,98E-03	76.032
$\Sigma Teb =$	1,19E-02						
$\Sigma Fi =$	12915041,42						

Tabla 8. Cálculo de los valores de F_i y de C_i , así como del coeficiente de calibración C_T .

En la figura 17 izquierda, se ha representado la correlación entre el valor de la transmisividad obtenida en los ensayos de bombeo (T_{eb}), y el valor de F_i empleando los valores calculados con información a priori. En el gráfico se observa cómo el valor de transmisividad del sondeo IV-1-5 es extremadamente pequeño, lo que puede tener una influencia negativa en el cálculo final de C_T . El SRM IV-4-3 parece quedar fuera de la alineación que mantienen los otros SRM, pero esto puede ser debido a que se ha llevado la interpretación de este SRM hasta una profundidad de 150 m, mayor que la profundidad alcanzada por el sondeo mecánico. El resto de los SRM mantienen una

alineación que ha permitido obtener un único coeficiente de calibración C_T que será el que se utilice para todo el acuífero, con un valor de 9.22×10^{-10} .

Empleando este valor se han calculado los valores de transmisividad a partir de los valores de SRM, T_{SRM} , para cada uno de los SRM paramétricos, valores que se han correlacionado con los que se tienen procedentes de los ensayos de bombeo, figura 17 derecha. Como se puede observar la correlación es bastante buena, situándose sobre una línea de 45° con la excepción del IV-1-5, que posee una transmisividad excesivamente baja como ya se mencionó antes.

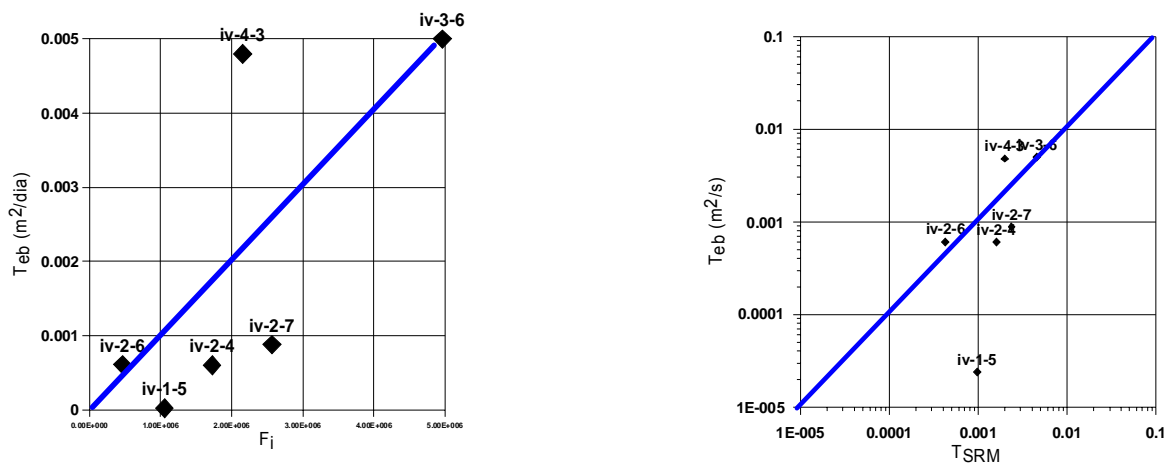


Figura 17. Izquierda: Correlación entre F_i y T_{eb} empleando los valores calculados con la interpretación con información a priori. Derecha: Correlación entre los valores de transmisividad calculados a partir de los valores de SRM y de los procedentes de los ensayos de bombeo.

6.3.3. Cálculo de la transmisividad SRM.

Una vez calculado el valor del coeficiente de calibración se ha introducido en el programa de inversión y se han obtenido los valores de permeabilidad, $k(z)$ en m/s, y de la transmisividad, $T(z)$ en m^2/s , para cada una de las capas en todos los SRM. Los gráficos con estas distribuciones para cada uno de los SRM que forman el perfil P1 se muestran en la figura 18, la transmisividad se representa acumulada.

Todos los gráficos se han representado a la misma escala para poder compararlos. Los gráficos de permeabilidad permiten seguir el acuífero superior aluvial, su muro aproximado se ha representado en la figura, así como apreciar los SRM que muestran

una gran permeabilidad en el acuífero deltaico inferior. Los gráficos de transmisividad acumulada muestran la evolución del acuífero.



Figura 18. En la parte superior se muestran los gráficos de la permeabilidad k (m/s) en función de la profundidad para los SRM del perfil P1. La línea negra representa el muro del acuífero aluvial. En la parte inferior se muestran los gráficos de transmisividad acumulada en función de la profundidad para el mismo perfil.

En el caso de los SRM situados en la zona M1 en la figura 19 se han representado estos mismos gráficos siguiendo la distribución espacial de los SRM.

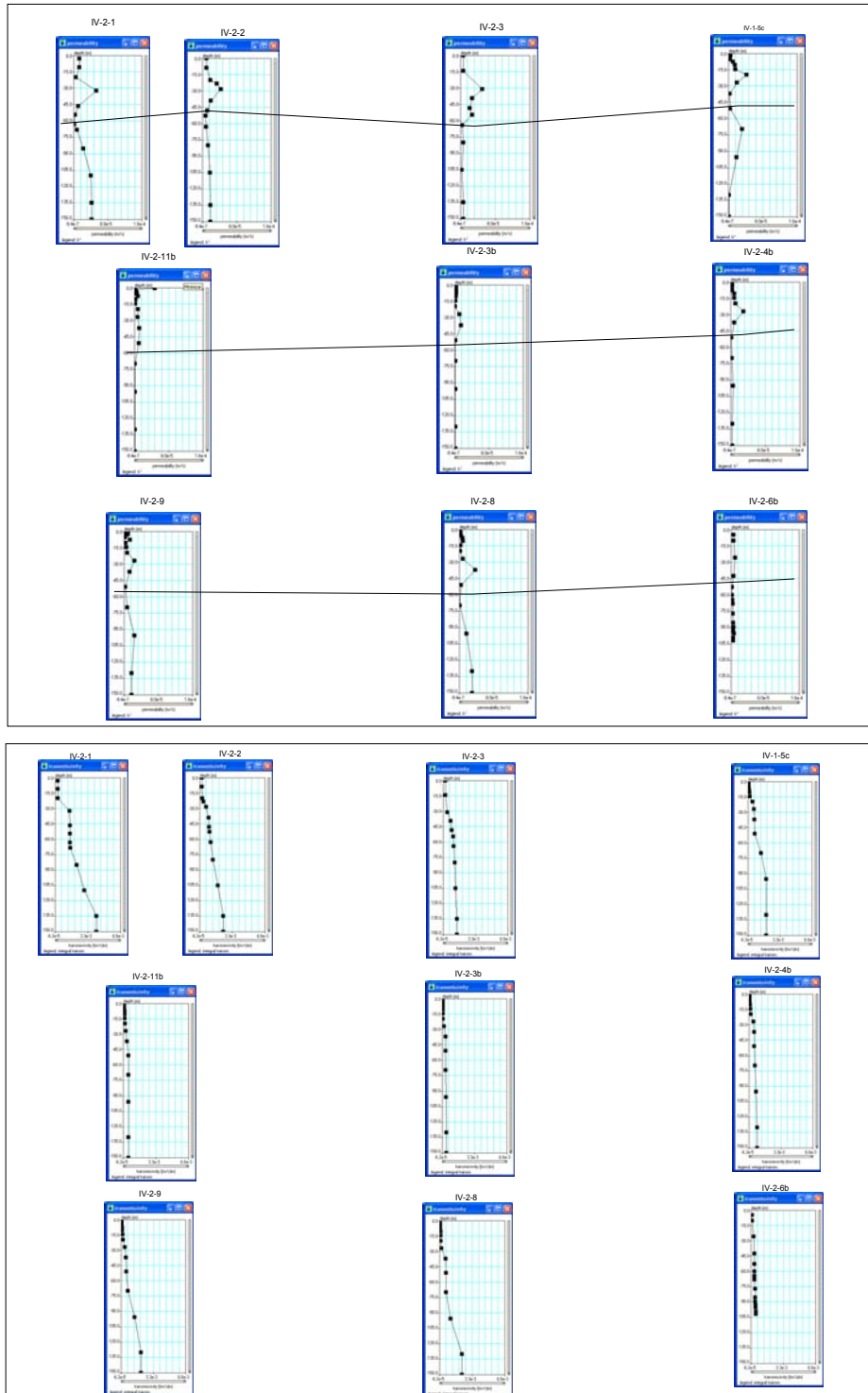


Figura 19. En la parte superior se muestran los gráficos de la permeabilidad k (m/s) en función de la profundidad para los SRM situados en la zona M1. La línea negra representa el muro del acuífero aluvial. En la parte inferior se muestran los gráficos de transmisividad acumulada en función de la profundidad para el mismo perfil. La distribución de los SRM en la figura sigue la distribución espacial de los mismos en el terreno.

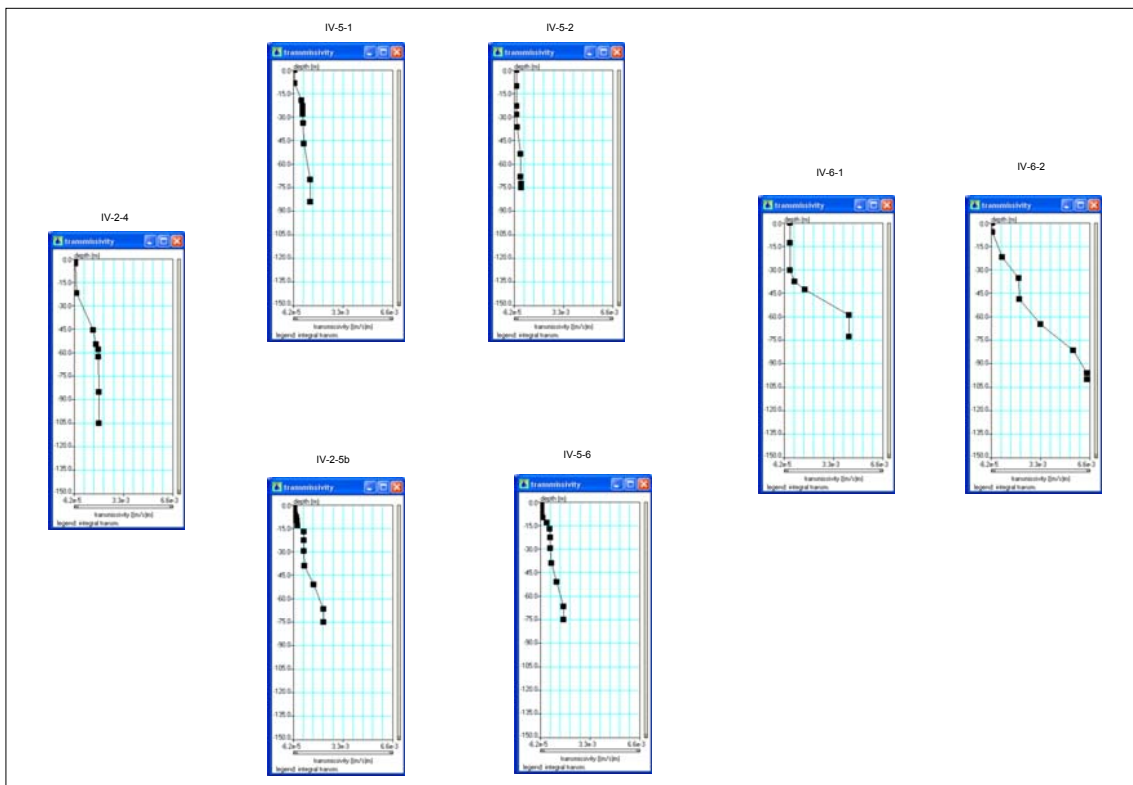
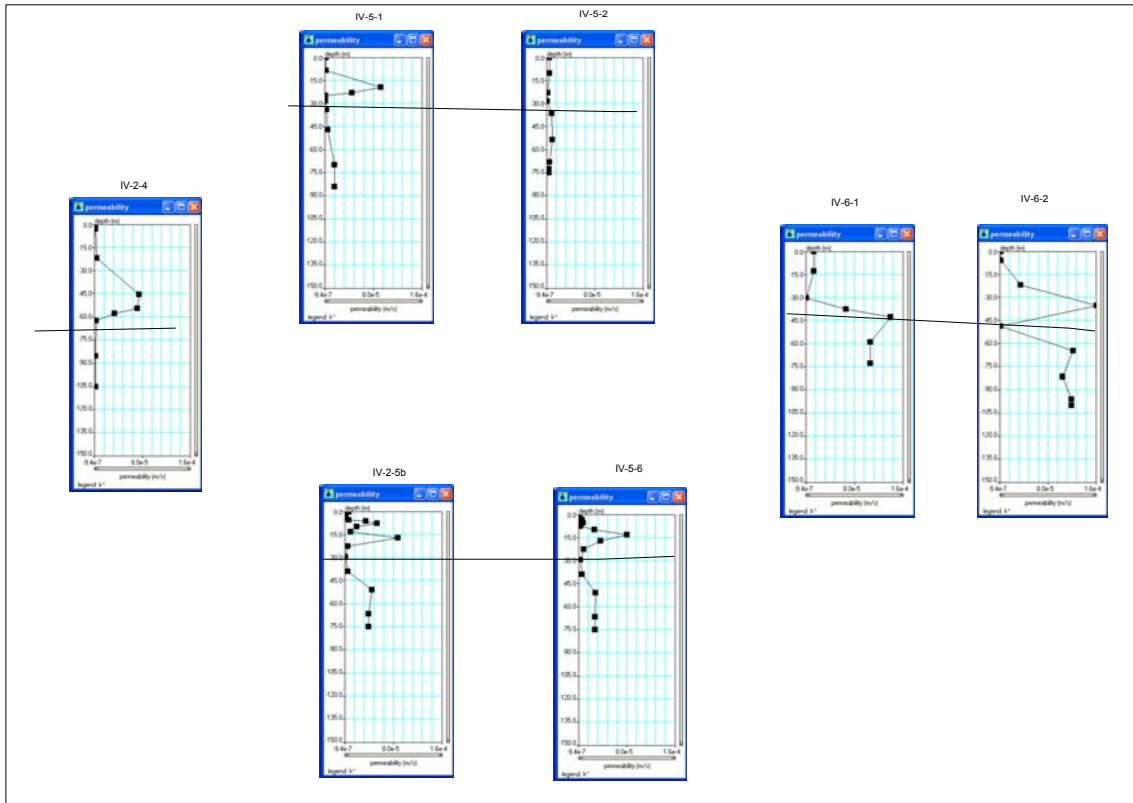


Figura 20. En la parte superior se muestran los gráficos de la permeabilidad k (m/s) en función de la profundidad para los SRM del perfil P2. La línea negra representa el muro del acuífero aluvial. En la parte inferior se muestran los gráficos de transmisividad acumulada en función de la profundidad para el mismo perfil. La distribución de los SRM en la figura sigue la distribución espacial de los mismos en el terreno.

Los mismos gráficos para los SRM del perfil P2 se encuentran en la figura 20.

En la tabla 9 se muestran los valores de la transmisividad T_{SRM} calculada para cada uno de los SRM medidos en el perfil P1 y en la zona M1.

SRM	Bombeo ensayo	Tsrm
iv-1-5	2,40E-05	1,05E-03
iv-1-5b		1,21E-03
iv-1-5c		1,85E-03
iv-2-1		1,98E-03
iv-2-11b		4,70E-04
iv-2-2		2,33E-03
iv-2-3		1,37E-03
iv-2-3b		3,70E-04
iv-2-4b		1,59E-03
iv-2-4	6,00E-04	7,70E-04
iv-2-6b	6,08E-04	4,30E-04
iv-2-7	8,80E-04	2,37E-03
iv-2-7b		2,70E-03
iv-2-7c		4,90E-04
iv-2-8		2,25E-03
iv-2-9		1,99E-03
iv-3-3		4,20E-04
iv-3-3b		4,38E-03
iv-3-6	5,00E-03	4,57E-03
iv-3-6b		3,12E-03
iv-3-6c		3,05E-03
iv-4-3	4,80E-03	1,98E-03

Tabla 9. Valor de la Transmisividad (T_{SRM}) calculada para cada SRM medido en el perfil P1 y en la zona M1, a partir del coeficiente de calibración de la zona.

En la tabla 9, no se han calculado los valores para los SRM situados en el perfil P2; esto ha sido debido a que su profundidad de investigación ha sido menor al emplearse en la mayoría de ellos un bucle más pequeño, por lo que se ha considerado que los SRM en esta zona no han proporcionado información suficiente del acuífero deltaico inferior, y por lo tanto no pueden compararse con el resto de los SRM. No obstante, si se ha introducido este valor en el programa de inversión y se han obtenido curvas de permeabilidad y transmisividad acumulada para estos SRM, que se han representado en la figura 20, esta representación únicamente intenta proporcionar una imagen cualitativa de estos valores en esta zona del acuífero.

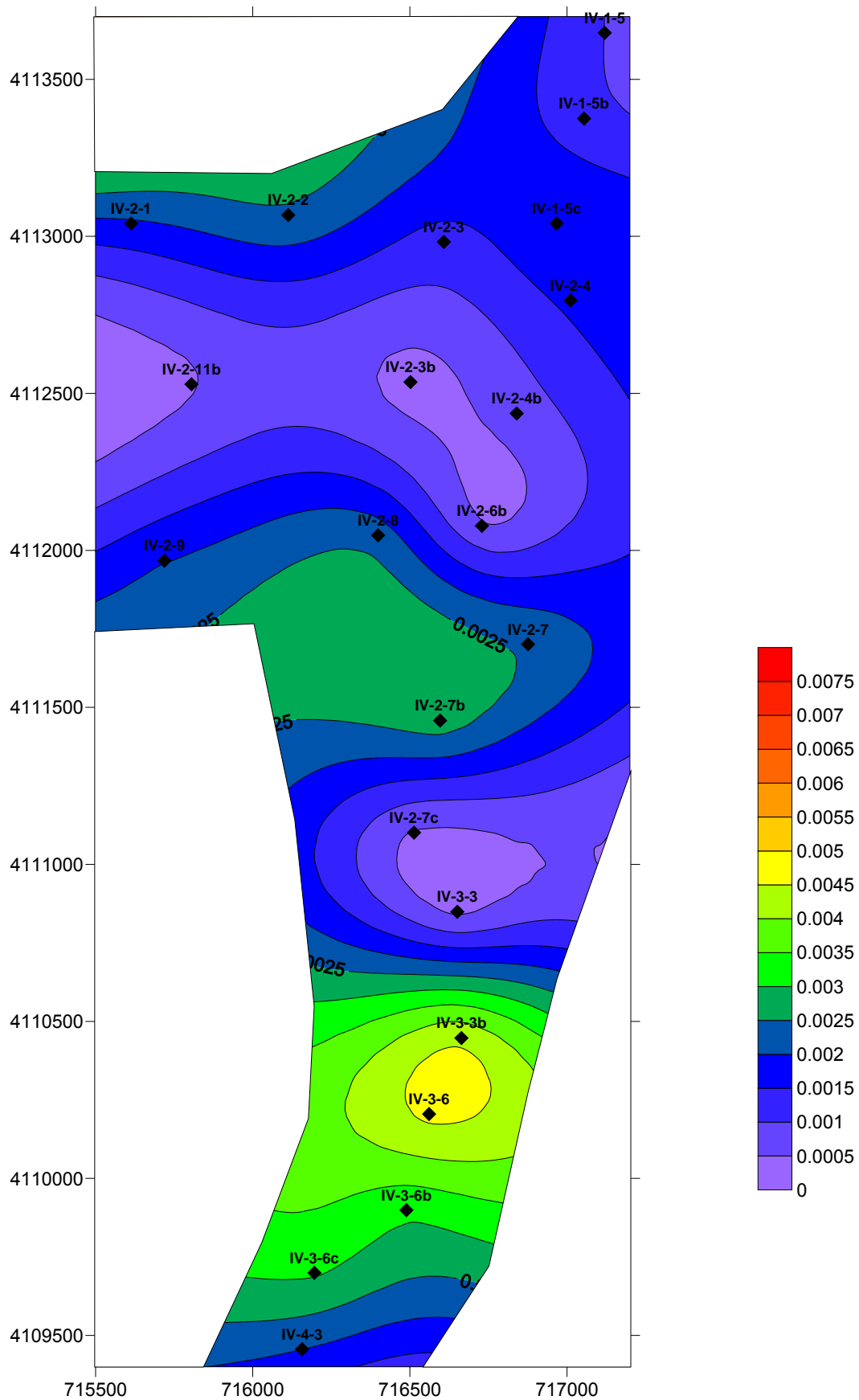


Figura 21. Mapa de isotransmisividades (T_{SRM}) del perfil P1 y de la zona M1. Los valores son en m^2/s

En la figura 210 se muestra el mapa de isotransmisividades (T_{SRM}) calculadas con los datos de SRM y empleando el valor del coeficiente C calculado en este trabajo (tabla 9), de la zona del perfil Norte-Sur y de la pequeña zona que simula una malla. En el se observa la distribución de la transmisividad, con valores mínimos en el centro de la pequeña malla, y en la zona de los SRM IV-2-7c y IV-3-3. Al Sur de estos últimos se observa una zona de máximo, que se cierra en el último SRM (IV-4-3) donde se produce un mínimo.

7.- RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo una campaña de SRM en una zona de ensayo perteneciente al acuífero Almonte-Marismas con el objetivo de obtener parámetros hidrogeológicos del mismo (geometría, presencia de agua, porosidad, transmisividad, etc.), a fin de obtener el modelo hidrogeológico del acuífero.

Los SRM medidos se han distribuido por la zona de la siguiente manera: 15 de ellos formando un perfil de dirección Norte-Sur, perfil P1, de unos 4,5 Km de longitud separados entre si 300 m. Otros 7 SRM medidos al Oeste de los anteriores que junto con algunos del perfil P1 forman una malla cuadrada de unos 500 m de lado, zona M1. Por último 8 SRM medidos hacia el Este del perfil P1, que forman el perfil P2.

La calidad de los SRM medidos en la parte Occidental de la zona es bastante buena, con valores altos de la relación señal ruido, midiéndose casi todos ellos con el tamaño de bucle previsto, cuadrado de 150 m. Sin embargo el aumento de ruido ambiental hacia el Este de la zona ha impedido medir todos los SRM proyectados inicialmente, haciendo necesario emplear bucles en forma de ocho de 75 m de lado para mejorar la relación señal ruido, lo que disminuye la teórica profundidad de investigación.

Con el perfil P1 se ha cartografiado el acuífero superior aluvial, que aumenta de potencia a medida que nos desplazamos hacia el Sur donde alcanza los 80-85m. Es un acuífero heterogéneo formado por alternancias de tramos más o menos permeables, que en conjunto posee un valor promedio de porosidad del 10-12 %. No se ha podido definir la geometría del acuífero inferior deltaico, ya que su espesor supera el límite de

resolución del método con el bucle empleado. El contenido en agua de este acuífero se ha mostrado variable, no mucha en algunos de ellos y una gran cantidad en otros.

Para la zona M1 se ha cartografiado también el acuífero superior aluvial, con las mismas características que las descritas para el perfil P1. En la parte central del lado Norte de esta malla es donde ha resultado más difícil definir el muro del acuífero superior y el techo del deltaico, mientras que en el resto la transición viene determinada por la presencia de un tramo poco permeable y escasa porosidad.

En el perfil P2 se ha apreciado una menor potencia del acuífero superior aluvial, y con una separación más clara entre el acuífero superior y el inferior. La porosidad en general es alta para este acuífero superior. Para el inferior se aprecia la presencia de agua en todos los SRM en materiales de alta permeabilidad, aunque dada la profundidad de investigación alcanzada en casi todos los SRM no se puede definir bien la geometría del mismo.

Se puede decir que los SRM han definido bien la geometría del acuífero superior aluvial en la zona de trabajo, formado en general por una alternancia de niveles de diferente permeabilidad y una porosidad promedio del 10-12 %, alcanzando en algún SRM el valor del 24 %. La potencia de este acuífero aumenta hacia el Sur y se mantiene hacia el Este. Con respecto al acuífero inferior, los SRM indican la presencia de agua en casi todos ellos; ahora bien, la profundidad de investigación de los SRM, función del bucle de medida empleado, y la propia resolución del método, no ha permitido obtener una información precisa de este acuífero inferior.

A partir de los datos de ensayo de bombeo de algunos sondeos mecánicos se ha podido establecer un coeficiente de calibración $C_T = 9.22 \times 10^{-10}$ para esta zona. Este coeficiente permite obtener valores de permeabilidad y transmisividad de las capas a partir de datos procedentes de la interpretación de SRM y por tanto extender esta información por toda la zona sin necesidad de nuevos ensayos de bombeo.

Los gráficos de permeabilidad han permitido definir el acuífero superior aluvial, así como apreciar los SRM que muestran una gran permeabilidad en el acuífero deltaico inferior. Los gráficos de transmisividad acumulada muestran la evolución del acuífero.

Se ha procedido a calcular el valor de la transmisividad para cada uno de los SRM medidos en el perfil P1 y en la zona M1. Con los valores calculados se ha confeccionado un mapa de iso-transmisividades de esta zona, que muestra una distribución homogénea de la transmisividad alterada por la presencia de unos mínimos en el centro de la pequeña malla y al Sur de la misma. El mayor máximo se sitúa al Sur del perfil P1.

Se han cumplido los objetivos generales de este trabajo, demostrando que los SRM permiten obtener valores de parámetros hidrogeológicos de una manera menos invasiva y costosa que los ensayos de bombeo en acuíferos donde este método pueda ser aplicado y que estos valores pueden ser útiles para el establecimiento de modelos hidrogeológicos.

Tres Cantos

Noviembre de 2007

Fdo. Félix Rubio