

Nueva campaña geofísica en el acuífero aluvial del río Verde (Almuñecar, Granada)

F. M. Rubio y J. L. Plata

Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas 23, 28003 Madrid
e-mails: fm.rubio@igme.es - jl.plata@igme.es

RESUMEN

La revisión de la información geoelectrica existente en la vega del río Verde en las proximidades de Almuñecar (Granada), realizada con objeto de verificar su utilidad para contrastar los nuevos valores tomados con un equipo de prospección magnetotélurica tensorial de alta resolución (ENVIRO-MT), puso de manifiesto que la interpretación dada a los SEVs efectuados en 1977 no se correspondía con la situación real, conocida posteriormente mediante la realización de sondeos mecánicos. Al no disponer de los datos de campo originales de la campaña geofísica para proceder a su reinterpretación, en el año 1998 se realizó una nueva campaña de SEVs. La metodología seguida para la interpretación de estos SEVs tiene cuatro etapas. En primer lugar, por agrupación de las curvas de campo en familias de similar morfología, se ha dividido el área estudiada en zonas de comportamiento geoelectrico análogo, lo que sirve de buena orientación para su posterior interpretación en términos hidrogeológicos. En segundo lugar, a partir de SEVs paramétricos (realizados junto a sondeos mecánicos) se ha asignado a cada litología un rango de valores de resistividad. Posteriormente, se ha extendido el modelo geoelectrico al resto de los SEVs efectuados en esta campaña, y por correlación se ha procedido al trazado de cortes de resistividades con significación geológica. Se ha puesto así de manifiesto que en una zona como la estudiada, donde la información litológica es abundante, la realización de unos pocos SEVs permite el establecimiento de la morfología del acuífero con gran detalle, identificándose la posición de posibles paleocauces y definiendo con precisión la evolución del espesor total de sedimentos.

Palabras clave: Geofísica, interpretación geoelectrica, resistividad, río Verde, SEV, Sondeo Eléctrico Vertical

New geophysical survey at the río Verde aluvial aquifer (Almuñecar, Granada)

ABSTRACT

A revision of the available geoelectric information about the río Verde basin in an area close to Almuñecar (Granada) has been carried out in order to verify its utility to assess the values measured with a new tensor magnetotelluric high resolution instrument (ENVIRO-MT). We detected that the interpretation given to the VESs measured in 1977 was not in correspondence with the geological information attained by boreholes drilled after the geophysical survey. As the field data of that survey were not available for reinterpretation, a new VESs survey was undertaken in 1998. The methodology we have followed to interpret the new data has four stages: first, the field curves have been grouped by families according to its morphology, giving rise to the division of the area in different zones of similar geoelectric behaviour, as a help for its further geological interpretation. The second stage has been to establish a range of resistivities for the different lithological beds by controlled interpretation of several VESs executed very close to drill holes. Afterwards, these values have been established for the rest of the VESs, and geoelectric profiles have been drawn by correlation of the resistivity values. This methodology has shown that in cases like this one, where there is quite a lot of geological information, the measurement of a few VESs allows to establish a detailed image of the aquifer morphology, identifying the position of possible paleochannels, and the evolution of the total depth of sediments in the area.

Key words: geoelectrical interpretation, Geophysics, resistivity, río Verde, Vertical Electrical Sounding, VES

Introducción

El acuífero aluvial de la Vega del río Verde se encuentra en el sur de la provincia de Granada. Su cuenca hidrográfica, con un desnivel de más de 1700 m, tiene una extensión de unos 100 km². Los depósitos aluviales se sitúan en un cerrado valle, con anchura inferior a 200 m en el norte, a la altura de Jete, abriéndose en

el sur, donde alcanza más de 1000 m. Los trabajos descritos en este artículo se han llevado a cabo en una zona de unos 1.5 km² situada en el sur, junto a la localidad de Almuñecar (figura 1), donde la vega, encajada entre los afloramientos del basamento, presenta un suave desnivel, subiendo desde la costa hasta alcanzar 25 m en el norte de la zona estudiada. El terreno está totalmente cubierto de plantaciones,

principalmente de chirimoyas, lo que constituye una especial dificultad logística para la realización de trabajos geofísicos de superficie, sobre todo en lo referente a la elección de la orientación de las alas y a la extensión de grandes longitudes de cable.

El acuífero es libre o semiconfinado, siendo el curso superficial del río Verde perdedor al alimentar al acuífero (Benavente *et al.*, 1982). Geológicamente el sector de Almuñecar se encuentra dentro de las zonas internas de las Cordilleras Béticas, en el complejo Alpujárride. Los depósitos aluviales, constituidos por gravas, limos y arenas, reposan en el área estudiada sobre un substrato paleozoico impermeable formado por esquistos oscuros y cuarcitas del Manto de Salobreña, aunque en el borde suroriental afloran los esquistos grises biotíticos del Manto de la Herradura, desconociéndose la conexión entre ambos Mantos bajo el aluvial.

El agua se utiliza tanto para abastecimiento urbano como agrícola. Durante los meses de mayo a septiembre coincide la necesidad de bombear agua para los cultivos del aguacate y del chirimoyo con el máximo consumo del núcleo urbano, dado el carácter veraniego de esta población, por lo que en épocas de estiaje tiene lugar intrusión de agua marina en el acuífero. Esta salinización en años de sequía, hasta ahora se ve recuperada en época de lluvias (Carrasco Cantos *et al.*, 2000. Fernández Rubio *et al.*, 1982).

Debido a la importancia que tiene este acuífero para la economía de la región, ha sido estudiado desde hace muchos años a fin de conocer en detalle su morfología y poder controlar adecuadamente los efectos de la invasión salina. Sus condiciones y la existencia de estos estudios previos es la razón por la que el acuífero fue elegido como zona de ensayo dentro del proyecto de transferencia tecnológica de la Unión Europea ENVIRO-MT, N° IN100480I (Plata, 2000), en el que participa el IGME. Este Proyecto tiene por objetivo el diseño y construcción de un nuevo instrumento para realizar mediciones magnetoteléuricas tensoriales de alta resolución en profundidades comprendidas entre 20 m y 200 m. Además de emisoras de radio en la banda de 10 kHz a 250 kHz, utiliza una fuente propia, formada por dos antenas verticales ortogonales entre sí, para la banda de frecuencias de 1 kHz a 25 kHz. El dispositivo de medición está formado por dos juegos perpendiculares de electrodos separados 5 m y un pequeño magnetómetro de tres componentes, por lo que es idóneo para trabajar en zonas con dificultades logísticas para la extensión de cables de mayores dimensiones.

Al analizar la información disponible sobre esta zona del acuífero se observaron ciertas discrepancias entre las diversas fuentes consultadas, por lo que se

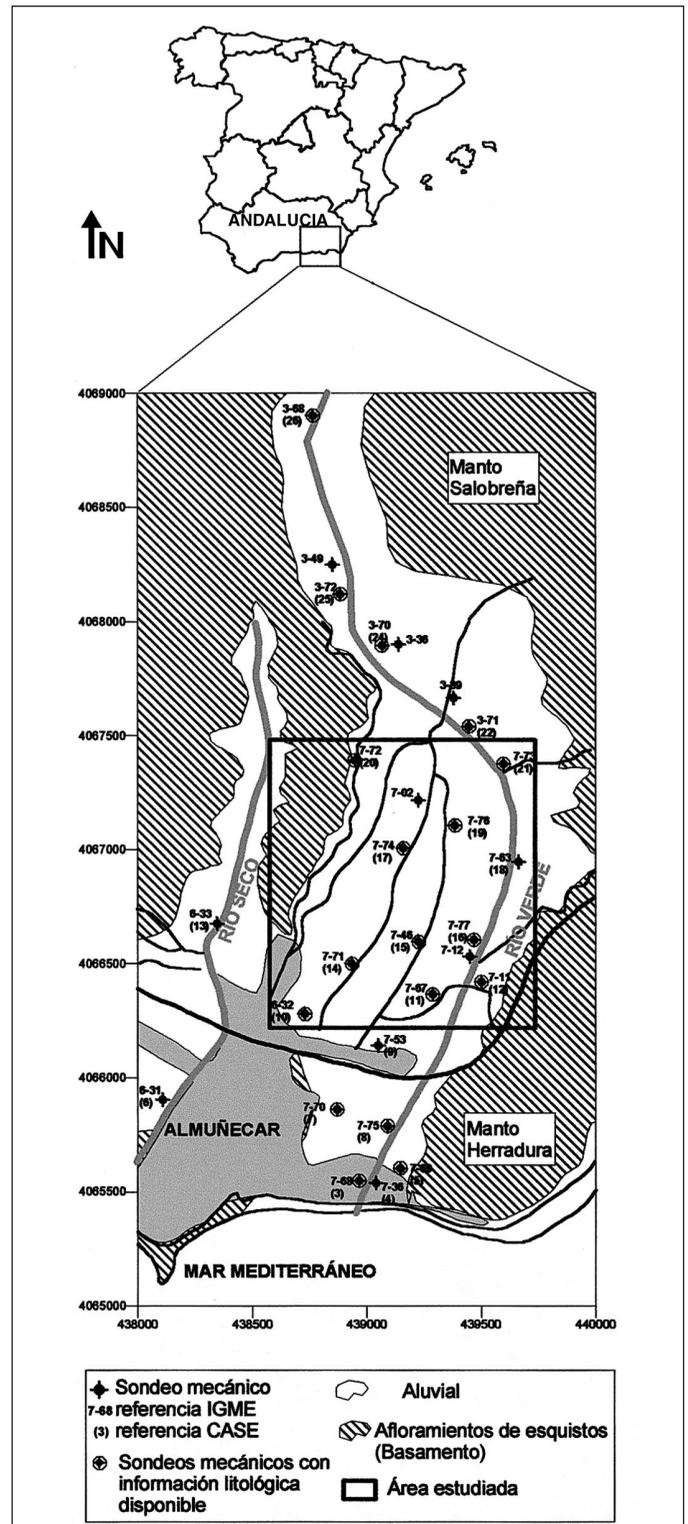


Fig. 1. Mapa de situación y geología de superficie de la porción sur del Acuífero del río Verde, con indicación de la zona estudiada en este trabajo y posición de los sondeos mecánicos existentes. Coordenadas UTM

Fig. 1. Geographical and geological map of the southern part of the Almuñecar aquifer, with the situation of the surveyed area and drill holes. UTM co-ordinates

llevó a cabo una revisión de los datos y se efectuó una nueva campaña geofísica con el objetivo de determinar de una manera más inequívoca la morfología del acuífero y su respuesta geoelectrónica, antes de utilizarla como base para la verificación de la metodología magnetotelúrica empleada en el nuevo Proyecto. Los datos analizados en este trabajo son una campaña de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) realizada en 1977, una campaña de SEVs realizada en 1998 y una serie de los sondeos mecánicos realizados por la Comisaría de Aguas del Sur (CASE) en 1984 de los que se dispone de información litológica.

Antecedentes geológicos y geofísicos analizados

Con el fin de establecer la distribución y litología de los diferentes sedimentos que constituyen el acuífero, en el año 1977 se llevó a cabo una campaña de 33 Sondeos Eléctricos Verticales (IGME, 1987), 18 de los cuales se encuentran dentro del área aquí comentada, con una distancia media de 400 m entre SEV. Estos sondeos fueron interpretados según los medios y conocimientos de la geología de la región de que entonces se disponía. En la figura 2 se representa uno de los perfiles geoelectrónicos obtenidos, que pasa junto a los sondeos mecánicos 7-74 y 7-71 (figura 1), realizados posteriormente, y que se incluyen aquí a efectos comparativos. La morfología del acuífero representada en este corte es análoga a la obtenida en los demás perfiles geoelectrónicos realizados en la

zona durante esa campaña, indicando una secuencia de capas homogéneas en toda la vega, aunque para ello se hayan correlacionado valores bastante dispares de resistividad. La interpretación muestra que bajo un recubrimiento superficial de tipo limoso con una resistividad comprendida entre 30 ohm.m y 140 ohm.m (entre 32 ohm.m y 50 ohm.m en el perfil de la fig. 2) y espesor variable entre 0 y 10 metros, se sitúa una capa resistiva, con valores entre 150 ohm.m y 1500 ohm.m (entre 170 ohm.m y 750 ohm.m en la fig. 2), atribuida a materiales detríticos gruesos con una potencia de 20 a 30 metros en la parte norte y entre 10 y 40 metros en el sur, junto a la costa. Bajo esta capa se encuentra otra menos resistiva (entre 50 ohm.m y 700 ohm.m para toda la zona y entre 50 ohm.m y 250 ohm.m en la fig. 2), considerada de materiales de grano más fino y de unos 40 metros de potencia, reposando directamente sobre el resistivo paleozoico, y que se acuña antes de llegar a la costa, lo que permite situar antes del substrato un material más conductor en la parte sur del acuífero. Las columnas litológicas de los sondeos mecánicos, realizados posteriormente, presentan, como puede apreciarse en el ejemplo indicado en la figura 2, una gran discrepancia entre el corte interpretado y la situación geológica real, siendo especialmente llamativa la diferencia en cuanto al espesor del recubrimiento aluvial. Al carecer de los datos de campo de esta campaña resulta imposible efectuar una reinterpretación de estos SEV utilizando el conocimiento actual de espesores.

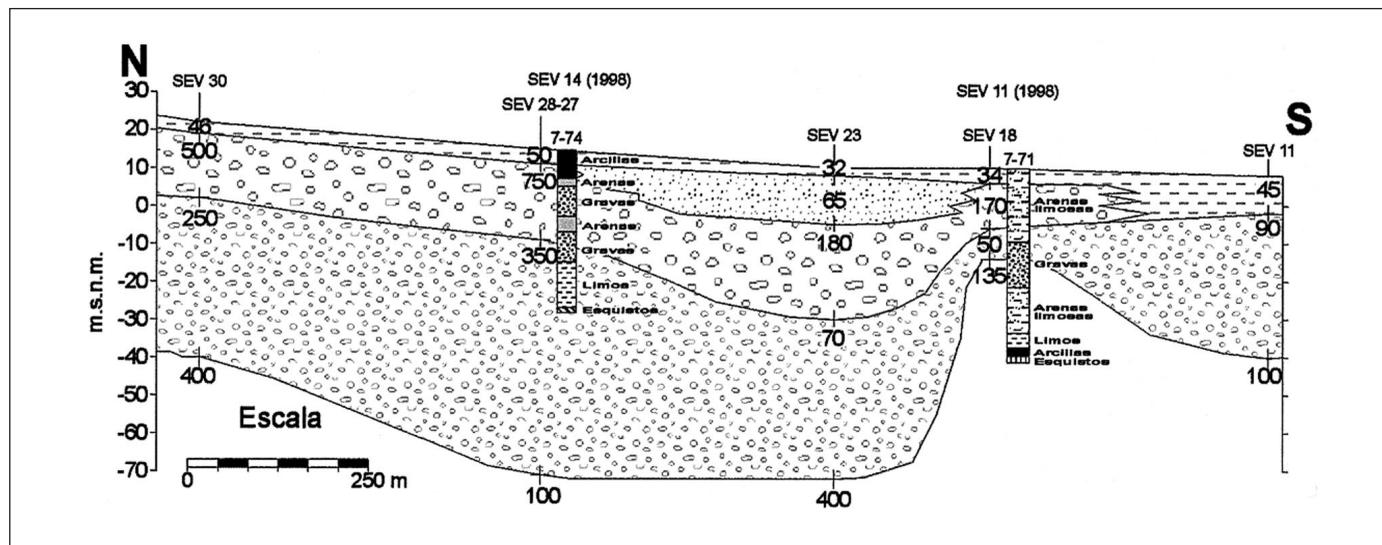


Fig. 2. Corte geoelectrónico obtenido en 1977. Su situación en la zona puede verse en la figura 1 por la posición de los sondeos mecánicos 7-74 y 7-71, efectuados en 1984. Se indica también los SEVs realizados en los mismos emplazamientos en la campaña geofísica de 1998
 Fig. 2. Geoelectrical section measured in 1977. Its situation within the area can be seen in figure 1 according to the position of drill holes 7-74 and 7-71, drilled in 1984. The number of the VESs measured in 1998 at the same site is also indicated

En la zona contemplada existen, entre otros muchos, más de quince sondeos mecánicos (figura 1) realizados en su mayoría por la Comisaría de Aguas del Sur (CASE) en 1984, de los que se ha dispuesto de información litológica, y que se utilizan como puntos de control del acuífero. Esta densidad de sondeos debería, en principio, permitir tener un conocimiento suficiente de la morfología del acuífero. Así, los cortes geológicos publicados (Calvache y Benavente, 1988) están apoyados, para el sector aquí comentado, con datos procedentes de las columnas de cinco sondeos mecánicos: los números CASE 22, 17 y 9 para un corte longitudinal y los 14 y 16 en sentido transversal (figura 1), presentando una secuencia formada por una capa superficial, de unos dos o tres metros de potencia de materiales con predominio de limos y arenas finas, bajo la que se sitúan arenas medias y, finalmente, antes de llegar a los esquistos del substrato, aparecen de nuevo unos diez metros de limos y arenas finas; esta secuencia, interpretada como homogénea en sentido tanto transversal como longitudinal, es interrumpida por lentejones de arenas gruesas y gravas de hasta más de 20 m de potencia, con gran continuidad longitudinal, pero que no ocupan todo el ancho del acuífero, pudiendo ser desde aflorantes a localizarse sólo en profundidad. La existencia de estos niveles de granulometría relativamente más gruesa que la de su entorno, podría reflejar la existencia de paleocauces que constituyan vías de circulación subterránea preferencial, cuya localización ha sido determinada en superficie mediante fotografía aérea (Fernández Rubio *et al.*, 1988) y confirmada por criterios hidrodinámicos e hidroquímicos, siendo de gran interés poder cartografiarla en el subsuelo. Aunque esta morfología del acuífero es en grandes rasgos cualitativamente igual a la reflejada por la campaña de SEVs anteriormente descrita, las potencias de las capas de los cortes geológicos son más fiables, al menos en lo que se refiere al espesor total de sedimentos, ya que están ajustadas, obviamente, a las dadas por los sondeos mecánicos.

Frente a esta situación esquemática general, un intento de correlación de más detalle entre las columnas de los sondeos mecánicos, considerando la totalidad de los disponibles actualmente, nos muestra una cuenca bastante más heterogénea en ambas direcciones (Rubio *et al.*, 1998), con cambios litológicos frecuentes entre arenas, gravas y limos, a veces con predominio de intercalaciones de materiales finos en el sector más próximo al borde costero, todo lo cual dificulta su seguimiento. Esta dificultad se ve acrecentada por el hecho de que algunas descripciones de las columnas son muy ambiguas, al basarse solamente en datos suministrados por el sondista, a

que a lo largo del tiempo no se ha seguido una clasificación litológica sistemática, y a que parte de los datos no son localizables, todo lo cual obliga a mantener en ocasiones una cierta reserva sobre la información geológica obtenida a partir de los sondeos mecánicos.

En estas condiciones, el dato más fiable suministrado por esta importante fuente de información geológica es la potencia de sedimentos encontrada, reflejada en la figura 3a. A partir de los afloramientos paleozoicos el basamento se hunde bruscamente hacia el centro de la vega, alcanzándose una potencia máxima de 55 m de sedimentos junto a los sondeos 7-46 y 7-67; esta cubeta se prolonga, cerrándose, en dirección norte, alcanzando unos 45 m de potencia junto a los sondeos 7-76 y 3-71, no coincidiendo por tanto su trazado con el actual cauce del río Verde. Hacia el sudeste, se aprecia la brusca elevación del basamento formado por materiales del Manto de la Herradura, cerrando la cubeta, que pudiera continuar, no obstante, abriéndose hacia la costa.

Nuevos trabajos geofísicos

Para poder usar esta información como referencia con la que contrastar y validar la obtenida con una nueva metodología geofísica, era necesario actualizar los datos geoeléctricos y obtener una definición de más detalle de la Vega del río Verde. Para ello se planificó en 1998 una nueva campaña de 15 sondeos eléctricos verticales y un perfil eléctrico continuo de resistividad y polarización inducida. Los SEVs fueron realizados con un dispositivo Schlumberger de AB variable entre 400 m y 900 m, para poder alcanzar el substrato en todos los casos. En la tabla I se encuentran recogidos los valores de AB y el azimut de las alas utilizado en cada uno de los SEV medidos, cuya posición se indica en la figura 4. Los SEVs fueron medidos con un instrumento Syscal R2 de IRIS Instruments e interpretados mediante el programa de interpretación semiautomática RESIXIP de Interpex.

Interpretación cualitativa de las curvas de los nuevos SEVs medidos

Todas las curvas de campo (valores de resistividad aparente frente a semilongitud del dispositivo ó AB/2) de los SEVs realizados tienen una morfología bastante similar, perteneciendo al tipo KH (conductor-resistivo-conductor-resistivo), que se adapta bien a la secuencia litológica general anteriormente descrita. Esta morfología se ve sin embargo modificada, de forma a veces importante, por la potencia de los

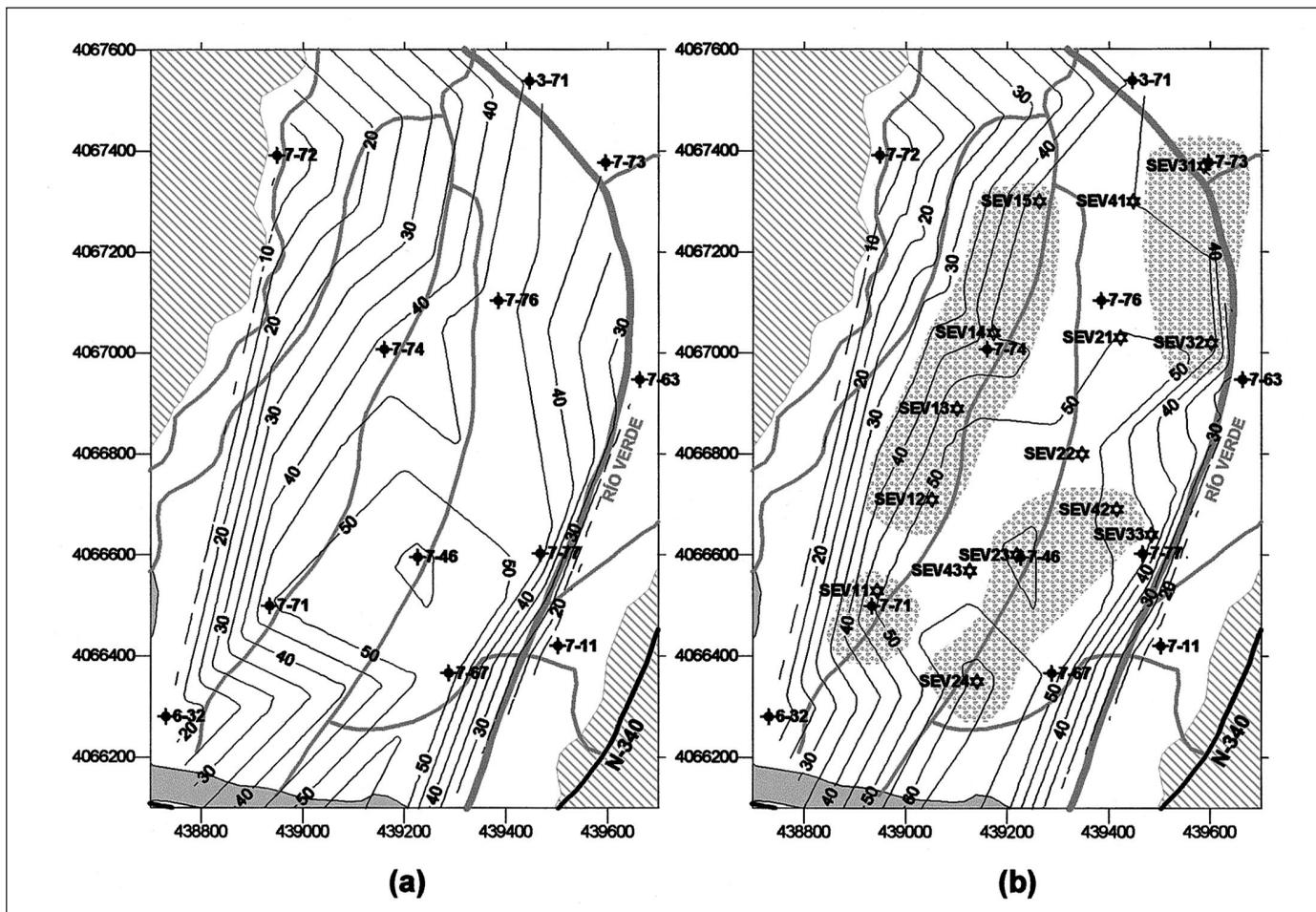


Fig. 3. Mapa de isovalores de potencia de sedimentos en el área estudiada, obtenido solamente a partir de los sondeos mecánicos (a) y obtenido añadiendo la información suministrada por la interpretación de los SEVs realizados en 1998 (b). Las zonas sombreadas del mapa (b) indican la posición de las intercalaciones de gravas, deducida por los valores de resistividad de los tramos geoelectrónicos
 Fig. 3. Map of the thickness of sediments in the area, drawn after the lithological data from the drill holes (a) and drawn adding the information attained with the VESs measured in 1998 (b). The shadowed zones in the map (b) indicate the situation of the gravel, deduced from the resistivity values of the geoelectrical layers

SEV	11	12	13	14	14b	15	21	22	23	24	31	32	33	41	42	43
AB (metros)	400	400	500	500	400	640	500	640	500	500	640	500	500	900	800	640
AZIMUT (grados)	35	30	30	33	123	53	30	21	30	30	160	0	28	25	25	23

Tabla I. Longitud (AB) y dirección (AZIMUT) de extensión del dispositivo utilizado en la medición de los SEVs
 Tabla I. Length and strike of the array used in the VESs. The strike is always referred to the North

diversos tramos y por la resistividad de los primeros metros del subsuelo, que oscila entre 38 ohm.m y 86 ohm.m, alcanzando puntualmente 346 ohm.m.

Mediante la comparación de la forma cualitativa de las curvas de campo, estas se han agrupado en familias, obteniéndose cuatro tipos de curvas, cuya distribución por la zona se representa en la fig. 4. La ayuda que aporta este método de agrupaciones de

los SEVs para realizar una interpretación de los mismos con mayor significado geológico, resulta evidente por el hecho de que todas las familias tienen orientación norte-sur, es decir, permite distribuir el área estudiada en diferentes condiciones de sedimentación, reflejadas en su manifestación geoelectrónica. La primera familia es la formada por los SEVs 31, 32, 33, 42, 23 y 24, situados en el este de la cuenca, cuya

curva tipo (para el SEV 32) se ha representado en la figura 5; en esta zona el recubrimiento superficial conductor es de menor potencia que en otras zonas y los materiales resistivos, tipo arenas y gravas, alcanzan su mayor potencia, siendo además posible su desdoblamiento en dos capas resistivas. La familia situada más hacia el centro de la vega se compone de los SEVs 22, 21 y 41, cuya curva tipo está representada en la figura 5 para el SEV 21. Se detecta la presencia de un tramo conductor superficial de mayor potencia que en la familia anterior, así como la menor potencia de la capa resistiva, que aparece además más homogénea que en el este, aunque aumentando su potencia en los SEVs realizados en el norte. En la parte central del sur-oeste del área se sitúa la familia formada por los SEVs 13, 12, y 43, con curva tipo representada en la figura 5 para el SEV 13, que refleja un aumento todavía mayor de la potencia del conductor superficial, mientras que disminuye la potencia de la capa intermedia, que es además de menor resistividad. Finalmente, los SEVs 11, 14 y 15, localizados al oeste de la cuenca, presentan las curvas de mayor dificultad de interpretación cualitativa (en la figura 5 se puede ver la curva tipo para el SEV 11), pudiendo ser debido a un todavía mayor desarrollo de la capa conductora superficial. Esta distribución de las curvas de los SEVs parece por tanto estar indicando una disminución desde el oeste hacia el este de la potencia de la capa conductora más superficial, que pasa a ser resistiva en el este; un aumento en esta misma dirección de la potencia de la siguiente capa o conjunto de capas resistivas, pudiendo diferenciarse la existencia de varios tramos resistivos en el este, a medida que nos aproximamos al cauce del río. La situación de estas familias reflejada en la figura 4 es por tanto de una mayor continuidad u homogeneidad de las capas en sentido norte-sur, con una clara heterogeneidad en sentido transversal a la vega.

Identificación de capas geoelectricas en los SEVs paramétricos

Seis de los SEVs de esta nueva campaña se han medido junto a sondeos mecánicos para correlacionar la información geoelectrica con las columnas litológicas. A 30 m del sondeo mecánico 7-71, que es de los que se dispone de una información más fiable, se ha realizado el SEV número 11, para el que ha sido posible encontrar una solución de interpretación según la secuencia siguiente (figura 6): un primer tramo conductor de 29 ohm.m, asimilado a las arenas limosas; a continuación el tramo de gravas se corresponde con una capa resistiva de 84 ohm.m; la colum-

na del sondeo mecánico continúa con una alternancia de arenas limosas, limos y arcillas que se interpreta en el SEV como un tramo único conductor de 10 ohm.m. Por último, se localiza un tramo resistivo que se corresponde con los esquistos del substrato, localizados geoelectricamente unos 5 m más profundos

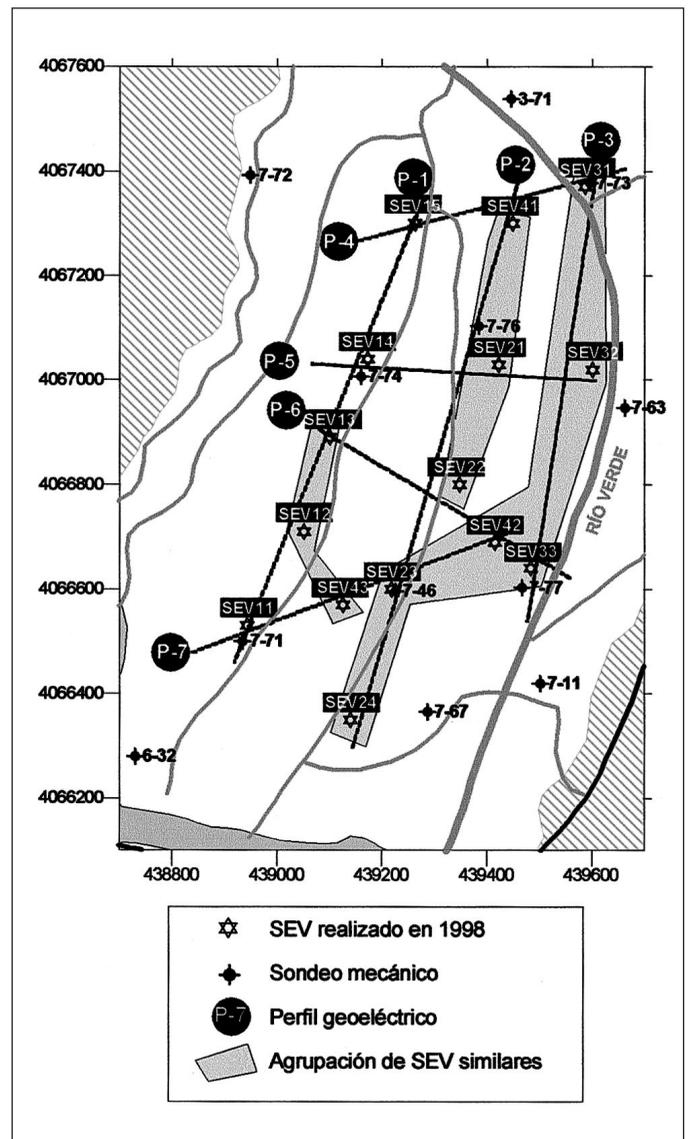


Fig. 4. Mapa de posición de los SEVs realizados en 1998, con indicación de los perfiles geoelectricos presentados en las figuras 8 y 9. Las zonas sombreadas muestran las agrupaciones o familias de los SEVs que tienen su curva de campo con la misma morfología, indicando de forma cualitativa situaciones geoelectricas muy similares
 Fig. 4. Position map of the VESs measured in 1998, with situation of the geoelectrical profiles shown in figures 8 and 9. The shadowed zones indicate the grouping of VESs with field curves of similar characteristics, and are a qualitative hint of the position of the areas with the same geoelectrical distribution of layers

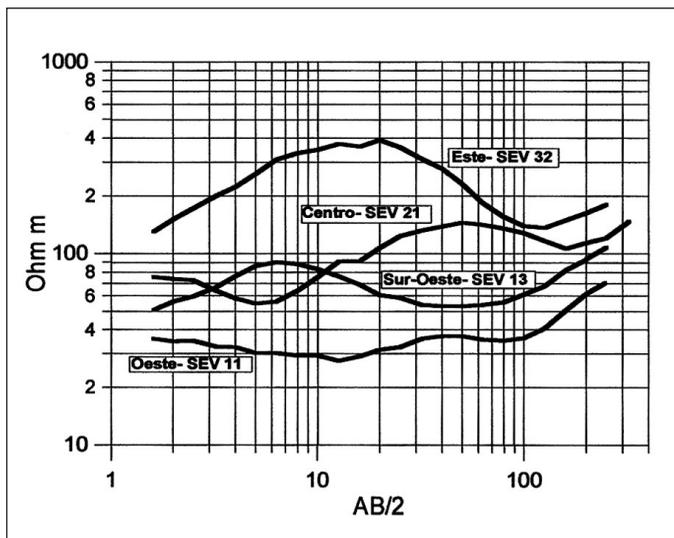


Fig. 5. Curvas tipo para cada una de las familias de SEVs indicadas en la figura 4

Fig. 5. Representative field curves for any of the groups of VESs indicated in figure 4

que en el sondeo mecánico, lo que puede estar justificado tanto por la distancia entre ambos datos y el alto gradiente que la topografía del basamento tiene en este lugar (figura 3 a), como por la posible existencia de un tramo de esquistos descompuestos antes de entrar en el basamento compacto, que es el que se comporta como más resistivo y, por tanto, el localizado en los SEVs. Junto a este sondeo también se localiza el SEV 18 de la campaña de 1977, para el que la profundidad del substrato fue interpretada a menos de la mitad de la realmente existente (figura 2). De entre las diversas soluciones equivalentes para la interpretación del SEV 11, en la figura 6 se da una que sitúa el resistivo final a una profundidad más parecida a la interpretada en 1977. Las curvas teóricas de ambas soluciones están dentro de los límites de cálculo admisibles, por lo que desde el punto de vista exclusivamente numérico ambas son igualmente posibles.

A 45 m al norte del sondeo mecánico 7-74 se encuentran el SEV 14 actual y el SEV 28 de la campaña de 1977; en la figura 6 se muestra la solución de interpretación que mejor se adapta a la columna litológica sin producir un exceso de capas geoelectricas: el primer tramo conductor, de 37 ohm.m incluye, además de las arcillas, parte de arenas y gravas; el siguiente tramo, resistivo de 274 ohm.m, se ajusta aceptablemente a la presencia de las gravas, y la siguiente capa conductora, de 31 ohm.m, engloba a gravas y arenas además del paquete de limos. Igual que en el caso

anterior, se demuestra que también la interpretación dada en 1977 es una de las posibles soluciones equivalentes, y que sólo el conocimiento de la situación geológica real actualmente disponible ha permitido una mejor interpretación de los datos geoelectricos.

Para observar el efecto que la orientación de las alas tiene en la interpretación de los SEVs, se intentó medir con dos orientaciones perpendiculares entre sí, lo que no siempre fue posible debido a las dificultades logísticas del área. En la figura 7 se representan las dos curvas obtenidas y sus interpretaciones para el SEV 14, apreciándose que las variaciones son mínimas, lo que muestra que, al menos en este caso, la orientación de las alas no produce un efecto significativo en la interpretación del SEV.

La interpretación del resto de los SEVs paramétricos es la reflejada en los cortes de las figuras 8 y 9. Así, para el SEV 21, efectuado a unos 80 m al sur del sondeo 7-76, el primer tramo de limos arenosos se ajusta bien a la potencia de un tramo de 45 ohm.m, las arenas posteriores a una capa de 464 ohm.m, pero la siguiente secuencia litológica formada por arenas de diversa granulometría y limos se manifiesta geoelectricamente como una sola capa de 35 ohm.m. En los sondeos 7-73 y 7-77, situados al este de la zona, el tramo superior conductor en los respectivos SEVs paramétricos 31 y 33 es de poca potencia, sin verse reflejado en la columna litológica.

Para el conjunto de los sondeos paramétricos realizados, se han podido encontrar soluciones que satisfagan la información litológica manteniendo un número de capas geoelectricas razonable, lo que en algunos casos requiere la agrupación de varios tramos litológicos en una sola capa geoelectrica, bien porque no presentan contraste significativo en sus resistividades o bien porque la potencia de alguna de sus capas no es suficiente para manifestarse individualizada en la curva del SEV. Este proceso de parametrización, ha puesto además de relieve cierta inconsistencia en la descripción de algunas columnas litológicas. Así, por ejemplo, las potencias de las capas de diferente resistividad interpretadas en el SEV 31, se adaptan perfectamente a las de la secuencia litológica del sondeo mecánico 7-73 (figura 8, Perfil 3) realizado a su lado, pero es bastante dudoso que unas arenas limosas puedan tener 399 ohm.m de resistividad, máxime si se tiene en cuenta que la misma litología se manifiesta en los demás sondeos con valores inferiores a 50 ohm.m. La descripción de la columna litológica del sondeo 7-46 (perfil 2 de la figura 8), realizado posiblemente en 1967, pensamos que no es fiable, siendo imposible encontrar una solución geofísica a su secuencia, aceptando por tanto como válida la interpretación dada al SEV 23.

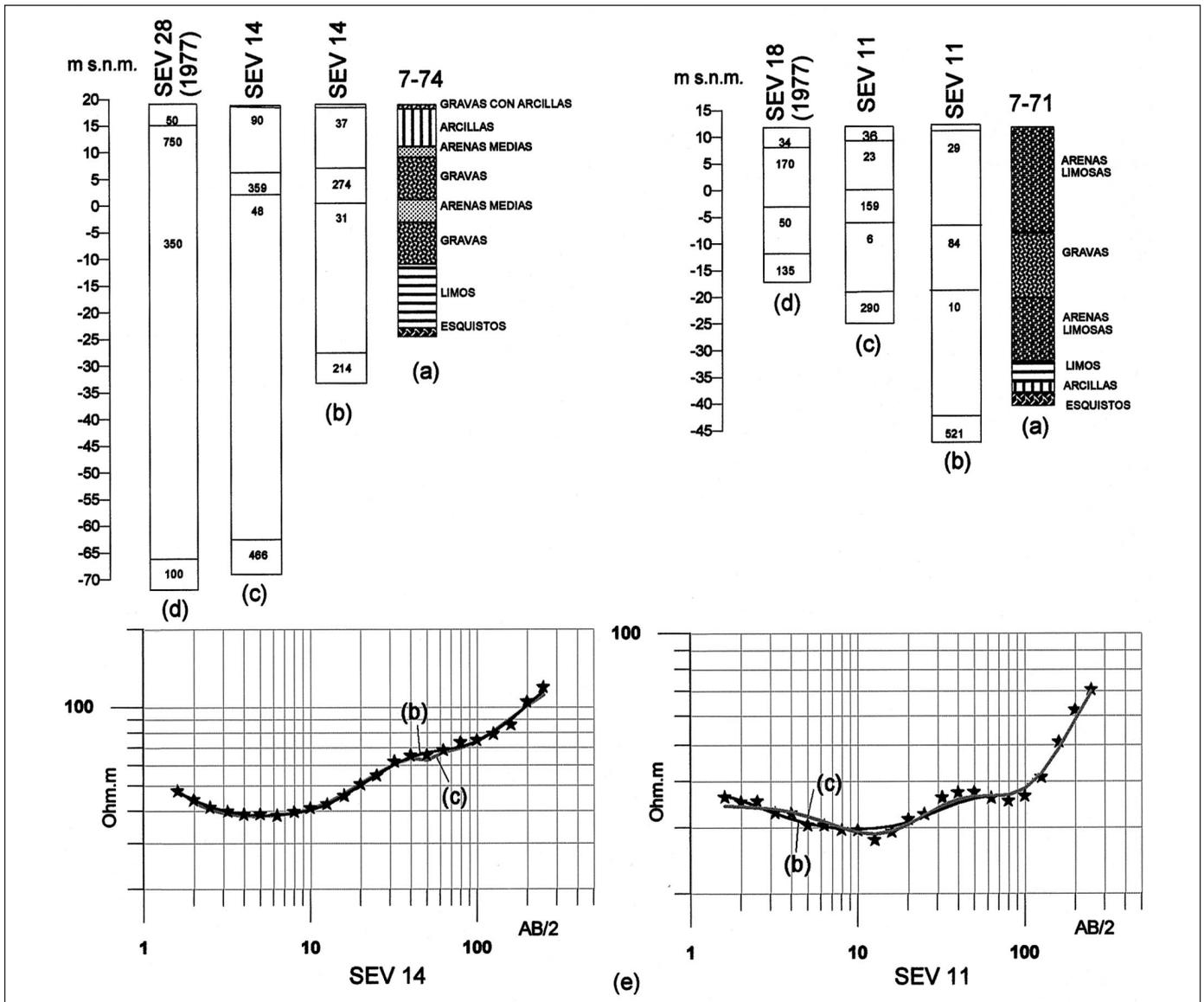


Fig. 6. Ejemplo de la interpretación realizada de algunos de los SEVs paramétricos. (a): columna litológica del sondeo mecánico adyacente. (b): Corte geoelectrónico interpretado con apoyo de la columna geológica para el SEV paramétrico realizado en 1998. En la parte inferior de la figura se indica con la misma letra la curva teórica correspondiente a esta interpretación (en trazo más oscuro) superpuesta a los valores medidos en campo (representados por estrellas). (c): Corte geoelectrónico interpretado para el SEV realizado en 1998, ajustándose a la interpretación del SEV efectuado en la misma posición en 1977 e interpretado sin apoyo geológico. En la parte inferior de la figura se indica con la misma letra la curva teórica correspondiente (en trazo más claro) superpuesta a los valores medidos en campo (representados por estrellas). (d): Corte geoelectrónico interpretado para el SEV realizado en 1977 sin ningún control geológico. (e): Corte geoelectrónico interpretado para el SEV realizado en 1998, ajustándose a la interpretación del SEV efectuado en la misma posición en 1977 e interpretado sin apoyo geológico. En la parte inferior de la figura se indica con la misma letra la curva teórica correspondiente (en trazo más claro) superpuesta a los valores medidos en campo (representados por estrellas).

Fig. 6. Example of the interpretation carried out for some the parametric VESs. (a): lithology of the closest drill hole. (b) geoelectrical interpretation of the VES measured in 1998, making use of the geological information. At the bottom of the figure the same letter shows the theoretical curve corresponding to this interpretation (in black) overlaid to the measured values (stars). (c) : geoelectrical interpretation of the VES measured in 1998, fitting the interpretation of the VES measured at the same site in 1977, which was interpreted without geological support. At the bottom of the figure the same letter shows the theoretical curve corresponding to this interpretation (in grey) overlaid to the measured values (stars). (d) : Geoelectrical interpretation of the VES measured in 1977, without geological support

Por tanto, aunque las potencias y las profundidades de las capas geoelectrónicas obtenidas en la interpretación de estos SEVs paramétricos se han podido ajustar bastante bien a la potencia y profundidad de

las capas litológicas encontradas en la descripción de las columnas, existen a veces discrepancias tanto en el sentido de que la resistividad hallada no se corresponde con la litología descrita, como a que un con-

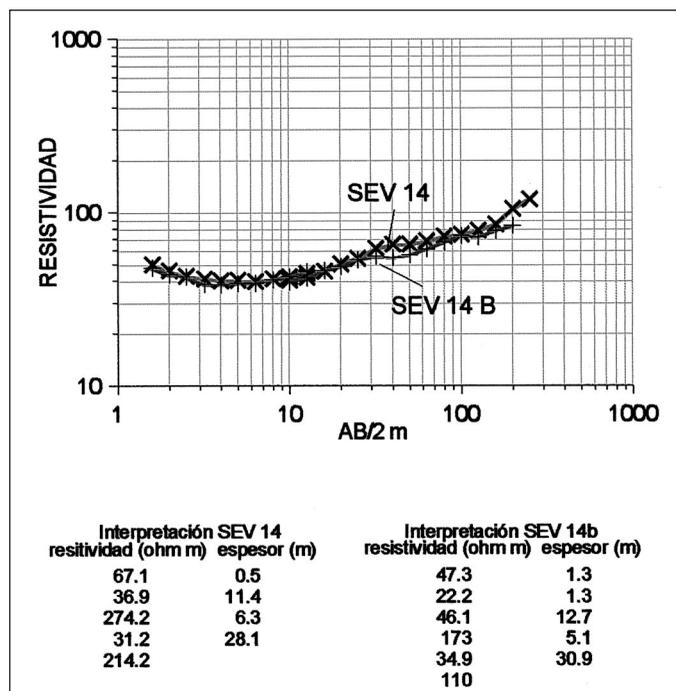


Fig. 7. Curvas e interpretaciones del SEV 14, medido con dos orientaciones perpendiculares para observar el efecto que la dirección de las alas produce en la interpretación de los SEV

Fig. 7. Curves and interpretations of SEV 14, measured with two perpendicular directions in order to show the effect of the orientation of the SEV in the interpretation

junto de capas de poca potencia tienen su equivalencia en un tramo geoelectrico único, resultando posiblemente la resistividad del conjunto más fiable y de mayor valor descriptivo del acuífero.

Con estos criterios, los valores de resistividad correspondientes a las litologías descritas en las columnas pueden clasificarse resumidamente de la siguiente manera para los SEVs paramétricos:

- limos arenosos y arenas limosas superiores: 29 ohm.m a 45 ohm.m.
- arenas finas, limosas, del tramo inferior: 10 ohm.m a 49 ohm.m, sin que se diferencie el tramo más rico en limos a veces existente antes de los esquistos del basamento, y englobando a veces intercalaciones de arenas más limpias o gruesas.
- arenas más gruesas y/o limpias de limos: 399 ohm.m a 464 ohm.m, con valores inferiores en el SEV 23 (266 ohm.m).
- gravas o arenas gruesas: 64 ohm.m a 93 ohm.m, con mayor valor en el SEV 14 (274 ohm.m, englobando tramos de arenas).
- esquistos del basamento: 133 ohm.m a 273 ohm.m, con 521 ohm.m en el SEV 11.

Asignación de litologías a los valores de resistividad en toda la zona

La secuencia de resistividades y su correspondencia con la litología obtenida en los sondeos paramétricos se ha mantenido como apoyo para la interpretación del resto de los SEVs de esta campaña. Resultado de esta interpretación son las asignaciones efectuadas, que se refieren en este apartado exclusivamente a los SEV no realizados junto a sondeos mecánicos y cuya descripción puede seguirse en los cortes de las figuras 8 y 9.

- La primera capa conductora (29-45 ohm.m), que se correlaciona bien con un tramo de arenas limosas o limos arenosos, puede asignarse a la primera capa interpretada en los SEVs 15, 13, 12, 41, 22 y 43, con valores de resistividad entre 20 ohm.m y 51 ohm.m. El tramo conductor inferior (10-49 ohm.m) se localiza en todos los SEVs, con valores de resistividad entre 16 ohm.m y 44 ohm.m, correlacionándose bastante bien en general con una alternancia de arenas, arenas limosas y limos.

- El tramo de mayor resistividad (399-464 ohm.m), asignado a arenas más gruesas, se identifica en los SEVs 41, 22, 32, 43, 24 y 42, ampliando el rango a 206-540 ohm.m. Esta capa se sitúa en los cuatro primeros casos inmediatamente debajo de la primera capa de mayor conductividad próxima a la superficie, mientras que en los dos últimos se sitúa por debajo de un tramo resistivo similar al del SEV 23.

- El tramo resistivo pero de valores inferiores (64-93 ohm.m, y puntual de 274 ohm.m), asignado a gravas, posiblemente saturadas, se identifica en la interpretación de los SEVs 15, 13, 12, 24, 42 y 32, siendo la única capa resistiva para los tres primeros SEVs enumerados, la primera capa del corte geoelectrico para los SEVs 24 y 42, y la segunda capa resistiva para el SEVs 32. El rango de resistividad aceptado se ve en este caso aumentado a 64-166 ohm.m, con valores puntualmente más elevados (260 ohm.m en el SEV 32).

- Por último, aparece también en todo el resto de los SEVs un tramo resistivo, entre 142 ohm.m y 331 ohm.m, que se atribuye al substrato de esquistos, y con un buen ajuste entre la profundidad real de las columnas y la interpretada en los SEVs; las resistividades calculadas en el SEV 11 (521 ohm.m) y el SEV 15 (60 ohm.m), las consideramos anomalías de interpretación debidas a un insuficiente número de puntos en "subida" de estas curvas de campo.

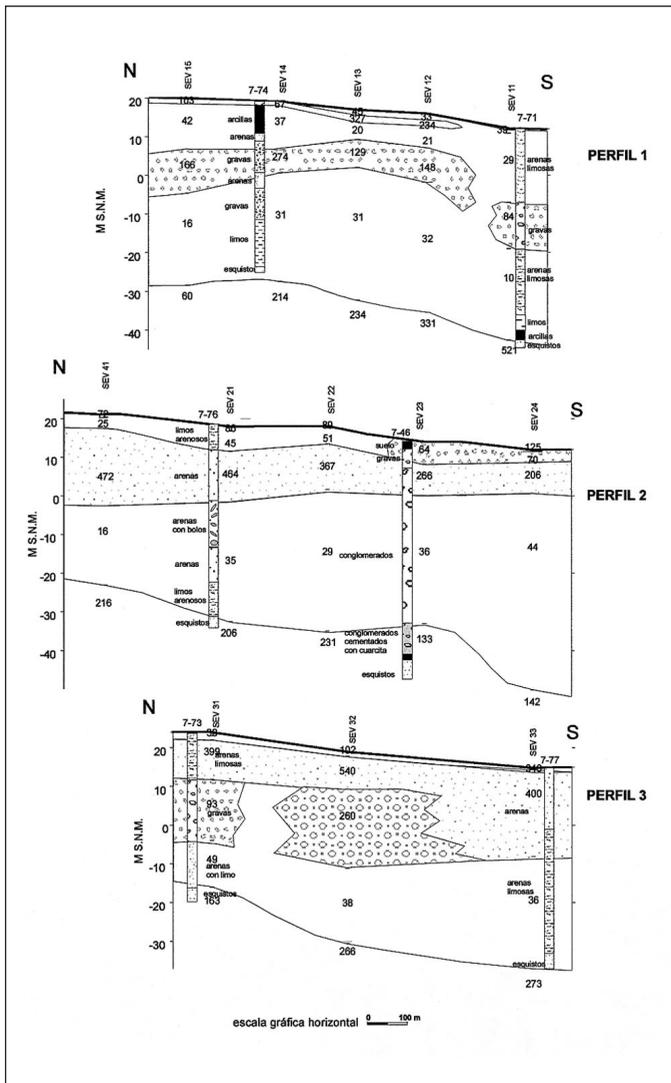


Fig. 8. Perfiles geoelectrónicos de orientación norte-sur con la correlación de resistividades efectuada tras la interpretación de los SEVs de 1998. Se incluyen las columnas de los sondeos mecánicos más próximos, con los que se ha llevado a cabo la interpretación paramétrica y que ha servido de base para la asignación de litologías a los tramos de resistividad

Fig. 8. Geoelectrical sections with North-South trend correlating the resistivities from the interpretation of the VESs measured in 1998. The lithological information from the drill holes used in the parametric fitting is included

Perfiles geoelectrónicos

Efectuadas estas asignaciones, con el conjunto de los SEVs se ha confeccionado una serie de perfiles geoelectrónicos, cuya posición está indicada en la figura 4, tratando de realizar una correlación de tramos en sentido tanto longitudinal como transversal a la vega. Los cortes están representados en las figuras 8 y 9, en

las que se ha incluido la columna de los sondeos mecánicos. El perfil 1, de orientación norte-sur, muestra un nivel superficial conductor, más potente en el SEV 11, y que corresponde a arenas limosas según el sondeo 7-71, con una pequeña intercalación resistiva bajo los SEVs 12 y 13 y los primeros metros del 14 y 15. Por debajo aparece un nivel resistivo, gravas según los sondeos mecánicos y de acuerdo con su resistividad, de unos 10 m de espesor y que aparece más profundo y con conexión poco probable con el tramo anterior bajo el SEV 11, donde pudiera ser mayor la permeabilidad. Continúa un potente nivel conductor que engloba varias litologías (arenas limosas, limos y arcillas), y que se sigue durante todo el perfil con un espesor que varía entre 20 m y 30 m. Por último el nivel resistivo profundo se correlaciona con el basamento de esquistos, con errores inferiores a los 2 metros en la determinación de la profundidad.

Los perfiles 2 y 3, con la misma orientación norte-sur, muestran una distribución similar al anterior, pero con importantes variaciones en sus posibilidades interpretativas. En el perfil 2 el primer tramo conductor es de menor potencia que en el perfil 1, apareciendo gravas muy superficiales en el sur. Posteriormente la capa resistiva hay que adjudicarla ahora a la presencia de arenas a lo largo de todo el perfil, excepto en el sur, donde pudiera ser de gravas. El nivel conductor profundo aumenta su potencia hacia el sur, resultando evidente que la interpretación de la profundidad del basamento dada al SEV 23 resulta errónea por la presencia de un nivel de "conglomerados cementados con cuarcita", único en toda el área. En el perfil 3, paralelo a los anteriores y el más próximo al cauce actual del río, disminuye aún más el espesor del primer conductor, apareciendo niveles resistivos de más de 20 m de potencia en toda su longitud, pero que tienen que desdoblarse en una capa de gravas bajo las arenas al menos en la mitad norte del perfil. Bajo este nivel se sitúan los mismos tramos que en el resto de los otros perfiles. La profundidad del basamento aumenta siempre hacia el sur.

Los perfiles 4, 5, 6 y 7 (figura 9) correlacionan los SEVs en dirección este-oeste, y permiten apreciar una mayor heterogeneidad lateral, como ya indicaban las agrupaciones de SEVs por familias cualitativas, mostrando la relación espacial entre los diferentes tramos resistivos de arenas y gravas. La potencia del tramo superficial de arenas limosas disminuye, hasta casi desaparecer, a medida que nos acercamos hacia el cauce del río. Se aprecia una cierta disminución de la resistividad hacia el sur y hacia el oeste, lo que, además de deberse a variaciones litológicas, podría interpretarse como un aumento en el contenido en

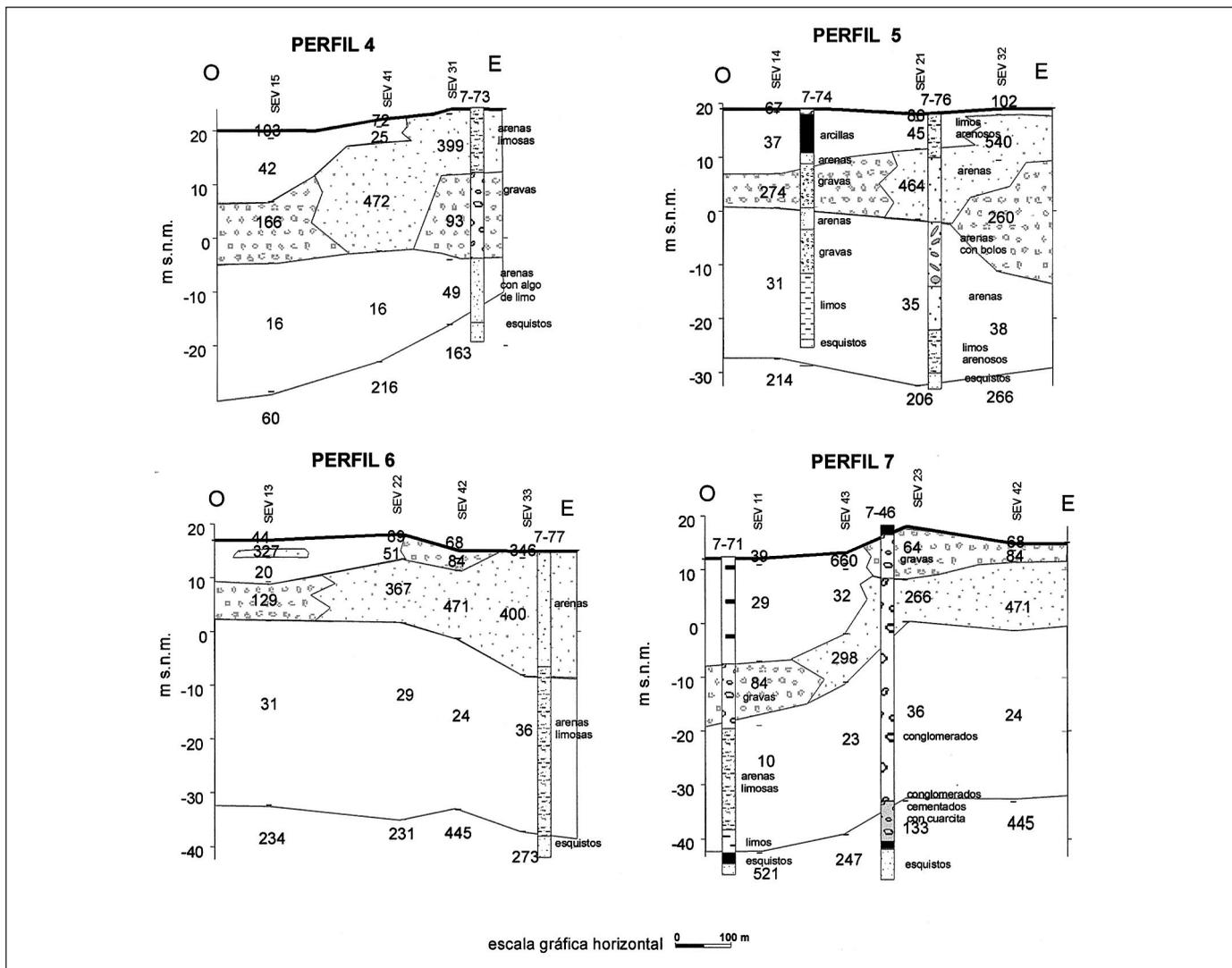


Fig. 9. Perfiles geoelectríficos de orientación este-oeste con la correlación de resistividades efectuada tras la interpretación de los SEVs de 1998. Se incluyen las columnas de los sondeos mecánicos más próximos, con los que se ha llevado a cabo la interpretación paramétrica y que ha servido de base para la asignación de litologías a los tramos de resistividad

Fig. 9. Geoelectrical sections with East-West trend correlating the resistivities from the interpretation of the VESs measured in 1998. The lithological information from the drill holes used in the parametric fitting is included

agua en esa dirección, ya que en la fecha de realización de estas medidas no existía salinización en el acuífero a la que atribuir este comportamiento de las resistividades.

En todos los perfiles se observa que los materiales depositados en la base forman una capa de gran homogeneidad y continuidad geoelectrífica, a pesar de que su litología no es única, estando formados por arenas finas, limos e intercalaciones de materiales más gruesos. Esta homogeneidad puede ser interpretada como un posible comportamiento hidráulico también homogéneo, formando una sola unidad. Las

secuencias de deposición posteriores son de materiales más gruesos, en las que cabe claramente diferenciar por su comportamiento geoelectrífico arenas medias que se extienden por todo el sector oriental del área, y lentejones de gravas o arenas más gruesas que se localizan tanto por debajo, como por encima o en contacto lateral con las arenas en el sector oriental, formando una secuencia de sedimentación única en el sector occidental.

Combinando la información de la potencia de sedimentos a partir de los sondeos mecánicos y de los SEVs, se ha vuelto a representar en la figura 3b el

mapa de isovalores del espesor de sedimentos aluviales, lo que proporciona una mejor visión de la posible geometría del techo del substrato impermeable y de la morfología de la cuenca que la obtenida utilizando exclusivamente los datos de los sondeos mecánicos (figura 3a). No se ha tenido en cuenta la interpretación del SEV 23, dando prioridad a la información suministrada por el sondeo mecánico 7-46. Tampoco se han utilizado los datos de los SEVs 11 y 33, dando igualmente preferencia a la potencia de sedimentos dada por las columnas de los sondeos mecánicos 7-71 y 7-77 junto a los que están efectuados. El talud occidental de la topografía de basamento aparece ahora definido con mayor pendiente, dando a la cubeta una base más ancha y de mayor extensión hacia el Norte; las irregularidades en la potencia de sedimentos que aparecían en el trazado anterior ahora están más suavizadas, aunque confirmando que la cuenca es más profunda hacia el sur de la vega, y posiblemente continúa hundiéndose hasta la costa.

Los tramos identificados como pertenecientes a gravas, de menor resistividad y por tanto, probablemente, de mayor permeabilidad, pueden estar representando la existencia de paleocauces. De acuerdo con la interpretación efectuada, su localización queda reflejada en la fig. 3b. La porción central de las gravas, prácticamente aflorantes, coincide con la de mayor potencia de sedimentos, situándose las otras dos zonas en los flancos y a profundidades superiores a los 10 m. Es evidente que esta situación geológica pertenece más a un entorno tridimensional que de dos dimensiones, por lo que la interpretación de los sondeos eléctricos se ha llevado aquí al límite de sus posibilidades gracias a la existencia de suficientes puntos de control. Este tipo de entornos requiere, de todas formas, la utilización de métodos geoelectricos de mayor poder de resolución y menores dimensiones del dispositivo de medición, como es el magnetoteléxico de altas frecuencias.

Conclusiones

La interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales sin el apoyo de columnas geológicas puede inducir a errores sustanciales, sobre todo en la determinación de las potencias de las capas. Por otra parte, la existencia de columnas litológicas de sondeos mecánicos no siempre es suficiente para establecer correlaciones entre capas, máxime cuando no se ha adoptado el mismo criterio en su definición y la secuencia de sedimentación es compleja. La medición de unos pocos SEVs permite una mejor correlación de la infor-

mación de los sondeos mecánicos, dando una imagen de gran detalle de la distribución de materiales dentro de una cuenca, pudiendo estar mejor definido el comportamiento de las diversas capas hidrogeológicas por sus resistividades que por sus litologías.

De los SEVs paramétricos realizados junto a los sondeos mecánicos, se ha establecido para esta cuenca la siguiente secuencia: los tramos conductores superficial y profundo, se localizan con gran homogeneidad en toda la vega, correlacionándose con arenas limosas. En ellas se intercalan cuerpos más resistivos, para los que se observa una variación lateral más acusada en dirección transversal que en sentido norte-sur, y están constituidos fundamentalmente por arenas medias en todo el sector oriental. Han sido cartografiadas además las intercalaciones de gravas, que forman cuerpos de menor continuidad lateral y que aunque están distribuidos por toda la cuenca, a techo, a muro y en contacto lateral con las arenas, presentan una clara disposición longitudinal en ciertos sectores. Estas gravas suponen posibles paleocauces.

Aunque los rangos de resistividad aceptados para cada tipo de litología son en ocasiones algo estrictos, habida cuenta de la resolución que cabe esperar con las dimensiones del dispositivo usado y dada la heterogeneidad geológica existente, puede concluirse que en general las capas geoelectricas descritas están representando tipos de granulometría, contenido en limos y/o contenido en agua, con cierta independencia de la litología.

El mapa de isolíneas de espesores de sedimentos obtenido a partir de la interpretación de los SEVs y de los sondeos mecánicos muestra que la profundidad del substrato se incrementa hacia el sur de la vega, cerrándose por fuertes taludes de los esquistos en ambos márgenes, lo que podría considerarse como una fosa tectónica.

La disponibilidad de sondeos mecánicos donde apoyar la interpretación de los sondeos eléctricos, junto con una metodología interpretativa adecuada, ha permitido extrapolar e interpolar la información puntual dada por aquellos a zonas más amplias de la vega, consiguiendo una mejor definición de la morfología del acuífero.

Agradecimientos

De acuerdo con la normativa sobre publicaciones actualmente vigente en el IGME, se hace constar que las opiniones reflejadas en este artículo son responsabilidad de sus autores, sin que tengan por qué coincidir con las institucionales.

Referencias

- Benavente, J., Fernández-Rubio R., Pulido, A. 1982. *Estudio hidrogeológico de los ríos Verde y Seco en el término municipal de Almuñecar (Granada)*. 195 p. Informe inédito realizado para el Ayuntamiento de Almuñecar.
- Calvache, M.L. y Benavente, J. 1988. Nuevos datos sobre la geometría del acuífero costero de Almuñecar (Granada). Aportación al conocimiento de la porosidad eficaz y de las reservas. *TIAC 88*, Tomo III, La intrusión en España, 375-384. Granada.
- Carrasco Cantos, F., Vadillo Pérez, I., Andrés, B., Benavente Herrera, J., Santos-Olmo, A. 2000. Estudio de la intrusión marina en el acuífero costero del río Verde de Almuñecar mediante registros de conductividad eléctrica del agua en piezómetros. *Jornadas de Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en Hidrogeología*. Granada. IGME. 333-340.
- Fernández-Rubio, R., Jalón, M., Benavente, J. y Fernández Lorca, S. 1982. Proceso de salinización-desalinización en el acuífero costero del río Verde en Almuñecar (Granada). *Simposio Agua Andalucía II*, 303-313. Granada.
- Fernández-Rubio, R., Benavente, J. y Chalons, C. 1988. Hidrogeología de los acuíferos del sector occidental de la costa de Granada. *TIAC 88*, Tomo II, Los acuíferos costeros de Andalucía occidental, 239-265. Granada.
- IGME. 1987. *Control de las explotaciones en los acuíferos de Almuñecar y Gualchos (años 85-86)*. Nota técnica nº 293. Málaga.
- Plata, J.L., 2000. *Adapting magnetotelluric (MT) geophysics systems to measure high frequency ranges for environmental investigations*. Final Report INI1004801 Proyect. ITGE. ND 62.196.
- Rubio, F.M, Plata, J.L., Peláez, A. 1998. *Realización de las campañas de SEV, PI y perfilaje eléctrico para el proyecto ENVIRO-MT, realizados en Almuñecar (Granada)*. Junio 1998. ITGE. ND. 62.193.

Recibido: Abril 2001

Aceptado: Febrero 2002