

Establecimiento preliminar de la posición de la interfase agua dulce-agua salada en el sector de la desembocadura del río Guadalfeo (acuífero Motril-Salobreña) mediante técnicas geofísicas y registros de salinidad

Study of the freshwater-saltwater interface position in the Guadalfeo River mouth sector (Motril-Salobreña aquifer) with geophysical techniques and salinity logs

Carlos Duque ⁽¹⁾, María Luisa Calvache ⁽²⁾, Manuel López Chicano ⁽²⁾, Antonio Pedrera ⁽³⁾ y Jesús Galindo-Zaldívar ⁽²⁾

⁽¹⁾ Department of Geography and Geology. Øster Voldgade 10, DK-1350. University of Copenhagen. Dinamarca. cad@geo.ku.dk

⁽²⁾ Departamento de Geodinámica. Av/ Fuentenueva s/n 18071. Universidad de Granada. calvache@ugr.es, jgalindo@ugr.es, mlopezc@ugr.es

⁽³⁾ Oficina de Proyectos del IGME de Granada. C/ Alcázar del Genil, 4, 18006 Granada. a.pedrera@igme.es

ABSTRACT

Several geophysical surveys (time domain electromagnetic soundings and electrical resistivity tomography) have been carried out in Motril-Salobreña aquifer for detecting the saline wedge but there are uncertainties about the exact position and shape. In 2009 a 250 metres depth borehole was drilled near the coastline. Electrical water conductivity logs showed a fresh water-brackish water change that is considered as the beginning of the saltwater-freshwater interface. The information obtained with the logs and the geophysical methods has been combined and an approximation to the upper limit of the saltwater-freshwater interface shape is presented.

Key-words: Motril-Salobreña aquifer, TDEM, electrical resistivity tomography, saline wedge, salinity logs.

RESUMEN

Se realizaron campañas geofísicas (Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo y tomografía eléctrica) en el acuífero Motril-Salobreña para detectar la cuña salina que revelaron incertidumbres acerca de la posición exacta y la forma que presenta esta. En 2009, se perforó un sondeo de 250 m de profundidad cerca de la línea de costa. Los registros de salinidad en el sondeo mostraron un cambio de agua dulce a agua salobre que es considerado como el inicio de la interfaz agua dulce-agua salada. La información obtenida a través de los registros de salinidad y los métodos geofísicos se combinó para presentar una primera aproximación de la morfología del límite superior de la transición desde agua dulce a agua salada.

Palabras clave: Acuífero Motril-Salobreña, sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo, tomografía eléctrica, cuña salina, registros de salinidad

Geogaceta, 50-1 (2011), 75-78.
ISSN:2173-6545

Fecha de recepción: 15 de Febrero de 2011
Fecha de revisión: 28 de Abril de 2011
Fecha de aceptación: 27 de Mayo de 2011

Introducción

La intrusión marina es muy frecuente en los acuíferos costeros donde la actividad humana exige el bombeo de recursos hídricos subterráneos para atender a las necesidades de la población. La determinación de la posición de la cuña salina representa un objetivo difícil de alcanzar debido a que, en muchas ocasiones, ésta se localiza a elevadas profundidades donde es más complicado aproximarse tanto por métodos directos como indirectos. La medida mediante registros verticales de conductividad eléctrica del agua subterránea tiene como principal inconveniente la necesidad de sondeos de gran profundidad, de coste muy elevado y, por ello, poco frecuentes. Por este motivo, se recurre con frecuencia a las técnicas geofísicas que permiten localizar sectores de

baja resistividad que puedan asociarse a intrusión marina. El principal inconveniente que presentan los datos geofísicos aparece a la hora de interpretar los resultados ya que los contrastes de resistividad pueden deberse tanto a cambios en la salinidad del agua como a cambios litológicos.

En el acuífero Motril-Salobreña, se han combinado ambas metodologías, ya que se han utilizado los datos obtenidos a partir de diferentes técnicas geofísicas junto con las medidas directas de conductividad eléctrica del agua en tres sondeos próximos a la costa de reciente construcción. La actividad antrópica está produciendo una importante reducción de las entradas de agua al acuífero debido a la construcción de una presa en el río Guadalfeo (una de las principales fuentes de recarga del acuífero) o a los cambios en los sistemas de riego de los cul-

tivos y en los usos del suelo sobre su superficie. Por este motivo, el riesgo de intrusión marina es cada vez mayor aunque hasta el momento no se hayan detectado evidencias claras de avance de la cuña salada. Se ha seleccionado la zona de estudio en las inmediaciones de la desembocadura del río Guadalfeo por ser ésta la zona más sensible a la intrusión marina (Calvache *et al.*, 2009).

Contexto hidrogeológico

El acuífero Motril-Salobreña limita hacia el Sur con el mar Mediterráneo a lo largo de 12 km (Fig. 1). Está compuesto por sedimentos detríticos con una conductividad hidráulica media de 50 m/d (Duque, 2009), aunque con oscilaciones de entre 200 m/d y 5 m/d. Esta elevada conductividad hi-



Fig. 1.- Localización del acuífero Motril-Salobreña y área de estudio.

Fig. 1.- Motril-Salobreña aquifer location and study area.

dráulica es la responsable de que el flujo subterráneo en el acuífero sea relativamente rápido por lo que un descenso de las entradas al sistema puede desembocar en procesos muy rápidos de avance de agua marina hacia el interior. Las principales fuentes de recarga del acuífero son el río Guadalfeo y la entrada por retorno de riegos (Duque y Calvache, 2010). Ambas están controladas y directamente relacionadas con la actividad humana por la presa de Rules y por la regulación de los sistemas de riego. Precisamente esta es también la causa del buen estado que ha presentado tradicionalmente el acuífero en comparación con otros acuíferos costeros cercanos, donde la intrusión marina ha sido detectada en las épocas de sequías (Calvache y Pulido-Bosch, 1991; 1997). Los sistemas de riego con altas dotaciones y la presencia del río Guadalfeo, con caudales muy elevados, incluso en épocas estivales, ha mantenido la buena calidad del agua del acuífero.

Antecedentes

En este sector costero se realizaron durante los años 80 y 90 diversos estudios geofísicos utilizando sondeos eléctricos verticales encaminados a establecer la geometría del acuífero y la naturaleza del sustrato así como dar una primera aproximación a la situación de la intrusión marina (Geirnaert *et al.*, 1981; Soto, 1998). De este modo se establecieron unas primeras bases de las propiedades eléctricas

de los materiales de la zona, como también se llevó a cabo en el cercano acuífero de Carchuna (Pulido-Bosch y Cañada, 1983)

Metodología

Para este estudio se dispuso de la información obtenida a partir de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT), tomografía eléctrica y la conductividad eléctrica del agua de un sondeo. Los SEDT se realizaron con un sistema PROTEM de marca Geonics. Está compuesto de un transmisor TEM-37, un receptor Protem-D y una bobina receptora de baja frecuencia como sensor. El procesado e interpretación de los datos se ha realizado con un modelo de capas planas que trabaja con modelización e inversión. El tamaño de los bucles eléctricos ha sido variable (entre 50 y 200 m). La tomografía eléctrica se realizó en perfil, mediante un equipo ABEM SAS 4000 con 40 canales de medida y un espaciado entre electrodos de 4 m. Se utilizó el protocolo de medida "4-channel multiple gradient" que ofrece una resolución superior al dispositivo tradicional Wenner-Schlumberger. Este incremento en la densidad de datos no implica un coste temporal muy elevado durante la adquisición gracias a los cuatro canales de medida.

El procesado se realizó mediante el programa de inversión RES2inv. La zona de estudio es llana por lo que la topografía se consideró horizontal. Para obtener los registros de salinidad se utilizó una sonda de conductividad y temperatura de 200 m y se realizaron medidas periódicas en aquellos

tramos del sondeo donde se localizaba la rejilla. Estos se localizan a espaciados variables distribuidos a lo largo de todo el sondeo de modo para conocer la distribución de salinidad en toda la columna de agua.

Resultados

Recientemente, en el sector de estudio se han llevado a cabo diferentes campañas para detectar la posición de la interfase agua dulce-agua salada. En 2006 se utilizaron sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo a partir de los cuales se localizaron dos puntos dentro del área de estudio donde se encontraron cambios significativos de resistividad (Duque *et al.*, 2008). Un sondeo (SEDT A) se localizó muy próximo a la línea de costa y el cambio de resistividad se detectó a 130 m de profundidad con una variación desde 80 Ω .m a menos de 8 Ω .m (Fig. 2). El SEDT B se situó a una distancia de 300 m de la línea de costa y se detectó un cambio similar en los valores de resistividad pero, en este caso, a una profundidad mayor, alrededor de los 180 m (Fig. 2).

En 2009 se realizó tomografía eléctrica en una línea de 200 m en dirección perpendicular a la línea de costa. Con esta técnica fue posible obtener información continua sobre las propiedades eléctricas del acuífero en una sección en dos dimensiones del acuífero. En la parte más cercana al mar se detectaron valores muy bajos de resistividad (1 Ω .m) muy cercanos a la superficie topográfica. Este es el punto más cercano a la línea de costa donde se detecta un contraste importante de resistividad por lo que podría ser considerado como el inicio de la interfase entre agua dulce y agua salada. Únicamente en este punto fue detectado un valor propio de agua salada o salobre, ya que en el resto de la tomografía los valores son considerablemente superiores a lo que se podría esperar de materiales saturados con agua salada (Fig. 2). En el año 2009 se perforó un sondeo de 250 m de profundidad en el área de estudio para la detección, mediante medidas de la conductividad del agua subterránea, de la interfase agua dulce-agua salada. Desde entonces se ha medido la conductividad eléctrica del agua subterránea a diferentes profundidades para obtener registros de salinidad. Se detectaron variaciones litológicas a lo algo del sondeo con presencia de arena fina, gra-

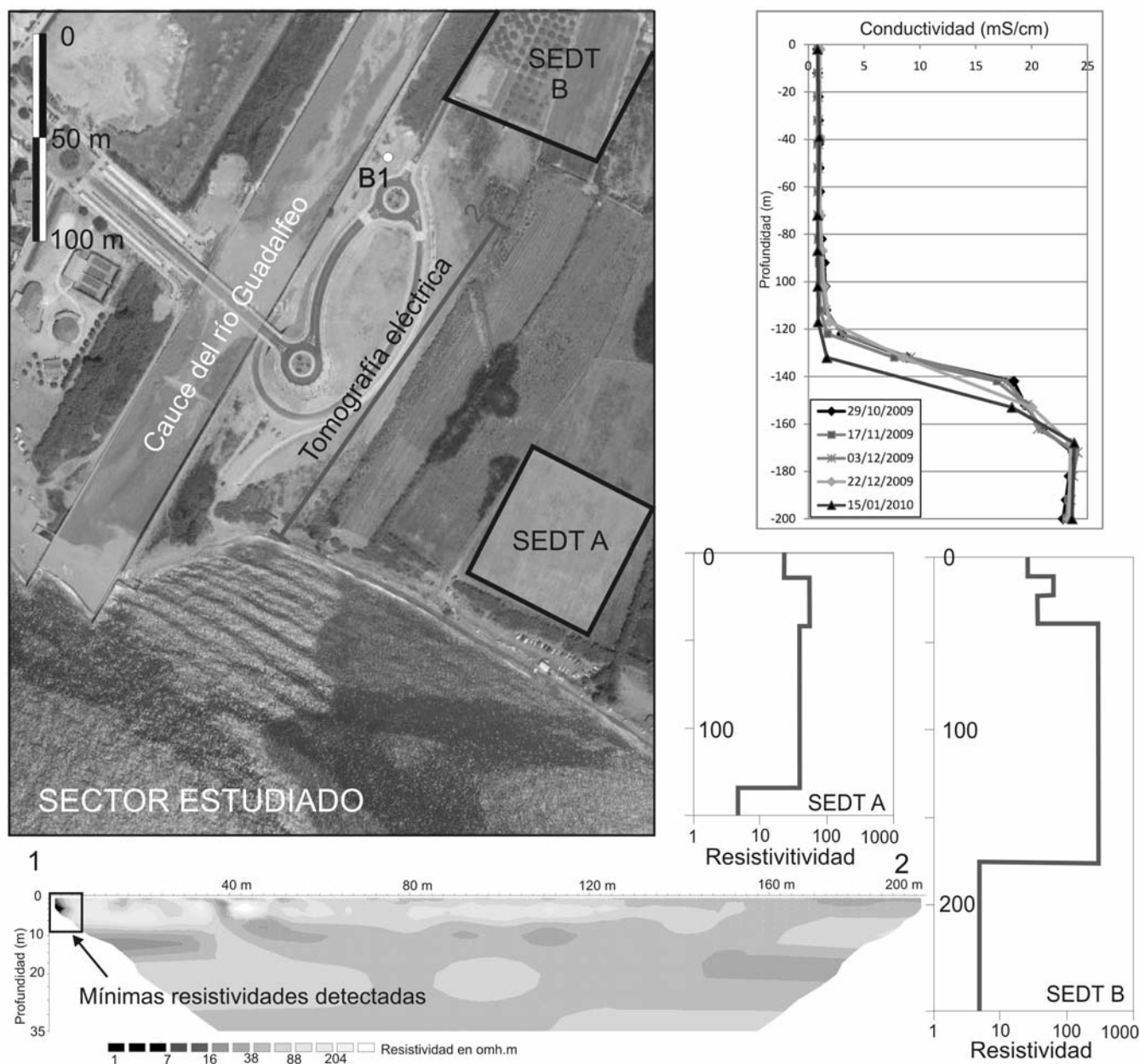


Fig. 2.- Resultados de los métodos aplicados.
Fig. 2.- Results of the applied methods.

vas gruesas y arcillas con intercalaciones de gravas. El sondeo resultó surgente si bien los materiales que se detectaron no parecen evidenciar una situación de confinamiento. A pesar de los flujos verticales los cambios de conductividad eléctrica del agua no muestran grandes variaciones en su posición a lo largo del tiempo. Los resultados muestran un cambio abrupto entre los 130 y los 170 m de profundidad donde el agua subterránea incrementa su conductividad eléctrica desde los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta más de 24000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por lo tanto, la conductividad eléctrica varía desde valores propios de agua dulce hasta los correspondientes a un agua salobre (la con-

ductividad eléctrica del agua del Mar Mediterráneo en esta localización es de 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esta podría ser la causa de que la resistividad medida en los SEDT no alcance valores muy bajos.

Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la interpretación de los datos fueron combinados para obtener una visión completa de la situación de la intrusión marina en el área cercana a la desembocadura del río Guadalfeo. Los resultados de los SEDT fueron contrastados a partir de los registros de sa-

linidad del agua subterránea en el sondeo. Por este motivo, se puede asegurar que las diferencias de resistividad encontradas están directamente relacionadas con cambios en la salinidad del agua subterránea, pudiéndose descartar los cambios litológicos. Además la tomografía eléctrica es coherente con el resto de resultados porque la resistividad asociada a la presencia de agua subterránea se detecta sólo en los puntos más cercanos a la costa. La congruencia de todos los datos utilizados en este estudio permitió la proyección de la forma del contacto entre al agua dulce y el agua salobre que representaría la parte superior de de la cuña salina (Fig. 3). La mor-

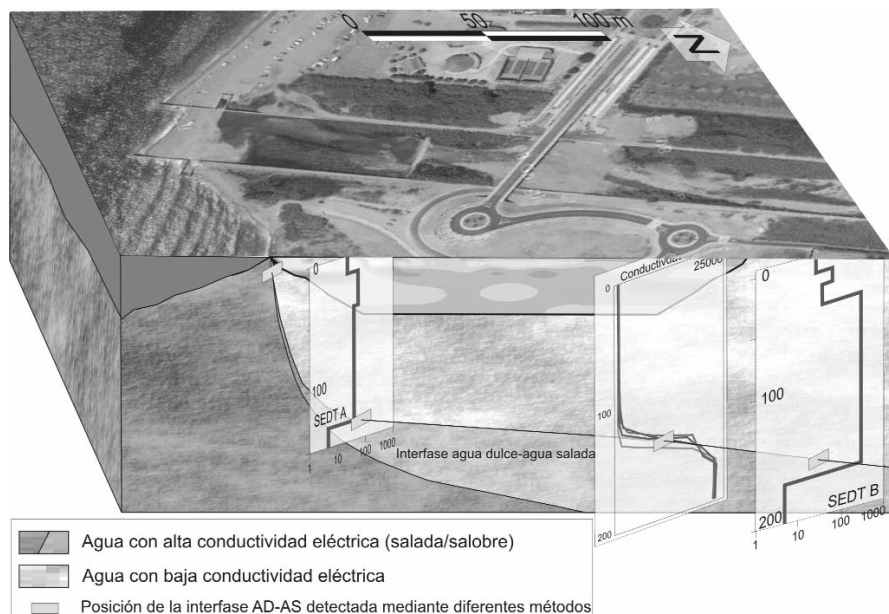


Fig. 3.- Contacto agua dulce-agua salobre obtenido a partir de las diferentes metodologías.
 Fig 3.- Freshwater-brackishwater contact inferred from the data obtained by different methodologies.

fología se corresponde por lo tanto con un parte inicial en la que se produce un descenso muy brusco desde la línea de costa hasta 50 m tierra adentro donde el cambio de salinidad se localiza ya a 130 m de profundidad desde la superficie topográfica. Posteriormente, la pendiente del contacto se suaviza y en los siguientes 250 m solamente desciende 50 m más.

Conclusiones

El estudio de la intrusión marina en el acuífero Motril-Salobreña representa un objetivo muy importante debido a los cambios que están produciéndose durante los últimos años asociados a las modificaciones antrópicas del entorno. Las propiedades hidráulicas de los materiales que lo compo-

nen además hacen prever que podrían desarrollarse procesos muy rápidos.

La aplicación de técnicas geofísicas en esta zona mostraba ciertas incertidumbres propias del método y que han sido parcialmente resueltas tras la comprobación con medidas directas de las propiedades del agua subterránea en un sondeo de reciente construcción.

La combinación de las diferentes medidas que se han realizado en el sector de estudio han mostrado unos resultados muy coherentes entre ellos y que permiten trazar una primera aproximación a la forma de la interfase agua dulce-agua salada. A partir de esta imagen se podrá analizar la evolución de este proceso y su correlación con las modificaciones de origen antrópico en un acuífero donde, hasta ahora, no se

habían detectado indicios de intrusión marina.

Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias a los fondos de los proyectos CGL2005-06224/BTE, CGL20 08-05016, CSD2006-00041, CGL20 08-0367 E/BTE y CGL2010-2104 financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia, los grupos de investigación de la Junta de Andalucía RNM-369 y RNM-148 y el programa de perfeccionamiento de Doctores del Plan Propio de la Universidad de Granada. Se agradece a los dos revisores anónimos sus aportaciones que ayudaron a mejorar la calidad final del trabajo.

Referencias

Calvache, M.L., Ibáñez, P., Duque, C., López-Chicano, M., Martín-Rosales, W., González-Ramón, A. y Rubio, J.C. (2009). *Hydrological Processes*, 23, 1268-1281.

Calvache, M.L. y Pulido-Bosch, A. (1991). *Journal of Hydrology*, 129, 95-213.

Calvache, M.L. y Pulido-Bosch, A. (1997). *Environmental Geology*, 30, 215-223.

Duque, C. y Calvache, M.L. (2010). *Geogaceta* 48, 119-122.

Duque, C., Calvache, M.L., Pedrera, A., Martín-Rosales, W. y López-Chicano, M. (2008). *Journal of Hydrology*, 349, 536-547.

Duque, C. (2009). *Influencia antrópica sobre la hidrogeología del acuífero Motril-Salobreña*. Tesis Doctoral. Univ. de Granada, 194 p.

Geirnaert, W., Pulido-Bosch, A., Castillo, E. y Fernández Rubio, R. (1981). *I Simposio del Agua en Andalucía*, 291-302.

Pulido-Bosch, A. y Cañada, P. (1983). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, IX, 363-374.

Soto, J.M. (1998). *Aportaciones al conocimiento del acuífero detrítico de Motril-Salobreña (Granada)*. Tesis de Licenciatura. Univ. de Granada, 135 p.