

# Uso de técnicas geofísicas para caracterizar la extrusión de agua salina en un acuífero costero mediterráneo bicapa (Río Vélez, provincia de Málaga)

*Use of geophysical techniques to characterize the extrusion of saline water in a two-layer Mediterranean coastal aquifer (Vélez River, Málaga province)*

J. Benavente <sup>(1)</sup>, K. el Mabrouki <sup>(1)</sup>, M. Himi <sup>(2)</sup>, J.L. García-Aróstegui <sup>(1)</sup>, C. Calabrés <sup>(2)</sup> y A. Casas <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto del Agua. Universidad de Granada. C- Ramón y Cajal, N° 4, 18071. Granada. jbenaven@ugr.es, kaltoum@ugr.es, jlgarostegui@teleline.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona. C- Martí i Franques, s/n, 08028. Barcelona. himi@geo.ub.es, cesarcalabres@hotmail.com, albertc@geo.ub.es

## ABSTRACT

*The river Vélez delta (Málaga province) is a two-layer aquifer. The groundwater overexploitation during the 1993-1995 drought period led to a quite general seawater intrusion in both layers, particularly severe in the deepest one (confined). The important aquifer recharge associated to the 1996-1997 abnormally rainy period has induced the flushing of most of the brackish and saline water. This study shows the status of the aquifer in September 2003 by means of geophysical techniques (FDEM soundings and Electrical Resistivity Imaging) and logs of electrical conductivity of the water in boreholes. The confined aquifer seems completely recovered, as flushing by freshwater continues. The phreatic aquifer had a rapid recovery after the recharge event, although during this study the presence of brackish waters –similar to those which existed before the recharge- has been identified. The geophysical methods have identified the vertical and lateral distribution of these waters, which now show different patterns with respect to the situation immediately after the drought.*

**Key words:** coastal aquifer, seawater intrusion, geophysical survey, conductivity logs, río Vélez

*Geogaceta*, 37 (2005), 127-130  
ISSN:0213683X

## Introducción

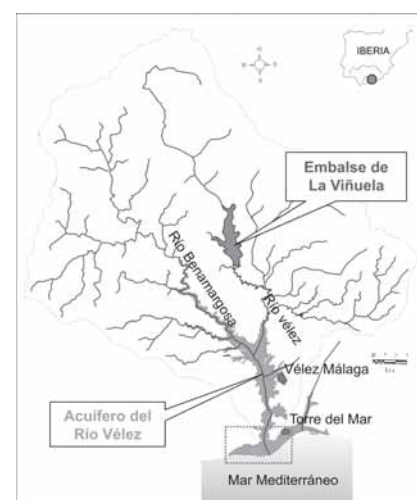
El área estudiada en el presente trabajo corresponde al sector deltáico del acuífero del río Vélez, en las inmediaciones de la localidad de Torre del Mar, en la costa de la provincia de Málaga (Fig. 1). Se trata de un área en la que en los últimos años se está llevando a cabo un importante desarrollo urbanístico en detrimento de terrenos que antes se dedicaban a la agricultura.

El acuífero del río Vélez está integrado por aluviones que ocupan una extensión de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>. El sustrato y los bordes del acuífero corresponden a materiales metapelíticos de las Zonas Internas de la Cordillera Bética así como a depósitos pliocenos de carácter limo-arcilloso. En el sector costero el sustrato se encuentra a una profundidad de aproximadamente de 60 m.

El acuífero en el sector deltáico es de carácter bicapa. Las perforaciones realizadas han puesto de manifiesto que en ese

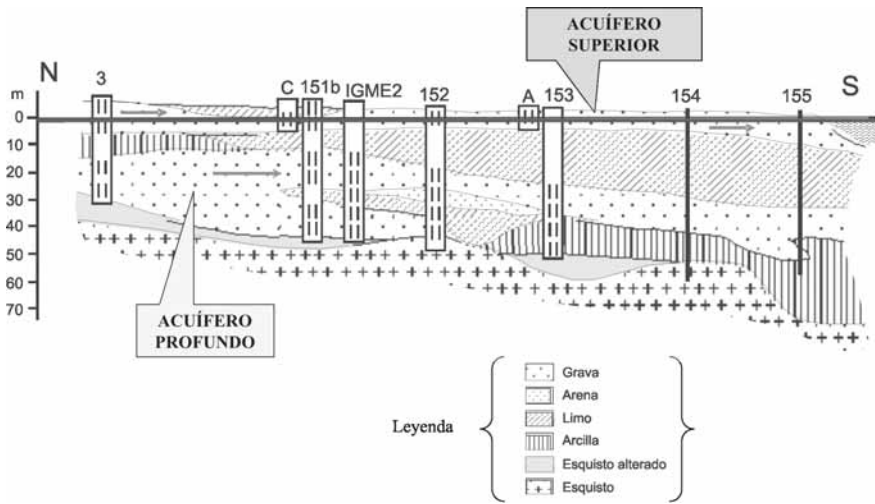
sector existen dos niveles permeables separados por una capa limo-arcillosa de aproximadamente 30 m de espesor. En general, el acuífero superior, de carácter libre, tiene un espesor inferior a 15 m. El acuífero profundo, de carácter confinado, tiene un espesor entre 20 y 30 m. Esta situación se esquematiza en la figura 2, correspondiente a un perfil situado en la margen derecha del cauce del río Vélez. En esta figura se representan también una serie de captaciones o perforaciones, con la particularidad de que algunas captan únicamente el acuífero superior o el inferior, mientras que otras captan ambos. Aguas arriba, ambos niveles permeables integran un único acuífero.

La principal recarga del acuífero corresponde a la infiltración del agua de los ríos Vélez y Benamargosa, ya sea de manera directa en los propios cauces o a partir del retorno de riegos efectuados a partir de acequias que derivan este agua. En cuanto a su descarga, hay que reseñar la existencia de numerosas captaciones que



**Fig. 1.- Localización del acuífero del Río Vélez y su cuenca vertiente. El rectángulo en el sector costero indica el área de estudio.**

*Fig. 1.- Location of the Río Vélez aquifer and its watershed. The rectangle in the coastal sector indicates the study area.*



**Fig. 2.-** Corte geológico a lo largo de la margen derecha del río Vélez, con indicación de algunos puntos de control hidrogeológico y la localización de sus zonas ranuradas (García-Aróstegui, 1998). Distancia aproximada entre el mar y el punto IGME-2: 1 km.

**Fig. 2.-** Geological cross section along the right bank of the Véz river. The location of some hydrogeological monitoring points is indicated. The position of the screened parts is also shown (García-Aróstegui, 1998). Approximate distance from the IGME-2 site to the sea: 1 km.

en ciertos periodos de escasez de recursos superficiales (1984-85 y 1993-94) han llegado a bombear casi 40 hm<sup>3</sup>/año (García-Aróstegui, 1998).

La construcción en 1990 de la presa de la Viñuela, aguas arriba del acuífero (Fig. 1), ha producido una disminución en la recarga del mismo debido a la regulación de los caudales superficiales fluyentes. A esto se añade el efecto de la sequía entre 1993 y 1995 que, ante la relativa escasez de recursos procedentes del mencionado embalse, motivó el incremento de los bombeos en las captaciones del acuífero. Esta situación favoreció la penetración tierra adentro de aguas de procedencia marina, proceso que ha sido estudiado por CHSE (1997), García-Aróstegui (1998) y García-Aróstegui *et al.* (2003).

En el último de los trabajos mencionados se analizan los efectos de la intrusión en los dos acuíferos. En el acuífero superior, en julio de 1995, los valores mayores de conductividad eléctrica (más de 7 mS/cm) se localizaban en la margen derecha del delta, próximos al borde costero; los más bajos eran algo inferiores a 2 mS/cm y se alcanzaban el sector más interior. En el acuífero inferior se midieron (por debajo de la cota -30 m) valores típicamente marinos, de más de 40 mS/cm, en piezómetros situados a aproximadamente 1 km del borde costero, como en el IGME-2 (Fig. 2).

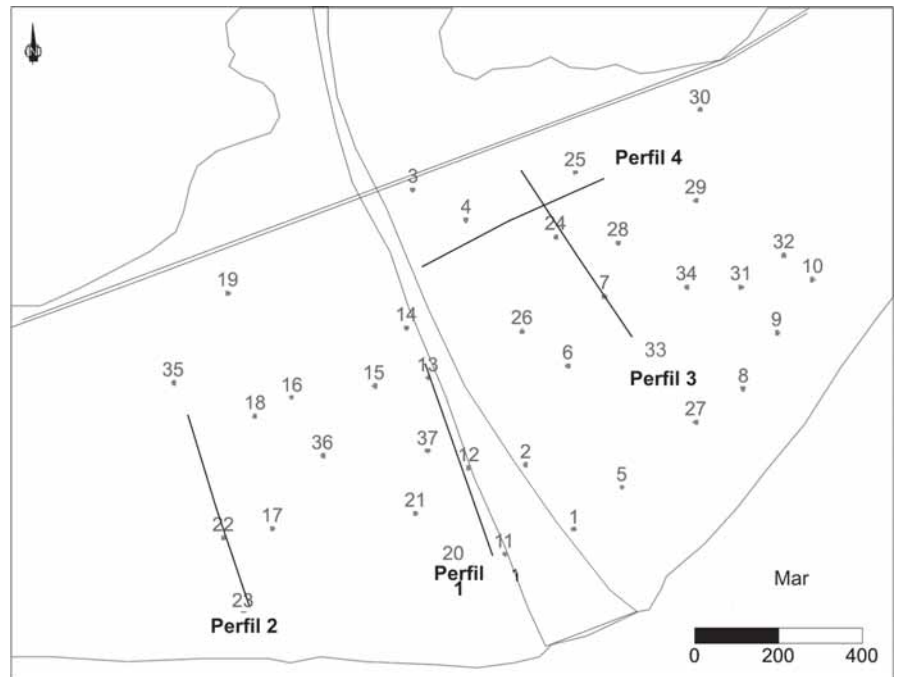
La situación que se acaba de describir se modificó como consecuencia de las importantes precipitaciones registradas entre los años 1996 y 1997, tras las que el embalse de la Viñuela se llenó completamente y vertió importantes caudales de agua hacia el río. El consiguiente incre-

mento en la recarga del acuífero ha ido acompañado de una reducción muy importante en los bombeos y una recuperación de niveles, de manera que muchos de los piezómetros abiertos en el acuífero confinado en el sector costero han pasado a ser surgentes. Esto, a su vez, ha inducido la extrusión del agua salada previamente intruida. La nueva situación se ha podido caracterizar a partir de controles físico-químicos en ciertos puntos. A este respecto, son particularmente ilustrativos los resultados de registros verticales de

conductividad en el mencionado piezómetro IGME-2, donde se advierte con claridad el lavado progresivo del agua salada. Así, en marzo de 1996, tras los primeros episodios importantes de recarga, la conductividad pasó a ser de algo menos de 20 mS/cm, mientras que en enero de 1997 y abril de 2001 los valores estaban entre 2 y 3 mS/cm (García-Aróstegui *et al.*, 2003).

La sequía de 1993-1995 no es el único episodio en el que se ha documentado la intrusión marina en el acuífero estudiado. Durante 1985 y 1986 se detectó en el acuífero superior otra situación similar, incluso más intensa, con un eje de penetración preferencial a lo largo del cauce (CHSE, 1987). En ese periodo no se encontraron indicios de intrusión en el acuífero inferior, aunque sí se identificaron anomalías que se imputaron a aguas salinas relacionadas con materiales del sustrato (CHSE, 1987; García-Aróstegui *et al.*, 2003).

El objetivo del presente trabajo es obtener datos adicionales que permitan conocer la distribución de la salinidad en el sector deltáico del acuífero tras el periodo de recarga de 1996 y 1997. Esto se ha abordado básicamente mediante el uso de técnicas de prospección geofísica. El estudio se ha complementado con la realización de medidas de las características físico-químicas de las aguas subterráneas, tanto a partir de muestras tomadas en captaciones como de registros verticales de conductividad en piezómetros. El trabajo de campo se llevó a cabo en septiembre del año 2003, aunque algunos controles físico-



**Fig. 3.-** Localización de las estaciones de sondeos electromagnéticos y los perfiles de tomografía.

**Fig. 3.-** Location of the electromagnetic sounding stations and the electrical imaging profiles.

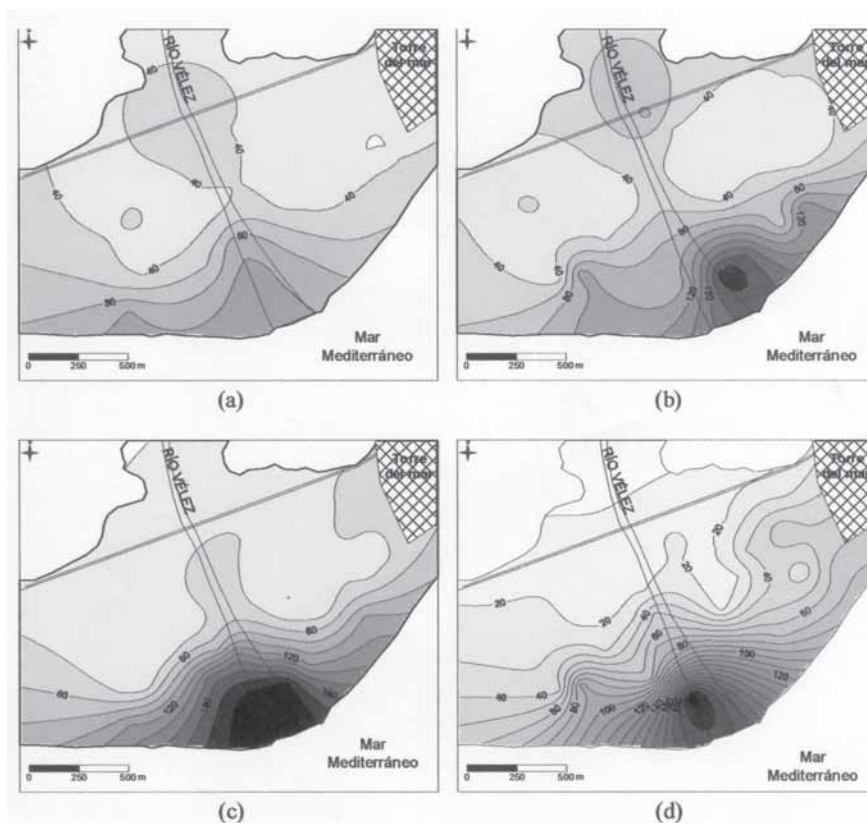


Fig. 4.- Mapas de isovalores (en mS/m) de la conductividad eléctrica de las formaciones, en los dipolos 10 HD (a: 7,5 m de profundidad, aprox.), 10 VD (b: 15 m), 40 HD (c: 30 m) y 40VD (d: 60 m), obtenidos de los sondeos electromagnéticos.

Fig. 4.- Maps of electrical conductivity (in mS/m) of the 10 HD (a: 7,5 m deep, approx.), 10 VD (b: 15 m), 40HD (c: 30 m) and 40VD (d: 60 m) dipoles.

químicos de las aguas subterráneas se han seguido realizando a lo largo del 2004.

### Metodología

Se han empleado dos métodos de prospección geofísica de superficie: tomografía eléctrica (ERI: "Electrical Resistivity Imaging") y sondeos electromagnéticos en el dominio de frecuencias. El primero permite medir la resistividad aparente del terreno. Se usó un resistivímetro Syscal-48, el cual incluye un cable con 48 electrodos conectados a intervalos de 10 m que supone una combinación de quadri-electrodos de 346 puntos de medida. Se empleó un dispositivo geométrico Wenner-Schlumberger que permite alcanzar una profundidad de investigación de casi 100 m. El equipo incluye un ordenador que varía el espaciado y posición de los electrodos y –tras un proceso numérico de inversión– genera un perfil de resistividad. Para el segundo método, que suministra valores de la conductividad eléctrica aparente del terreno, se empleó un equipo Geonics EM-34 con dos bucles conectados, que permite seleccionar fácilmente el espaciado entre bucles de 10, 20 y 40 m con configuraciones de dipolo horizontal y vertical. Las profundidades efectivas de exploración son variables según

la configuración, oscilando entre aproximadamente 7,5 m (dipolo horizontal, 10 m de espaciado) y 60 m (dipolo vertical, 40 m de espaciado).

En la figura 3 se incluye la localización de los 35 sondeos electromagnéticos y de los cuatro perfiles de tomografía realizados.

### Resultados

Se han elaborado gráficos de isolíneas de conductividad eléctrica aparente del terreno obtenidos a partir de los sondeos electromagnéticos. En la figura 4 se presentan una serie de mapas correspondientes a diferentes configuraciones de los sondeos. En todos los gráficos se observa un incremento de la conductividad desde el interior hacia la costa, con valores máximos en las inmediaciones de la desembocadura del río Vélez a una profundidad entre los 30 y 45 m.

Si se comparan los cuatro mapas de la figura 4 se observa que a profundidades bajas (a) los valores mayores son de 1,2 mS/cm. Estos valores son inferiores a los que se registran a profundidades medias (c), donde los valores máximos son de aproximadamente de 2,4 mS/cm. A la profundidad mayor reconocida (d), se obser-

va que los valores más altos son de aproximadamente 2 mS/cm.

En cuanto a los perfiles de tomografía, en la figura 5 se representa uno de ellos coincidente aproximadamente con el de la figura 2. La sección que propone el modelo indica una anomalía de baja resistividad eléctrica (5 ohm-m) a una profundidad entre 15 y 30 m. Encima se sitúa una delgada capa con resistividades entre aproximadamente 20 y 40 ohm-m. Debajo, hasta la máxima profundidad reconocida, se identifica de nuevo una capa de alta resistividad, mayor aún que la superficial (50-70 ohm-m).

En cuanto a las medidas de conductividad del agua en piezómetros y captaciones, el piezómetro A, de 12m de profundidad (Fig. 2), atraviesa el acuífero superior y se han medido valores entre aproximadamente 8 y 28 mS/cm a lo largo de su columna, con un cambio muy marcado entre ambos localizado aproximadamente a los 7 m de profundidad (Fig. 5). Por el contrario, un registro realizado en pleno periodo de recarga (enero de 1997) indicaba valores entre 3 y 4 mS/cm (CHSE, 1997). En otro piezómetro situado unos 600 m aguas arriba (C, Fig. 2) se han medido valores de alrededor de 2 mS/cm a lo largo de toda la columna. Además de estos registros, se dispone de valores de conductividad del agua en muestras en bombeo de captaciones del acuífero superior, localizadas en el extremo septentrional del área de estudio, con valores cercanos a 1 mS/cm.

En cuanto al acuífero inferior, en el piezómetro 153 la distribución de los valores de conductividad a lo largo de la columna es bastante homogénea, con un valor de aproximadamente 1,2 mS/cm (Fig. 5). Esto contrasta con valores previos entre 8 y 15 mS/cm obtenidos en marzo de 1996, es decir, a comienzos del periodo de recarga (CHSE, 1997). El registro obtenido en el piezómetro IGME-2 es similar al del 153 y pone de manifiesto que continúa la tendencia de disminución de salinidad que García-Aróstegui *et al.* (2003) documentan para este punto desde octubre de 1993 hasta abril de 2001.

Es de reseñar que, como consecuencia de ciertos episodios de precipitaciones intensas en el área a principios de 2004, el río en su crecida ha destruido los dos piezómetros representados en la figura 5. También han desaparecido a lo largo del tiempo otros que aparecen en la figura 2, como los dos que se sitúan más cerca del mar. Por otra parte, la situación exacta respecto del mar de la instalación 153/A que indica la figura 7 no coincide exactamente con la de la figura 2, debido a mo-

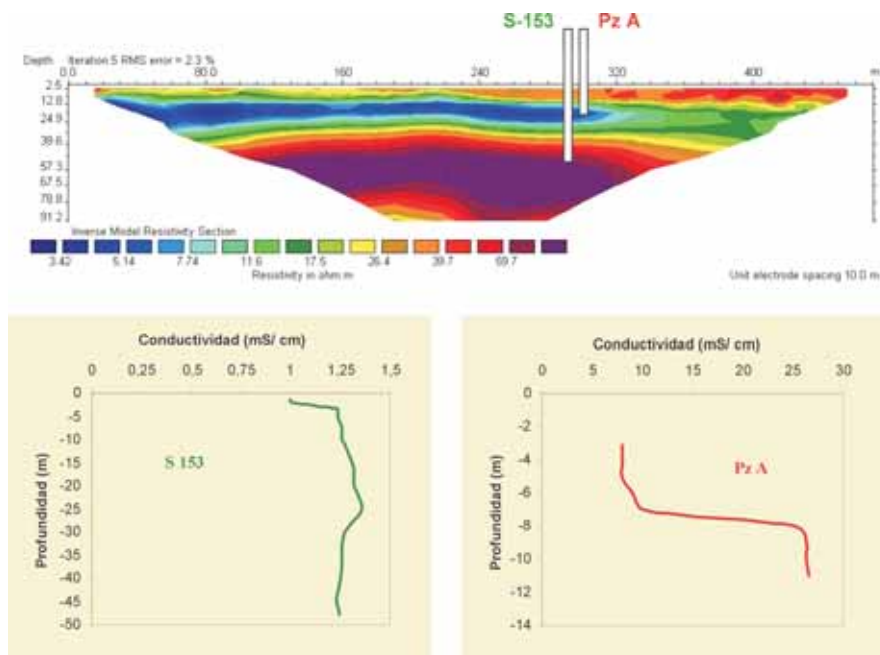


Fig. 5.- Perfil 1 de resistividad aparente obtenido a partir de la tomografía eléctrica (ver situación en la Fig. 3). Se incluye la situación aproximada y los registros de conductividad eléctrica en dos piezómetros.

Fig. 5.- Cross-section of apparent resistivity from the Electrical Imaging (it corresponds to the profile 1 in Fig. 3). The approximate location and the electrical conductivity logs in two piezometers are also shown.

dificaciones recientes en la línea de costa en ese sector.

### Discusión

Los dos métodos geofísicos empleados dan resultados comparables, esto es: existencia de una franja de terreno de mayor conductividad (o menor resistividad) entre otras dos de menor conductividad. La capa más conductora tiene una mayor penetración tierra adentro en coincidencia aproximadamente con el cauce del río Vélez en su sector de desembocadura, y su profundidad está entre 15 y 30 m (según la tomografía eléctrica) y entre 30 y 45 m (según la interpolación de los sondeos electromagnéticos). De acuerdo con los datos disponibles de las perforaciones en el área, la capa de mayor conductividad relativa debe corresponder a la base del acuífero superior y, sobre todo, al nivel limo-arcilloso que separa los dos acuíferos. En este sentido, las estimaciones de profundidad más ajustadas parecen ser las de la tomografía eléctrica.

Los datos disponibles sobre la salinidad del acuífero inferior, tanto directos (medidas de conductividad en piezómetros) como indirectos (métodos geofísicos) indican una recuperación prácticamente total de la severa intrusión marina sufrida entre 1993 y

1995, con valores de conductividad por debajo de 1,3 mS/cm en su mayor parte.

En el acuífero superior se han medido valores de conductividad comprendidos aproximadamente entre 1 y 8 mS/cm. Son aguas salobres como las que se identificaban al final del periodo de sequía (García-Aróstegui *et al.*, 2003), por lo que el efecto de extrusión salina tras la recarga ya no se identifica. Un cambio respecto a dicha situación está en la orientación de las líneas de igual salinidad, aquí determinadas por métodos geofísicos. Según García-Aróstegui *et al.* (2003), el que los valores más altos se localizaran entonces en la margen derecha del río obedecía a la propia ubicación de las captaciones. Los resultados de este estudio indican que los valores más altos se han desplazado hacia el eje del cauce e incluso a su margen izquierda. Otro cambio afecta a la distribución vertical de la salinidad, que, según (García-Aróstegui *et al.*, 2003), apenas mostraba variaciones. En este estudio, sin embargo, se han obtenido datos directos e indirectos que apuntan a una penetración tierra adentro de aguas salobres, más parecida a la típica morfología de cuña, con el principal avance coincidente con el cauce del río.

### Conclusiones

La prospección geofísica, apoyada por

controles de conductividad eléctrica del agua subterránea, en el sector costero del acuífero del río Vélez, pone de manifiesto que los efectos de la intrusión marina que afectó con intensidad al acuífero confinado en ese sector durante el periodo de sequía de 1993-1995 han desaparecido prácticamente en las fechas de este estudio (septiembre de 2003), debido a la importante recarga ocurrida en 1996-1997 y a la reducción de extracciones en los años siguientes.

En el acuífero libre, el efecto de la recarga se ha disipado en su mayor parte, pues durante el estudio se han identificado aguas salobres que ocupan una extensión similar a la que tenían al final de la sequía. La distribución en planta y en perfil de este agua es, sin embargo, algo diferente de la de entonces, pues existe una zona principal de avance relacionada con el cauce del río Vélez, que en la anterior situación se encontraba claramente desplazada hacia la margen derecha. Ello debe responder a modificaciones en la situación de los puntos de bombeo próximos y/o a variaciones locales de la permeabilidad del acuífero. También se detectan cambios en la distribución vertical de salinidades, que ahora aparece mejor estructurada según la típica forma de cuña hacia tierra adentro.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el contrato SWIMED (SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT IN MEDITERRANEAN COASTAL AQUIFERS), ICA3-CT2002-10004 (V FP, INCO Program, European Commission).

Se agradece la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Sur de España, por facilitar el acceso a los piezómetros.

### Referencias

- CHSE. (1987). *Proyecto 12/8*. Dirección General de Obras Hidráulicas.
- CHSE (1997). *Asistencia técnica para el seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad*. Comisaría de Aguas del Sur de España, Ministerio de Medio Ambiente.
- García-Aróstegui, J.L. (1998). *Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 377 p.
- García-Aróstegui, J.L., Cruz San Julián, J.J., y Hidalgo Estévez, M.C. (2003). En: *Tecnología de la Intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países mediterráneos*. Tomo I, 261-270.