

Procesos de intrusión-extrusión marina y propuestas de gestión integrada en acuíferos detríticos costeros mediterráneos: río Vélez (Málaga, España)

J.L. García-Aróstegui⁽¹⁾ y J. Benavente⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Avda. Alfonso X El Sabio, 6- 30008 Murcia (España).
E-mail: j.arostegui@igme.es

(2) Instituto del Agua de la Universidad de Granada. c/ Ramón y Cajal, 4, 18071 Granada (España).
E-mail: jbenaven@ugr.es

RESUMEN

La reversibilidad de los procesos de intrusión marina en términos de salinidad, sin tener en cuenta las posibles modificaciones de la matriz arcillosa, ha sido notoria en varios acuíferos detríticos del sur de España, en el periodo húmedo posterior a la sequía de mediados de los años noventa del pasado siglo. Uno de estos casos ha sido el acuífero de Vélez, donde la coincidencia del citado periodo húmedo con el inicio de la regulación superficial de la cuenca del río Vélez ha reducido la salinidad en la zona costera que se ha mantenido con valores de agua dulce hasta la actualidad debido a una reducción de los bombeos de aguas subterráneas. El previsible incremento paulatino de las demandas de agua plantea la necesidad de llevar a cabo una explotación sostenible mediante la integración de los recursos hídricos subterráneos con los del Embalse de la Viñuela y las Aguas Residuales depuradas.

Palabras clave: acuíferos costeros, control de las aguas subterráneas, gestión integrada de recursos hídricos, intrusión marina, Málaga, sistema del río Vélez

Seawater intrusion-extrusion processes and integrated management proposals in Mediterranean coastal detrital aquifers: Vélez river (Málaga, Spain)

ABSTRACT

The reversibility of the seawater intrusion processes in salinity terms, without considering the feasible modifications of the argillaceous matrix, has been well-known in several detrital aquifers of southern Spain, in the later humid period to the ninety's of the last century drought. One of these cases has been the Vélez aquifer, where the coincidence of the mentioned humid period with the beginning of the superficial regulation of the Vélez river basin has reduced the salinity in the coastal zone that has stayed with values of freshwater until the present time because of the groundwater pumping reduction. The establishment of a sustainable exploitation considering the groundwater resources, water of Viñuela reservoir and recycled wastewater is necessary before the expected gradual increase of water demands.

Key words: coastal aquifers, groundwater monitoring, integrated water resources management, Málaga, río Vélez system, seawater intrusion

Introducción

Los dos principales impactos a que se ven expuestas en su estado químico las masas de agua subterránea de España son, con carácter general, las elevadas concentraciones de nitratos y la salinización por intrusión marina. En el primer caso, la causa hay que buscarla en la importante tradición agrícola de regadío de España, con la actividad fertilizadora que conlleva, y afecta tanto a zonas continentales como costeras. El segundo de los problemas citados es exclusivo de las zonas costeras y su origen reside en los frecuentes desequilibrios entre recursos y demandas de agua

que afectan a la franja mediterránea española y a las áreas insulares de su territorio, que están caracterizados por demandas de agua generalmente elevadas respecto a los recursos disponibles. Ello obedece, del lado de la demanda, a: (1) el mayor asentamiento de población en estas áreas- y el impacto estacional que el turismo produce en ello-; (2) la ubicación preferente de zonas regables con cultivos de alta rentabilidad y (3) la concentración industrial, vinculada a importantes puertos. Frente a ello, estos territorios suelen presentar un clima que impone recursos hídricos superficiales escasos o, al menos, concentrados en los periodos del año de menor demanda de agua, con

lo que se explica la circunstancia de desequilibrio antes apuntada.

Prueba del alcance de este problema para la calidad de las aguas subterráneas es que dos tercios de las masas de agua subterránea del ámbito peninsular mediterráneo e insular español presentan síntomas de contaminación por intrusión marina (Gómez Gómez *et al.*, 2003). De los casos afectados, el 20% alcanza el diagnóstico más preocupante (intrusión "general") de los tres considerados: local, zonal y general. En Sánchez y Castillo (2005) se describen los principales acuíferos del litoral mediterráneo andaluz y puede comprobarse la existencia de numerosos casos con problemas estacionales de intrusión marina, agravados en periodos de sequía.

El caso que aquí se describe, el acuífero costero del río Vélez (provincia de Málaga), es buen ejemplo de las consecuencias de los dos impactos antes citados. En el presente trabajo no se pretende describir la problemática de los nitratos, sino que se centra, por un lado, en exponer las razones del problema de la intrusión marina y, en concreto, en dar a conocer la reversibilidad de este proceso en términos de salinidad de las aguas subterráneas, sin entrar a valorar las eventuales modificaciones físico-químicas en las condiciones de la matriz porosa. Esta circunstancia no es novedosa, pues, por ejemplo, en un acuífero costero próximo (río verde de Almuñécar, provincia de Granada) ha sido ya objeto de varios trabajos (Fernández-Rubio *et al.*, 1986; Fernández-Rubio y Jalón, 1988; Calvache y Pulido, 1990; Carrasco *et al.*, 1999; Benavente *et al.*, 2005b), aunque la geometría y el funcionamiento de dicho acuífero son más sencillos que el caso que aquí nos ocupa. Por otro lado, en el presente trabajo se plantean las medidas oportunas para conseguir que el citado proceso de salinización no se vuelva a producir. Tales medidas se basan, en general, en la deseable gestión integrada de los diferentes recursos hídricos disponibles actualmente en la cuenca del río Vélez, a saber: aguas procedentes de un embalse, aguas subterráneas y aguas residuales urbanas depuradas.

Una vez expuestos los objetivos de este trabajo, en apartados siguientes se efectuará una descripción del ámbito hidrológico y socio-económico del área de estudio; luego se relacionarán los principales estudios hidrogeológicos previos; a continuación se describirán las características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero, para centrarse más adelante en la caracterización de los procesos de intrusión-extrusión y finalizar con una referencia a las principales estrategias aplicables para la gestión integrada de los recursos hídricos.

Descripción del área de estudio

La masa de agua subterránea del río Vélez está situada en el sector costero central de la comarca de la Axarquía, a unos 30 km al este de la ciudad de Málaga (figura 1). Ocupa la cuenca baja del río Vélez con su afluente principal, el río Benamargosa, y se incluyen, asimismo, los depósitos aluviales costeros del río Seco, situados al este. Coincide con una llanura aluvial que ha sido utilizada para la agricultura de regadío, tradicionalmente de caña de azúcar y productos hortícolas, en especial en las "vegas" de Vélez-Málaga, a cuyo extenso término municipal pertenece la mayor parte de la superficie del acuífero. En los últimos años el laboreo agrícola de regadío se está extendiendo por las laderas de la llanura aluvial, para el cultivo, casi exclusivo, del aguacate.

En cuanto a núcleos de población en el área, destacan los de Vélez-Málaga y Torre del Mar, este último en el borde costero y dependiente administrativamente del anterior. Su población conjunta en 2005 es de aproximadamente 65.000 habitantes, con incrementos importantes en el segundo núcleo durante el verano debido al turismo. En el periodo 1994-2005 se ha comprobado un incremento demográfico del 19%. En la actualidad ambos núcleos pueden considerarse prácticamente unidos en el contexto del importante desarrollo urbano que experimenta la parte más baja de la llanura aluvial. La ocupación del terreno por zonas urbanas y de servicios se está haciendo sobre todo en detrimento de terrenos de las vegas agrícolas.

La cuenca del río Vélez tiene una extensión de 610 km². Desde el punto de vista administrativo, se incluye dentro del ámbito de gestión de la denominada Cuenca Mediterránea Andaluza (anteriormente Confederación Hidrográfica del Sur de España). Su regulación se llevó a cabo a mediados de la década de los años noventa del pasado siglo con la entrada en funcionamiento del sistema del embalse de la Viñuela (figura 1).

Tradicionalmente, el abastecimiento a la población de la zona costera se efectuaba a partir de aguas subterráneas, mientras que al riego de los cultivos que se concentraban en las vegas de la parte baja de la cuenca se destinaban sobre todo aguas superficiales derivadas por acequias. Las aguas superficiales excedentarias circulaban hacia el mar y el caudal de esta descarga, por lo menos de forma estacional, solía ser importante. A partir de finales de los años setenta, el aumento paulatino de la demanda para abastecimiento y riego, con una ampliación sustancial de la superficie dedicada a los cultivos subtropicales sobre las laderas próximas al valle aluvial, provocó el incre-

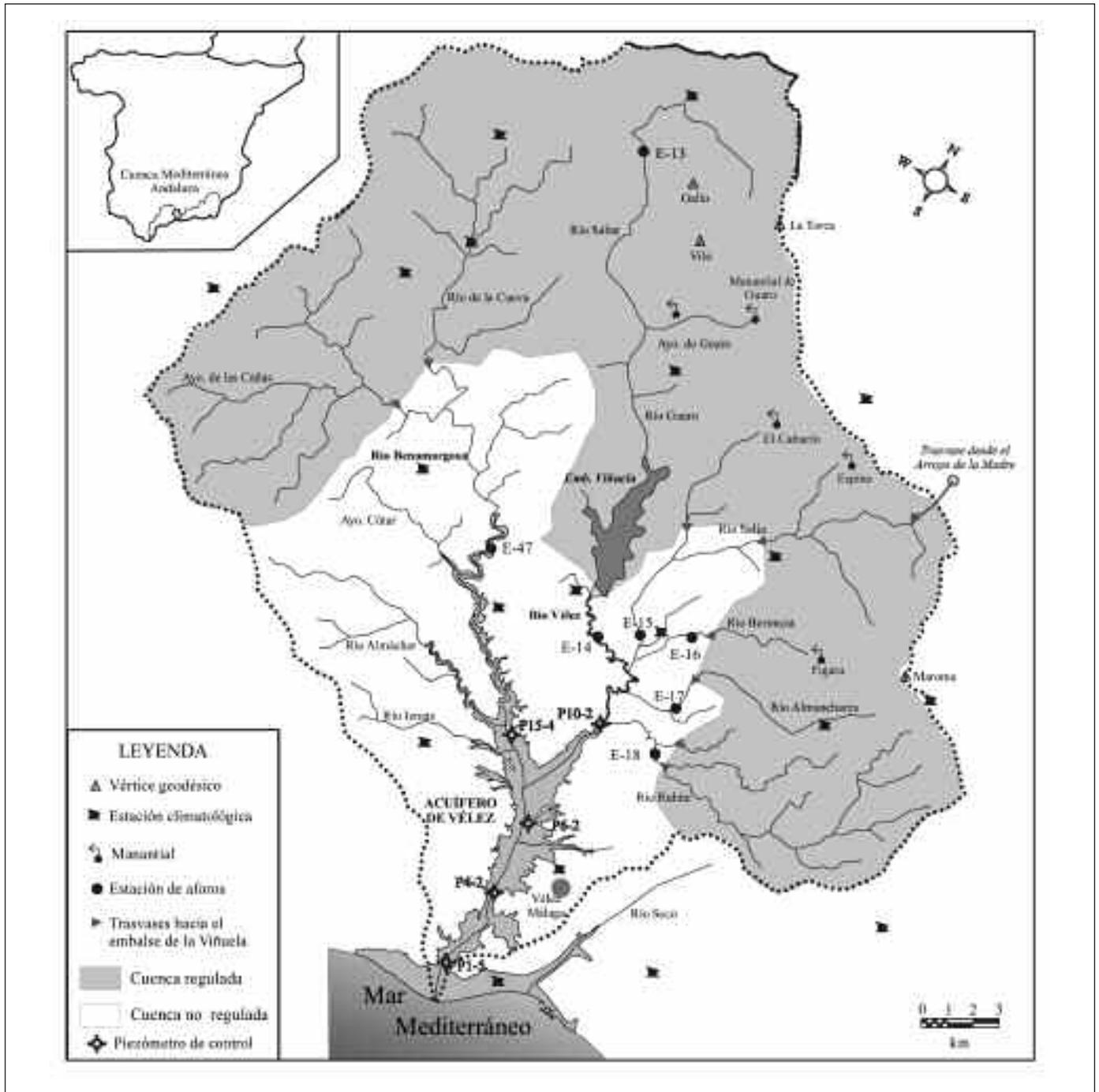


Figura 1. Cuenca hidrográfica del río Vélez y principales elementos de gestión hídrica
 Figure 1. Hydrographical basin of Vélez river and main elements of water resources management

mento del caudal bombeado en un número creciente de captaciones de agua subterránea y la sustitución de captaciones de excavación manual por sondeos. La explotación de las aguas subterráneas contribuyó así a un considerable desarrollo económico de esta

comarca, pero la falta de planificación pronto dio lugar a la aparición de síntomas negativos relacionados con la explotación intensiva. Así, en los estiajes se registraban importantes descensos de los niveles piezométricos, especialmente en ciclos secos, y

empezó a advertirse un progresivo deterioro de la calidad del agua subterránea asociado a la intrusión marina.

El sistema del embalse de La Viñuela está incluido dentro del denominado Plan Guaro para el riego y abastecimiento de la Costa del Sol oriental de Málaga. Dicho sistema está constituido por la presa de La Viñuela (173 hm³ de capacidad) y ocho presas de derivación para trasvasar caudales desde los principales cursos de la cuenca hacia dicho embalse. Se logra regular así una superficie de unos 440 km², lo que supone el 72% de la superficie total de la cuenca hidrográfica. Las aguas embalsadas se destinan al riego de los cultivos situados en la margen izquierda del valle bajo del río Vélez por debajo de la cota 140 (unas 3.200 ha), al abastecimiento de los núcleos urbanos de la Costa del Sol oriental (entre Málaga y Nerja) y, eventualmente, al suministro de la ciudad de Málaga. La entrada en servicio del embalse se produjo en el año 1989. Durante el primer quinquenio de la década de los noventa, coincidiendo con un importante periodo de sequía, se fueron terminando obras complementarias (presas de derivación y canales principales de abastecimiento y riego). En este periodo, el acuífero vio reducidos considerablemente sus recursos, con unos descensos de niveles cada vez más acusados en los estiajes. La situación más alarmante se alcanzó a finales del estiaje de 1995, con escasas reservas en el embalse y en el acuífero, lo que afectó al abastecimiento a la población y al regadío. Las importantes aportaciones pluviométricas de los años 1996 y 1997 pusieron fin al periodo de sequía. Se produjo el llenado completo del embalse e, incluso, hubo que realizar varios desembalses en previsión de intensas precipitaciones. Durante estos años se regularizó el abastecimiento a la población desde el embalse, iniciado en 1994, y comenzaron a realizarse desembalses para riego. Los niveles piezométricos se recuperaron con enorme rapidez entre finales de noviembre de 1995 y principios de febrero de 1996, situación que se mantiene en la actualidad, como más adelante se detallará.

Antecedentes

Las primeras investigaciones hidrogeológicas sistemáticas del acuífero de Vélez fueron realizadas por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), a mediados de los años setenta, en el marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS). De forma paralela, el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) llevó a cabo numerosos sondeos de investigación en el delta del río Vélez que

pusieron de manifiesto la existencia de dos tramos acuíferos (CHSE, 1987).

En los estiajes de los primeros años de la década de los ochenta se produjeron descensos importantes de los niveles de agua en la zona del delta, y se incrementó la salinidad en las captaciones para el abastecimiento a Torre del Mar y a la costa occidental de Vélez Málaga. Estos efectos de la intrusión marina y el análisis de la afección a los recursos hídricos que pudiera provocar la construcción del embalse de la Viñuela promovieron la realización del "Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa" (CHSE, 1987), que llevó a cabo la Confederación Hidrográfica del Sur de España entre los años 1984 y 1986.

Durante el año 1987, el Instituto Geológico y Minero llevó a cabo el "Estudio de las posibilidades de lucha contra la intrusión marina mediante la utilización de barreras artificiales en el acuífero de Vélez" (ITGE, 1988), donde se analizó la posibilidad de ejecución de una pantalla semi-impermeable, perpendicular al cauce y situada unos 1.100 m de la desembocadura. En este proyecto se efectuó, además, un ensayo puntual de inyección de lechada de cemento-bentonita y se obtuvo una reducción de la permeabilidad media de tan sólo el 37% respecto a valor inicial.

Entre los años 1990 y 1992, la colaboración científica mantenida entre el Instituto del Agua de la Universidad de Granada, el Departamento de Geología de la Universidad de Málaga y el Instituto de Geología, Geofísica y Geoinformática de la Universidad Libre de Berlín, permitió que se realizaran nuevos trabajos de investigación sobre el acuífero del río Vélez (Winchenbach, 1993).

Entre los años 1995 y 1997 se llevó a cabo el proyecto de "Seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad" (CHSE, 1997).

Entre 1993 y 1997, la Universidad de Granada, desarrolló los trabajos de investigación que dieron lugar a la tesis doctoral "Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)" (García-Aróstegui, 1998).

Entre los años 2003 y 2005 se han llevado a cabo diferentes trabajos y recopilaciones de datos previos en el marco del Proyecto Europeo "Sustainable Water Management in Mediterranean Coastal Aquifers, SWIMED", coordinado por el segundo autor del presente trabajo, en el que este acuífero costero fue seleccionado junto a otros de Italia, Marruecos, Túnez y Palestina debido a sus características favorables, particularmente por la cantidad de información hidrogeológica sobre el mismo que se ha ido generando

en los últimos treinta años mediante los estudios que se han descrito.

El Plan Guaro, antes mencionado, está en la actualidad siendo objeto de una nueva fase de planificación con el objetivo principal de satisfacer la demanda de riego de la margen derecha del valle bajo del río Vélez, con una superficie de cultivos semejante a la de la margen izquierda (3.200 ha). Además de con recursos superficiales regulados por el sistema de La Viñuela, se cuenta para esta nueva fase del Plan con las aguas residuales tratadas de la EDAR de Vélez-Málaga, que ha entrado en funcionamiento recientemente. También se plantea la explotación del acuífero para suplir aproximadamente la tercera parte de una demanda total estimada en algo más de 21 hm³/año.

Características hidrogeológicas

Los materiales acuíferos principales corresponden a depósitos detríticos groseros (gravas y arenas), que representan formaciones aluviales y deltaicas de edad Cuaternario (20 km²). En relación con la permeabilidad del acuífero, se han obtenido valores entre 30 y 300 m/día. La porosidad eficaz varía entre el 2% y el 10% (CHSE, 1987).

El sustrato y los bordes del acuífero están constituidos por materiales metapelíticos de muy baja permeabilidad de los Complejos Alpujárride y Maláguide de la Cordillera Bética, así como por limos y arcillas arenosas del Plioceno, también de permeabilidad

baja. Localmente, esta última formación presenta un tramo basal permeable constituido por conglomerados, el cual ha sido identificado, con carácter confinado, en la proximidad de la zona de confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa. Los mayores espesores de aluvial aparecen también en la citada zona donde –según datos de CHSE (1987)– se alcanzan los 70 m, así como en el sector deltaico, con más de 50 m de potencia y donde se han diferenciado dos tramos acuíferos –confinado, el inferior– separados por un nivel limo-arcilloso poco permeable. Otra particularidad geométrica del acuífero es la existencia, a unos 4 km de la costa, de un estrechamiento coincidente con una elevación del sustrato hasta la cota del nivel del mar. Esta estructura permite diferenciar en el acuífero un sector continental y otro costero, los cuales, en épocas de intensa sequía (finales del estiaje del año 1995), han llegado a quedar independizados debido al descenso de los niveles piezométricos por debajo de la cota del mencionado umbral del sustrato (figura 2).

La recarga del acuífero fue estimada en los años 1984-1985 en unos 33 hm³/año, de los cuales 28 hm³/año procedían de la infiltración de las aguas de los ríos Vélez y Benamargosa y el resto del retorno de riegos (3 hm³/año) e infiltración de la precipitación (2 hm³/año). Las estimaciones más recientes corresponden al periodo 1993/94-1996/97, que incluye años con características hidrometeorológicas muy contrastadas. Esta circunstancia se manifiesta en que la recarga anual estimada ha variado entre 6 hm³ en 1994/95 y más de 100 hm³ en 1996/97. La infiltración del agua superficial supone más del 90% en todos los casos. El

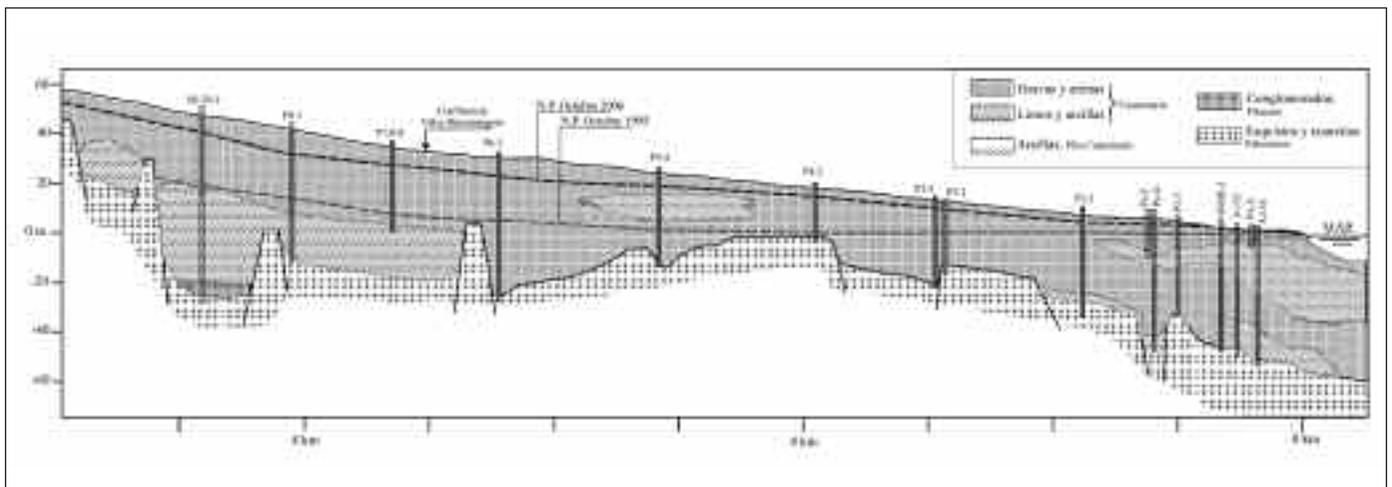


Figura 2. Corte hidrogeológico esquemático del acuífero del río Vélez
 Figure 2. Schematic hydrogeological section of Vélez river aquifer

régimen hidrológico del acuífero está, pues, estrechamente condicionado por las actuaciones de regulación de la cuenca del río Vélez y, en particular, por la explotación del embalse de La Viñuela. A este respecto, se ha efectuado una modelización matemática en régimen permanente del acuífero que permite vincular diferentes escenarios de explotación del embalse con las consecuencias en la piezometría y en los componentes del balance hídrico del sistema, con especial atención a las eventuales entradas de agua procedente del mar (García-Aróstegui *et al.*, 1998 y 2000).

Las salidas principales del acuífero se producen por bombeo. Las estimaciones disponibles de extracciones totales y de su distribución para riego y para abastecimiento a nivel anual son: 40 hm³ (34 hm³ y 6 hm³) en el año 1984/85; 39 hm³ (28 hm³ y 11 hm³) en 1993/94; 28 hm³ (27 hm³ y 1 hm³) en 1994-95; 18 hm³ (14 hm³ y 4 hm³) en 1995/96 y sólo 6 hm³ (5 hm³ y 1 hm³) en 1996/97 (García-Aróstegui, 1998; CHSE, 1997). En la situación actual, el abastecimiento a la población y los denominados riegos de la margen izquierda del Guaro se efectúan exclusivamente con aguas del embalse de la Viñuela, por lo que no utilizan las captaciones subterráneas. La explotación por bombeo actual, sobre la que no existen controles que permitan una cuantificación precisa, se destina al exiguo regadío tradicional ubicado sobre el acuífero y a los riegos de la margen derecha que, mediante conducciones provisionales y de forma local, también emplean aguas del embalse. Como ya ha sido indicado, recientemente se están planteando los estudios necesarios para la consolidación de esta zona regable de la margen derecha y culminar así los objetivos del mencionado Plan Guaro.

El volumen de material acuífero es de algo más de 500 hm³, de los que pueden llegar a estar saturados hasta el 90%, y se estima una capacidad máxima de almacenamiento de agua subterránea del acuífero de unos 30 hm³.

En el acuífero existe una densa red de control piezométrico, puesta en marcha como consecuencia de dos estudios hidrogeológicos llevados a cabo por el organismo de cuenca (CHSE, 1987; CHSE, 1997). A partir de los registros piezométricos disponibles puede inferirse para las condiciones actuales un balance hídrico actualmente compensado y unas relaciones río-acuífero tales que durante la mayor parte del año se observa un tramo de río ganador o en equilibrio en los últimos 4-5 km del río Vélez antes de su desembocadura.

En la figura 3 se representan evoluciones de niveles en distintos puntos del acuífero cuya situación puede observarse en las figuras 1 y 2. Las variacio-

nes, tanto estacionales como anuales, en la relación recarga/bombeos explican la tendencia general expresada en el gráfico. Así, por orden cronológico, son patentes los descensos en los meses de verano de los años 1985, 1988 y 1989 (entre 1986 y la mitad de 1988 no hay registro). Las precipitaciones importantes de finales de 1989 inducen una subida apreciable de niveles. Luego se advierte una tendencia general de descenso que culmina a finales de 1995, en relación con el final del importante periodo de sequía. Las importantes precipitaciones de 1996 y 1997, con la recarga asociada que conlleva, junto al hecho ya apuntado de la plena operatividad del embalse de La Viñuela que hace disminuir sensiblemente los bombeos son las causas que explican la evolución registrada desde entonces. Nótese que ya no se identifican niveles negativos en el sector costero del acuífero, circunstancia usual desde el comienzo del registro. Los niveles en los sectores central y costero parecen tender a la estabilización. Tan sólo en los puntos situados a mayor cota la evolución piezométrica indica variaciones estacionales de cierta entidad (figura 3), las cuales son el reflejo de mayores gradientes hidráulicos y permeabilidades. Otro de los efectos recientes observados es que, desde 1997, en el sector costero el nivel piezométrico del tramo acuífero inferior está a cota más alta que el del acuífero superior (del orden de 0,5-1,5 m por encima, con surgencia en algún punto).

Desde el punto de vista hidroquímico, en el sector estrictamente aluvial del acuífero las aguas son mayoritariamente bicarbonatadas cálcico-magnésicas. Ésta es también la facies hidroquímica del agua de recarga principal- la del río Vélez- y es consecuencia de la disolución de los materiales calizo-dolomíticos que abundan en el área de cabecera de la cuenca y cuyo drenaje impone el caudal de base del citado curso. A medida que progresa el flujo subterráneo, la facies evoluciona en el seno del acuífero a bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica (García-Aróstegui *et al.*, 2005). En el sector situado ligeramente aguas arriba del umbral del sustrato se produce un incremento notable de la salinidad, como consecuencia de la agricultura intensiva. En el sector deltaico se observa una mayor diversidad de facies hidroquímicas: existen aguas bicarbonatadas, aguas bicarbonatadas-sulfatadas y también cloruradas sódicas, con elevada salinidad, especialmente en la margen derecha del río Vélez. Este último tipo de aguas no parecen ser resultado de una evolución a lo largo del flujo en el acuífero aluvial, sino aguas congénitas vinculadas a niveles poco permeables en algunos sectores del contacto entre el acuífero aluvial y el sustrato esquistoso.

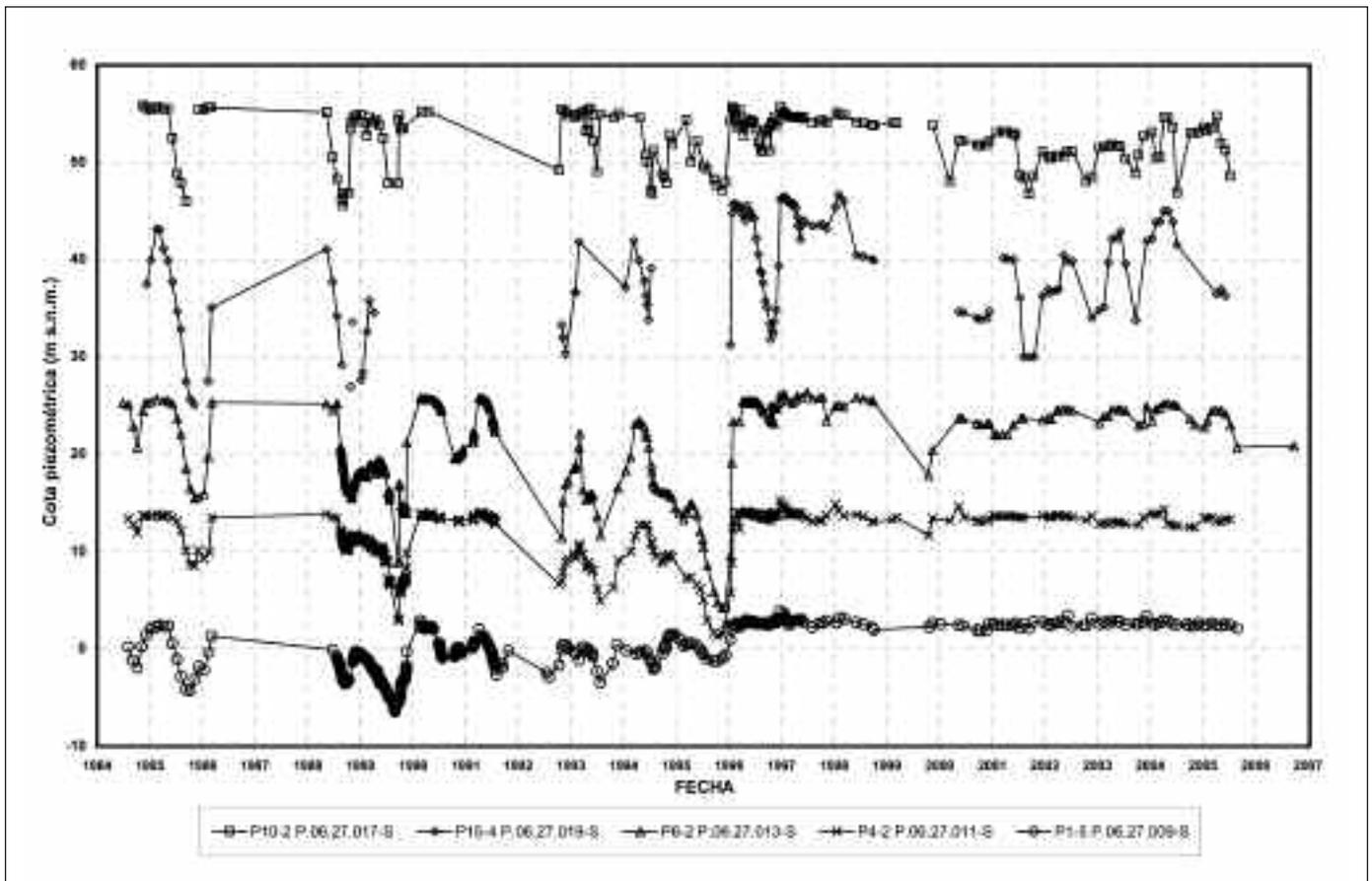


Figura 3. Evolución histórica de niveles piezométricos
 Figure 3. Historical evolution of piezometric levels

Durante la década de los noventa, el problema de la escasez de recursos hídricos debido a la sequía que culminó en el otoño de 1995 se vio agravado por el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas. La concentración de bombes en el sector costero provocó la progresión de la intrusión marina y, con ello, la salinización de numerosas captaciones, situación que ya había sido también advertida en periodos secos precedentes. Por otra parte, la agricultura intensiva que se desarrolla sobre el acuífero conlleva la aplicación de elevadas dosis de fertilizantes, que ha dado lugar a altos contenidos en nitratos en las aguas subterráneas. Durante los años hidrológicos 1993/94 y 1994/95, el 70% de las captaciones existentes presentaban contenidos en nitratos superiores a 50 mg/l, con valores máximos que superaban los 250 mg/l en los sectores central y deltaico. El problema de la contaminación por nitratos persiste en la actualidad y algunos estudios también han puesto de manifiesto la presencia de plaguicidas (García-Aróstegui, 1998).

Trabajos recientes centrados en la distribución de especies de N disueltas sugieren la existencia de procesos de desnitrificación en el acuífero superior del sector costero, asociados verosímilmente a la presencia de materia orgánica en los sedimentos (Vadillo *et al.*, en prensa).

Caracterización de los procesos de intrusión-extrusión marina

En apartados anteriores se ha mencionado la incidencia del proceso de intrusión marina como uno de los principales problemas del acuífero de Vélez. Ya ha sido expuesto que durante algunos años de las décadas de los ochenta y noventa del pasado siglo la concentración de bombes en el sector costero provocó la salinización de numerosas captaciones debido al progreso de la intrusión marina. Este fenómeno de alteración del régimen de flujo subterráneo se produ-

jo por un bombeo excesivamente concentrado debido a una distribución inadecuada de las captaciones. Es pertinente señalar, no obstante, que la elevación del sustrato a la que se ha hecho referencia anteriormente (figura 2) tiene como consecuencia favorable la limitación de un hipotético avance de la intrusión marina aguas arriba de dicho sector.

A lo largo de los años se han efectuado controles detallados del estado del proceso de intrusión, tanto a partir de datos piezométricos como físico-químicos obtenidos en una red de control constituida por piezómetros, pozos y sondeos que aportan información del acuífero superior, inferior o de ambos en el sector deltaico (figura 4).

En el acuífero superior, debido a su reducido espesor, los registros verticales de conductividad eléctrica no han evidenciado la existencia de una interfase

agua dulce-agua salada. Las aguas de este tramo presentan salinidades moderadas (entre 2 y 3 g/l) si bien, en la margen derecha del río, durante el periodo 1993-1995 se registraron mayores salinidades (5-6 g/l) probablemente relacionadas con el bombeo en una zona más permeable (gravas).

En el acuífero profundo, las testificaciones de conductividad realizadas entre finales de los años ochenta y mediados de los noventa permitieron identificar claramente la zona de transición agua dulce-agua salada. Las importantes precipitaciones que tuvieron lugar a principios de 1996 provocaron una significativa mejora de la calidad del agua y un proceso de extrusión marina. Esta disminución de la salinidad continuó progresando y los registros realizados en marzo de 1997, año también anormalmente lluvioso, mostraron valores de conductividad inferiores a 2500

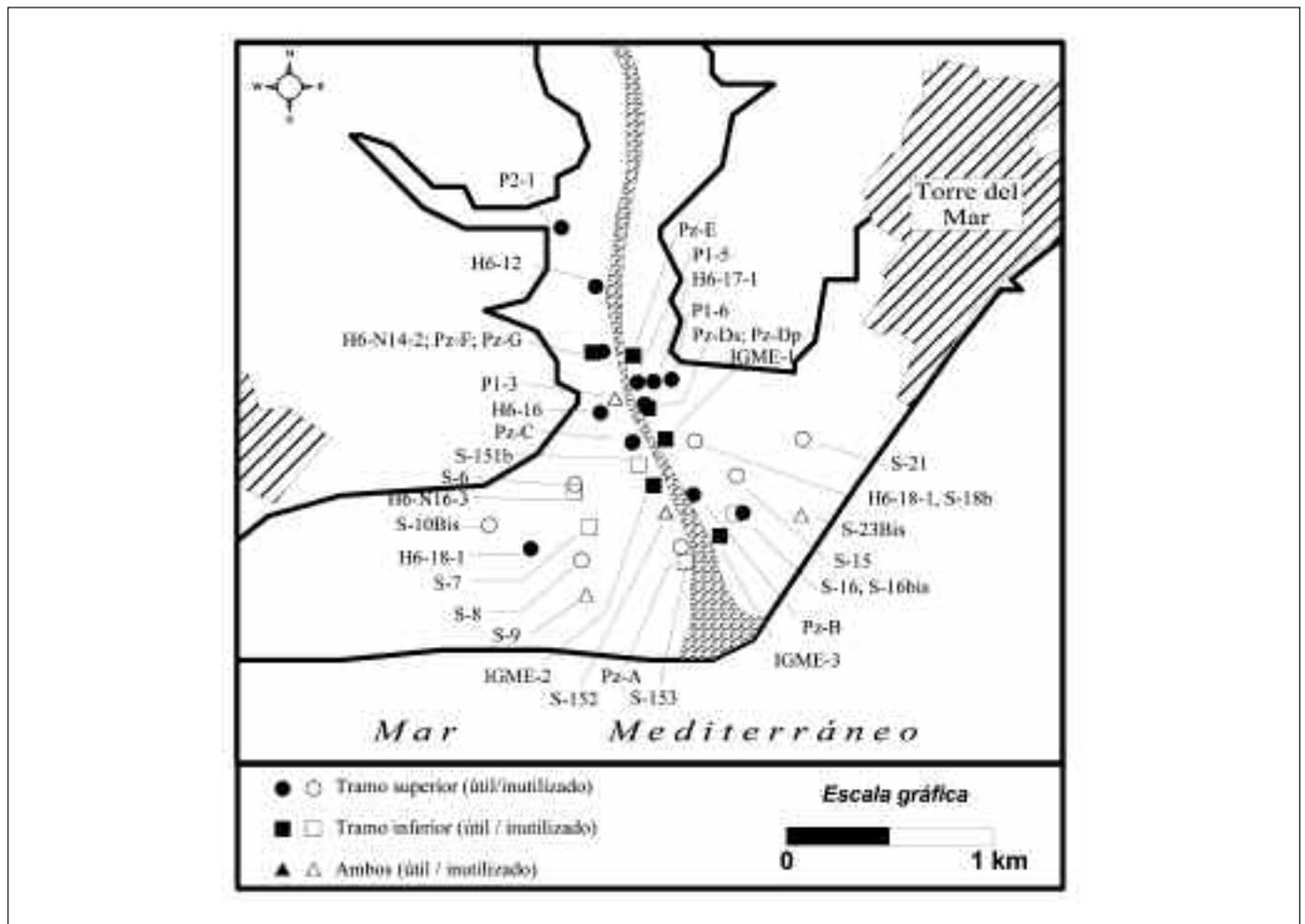


Figura 4. Puntos de control de la intrusión marina
Figure 4. Control points of seawater intrusion

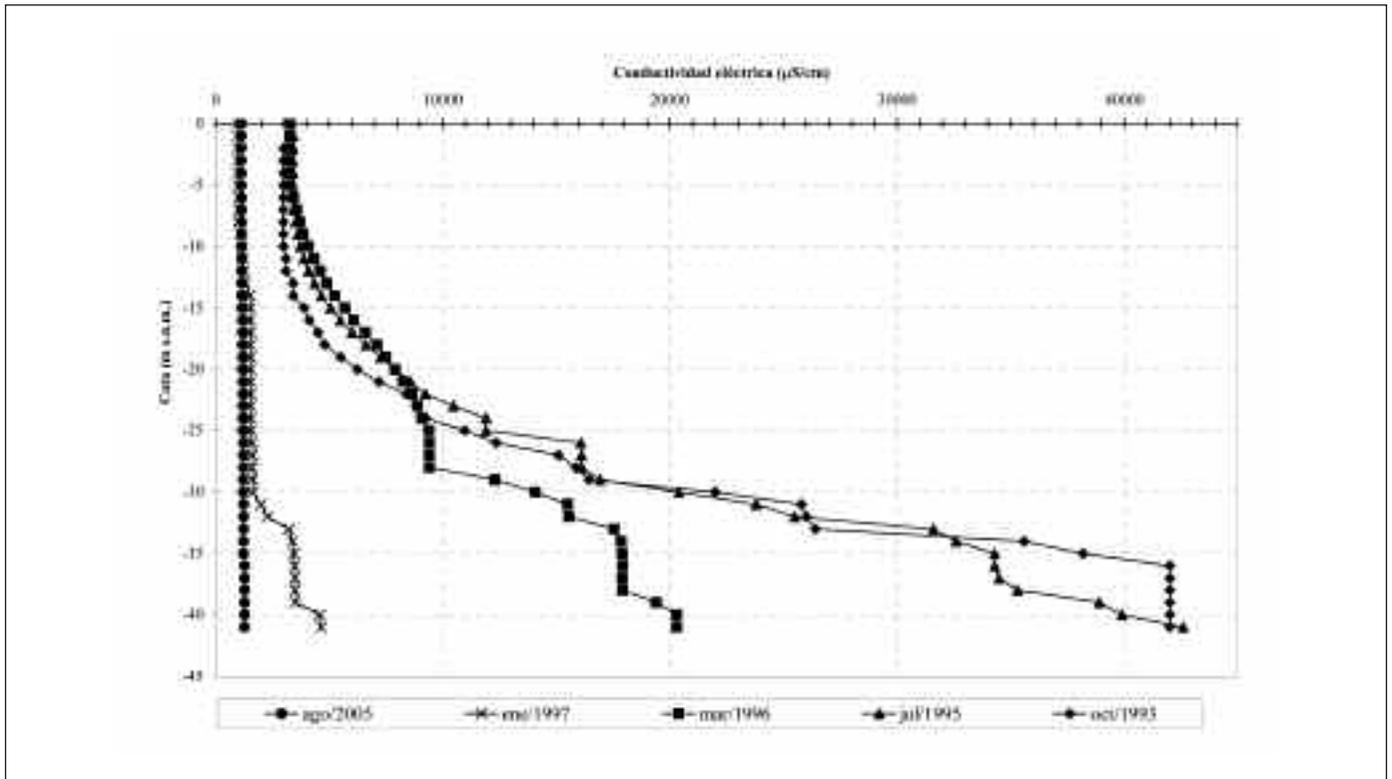


Figura 5. Perfiles verticales de conductividad eléctrica en un piezómetro representativo del tramo acuífero inferior (IGME-2)
 Figure 5. Vertical profiles of electrical conductivity in a representative piezometer of the bottom aquifer (IGME-2)

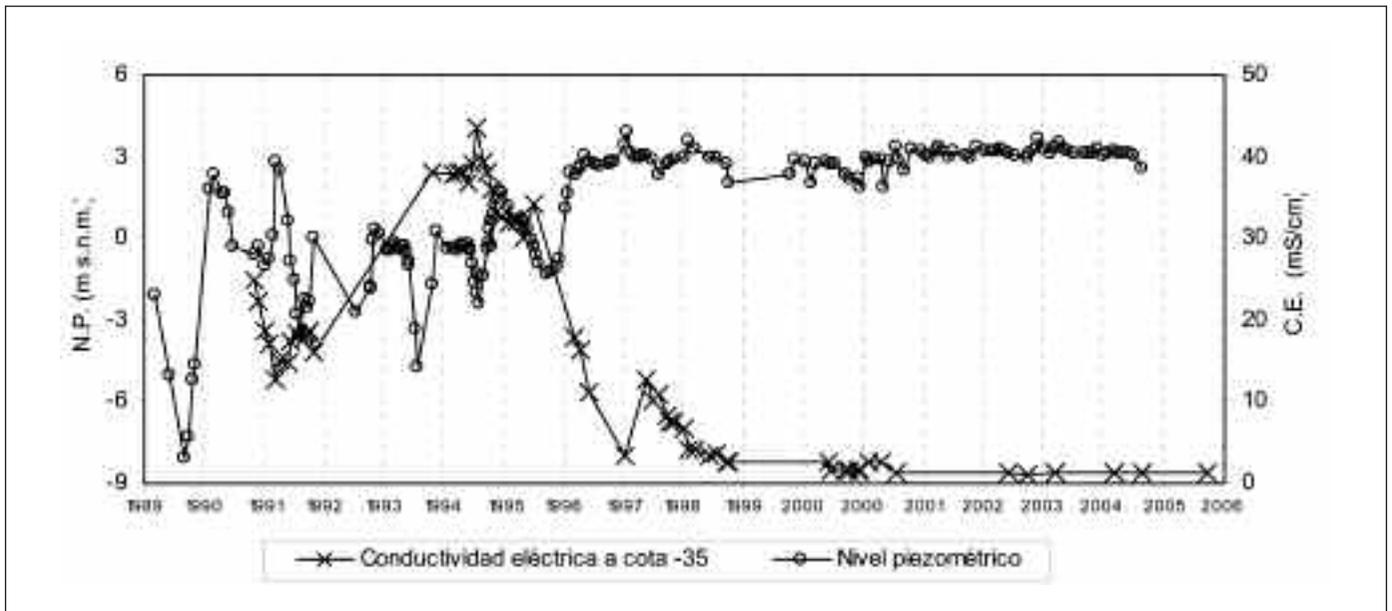


Figura 6. Comparación entre nivel piezométrico y conductividad eléctrica (a cota -35 m s.n.m.), en un piezómetro representativo del tramo acuífero inferior (IGME-2)
 Figure 6. Comparison piezometric level vs. electrical conductivity (-35 m asl), in a representative piezometer of the bottom aquifer (IGME-2)

?S/cm. Esta situación de extrusión marina y recuperación de la calidad de las aguas del acuífero inferior se mantiene actualmente (figura 5), lo cual es resultado principalmente de la reducción de la explotación.

En ambos niveles acuíferos, los controles temporales han permitido evidenciar que, como era de esperar, los ascensos del nivel piezométrico coinciden con una disminución de la conductividad eléctrica de las aguas (figura 6). También cabe señalar que los registros de conductividad efectuados durante 1993/94-1994/95 pusieron de manifiesto un incremento de la salinidad de las aguas respecto a los años anteriores y, en especial, en comparación con las medidas realizadas en los años 1984 y 1985 (CHSE, 1987).

Recientemente, campañas de prospección geofísica (tomografía eléctrica y sondeos electromagnéticos) en el entorno de la desembocadura del río Vélez han permitido extender los resultados de los controles en sondeos, de manera que se alcanza información sobre variaciones espaciales de salinidad en los acuíferos del sector costero. Estas metodologías indican, entre otros aspectos, una mayor efectividad de la extrusión salina en el acuífero inferior, pues en el acuífero superior es de esperar que influyan también otros procesos, como el retorno de riegos o la contaminación superficial asociada a la creciente ocupación urbana del área (Benavente *et al.*, 2005a).

Estrategias para una gestión integrada de los recursos hídricos

La importancia estratégica evidente de los recursos subterráneos en la Costa del Sol Oriental y los problemas planteados por una explotación incontrolada de los mismos ha promovido, según se ha mencionado anteriormente, la realización de diversas investigaciones hidrogeológicas en el acuífero que aquí se trata, entre cuyos objetivos prioritarios destacan los relativos a la comprensión del funcionamiento del acuífero, con especial énfasis en los procesos de intrusión marina, y al impacto de la construcción del embalse de La Viñuela sobre el régimen hidrológico del acuífero. En la actualidad, el interés apunta a la posibilidad de uso conjunto del sistema embalse-acuífero-aguas residuales depuradas, pues la opción de desalinización de agua de mar no es considerada todavía como alternativa viable frente a las otras fuentes.

Entre las herramientas para optimizar la gestión de los recursos hídricos se pueden destacar:

- Completado y mantenimiento de las redes de

control piezométrico y de calidad de las aguas subterráneas.

- Elaboración de modelos de flujo y de transporte de solutos del acuífero en régimen transitorio, los cuales permitirían, entre otros aspectos, prever los efectos de eventuales actuaciones de recarga artificial y de la intrusión marina.
- Elaboración de modelos de uso conjunto embalse-acuífero-aguas residuales, de acuerdo con las variaciones en los escenarios demanda, especialmente adaptados para plantear soluciones frente a la problemática de situaciones de sequía.
- Potenciar la constitución de comunidades de usuarios del acuífero de Vélez como medida clave en la protección cuantitativa y cualitativa de los recursos hídricos subterráneos.

En cualquier caso, el desarrollo de estrategias de gestión de los recursos hídricos debe ir parejo al avance en su conocimiento, sobre todo en lo relativo a las aguas subterráneas que son usualmente las menos estudiadas. En este sentido, el acuífero de Vélez es uno de los que dispone actualmente de una mayor densidad de puntos de control piezométrico e hidroquímico (intrusión marina) en toda la Cuenca Mediterránea Andaluza. Esta infraestructura de control, junto al conocimiento adquirido del acuífero en los diferentes estudios realizados, permiten considerarlo como un "laboratorio natural" para estudiar, a escala real, diferentes cuestiones hidrogeológicas del máximo interés, entre las que podrían citarse el estudio de procesos de flujo y transporte a través de la zona no saturada; el flujo subterráneo y el transporte en medios porosos saturados; los procesos de recarga natural y artificial; los fenómenos de intrusión-extrusión marina y las técnicas de gestión hídrica integrada de los recursos hídricos (embalse, acuífero, aguas residuales convenientemente tratadas y, eventualmente, desalinización).

Conclusiones

Las actuaciones en materia hidrológica en esta zona de demanda de agua elevada y creciente deben iniciar una nueva etapa de planificación y gestión integral sostenible de los recursos hídricos. Desde el punto de vista de la gestión, dado que se trata de una zona propensa a sufrir sequías, no sólo debe tenerse en cuenta el criterio tradicional de gestión de la oferta, consistente en aumentar la disponibilidad de agua (embalse, acuífero, reutilización y desalinización), sino también la gestión de la demanda, línea de

acción que está en la base de las propuestas del reciente Programa AGUA del Ministerio de Medio Ambiente, y, en particular, de su aplicación urgente a las cuencas mediterráneas. El conocimiento actualmente disponible permite identificar estrategias y valorar sus repercusiones. Desde el punto de vista científico, el conocimiento detallado de los procesos hidrogeológicos en casos de estudio como el del acuífero de Vélez puede permitir su extrapolación a sistemas de mayor escala y, es por ello que se considera que el acuífero de Vélez constituye un buen "laboratorio natural".

Como consideraciones de carácter general que plantea el presente trabajo cabe señalar las siguientes:

- El papel de la ciencia en la gestión de las aguas subterráneas debe incidir en los aspectos que permitan una mejor comprensión de los efectos que supondrían diferentes alternativas de uso, especialmente cuando pueden suponer descensos significativos de niveles piezométricos o degradación del agua subterránea.
- En la actualidad, la intrusión marina no supone un problema significativo. Sin embargo, la historia del acuífero demuestra la rapidez con la que se puede reproducir este fenómeno. Para minimizar los riesgos es necesario llevar un control adecuado del acuífero, evitar el incremento de la explotación en el área costera y, en general, mantener un balance hídrico equilibrado, al menos en la zona costera.
- El deterioro de las aguas por los nitratos de origen agrario es uno de los principales problemas medioambientales de la zona. La mayor parte del acuífero presenta contenidos muy por encima del máximo admisible para aguas potables (50 mg/l) de tal manera que tampoco pueden ser consideradas como reserva estratégica para el abastecimiento.
- Teniendo en cuenta lo expuesto, resulta evidente que los usuarios del acuífero deben ser solidarios porque sus acciones individuales se interfieren recíprocamente. Resulta, por tanto, aconsejable la constitución de la Comunidad de Usuarios de Aguas Subterráneas para conseguir una gestión sostenible eficaz, no sólo desde el punto de vista cuantitativo sino también en los aspectos relacionados con la calidad de las aguas.

El agua, con independencia de su origen inmediato (aguas superficiales, subterráneas, depuradas, etc.), constituye un único recurso y un bien preciado que hay que cuidar. De cara a un mejor aprovechamiento, resulta conveniente el establecimiento del

uso conjunto en el sistema hídrico embalse-acuífero-aguas residuales tratadas. La recarga artificial puede jugar un importante papel garantizando una mejora de la regulación del sistema hídrico y, en particular, de la calidad de las aguas del acuífero, evitando la intrusión marina y ampliando la disponibilidad de recursos.

Agradecimientos

Este trabajo se inscribe en el marco del Proyecto Europeo (Programa INCO) "Sustainable Water Management in Mediterranean Coastal Aquifers, SWIMED" (ICA3-CT-2002-10004). Se agradece a la Cuenca Mediterránea Andaluza (Agencia Andaluza del Agua) las facilidades prestadas para el acceso a la información disponible. Nuestro agradecimiento también a los técnicos responsables en Málaga de la Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas (AcuaMed, Ministerio de Medio Ambiente) y de la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía implicados en la nueva fase del Plan Guaro, por los cambios de impresiones mantenidos en varias reuniones. Todas las ideas expuestas son de exclusiva responsabilidad de los autores y no tienen porque coincidir con las de los Organismos donde desarrollan su labor profesional.

Referencias

- Benavente, J., El Mabrouki, K., Himi, M., García-Aróstegui, J.L., Calabrés, C. y Casas, A., 2005a. Uso de técnicas geofísicas para caracterizar la extrusión de agua salina en un acuífero costero mediterráneo bicapa (Río Vélez, provincia de Málaga). *Geogaceta*, 37, 127-130.
- Benavente, J., Hidalgo, M.C. and Carrasco, F., 2005b. Influence of a high recharge episode following a drought period in an aquifer affected by seasonal seawater intrusion (Granada coast, S. Spain). In: Benavente, J., Larabi, A. and El-Mabrouki, K. (eds.), *Monitoring, Modelling and Management of coastal aquifers*. Geological Survey of Spain, Granada, 291-300.
- Calvache, M.L. y Pulido, A., 1990. Simulación matemática del flujo subterráneo en el acuífero del río Verde (Almuñécar, Granada). *Estudios Geológicos*, 46, 301-306.
- Carrasco, F., Vadillo, I., Andreo, B., Benavente, J. y Santos-Olmo, A., 1999. Estudio de la intrusión marina en el acuífero costero del río Verde de Almuñécar mediante registros de conductividad eléctrica del agua en piezómetros. En: Olmo M. y López-Geta J.A. (eds.), *Actualidad de las Técnicas Geofísicas Aplicadas en Hidrogeología*, Instituto Tecnológico y Geominero de España, Madrid, 333-340.

- CHSE, 1987. *Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa. Proyecto 12/87*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Sur de España.
- 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*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Sur de España.
- Fernández-Rubio, R. y Jalón, M., 1988. Nuevos datos sobre el proceso salinización-desalinización del acuífero aluvial del río Verde (Almuñécar). *La intrusión en España (TIAC'88)*, Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 413-438.
- Fernández-Rubio, R., Jalón, M., Benavente, J. y Fernández-Lorca, S., 1986. Proceso de salinización-desalinización en el acuífero costero del río Verde (Almuñécar, Granada). *II Simposio sobre El Agua en Andalucía*, Granada, 303-314.
- García-Aróstegui, J.L., 1998. *Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Memoria inédita. 377 pp.
- García-Aróstegui, J.L., Hidalgo, M.C. and Benavente, J., 2005. Groundwater quality monitoring in a coastal Mediterranean aquifer affected by agricultural contamination and seawater intrusion-extrusion processes (Vélez river, Andalusia, Spain). In: Benavente, J., Larabi, A. and El-Mabrouki, K. (Eds.), *Monitoring, Modelling and Management of coastal aquifers*. Geological Survey of Spain, Granada, 301-313.
- García-Aróstegui, J.L., Padilla, F. y Cruz-Sanjulián, J.J., 1998. Numerical simulation of the influence of the La Viñuela reservoir system on the coastal aquifer of the Vélez River (Málaga, Spain). *Hydrological Sciences Journal*, 43 (3), 459-477.
- García-Aróstegui, J.L., Padilla, F., Hidalgo, M.C. y Cruz-Sanjulián, J.J., 2000. Water management in a coastal region of Southern Spain, the Vélez River catchment area. Simulation of groundwater and surface water flow for the correct freshwater budget. *Hydrogéologie*, 3, 13-22.
- Gómez Gómez, J.D., López Geta, J.A. y Garrido, E., 2003. The state of seawater intrusion in Spain. En: López-Geta, J.A., Gómez, J.D., De la Orden, J.A., Ramos, G. y Rodríguez, L. (Eds.), *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos*. Instituto Geológico y Minero de España, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 8, 169-186.
- ITGE, 1988. *Estudio de las posibilidades de lucha contra la intrusión salina mediante la utilización de barreras artificiales*. Instituto Tecnológico y Geominero de España. Memoria inédita.
- Sánchez, L. y Castillo, A., Eds. y Coords, 2005. *Itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz*. Universidad de Granada-Agencia Andaluza del Agua, Granada, 238 pp.
- Vadillo, I., Benavente J., El-Mabrouki, K., Carrasco, F., López, V. and García-Aróstegui, J.L. (*In press*). Distribution of nitrogen species and evidence of denitrification in the Vélez river aquifer (South of Spain). *WAPO Conference*, Barcelona.
- Wichenbach, M., 1993. *Leitähigkeitsmessungen im delta des río Vélez (Málaga, Spanien)*. Tesis de Licenciatura. Universidad Libre de Berlín. Memoria inédita, 72 pp.

Recibido: enero 2007
Aceptado: mayo 2007