

Cambios en la calidad del agua subterránea debidos a la explotación intensiva del acuífero carbonático de la Sierra de Humilladero (Málaga, España)

Changes in groundwater quality due to intensive exploitation of the carbonate aquifer of Sierra de Humilladero (Malaga, Spain)

Sergio Martos-Rosillo¹, Antonio González Ramón¹, Javier Gustavo Heredia Díaz¹, Antonio Pedrera Parias¹ y Miguel Rodríguez Rodríguez²

¹ Instituto Geológico Minero de España. C/Ríos Rosas. 28003, Madrid. s.martos@igme.es, antonio.gonzalez@igme.es, j.heredia@igme.es, a.pedrera@igme.es

² Universidad Pablo de Olavide. C/ Utrera, km 1. 41089, Sevilla. mrodod@upo.es

ABSTRACT

The Sierra de Humilladero carbonate aquifer, located in the province of Málaga and next to Fuente de Piedra playa lake, is undergoing intensive exploitation of its groundwater since the eighties of the last century. This exploitation has resulted in an important decrease of the piezometric level, which has caused the interruption of the groundwater discharge to the playa lake and the current groundwater extraction of the aquifers and aquitards bordering the Humilladero aquifer. The inversion of the groundwater flow, generated by the intensive exploitation, has modified the hydrochemical characteristics of the groundwater to such an extent that, in the dry season of 2016, it ceased to be appropriate for the urban supply to the populations of Humilladero and Fuente de Piedra. The aquifer response to such exploitation has shown that the hydrochemical changes occur in a much abrupt way than the hydrodynamic ones. For this reason, specific groundwater management guidelines are proposed for this type of aquifer, highly vulnerable to groundwater exploitation due to its small size and the high hydraulic diffusivity of the materials that constitute it.

Key-words: Water quality and hydrochemistry, groundwater management, semi-arid climate.

Geogaceta, 62 (2017), 91-94
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

Los recursos hídricos subterráneos del acuífero carbonático de la Sierra de Humilladero (Málaga) se destinan, fundamentalmente, para el abastecimiento de las localidades de Fuente de Piedra y Humilladero. Los notables descensos del nivel piezométrico, acumulados tras más de una veintena de años durante los que el acuífero ha estado sometido a explotación intensiva del agua subterránea, han provocado un empeoramiento generalizado de su calidad, debido, funda-

mentalmente, al incremento de la salinidad por la mezcla con aguas hipersalinas de los materiales evaporíticos que lo delimitan.

El principal objetivo de este trabajo ha consistido en analizar la respuesta hidroquímica de este acuífero, en el que la ausencia de planificación ha desembocado en la salinización de sus recursos hídricos subterráneos.

Descripción del área de estudio

La Sierra de Humilladero se localiza en la parte septentrional de la provincia de

RESUMEN

El acuífero carbonático de la Sierra de Humilladero, situado en la provincia de Málaga, junto a la laguna de Fuente de Piedra, está sometido a un proceso de explotación intensiva del agua subterránea desde los años ochenta del siglo pasado. Dicha explotación ha ocasionado un importante descenso de la superficie piezométrica, lo que ha provocado que este acuífero haya dejado de alimentar a la laguna y que, en la actualidad, se estén captando aguas subterráneas de los materiales acuíferos y acuitardos que lo delimitan. La inversión del flujo generada por la explotación intensiva ha modificado las características hidroquímicas del agua subterránea hasta tal punto que, en el estiaje del año 2016, esta dejó de ser apta para el abastecimiento a las poblaciones de Humilladero y Fuente de Piedra. La respuesta del acuífero frente a la explotación ha puesto de manifiesto que los cambios hidroquímicos se producen de una forma mucho más brusca que los hidrodinámicos. Por esta razón, se proponen pautas de gestión de las aguas subterráneas específicas para este tipo de acuíferos, altamente vulnerables a la explotación debido a su reducido tamaño y la alta difusividad hidráulica.

Palabras clave: Calidad e hidroquímica de aguas, gestión de aguas subterráneas, zonas semiáridas.

Recepción: 1 de febrero de 2017
Revisión: 21 de abril de 2017
Aceptación: 26 de abril 2017

Málaga (Fig. 1), cerca del límite con las provincias de Sevilla y Córdoba. Las cotas más altas de esta sierra están por debajo de 670 m s.n.m. Sobre la sierra predominan los bosques densos de coníferas con matorral y monte bajo.

La precipitación media anual, en el periodo 1962/63-2015/16, es de 450 mm (IGME, 2016). Desde el punto de vista geológico, el acuífero se encuentra en las Zonas Externas de la Cordillera Bética, dentro del denominado Complejo Caótico Subbético (Martín-Algarra y Vera, 2004). Sobre esta

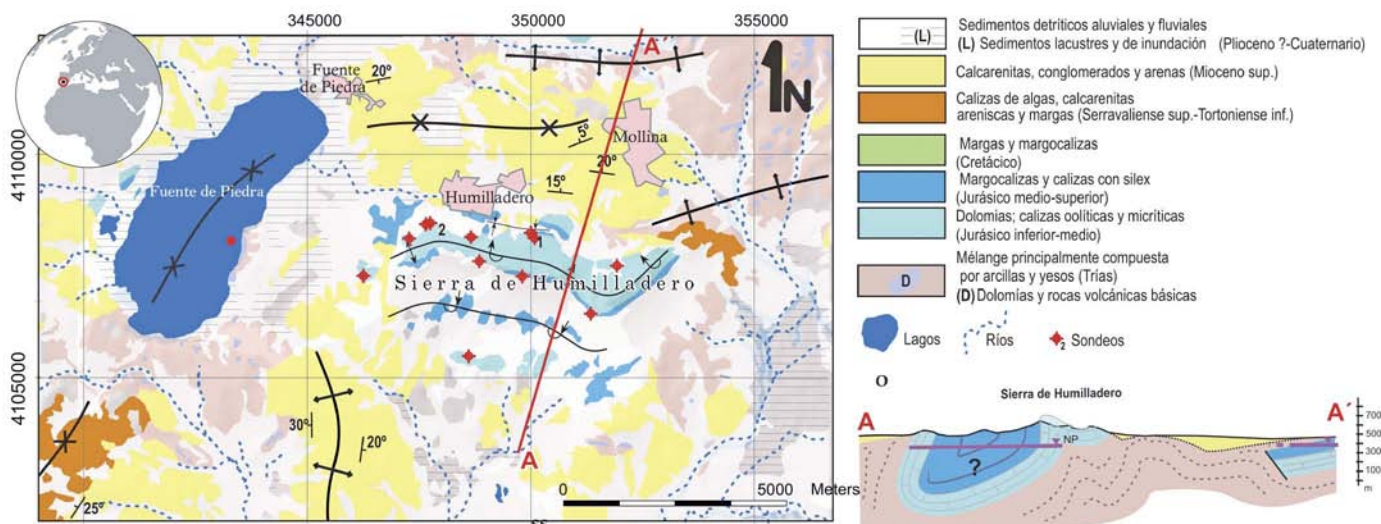


Fig. 1.- Situación y mapa hidrogeológico. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Study site and hydrogeological map. See color figure in the web.

unidad, compuesta fundamentalmente por materiales triásicos en facies germano-andaluzas, se reconocen unidades carbonáticas jurásicas, en las que es posible establecer su estructura interna, y que dan lugar a sierras como las de Molina-La Camorra y Humilladero (Pedrera *et al.*, 2016). En la Sierra de Humilladero, los materiales carbonáticos jurásicos (dolomías, calizas y margocalizas) presentan espesores de hasta 500 m. Los materiales del Mioceno superior afloran en el sector septentrional. Se trata de un conjunto de areniscas bioclásticas de espesor muy variable, y que no suele llegar a los 100 m. También afloran en la zona materiales cuaternarios, todos de poco espesor, relacionados con depósitos de ladera. En lo que se refiere a la estructura, la Sierra de Humilladero se ha interpretado como un anticlinal complejo, del que aflora su charnela y parte de su flanco meridional. Este flanco, que presenta un buzamiento subvertical, localmente invertido, continúa probablemente hacia el sur, donde está cubierto por materiales cuaternarios (IGME, 2016).

La superficie de afloramientos permeables del acuífero (calizas y dolomías jurásicas) es de tan solo 5 km². Los materiales acuitados formados por las margas y arcillas con evaporitas en facies germano-andaluzas, delimitan el acuífero en su base y lateralmente. El acuífero jurásico se encuentra superpuesto y en conexión hidrogeológica con materiales permeables cuaternarios y miocenos en los sectores norte y oeste. Los ensayos de bombeo realizados en los sondeos que perforan las dolomías y las calizas jurásicas de la Sierra de Humilladero suelen

presentar altos valores de permeabilidad, con transmisividades comprendidas entre 70 y 24000 m²/día (IGME, 2016).

En régimen natural el flujo del acuífero circulaba hacia los materiales miocenos y cuaternarios que afloran al norte y al oeste del acuífero (Linares, 1990). Los primeros datos piezométricos (Fig. 2) indican que el nivel se situaba a unos 446 m s.n.m., es decir unos 37 m por encima del fondo de la laguna de Fuente de Piedra (409,1 m s.n.m.), hacia donde se drenaban de forma lateral los recursos del acuífero (IGME, 2016). En este sentido, se debe indicar que la recarga media del acuífero ha sido evaluada con distintos métodos en Ruiz (2012), resultando comprendida entre 0,7 y 1 hm³/año.

La actual situación hidrodinámica es notablemente distinta. Este acuífero empieza a ser explotado a principios de los años ochenta del siglo XX, con la puesta en marcha del sondeo de abastecimiento a Humilladero (sondeo 1, Fig. 1), advirtiéndose que la explotación del acuífero no debía superar 1 hm³/año (IGME, 1981). A finales de los años noventa se construyen nuevos pozos para el abastecimiento de Fuente de Piedra (sondeo 2) y otros destinados a uso agrícola y ganadero. A partir de esos años, la explotación del acuífero crece y los niveles piezométricos comienzan a descender de forma alarmante (5,6 m/año, Fig. 2), produciéndose un vaciado constante del acuífero. El consumo continuado de reservas persiste a fecha de hoy. En 2016, el descenso acumulado del nivel es de 85,24 m con respecto a los niveles medidos en 1980. En junio de 2016, los niveles piezométricos en todo el acuífero estaban comprendidos

entre 360 y 366 m s.n.m. Esta situación ha traído como consecuencia un progresivo empeoramiento de la calidad química del agua subterránea en todo el acuífero que se describe en los siguientes apartados.

En IGME (2016) se indica que la explotación actual del acuífero debe superar los 2,5 hm³/año, de los que 2 hm³/año se destinan para el abastecimiento de las localidades de Fuente de Piedra (0,8 hm³/año) y Humilladero (1,2 hm³/año).

Metodología

Para caracterizar la actual calidad del agua subterránea del acuífero de la Sierra de Humilladero, se realizó, en junio de 2016, una campaña de muestreo en la mayoría de los sondeos instalados en el acuífero. Estas muestras han sido analizadas en el laboratorio del IGME, donde se utilizan técnicas espectrofotométricas y cromatográficas (cromatografía iónica). Por otro lado, se dispone de muestras adicionales de la Base de Datos Aguas del IGME, muestreadas en campañas anteriores. Además se ha contado con medidas de conductividad eléctrica del agua (en adelante CE) y concentración de nitratos, del sondeo de abastecimiento de Fuente de Piedra, facilitadas por el Ayuntamiento de esta localidad. El tratamiento de los datos hidrogeoquímicos se ha realizado con el programa AQUACHEM 4.0.

Resultados

En la figura 3 se presenta un diagrama de Piper en el que se han representado los análisis químicos, que proceden de la base

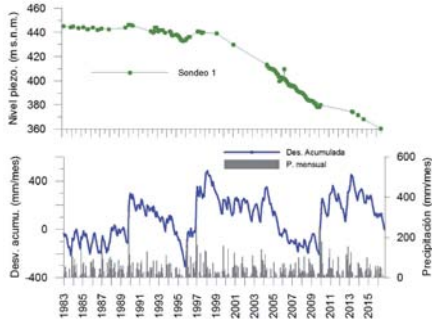


Fig. 2.- Evolución piezométrica en el pozo de abastecimiento a Humilladero (Sondeo 1), superior; desviación acumulada y precipitación mensual en la Sierra de Humilladero, inferior. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Piezometric evolution in the urban supply well of Humilladero (Drill 1), up; cumulative deviation and monthly rainfall in Humilladero Sierra, down. See color figure in the web.

de datos AGUAS del IGME, obtenidos en diferentes pozos del acuífero jurásico entre los años 2003 y 2015. Por otra parte, en ese mismo gráfico se diferencian las muestras captadas en el acuífero jurásico, durante una campaña de muestreo realizada entre los días 21 y 22 de junio de 2016. Las muestras del periodo 2003-15 presentan facies hidroquímica bicarbonatada cálcica y magnésica. Con el paso del tiempo la facies evoluciona, siguiendo la tendencia indicada por las flechas negras, dibujadas sobre el diagrama, hacia clorurada sódica (Fig. 3). La mediana de la CE ha pasado de 792 a 3430 $\mu\text{S}/\text{cm}$, al igual que la mediana de los contenidos en cloruros y sulfatos que presentaban unas concentraciones de 80 y 47 mg/l (2003-15) y han pasado a valores de 1020 y 127 mg/l (2016), respectivamente.

Se dispone también de una serie de medidas temporales de CE y NO_3^- procedentes del sondeo de abastecimiento a Fuente de Piedra. Las medidas tienen carácter mensual a partir de agosto de 2011 y semanal a partir de diciembre de 2015. Estos parámetros se han comparado con la curva de evolución piezométrica medida en el sondeo de abastecimiento a Humilladero (Fig. 4). El gráfico muestra la evolución inversa en ambos parámetros, con un crecimiento de la CE que se correlaciona con los descensos registrados en el nivel piezométrico del acuífero. Por otra parte, el descenso en el NO_3^- puede relacionarse con la progresiva extracción de reservas del acuífero, con menores concentraciones de nitrato y/o con procesos de desnitrificación producto de la mezcla con las aguas salinas del sustrato evaporítico, según los procesos descritos en Russak *et al.* (2015).

La tendencia en el ascenso de la conductividad solo se rompe durante el periodo húmedo del año 2010-2011.

Discusión y conclusiones

El análisis de los resultados expuestos pone de manifiesto que se está ante un proceso de salinización progresiva y generalizada del agua subterránea del acuífero jurásico de la Sierra de Humilladero, que se hizo evidente a partir de 2012, y que está relacionado con la entrada de aguas hipersalinas del sustrato arcilloso-evaporítico triásico, provocada, a su vez, por el alarmante descenso de la superficie piezométrica del acuífero jurásico. Este mismo efecto se ha producido en los acuíferos jurásicos de la Sierra de Estepa, en la provincia de Sevilla, donde la explotación intensiva del agua subterránea, al igual que ocurre aquí, provoca una mezcla con las aguas hipersalinas del sustrato triásico-evaporítico (Martos-Rosillo y Moral, 2015). En este sentido, debe ser destacado que este mismo proceso está ocurriendo en otros acuíferos similares próximos, como el de Molina-La Camorra y el acuífero de la Sierra de los Caballos.

La creciente e insostenible demanda de los dos municipios que explotan el acuífero, que consumen dotaciones del orden de 1000 l/hab/día (IGME, 2016), se ha ido cubriendo con una mayor explotación del acuífero, mediante equipos de bombeo de mayor caudal y colocados, cada vez, a mayor profundidad.

En Heredia *et al.* (2004) se advierte que la calidad del agua para abastecimiento empezaba a empeorar debido a procesos de mezcla con aguas del sustrato evaporítico (aumento de la salinidad y descenso

del contenido en tritio) y del acuífero Mioceno (aumento del contenido en nitratos). Sin embargo, las bajas salinidades del agua explotada y los reducidos contenidos en nitratos no preocuparon a los servicios de abastecimiento locales hasta que, en 2015, la calidad empeoró de forma drástica, tornándose inadecuada para distintos usos, entre ellos el del abastecimiento a la población.

La alta correlación existente entre el aumento de la salinidad y el descenso del nivel piezométrico indica que, de continuar con el actual ritmo de bombeo, la situación seguirá empeorando, al aumentar el porcentaje de mezcla con las aguas salinas del sustrato triásico. Por todo ello, y por el actual ritmo de descenso del nivel piezométrico, se requiere de una urgente actuación encaminada a tomar decisiones que permitan garantizar el abastecimiento a la población. En primer lugar, se debería actuar de manera rápida con objeto de reducir las elevadas dotaciones utilizadas para abastecimiento, así como revisar y reparar las zonas deterioradas de las redes de distribución e identificar y anular posibles tomas ilegales de forma inmediata. En este sentido se debería desagregar parte de la demanda industrial, al menos la que no requiera de un agua con calidad para uso potable, atendiendo a la misma con agua de peor calidad procedente del acuífero mioceno. También se deberían reducir y controlar las dotaciones de los pozos de regadío, sustituyendo, siempre que sea posible, las aguas explotadas del acuífero jurásico, por aguas de otros acuíferos y/o por aguas residuales urbanas convenientemente tratadas.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por la Dirección General de Planificación y Gestión de Dominio Público Hidráulico de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía. Asimismo, se agradece a los ayuntamientos de Humilladero y Fuente de Piedra el acceso a los datos hidroquímicos de los sondeos de abastecimiento municipales. Por último, se quiere hacer constar el agradecimiento de los autores a los profesores Pablo Jiménez Gavilán y Jesús Mateo Lázaro por sus acertados comentarios y sugerencias.

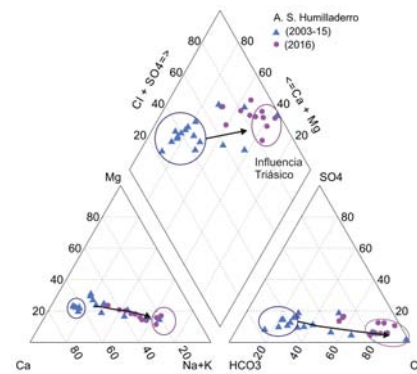


Fig. 3.- Diagrama de Piper del agua subterránea del acuífero de la Sierra de Humilladero. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Piper diagram of groundwater of Sierra de Humilladero aquifer. See color figure in the web.

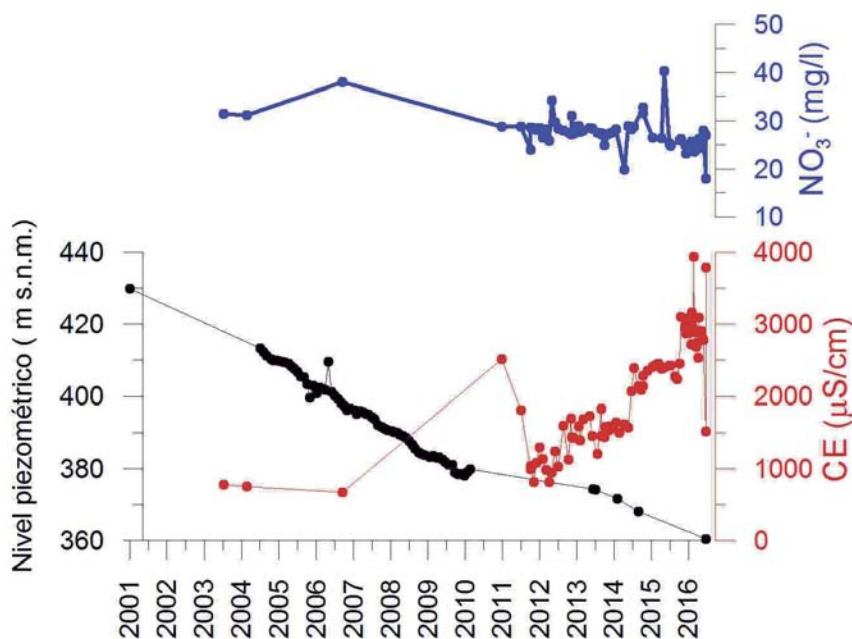


Fig. 4.- Evolución del nivel piezométrico, de la conductividad eléctrica y del contenido en nitrato del sondeo 2. Ver figura en color en la web.

Fig. 4.- Evolution of piezometric level , nitrate and electrical conductivity of groundwater in well 2. See color figure in the web.

Referencias

Heredia, J., Araguás, L. y Ruiz, J.M. (2004). En: *18th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM)*, Spain.

IGME (1981). *Bombeo de ensayo del sondeo de abastecimiento a Humilladero (Málaga)*. Nota técnica 177-11-(VI)-81, Madrid.

IGME (2016). *Estado piezométrico e hidroquímico del acuífero carbonático de la Sierra de Humilladero*. Informe interno. Madrid, 49 p.

Linares, L. (1990). *Hidrogeología de la Laguna de Fuente de Piedra*. Granada (España). Tesis Doctoral. Univ. de Granada, 309 p.

Martin-Algarra, A. y Vera, J.A. (2004). En: *Geología de España* (Ed: J.A. Vera). Sociedad Geológica de España, Madrid. 352-354.

Martos-Rosillo, S. y Moral, F. (2015). *Journal of Hydrology*. 528, 249-263.

Pedrera, A., Martos-Rosillo, S., Galindo-Zaldívar, J., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Martín-Rodríguez, J.F. y Zúñiga-López, M.I. (2016). *Journal of Applied Geophysics* 129, 17–27.

Ruiz, P. (2012). *Evaluación de la recarga de los acuíferos carbonatados de la Sierra de Mollina – La Camorra y Humilladero (Málaga)*. Trabajo Fin de Grado. Univ. Pablo de Olavide. Sevilla, 73 p.

Russak, A., Sivan, O., Herut, B., Lazar, B. y Yechieli, Y. (2015). *Journal of Hydrology* 529, 1282-1292.