

Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonatado de la Alta Cadena (provincia de Málaga, España)

Considerations about the hydrogeological functioning of the Alta Cadena carbonate aquifer (Málaga province, Spain)

M. Mudarra, B. Andreo y A.I. Marín

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias y centro de hidrología de la Universidad de Málaga, 29071 Málaga. mmudarra@uma.es, andreo@uma.es, aimarin@uma.es

ABSTRACT

The hydrodynamic and hydrochemical responses of three springs (Villanueva del Rosario, Pita and Parroso) located in the Alta Cadena carbonate aquifer (province of Malaga, South Spain) have been monitored from September 2006 to January 2008. A first interpretation on the hydrogeological functioning and on the karst network development has been performed, which is useful for groundwater protection. Thus, Villanueva del Rosario spring drains a part of the Alta Cadena aquifer more karstified than the catchment area of the other two springs. This means that catchment area of Villanueva del Rosario spring is more vulnerable than the other to the contamination and consequently it needs more strict protection criteria.

Key words: carbonate (karst) aquifer, hydrochemistry, hydrodynamic, Malaga province

Geogaceta, 44 (2008), 163-166
ISSN: 0213683X

Introducción

La Alta Cadena está formada, de oeste a este, por las Sierras de las Cabras, Camarolos, Gorda de Villanueva del Trabuco y San Jorge, situadas en la parte nororiental de la provincia de Málaga (Fig. 1). El relieve es escarpado, con fuertes pendientes, y altitudes comprendidas entre 500 m y 1640 m (pico Chamizo). El clima existente en la zona es de tipo Mediterráneo templado con valores medios de precipitación y temperatura de 650 mm y 16 °C. Las precipitaciones registradas durante el periodo en que se ha realizado este trabajo (septiembre 2006-enero 2008) han estado por debajo de la media, aunque se han producido tres periodos lluviosos relativamente importantes: en otoño de 2006 (con precipitaciones intensas, de hasta 70 mm, los días 7 y 8 de noviembre), primavera de 2007 y otoño de 2007.

La Alta Cadena forma parte del dominio paleogeográfico del Subbético Interno, dentro de la Zona Externa de la Cordillera Bética (Peyre, 1974; Martín Algarra, 1987). Los materiales que afloran en el área de estudio aparecen representados en la figura 1. La serie estratigráfica comienza con materiales arcillosos y evaporíticos (yesos) de edad Triásica, que en su parte superior presentan intercalaciones de niveles dolomíticos y rocas volcánicas básicas. Encima, aparecen dolomías de edad liásica y calizas de edad Jurásico Medio y Superior, con una potencia total de 250-300 m. La serie termina con

margas-margocalizas y niveles intercalados de brechas calcáreas, de edad Cretácico Inferior a Oligoceno.

La estructura geológica de la Alta Cadena se caracteriza por la existencia de pliegues de dirección ENE-OSO, a partir de los cuales se han desarrollado cabalgamientos de vergencia sur. Dichos cabalgamientos han utilizado las arcillas triásicas y las margas cretácicas como niveles de despegue y delimitan escamas tectónicas, que son la característica estructural más marcada de la Alta Cadena. Al sur y norte, cabalgando sobre ella, afloran arcillas del Flysch del Campo de Gibraltar. Todo el conjunto estructural han sido afectado por fallas de desgarre y normales que han terminado por configurar la compleja estructura y escarpada orografía del macizo de la Alta Cadena.

El modelado kárstico está bien representado en las zonas de mayor altitud donde afloran las calizas jurásicas, con la presencia de campos de dolinas y lapiaces, como ocurre en las Sierras de San Jorge y Gorda. Se conocen varias cavidades repartidas por toda la sierra y varios sumideros kársticos (Fig. 1).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el acuífero de la Alta Cadena ocupa una superficie aproximada de 70 km² y está formado por las dolomías y calizas del Jurásico. Está limitado en todos sus bordes por materiales arcillosos de baja permeabilidad, pertenecientes al Flysch, que aparecen a menor cota topográfica en la cara norte que en la

sur. La recarga del acuífero se produce por infiltración directa del agua de lluvia y, excepcionalmente, de fusión nival. La descarga tiene lugar por manantiales situados en el borde norte de las sierras, de los cuales se han seleccionado tres para la realización de este trabajo: Parroso (situado a cota 750 m s. n. m.), Villanueva del Rosario (770 m s. n. m.) y Pita (825 m s. n. m.).

En la Alta Cadena se han realizado varios trabajos hidrogeológicos previos, que se comentan a continuación, por orden cronológico. Pulido Bosch y Cerón (1991) investigaron las variaciones de la composición química del agua del manantial de la Yedra, situado en la Sierra de las Cabras. En dos informes técnicos de la Dirección General de Obras Hidráulicas de la Junta de Andalucía (DGOH, 1994; 1995), se presentaron aspectos básicos de la hidrogeología de estas sierras, con el objetivo de plantear soluciones y alternativas para cubrir la demanda de agua de Antequera y Villanueva del Trabuco. En un capítulo del Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga, se presenta un resumen actualizado de las características hidrogeológicas de la Alta Cadena (Mudarra y Andreo, 2007). Más recientemente, se han llevado a cabo estudios para conocer la recarga media y su distribución espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (Marín *et al.*, 2007).

Desde Septiembre de 2006, se están llevando a cabo investigaciones hidrogeológicas detalladas en el acuífero de

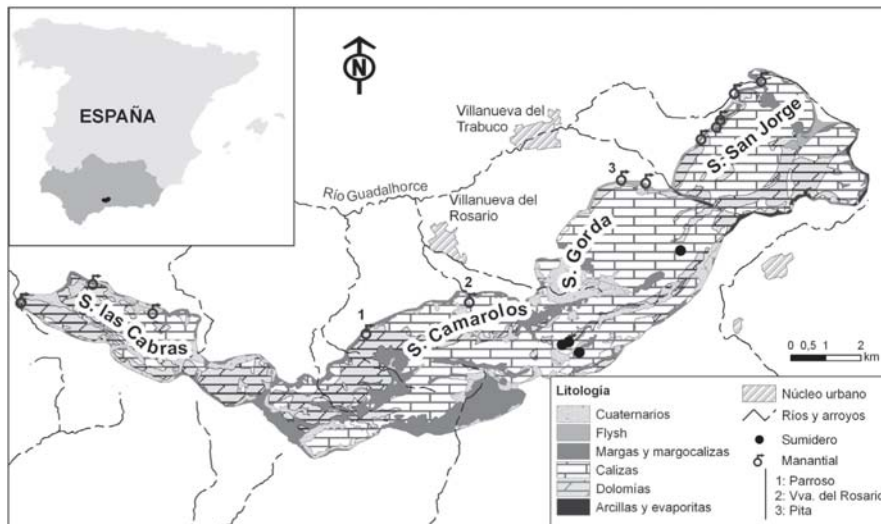


Fig. 1.- Situación del área de estudio y esquema geológico.

Fig. 1.- Location of the study area and geological sketch.

la Alta Cadena, para conocer el funcionamiento hidrogeológico, los recursos hídricos y la vulnerabilidad a la contaminación. Todo ello permitirá desarrollar estrategias de protección de las aguas subterráneas, necesarias para el cumplimiento de las directivas europeas en materia de aguas (Directiva Marco del Agua y Directiva de Aguas Subterráneas). En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos en tres manantiales (Parroso, Villanueva del Rosario y Pita), representativos de las características hidrogeológicas de la Alta Cadena, mediante la aplicación de técnicas hidrodinámicas e hidroquímicas.

Caracterización hidrodinámica

El control del caudal de los manantiales se ha llevado a cabo mediante aforos puntuales con micromolinetes, aunque aguas abajo del manantial de Villanueva del Rosario se registra su caudal en una estación de aforos de la Agencia Andaluza del Agua. Este manantial se aprovecha para abastecimiento de la localidad de Villanueva del Rosario, pero en estiaje presenta caudales muy bajos, insuficientes para cubrir la demanda, por lo que se pone en funcionamiento un sondeo próximo que termina por agotar el manantial hasta la nueva época de recarga. Durante el periodo de estudio, el manantial del Parroso ha presentado un caudal medio de 50 L/s; el de Villanueva del Rosario de 125 L/s y el de la Pita de 15 L/s.

En los hidrogramas de los manantiales (Fig. 2) se pueden distinguir tres crecidas, correspondientes a las principales épocas de recarga (otoño de 2006, primavera de 2007 y otoño de 2007). El manantial de Villanueva del Rosario presenta variaciones de caudal de 15 a 375 L/s, que se producen de forma

rápida en condiciones de recarga. La surgencias del Parroso y la Pita muestran variaciones de caudal menos acusadas, de 30 a 85 L/s y de 7 a 30 L/s, respectivamente, que denotan respuestas más amortiguadas ante las precipitaciones.

Se ha realizado un análisis preliminar de las curvas de agotamiento de los manantiales del Parroso y la Pita, siguiendo el método de Maillet, para un único periodo de agotamiento, de 105 y 88 días, respectivamente, durante el verano de 2007. Los coeficientes de agotamiento (α) obtenidos son de $3,03 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$ para el manantial del Parroso y $6,71 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$ para el de la Pita. No se ha podido analizar la curva de agotamiento del manantial de Villanueva del Rosario debido a la influencia de los bombeos estivales que se realizan en las inmediaciones de la surgencia. El valor del coeficiente de agotamiento, calculado por Jiménez *et al.* (2002) en este último manantial, en ausencia de bombeos, es de $1,55 \times 10^{-2}$.

Caracterización hidroquímica

Se ha llevado un control de la composición química del agua de las tres surgencias estudiadas, con una periodicidad media semanal e incluso diaria durante alguna crecida. Se han analizado los componentes químicos mayoritarios disueltos en el agua y el carbono orgánico total (COT). En la figura 2 se presentan las evoluciones temporales de los parámetros más significativos. Además, se dispone de datos horarios de conductividad eléctrica del agua drenada por los manantiales de Villanueva del Rosario y de la Pita (Fig. 2), que han sido obtenidos mediante sensores de registro continuo.

Las aguas drenadas por los manantiales estudiados son de facies bicarbonatada cálcica,

dada la naturaleza carbonatada de los materiales acuíferos. No obstante, el agua de las surgencias de Villanueva Rosario y del Parroso tiene contenidos relativamente altos en sulfatos y, el segundo, presenta, a veces, facies bicarbonatada-sulfatada cálcica.

Las curvas de frecuencia de la conductividad eléctrica del agua de los manantiales (Fig. 3) muestran diferentes formas y rangos de variación. La curva correspondiente al manantial de Villanueva del Rosario no tiene una moda definida, es claramente multimodal, y presenta un gran rango de variación, desde valores inferiores a $300 \mu\text{S/cm}$, en momentos de dilución (periodos de crecida), a $460 \mu\text{S/cm}$ en periodos de estiaje. Sin embargo, la curva de frecuencia de los valores de conductividad eléctrica medidos en el agua del manantial de la Pita tiene una forma unimodal, porque el agua suele presentar valores de conductividad eléctrica del orden de $240 \mu\text{S/cm}$. La curva de frecuencia correspondiente a la surgencia del Parroso es intermedia entre las dos anteriores, aunque más parecida a la de la Pita. Sus valores de conductividad eléctrica están comprendidos entre 350 y $410 \mu\text{S/cm}$.

Por lo que respecta a la evolución temporal de los parámetros hidroquímicos, el agua del manantial de Villanueva del Rosario (Fig. 2A) experimenta disminuciones de la temperatura y de la conductividad eléctrica generalizadas durante las crecidas, con disminuciones en casi todos los componentes químicos. Éstos evolucionan de manera similar a la conductividad eléctrica, excepto el COT, que presenta valores más elevados en épocas de crecida, sobre todo, en las primeras crecidas otoñales. El contenido en NO_3^- aumenta en respuesta a las primeras lluvias del año hidrológico pero, después, sigue una tendencia descendente hasta la siguiente crecida otoñal.

El manantial de la Pita responde de forma relativamente rápida a las precipitaciones pero, al contrario de lo que ocurre en el de Villanueva Rosario, los aumentos de caudal producen un ascenso de la conductividad eléctrica (Fig. 2B). Este aumento de conductividad, de hasta $25 \mu\text{S/cm}$, se debe al aumento del contenido en Ca^{+2} y de la Alcalinidad Total. Las concentraciones de COT, Cl^- , Na^+ y NO_3^- también aumentan durante los periodos de recarga, a veces con ligero desfase respecto al incremento en el contenido Ca^{+2} y la Alcalinidad; después de las crecidas, los contenidos en Cl^- y Na^+ disminuyen progresivamente. Sin embargo, la concentración de Mg^{+2} desciende en los momentos de recarga y aumenta en aguas bajas. La temperatura del agua también suele ser menor en aguas altas que estiaje.

El manantial del Parroso experimenta una crecida relativamente importante en no-

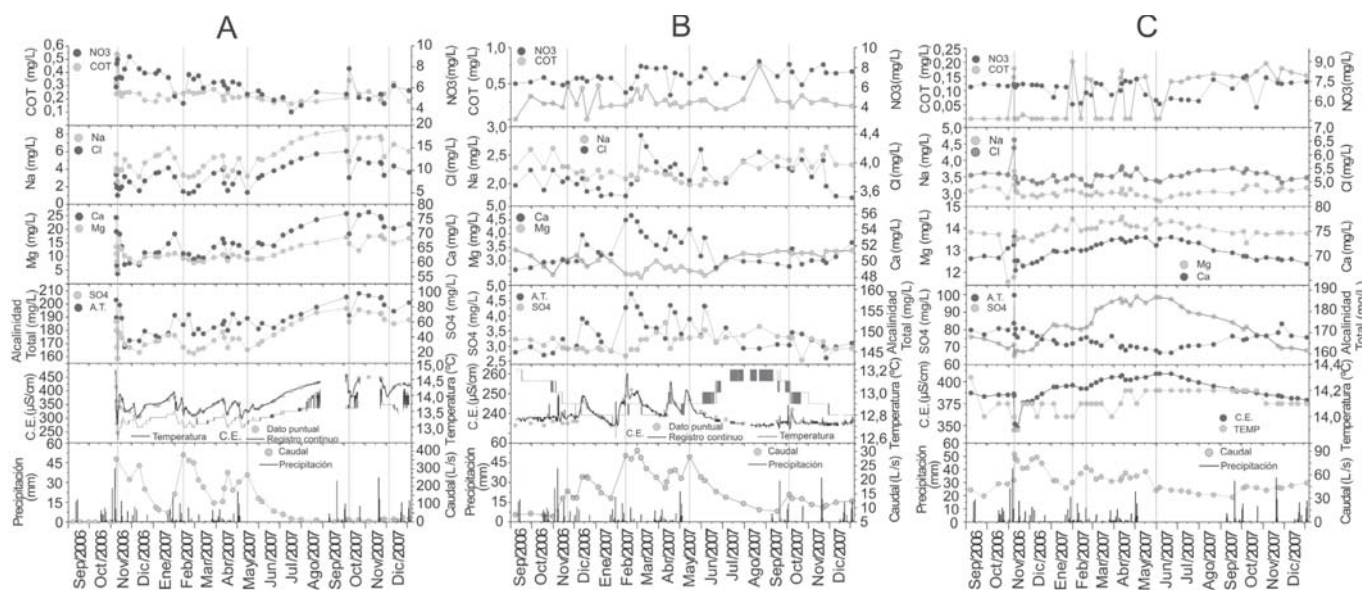


Fig. 2.- Evolución temporal del caudal y de los parámetros hidroquímicos en respuesta a las precipitaciones en los manantiales de Villanueva del Rosario (A), Pita (B) y Parroso (C).

Fig. 2.- Temporal evolution of flow rate and hydrochemical parameters versus rainfall in Villanueva del Rosario (A), Pita (B) and Parroso (C) springs.

viembre de 2006 (Fig. 2C), que produce una clara disminución de la conductividad eléctrica del agua, de la temperatura y de los contenidos en SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} , al tiempo que aumentan las concentraciones en Cl^- , Na^+ y COT y la Alcalinidad. En crecidas posteriores, de menor importancia, se registran variaciones del mismo tipo, pero de menor magnitud, en dichos parámetros. No obstante, durante el año 2007, la evolución de la conductividad eléctrica está condicionada por las variaciones en los contenidos de SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} , que aumentan después de cada evento de recarga. Desde la crecida de noviembre de 2006 hasta mayo-junio de 2007, aumenta progresivamente la concentración de estos tres componentes, fecha a partir de la cual se produce un descenso generalizado de sus respectivas concentraciones. La Alcalinidad evoluciona de manera inversa a los tres anteriores y presenta los valores más bajos en junio de 2007.

Discusión e interpretación

Una primera aproximación al funcionamiento hidrodinámico del acuífero drenado por los manantiales estudiados, a partir del coeficiente de agotamiento, demuestra que el manantial de Villanueva del Rosario drena un sector con elevado grado de karstificación funcional, lo cual permite el vaciado rápido del agua del sistema en condiciones de aguas bajas. Tal es así que, en estiaje, el manantial queda con un caudal exiguo y, para cubrir el abastecimiento urbano de Villanueva del Rosario, es necesario bombear agua de un sondeo próximo. En cambio, las surgencias de la Pita y del Parroso, mantienen caudales

durante el estiaje porque en sus correspondientes cuencas de alimentación existe menor desarrollo del drenaje kárstico.

Las formas de las curvas de frecuencia de los valores de conductividad eléctrica medidos en el agua de los manantiales (Fig. 2) demuestran que el de Villanueva del Rosario tiene una mayor variabilidad hidroquímica, es decir, la mineralización del agua presenta un gran rango de variación. Ello es debido a un mayor desarrollo de los conductos kársticos en el sector de acuífero que drena. Por su parte, la curva de frecuencias correspondiente al manantial de la Pita, claramente unimodal, es indicativa de un bajo desarrollo de la karstificación funcional y la curva del manantial del Parroso denota un comportamiento hidrogeológico intermedio entre los dos anteriores.

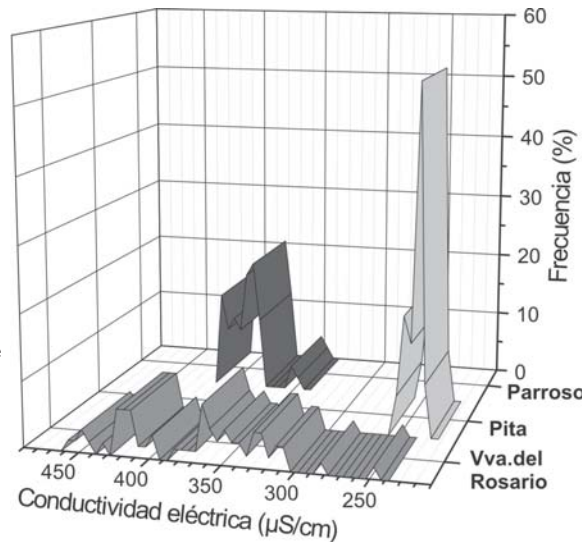
En relación con las evoluciones temporales de los parámetros hidroquímicos, cabe señalar que el manantial de Villanueva del Rosario, en cada evento pluviométrico importante, presenta un aumento de caudal y una disminución generalizada de todos los componentes químicos (Fig. 2A). Ello es debido a la mezcla de agua de la zona saturada que estaba drenando el manantial antes de la recarga con el agua procedente de ésta, que circula por la zona no saturada, con mayores contenidos en COT y NO_3^- disueltos en el horizonte edáfico. La magnitud de las diluciones es proporcional a la importancia de la recarga. A medida que disminuye el caudal, se homogeniza la mezcla de aguas, aumenta la temperatura y se produce disolución de los materiales acuíferos, principalmente en la zona saturada; por ello, de manera progresiva, se regis-

tra un aumento la conductividad eléctrica del agua de la surgencia y de los contenidos en los parámetros hidroquímicos, excepto COT y NO_3^- .

El manantial de la Pita registra aumentos de caudal y de conductividad eléctrica durante las épocas de recarga (Fig. 2B). Los aumentos de conductividad están ligados a incrementos en la concentración de Ca^{2+} y en la Alcalinidad Total, coinciden con descensos del contenido en Mg^{2+} y suelen ir seguidos de aumentos en las concentraciones de Cl^- , Na^+ y COT . Todo ello parece indicar que existe cierta participación de la zona no saturada, especialmente durante los periodos de recarga. Las variaciones en los contenidos de los componentes químicos, aunque de poca magnitud, se producen de forma relativamente rápida, lo cual sugiere que, en respuesta a las crecidas, el agua previamente almacenada en las fracturas de la zona no saturada, es pronto movilizadas hacia el manantial. El desfase entre los picos de Alcalinidad y contenido en Ca^{2+} y los picos de las concentraciones en Cl^- y en COT podría ser indicativo del tiempo de tránsito del agua por la zona no saturada, desde el suelo hasta el manantial. En situación de aguas bajas debe haber participación de la zona saturada, donde el mayor tiempo de permanencia del agua en el acuífero provoca ligeros aumentos del contenido en Mg^{2+} y el reequilibrio de la temperatura del agua con los valores relativamente más altos de las condiciones de estiaje. La disminución progresiva de los contenidos en Cl^- y Na^+ después de las crecidas es coherente con la participación predominante de la zona saturada en condiciones de aguas bajas.

Fig. 3.- Curvas de frecuencias de los valores de conductividad eléctrica medidos en los tres manantiales considerados en este trabajo.

Fig. 3.- Frequency curves of the electrical conductivity values recorded in the three spring monitored in the frame of this work.



El manantial del Parroso, en respuesta a las precipitaciones, presenta aumentos de caudal y diluciones de importancia proporcional a la recarga (Fig. 3C). Así, las disminuciones en los contenidos en SO_4^{-2} , Ca^{+2} y Mg^{2+} , que provocan los descensos de conductividad eléctrica durante las crecidas, son mayores en respuesta a las lluvias intensas de noviembre de 2007. Los aumentos del contenido en COT, a veces también de NO_3^- , que se registran en buena parte de las crecidas, denotan la participación del agua de recarga y de la zona no saturada en el funcionamiento del acuífero. No obstante, cada una de las crecidas y diluciones asociadas, van seguidas de un aumento de la conductividad eléctrica y de los componentes que más la condicionan (SO_4^{-2} , Ca^{+2} y Mg^{2+}), el cual se produce de forma amortiguada y diferida en el tiempo (del orden de un mes). Es decir, cada evento de recarga provoca la participación de todo el acuífero, tanto de la zona no saturada como de la zona saturada, y se produce un efecto pistón, que moviliza hacia el manantial aguas previamente almacenadas en la zona saturada, con mayor tiempo de permanencia en el acuífero, mayor conductividad eléctrica y contenidos más elevados en SO_4^{-2} , Ca^{+2} y Mg^{2+} , pero con menores contenidos en COT porque parte del carbono ha sido mineralizado. Las crecidas registradas hasta mayo de 2007, con sus correspondientes efectos pistón, provocan una evolución hidroquímica resultante (Fig. 2C) que se caracteriza por el aumento progresivo de la conductividad eléctrica y los parámetros que más la condicionan (SO_4^{-2} , Ca^{+2} y Mg^{2+}), e incluso de la temperatura del agua. La evolución contraria que presenta la Alcalinidad podría indicar que el agua almacenada en la zona saturada da lugar a precipitación de calcita, probablemente por efecto de ión (Ca^{+2} de los carbonatos y de los yesos). De hecho, los aumentos de Alcalinidad, relacionados con la precipitación/disolución

de calcita, se producen en las épocas de crecida o una vez que se homogeneiza la mezcla de agua procedente de la recarga con la almacenada previamente en el acuífero, lo cual ocurre a partir de junio de 2007.

Conclusiones

El análisis de las respuestas hidrodinámicas e hidroquímicas de tres manantiales que drenan el acuífero carbonatado de la Alta Cadena (provincia de Málaga) muestra un funcionamiento hidrogeológico diferente según el sector que se considere. Así, el manantial de Villanueva del Rosario experimenta rápidos aumentos de caudal, disminuciones temperatura y diluciones generalizadas del agua ante las precipitaciones; en estiaje, los caudales disminuyen de forma rápida. En definitiva, el sector de acuífero drenado por este manantial presenta un importante grado de karstificación funcional, especialmente en la zona no saturada, propio de sistemas de flujo por conductos, de vaciado rápido y baja capacidad de regulación natural. Estas características hacen que el manantial sea altamente vulnerable a la contaminación, aspecto que se debe tener en cuenta para la gestión del acuífero.

El sector de la Alta Cadena drenado por el manantial de la Pita, debe tener un bajo grado de karstificación funcional, incluso a nivel de la zona no saturada, la cual parece condicionar su funcionamiento (sobre todo en situaciones de recarga) y provocar desfases en las respuestas a las lluvias. Este manantial es moderadamente vulnerable a la contaminación porque la zona no saturada de su cuenca de alimentación presenta capacidad de atenuación de potenciales contaminantes.

Por último, las respuestas hidrodinámicas e hidroquímicas del manantial del Parroso son de tipo intermedio entre

los dos manantiales anteriores, más parecidas al de la Pita, pero con una mayor participación conjunta de la zona no saturada y de la zona saturada del acuífero. El sector de la Alta Cadena drenado por el manantial del Parroso tiene un bajo grado de organización del drenaje kárstico, algo más desarrollado en la zona no saturada. Ello le confiere una cierta inercia y capacidad de regulación natural, por lo que es moderadamente vulnerable a la contaminación.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los proyectos CGL2005-05427 y CGL2008-06158 de la DGICYT, P06-RNM 2161 de la Junta de Andalucía, A/010219/07 de la AECL, IGCP-513 de la UNESCO y al Grupo de investigación RNM 308 de la Junta de Andalucía.

Referencias

- DGOH (1994). *Estudio previo de la determinación de fuentes de abastecimiento de agua de Antequera*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía. Informe inédito.
- DGOH (1995). *Estudio previo de la determinación de fuentes alternativas de abastecimiento de agua a los municipios de Archidona y Villanueva del Trabuco (Málaga)*. Dirección General de Obras Hidráulicas. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía. Informe inédito.
- Marín, A.I., Andreo, B. y Mudarra, M. (2007). En: *XXXV IAH Congress International Association of Hydrogeologists, Groundwater and Ecosystems*. Lisboa, Portugal.
- Martín Algarra, M. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y Externas de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 1171 p.
- Mudarra, M. y Andreo, B. (2007). En: *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga*, 2; 113-118. Diputación Provincial de Málaga-IGME-UMA.
- Jiménez P, Carrasco F., Andreo B., Durán J.J. y López-Geta J.A. (2002). En: *Karst and Environment* (F. Carrasco, J.J. Durán y B. Andreo, Eds.). Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación, 105-113.
- Peyre, Y. (1974). *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères Bétiques, Espagne)*. Tesis Doctoral, Univ. de París. Inst. Nat. Agronomique, París, 528 pp.
- Pulido Bosch, A. y Cerón, J.C. (1991). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 4, 1-2, 51-59.