

# Investigación del funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonatado drenado por el manantial de Villanueva del Rosario (Alta Cadena, Málaga) a partir de un ensayo de trazadores

*Investigation on the hydrogeological functioning of the carbonate aquifer drained by Villanueva del Rosario spring (Alta Cadena, Málaga) from a tracer test*

Matías Mudarra Martínez <sup>(1)</sup>, Ana Isabel Marín Guerrero <sup>(1)</sup>, Bartolomé Andreo Navarro <sup>(1)</sup>, Iñaki Vadillo Pérez <sup>(1)</sup>, Juan Antonio Barberá Fornell <sup>(1)</sup>, Christoph Neukum <sup>(2)</sup>, Damián Sánchez García <sup>(1)</sup>, Cristina Liñan Baena <sup>(1)</sup> e Isaac Pérez Ramos <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29071.

<sup>(2)</sup> Departamento de Ingeniería Geológica e Hidrogeología, Universidad de Aachen, 52064. Aachen, Alemania.

## ABSTRACT

A multi-tracer test was done in the Alta Cadena and Los Tajos mountains range (Malaga province, southern Spain) in order to delimitate the aquifer system drained by Villanueva del Rosario spring and to precise its hydrogeological behaviour. The results show a partitioning of the carbonate outcrops in different aquifer systems. The system drained by Villanueva del Rosario exhibits clear a karstic behaviour with flow velocities above 200 m/h. The karst conduits and the groundwater flow path in this system are determined by ENE-WSW folds and thrust, and transverse fractures.

**Key words:** Karst aquifer, tracer test, hydrodynamic, functional karstification, Malaga province.

Geogaceta, 48 (2010), 131-134  
ISSN: 0213-683X

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010  
Fecha de revisión: 21 de abril de 2010  
Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010

## Introducción

La Alta Cadena, situada en la parte nororiental de la provincia de Málaga (Fig. 1), está formada, de oeste a este, por los macizos carbonatados de las sierras de las Cabras, Camarolos, Jobo, Gorda de Villanueva del Trabuco y San Jorge, mientras que el área de Los Tajos, situada inmediatamente al sureste de los relieves anteriores, está constituida por la Sierra del Rey y el Tajo de Gomer. El terreno es muy escarpado, sobre todo en Los Tajos donde, como su nombre indica, existen paredes casi verticales, de más de 100 m de altura. Las altitudes en esta región están comprendidas entre 500 y 1640 m s.n.m. (pico Chamizo). El clima es Mediterráneo templado con valores medios de precipitación de 650 mm y temperatura de 16 °C.

Desde el punto de vista geológico, los materiales de Alta Cadena pertenecen al dominio paleogeográfico del Subbético Interno y Los Tajos al Penibético o Subbético Interno Occidental, ambos pertenecientes a la Zona Externa de la Cordillera Bética (Peyre, 1974; Martín Algarra, 1987). La serie estratigráfica general de las unidades pertenecientes a la Alta Ca-

dena 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 y margocalizas de edad Cretácico Inferior a Oligoceno (Fig. 1).

La serie estratigráfica del dominio Penibético está formada, de muro a techo, por tres conjuntos litológicos (Martín-Algarra, 1987): arcillas con evaporitas del Triás (Grupo Hidalga), dolomías y calizas del Jurásico (Grupo Torcal) y margas y margocalizas del Cretácico (Grupo Espartina). En Los Tajos sólo afloran los materiales jurásicos y cretácicos (Fig. 1).

La estructura geológica de la Alta Cadena – Los Tajos está formada por escalas tectónicas apiladas, unas sobre otras, con vergencia general S - SE (Fig. 1). La unidad de Los Tajos es la que ocupa la posición tectónica más baja, mientras que los materiales que forman la Alta Cadena ocupan la posición superior. En detalle, la estructura de la Alta Cadena se caracteriza por la existencia de pliegues de direc-

ción ENE-OSO, a partir de los cuales se han desarrollado cabalgamientos de vergencia sur (Martín Algarra, 1987). Dichos cabalgamientos han utilizado las arcillas triásicas y las margas cretácicas como niveles de despegue. Por su parte, la estructura geológica de Los Tajos está formada por un anticlinorio, de dirección E – O, en cuyo núcleo hay algunos cabalgamientos de vergencia norte, desarrollados a favor de los materiales margosos. Al sur y norte de ambos conjuntos, cabalgando sobre las unidades subbéticas, afloran arcillas del Flysch del Campo de Gibraltar. Todo el conjunto tectónico ha sido afectado por fallas de desgarre y normales que han configurado la compleja estructura y escarpada orografía de la Alta Cadena y de Los Tajos.

En el presente trabajo se recogen los resultados de un ensayo de trazadores realizado en las sierras de la Alta Cadena (Fig. 1), con el fin de conocer la conexión hidrogeológica entre los sumideros y los diferentes manantiales, determinar el orden de magnitud de las velocidades de flujo en el interior del acuífero y obtener la mayor información posible sobre el grado de karstificación funcional existente en los acuíferos. En esta área se están

llevando a cabo investigaciones hidrogeológicas detalladas mediante diferentes métodos (hidrodinámicos, hidroquímicos) por lo que estos resultados permitirán precisar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero deducido mediante diferentes métodos (Mudarra, 2007).

### Características geomorfológicas e hidrogeológicas generales

El modelado kárstico está bien representado en la Alta Cadena, principalmente en las zonas donde afloran las calizas jurásicas. Existen campos de lapiazes, como pueden observarse en las Sierras de San Jorge, Jobo, Gorda y en la parte norte de Los Tajos. Hay también otras formas exokársticas como dolinas y pequeñas uvalas, visibles en las partes elevadas de la Alta Cadena, que se han desarrollado, en la mayoría de los casos, a favor de fallas. Las uvalas de mayor entidad se encuentran situadas en la parte oriental y occidental de la Sierra del Jobo y sus fondos están constituidos por materiales cretácicos. Para la realización del ensayo de trazadores se han escogido dos uvalas que tienen sendos sumideros kársticos activos (Fig. 1): el sumidero del cortijo del Chami (a cota 1148 m s.n.m.), considerado en el presente trabajo como punto de inyección nº 1 (PI-1), y el sumidero de la uvala situada al suroeste del pico Chamizo (1315 m s.n.m.), punto de inyección nº 2 (PI-2).

Desde el punto de vista hidrogeológico, los acuíferos de la Alta Cadena ocupan una superficie aproximada de 70 km<sup>2</sup> y están asociados a las dolomías y calizas del Jurásico. Están limitados, en los bordes norte y sur, por materiales arcillosos de baja permeabilidad, pertenecientes al Flysch. La recarga de los acuíferos se produce por infiltración directa del agua de lluvia y, muy excepcionalmente, por fusión nival. La descarga del acuífero de la Alta Cadena tiene lugar en el borde norte de ésta, por manantiales (Fig. 1): Parroso (situado a cota 750 m s. n. m.), Villanueva del Rosario (770 m s. n. m.), Chorro Negro (790 m s.n.m.), Pita (825 m s. n. m), Eulogio (840 m s.n.m.) e Higuierilla (830 m s.n.m.). Dadas las excepcionales condiciones de aguas altas registradas durante la realización del ensayo de trazadores, aparecieron algunos manantiales de tipo *trop plein*, como el asociado al manantial de Villanueva del Rosario (810 m s.n.m.) en la zona del Hondonero. La descarga del acuífero de Los Tajos se produce por el borde sur de estos relieves, principalmen-

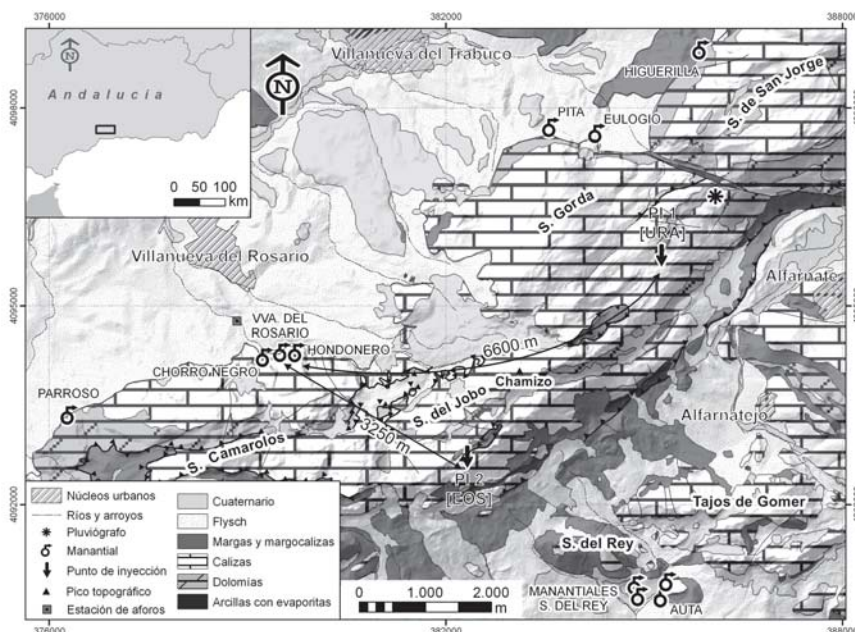


Fig. 1.- Situación del área de estudio, esquema geológico y conexiones hidrogeológicas entre los puntos de inyección (EOS: Eosina, URN: Uranina) y los puntos de control, deducidas del ensayo de trazadores.

Fig. 1.- Location of the study area, geological sketch and hydrogeological connections between injection points (EOS: Eosine, URN: Uranine) and monitoring points, deduced from tracer test.

te por los manantiales de Auta (620 m s.n.m.) y Sierra del Rey (619 m s.n.m.), y por otras surgencias de menor importancia situadas a mayor cota (636 m s.n.m.).

### Metodología

Durante la realización del ensayo se ha controlado la precipitación mediante un pluviógrafo situado al NE del Cortijo El Chami (1129 m s.n.m.) (Fig. 1). Asimismo, se ha medido el caudal del manantial de Villanueva del Rosario en la estación de aforos instalada por la Agencia Andaluza del Agua. Los caudales del resto de los manantiales se han calculado a partir de aforos puntuales con micromolinetes y aforos químicos (con NaCl).

Los trazadores utilizados para el ensayo han sido Uranina (*Acid Yellow 73*, CAS: 518-47-8) y Eosina (*Acid Red 87*, CAS: 17372-87-1). Los dos trazadores son sustancias orgánicas que emiten un pico de fluorescencia en longitudes de onda distinta, por lo tanto, una posible presencia simultánea de ambos, en las muestras de agua, no presentaría problemas de detección y separación por el método analítico. Uranina y Eosina han sido utilizadas en otros macizos kársticos del sur de España, con resultados satisfactorios (Andreo et al., 2004).

La inyección de los trazadores se efectuó el día 5 de febrero de 2009. La Uranina se inyectó a las 15:30 y la Eosina

a las 16:00 horas, aprovechando la existencia de agua de escorrentía que se infiltraba en los sumideros kársticos. Se vertieron 3 kg de Uranina en el sumidero nº 1 (PI-1), donde se introducía un caudal estimado de 10 L/s de agua con una conductividad eléctrica de 97 µS/cm y una temperatura de 3,2 °C, mientras que 2 kg de Eosina se inyectaron en el sumidero nº 2 (PI-2), cuyo caudal se estimó en 25 L/s y el agua tenía una conductividad eléctrica de 210 µS/cm y 2,7 °C de temperatura.

El muestreo de agua en todos los manantiales seleccionados se inició entre 1 hora y dos horas después de las inyecciones, con una periodicidad progresivamente creciente entre dos horas y 1 día. La recogida de muestras comenzó el día 5 de febrero de 2009 y finalizó el 16 de febrero de 2009 en todos los manantiales (Fig. 2). El total de muestras recogidas en el ensayo ha estado comprendido entre 17 (Chorro Negro, *trop pleins* de Villanueva del Rosario y Auta, Sierra del Rey), 49 (Parroso, Villanueva del Rosario, Pita, Eulogio e Higuierilla) y 76 (Auta). Las muestras se tomaron en frascos de cristal de topacio de 60 cm<sup>3</sup> y se transportaron en oscuridad, para evitar la fotodegradación del trazador. Los análisis de las muestras se realizaron en un plazo inferior a 2 días, con un espectrofluorímetro marca Perkin-Elmer, modelo LS-55, en el Laboratorio de Hidrogeología de la Universidad de Má-

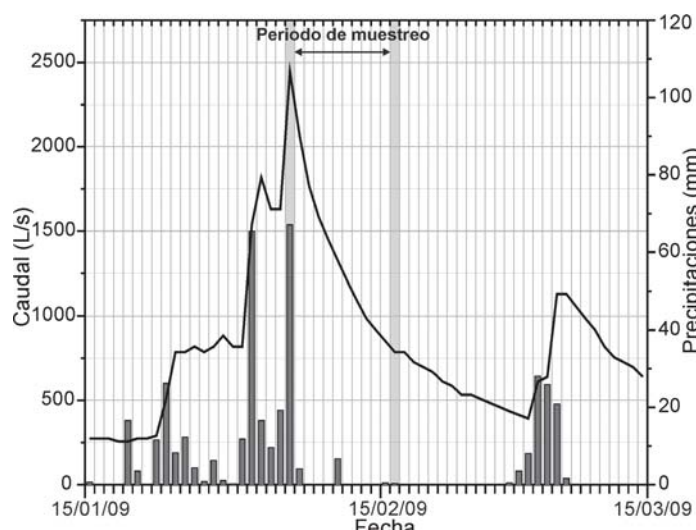


Fig. 2.- Hidrograma del manantial de Villanueva del Rosario e hietograma del pluviógrafo situado cerca del Cortijo del Chami, durante el periodo comprendido entre el 15 de enero y el 15 de marzo de 2009.

Fig. 2.- Villanueva del Rosario spring hydrograph and rainfall recorded in meteorological station situated near Cortijo del Chami, from January 15<sup>th</sup> to March 15<sup>th</sup>, 2009.

laga. Los límites de detección de Uranina y Eosina han sido, respectivamente, 0,04 µg/L y 0,3 µg/L.

## Resultados

En la semana del 31 de enero al 6 de febrero de 2009 se registró una precipitación total de 194 mm en el pluviógrafo del Cortijo de Chami, con un valor de 67 mm el día 5 de febrero (Fig. 2). En días sucesivos no se recogieron precipitaciones significativas. Ello propició que la inyección de los trazadores se llevara a cabo en un contexto hidrodinámico general de máxima descarga de los manantiales, como se observa en el hidrograma de la surgencia de Villanueva del Rosario (Fig. 2).

Únicamente se detectaron trazadores en el manantial de Villanueva del Rosario y en su *trop plein*. De este último, denominado en el presente trabajo como manantial del Hondonero, no se tenía constancia de su existencia antes del ensayo. Además, el agua que bajaba por el cauce procedente de la zona del Hondonero presentaba turbidez y no se comenzó a muestrear hasta el día 8 de febrero, momento en el que el agua fluía limpia y era posible su análisis.

Los resultados obtenidos del análisis de los trazadores en las muestras de agua de los dos manantiales se resumen en la tabla I y en las figuras 3a y 3b. El primer trazador que se detectó en el agua del manantial de Villanueva del Rosario fue la Eosina, 17 horas después de la inyección, con el valor máximo de concentra-

ción de este trazador (3,292 µg/L) registrado a las 22,5 horas. La velocidad de flujo más rápida que se deduce de estos resultados es 190 metros/hora (m/h), con una velocidad modal de 145 m/h. Por lo que respecta a la Uranina, se detectó en el agua del manantial 27 horas después de la inyección de este trazador y el pico de concentración (19,102 µg/L) se alcanzó a las 30,5 horas de la inyección. La velocidad de flujo más rápida para este trazador es 245 m/h, con una velocidad modal de 215 m/h. Estas velocidades obtenidas son, en todo caso, valores mínimos de velocidad, en la medida en que cualquier desviación de un trayecto puramente lineal (sinuosidad) conduciría a valores aún superiores.

En el *trop plein* de Villanueva del Rosario sólo se detectó Uranina, con un valor máximo de concentración de 1,736 µg/L, registrada a las 65 horas de la inyección (Fig. 3b), coincidiendo con la primera muestra que se tomó en esta surgencia. La presencia de este trazador persistió hasta las 187 horas, momento en el que se tomó la última muestra de agua en el manantial, dado su escaso caudal. La velocidad modal de flujo debe ser parecida a la calculada en el manantial de Villanueva del Rosario ya que ambas surgencias están separadas 150 metros.

La tasa de recuperación de trazador ha sido variable, entre un 21% para la Eosina y un 71% para la Uranina. Las curvas de concentración y recuperación de Uranina en el manantial del Hondonero (Fig. 3b) son estimadas, dado que el muestreo en esta surgencia se inició 3

| 3 Kg Uranina [URN]<br>Inyección en sumidero<br>Cortijo El Chami | Manantiales            |           | Unidad |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|--------|
|                                                                 | Villanueva del Rosario | Hondonero |        |
| Distancia punto de inyección                                    | 6600                   | 6450      | m      |
| Tiempo primera detección                                        | 27                     | -         | horas  |
| Tiempo hasta conc. máx (pico)                                   | 30,5                   | -         | horas  |
| Máxima concentración                                            | 19,102                 | -         | µg/L   |
| Mayor velocidad de flujo                                        | 245                    | -         | m/h    |
| Velocidad modal (pico)                                          | 215                    | -         | m/h    |
| Caudal medio manantiales                                        | 1330                   | 305       | L/s    |
| Tasa de recuperación                                            | 60                     | 11,3*     | %      |

| 2 Kg Eosina [EOS]<br>Inyección en sumidero<br>uvala suroeste Chamizo | Manantiales            |           | Unidad |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|--------|
|                                                                      | Villanueva del Rosario | Hondonero |        |
| Distancia punto de inyección                                         | 3230                   | 3060      | m      |
| Tiempo primera detección                                             | 17                     | -         | horas  |
| Tiempo hasta conc. máx (pico)                                        | 22,5                   | -         | horas  |
| Máxima concentración                                                 | 3,292                  | -         | µg/L   |
| Mayor velocidad de flujo                                             | 190                    | -         | m/h    |
| Velocidad modal (pico)                                               | 145                    | -         | m/h    |
| Caudal medio manantiales                                             | 1330                   | 305       | L/s    |
| Tasa de recuperación                                                 | 21                     | -         | %      |

Tabla I.- Principales parámetros hidráulicos deducidos del ensayo de trazadores. (\*Tasa de recuperación aproximada).

Table I.- Main hydraulic parameters deduced from tracer test. (\*approximated recovery rate).

días después del comienzo del ensayo. La concentración de trazador en este manantial durante los primeros días, en los que no se tomaron muestras en esta surgencia, se ha estimado mediante regresión, a partir de los datos de concentración registrados en el manantial del Hondonero y los datos obtenidos en el manantial de Villanueva del Rosario durante el tiempo que se muestrearon conjuntamente. El ajuste de la recta de regresión (r) es de 0,9931. El número de aforos realizados en el manantial del Hondonero fue de 2, con un caudal medio de 305 L/s.

## Discusión e interpretación

Se pone de manifiesto la compartimentación del macizo en diferentes sistemas hidrogeológicos. El hecho de la Uranina y la Eosina sólo se hayan detectado en el manantial de Villanueva del Rosario y en su *trop plein*, indica que estos manantiales se alimentan de las aguas infiltradas en la Sierra del Jobo y en la parte oriental de la Sierra de Camarolos (Fig. 1). Por otro lado, deben de existir barreras hidrogeológicas importantes de tipo tectónico o litológico que impiden el flujo subterráneo hacia otros manantiales de la Alta Cadena, tanto hacia el este como hacia el oeste, y también hacia el sur, hacia Los Tajos, ya que no se han detectado trazadores en el agua de los manantiales de Auta. Así, por ejemplo, a partir de los resultados obtenidos, parece que es muy probable que los manantiales de Pita y Eulogio drenen un sistema acuífero independiente, formado por la



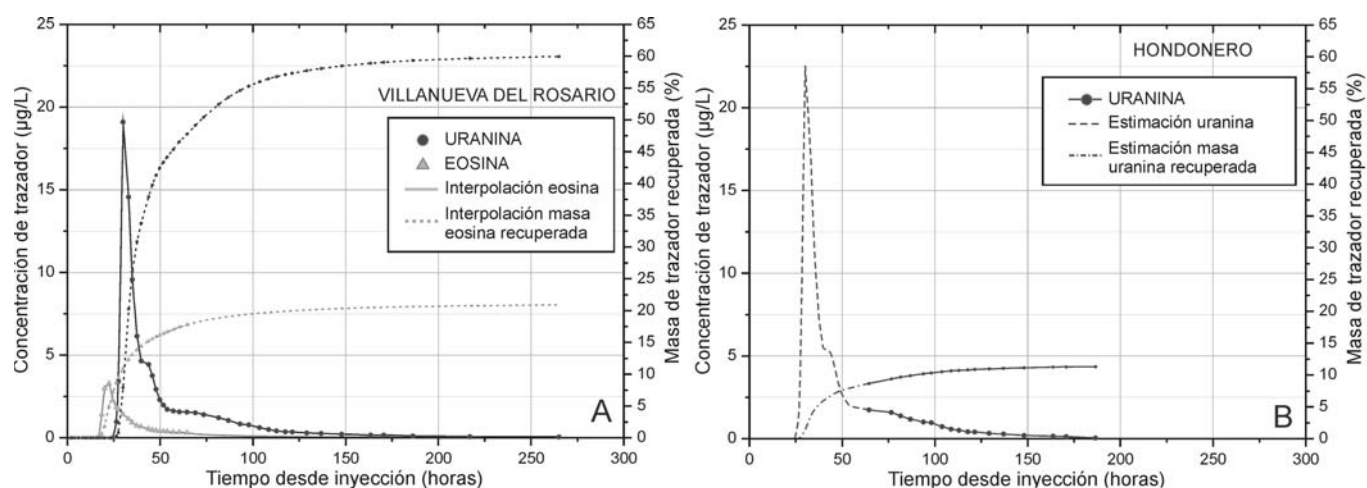


Fig. 3.- Curvas de concentración y de masa recuperada de trazador en los manantiales de Villanueva del Rosario (A) y Hondonero (B).

Fig. 3.- Tracers breakthrough and recovery curves at the Villanueva del Rosario spring (A) and the Hondonero spring (B).

mayor parte de la Sierra Gorda de Villanueva del Trabuco. Al este, la Sierra de San Jorge se conforma como otro sistema independiente drenado, entre otros manantiales, por el de la Higuerilla. Hacia el oeste, el manantial del Chorro Negro forma parte de un sistema que parece estar desconectado hidrogeológicamente del manantial de Villanueva del Rosario y más bien estaría relacionado con el sistema hidrogeológico de la Sierra de Camarolos, drenada también por el manantial de Parroso.

Las curvas de concentración de Eosina y de Uranina en el agua del manantial de Villanueva del Rosario (Fig. 3a) muestran, en general, distribuciones propias de acuíferos con el drenaje kárstico bien desarrollado, con ascensos y descensos muy acusados de la curva de respuesta, lo que indica un tránsito rápido del flujo proveniente de las áreas de inyección (áreas de recarga). Las elevadas velocidades de flujo (del orden de 200 m/h) que se han registrado durante el ensayo de trazadores demuestran la existencia de conductos preferenciales de dirección NE – SO (a favor de la estructura) y ESE – ONO (fracturas transversales a la estructura), entre los dos puntos de inyección y el manantial de Villanueva del Rosario. Estas direcciones de flujo están relacionadas con el desarrollo de la karstificación funcional a favor de las escamas tectónicas y fracturas transversales que constituyen las sierras.

El hecho de que no se haya recuperado el 100% de los trazadores inyectados en el acuífero puede ser interpretado por la existencia de descargas no controladas en el borde norte de la Alta Cadena. El retraso en el muestreo del manantial del Hondonero podría explicar una pérdida

considerable de masa de trazador/es que no ha quedado registrada. No obstante, parte de los trazadores pueden quedar almacenados en sectores más fisurados o fracturados del acuífero, o en zonas de estancamiento, alcanzadas por el agua en momentos de elevada recarga y, más tarde, después del periodo de muestreo, pueden drenarse durante la decrecida y el agotamiento del manantial.

### Conclusiones

El ensayo de trazadores que se ha efectuado en las Sierras de la Alta Cadena ha permitido constatar la elevada complejidad hidrogeológica que existe en este macizo. Son varios los sistemas acuíferos existentes, de los cuales, el drenado por el manantial de Villanueva del Rosario se presenta como el más importante. Este sistema recoge el agua infiltrada en la parte central de la Alta Cadena, especialmente en la Sierra del Jobo.

Las direcciones de flujo subterráneo E – O y ESE – ONO deducidas a partir del ensayo de trazadores indican que la karstificación, en el sistema hidrogeológico de Villanueva del Rosario, está condicionada principalmente por la estructura geológica, formada por cabalgamientos y escamas tectónicas con vergencia sur-sureste y fallas transversales. Las velocidades de flujo calculadas son propias de acuíferos kársticos con un elevado grado de karstificación funcional, lo cual está en consonancia con las interpretaciones efectuadas previamente a partir de otros métodos hidrogeológicos y que reflejan la heterogeneidad hidrogeológica que existe en este acuífero.

### Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los proyectos CGL2005-05427 y CGL2008-06158 BTE de la DGICYT, P06-RNM 2161 de la Junta de Andalucía, A/010219/07 de la AEIC, IGCP-513 de la UNESCO y Acción Integrada HP2008-047; realizado conjuntamente por miembros del Grupo de investigación RNM 308 de la Junta de Andalucía y del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Aachen (Alemania). Se agradece la colaboración prestada por Pablo Jiménez Gavilán, D. Merchán, C. Sicilia, D. Gutiérrez, P. Hueso, D. Schermer, J.M. Carrasco, M. Y. Valverde, C. M. López, J. Ferrete. Se agradece también los constructivos comentarios de Tomás Morales Jubería.

### Referencias

- Andreo, B., Vadillo, I., Carrasco, F., Neukum, C., Jiménez, P., Goldscheider, N., Hötzl, H., Vías, J.M., Pérez I. y Göppert, N. (2004). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, Vol. 17, 187-198.
- Martín Algarra, M. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y Zonas 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*. Vol. II. Diputación provincial de Málaga-IGME-UMA. p 113-118.
- Peyre, Y. (1974). *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères Bétiques, Espagne)*. Tesis Doctoral Univ. de París. Inst. Nat. Agron. París, 528 p.