

# Diferenciación hidrogeológica de acuíferos kársticos en la cuenca alta del río Turón (Serranía de Ronda oriental) mediante un ensayo multitrizador

*Hydrogeological differentiation of karst aquifers located in the headwaters of Turón river (eastern Serranía de Ronda) by a multitracer test*

Juan A. Barberá Fornell<sup>1</sup>, Matías Mudarra Martínez<sup>1</sup>, Ana I. Marín Guerrero<sup>1</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>1</sup>, Iñaki Vadillo<sup>1</sup>, Christoph Neukum<sup>2</sup>, Damián Sánchez García<sup>1</sup>, Isaac Pérez Ramos<sup>1</sup> y Luis Ortega Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología (CEHIUMA), Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n, 29071 Málaga, España. jabarbera@uma.es, mmudarra@uma.es, aimarin@uma.es, andreo@uma.es, vadillo@uma.es, dsanchez@uma.es, isaacperez@uma.es

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Geológica e Hidrogeología, Universidad de Aachen. 52064 Aachen, Alemania. neukum@lii.rwth-aachen.de

<sup>3</sup> C/ Profesor Agustín Escribano, 10, 18004, Granada, España. luisorg2@hotmail.com

## ABSTRACT

A multitracer test carried out in the headwaters of Turón river (eastern Serranía de Ronda, Málaga province) allowed to define the recharge and discharge areas, as well as to precise the hydrogeological functioning of the karst aquifers studied. Results confirm that the groundwater drainage of the eastern part of Sierra Hidalga aquifer and of the central sector of Sierra Blanquilla aquifer feed Turón river waters, while western part of the latter aquifer seems to drain toward Ronda basin. The high groundwater flow velocities deduced from the trace experiment performed at Sierra Hidalga aquifer, up to 190 m/h, evidence a typical karstic behaviour. The relationships between surface waters and groundwaters in the catchment area of Turón river has been also demonstrated.

**Key-words:** Karst aquifer, multitracer test, eastern Serranía de Ronda, aquifer-river interaction.

## RESUMEN

La realización de un ensayo multitrizador en la cabecera del río Turón (Serranía de Ronda oriental, Málaga) ha permitido definir las áreas de recarga y descarga, así como precisar el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos existentes. Los resultados obtenidos confirman que el drenaje de Sierra Hidalga oriental y del sector central de Sierra Blanquilla tiene lugar hacia el río Turón, mientras que el sector occidental de esta última sierra parece descargar subterráneamente hacia la depresión de Ronda. Las altas velocidades de flujo deducidas a partir del ensayo en Sierra Hidalga, superiores a 190 m/h, demuestran un funcionamiento propio de acuífero kárstico. En la cuenca alta del río Turón se ha constatado la existencia de una estrecha interrelación entre las aguas superficiales y subterráneas.

**Palabras clave:** Acuífero kárstico, ensayo multitrizador, Serranía de Ronda oriental, relación río-acuífero.

Geogaceta, 52 (2012), 145-148.  
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2012

Fecha de revisión: 26 de abril de 2012

Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

## Introducción

La Serranía de Ronda oriental (Fig. 1) se encuentra en el sector NO de la provincia de Málaga y está formada, entre otras, por las sierras Hidalga y Blanquilla. Esta región se caracteriza por presentar una orografía abrupta y un clima de tipo continental-mediterráneo, con valores medios anuales de precipitación y temperatura de 960 mm y 13 °C, respectivamente.

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio forma parte del dominio Subbético Interno occidental o Penibético (Martín Algarra, 1987), perteneciente a la Zona Externa de la Cordillera Bética. La se-

cuencia estratigráfica de este dominio geológico presenta tres grupos litológicos (Fig. 1): arcillas con evaporitas del Triásico superior en la base; un conjunto intermedio formado por dolomías y calizas del Jurásico (espesor >500 m); y, a techo, una sucesión de margas y margocalizas de edad Cretácico-Paleógeno. Sobre todos ellos, y discordantes, afloran calcarenitas de edad Mioceno superior que constituyen el relleno de la depresión de Ronda.

La estructura geológica está compuesta por pliegues con forma de cofre, de dirección NE-SO e inmersión hacia el NE. En los núcleos anticlinales afloran las dolomías y calizas jurásicas, mientras que los núcleos

sinclinales están ocupados por las margas y margo-calizas cretácico-terciarias (Cruz-Sanjulián, 1974; Martín Algarra, 1987). Estos pliegues están afectados por fracturas de direcciones predominantes N50°-70°E y N150°E (Fernández *et al.*, 1981).

Las calizas y dolomías jurásicas de las sierras Hidalga y Blanquilla ocupan una superficie de 50 km<sup>2</sup> y son permeables por fisuración y/o karstificación. Además, presentan un gran desarrollo de formas exokársticas de absorción preferencial, entre las que destacan: dolinas con sumideros, uvalas y campos de lapiaz.

La técnica de trazado artificial constituye una herramienta de gran utilidad en hi-

drogeología kárstica (Käss, 1998; Antigüedad *et al.*, 2000; Benischke *et al.*, 2007), que permite conocer el movimiento de las aguas subterráneas y definir las zonas de recarga, no siempre fáciles de delimitar por otros métodos.

En este trabajo se muestran los resultados del ensayo multitrizador realizado con los siguientes objetivos: precisar las áreas de alimentación de los manantiales que drenan las sierras Hidalga y Blanquilla, determinar las relaciones hidráulicas entre ambos macizos carbonáticos y conocer la interacción entre las aguas subterráneas y superficiales en la cuenca alta del río Turón.

### Características hidrológicas e hidrogeológicas

La principal divisoria hidrográfica en el área de estudio (Fig. 1) separa las cuencas vertientes a los ríos Guadiaro, al oeste, y Guadalhorce, al este. Esta última, a su vez, se divide en dos subcuencas: río Guadalteba (al norte) y Turón (al sur). La cuenca alta del río Turón ocupa una superficie aproximada de 50 km<sup>2</sup>, e incluye materiales permeables (calizas y dolomías jurásicas) y de baja permeabilidad (margas y margocalizas). Las aguas superficiales de los arroyos de Buenavista y de la Higuera (Fig. 1), junto con la descarga subterránea de las sierras Hidalga y Blanquilla, aportan caudal al río Turón en épocas de lluvia. En estiaje, la alimentación procede únicamente de las aguas subterráneas.

La recarga de los acuíferos estudiados se produce esencialmente por infiltración directa de lluvia. La descarga de Sierra Hidalga tiene lugar hacia el O (Fig. 1), por los manantiales del río Grande (rG; ~15 l/s, 770 m s.n.m.), y hacia el NE por el manantial de Buenavista (Bv; <100 l/s, 730 m s.n.m.). El drenaje de Sierra Blanquilla se produce por su borde sur (Fernández *et al.*, 1981; Jiménez *et al.*, 2007), a través de los manantiales permanentes de El Burgo (BG; ~1200 l/s, 600 m s.n.m.) y Hierbabuena (HB; ~100 l/s, 650 m s.n.m.), y las surgencias *trop plein* Tp1 (~100 l/s; 655 m s.n.m.) y Tp2 (<50 l/s; 670 m s.n.m.). La descarga visible de Sierra Blanquilla se completa, en su límite NO, con el manantial Hidalga (Hd; <10 l/s, 860 m s.n.m.).

En el cauce del río Turón hay diques que laminan las avenidas, dos de ellos situados a pocos metros, aguas abajo, de los manantiales más caudalosos (HB y BG).

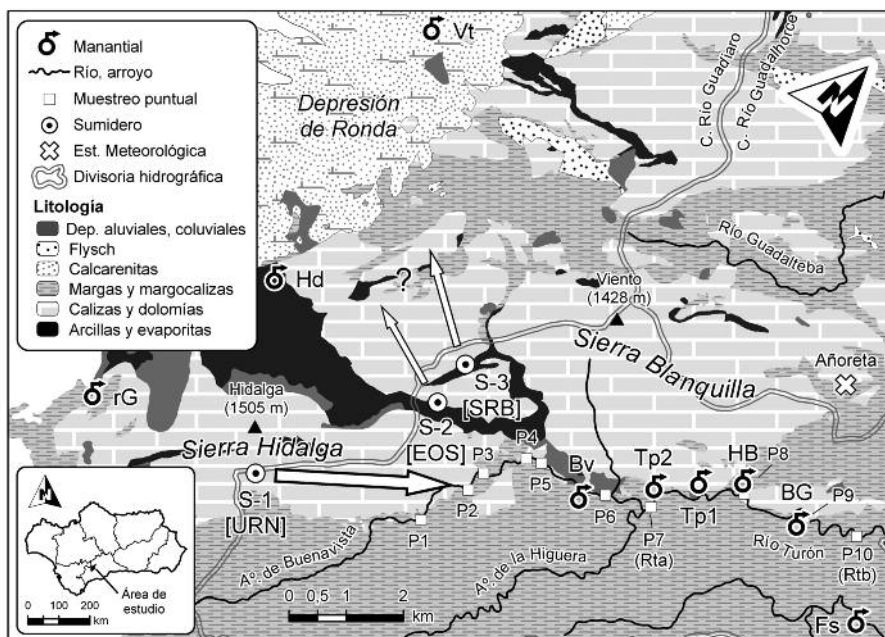


Fig. 1.- Situación del área estudiada, mapa litológico y conexiones hidrogeológicas (flechas blancas: constatada desde S-1 y supuestas desde S-2 y S-3) deducidas a partir del ensayo multitrizador.

Fig. 1.- Location of the test site, lithological map and hydrogeological connections (white arrows: proved from S-1 and supposed from S-2 and at S-3) deduced from multitracer test.

### Metodología

Durante el ensayo multitrizador se registraron datos horarios de precipitación en una estación meteorológica localizada en el cortijo de Añoreta (Fig. 1; 965 m s.n.m.). Los caudales en el río Turón se controlaron mediante aforos químicos, por el método de dilución de sal común, aguas arriba (Rta) y abajo (Rtb) de la zona de descarga (Fig. 1).

De forma complementaria, entre febrero y mayo de 2010, se llevaron a cabo 3 campañas puntuales de medición de caudal, conductividad eléctrica (CE) y uranina en 10 puntos situados a lo largo del río Turón y del arroyo de Buenavista (muestreo puntual; Fig. 1).

Para la inyección múltiple, realizada el 19 de febrero de 2010, se seleccionaron 3 sumideros kársticos (Fig. 1): S-1, localizado en el altiplano de Sierra Hidalga (1310 m s.n.m.), y S-2 y S-3 (1150 y 1200 m s.n.m.) ubicados en el sector occidental de Sierra Blanquilla. Los trazadores utilizados fueron uranina (URN, *Acid Yellow 73*), eosina (EOS, *Acid Red 87*) y sulforodamina B (SRB, *Acid Red 52*). La uranina se inyectó en S-1 (Fig. 1), que no se encontraba activo, entre las 11:15 y las 12:15 horas. Para garantizar la movilización de los 3 kg de trazador se utilizó una cuba de 8 m<sup>3</sup> de agua, que pro-

porcionó un caudal continuo de entrada de 2 l/s. La inyección de 3 kg de eosina y otros 2 kg de sulforodamina B se realizó a las 11:00 horas del mismo día, en los sumideros S-2 y S-3, respectivamente. Los caudales de entrada estimados fueron de 5 (S-2) y 30 l/s (S-3).

La recogida de muestras de agua se inició el 19 de febrero a las 23:00 y finalizó el 4 de marzo a las 19:00 horas. A los puntos iniciales de muestreo (manantiales del río Turón, Hd y rG) se añadieron los manantiales de la Ventilla (Vt; ~40 l/s, 730 m s.n.m.; Fig. 1) y de la Fuensanta (Fs; ~70 l/s, 630 m s.n.m.) puesto que no se conocen sus áreas de recarga. Las muestras se tomaron cada hora y de forma automática en el manantial rG, y de forma manual y con una periodicidad de 2 horas en el resto de manantiales citados. La periodicidad de muestreo se amplió a 24 horas al cabo de 3 días de ensayo en rG, y después del día 23 en los demás puntos muestreados. El número de muestras recogidas durante el ensayo fue 40 (Hd, Vt, BG, Rta y Rtb), 47 (Fs) y 83 (rG). Éstas se transportaron y almacenaron en frascos de topacio de 60 ml, en total oscuridad, para evitar la fotodegradación del trazador. Los análisis se efectuaron en 48 horas después del muestreo, con un fluorímetro Perkin Elmer LS55, en el Laboratorio de Hidrogeología de la Universidad de Má-

laga. El límite de detección de la uranina es 0,04 µg/L.

## Resultados

De los tres trazadores inyectados sólo apareció uranina en los puntos controlados en el valle del río Turón, mientras que eosina y sulforrodamina B no fueron detectadas. Los parámetros hidráulicos deducidos a partir del ensayo se recogen en la tabla I y en la figura 2. La uranina se registró por primera vez en el río Turón en Rta (Figs. 1 y 2), 31 h después de la inyección. No obstante, la primera aparición del trazador tuvo lugar en el manantial de Buenavista (Bv; Tabla I, Figs. 1 y 3), el único punto no muestreado

directamente (por la gran dificultad de acceso). La concentración máxima medida en Rta fue de 258,9 µg/L. La uranina, además de aparecer en Rta, fue detectada 5 horas después en el manantial BG, donde se registró una concentración de 22,7 µg/L, algo menos del 10% de la concentración máxima en Rta.

En el manantial Bv se ha estimado una velocidad máxima de flujo subterráneo de 194,1 m/h (Tabla I) y una velocidad promedio de 171,5 m/h. Para ello se ha descompuesto el trayecto supuestamente seguido por el trazador (desde S-1) en dos tramos, uno subterráneo y otro superficial, y para este último se ha tenido en cuenta la velocidad media del trazador calculada a partir

del flujo superficial durante el ensayo (682,7 m/h) y los tiempos de primera llegada y máxima concentración de la sustancia en el río (Rta). Las curvas de concentración de uranina resultantes del flujo subterráneo hasta el manantial Bv, aunque no fueron registradas en dicho punto, debieron de presentar una morfología parecida a las observadas en los puntos del río Rta y Rtb (Fig. 2), con concentraciones aun más elevadas.

Las medidas de caudal en el río fueron insuficientes para cuantificar la tasa de recuperación de la uranina en el punto Rta, el más cercano al manantial Bv.

En la figura 3 se presentan los resultados de las 3 campañas de muestreo puntual a lo largo del río Turón (Fig. 1). El trazador se detectó por primera vez, y con la máxima concentración, en el punto 6 (justo aguas abajo de Bv), donde se produjo un primer aumento significativo de caudal y de CE. La uranina también se detectó en las aguas de los puntos P7 (Rta), P9 (BG) y P10 (Rtb). En las otras dos campañas, realizadas en condiciones de aguas intermedias-bajas, no se detectó trazador y las variaciones más relevantes de caudal y CE tuvieron lugar en dos sectores: en los puntos P6-P7 y aguas abajo de P8 (HB) o, en su defecto, de P9-P10. No obstante, dichos cambios resultaron ser más significativos en este segundo tramo.

3 kg [URN] Inyección en sumidero (S1) de Sierra Hidalga	*NC	**C			Unids.
	***Bv	Rta	BG	Rtb	
Distancia punto de inyección	5,9	6,9	9,6	10,6	km
Tiempo de primera detección	—	31	36	36	h
Tiempo máx. concentración	30,4	35	40	41	h
Máxima concentración	—	258,9	22,7	75,1	µ g/L
Máxima velocidad de flujo	194,1	221,6	265,8	294,4	m/h
Velocidad flujo dominante	171,5	196,3	239,3	258,5	m/h
Caudal medio	—	>3,3	—	>8,9	m <sup>3</sup> /s

Tabla I. Principales parámetros obtenidos del ensayo multitrizador. \*NC = punto no controlado; \*\*C = punto controlado; \*\*\* Bv = datos deducidos a partir del ensayo.

Table I. Main hydraulic parameters deduced from the multitracer test. \*NC = not measured; \*\*C = measured; \*\*\*Bv = data deduced from test.

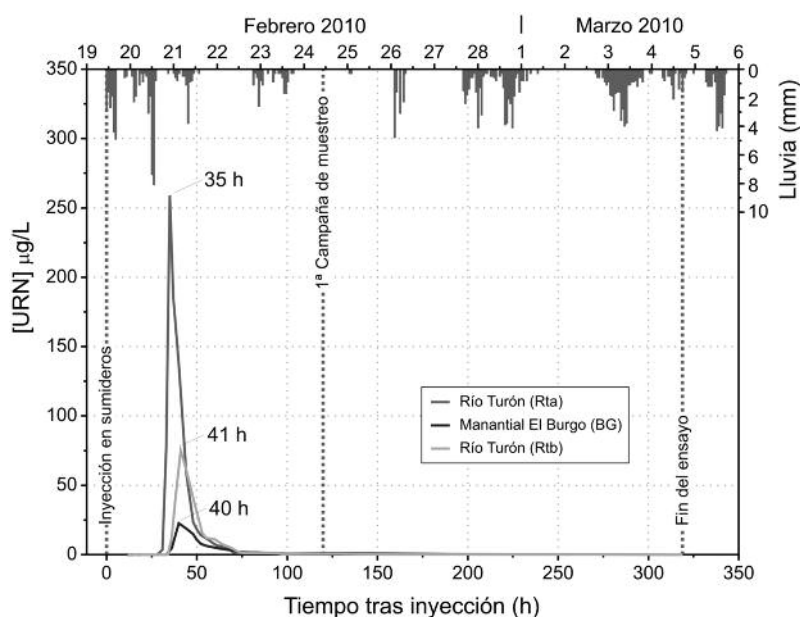


Fig. 2.- Curva de concentración de uranina en los puntos Rta, BG y Rtb, y distribución de los eventos pluviométricos durante el ensayo.

Fig. 2.- Uranine breakthrough curve recorded at sampling points Rta, BG and Rtb, and rainfall events during multitracer test.

## Discusión e interpretación

La detección de uranina durante el ensayo multitrizador, en el punto Rta del río y en el manantial Bv (entre los puntos P5 y P6, Fig. 3), pone de manifiesto el drenaje del sector centro-oriental de Sierra Hidalga hacia el valle del río Turón. Las altas concentraciones de trazador medidas en Rta (>250 µg/l) y los valores medios de caudal en este punto del río (3,3 m<sup>3</sup>/s; Tabla I) podrían indicar que la masa de trazador recuperada en Bv fue relativamente alta.

El trazador contenido en las aguas del río Turón interacciona con las aguas de descarga de Sierra Blanquilla, especialmente en el entorno de los manantiales que se encuentran regulados por diques, como es el caso de BG. La infiltración y mezcla de aguas está condicionada por la retención y almacenamiento temporal de las aguas en este tipo de estructuras, que elevan de forma artificial el nivel piezométrico en la zona de descarga. Como consecuencia de

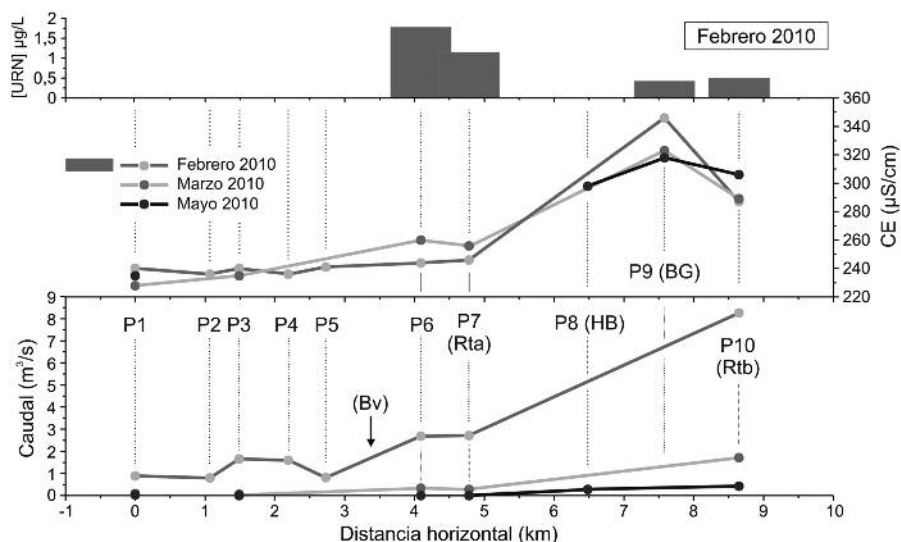


Fig. 3.- Evolución espacial de las concentraciones de uranina (arriba), CE (centro) y caudal (abajo) medidas a lo largo del río Turón en tres campañas de muestreo realizadas en 2010.

Fig. 3.- Spatial evolution of uranine contents (upper), EC (middle) and discharge (lower) measured along the Turón river in February, March and May 2010 sampling campaigns.

esto se detectó uranina en el manantial BG, más diluida que las concentraciones medidas en el río durante el ensayo. Además, las variaciones de caudal y CE que experimentan las aguas del río por debajo del manantial Bv son indicativas de la descarga de agua subterránea, más mineralizada, que procede de la recarga en los afloramientos carbonáticos. Todo ello evidencia la contribución de las aguas subterráneas de Sierra Blanquilla al caudal del río Turón y la interrelación entre las aguas superficiales y subterráneas.

No se detectó este trazador en los manantiales rG y Hd, probablemente porque el drenaje se dirige hacia el NE. Del mismo modo, parece que no hay conexión hidrogeológica entre las sierras Hidalga y Blanquilla, debido a que los materiales arcillosos triásicos (Fig. 1) actúan como barrera impermeable.

La ausencia de eosina y sulforrodamina B en el muestreo podría indicar que la descarga del área occidental de Sierra Blanquilla se produce de forma no visible hacia la depresión de Ronda (NO), aunque no se ha detectado trazador en el manantial de la Ventilla (Vt, Fig. 1).

La forma de las curvas de concentración

de uranina registradas en los puntos del río Rta y Rtb y en el manantial BG, estrecha y puntiaguda, sugiere un drenaje rápido del sector nororiental del acuífero de Sierra Hidalga a través del manantial de Buenavista (Bv), por un sistema de conductos bien desarrollados, que es típico de acuíferos kársticos.

### Conclusiones

La realización de un ensayo multitrazador en la Serranía de Ronda oriental ha permitido mejorar el conocimiento sobre la relación entre las zonas de recarga y descarga de los principales manantiales que drenan los acuíferos carbonáticos situados en la cabecera del río Turón. El manantial de Buenavista (Bv) drena el sector oriental de Sierra Hidalga, mientras que los otros manantiales localizados en la cuenca alta del río Turón drenan la parte central de Sierra Blanquilla. El drenaje del sector occidental de esta última podría llevarse a cabo hacia la depresión de Ronda.

Además, del ensayo multitrazador y de la cartografía geológica se puede deducir que no hay conexión hidrogeológica entre las sierras Hidalga y Blanquilla, ni entre los

sectores diferenciados en la segunda. Esta desconexión es debida a la presencia de materiales arcilloso-evaporíticos triásicos, que independizan dichas estructuras.

La interrelación entre las aguas superficiales del río Turón y las aguas subterráneas se ha constatado mediante la detección de trazadores, especialmente en las aguas del manantial de El Burgo (BG), y mediante la descarga subterránea de Sierra Blanquilla.

Las altas velocidades de flujo calculadas para el macizo de Sierra Hidalga son características de acuíferos kársticos, cuyo drenaje se produce rápidamente por un sistema de conductos bien desarrollado.

### Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía a los proyectos RNM-02161 de la Junta de Andalucía y CGL2008-06158 de la DGICYT, IGCP-598 de la UNESCO y Acción Integrada GE-2009-0060. Se agradece la ayuda prestada a Jesús Ferrete, Diego Plaza, David García, Bibiana Avendaño y Marta Barceló. Se agradece también los constructivos comentarios del Dr. Tomás Morales Juberías y de los revisores anónimos.

### Referencias

Antigüedad I., Morales T., Fernández de Valderama I., Mugerza I., Arrate I. y Bezares P. (2000). *Hydrogéologie*, 3, 47-58.

Benischke, R., Goldscheider, N. y Smart, C. (2007). *Methods in karst hydrogeology*. Taylor & Francis, 147-170.

Cruz-Sanjulián, J. (1974). *Estudio geológico del sector Cañete la Real-Teba-Osuna*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 431 p.

Fernández, R., Pulido-Bosch, A. y Fernández Rubio, R. (1981). En: *I Simp. Agua en Andalucía*, II: 643-658.

Jiménez P., Fernández R. y Jiménez Fernández P. (2007). En: *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*, 2, 49-58. Diputación de Málaga-IGME-UMA.

Käss, W. (1998). *Tracing techniques in geohydrology*. Rotterdam, Balkema, 581 p.

Martín Algarra A. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las zonas internas y las zonas externas de la Cordillera Bética (Sector Centro-Occidental)*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 1171 p.