

# Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico y la vulnerabilidad a la contaminación de la Sierra de las Nieves (Málaga) a partir de un ensayo de trazador en condiciones de estiaje

*Considerations on the hydrogeological functioning and on the vulnerability of groundwater to contamination in Sierra de las Nieves (Málaga) during a dry-period tracer test*

B. Andreo <sup>(1)</sup>, I. Vadillo <sup>(1)</sup>, F. Carrasco <sup>(1)</sup>, C. Neukum <sup>(2)</sup>, P. Jiménez <sup>(1)</sup>, C. Liñán <sup>(1)</sup>, N. Goldscheider <sup>(3)</sup>, H. Hötzl <sup>(2)</sup>, R. Ferrer <sup>(4)</sup>, L. del Campo <sup>(4)</sup>, N. Göppert <sup>(2)</sup>, J.M. Vías <sup>(1)</sup>, I. Pérez <sup>(1)</sup>, D. Sánchez <sup>(1)</sup> y A. Cobos <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, 29071 Málaga, andreo@uma.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Geología Aplicada, Universidad de Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, Alemania. christoph.neukum@agk.uni-karlsruhe.de

<sup>(3)</sup> Centro de Hidrogeología, Universidad de Neuchâtel, 2007 Neuchâtel, Suiza. nico.goldscheider@unine.ch

<sup>(4)</sup> Grupo de Espeleología de la Sociedad Excursionista de Málaga, C/ República Argentina, 9 (El Limonar), Málaga

## ABSTRACT

*A tracer test during low-flow conditions was carried out in the karstic aquifer of Sierra de las Nieves (Málaga) in order to assess its hydrogeological functioning and vulnerability to contamination. Two kilogrammes of Eosine were injected in an active siphon located in the Sima del Aire cave shaft (-640 m) at the end of August 2003. The springs were sampled until November 2003. For more than 50 days, the tracer was not detected at any of the springs. After several rainfall events in October 2003, a signal was observed in the two Rio Grande springs. The first arrival of Eosine appears before the increase of spring discharge and the dilution effect of the most important rainfalls (86 mm, October 25<sup>th</sup>). The calculated groundwater velocities (below 4 m/hour) are not representative of the dry period because rainfall forced the Eosine transport. However, they give an idea about the long residence time if a contamination event occurs during low-flow conditions.*

**Key words:** karstic aquifer, Sierra de las Nieves, tracer test

*Geogaceta*, 37 (2005), 143-146

ISSN:0213683X

## Introducción

El sistema acuífero de la Sierra de las Nieves (Fig. 1), está situado en la parte occidental de la provincia de Málaga, concretamente forma parte de la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves, que se ubica en el interior de un enclave natural declarado Parque Natural y Reserva de la Biosfera de la UNESCO. El acuífero tiene una superficie aproximada de 100 km<sup>2</sup> y toma el nombre del macizo más elevado de la zona (Sierra de las Nieves) con picos que superan los 1.700 m de altitud, entre los que destaca el vértice Torrecilla (1.919 m), el más alto de la provincia de Málaga. En esta sierra existe un gran desarrollo del modelado kárstico (Delannoy, 1987): en la parte occidental se encuentra el paleopolje de los Llanos de la Nava, así como dolinas y campos de lapiaz, mientras en el sector oriental (en el área del vértice Torrecilla) hay abundantes dolinas de dimensiones variables, muchas de ellas con sumideros kársticos

asociados. En esta última zona se han descrito varias simas de grandes profundidades: la sima G.E.S.M., la más profunda del Sur de la península Ibérica, con más de 1.100 m de desnivel explorados hasta la actualidad (Sociedad Excursionista de Málaga, 1990) y la sima del Aire, la segunda cavidad de Andalucía en desnivel, con -650 m (Ferrer, 2003). La entrada de esta última cavidad se encuentra a 1.450 m de altitud y se desarrolla verticalmente hasta los -520 metros. A partir de esta cota y hasta los -640 m, la cavidad se extiende horizontalmente por dos niveles de cavernamiento. El primer nivel, situado entre -520 y -550 m, presenta galerías de hasta 14 metros de altura y no es activo en la actualidad, desde el punto de vista hidrogeológico. En el segundo nivel, el más profundo hasta la fecha y con dimensiones más reducidas (2-9 m de altura y 2-5 m de anchura), aparecen sifones activos (-632 m, -640 m y -650 m) que ponen de manifiesto la conexión con la zona saturada del acuífero.

Las formas kársticas antes citadas permiten una infiltración rápida del agua de lluvia y de fusión nival y favorecen la conexión directa entre la superficie y el subsuelo. Este aspecto es importante si existen contaminantes en superficie que pueden ser arrastrados hacia la zona saturada de los acuíferos y, con posterioridad, a los puntos de descarga. Dado que los acuíferos kársticos son especialmente vulnerables a la contaminación, es necesario anticiparse a ella y llevar a cabo investigaciones destinadas a planificar el uso del suelo para una adecuada protección de los recursos hídricos subterráneos y de las captaciones de abastecimiento. En este sentido, un método de investigación interesante consiste en realizar ensayos de trazadores que permiten determinar el tiempo de tránsito del trazador, la concentración máxima del mismo y la persistencia de su concentración en los puntos de descarga (e.g., Antigüedad *et al.*, 1990; Käss, 1998; González-Yélamos, 1999).

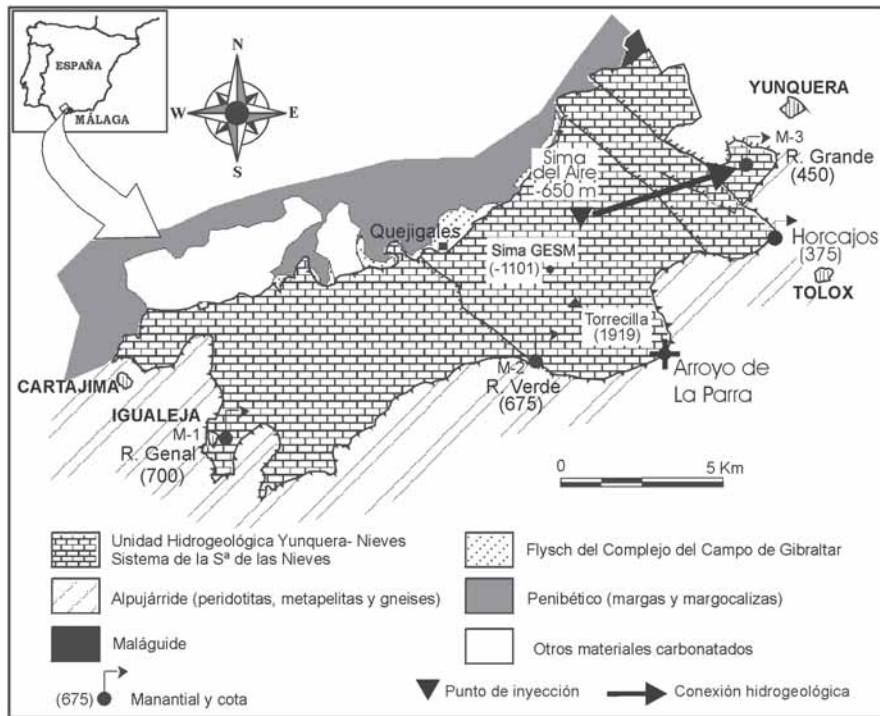


Fig. 1.- Situación geográfica y esquema hidrogeológico de la Unidad Yunquera-Nieves.

Fig.1.- Location and hydrogeologic sketch of the Hydrological Unit Yunquera-Nieves.

En el presente trabajo se recogen los resultados de un ensayo de trazador realizado en la Sierra de las Nieves (Fig. 1) en condiciones de estiaje. En este área se han realizado investigaciones hidrogeológicas mediante diferentes métodos (hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos) que indican un funcionamiento de tipo kárstico (Liñán *et al.*, 2001; Liñán, 2003). Con este trabajo se pretende conocer la conexión hidráulica entre la sima del Aire y los principales manantiales del acuífero y determinar el orden de magnitud de las velocidades de flujo en el interior del mismo. Estos resultados permitirán precisar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero deducido por otros métodos hidrogeológicos y hacer consideraciones sobre vulnerabilidad a la contaminación en la Sierra de las Nieves.

**Marco geológico e hidrogeológico**

Desde el punto de vista geológico, el sistema acuífero está formado por materiales dolomíticos y calizos de edad triásica y liásica, pertenecientes a la Unidad de las Nieves (Martín Algarra, 1987), cuya potencia supera en algunos sectores los 1.200 m. Dicha unidad está situada en el sector occidental de la Cordillera Bética, al frente de la Zona Interna. La estructura geológica corresponde a un sinclinal tumbado, vergente al NW (el sinclinal de la Torrecilla).

El acuífero de la Sierra de las Nieves está limitado, al Norte, por el contacto de cabalgamiento entre la Unidad de las Nieves y materiales del Flysch del Campo de Gibraltar y del Subbético Interno occidental (Penibéticas), que constituyen el sustrato del acuífero carbonatado (Fig. 1). Al Sur, por el cabalgamiento que pone en contacto los materiales acuíferos con materiales alpujarrides de baja permeabilidad (fundamentalmente peridotitas, metapelitas y gneises de la Unidad de los Reales). Al Este, queda limitado por el sistema de fallas de dirección N130E, que discurren entre las poblaciones de Tolox y Yunquera. El límite Oeste lo constituye el estrechamiento de la unidad tectónica de las Nieves a la altura de la población de Cartajima, sector en el que los materiales acuíferos pierden continuidad por la existencia de una serie de fracturas transversales y por el cabalgamiento de los materiales alpujarrides de baja permeabilidad.

La recarga del sistema se produce por infiltración del agua de lluvia y, ocasionalmente, de nieve. La descarga se realiza, fundamentalmente, a través de tres manantiales (Fig. 1): Río Grande, Río Verde y Río Genal. El primero, con un caudal medio de unos 625 L/s, surge en el extremo NE del sistema, a cota 450 m s.n.m., ligado a una importante fractura kilométrica de dirección NW-SE. La surgencia de Río Verde, a cota 675 m

s.n.m. y con un caudal medio de 550 l/s, se localiza en el borde meridional, en el contacto con las peridotitas alpujarrides y está relacionado con otra importante fractura plurikilométrica de dirección NW-SE, la falla de las Turquillas. El nacimiento de Río Genal, con un caudal medio de 380 l/s, se localiza en el extremo SW del sistema, a una cota de 700 m s.n.m. Otras surgencias significativas son las del Nacimiento de Tolox y Cisnera, situadas en el río Horcajos y asociadas al contacto con las peridotitas (Fig. 1). La descarga se produce a cota 375 m s.n.m. con un caudal medio conjunto de 43 L/s (Liñán, 2003).

El análisis de la forma de los hidrogramas de los tres manantiales principales, Río Genal, Río Verde y Río Grande, así como el tratamiento de los mismos mediante diferentes técnicas (análisis de la curva de recesión, análisis correlatorio y espectral, análisis de caudales clasificados), permiten definir el sistema como de tipo kárstico (Liñán *et al.*, 2001; Liñán, 2003). En todos ellos se observan rápidos e importantes aumentos del caudal en respuesta a las precipitaciones, que suelen ir acompañados de diluciones en la composición química e isotópica de las aguas (Liñán *et al.*, 1999).

Un ensayo de trazador previo, realizado mediante la inyección de Uranina en el sifón final de la sima G.E.S.M., demostró que dicha sima estaba conectada con el manantial de Río Grande (Durán y López Martínez, 1992). En trabajos más recientes (Liñán *et al.*, 1999; Liñán 2003 y Andreo *et al.*, 2004) se ha puesto de manifiesto que el manantial de Río Grande drena aguas con valores más negativos de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$  que los de las surgencias de Río Verde y Río Genal, debido a la mayor altitud de su área de recarga que se encuentra (al menos en parte) en el sector del vértice Torrecilla. Estos trabajos están de acuerdo con la conexión hidrogeológica probada mediante el ensayo de trazador previo.

**Metodología**

La inyección se realizó el día 29 de Agosto de 2003, a las 20:15 horas, en el sifón situado a cota -640 m de la Sima del aire. El trazador empleado consistió en 2 kg de Eosina (*Acid Red 87*, CI: 45 380, CAS: 17372-87-1). La duración completa de la inyección fue inferior a 10 minutos.

Durante la realización de la prueba, la precipitación diaria se ha controlado mediante un aparato de registro continuo si-

tuado en el área de Los Quejigales (Fig. 1). Así mismo, se ha medido la altura limnimétrica y/o el caudal en la estación de aforos del manantial de Río Verde. En los manantiales de Río Grande y Río Horcajos no se dispone de un control preciso de caudales; únicamente en el primero existe una estación de aforos, a 5 km aguas abajo de los puntos de surgencia, pero incluye agua de otros manantiales.

Además de la muestra de agua de los manantiales para determinar la concentración de trazador, se tomaron muestras para análisis químicos. En los puntos más alejados, donde era menos previsible que se detectara el trazador (manantial de Genal y sondeos de Arroyo de la Parra) se colocaron bolsas de carbono para constatar la posible presencia de trazador.

El muestreo se inició el día 28 de Agosto, antes de la inyección, para caracterizar de forma inequívoca la llegada y el tránsito del trazador por el acuífero y finalizó el 4 de Noviembre de 2003 en los manantiales de Grande y Verde y el 7 de Noviembre en los demás puntos de control. El total de muestras recogidas durante el ensayo ha sido de 187 en cada punto.

Las muestras se tomaron en frascos de cristal oscuro de 60 cm<sup>3</sup> y se almacenaron en oscuridad y refrigeradas para evitar la fotodegradación del trazador y aminorar la actividad microbiana, procesos causantes de la pérdida de concentración de trazador en el agua. Los análisis de las muestras han consistido en la medida de los espectros de fluorescencia del trazador con un espectrómetro de luminiscencia Perkin Elmer LS-50B, dotado de barrido sincronizado, que ha permitido estudiar de forma conjunta los espectros de excitación y emisión. El límite de detección ha sido de 0,06 mg/L. En general, los análisis se han realizado en un plazo inferior a una semana, en el Laboratorio del Departamento de Geología Aplicada de la Universidad de Karlsruhe (Alemania).

## Resultados

El ensayo de trazador se ha llevado a cabo a finales de estiaje, en ausencia de precipitaciones. La primeras lluvias del año hidrológico 2003/04 tuvieron lugar en Septiembre y Octubre de 2003. Las precipitaciones más importantes se registraron entre los días 25 y 31 de Octubre, con un total de 246 mm y una precipitación máxima diaria de 86 mm el día 25.

En el momento de la inyección, en el sifón circulaba un caudal aproximado de 5 L/s. Anteriormente, durante la campaña

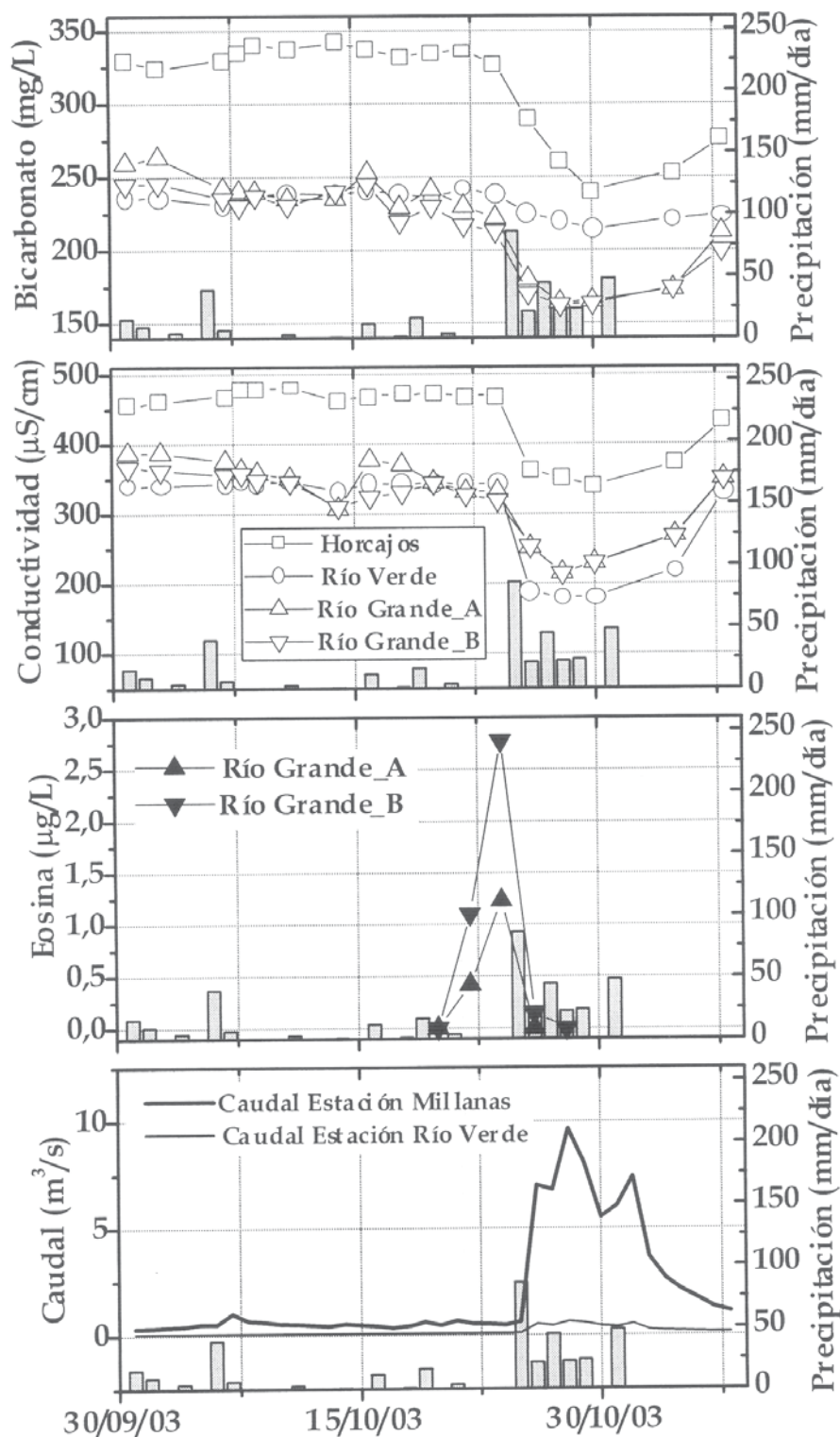


Fig. 2.- Evolución de la conductividad eléctrica y del contenido en bicarbonato en el agua de los manantiales de Horcajos, Río Verde y de las dos surgencias del nacimiento de Río Grande durante el ensayo de trazador. Se ha representado también los datos de concentración de Eosina en las dos surgencias del nacimiento de Río Grande así como la evolución de la precipitación en la estación de Los Quejigales y del caudal en el Río Grande (Estación de Las Millanas) y en el manantial de Río Verde. Esta figura incluye solo el periodo en el que se registraron variaciones de los parámetros controlados.

Fig. 2.- Evolution of electrical conductivity and bicarbonate content in the springwaters of Horcajos, Verde river and the two spring of Grande river during the tracer test. It has been also represented the concentration of Eosine in the two springs of Río Grande, the rainfall in Quejigales station and the outflow in Río Grande (Millanas station) and Río Verde springs. This figure include only the period in which were recorded variations in the monitored parameters.

espeleológica realizada en Abril de 2003 por el Grupo de Espeleología de la Sociedad Excursionista de Málaga, se estimó un caudal de varias decenas de L/s.

No se detectaron variaciones significativas del caudal de los manantiales durante el ensayo, como corresponde con el régimen hidrodinámico de finales del agotamiento. En la estación de aforos de Río Grande se registró un ligero aumento de caudal el día 20 de Octubre, en respuesta a las lluvias caídas con anterioridad, aunque fue a de finales de Octubre (concretamente el día 25), cuando los manantiales mostraron incrementos de caudal (Fig. 2).

Entre los días 22 y 26 de Octubre de 2003 se detectó trazador en los dos puntos de surgencia controlados en el nacimiento de Río Grande (Figs. 1 y 2). La primera detección (22/10/03) y la concentración máxima de Eosina (24/10/03) se registraron antes del máximo de precipitación del día 25, por lo que el flujo de agua que forzó la salida de trazador del sistema se infiltró durante los periodos lluviosos anteriores. En el resto de puntos de control no se detectó el trazador. Las precipitaciones del día 25 provocaron una dilución generalizada de los parámetros hidroquímicos en el agua de todos los manantiales (Fig. 2).

### Discusión y conclusiones

No se dispone de un adecuado control de caudales en las surgencias del nacimiento de Río Grande, por lo que no se puede conocer la cantidad total de trazador recuperada. En estas circunstancias el ensayo tiene solo un interés cualitativo, en cuanto que permite demostrar la conexión hidrogeológica entre la sima del Aire y el manantial de Río Grande. El flujo subterráneo se dirige hacia el NE, hacia las surgencias de Río Grande, siguiendo la dirección estructural marcada por el sinclinal de la Torrecilla. Esta conclusión está de acuerdo con los trabajos previos (Durán y López Martínez, 1992; Liñán *et al.*, 1999; Liñán, 2003; Andreo *et al.*, 2004), según los cuales el sector del vértice Torrecilla forma parte del área de recarga del nacimiento de Río Grande.

Las curvas de paso del trazador son propias de acuíferos kársticos, con ascensos y descensos muy acusados de la curva de respuesta, lo que indica un tránsito rápido de un flujo dominante proveniente de las áreas de inyección (áreas de recarga).

El tiempo de primera detección de la Eosina es de 54 días y de 56 días hasta el pico de concentración (Fig. 2). Dado que la distancia entre la sima del Aire y el manantial es de aproximadamente 5 km, se puede estimar una velocidad máxima de flujo de 93 m/día (~ 3'9 m/hora) y una velocidad de flujo dominante de 89 m/día (~ 3'7 m/hora). Estos datos son poco significativos de la velocidad de flujo en el acuífero de la Sierra de las Nieves, en condiciones de estiaje, ya que el trazador hubiera tardado más tiempo en drenarse por los manantiales de no haberse producido las lluvias de Septiembre y Octubre.

En condiciones de estiaje existe un flujo lento a través de la potente zona no saturada del acuífero (del orden de 1 km de espesor). Sin embargo, el sistema responde rápidamente ante las precipitaciones con aumentos de caudal y diluciones de la composición química del agua de los manantiales, lo cual demuestra la existencia de una red kárstica en su interior que permite el drenaje rápido en condiciones de recarga. Este aspecto es importante en términos de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Un contaminante potencial que se infiltrara en el acuífero a finales de estiaje, podría permanecer varios meses en el acuífero aunque posiblemente sería eliminado en las posteriores épocas de recarga.

### Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los Proyectos REN2002-01797/HID y REN2003-01580/HID de la DGI, realizada conjuntamente por miembros del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía) y el Grupo de Geología Aplicada de la Universidad de Karlsruhe (Alemania) en el marco de la Acción Europea COST 620 y de la Acción Integrada

HA2002-0128. Se agradece la colaboración prestada por los miembros de la Sociedad Excursionista de Málaga y los estudiantes de Ciencias Ambientales de la Universidad de Málaga para la toma de las muestras durante el ensayo.

### Referencias

- Andreo, B.; Liñán, C.; Carrasco, F.; Jiménez de Cisneros, C.; Caballero, E. y Mudry, J. (2004). *Applied Geochemistry*, 19, 561-574.
- Antigüedad, I., Ibarra, V. y Morales, I. (1990). *Memoires of IAH*, XXII, 1, 212-215.
- Delannoy, J.J. (1987). *Reconocimiento biofísico de Espacios Naturales de Andalucía*. Junta de Andalucía, Casa de Velázquez: Madrid, 50 p.
- Durán, J.J. y López Martínez, J. (1992). En: *Hydrogeology of Selected Karst Regions* (Back, Herman y Paloc, Eds.). IAH Publ. 13, 43-60.
- Ferrer, R. (2003). *Monografías Espeleológicas*, 5, 61-70.
- González-Yélamos, J. (1999). En: *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico* (B. Andreo *et al.*, Eds.). Patronato Cueva de Nerja, 441-451.
- Käss, W. (1998). *Tracing technique in geohydrology*. Rotterdam, Balkema, 581 p.
- Liñán, C. (2003). *Hidrogeología de Acuíferos Carbonatados de la Unidad Yunquera-Nieves*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 317 p.
- Liñán, C.; Andreo, B. y Carrasco, F. (1999). En: *XXIX Congress of International Association of Hydrogeologists*, 203-208.
- Liñán, C., Carrasco, F. y Andreo, B. (2001). En: *V Simposio Agua Andalucía*, 2, 63-72.
- Martín Algarra, A. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental)*. Tesis Doctoral, Univ. Granada, 1171 p.
- Sociedad Excursionista de Málaga (1990). *Monografías subterráneas*, 4, 36 p.