

EXPERIENCIA EN LA UTILIZACIÓN DE EQUIPOS MÓVILES Y PEQUEÑAS INSTALACIONES EN INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS LLEVADAS A CABO POR EL INSTITUTO DEL AGUA DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

José Benavente Herrera*

RESUMEN

Los problemas con este tipo de instrumentos se plantean cuando las condiciones de uso se alejan de las usuales. Por ejemplo: aguas muy salinas (formaciones evaporíticas o lagos “playa”: valores de conductividad fuera de rango; corrosión en dispositivos fijos) o muy diluidas (alta montaña: valores muy bajos de conductividad y efecto comparativamente mayor de variaciones en la alimentación por efecto de la temperatura); accesibilidad de ciertos equipos –y protección frente a fauna- en lagunas y humedales; interior de cavidades kársticas (humedad elevada; incrustabilidad); compatibilidad con medidas de protección mediambiental; equipos radiactivos: permisos y controles requeridos que encarecen su amortización. En cuanto al servicio técnico, se considera básico que sea rápido y receptivo a las cuestiones de los usuarios.

Palabras clave

Control hidrogeológico; equipos móviles; pequeñas instalaciones; condiciones de uso; salmueras; alta montaña; humedales; cavidades; Espacios Protegidos

ABSTRACT

Problems using this kind of equipments are likely to be expected when working conditions are far different of the usual ones. This can be the case, for instance, when dealing with: brines (evaporite formations or playa lakes: conductivity values out of the upper measuring range; corrosion if the instruments must stay) or very dilute waters (high mountain environments: very low conductivity values which can be considerably affected by small temperature-driven power oscillations in batteries); movility of some equipments –and protection against fauna- in ponds and wetlands; inside karstic caves (high humidity; scaling); fitting environmental protective steps in natural sites; radioactive devices: legal requirements can increase equipment maintenance. Technical support should be as quick and user-friendly as possible.

Key words

Hydrogeological monitoring; portable equipments; small installations; working conditions; brines; high mountain; wetlands; caves; Protected Sites

INTRODUCCIÓN. TIPOS DE EQUIPOS

Desde su creación, a primeros de los 90 del pasado siglo, en el Instituto del Agua de la Universidad de Granada (IAUGR) o en el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos (GIRH: Plan Andaluz de Investigación, Junta de Andalucía) se han llevado a cabo estudios hidrogeológicos con diferentes objetivos, que más adelante se comentarán, en los cuales se ha empleado una instrumentación relativamente variada.

Hay equipos que están indicados específicamente para objetivos bastante concretos. Es el caso, por ejemplo, de una cápsula de cerámica para muestrear agua de la zona no saturada. Por el contrario, algunos tipos de instrumentos son empleados en una amplia gama de investigaciones sobre aguas subterráneas. Así, un conductivímetro provisto de un cable apropiado puede ser empleado en reconocimientos hidroquímicos rutinarios, en la realización de aforos por integración en cursos de agua o para medir el flujo mediante ensayos de dilución en piezómetros.

Cabe distinguir, así mismo, entre instrumentos típicamente hidrológicos (hidroniveles y micromolinetes, por ejemplo) y otros correspondientes a metodologías auxiliares de empleo más o menos generalizado en las investigaciones de aguas subterráneas, como son las medidas de variables climatológicas, topográficas, geofísicas del terreno o físico-químicas de las aguas.

TIPOS DE INVESTIGACIONES

A continuación se presenta una selección de estudios realizados (tesis doctorales o proyectos de cierta entidad), distinguidos tanto en función de los diferentes objetivos

como de sus particulares ámbitos de trabajo:

- Procesos en la zona no saturada, ZNS (Doñana, en la provincia de Huelva –Olías (1995)- y Cueva de Nerja, en la provincia de Málaga); el caso de Nerja es de resaltar, por cuanto los estudios atienden también- además de a los procesos de infiltración y goteo en la cueva- al efecto del importante número de visitantes en los parámetros ambientales de la cavidad (Carrasco et al., 1995; Benavente et al., 1996b; Andreo et al., 2002). La peculiaridad de este ámbito es que las observaciones sobre los procesos en la ZNS se realizan desde dentro de ella.
- Relaciones entre sistemas de flujo en acuíferos carbonatados montañosos y las características físico-químicas e isotópicas de sus aguas (Sierras de Cazorla y Segura, en la provincia de Jaén, y Sierras de Baza-Gádor-Albuñol-Lújar, en la provincia de Granada) (Benavente et al., 1990; Cruz San Julián et al., 1990, 1992).
- Limnología y condicionamiento hidrogeológico de zonas húmedas protegidas, como, por ejemplo, lagunas de alta montaña (Sierra Nevada), lagunas dulces o saladas en ambientes evaporíticos (Fuente de Piedra, Campillos, Archidona y otras del norte de Málaga) y lagunas litorales (Albuferas de Adra, en Almería) (Cruz San Julián y Benavente, 1996; Almécija, 1997; Rodríguez Rodríguez, 2002).
- Acuíferos costeros e intrusión marina (río Verde de Almuñécar, en la provincia de Granada y río Vélez, en la provincia de Málaga) (Carrasco et al., 2000).
- Aguas subterráneas en distritos mineros abandonados -tanto en lo relativo a aspectos hidrodinámicos como a calidad

de las aguas- e hidrogeología en materiales graníticos (batolito de Linares, en la provincia de Jaén) (Hidalgo et al., 1999).

COMENTARIOS SOBRE EL EQUIPAMIENTO UTILIZADO

A continuación se hace un breve comentario sobre los instrumentos y equipos portátiles utilizados en nuestros estudios a partir de su ámbito más frecuente de utilización.

Antes se aludió a los instrumentos de uso bastante generalizado. Este es el caso, por ejemplo, de los medidores de características físico-químicas de las aguas: temperatura, pH, potencial redox, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto (foto 1). De ellos, pH y oxígeno disuelto suelen proporcionar lecturas menos estables que el resto, por lo que retardan a veces la toma de datos. Esto tiene su importancia cuando se trabaja en ciertas zonas de montaña con accesos que consumen bastante tiempo, pues el rendimiento de los controles disminuye y el coste de la investigación se encarece.

El límite superior de medida de muchos conductivímetros no es apto para registros



Foto 1. Bombo en un piezómetro con fines de control detallado de las características físico-químicas de las aguas subterráneas



Foto 2. Salida de aguas captadas en el manantial de Meliones (Málaga)

en ciertos ámbitos investigados: manantiales que drenan evaporitas, lagos salados en fase evaporativa terminal o salmueras freáticas asociadas (foto 2). La elevada salinidad (más de 300 g/L) de este tipo de aguas hace que los elementos metálicos en contacto experimenten una apreciable corrosión, incluso en los calificados como “inoxidables”.

La circunstancia contraria a la anterior también plantea problemas. En lagunas de alta montaña se miden frecuentemente conductividades inferiores a 10 S/cm y temperaturas de pocos grados sobre cero. En estas condiciones, cambios de temperatura exterior (producidas por las diferencias de insolación) pueden inducir pequeñas diferencias de voltaje en las baterías y las lecturas no se estabilizan o muestran cierta componente errática.

Los dispositivos compactos de muchas de estas variables físico-químicas (“sondas multiparamétricas”) suelen estar mejor adaptados para su conexión con “data-logger” o para reconocimientos limnológicos desde barcas en lagos de profundidad escasa. En caso de resultar dañado el instrumento, sin embargo, se imposibilita la medida de variables que podrían hacerse por separado.

Cuando no existen estaciones climatológicas próximas a los sectores de estudio, o cuando no se dispone en ellas de datos de las variables que interesan en los estudios hidrogeológicos, se recurre a la instalación de aparatos individuales (pluviómetros o pluviógrafos, por ejemplo) o estaciones portátiles. En conexión con un “data-logger” se mide radiación, presión barométrica, humedad relativa, temperatura del aire, dirección y velocidad del viento e intensidad de precipitación. Cuando los medidores de precipitación convencionales se instalan en cumbres montañosas, que es una circunstancia de evidente interés hidrogeológico, existe el problema de la cuantificación de las aportaciones nivales. Para ciertos trabajos de evaluación de recarga (método del balance de cloruros) o para conocer variaciones isotópicas altitudinales, es de gran interés disponer de pluviocaptadores a diferentes cotas dentro de las zonas de estudio. Nosotros hemos llevado a cabo esta labor de manera bastante artesanal, aunque efectiva (Benavente et al., 1996a; Cardenal et al., 1994).

En ciertas investigaciones (zonas húmedas, por ejemplo) es necesario medidas de evaporación. Los tanques de clase A no son, estrictamente, instrumentos portátiles, aunque en nuestro caso los hemos transportado de unos sectores de estudio a otros (foto 3). Requieren disponer de agua para reponer pérdidas, lo cual es un inconveniente si se instalan en puntos de difícil acceso, y deberían controlarse diariamente. En la laguna de Fuente de Piedra hemos obtenido valores medios mensuales (afectados por un coeficiente de 0,7) similares a los obtenidos a partir de medidas en un sencillo evaporímetro tipo “Piche” próximo. Por otra parte, si no se protegen adecuadamente, existe el riesgo de que estos dispositivos atraigan a una variada fauna que con su presencia (bebederos, chapoteos, etc.) distorsione las medidas o deteriore la instrumentación.

Una aplicación particular de ciertos instrumentos climatológicos es la realización de medidas en el interior de cavidades. Dentro de la cueva de Nerja existen, entre otros, sensores de temperatura, humedad relativa, presión barométrica, velocidad del viento (como índice de ventilación) y de intensidad de “precipitación” (en realidad, caudal de goteo) en ciertos puntos. En este último caso se han encontrado problemas de funcionamiento debido al carácter muy incrustante de las aguas recogidas, que afectan al mecanismo del pluviógrafo. También plantea inconvenientes el medidor de humedad relativa, seguramente debido a que la atmósfera a medir tiene durante largos periodos valores próximos al 100 %. En estos ámbitos particulares, los sensores de contenido en CO₂ del aire son del máximo interés. Estos sensores, sin embargo, no alcanzan a registrar algunos valores relativamente elevados del contenido en ese gas en la franja superior edáfica sobre la cavidad.

La capacidad de infiltración la hemos determinado mediante dispositivos de doble anillo. Requiere disponer de suministro de agua en cantidad suficiente, lo cual suele ser un problema. Las lecturas son frecuentemen

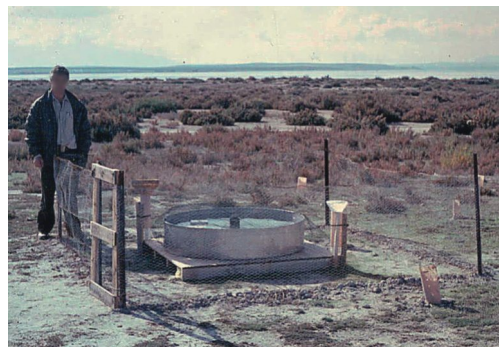


Foto 3. Tanque de evaporación (“clase A”) en el borde septentrional de la Reserva Natural de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga)

te erráticas debido al efecto de burbujas de aire atrapado por el frente húmedo. También plantea problemas la hinca apropiada del dispositivo, sobre todo cuando hay cantos en el terreno, lo que conduce a fugas laterales del agua introducida (Almécija, 1997).

Para las medidas de variaciones de almacenamiento en lagunas hemos utilizado escalas limnimétricas similares a las adosadas en las paredes de ciertas estaciones de aforo. Deben ser instaladas preferiblemente en zonas interiores de las masas de agua, por lo que el uso de instrumentos que impliquen acceso a los mismos para las lecturas no es práctico. Deben tener una numeración y marcado que sea identificable con prismáticos desde las orillas (foto 4).

La realización de aforos en secciones naturales de cauces es una técnica básica en muchos estudios hidrogeológicos. En un principio usamos micromolinetes, con hélice desplazable sobre varillas y conectada por cable a un contador -analógico o digital-separado (foto 5). Más recientemente utilizamos equipos compactos con menos problemas de conservación, al estar todos los elementos antes citados integrados en la misma carcasa. Es interesante -a efectos de interpretación de mezclas, descargas ocultas, etc.- complementar los aforos con muestreos hidroquímicos; también para hacer balances de solutos en lagos (Cardenal et al., 1992; Benavente et al., 1998). En los casos en que la sección de aforo es muy irregular, los aforadores químicos automatizados basados en el vertido al cauce de cantidades conocidas de sal (conductivímetros con un "software" adaptado a tal tarea, de hecho), son de muy sencilla utilización y permiten una variedad de salidas gráficas.

Las medidas de humedad en la zona no saturada se han efectuado en instalaciones



Foto 4. Borde occidental de la Reserva Natural de la laguna Salada de Campillos (Málaga)

controlado en el patio de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada y, sobre todo, en algún enclave del P. N. de Doñana y de su entorno (foto 6). Las medidas se han hecho con sonda de neutrones. Este instrumento presenta la ventaja de poder hacer medidas a diferentes profundidades del perfil del suelo en tubos de aluminio dispuestos al efecto. Los sensores eléctricos de humedad, por el contrario, requieren su instalación previa a profundidades establecidas. Ambos procedimientos requieren calibración previa a partir de ensayos de laboratorio. El inconveniente de la sonda neutrónica deriva de su carácter

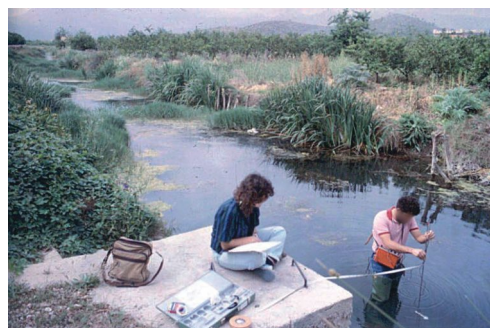


Foto 5. Realización de aforos con micromolinete en un sector de descarga subterránea hacia la marjalería de Pego (Alicante)



Foto 6. Instalación lisimétrica en la finca Los Mimbrales, próxima a la aldea de El Rocío (Parque Nacional de Doñana, Huelva)

de instalación radiactiva, lo que implica controles periódicos, necesidad de cursos de capacitación para usuarios e importantes gastos, incluso, para su precinto y clausura. Si no se emplea frecuentemente, como ha sido nuestro caso, y no se dispone de ayudas para el costoso mantenimiento, el disponer de este equipo casi supone la quiebra económica del IAUGR.

Para la toma de muestras de agua en la zona no saturada se han usado cápsulas de cerámica, con el inconveniente de su obstrucción tras un cierto lapso de tiempo de ser utilizadas. Las de Teflón no tienen ese problema, pero requieren un sistema continuo de succión para obtener las muestras.

En ciertos estudios en materiales blandos y con el nivel freático a menos de un metro de profundidad (orillas de lagunas, por ejemplo) se han aprovechado los agujeros resultantes de la toma de muestras del terreno -mediante barrenas accionadas manualmente, helicoidales o cilíndricas, o sacamuestras de tipo "bipartido"- para instalar tubería de PVC ranurada y disponer de sencillos piezómetros de observación (fotos 7 y 8). Esto, además, ha permitido analizar los sedimentos (Benavente et al.,



Foto 7. Orilla de la Reserva Natural de la laguna de La Ratosa (Alameda, Málaga) en estiaje

2000b). Lógicamente, en condiciones usuales de dureza de materiales y de profundidad de investigación, estos dispositivos suelen realizarse por procedimientos mecánicos (sondeos). En un caso en que era imposible el acceso de maquinaria hemos intentado adaptar un equipo autotransporta-



Foto 8. Testigos de sedimentos someros lagunares obtenidos manualmente

ensayos geotécnicos (penetrometrías) para instalar un tubo piezométrico de diámetro suficiente (Benavente y Rodríguez Rodríguez, 2001) (foto 9).



Foto 9. Realización de un piezómetro somero junto a la Reserva Natural de la Albufera Honda (Adra, Almería)

Las medidas de la profundidad del nivel piezométrico mediante hidroniveles de diferente naturaleza (acústicos, luminosos) no suelen plantear problemas por ser instrumentos relativamente simples y robustos. Cuando las circunstancias lo permiten y se dispone de medios, el uso de sensores de presión conectados a “data-logger” es más recomendable (foto 10).

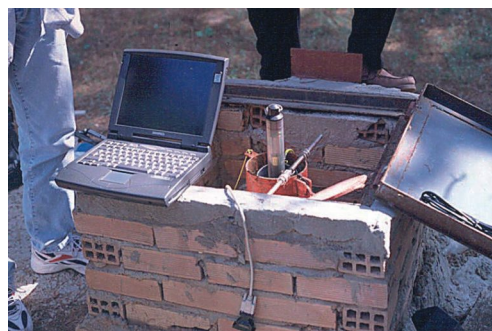


Foto 10. Obtención con ordenador portátil de datos de nivel piezométrico en un punto de control de la red del IGME

Para la toma de muestras de agua subterránea se suministran unos sacamuestras conectables al extremo de la sonda y accionables mediante un “mensajero” (también pueden ser accionados eléctricamente). El aislamiento puede no ser efectivo y la sonda continúa en funcionamiento durante la operación de la toma de muestras. Con hidroniveles acústicos, en aguas muy salinas, eso implica sufrir un pitido enervante durante toda la duración del muestreo

El medidor de conductividad y temperatura del agua conectado a una sonda con cable de longitud suficiente (nosotros disponemos de un WTW con cable de 100 m) es un equipo de gran utilidad para estudios de intrusión marina -con objeto de identificar la posición y el espesor de la zona de transición entre el agua dulce y el n



Foto 11. Realización de medidas de conductividad eléctrica a diferente profundidad en un sondeo piezométrico

agua salada (Carrasco et al., 1999)- o para el seguimiento de “plumas” contaminantes. En particular, la zona de transición agua dulce-salmuera en la proximidad de lagos salados se puede identificar con claridad mediante este sistema (Benavente et al., 1994) También hemos adaptado esta instrumentación a la realización de ensayos de dilución en piezómetros (Benavente et al., 2000a), a partir de la introducción en la perforación de agua salada, y estimar velocidades de flujo (foto 11). El manejo de un cable grueso de 100 m de longitud es engorroso si no se dispone de carrete apropiado.

En cuanto a la alimentación de los equipos portátiles utilizados, se basa en baterías recambiables o recargables en la mayoría de ellos. Algunos equipos dan más problemas que otros a este respecto, sobre todo cuando se plantea su empleo en conexión con dispositivos de “data-logger”. Tan sólo en el caso de los numerosos sensores de la Cueva de Nerja la alimentación procede de la red convencional.

CONSIDERACIONES FINALES

A medida que las condiciones de uso se alejan de las consideradas típicas en investigaciones hidrogeológicas, el rendimiento de los equipos portátiles plantea más inconvenientes. Es el caso, por ejemplo, de zonas de alta montaña o de aguas muy salinas, o del interior de cavidades, según se ha comentado.

El uso y almacenamiento de equipos con elementos radiactivos, además de requerir personal autorizado, está sujeto a regulación legal que incluye, entre otros aspectos, el pago de tasas que encarecen sensiblemente su mantenimiento. Esto debe de tenerse en cuenta a la hora de adquirir tales instrumentos.

Disponer de un servicio técnico con

prontitud y, cuando proceda, adaptar los instrumentos a los requerimientos particulares del cliente, es básico a la hora de seleccionar el equipamiento a adquirir.

AGRADECIMIENTOS

A los Dres. A. Castillo Martín y F. Carrasco Cantos, compañeros en numerosas investigaciones y miembros del IAUGR y del GIRH, respectivamente, les agradezco los comentarios y la ayuda en relación con el tema objeto de esta contribución.

BIBLIOGRAFÍA

- Almécija, C. 1997. Estudio hidrológico e hidroquímico de los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga. Tesis doctoral Univ. Granada. 464 págs.
- Andreo, B., Carrasco, F., Liñán, C. y Vadillo, I. 2002. Epigenic CO₂ Controlling the Drip Water Chemistry and Speleothem Growth in a Mediterranean Karst Area (Nerja Cave, Southern Spain). In: Karst Processes and the Carbon Cycle (Eds. Y. Daoxian y Z. Cheng): 51-64.
- Benavente, J.; Cardenal, J.; Cruz-Sanjulián, J.; García-López, S.; Araguás, L. y López-Vera, F. 1990. Content analysis of stable isotopes in aquifers from the coastal mountainous chain of Gádor-Lújar (Southeast Andalusia, Spain). In: Water Resources in Mountainous Regions (A. Parriaux, ed.). Intern. Assoc. of Hydrogeologists, v. XXII, part 2: 415-424.
- Benavente, J., Almécija, C. y Carrasco, F. 1994. Características físico-químicas de las aguas subterráneas en la proximidad de lagos salados. Algunos ejemplos del norte de la provincia de Málaga. In: Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas en España (Ed. L. Rebollo). Publicado por el Grupo español de la AIH, tomo II: 111-122.

- Benavente, J.; Cruz-Sanjulián, J.J.; Cardenal, J. y García-López, S. 1996a. Identificación de distintos procesos hidrometeorológicos e hidrogeológicos en la vertiente sur de Sierra Nevada mediante trazadores naturales, químicos e isotópicos. 1ª Conferencia Internacional Sierra Nevada: Conservación y Desarrollo sostenible, pp. 419-440.
- Benavente, J., Almécija, C. y Carrasco, F. 1996b. Estudio preliminar de los procesos de infiltración sobre los materiales carbonatados de la Cueva de Nerja (Málaga). IV Simposio sobre el Agua en Andalucía, Actas editadas por el ITGE, vol. I: 91-100.
- Benavente, J., Reyes, J. y Rodríguez Rodríguez, M. 1998. Aporte de solutos por cursos superficiales a la laguna de Fuente de piedra (Málaga). *Geogaceta*, 24: 51-54.
- Benavente, J., Almécija, C., Carrasco, F., Andreo, B., Vadillo, I., El Amrani, N. y Santos-Olmo, A. 2000a. Medidas de flujos en un acuífero aluvial costero (río Verde, Granada) mediante ensayos de dilución en piezómetros. In: Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en Hidrogeología (Eds. Olmo, M. y López Geta, J.A.), publicado por el ITGE, pp. 267-271.
- Benavente, J., Almécija, C., Rodríguez Rodríguez, M., Carrasco, F. y Rodríguez Jiménez, P. 2000b. Características de los depósitos de la laguna de La Ratosa (Málaga). *Geogaceta*, 28: 19-22.
- Benavente, J., y Rodríguez Rodríguez, M. 2001. Reconocimiento geológico de las albuferas de Adra (Almería) a partir de datos geofísicos. *Geogaceta*, 29: 23-25.
- Cardenal, J.; Benavente, J. y Cruz-Sanjulián, J. 1992. Caracterización hidroquímica de las relaciones río-acuífero en la Sierra de Lújar (Granada). *Geogaceta*, 11: 59-60.
- Cardenal, J.; Benavente, J. y Cruz-Sanjulián, J.J. 1994. Contenido en cloruros de las precipitaciones al sur de Sierra Nevada (Granada). Aplicación a la evaluación de recursos hídricos. *Geogaceta*, 16: 3-6.
- Carrasco, F., Andreo, B., Benavente, J. y Vadillo, I. 1995. Chemistry of the water in the Nerja Cave System (Andalusia, Spain). *Cave & Karst Science* (Transactions of the British Cave Research Association), v. 21, n° 2: 27-32.
- Carrasco, F., Vadillo, I., Andreo, B., Benavente, J. y Santos-Olmo, A. 2000. Estudio de la intrusión marina en el acuífero costero del río Verde de Almuñécar mediante registros de conductividad eléctrica del agua en piezómetros. In: Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en Hidrogeología (Eds. Olmo, M. y López Geta, J.A.), publicado por el ITGE, pp. 333-340.
- Cruz San Julián, J.J., Araguás, L., Rozanski, K., Benavente, J., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García López, S., Martínez Garrido, J.C., Moral, F. y Olías, M. 1992. Sources of precipitation over South-Eastern Spain and groundwater recharge. An isotopic study. *Tellus*, 44 B: 226-236.
- Cruz San Julián, J.J. y Benavente, J. (Eds.). 1996. Wetlands: a multiapproach perspective. Hydrological and Ecological studies applied to Wetland Management in Semiarid Climates. Univ. Granada-Coimbra Group 262 págs.
- Cruz San Julián, J.J., Benavente, J., Martínez Garrido, J.C., Moral, F., Araguás, L. y López Vera, F. 1990. Deuterium And Oxygen-18 content in karstic aquifers in the Sierras de Cazorla and segura (Betic Cordillera, Spain). In: Water Resources in Mountainous Regions (Parriaux, A., ed.), *Memoires of IAH*, vol. XXII, part 2: 424-433.
- Olías, M. 1995. Evaluación de la recarga y comportamiento de la zona no saturada en el acuífero Almonte-Marismas (Huelva). Tesis doctoral Univ. Granada. 337 págs.
- Rodríguez Rodríguez, M. 2002. Contribución hidrogeológica y limnológica a la caracterización ambiental de zonas húmedas de Andalucía oriental. Tesis doctoral Univ. Granada. 328 págs.