

# Caracterización hidroquímica temporal y espacial del borde norte del acuífero de Sierra Gorda (Loja, Granada)

## *Temporal and spatial hydrochemical characterization in the northern boundary of the Sierra Gorda aquifer (Loja, Granada)*

Antonio González-Ramón, Tomás Peinado-Parra y Juan Antonio Luque Espinar

Instituto Geológico y Minero de España, Alcázar del Genil 4, Edf. Zulema bajo, 18006 Granada, España.  
antonio.gonzalez@igme.es, t.peinado@igme.es, ja.luque@igme.es

### ABSTRACT

The main discharge Sierra Gorda aquifer occurs in the northern boundary. Most of the springs related to the aquifer are on the left bank of the Genil river, in the vicinity of Loja (Granada), but there are springs on the right bank, as the spring of Frontil, where the origin of groundwater is contested. The arguments for the hydrogeological relation between the Sierra Gorda aquifer and springs on the right bank of the river Genil are provided by the physico-chemical data from the Geological Survey of Spain network quality control, taken between 1991 and 2001. This question involves the passage of groundwater under the river without producing mixtures with surface water. It also includes information from a sampling campaign in the autumn of 2011 that falls in the same direction.

**Key-words:** Acuífero, hydrochemistry, karst, spring, river-aquífer relation.

### RESUMEN

La principal descarga del acuífero de Sierra Gorda se produce en su borde norte. La mayor parte de los manantiales asociados se sitúan en la margen izquierda del río Genil en el entorno de Loja (Granada), pero existen también manantiales en la margen derecha, como el manantial del Frontil, en los que la procedencia del agua subterránea es controvertida. Los datos físico-químicos provenientes de la red de control de calidad del IGME, tomados entre los años 1991 y 2001, aportan argumentos a favor de la relación hidrogeológica entre el acuífero de Sierra Gorda y los manantiales de la margen derecha del río Genil, lo que implicaría el paso del agua subterránea bajo dicho río sin que se produzcan mezclas con las aguas superficiales. Se incluye también información de una campaña de muestreo realizada en el otoño de 2011 que incide en el mismo sentido.

**Palabras clave:** Acuífero, hidroquímica, karst, manantial, relación río-acuífero.

Geogaceta, 52 (2012), 129-132.  
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 7 de febrero de 2012  
Fecha de revisión: 26 de abril de 2012  
Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

## Introducción

Sierra Gorda conforma uno de los acuíferos kársticos más importantes de Andalucía. Su extensión es de 293 km<sup>2</sup> (López-Chicano, 1992; Junta de Andalucía-ITGE, 1998) y su volumen de descarga se ha estimado en cerca de 140 hm<sup>3</sup> anuales (Fig. 1). La zona de recarga es característica de un karst desarrollado, con la presencia de grandes campos de dolinas y varios poljes con rellenos sedimentarios de materiales que van desde el Mioceno superior hasta el Cuaternario.

Su estructura consiste en un anticlinorio, vergente al oeste, con forma de domo alargado en sentido N-S y con su núcleo replegado y afectado por una importante falla

inversa de dirección NNO-SSE (Lupiani *et al.*, 1988).

La mayor parte de sus recursos se drenan por una serie de manantiales ubicados en el entorno de Loja y en la cabecera del río Frío, en la margen izquierda del río Genil. La cota a la que se ubican estos manantiales varía entre 453 m (Borbotote) y 557 m (El Confin). En la margen derecha del río Genil existen tres manantiales, también con cotas similares, que surgen en la ladera meridional del Hacho de Loja (El Frontil, D. Pedro y La Palma). El manantial del Frontil presenta un volumen de descarga del orden de 10 hm<sup>3</sup> anuales, que no puede ser explicado por infiltración en el acuífero del Hacho de Loja. En diversos documentos (IGME, 1983, Dip. de Granada-ITGE, 1988, Junta de Andalucía-ITGE, 1998

y CHG-IGME, 2001) se defiende su relación con el acuífero de Sierra Gorda, aunque esta hipótesis es controvertida (López-Chicano y Pulido Bosch, 2002), pues implica el paso del agua subterránea bajo el río Genil, que actúa como nivel de base del drenaje subterráneo, sin que se produzca mezcla con el agua circulante por éste y en una zona muy compleja desde el punto de vista tectónico, ya que ambas márgenes están separadas por la importante zona de fractura Cádiz-Alicante (Sanz de Galdeano, 1983).

El objetivo de este trabajo es aportar argumentos a favor de la relación hidrogeológica entre ambas márgenes del río Genil y contribuir a mejorar la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas del acuífero de Sierra Gorda.

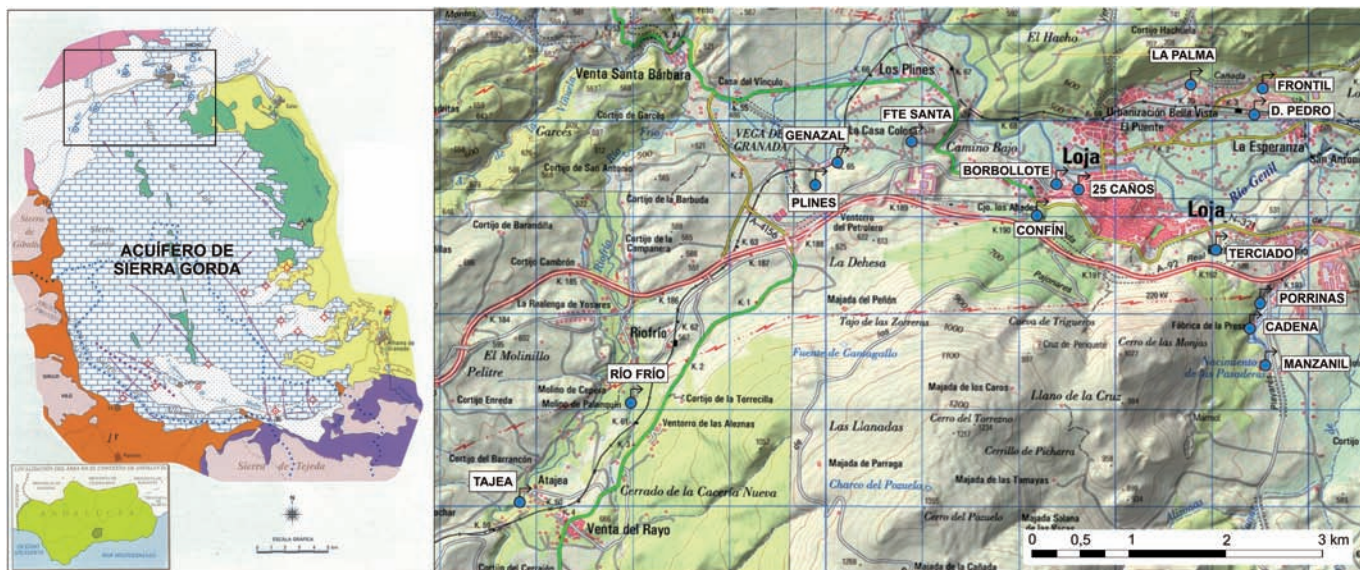


Fig. 1. Localización geográfica del acuífero de Sierra Gorda, esquema hidrogeológico y manantiales muestreados.  
 Fig. 1. Geographical location of the Sierra Gorda aquifer, hydrogeological framework and sampled springs.

**Metodología**

El caudal de descarga de los principales manantiales de Sierra Gorda ha sido controlado por el IGME desde 1974, año en el que también se tomaron los primeros datos hidroquímicos.

En 1986 se inició un control de la calidad del agua en 11 puntos, con una periodicidad semestral; en 8 de ellos se mantuvo hasta el año 2001. Se ha estudiado un periodo de 10 años, entre 1991 y 2001, en el que, debido a diversos trabajos realizados en la zona, se dispone de un mayor número de análisis.

Por otra parte, entre septiembre y noviembre de 2011 se realizó un muestreo en 15 puntos en los que se midió, *in situ*, la temperatura, conductividad y alcalinidad.

El total de análisis estudiados es de 181, todos realizados en el laboratorio de caracterización físico-química de aguas naturales del IGME.

**Resultados obtenidos**

En la figura 2 se muestra la distribución de facies de las aguas analizadas en un diagrama de Piper. Se han diferenciado las aguas procedentes de los manantiales del Sector Occidental (Río Frio y la Tajea), del Sector Oriental (Manzanil, Cadena, Porrinas, Genazal, Plines y manantiales de Loja en la margen izquierda del Genil) y del Sector del Frontil (Frontil, Don Pedro y La Palma).

En el campo de los aniones se observan

diferencias entre sectores debidas a cambios en el contenido en  $SO_4^{2-}$ , y en menor medida en  $Cl^-$ .

En el campo de los cationes la diferenciación es menos clara, con facies cálcico-magnésicas y una tendencia hacia el incremento en el valor del  $Na^+$  en el Sector del Frontil.

La evolución espacial del quimismo del agua subterránea se ha estudiado con mayor detalle a partir de los datos obtenidos en el muestreo de otoño de 2011, el más completo.

En la figura 3 se expone la relación entre la temperatura y los iones  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ . En un acuífero kárstico, el agua, una vez que alcanza la zona saturada, incrementa su temperatura en función de la profundidad a la que circula, lo que suele

estar relacionado con el tiempo de residencia en el acuífero, en ausencia de mezclas de aguas de distinta procedencia. Los diagramas de la figura 3 muestran que las aguas más frías se encuentran en el Sector Occidental, con un aumento del orden de  $1^\circ C$  con respecto a las aguas del Sector Oriental y un nuevo incremento de entre  $0,5^\circ C$  y  $1^\circ C$  para las del Sector del Frontil.

Entre los manantiales del Sector Occidental y el resto se observa un salto en el valor de la temperatura y en el de todos los iones, con la excepción del  $Cl^-$  (Fig. 3A). Este salto es especialmente significativo en el  $SO_4^{2-}$  (Fig. 3B). En los manantiales del Sector Oriental y el Sector del Frontil se observa, en cambio, una evolución en los valores de temperatura desde el sector Oriental hacia el del Frontil, pero escasas diferencias en los valores iónicos. Hay una mejor correlación positiva de los valores de  $Mg^{2+}$  y  $Cl^-$  con la temperatura que con los del  $Ca^{2+}$  y los del  $SO_4^{2-}$ .

El  $Ca^{2+}$  y el  $SO_4^{2-}$  pueden estar afectados por procesos de disolución-precipitación de calcita o yeso. Para que el  $SO_4^{2-}$  sufra procesos modificadores debe haber evaporitas (yeso) en el medio, aunque también puede verse afectado por procesos de oxidación de sulfuros (pirita), que no se han observado en este acuífero. El  $Mg^{2+}$  puede verse afectado por procesos de disolución-precipitación, pero la dolomita se disuelve más lentamente. Esto suele traducirse en ligeros incrementos del  $Mg^{2+}$  en relación con el tiempo de residencia del agua en el acuí-

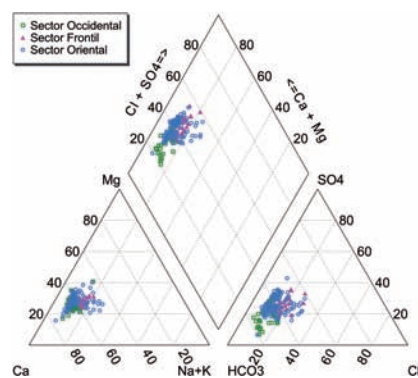


Fig. 2. Diagrama de Piper de las muestras estudiadas.  
 Fig. 2. Piper diagram of the sampled studied.

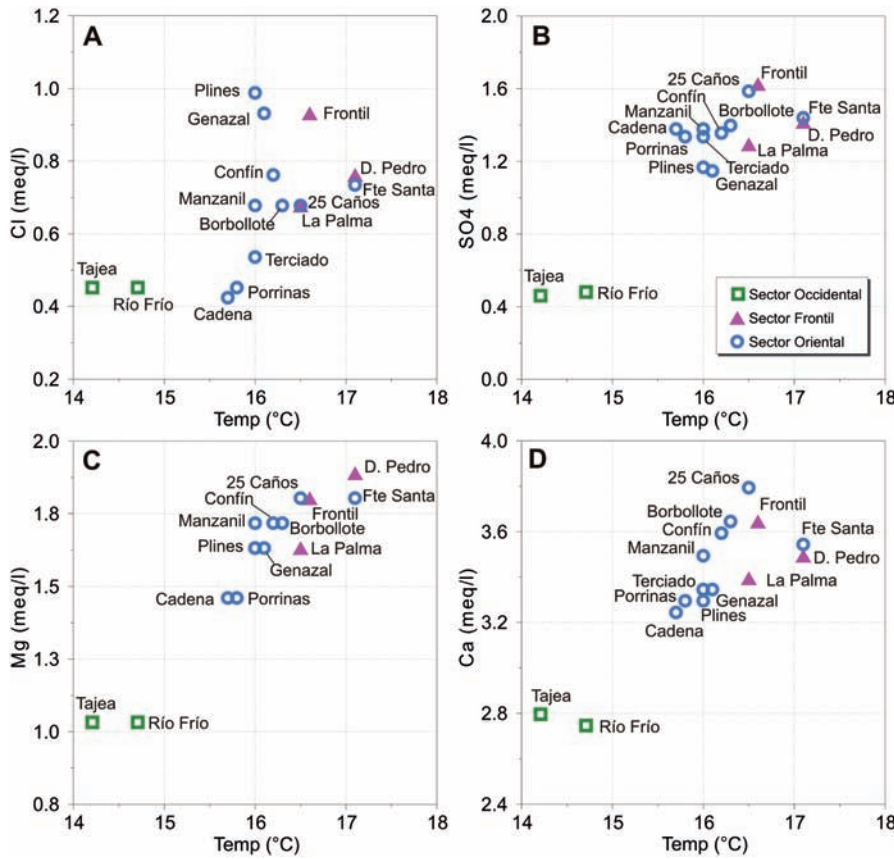


Fig. 3. Relación entre la temperatura del agua y diversos iones para el muestreo realizado en el otoño de 2011.

Fig. 3. Comparison of the temperature and distinct ions. Display in autumn of 2011.

fero. También la dedolomitización produce lentos incrementos en el  $Mg^{2+}$ . De igual forma el  $Cl^-$  evoluciona hacia paulatinos incrementos en aguas con mayor recorrido en el acuífero.

Las distribuciones iónicas observadas son coherentes con una relación hidrogeológica entre el sector Oriental y el del Frontil, con un sentido de flujo del primero hacia el segundo. Por otra parte, también son coherentes con la presencia de una divisoria hidrogeológica entre el Sector Occidental y Oriental, que da lugar a una diferente señal hidroquímica entre las aguas de ambas zonas. Esta diferencia es debida básicamente al contenido en  $SO_4^{2-}$ .

En la figura 4 se expone la evolución mensual del contenido en  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en cinco de los manantiales más representativos de los tres sectores, para el periodo comprendido entre septiembre de 1991 y octubre de 2001.

El gráfico 4A muestra una extraordinaria similitud en la evolución del  $SO_4^{2-}$  para todos los manantiales de los sectores Oriental y Frontil y, con valores más bajos pero

también con una evolución similar, con Río Frío. El coeficiente de correlación ( $r^2$ ), que relaciona el contenido en  $SO_4^{2-}$  del manantial del Frontil con los de Manzanil y Borbollote, es de 0,92, y de 0,95 con el Manantial de Genazal, es decir, crece en dirección S-N e indica que el origen del  $SO_4^{2-}$  es el mismo para todos los manantiales. También se observa cierta correlación con el manantial de Río Frío, aunque notablemente más baja ( $r^2=0,64$ ).

Para el contenido en  $HCO_3^-$  se aprecia asimismo una buena correlación entre el Frontil y Manzanil (gráfico 3B) con un  $r^2$  de 0,60, de 0,69 con Borbollote y de 0,86 con Genazal, nuevamente la correlación crece en dirección S-N. Con Río Frío  $r^2$  es de 0,42 que indica una baja correlación entre ambos manantiales.

Con respecto al contenido en  $Ca^{2+}$  y en  $Mg^{2+}$ , aunque se aprecian similitudes en las curvas de evolución temporal, los coeficientes de correlación entre el Frontil y resto de manantiales son bajos, lo que sugiere que estos iones podrían estar afectados por procesos de intercambio iónico.

### Discusión y conclusiones

La escasa variación del contenido en  $SO_4^{2-}$  entre los manantiales del borde norte, apunta hacia una fuente de suministro para este ión alejada del área de descarga y que afecta de diferente forma al Sector Oriental y al Occidental. Por otra parte corrobora la estrecha relación hidrogeológica existente entre el Sector Oriental y el Sector del Frontil. No hay variaciones significativas en el valor del  $SO_4^{2-}$  entre los manantiales asociados al borde del afloramiento principal en el Sector Oriental, como el Manzanil, la Cadena, el Terciado y otros, y los que surgen en afloramientos aislados rodeados de materiales pliocenos y cuaternarios, como Genazal, Plines o Fuente Santa, e incluso tampoco con los manantiales del Sector del Frontil. Un posible origen para buena parte del  $SO_4^{2-}$  puede encontrarse en los rellenos sedimentarios Mio-pliocenos de los poljes situados en la zona sur del acuífero, donde el yeso está presente y hay aguas con facies sulfatada (Hidalgo, 1974; López-Chicano y Pulido Bosch, 2002). La infiltración hacia el acuífero kárstico del agua contenida en estos rellenos podría afectar, en su mayor parte, a la zona de recarga del Sector Oriental y, en menor medida, a la del Occidental, cuya divisoria puede relacionarse con el eje del domo anticlinal que estructura el acuífero. Esto explicaría el menor contenido en  $SO_4^{2-}$  en los manantiales de este último sector.

La buena correlación observada en la evolución temporal del contenido en  $HCO_3^-$  entre manantiales también sugiere una única fuente de suministro, en este caso puede encontrarse en la disolución de la calcita y dolomita, que se produce fundamentalmente en el suelo y en la zona no saturada y ocasionalmente también en la zona saturada.

La baja correlación en la evolución temporal entre manantiales que se observa en los valores del  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  y, aunque aquí no se exponen, el  $Cl^-$  y el  $Na^+$ , podría ser debida a fenómenos de intercambio iónico en el paso del agua hacia los manantiales que surgen en medio de los afloramientos pliocenos y cuaternarios.

Los datos físico-químicos, tanto desde el punto de vista espacial como temporal, apoyan la hipótesis de la existencia de una estrecha relación hidrogeológica entre los manantiales de la margen izquierda (Sector Oriental) y de la margen derecha del río



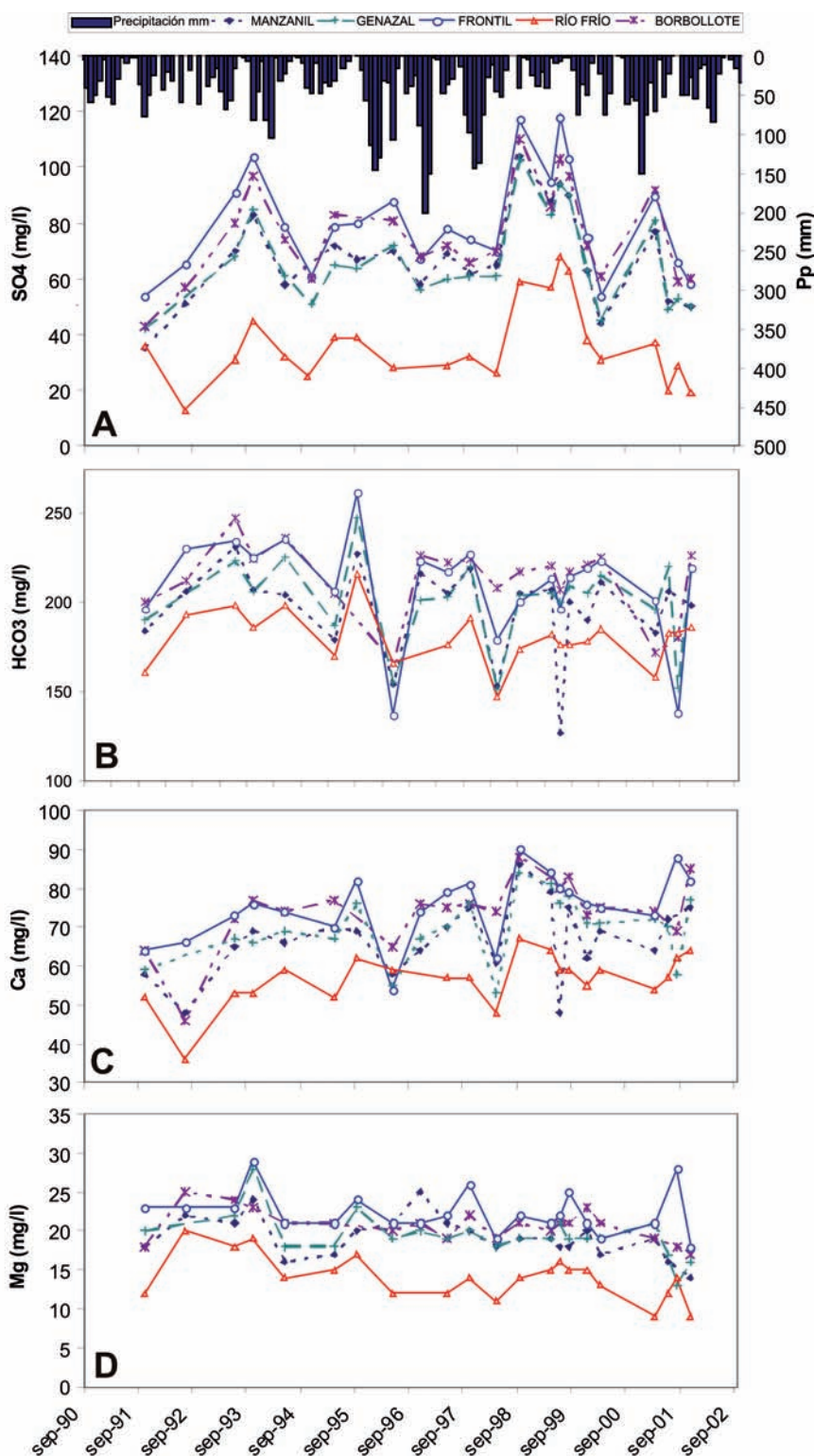


Fig. 4. Evolución mensual del contenido en  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  para el periodo 1991-2001 en los manantiales de Río Frio, Manzanil, Borbollote, Genazal y Frontil.

Fig. 4. Monthly evolution of the  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  (1991-2001) in the Río Frio, Manzanil, Borbollote, Genazal and Frontil springs.

Genil (Sector Frontil). El incremento de temperatura que se produce en este paso es muy sutil, inferior incluso a un grado, lo que implica que el paso del agua bajo el cauce del río se produce a escasa profundidad, por debajo del centenar de metros. Por otra parte, tampoco se observa una modificación importante del quimismo, lo que sugiere que no hay mezclas con aguas de diferente procedencia en este paso, o si las hay estas son de muy poca importancia.

### Agradecimientos

Se agradece a Manuel López Chicano la revisión del artículo y sus sugerencias.

### Referencias

CHG-IGME (2001). *Revisión y actualización de las normas de explotación de las unidades hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete-Barbate. Propuesta de normativa y definición de nuevas unidades hidrogeológicas.*

Diputación de Granada-ITGE (1988). *Atlas hidrogeológico de la Provincia de Granada*, 102 p.

Hidalgo, J. (1974). *Estudio hidrogeológico del Polje de Zafarraya y zonas adyacentes (prov. de Granada y Málaga)*. Tesis de Licenciatura, Univ. de Granada, 165 p.

IGME (1983). *Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España (Sector Occidental)*. Informe Técnico.

Junta de Andalucía-ITGE (1998). *Atlas hidrogeológico de Andalucía*, 216 p.

López-Chicano, M. (1992). *Hidrogeología del acuífero kárstico de Sierra Gorda*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 429 p.

Lopez-Chicano, M. y Pulido-Bosch A. (2002). En: *Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete*. IGME-CHG-COPTJA-DPG, 311-340.

Lupiani, E., Sanz de Galdeano, J.M. y Soria, J. (1988). *Mapa Geológico de España 1:50.000 hoja nº 1025 (Loja)*. IGME.

Sanz de Galdeano, C. (1983). *Estudios Geológicos*, 39, 157-165.