

Reconocimiento hidrogeológico, hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas del macizo kárstico del Haouz (Rif septentrional, Marruecos)

Hydrogeological, hydrochemical and isotopic survey of the groundwater of the Haouz karstic massif (northern Rif, Morocco)

Jamal Stitou el Messari⁽¹⁾, Santiago García-López⁽²⁾, Rachid Hlila⁽¹⁾ y Anas Emran⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Geología, Universidad Abdel Malek-Essaadi, Fac. Sci AC 2121 Tetuán, Marruecos. jstitou@uae.ma

⁽²⁾Departamento de CC. de la Tierra. Universidad de Cádiz. Campus Río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real (Cádiz). santiago.garcia@uca.es

⁽³⁾Departamento de Ciencias de la Tierra, Laboratorio GEOTEL CNRST URAC 46, Instituto Científico, Universidad Mohammed V, Rabat, Marruecos. emrananas@yahoo.fr

ABSTRACT

This work is focused on the group of karstic springs that drain the carbonatic massif of the Haouz (Rif Chain, Morocco). First of all, the geological context is analyzed. Geology is characterized by a complex structural disposal, composed of four lithologic groups: the Dorsal, the Sebtime Complex, the Ghomaride Complex and the Flych. The general structure consists in a group of tectonic flakes lengthened in direction N-S, with structure in fan, cut by strike-slip faults. As a consequence of this, the hydrogeologic system of the Haouz is very compartmentalized, with a high number of springs. Upwelling usually go around the carbonatic materials and most of them are associated to tectonic accidents. Three different hydrogeological sectors are identified (Jebel Musa, Fahs el Mhar-Annassar and Jebel Darsa) depending on the geographic position of the outcrops, the lithology and/or structural characteristics. The differences found in the hydrochemical and isotopic composition of the different springs represent the differences in the lithology (limestone, dolomite, and evaporite rocks), the length of the flow and residence time of the groundwater in the aquifer, the altitude of the recharge area and the degree of fracturing of the carbonatic materials.

Key-words: Rif Chain, Haouz, karst, hydrochemistry, stable isotopes.

RESUMEN

En este trabajo se estudia el conjunto de manantiales kársticos que drenan el macizo carbonático del Haouz (Cordillera del Rif, Marruecos). En primer lugar, se analiza el contexto geológico, caracterizado por una compleja disposición estructural de cuatro conjuntos litológicos implicados: la Dorsal, el Complejo Sébtide, el Complejo Ghomáride y el Flych. La estructura general consiste en un conjunto de escamas tectónicas alargadas en dirección N-S, con estructura en abanico, cortadas por fallas de salto en dirección. Como consecuencia de ello, el sistema hidrogeológico del Haouz se encuentra muy compartimentado, con un elevado número de surgencias que bordean los materiales carbonáticos y que se encuentran asociadas en su mayoría a accidentes tectónicos. Se identifican tres sectores hidrogeológicos (Jebel Musa, Fahs el Mhar-Annassar y Jebel Darsa) en función de la posición geográfica de los afloramientos y características litológicas y/o estructurales. Las diferencias encontradas en la composición hidroquímica e isotópica de los distintos manantiales se interpreta básicamente como consecuencia de diferencias en la litología (calizas, dolomías y evaporitas), la longitud del flujo y tiempo de residencia de las aguas en el acuífero, la altitud del área de recarga y el grado de fracturación de los materiales carbonáticos.

Palabras clave: Cordillera del Rif, Haouz, karst, hidroquímica, isótopos estables.

Geogaceta, 50-1 (2011), 95-98.
ISSN:2173-6545

Fecha de recepción: 15 de Febrero de 2011

Fecha de revisión: 28 de Abril de 2011

Fecha de aceptación: 27 de Mayo de 2011

Introducción

El macizo kárstico del Haouz forma parte de la cordillera rifeña y está ubicado dentro de los límites administrativos de Tetuán, Fahs Anjra y Ceuta. Las rocas carbonáticas afloran en varios relieves abruptos con cimas elevadas (Jebel Musa: 843 m, Jebel Darsa: 552 m, Fars Lemahar: 611 m). Este macizo está orientado según un eje N-S con unas dimensiones de unos treinta ki-

lómetros de largo por cuatro de ancho. En este macizo nacen varios ríos como Martil, Smir y Negro. La mayor parte de este acuífero funciona, todavía, en régimen natural, pues no se realizan prácticamente explotaciones por bombeo. Sin embargo, parte de la descarga natural es captada en el extremo septentrional para el abastecimiento de la ciudad de Ceuta y en el meridional, para el abastecimiento de Tetuán, donde la descarga alimenta una red tradicional de

distribución en la antigua medina, denominada "skundo". Además, muchos de estos manantiales son aprovechados para el abastecimiento de pequeños núcleos rurales. En el marco de este trabajo se pretende caracterizar el sistema hidrogeológico a través del estudio de sus manantiales, en particular de la caracterización hidrogeoquímica e isotópica de sus aguas, en un contexto geográfico marcado por la proximidad del Estrecho de Gibraltar.

Contexto geológico

El área de estudio está ubicada en una zona compleja desde el punto de vista estratigráfico y estructural: el Rif Interno. Este dominio está compuesto por varios conjuntos estructurales, que de oeste a este son: la Dorsal, el Complejo Ghomáride y el Complejo Sébtide (Didon *et al.*, 1973). En particular, el macizo del Haouz está constituido básicamente por materiales carbonáticos de la Dorsal, a su vez divididos en tres grupos de unidades (Fig. 1): i) Unidades de la Dorsal Interna, cuyas series estratigráficas están constituidas mayoritariamente por calizas masivas blancas del Lías inferior y una formación detrítica roja del Trias en el extremo oriental, ii) Unidades de la Dorsal Intermedia, constituida por una alternancia calizo-margoso-dolomítica y por calizas masivas blancas del Trias-Lias y iii) Unidades de la Dorsal Externa, que incluyen una formación típica, la denominada "formación de alternancia calizo-margo-dolomítica del Rhetense" (Nold *et al.*, 1981).

La estructura de la Dorsal del Haouz corresponde a un conjunto de unidades y/o escamas tectónicas alargadas según dirección N-S y cortadas por grandes fallas de salto en dirección ENE-WSW y WNW-ESE. Dicha estructura fue adquirida como consecuencia de un movimiento global hacia el WSW del dominio interno durante el Mioceno inferior-medio (Hlila y Sanz de Galdeano, 1994, Hlila, 2005). Estos eventos tectónicos paroxismales dieron como resultado: i) pliegues de dirección N-S y cabalgamientos con vergencias opuestas hacia el oeste y el este y ii) fallas de salto en dirección conjugadas (Fig. 1). Así, la disposición general de las escamas y/o unidades corresponde a una estructura en abanico.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta geometría tiene gran trascendencia dado que los carbonatos reposan sobre o están englobados en los materiales impermeables tanto al Este como al Oeste, pero con un enraizamiento relativamente reducido, lo que condiciona notablemente el volumen de reservas hídricas.

Marco hidrogeológico

Los afloramientos carbonáticos constituyen acuíferos por fisuración y karstificación, con funcionamiento en régimen libre al menos en los sectores donde afloran. A partir del nivel piezométrico y de la confi-

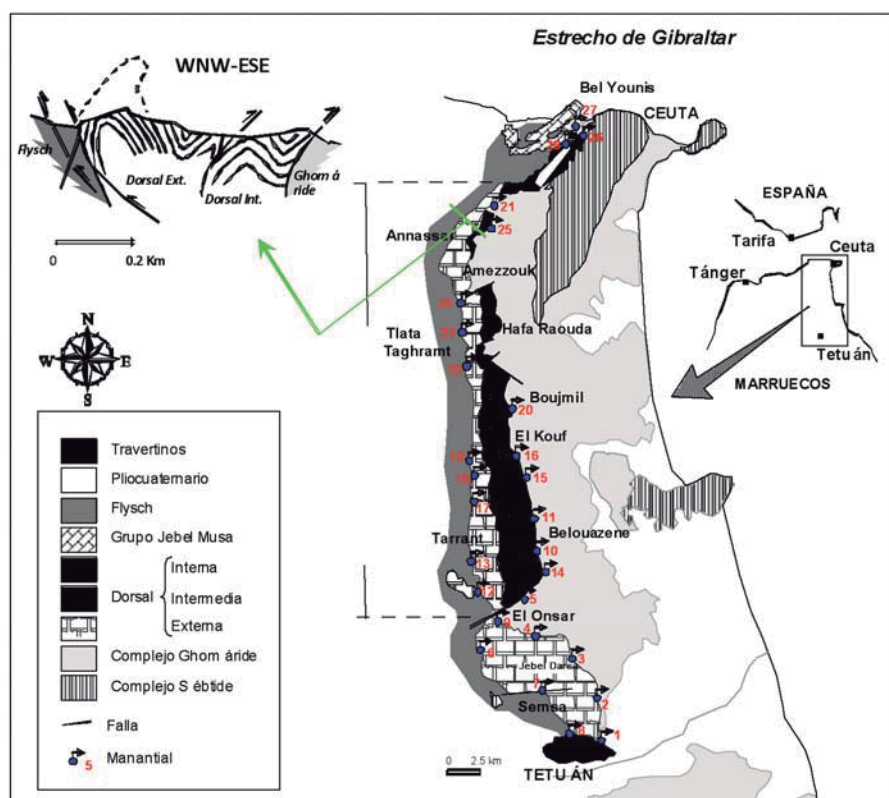


Fig. 1.- Situación geográfica del sector de estudio y esquema hidrogeológico.

Fig. 1.- Situation of the study area and hydrogeological scheme.

guración de los diferentes accidentes tectónicos transversales se han diferenciado tres sectores hidrogeológicos (Jebel Musa, Fahs el Mhar-Annassar y Jebel Darsa, Fig. 1). Cabe destacar que la mayoría de los manantiales estudiados se localizan agrupados en tres niveles de descarga: (a) el nivel 350-400 m, en el que se incluyen las surgencias situadas en la vertiente occidental del macizo del Haouz; (b) el nivel 170-230 m que corresponde a los manantiales que surgen en la vertiente oriental y (c) el nivel inferior a 150 m, en el que se agrupan los manantiales tanto septentrionales del Complejo de Jebel Musa, como los meridionales del Jebel Darsa. El sustrato impermeable de los materiales acuíferos está constituido en su parte occidental por calizas margosas del Malm-Cretácico inferior y areniscas micáceas del Oligoceno-Aquitaniense (flysch) con intercalaciones de caliza de edad Turoniense-Senoniense de la unidad de Tánger. En su parte oriental, el impermeable está constituido por pizarras y areniscas epimetamórficas paleozoicas, grauvacas y arcillas rojas del Permo-Triásico del Complejo Ghomáride y cuarcitas y pizarras del Complejo Sébtide. Las surgencias están estrechamente relacionadas con los accidentes transversales E-W y/o NE-SW que provocan

el contacto de las formaciones calcáreas con el sustrato impermeable. Las estructuras de plegamiento y la presencia en la serie estratigráfica de materiales poco permeables condiciona, en ocasiones, la individualización de diferentes acuíferos.

La totalidad de los recursos subterráneos proviene de la infiltración del agua de lluvia sobre las superficies de los afloramientos, fundamentalmente en las cotas altas, donde se aprecia abundantes efectos de la karstificación en superficie con campos de lapiaz, simas, dolinas y poljes. La precipitación media anual en el sector se estima comprendida entre 750 mm en los bordes y 1100 mm en las cumbres, con un gradiente pluviométrico próximo a 35 mm/100 m. Estos valores se han obtenido a partir de la correlación entre la altura y la precipitación en las estaciones pluviométricas existentes en el área de estudio. La precipitación media anual estimada para el conjunto del Haouz, considerando la distribución hipsométrica, se aproxima a 1000 mm. La infiltración eficaz debe ser elevada, al estar favorecida por la disposición estructural de los macizos, con la estratificación en algunos casos próxima a la vertical, la intensa fracturación sufrida por los materiales carbonáticos y el escaso desarrollo

de la cobertura edáfica. Esto último favorece que el almacenamiento temporal sub-superficial sea escaso y con ello que la evapotranspiración no sea muy elevada.

Por sectores, y considerando una infiltración neta entre 40 y 45 % de la precipitación, valor próximo al obtenido en acuíferos semejantes en ambientes mediterráneos con métodos como el APLIS (Andreo *et al.*, 2008), el sistema que presenta mayores recursos, dada su mayor extensión, es el de Fahs el Mhar-Annassar con 26 hm³/año. En el sector del Jebel Musa, existen varios acuíferos bien diferenciados (García-López *et al.*, 1994) que en conjunto presentan unos recursos medios renovables de unos 3 hm³/año. Parte de estos sistemas drena de forma oculta y directa hacia el mar (afloramiento de Ras Leona) y el resto a través de una decena de manantiales, alguno de los cuales puede alcanzar caudales punta superiores a 160 l/s (n°27), evidenciando con ello un comportamiento netamente kárstico. El sistema de Jebel Darsa, es un acuífero bien delimitado, con unos recursos medios renovables de 12.5 hm³/año y descarga condicionada por la fracturación (de dirección NW-SE), así como por fallas transversas E-W (accidente de Semsá). La existencia de una estructura anticlinal propicia el tránsito de las aguas en contacto con materiales evaporíticos de edad Permo-Tríasica, lo que condiciona sus características hidroquímicas.

Características hidroquímicas

A partir de muestreos realizados en varias campañas de campo en 2008 y 2009 se han determinado las principales caracte-

rísticas físico- químicas de las aguas drenadas del macizo del Haouz. En la tabla I se muestran los valores de algunos de los manantiales más importantes del área, clasificadas por sectores.

La génesis de la composición química de las aguas subterráneas en los acuíferos kársticos depende de una gran diversidad de factores (Custudio, 1983): edáficos, climatológicos, litológicos y tiempo de residencia. En el macizo del Haouz y atendiendo básicamente a la temperatura y conductividad es posible identificar aguas de flujo más local, de menor profundidad y duración, cuya infiltración se produce en el entorno de las surgencias. Corresponden generalmente a manantiales de caudal relativamente pequeño, aguas más frías y menos mineralizadas. Otras aguas, sin embargo, como las drenadas por alguno de los manantiales más caudalosos del área (nos 1, 8, 28) están asociadas a flujos más largos y profundos, como se desprende de su mayor conductividad y temperatura y previsiblemente mayor tiempo de residencia, y en algunos casos mayor regularidad en el caudal.

Por otra parte, comparando la temperatura media entre los distintos sectores, se aprecia grandes similitudes, como cabe esperar del hecho de que las áreas de recarga se encuentran a una cota semejante, bajo un mismo contexto climático, y que el grado de desarrollo de la karstificación funcional entre los diferentes sistemas constituidos por una misma litología debe ser muy parecido. Por el contrario, la comparación de la temperatura en un mismo bloque pone de manifiesto diferencias de hasta 3°C, atribuible a las diferencias en el flujo anteriormente apuntadas.

En la figura 2 se muestra el diagrama de las proporciones iónicas (Piper) de las aguas de los manantiales muestreados. Se puede apreciar que las facies dominantes son bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada cálcico-magnésica y bicarbonatada magnésico-cálcica, dependiendo básicamente de la naturaleza más o menos dolomítica de la formación carbonática atravesada. La mayoría de las aguas presentan, además, muy escasa concentración de sulfatos, lo que es atribuible a la escasa o nula presencia de yeso en las series carbonatadas. Sin embargo, en ciertas aguas la presencia de sulfatos es significativa pudiendo alcanzar valores elevados elevados, dando lugar a facies sulfatada cálcica (n° 28). La composición de estas aguas sería consecuencia de flujos más profundos, posiblemente asociados a la existencia de accidentes tectónicos importantes. En este caso, la disolución de materiales evaporíticos presentes en las formaciones de borde, contribuirían al aumento de la mineralización y al cambio de facies hidroquímica.

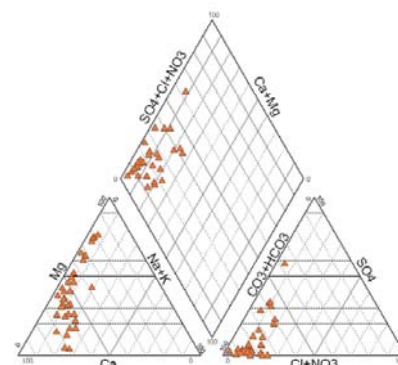


Fig. 2.- Diagrama de Piper de las aguas de los manantiales de la zona de estudio.

Fig. 2.- Piper diagram of the water springs in the study zone.

Contenido en isótopos estables (¹⁸O y ²H)

Se han considerado 91 datos analíticos de isótopos estables (¹⁸O, ²H) obtenidos tanto en el presente trabajo como en estudios previos (García-López *et al.*, 1994; Stitou *et al.*, 2010). Esta información se refiere a un total de 45 manantiales, situados en un rango de altitudes entre 5 y 500 m.s.n.m. De ellos, 14 superan los 10 l/s de caudal medio, 22 están comprendidas entre 1 y 10 l/s y 9 presentan caudales inferiores a 1 l/s. Estos últimos, corresponden a pequeñas surgencias asociadas al epikarst o

COD→	Sector Jebel Darsa			Sector Fahs el Mhar-Annassnr				Sector Javel Musa	
	1	7	8	11	12	17	20	27	28
Altitud (m)	41	265	140	174	363	303	342	94	115
Q (l/s)	4	22	20	20	10	22	20	90	33
Temp. (°C)	20,8	16,6	20,7	15,3	16,0	15,0	14,9	15,2	18,2
Cond. (µS/cm)	1262	722	1140	353	466	358	328	306	1180
pH	7,45	7,25	7,35	7,77	7,50	7,64	7,81	7,23	7,1
Ca ²⁺ (mg/l)	148,0	100,2	122,0	59,1	78,0	81,6	91,2	72,0	316,0
Mg ²⁺ (mg/l)	5,0	32,9	24,6	13,7	31,0	52,5	51,5	55,0	12,5
Na ²⁺ (mg/l)	61,0	15,7	57,0	8,7	11,6	10,0	10,0	12,0	15,0
K ⁺ (mg/l)	13,6	0,7	5,0	0,4	1,1	0,0	0,0	0,6	1,2
Cl ⁻ (mg/l)	41,9	26,1	54,8	16,2	21,0	17,8	21,3	32,0	42,3
HCO ₃ (mg/l)	381,0	250,0	341,0	197,0	395,0	243,9	243,9	168,0	304,9
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	157,6	38,9	127,8	12,6	19,7	3,5	4,4	11,2	260,0
¹⁸ O (‰)	-4,96	-5,29	-	-5,03	-5,08	-5,37	-4,89	-5,19	-4,73
² H (‰)	-25,5	-28,6	-	-22,5	-23,1	-25,9	-22,2	-27,3	-22,9
d (‰)	14,2	13,7	-	17,7	17,5	17,0	16,9	14,2	14,9

Tabla I.- Composición hidroquímica e isotópica de las aguas de manantiales seleccionados por sectores.

Table I.- Hydrochemical and isotopic composition of water of selected springs by sectors.

a afloramientos carbonáticos inconexos de pequeña extensión. El valor medio del contenido en ^{18}O para el conjunto de los manantiales muestreados es -5.20‰ . Los valores encontrados se adaptan aceptablemente a los valores propios de la región de acuerdo con la distribución latitudinal de este isótopo, que para la región del Estrecho a nivel del mar es de unos -4.5‰ . (Estación de Gibraltar, IAEA). No obstante, se observa un empobrecimiento de las aguas de los manantiales atribuible al efecto altitudinal. El valor medio para el ^2H es -25.9‰ .

El parámetro exceso de deuterio varía entre 12 y 19 ‰. En este sentido, la disposición de los puntos relativos a los manantiales en el diagrama ^2H versus ^{18}O (Fig. 3), entre la Línea Meteorológica Mundial (GMWL) y la Línea Meteorológica del Mediterráneo (MMWL), indica claramente la influencia mixta, atlántica y mediterránea, en la recarga de los acuíferos, asociada a situaciones meteorológicas contrastadas durante los episodios de recarga.

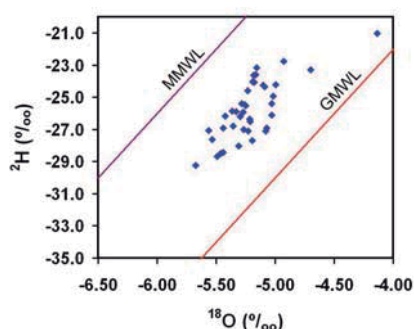


Fig.3.- Situación de las aguas de los manantiales en el diagrama ^2H versus ^{18}O . (GMWL: Línea Meteorológica Mundial; MMWL: Línea Meteorológica del Mediterráneo).

Fig.3.- Status of the waters of the springs in the diagram ^2H versus ^{18}O . (GMWL: Global Meteoric Water Line; MMWL: Mediterranean Meteoric Water Line).

En principio, no se observa una relación clara entre el contenido isotópico de cada manantial con la altitud a la que se encuentra. Este hecho se justifica por la diferencia existente entre la cota del manantial y la cota media del área de recarga.

Sólo en los manantiales de caudal muy pequeño, ligados al epikarst, el área de alimentación estará en las inmediaciones de la surgencia. Estos manantiales, por tanto, aportan una valiosa información de las características isotópicas del agua de recarga. De acuerdo con este criterio, se han seleccionado 7 manantiales con caudal inferior a 1 l/s y se han representado sus contenidos isotópicos frente a su altitud (Fig. 4).

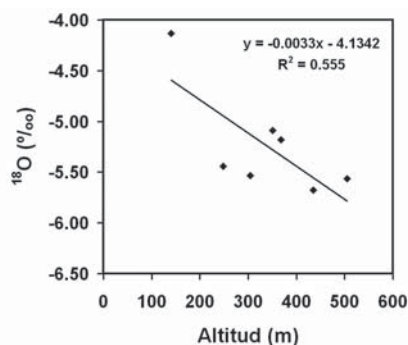


Fig.4.- Diagrama ^{18}O versus altitud para los manantiales asociados al epikarst.

Fig.4.- Diagrams ^{18}O versus altitude for the springs associated with epikarst.

En este caso, se observa una clara tendencia al empobrecimiento isotópico con el aumento de altitud. Los puntos se disponen en torno a una recta de pendiente $-0.33\text{‰}/100\text{m}$, que representa el gradiente isotópico altitudinal, y una ordenada en el origen (-4.13‰), que representa el contenido isotópico al nivel del mar y que resulta algo mayor al valor medio en la estación de Gibraltar, anteriormente citada. Este ajuste permite realizar estimaciones de altitud media del área de recarga para los manantiales regionales de caudal importante. Los cálculos arrojan valores comprendidos entre 400 m y 180 m.

En términos generales, la variabilidad isotópica de las aguas de manantiales no epikársticos es relativamente pequeña (entre -4.70 y -5.49). Incluso en el sector de Jebel Musa, en el que los manantiales se encuentran a cotas relativamente bajas (<120 m), los valores encontrados son semejantes a los de manantiales del sector central, a cota mucho más elevada.

Conclusiones

En el macizo carbonático del Haouz se han identificado tres sectores hidrogeológicos de funcionamiento relativamente independiente. La estructura general del Haouz es compleja y consiste en escamas imbricadas con series invertidas en forma de abanico y buzamiento general hacia el SW, afectadas por numerosos accidentes tectónicos responsables de la diferenciación de compartimentos hidrogeológicos. La geometría de los materiales carbonáticos presenta un escaso enraizamiento, lo que hace prever limitados volúmenes de reservas hídras subterráneas.

Casi la totalidad de las surgencias que drenan estas formaciones calcáreas están

relacionadas con accidentes tectónicos. A partir de los datos hidroquímicos se identificó la facies de cada manantial, que está determinada básicamente por las rocas por las que transita el agua; la facies dominante es la bicarbonatada cálcica y cálcico-magnésica, si bien se detecta en varios puntos la influencia de los procesos de disolución de yesos. Hay dos tipos de circulación: local (más superficial, rápida y de aguas más frías) y más profunda (mayor temperatura, recorrido y tiempo de residencia), asociada a alguno de los manantiales de mayor entidad.

El contenido isotópico pone de manifiesto que hay influencia mixta, atlántica y mediterránea, en la recarga de los acuíferos y que el gradiente isotópico altitudinal es próximo a $0.33\text{‰}/100\text{m}$ lo que permite estimar la altitud media de la recarga de los distintos manantiales estudiados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto A/018007/08 financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Los autores agradecen a los revisores anónimos sus comentarios y sugerencias, que han permitido mejorar notablemente este trabajo.

Referencias

- Andreo, B., Vías, J., Durán, J.J. Jiménez, P., López-Geta, J.A. y Carrasco, F. (2008). *Hydrogeology Journal*, 16, 911-925.
- Custodio, E. y Llamas, R. (1983). *Hidrología Subterránea*, 2 tomos, Ed. Omega, Barcelona, 1019-1036.
- Didon, J., Durand-Delga, M. y Kornprobst, J. (1973). *Bull. Soc. Géol. France*, (7), 15, 2, 77-105.
- García-López, S., Cruz-Sanjulian, J.J. y Benavente, J. (1994). *Rev. Soc. Geol. España*, (3-4), 319-326.
- Hlila R. (2005). *Evolution tectono-sédimentaire Tertiaire au front Ouest du domaine d'Alboran (Ghomarides et Dorsale calcaire, Rif septentrional, Maroc)*. Tesis Doctoral, Univ. Abdel Malek Essáadi, Tétouan, 351 p.
- Hlila R. y Sanz de Galdeano, C. (1994). *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 318, série II, 1261-1266.
- Nold, A., Uttinger, J. y Wildi, W. (1981). *Notes et mémoires, Service de Géologie, Maroc*, 300-233 p.
- Stitou el Messari J., García-López, S. Hlila, R. y Emran, A. (2010). En: *II Congreso GIRD3D'2010*, Agadir, Marruecos, 1, 183-184.