

Variabilidad espacial de las características físico-químicas de las aguas subterráneas de los acuíferos carbonáticos del Haouz (Tetuán, Norte de Marruecos)

Spatial variability of physico-chemical characteristics of groundwater in carbonate aquifers of Haouz (Tetouan, Northern Morocco)

Sergio Martos-Rosillo⁽¹⁾, Juan José Durán Valsero⁽²⁾, Juan Antonio Luque Espinar⁽¹⁾, Karim El Morabiti⁽³⁾, Younes El Kharim⁽³⁾, Juan Antonio López Geta⁽²⁾, Alfredo García de Domingo⁽²⁾ y Mohamed Ben Makhlof⁽³⁾

⁽¹⁾ IGME. Urb. Alcázar del Genil, 4, ed. Zulema, bajo, s/n, Granada. 18006. s.martos@igme.es, ja.luque@igme.es

⁽²⁾ IGME. C/ Ríos Rosas, 23, 28004 Madrid, jj.duran@igme.es, lopez.geta@igme.es, a.garcia@igme.es

⁽³⁾ Université Abdelmalek Essaâdi, Faculte des Sciences, Mhannech II, 93 002, B.P. 2121 Tétouan-Maroc. kmorabiti@yahoo.fr, ykharim@yahoo.fr, benmaklof@yahoo.fr

ABSTRACT

The Haouz mountain range, situated in the north of Morocco, between the cities of Ceuta and Tetouan, has a surface area greater than 90 km² and consists of karst aquifers mainly dolomitic. These aquifers are characterized by a thrust nappes structure which gives rise to a marked partitioning of the aquifers. A first approach on its hydrogeological functioning and spatial variability of the physical-chemical characteristics of groundwater is presented in this paper.

Key-words: Hydrochemistry, karst, carbonate aquifer, Morocco.

Geogaceta, 50-1 (2011), 99-102.
ISSN:2173-6545

Introducción

La cadena montañosa del Haouz, incluida en la denominada Dorsal Rifeña, está situada al norte de Marruecos, entre las localidades de Tetuán, al sur, y Ceuta, al norte. Consiste en una estrecha franja de materiales carbonáticos, de orientación norte-sur, con una treintena de kilómetros de largo por cuatro de ancho, en las que en algunos puntos se superan los 840 m de altitud. Los recursos hídricos asociados a los acuíferos del Haouz se utilizan, actualmente, para el abastecimiento de poblaciones menores y para regadíos tradicionales de pequeñas huertas. Sin embargo, su posición estratégica, en una región en la que existe una reducida garantía de suministro a la población, en épocas de sequía, y en la que está previsto un incremento de la demanda para uso turístico y agrícola, hacen de especial interés el estudio de estos acuíferos, con vista a la correcta utilización de sus recursos.

En esta investigación, el principal objetivo ha consistido en contribuir a la mejora del conocimiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos del Haouz, mediante el estudio y análisis de las características físico-químicas de sus aguas subterráneas.

Marco geológico e hidrogeológico

Desde el punto de vista geológico, el macizo del Haouz forma parte de la Dorsal Rifeña (SGM, 1979).

La Dorsal Calcárea, en la que están incluidos la mayoría de los acuíferos investigados, separa las Zonas Internas (al E) de la Zona de Flysch Alóctonos (al O) (Fig. 1). Los materiales permeables de la Dorsal quedan incluidos en la serie mesozoica, representada por dolomías (Triásico-base del Jurásico) y calizas (Jurásico), que alcanzan potencias de varios centenares de metros. Estructuralmente, se encuentran dispuestos en escamas

RESUMEN

La cadena montañosa del Haouz, situada entre las ciudades de Ceuta y Tetuán, con una superficie superior a los 90 km², está constituida por una serie de acuíferos kársticos, fundamentalmente dolomíticos. Estos acuíferos se caracterizan por una fuerte compartimentación consecuencia de una estructura en escamas afectada, a su vez, por importantes fracturas transversales. En este trabajo se presenta una primera evaluación de su funcionamiento hidrogeológico así como de la variabilidad espacial de las características físico-químicas de sus aguas subterráneas.

Palabras clave: Hidroquímica, karst, acuífero carbonático, Marruecos.

Fecha de recepción: 15 de Febrero de 2011
Fecha de revisión: 28 de Abril de 2011
Fecha de aceptación: 27 de Mayo de 2011

apretadas e imbricadas, con cabalgamientos subverticales N-S y fracturas transversales de dirección NE-SO, que, como se indica más adelante, definen sectores con diferente funcionamiento hidrogeológico.

Desde el punto de vista hidrogeológico los acuíferos carbonáticos de la cadena del Haouz presentan todos sus límites laterales cerrados al flujo subterráneo. Al oeste, los materiales carbonáticos se enfrentan a las margas y margocalizas terciarias de la propia serie de la Dorsal, a las formaciones margo-arcillosas y areniscosas del flysch Alóctono Rifeño y a las margas de la Unidad de Tánger. Hacia el este, son los materiales epimetamórficos Ghomárides, de edad Paleozoica y Triásica, los que limitan la transferencia de recursos hídricos subterráneos. El límite meridional lo constituye el graben situado al sur de Tetuán (Aluni, 2004), sobre el que discurre el río Martil. Al norte, la cadena limita con el mar Mediterráneo. Por otro lado, la particular estructura geológica del macizo cal-

cáreo, afectada por numerosas fallas transversales a la estructura general, y la diferente cota de drenaje de las principales surgencias permitieron a Durán *et al.* (2009) describir seis acuíferos (Fig. 1) con un funcionamiento hidrogeológico independiente: Jbel Moussa, Annaser, Kehraline, Fath Lemhar, Sinclinal de Belouazene y Jbel Darsa.

La recarga se produce por la infiltración directa del agua de lluvia; preferentemente sobre las altiplanicies que coronan los afloramientos,

como se deduce del notable desarrollo de las formas kársticas superficiales. La recarga ha sido evaluada en 35 hm³/año, mediante balances de agua en el suelo, con los datos meteorológicos disponibles, correspondientes al periodo 1984-2006. La descarga se produce a través de los numerosos manantiales existentes en los bordes de los acuíferos, en la zona de contacto de las rocas carbonáticas con los materiales de menor permeabilidad (ver Fig. 1).

Material y Métodos

Para conocer las características físico-químicas de las aguas subterráneas de los acuíferos carbonáticos del Haouz, se han seleccionado 35 manantiales (Fig. 1), en los que se recogieron sendas muestras de agua. Se realizaron dos campañas: la primera, en septiembre de 2009, y la segunda, en junio de 2010. Estas muestras se analizaron en el laboratorio del IGME, si bien antes de su aná-

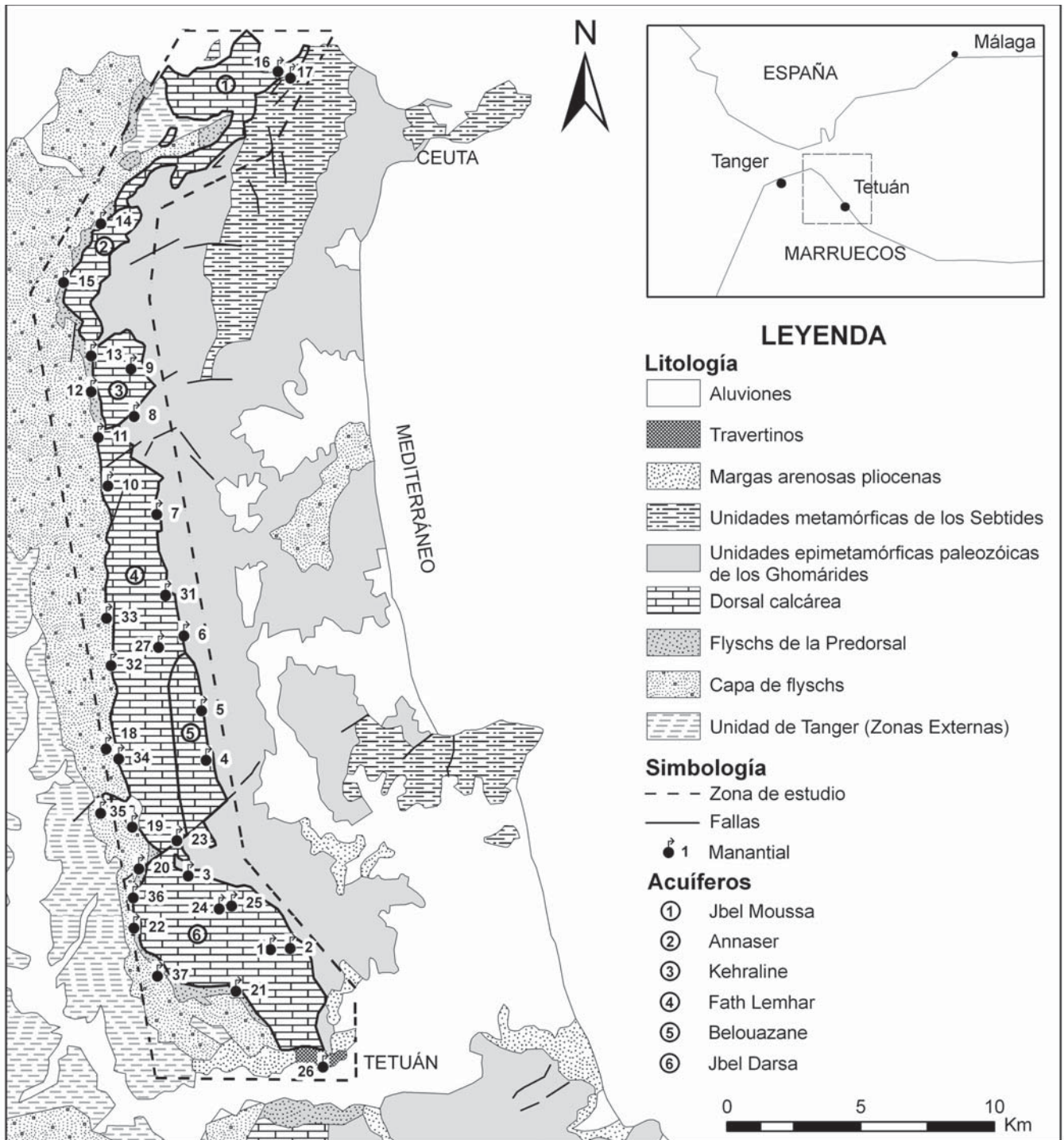


Fig. 1.- Mapa hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos de la cadena del Haouz.
 Fig. 1.- Hydrogeological map of the carbonate aquifers of Haouz mountain range.

lisis se realizaron distintas determinaciones físico-químicas in situ (pH, temperatura y conductividad eléctrica a 20°C). En el laboratorio, se han analizado la conductividad eléctrica del agua a 20°C (en adelante CE) y el pH, por electrometría; K y Na, por espectrometría de emisión atómica; HCO₃ y CO₃, por volumetría, y finalmente, Ca, Mg, PO₄, NH₄, SiO₂, Cl, SO₄, por espectrofotometría de absorción. Para el análisis y la interpretación de la información hidrogeoquímica se utilizaron gráficos de interpretación hidrogeoquímica (Custodio, 1983; D'Amore *et al.*, 1983; Guggenbach, 1988; Güler *et al.*, 2002; Hanshaw y Back, 1979) y se estudiaron las principales relaciones iónicas (Fagundo *et al.*, 1996). El tratamiento de la base de datos hidrogeoquímicos se ha realizado con el programa AQUACHEM 4.0 (Waterloo Hydrogeologic, 2003). Los importantes errores analíticos de dos de las muestras recogidas hicieron que éstas no fuesen consideradas.

Resultados

La variabilidad espacial de las características físico-químicas de las aguas subterráneas de los acuíferos carbonáticos del Haouz no es muy importante. No obstante, el análisis conjunto de la CE, la temperatura y la relación r(Mg+Ca) ha permitido diferenciar cuatro grupos de aguas (Fig. 2A).

El grupo mayoritario (74% de las muestras) presenta facies bicarbonatada cálcico-magnésica. Son aguas poco mineralizadas (412 < CE < 637 µS/cm) y con una temperatura media de 16,3°C, comprendida entre 14,8 a 18,5°C (Grupo I, Fig. 2). Las concentraciones medias de cloruro, calcio, magnesio y sulfato son 24, 68, 28 y 23 mg/l, respectivamente.

Más frías (de 15,1 a 15,6 °C) y con menor salinidad (340 < CE < 402 µS/cm) son las aguas asociadas, fundamentalmente, al acuífero del sinclinal de Belouazane y al manantial de Aguas Blancas (n° 17, Fig. 1), del acuífero del Jbel Moussa. Los contenidos medios de cloruro, calcio, magnesio y sulfato, de este tipo de aguas, son 19, 50, 14 y 21 mg/l, respectivamente (Grupo II, Fig. 2). Asimismo, presentan facies bicarbonatada cálcico-magnésica y bicarbonatada cálcica, en el caso del manantial de Aguas Blancas.

Por último, se distinguen otros dos grupos de aguas con mayor temperatura y más mineralizadas. El primero (Grupo III, Fig. 2), lo forman las dos muestras de agua recogidas en el acuífero de Annaser, de facies bicarbonatada cálcico-magnésica, pero más mi-

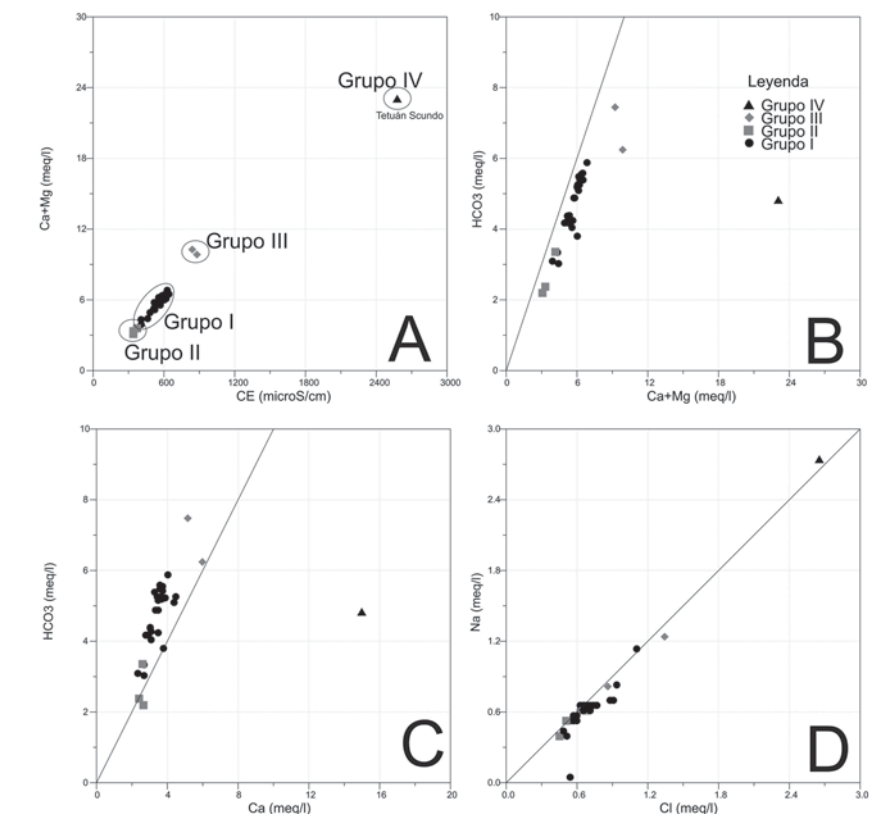


Fig. 2.- Diferentes relaciones iónicas de las muestras de agua subterránea recogidas.
Fig. 2.- Different ionic ratios of groundwater samples collected.

neralizadas y más calientes que las de los anteriores tipos (899-874 µS/cm y 18-18,1 °C). Con unas concentraciones medias de cloruro, calcio, magnesio y sulfato que también son mayores, 37, 113, 47 y 88 mg/l, respectivamente. El segundo, y con notables diferencias hidrogeoquímicas frente al resto, corresponde al manantial de Tetuán Scundo (n° 26, Fig. 1), del acuífero del Jbel Darsa y ubicado en la Medina de Tetuán. Este manantial drena el agua más mineralizada (2575 µS/cm) y de mayor temperatura (23,1°C) de todas las analizadas (Grupo IV, Fig. 2). El agua es de facies sulfatada cálcico-magnésica y sus concentraciones medias cloruro, calcio, magnesio y sulfato son de 94, 300, 98 y 820 mg/l, respectivamente.

El estudio de las principales relaciones iónicas ha permitido identificar los principales procesos modificadores de las aguas subterráneas muestreadas. Así, aparte de los usuales procesos de aporte atmosférico, de reconcentración por procesos de evapotranspiración y evaporación y de disolución de CO₂, es la disolución de la dolomita la principal reacción que se produce en estos acuíferos. Este hecho puede comprobarse en las gráficas de dispersión B, C y D de la figura 2, en las que se ha incluido una línea que representa la relación iónica 1:1 de los ele-

mentos representados. No obstante, en los manantiales del acuífero del anticlinal de Belouazane y en el manantial de Aguas Blancas (acuífero de Jbel Moussa) la reacción de disolución de calcita (Fig. 2C) predomina respecto a la de la dolomita (Fig. 2B). Hecho, que en el caso del manantial de Aguas Blancas, según García-López *et al.* (1994), está relacionado con la composición litológica del sistema hidrogeológico drenado, compuesto, fundamentalmente, por caliza, y con el mayor grado de karstificación que presenta la unidad geológica del Jbel Moussa, frente a las de las unidades de Jbel Falles y Jbel Chinder, presentes en el acuífero considerado en este trabajo como del Jbel Moussa (ver Fig. 1).

Por otro lado, las considerables concentraciones de cloruro y sodio identificadas en los manantiales de Tetuán Scundo (n° 26), Debbane (n° 14) y Fendlaula, (n° 37) implican un aporte de estos iones provenientes de la disolución de halita (Fig. 2D). Asimismo, en los manantiales del acuífero de Annaser y en el de Tetuán Scundo, la disminución de la concentración de bicarbonato y el aumento del contenido en magnesio y calcio, respecto al resto, indican un evidente proceso de dedolomitización, asociado a la disolución de yeso (Fig. 3). Las consideraciones que se desprenden de los procesos hidrogeoquímicos

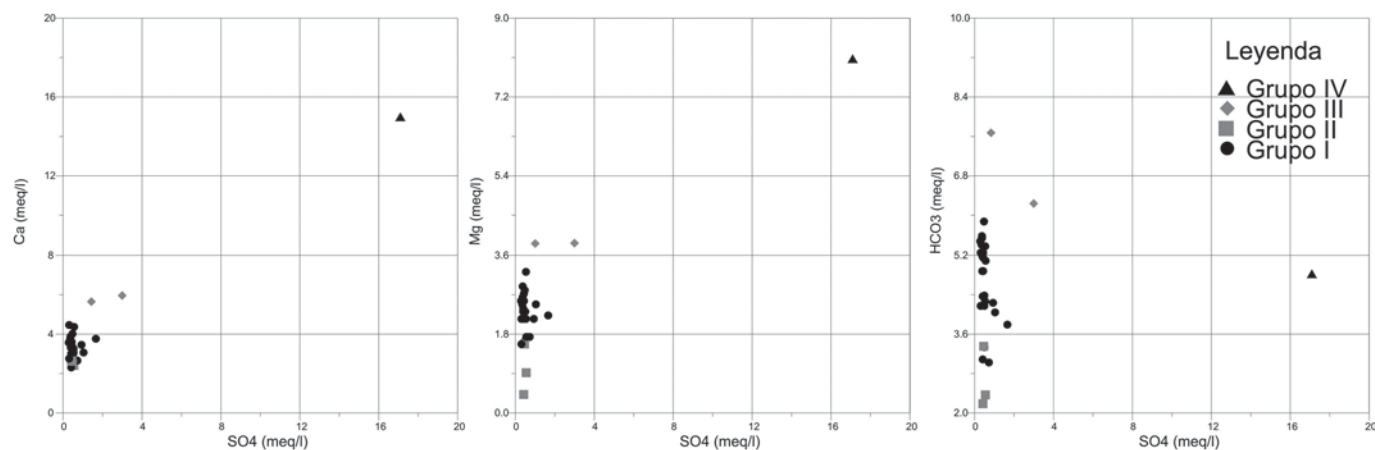


Fig. 3.- Diferentes relaciones iónicas de las muestras de agua subterránea recogidas.

Fig. 3.- Different ionic ratios of groundwater samples collected.

que generan estas aguas más mineralizadas, su mayor temperatura, anómala respecto al resto, y la ubicación de los manantiales junto a importantes zonas de fractura, hacen suponer la existencia de flujos verticales profundos, en los que se favorecería una mayor interacción con materiales triásicos evaporíticos. De hecho, Aluni *et al.* (2008) ya constataron este tipo de procesos al estudiar la hidrogeoquímica de la Dorsal Calcárea, en el acuífero de Jbel Darsa, al noroeste de la ciudad de Tetuán.

Por último, debe ser destacado que la totalidad de las aguas analizadas son químicamente aptas para el consumo humano, de acuerdo con las normas internacionales de potabilidad, con excepción del manantial de Tetuán Scundo, donde los sulfatos superan las concentraciones máximas admisibles.

Discusión

La alta compartimentación que presentan los acuíferos carbonáticos del Haouz provoca la formación de acuíferos con funcionamiento hidrogeológico independiente, en los que se suponen unos tiempos de residencia reducidos. Este hecho explicaría la presencia mayoritaria de aguas poco mineralizadas (Grupo I y II). Con todo, existe un reducido número de manantiales asociados a fracturas profundas, en los que se drenan aguas más evolucionadas, más mineralizadas y más calientes que el resto (Grupo III y IV). Si se pretende hacer una explotación sostenible de los recursos hídricos asociados a estos acuíferos, es necesario que los planificadores del agua tengan en cuenta las anteriores consideraciones. La explotación de sectores asociados a fallas profundas provocará la extracción de aguas mineralizadas,

poco aptas para el consumo humano. Asimismo, la explotación no planificada de los pequeños acuíferos diferenciados, a su vez compartimentados en escamas, provocará, muy probablemente, la desaparición de sus manantiales, con las consecuentes afectaciones sociales y medioambientales. Por tanto, antes de acometer la explotación de estos acuíferos sería recomendable seleccionar cuales se deberían explotar, cómo y cuánto, y todo basado en investigaciones hidrogeológicas de detalle que requieren de la adquisición de datos hidrogeológicos e hidrometeorológicos continuos en el espacio y en el tiempo.

Conclusiones

En el macizo del Haouz existen seis acuíferos con un funcionamiento hidrogeológico independiente. Las aguas subterráneas drenadas por estos acuíferos presentan, mayoritariamente, unas características hidrogeoquímicas muy homogéneas: son poco mineralizadas y con una temperatura media similar a la del aire en las zonas de recarga. Los manantiales del sinclinal de Belouazane y de Jbel Moussa drenan aguas ligeramente más frías y menos mineralizadas que las anteriores. Por el contrario, los manantiales del acuífero de Annaser y el manantial de Tetuán Scundo (perteneciente al acuífero de Jbel Darsa) asociados a zonas de fractura, drenan aguas más mineralizadas y más calientes que el resto. En este último grupo de aguas se ha puesto de manifiesto la existencia de procesos de disolución de yeso y halita.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto "Contribución al conocimiento hidrogeológico del

acuífero kárstico del Haouz (Tetuán, Norte de Marruecos)" (A/022029/08), financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. Agradecemos a los dos revisores anónimos su contribución a la mejora del presente trabajo. Asimismo, se agradece a Luis Hueso la delineación de la figura 1.

Referencias

- Aluni, K. (2004). *Contribution à la connaissance hydrogéologique des formations carbonatées de la région de Tétouan*. 67. Mémoire du DESA, Univ. Tetuán, 67 p.
- Aluni, K., El Morabiti, K., Pulido-Bosch, A., El Kharim, Y. y Benmakhlof, M. (2008). *Geogaceta*, 44, 55-58.
- Custodio, E. (1983). En: *Hidrología Subterránea*. (Custodio y Llamas, Eds). Ediciones Omega, 1003-1095.
- D'Amore, F., Scandiffio, G. y Panichi, C. (1983). *Biothermics*, 12, 141-148.
- Fagundo, J. R., Váldez, J.J. y Rodríguez-Rubio, J. E. (1996). 12-212. *Hidroquímica del Karst*. Univ. de Granada, Granada.
- García-López, S., Cruz-Sanjulián, J.J. y Benavente, J. (1994). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 7, 319-326.
- Giggenbach, W. F. (1988). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765
- Güler, C., Thyne, G. D. McCray, J.E. y Turner, A.K. (2002). *Hydrogeology Journal*, 10, 455-474.
- Hanshaw, B. B. y Back, W. (1979). *Journal of Hydrology*, 43, 287-312.
- Durán, J.J., López Geta, J.A., García de Domingo, A., El Morabiti, K., El Kharim, Y., y Ben Makhlof, M. (2009). *Contribución al conocimiento hidrogeológico del acuífero kárstico del Haouz (Tetuán, Norte de Marruecos)*. IGME-AECI, Madrid.
- SGM. (1979). *Carte Géologique de Sebta, échelle 1/50.000*. Service Géologique du Maroc.
- Waterloo Hydrogeologic, I. (2003). *AquaChem user's manual*. 184 p.