

^{18}O , Br y el origen de la salinización en los acuíferos costeros de Martíl-Alila y Smir (Tetuán, Marruecos)

Br, ^{18}O and the origin of salinization in the Martíl-Alila and Smir aquifers (Tetouan Morocco)

J. Stitou el Messari ⁽¹⁾, J.C. Cerón ⁽²⁾, A. Pulido Bosch ⁽³⁾, N. Aoulad Mansour ⁽⁴⁾ y M. Himi ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geología, Universidad Abdel Malek-Essaadi, Fac. des Science AC 2121 Tetuán, Marruecos.

⁽²⁾ Departamento de Geodinámica y Paleontología, Universidad de Huelva, 21819, Huelva.

⁽³⁾ Departamento de Hidrogeología y Q. A. Universidad de Almería, 04120, La Cañada Almería.

⁽⁴⁾ Laboratorio Regional del Medio Ambiente A.C. 2121 Tetuán.

⁽⁵⁾ Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Universidad de Barcelona, Martí i Franquès, s/n 08028, Barcelona

ABSTRACT:

The analysis of the occurrence of isotope (O^{18}) in relation to other ions (Cl and Br) in the groundwater of the Martil-Alila and Smir aquifers reveals that the process of salinization is caused by intruding seawater and polluted waters, coming from river Martil and M'diq city.

Key words: hydrogeochemistry, salinization, seawater intrusion.

Geogaceta, 37 (2005), 131-134
ISSN:0213683X

Características generales

Las planas de Martíl-Alila y Smir son dos llanuras costeras con una superficie próxima a 87 y 12 km² respectivamente. En ellas se asientan las poblaciones de Tetuán, Martíl y M'diq. Los ríos Martíl y Alila atraviesan los sectores septentrional y meridional de la plana de Martil-Alila, y el río Smir la parte central de la llanura de Smir (Fig.1). Los ríos Alila y Smir tienen un funcionamiento esporádico, mientras que el río Martíl es permanente. La altura sobre el nivel del mar de las planas varía entre 10 m y 0 m, y tienen una pendiente media del 2 %.

Desde el punto de vista geológico, ambos acuíferos constituyen dos llanuras aluviales costeras dentro del dominio interno de la cordillera Rifeña. Sus orientaciones son paralelas a la costa y están limitadas por el mar mediterráneo al Este, y por las colinas paleozoicas al Norte, Sur y Oeste. En su extremo SW la plana de Martil-Alila entra en contacto con los materiales carbonatados de la Dorsal Caliza.

Los sedimentos plio-cuaternarios que constituyen el relleno de estas llanuras son materiales detríticos, y en donde es fácil identificar conglomerados –en su parte inferior-, una formación intermedia de arcillas, y una superior formada por arenas y gravas. Este relleno se caracteriza por registrar frecuentes cambios laterales de facies y de granulometría. Dos campañas de prospección geofísica eléc-

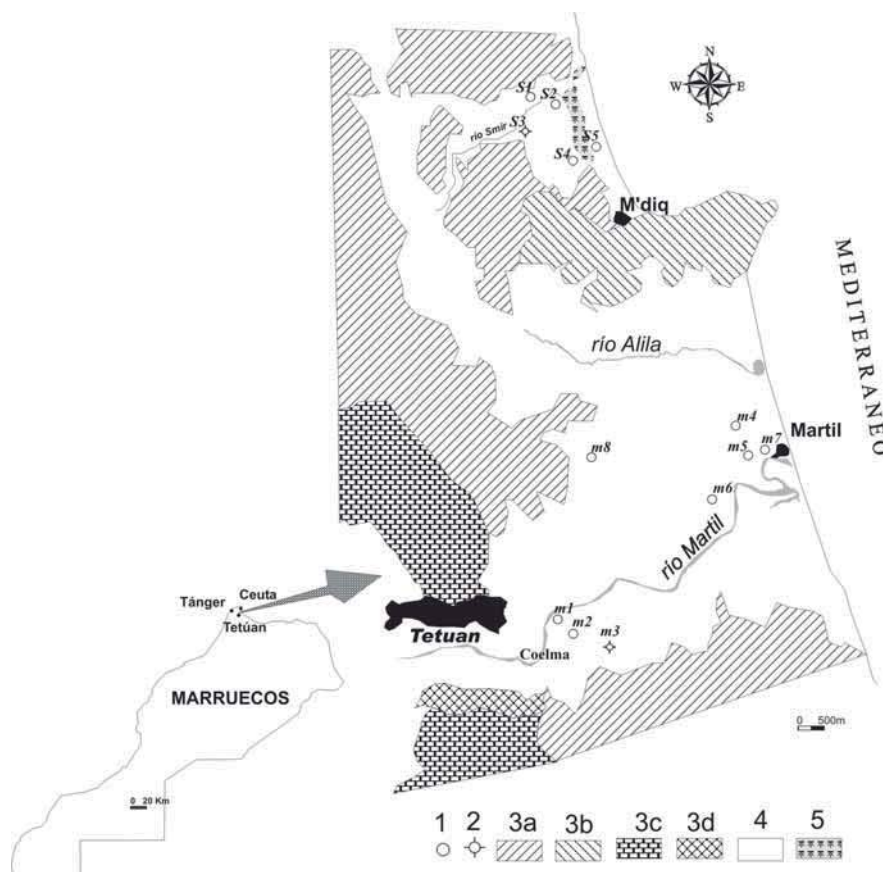


Fig. 1.- Localización geográfica y esquema hidrogeológico del área de estudio. 1: pozo; 2: sondeo; 3: material del borde (3a: complejo Gomáride; 3b: complejo Sébtide; 3c: Dorsal caliza; 3d: flysch); 4: Cuaternario; 5: zona húmeda de Smir.

Fig. 1.- Geographic location and hydrogeological scheme of study area. 1: well; 2: drill well; 3: border materials (3a: Gomarid complex; 3b: Sebti complex; 3c: Dorsal calcaire; 3d flysch); 4: Quaternary materials; 5: wetland.

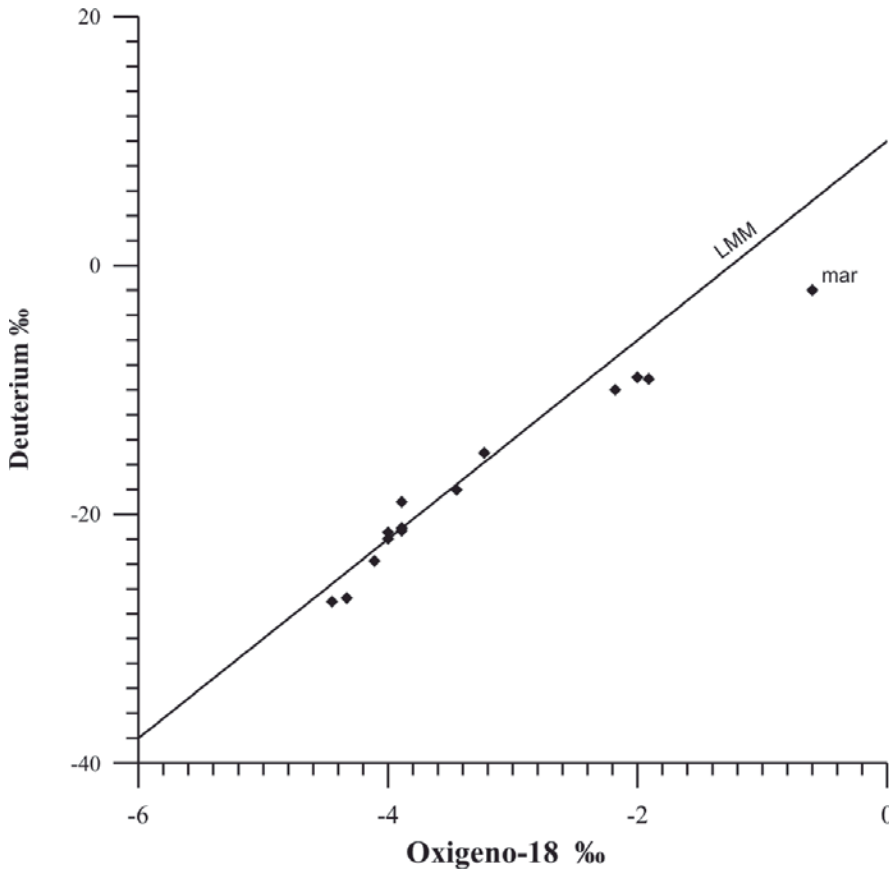


Fig. 2.- Relación entre oxígeno-18 y deuterio. Se señala la línea meteórica mundial (LMM).

Fig. 2.- Plots $\delta^{18}O$ vs δD of groundwater samples in the aquifers (LMM: world meteoric line).

trica, apoyadas en las columnas litológicas de sondeos, han permitido reconocer la geometría de las rocas del relleno. En lo que se refiere a la naturaleza del sustrato del acuífero, se le supone impermeable y formado por margas y arcillas terciarias. El espesor del relleno plio-cuaternario varía entre 0 y 30 m en el acuífero de Martil-Alila, y entre 0 y 20 m en el acuífero de Smir (Stitou *et al.*, 1995 y 1998).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el acuífero de Martil-Alila constituye un solo sistema hidrogeológico de comportamiento mono y/o bicapa. Dada la irregularidad litológica del acuífero, la transmisividad puede variar dentro de un amplio rango de valores, por lo que es difícil dar un valor representativo de todo el acuífero. La DRH (1988), El Morabiti y Pulido Bosch (1994) y Stitou (2002) determinan un rango de 17 m²/día a 7690 m²/día, con un valor medio de 2074 m²/día. La anisotropía identificada se corresponde con diferencias sectoriales de manera que los máximos valores se localizan en el área próxima a los cauces de los ríos Martil y Alila, mientras que los mínimos se encuentran en la zona Sur, donde predomina el contenido arcilloso de los sedi-

mentos. La recarga que recibe el acuífero puede ser tanto de infiltración directa del agua de lluvia y de los ríos, como de aportes laterales del acuífero kárstico, e incluso por retorno del agua de riego. La descarga del acuífero tiene lugar mediante extracciones por bombeo, salidas directas al mar, y por alimentación al río Martil.

El acuífero de Smir constituye un solo sistema hidrogeológico de comportamiento monocapa. Los materiales detríticos cuaternarios tienen un comportamiento de acuífero, que puede ser localmente de acuitardo cuando predomina la fracción fina. La profundidad del agua subterránea está entre 0 y 4 m y la transmisividad es del orden de 138 m²/día (Stitou *et al.*, 2003). La recarga del acuífero de Smir se produce fundamentalmente por la infiltración de la precipitación (que se estima en alrededor de 1,5 hm³/año) y de la escorrentía superficial generada en su cuenca vertiente (próxima a 1,8 hm³/año). En menor medida, una pequeña parte de la infiltración se debe a la recarga del río Smir y a los vertidos de aguas residuales de las poblaciones del área (en torno a 0,5 hm³/año).

La recarga del río Smir se ha visto muy reducida desde la construcción del

embalse de Smir. La Agencia Hidráulica de Loukkos cifraba anteriormente esta recarga en alrededor de 25 hm³/año; actualmente se estima en aproximadamente 1 hm³/año. Las salidas del acuífero se producen por bombeo en los pozos del área, el aporte subterráneo al mar Mediterráneo, y la evaporación en el humedal o *merja*. El humedal representa el nivel freático en el área, en la franja de comportamiento hidrogeológico libre del acuífero de Smir; está sometido a evaporación, por lo que constituye una de las salidas naturales del acuífero y que han sido estimadas por Stitou y Pulido Bosch (1995) en alrededor de 0,6 hm³/año.

Hidrogeoquímica

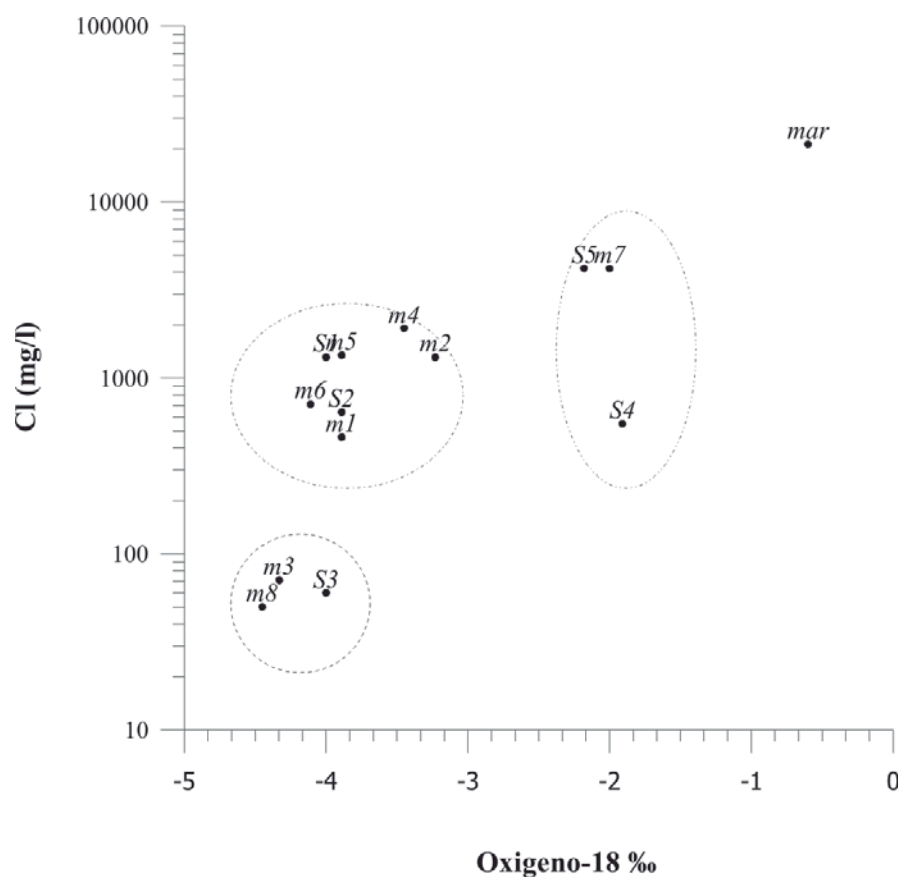
Los análisis isotópicos fueron realizados en el laboratorio de la estación experimental del Zaidín de Granada. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla I. Se expresan en ‰ de la desviación estándar internacional V-SMOW V-SMOW.

Las aguas subterráneas del acuífero de Martil-Alila y de Smir presentan un contenido en ¹⁸O que varía entre -4,44 ‰ y -1,9 ‰, con un valor medio de -3,5 ‰ y una desviación típica de 0,8. Cabe destacar que los valores bajos fueron obtenidos en las muestras tomadas en la parte occidental de los acuíferos de Martil-Alila y de Smir. Los valores altos (enriquecimiento) se encuentran en la costa, cerca a la ciudad de Martil, en el sector de Coelma (acuífero de Martil Alila.), y en la parte septentrional de la zona húmeda de Smir y de la zona de costa (acuífero de Smir). El contenido en deuterio varía entre -27 ‰ y -9,11 ‰, con un valor medio de -20,08 ‰.

La relación $\delta^{18}O$ - δD ha sido utilizada en varios sitios del mundo para caracterizar procesos de salinización en los acuíferos costeros. De hecho, estos isótopos estables permiten abordar los problemas del origen del agua y de las posibles conexiones entre diversos grupos (Gat, 1981). Varios autores han demostrado que existe un enriquecimiento de ¹⁸O en los sectores costeros afectados por intrusión marina (Bear *et al.*, 1999).

Debido a la carencia de medidas isotópicas en el sector estudiado, pensamos que sería de gran utilidad la comparación de las muestras con la línea meteórica mundial (LMM: $D = 8^{18}O + 10$).

Los puntos representativos de las muestras tomadas en los acuíferos de Smir y de Martil-Alila, así como la de mar, se alinean a lo largo de recta

Fig. 3.- Relación entre ^{18}O y Cl^- .Fig. 3 - Plots $\delta^{18}\text{O}$ vs Cl^- of groundwater samples in the aquifers.

meteórica mundial (Fig. 2). El coeficiente de determinación (r^2) entre δD y $\delta^{18}\text{O}$ es de 0,9, mientras que la relación de regresión entre estos dos isótopos estables es: $D = 6,62 \delta^{18}\text{O} + 4,52$. También observamos que ciertos puntos presentan un desplazamiento de $\delta^{18}\text{O}$ hacia valores más positivos.

Los valores de exceso del deuterio del agua de lluvia se adquieren durante la evaporación de las masas del aire y son modificados por su historia posterior. Dependen principalmente de la temperatura y de la humedad relativa existente durante la formación del vapor de agua y, por lo tanto, del lugar donde se forman. Las lluvias atlánticas están caracterizadas por un valor de exceso del deuterio comprendido entre +8,9 ‰ y +12 ‰, mientras que las lluvias mediterráneas muestran un contenido más alto, de hasta +22 ‰ en el mediterráneo oriental (Gat, 1981)

Las aguas analizadas presentan valores de excesos en deuterio comprendidos entre +4,1 ‰ y +12,1 ‰, con una media de +9,7 ‰. Esto confirma que las aguas de los acuíferos de Martil-Alila y de Smir son de origen meteórico, con fuente atlántica y con una ligera influencia medite-

rránea. Por otra parte, son modificados por un proceso de evaporación y de mezcla de aguas, el cual se justifica por el enriquecimiento en ^{18}O de algunos puntos.

Relación entre ^{18}O y Cloruro

Con el objetivo de determinar los procesos que afectan al contenido en ^{18}O se ha representado en la figura. 3 la concentración de Cl^- en función del ^{18}O . En ella se pueden apreciar tres grupos. El primero presenta un bajo contenido en ion Cl^- (inferior a 100 mg/l) y un bajo contenido en ^{18}O . El segundo está enriquecido en ion Cl^- y tiene un contenido en ^{18}O relativamente constante; sin embargo, en el seno de este grupo dos puntos se enriquecen relativamente en este elemento (m4 y m2), probablemente a causa de la evaporación. En este sentido, si resulta únicamente de la evaporación, el contenido en cloruro debe ser correlativo con el contenido en ^{18}O (lo que permite saber el grado de evaporación). El tercer grupo está formado por puntos muestreados cerca de la costa, y que tienen una alta mineralización y un contenido elevado en ^{18}O debido a la intrusión marina.

Los puntos m8 y S4 se disponen sobre la línea de evaporación con una pendiente menor que la de la LMM. Esta desviación se puede explicar por la evaporación, debido a que estos puntos son pozos de gran diámetro. Además de este proceso, actuarían también el intercambio isotópico entre la materia orgánica de las aguas residuales y el agua subterránea, y siendo el intercambio a favor de ésta última.

Relación entre ^{18}O y Br/Cl

Ocho muestras tienen una relación Br/Cl casi igual a la del mar (1,7 a 2,8 ‰)

Referencia	Oxígeno-18 ‰	Deuterio ‰	Br ⁻ ppm	Cl ⁻ ppm	rBr/rCl ‰	d
S1	-4	-21.44	5	1313	1.69	10.56
S2	-3.89	-19.02	2.54	639	1.77	12.1
S3	-4	-21.99	0.075	60	0.55	10.01
S4	-1.91	-9.12	0.8	550	0.64	6.16
S5	-2.18	-10	20	4201	2.1	7.44
m1	-3.89	-21.33	0.98	461	0.94	9.79
m2	-3.23	-15.06	7	1313	2.30	10.78
m3	-4.33	-26.72	0.05	71	0.31	7.92
m4	-3.45	-18.03	12	1917	2.78	9.57
m5	-3.89	-21.11	8.7	1349	2.80	10.01
m6	-4.11	-23.75	3.7	710	2.31	9.13
m7	-2.17	-9.13	22	4190	2.33	7
m8	-4.45	-27	0.082	50	0.70	8.6
mar	-0.6	-2	82	21308	1.70	2.8
Mínimo	-4.44	-27	0.05	50	0.30	5.36
Media	3.5	-20.8	6.3	1294	1.60	8.9
Máximo	-1.9	-9.11	22	4201	2.70	12
D-típica	0.8	4.8	7.4	1408	0.89	2.06

Tabla I.- Contenido isotópico de las aguas subterráneas de los acuíferos de Martil-Alila y de Smir (julio, 2002); d: exceso en deuterio y D-típica: desviación típica.

Table I.- Isotopics content of groundwaters of the Martil-Alila and Smir aquifers (July, 2002); d: excess in deuterium and D-típica: standard deviation.

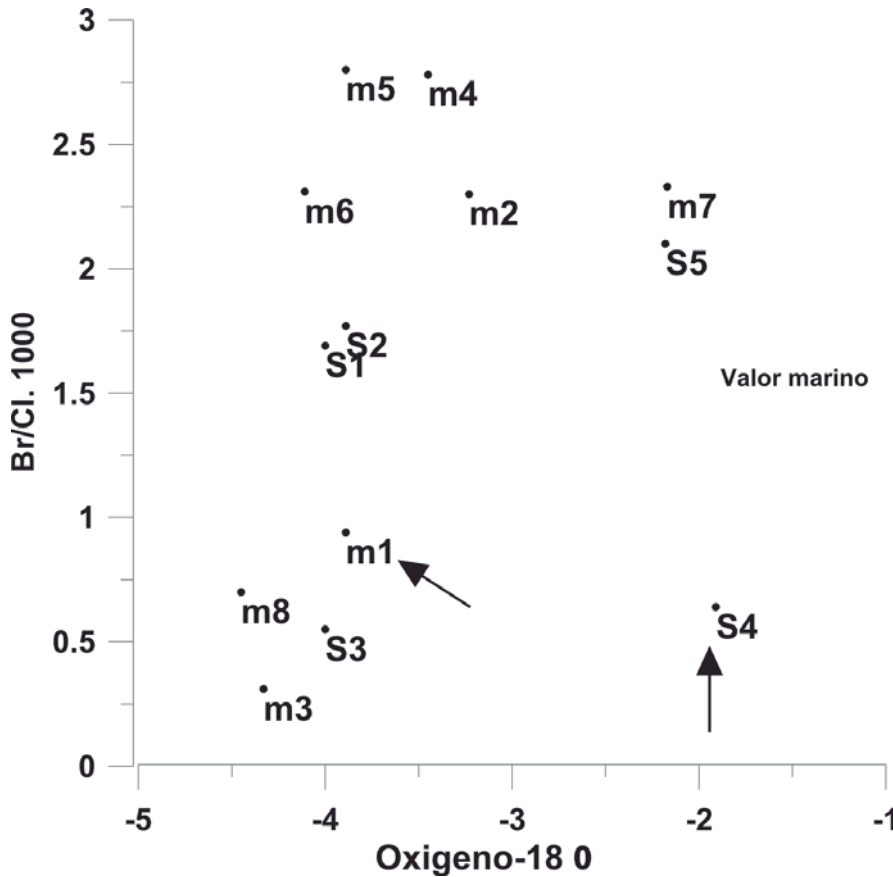


Fig. 4- Relación entre oxígeno-18 y el Br/Cl.

Fig. 4 - Plots δ¹⁸O vs Br/Cl of groundwater samples in the aquifers.

y son ricas en ¹⁸O (Tabla I), lo que demuestra el origen marino de los cloruros y los bromuros de estas aguas subterráneas. El aumento de la relación Br/Cl en este agua con respecto a la del mar (1,5 a 1,7 ‰) puede ser explicada por aerosoles marinos (Hsissou *et al*, 1999). En parte, también puede ser debido al enriquecimiento en bromuros desde los horizontes orgánicos del suelo que almacenan bromuros. En la franja litoral del sector estudiado la mineralización es fuerte, al igual que en el sector de Martil y en el sur del acuífero de Smir; este hecho es debido sobre todo a la intrusión marina, por lo que la relación Br/Cl está muy cerca de la del agua de mar.

La anomalía de Coelma (Fig. 4, puntos m1 y m2) está relacionada con dos fenómenos distintos. En primer lugar, con la salinidad de los sedimentos de origen marino que impregna los terrenos plio-cuaternarios y que da lugar a una relación Br/Cl con valores próximos (punto m2). En segundo lugar, con las aguas residuales no tratadas vertidas directamente en el río Martil, y con los “pozos negros” que todavía no están conecta-

dos al sistema de saneamiento de la ciudad de Tetúan.

Para las aguas del sector meridional del acuífero de Smir (punto S4), el enriquecimiento en ¹⁸O y en Cl⁻ llevaría a pensar en una posible intrusión marina; sin embargo, la baja relación Br/Cl (0,64 ‰) hace suponer que existe otra fuente de cloruro y, por lo tanto, de ¹⁸O. Esto también se supone para las aguas residuales transportadas desde la estación del tratamiento de M’diq (fuera de servicio) y evacuadas sin ningún tratamiento en la merja de Smir. De hecho, puede haber un intercambio de ¹⁸O entre la materia orgánica del agua residual y el agua del acuífero; este intercambio sería a favor del agua subterránea, que se enriquecería en este elemento. Para la otras aguas (puntos m1, m8, m3 y S2), los bromuros y las relaciones Br/Cl son relativamente bajas respecto de la de mar, y también menos enriquecidas en ¹⁸O.

Conclusiones

La salinidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de Martil-Alila y de Smir

aumenta, en líneas generales, desde el oeste hacia la costa. Sin embargo, hay anomalías como las observadas en el sector de Coelma y al sur de la merja de Smir.

Las aguas de los acuíferos de Martil-Alila y de Smir son de origen meteórico y fuente atlántica, con una ligera influencia mediterránea. Por otra parte, son modificadas por procesos de evaporación y de mezcla de aguas.

Según se deduce del estudio de ion bromuro y de ¹⁸O, los procesos de salinidad parecen intervenir de forma significativa en la intrusión marina y en la mezcla de las aguas residuales superficiales, además de las aguas fósiles.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Agencia Hydraulique de Loukkos de Tetúan por su colaboración en el aporte de documentación. El estudio presentado fue realizado gracias a una Beca de la AEIC (Becas MAE 2004/2005).

Referencias

Bear, J., Cheng, A.H.D, Sorek, S., Ouazar, D., y Herrera, I. (1999). *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers Concepts, Methods and Practices*. Kluwer Academic Publishers, 150 p.

DRH (1988). Informe inédito, 120 p.

El Morabiti, K. y Pulido Bosch, A. (1994). *Hydrogeologie*, 1, 21-33.

Gat, J.R. (1981). En: *Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle* (J.R. Gat y G. Gonfiantini Eds.). IAEA Technical Report Series, 210, 223-240.

Hsissou, Y., Mudry, J., Mania, J., Bouchaou, L. y Chauve, P. (1999). *Comptes Rendues de l'Academie des Sciences de Paris*, 328, 381-386.

Stitou, J. y Pulido Bosch, A (1995). *Hydrogeologie*, 3, 39-46.

Stitou, J., Pulido Bosch, A., Targuisti, K., Cerón, J.C. y Aoulad Mansour, N. (1998). *Geogaceta*, 23, 147-150.

Stitou, J. (2002): Étude de la salinité des eaux souterraines des aquifères côtiers Martil-Alila et Smir : Intégration des méthodes hydrogéochimiques, géophysiques et isotopiques. Thèse de Doctorat d'état. Univ. de Tetúan, 283 p.

Stitou, J., Pulido Bosch, A., Targuisti, K., Cerón, J.C. (2003). *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países mediterráneos (TIAC'03)*. Comunicaciones, 2, 319-330.