

Evolución hidroquímica en los acuíferos del sector Ksar El Kebir-Larache (Marruecos)

Hydrochemical evolution in the aquifers of the Ksar El Kebir-Larache sectors (Morocco)

B. Bouhmadi (*), J. Benavente (**) y M.C. Hidalgo (***)

(*) Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad Abdelmalek Essaadi, BP: 2121, Tetuán, Marruecos.

(**) Instituto del Agua, Universidad de Granada. c/ Rector López Argüeta, s/n. 18071, Granada.

(***) Dpto. de Geología, E.U.P. Linares, Universidad de Jaén. c/ Alfonso X el Sabio, 28. 23700 Linares.

ABSTRACT

The synthesis of hydrochemical data obtained in the lower basin of the Loukkos river (Morocco) as well as the results of speciation and mass transfer calculations point out that the main processes which influence the groundwater composition of the study area are: a) the dissolution of calcite, dolomite, gypsum and halite, b) the acquisition of CO₂ and c) the Ca/Na exchange with clayey sediments, although some mixing with connate saline waters can't be rejected. Thus, a hydrochemical evolution has been identified from low salinity (less than 0.5 g/l) waters of a Ca-HCO₃ type to others of 1-2 g/l (eventually a few tens of g/l) and Ca and/or Na-Cl type.

Key words: hydrochemistry, alluvial aquifer, mineral equilibria, Loukkos river, Morocco.

Geogaceta, 25 (1999), 47-50

ISSN: 0213683X

Introducción

El área de estudio está situada al NO de Marruecos, entre las ciudades de Larache y Ksar-El-Kebir. Se extiende sobre una superficie de 280 km² y corresponde a la llanura aluvial del río Loukkos y la zona adyacente de Oulad-Ogbane (Fig. 1). El clima de la zona es subhúmedo y la precipitación media anual es de aproximadamente 650 mm.

Los materiales de mayor interés hidrogeológico en el sector estudiado son los aluviones cuaternarios de la llanura y los materiales conglomeráticos villafranienses de la zona de Oulad-Ogbane (Bouhmadi *et al.*, 1994). En buena parte de la llanura aluvial existe una capa superior limo-arcillosa bajo la que se identifican materiales de granulometría más gruesa, aunque variable lateralmente. En particular, Messaoud (1961) identificó dos acuíferos superpuestos en determinados sectores de la orilla derecha, de los cuales el inferior estaba ocupado por aguas congénitas de elevada salinidad. El sustrato de estas formaciones permeables corresponde generalmente a margas del Mioceno superior, las cuales afloran al sur del sector estudiado (Bouhmadi, 1994).

Las aguas subterráneas están destinadas preferentemente al abastecimiento de las poblaciones, que totalizan algo más de

200.000 habitantes. La actividad principal del área es la agricultura. Los cultivos se riegan mayoritariamente con aguas superficiales.

El análisis piezométrico pone de manifiesto que existe recarga del acuífero aluvial a partir del sector de Oulad-Ogbane y que el flujo regional en aquél es hacia la desembocadura. También se identifica una depresión de la superficie piezométrica al NO de Ksar-El-Kebir, que es producto de la explotación concentrada en ese sector (Bouhmadi, 1994). Ambas circunstancias se reflejan en la figura 1, donde también se incluye la situación de los 54 puntos de agua muestreados en agosto de 1992. Se trata de pozos excavados o sondeos de explotación, a excepción de algunos pozos cerca de la desembocadura del río Loukkos que están abandonados a causa de sus aguas relativamente salinas. Las medidas tomadas *in situ* son la conductividad eléctrica, el pH, el potencial redox y la temperatura. En el laboratorio del Instituto del Agua de la Universidad de Granada se han analizado los contenidos en los constituyentes mayoritarios. Los resultados de los análisis químicos de las aguas muestreadas han sido objeto de diferentes tratamientos estadísticos (Bouhmadi *et al.*, 1995), a partir de los cuales se pueden identificar dos grupos de puntos: los de la zona de Oulad-Ogbane y los de la llanura

aluvial. No obstante, dentro de este último grupo puede considerarse la existencia de dos familias de aguas cuya diferencia estriba básicamente en la distinta salinidad. A este respecto, según se ha dicho, existe un grupo de puntos situados en el sector más próximo a la desembocadura caracterizados por elevados contenidos salinos, en relación con las aguas congénitas antes mencionadas.

Se presentan en este trabajo las principales características hidroquímicas de las tres familias de aguas antes definidas. También se determina el estado de saturación de las aguas y las transferencias de masas y procesos hidrogeoquímicos que caracterizan el flujo desde el acuífero de Oulad-Ogbane hasta el sector de concentración de explotaciones en la llanura aluvial.

Para conocer el estado de saturación de las aguas respecto a las principales fases minerales y gaseosas presentes en el sistema (calcita, dolomita, yeso, halita y CO₂) se ha utilizado el modelo WATEQ4F (Back y Nordstrom, 1991). Para el cálculo de las transferencias de masas se ha utilizado el programa NET-PATH (Plummer *et al.*, 1991).

Resultados

Características hidroquímicas

En la tabla 1 se presentan los estadís-

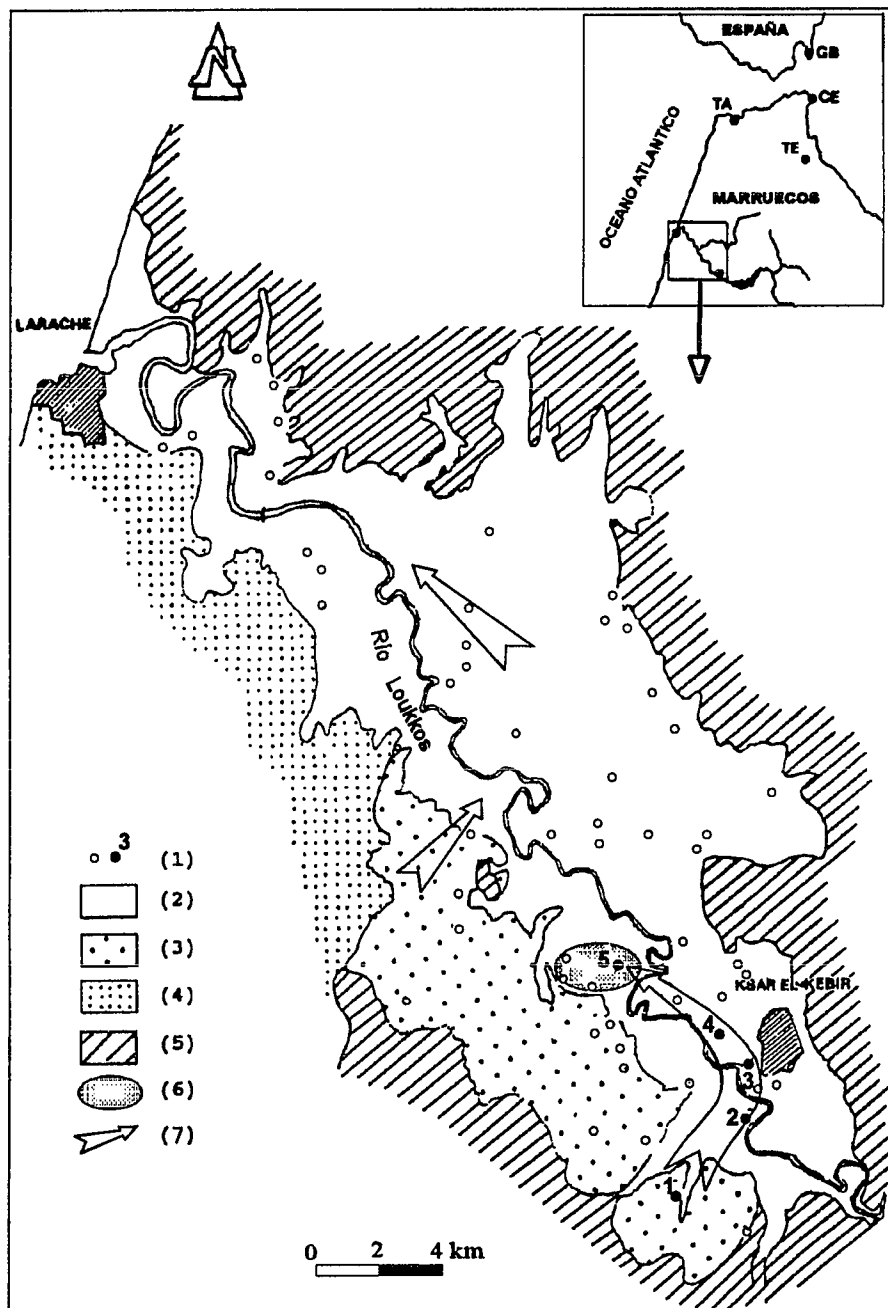


Fig. 1. Situación geográfica del área estudiada. (1) Puntos de control hidroquímico (en negro, los utilizados en la modelización hidrogeoquímica); (2) Llanura aluvial y terrazas fluviales (Cuaternario); (3) Conglomerados con matriz arcillosa de la zona de Oulad-Ogbane (Villafranchiense); (4) Formación arenosa de Rmel (Villafranchiense); (5) Sustrato impermeable indiferenciado (ante-plioceno); (6) Zona del cono de depresión de la superficie piezométrica; (7) Dirección aproximada del flujo subterráneo.

Fig. 1.- Geographical location of the study area. (1) Hydrochemical sampling points (in black, points used in the hydrogeochemical modeling); (2) Alluvial plain and terraces (Quaternary); (3) Conglomerates with clayey matrix in the Oulad-Ogbane zone; (4) Sandy formation of Rmel (Villafranchian); (5) Impervious substratum (pre-pliocene); (6) Piezometric drawdown sector; (7) Approximated groundwater flow direction.

ticos básicos de las características físico-químicas de las aguas de cada uno de los grupos antes definidos. En la figura 2 se representan los correspondientes análisis-tipo en un diagrama de Piper. Las aguas del grupo A (Oulad-Ogbane) destacan

por su mineralización reducida, inferior a 300 mg/l como media. Por el contrario, las del grupo C (desembocadura) se caracterizan por un valor superior a 30 g/l. Las primeras tienen facies bicarbonatada-cálcica y las segundas clorurada-sódica

(Fig. 2), mientras que las aguas del grupo B presentan rasgos intermedios en cuanto a salinidad y proporciones iónicas.

Estados de saturación de las aguas

Respecto a la calcita, los índices de saturación varían entre -2.2 y 0.9. El 15% de las muestras están en equilibrio, el 56% sobresaturadas y el 29% subsaturadas. Las aguas de la zona de Oulad-Ogbane están subsaturadas y las aguas de la llanura presentan índices de saturación variables con una ligera sobresaturación en la desembocadura.

Respecto a la dolomita, los valores calculados de los índices de saturación oscilan entre -4.6 y 2.2. El 25% de las muestras están en equilibrio, el 10% sobresaturadas y el 65% subsaturadas. Las aguas de la zona de Oulad-Ogbane están subsaturadas, mientras que las aguas de la llanura aparecen ligeramente subsaturadas o en equilibrio, y tienden a la saturación hacia la desembocadura.

Respecto al yeso y la halita, todas las muestras de agua se encuentran subsaturadas. Las aguas de la zona de Oulad-Ogbane presentan los índices de saturación más bajos, mientras que las de la desembocadura se aproximan más al estado de equilibrio.

Los valores de la presión parcial de CO₂ obtenidos indican que el 72% de las muestras presentan valores comprendidos entre 10⁻¹ y 10⁻² atm.

Procesos hidrogeoquímicos

Los principales procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar entre la zona de Oulad-Ogbane y la llanura aluvial han sido cuantificados mediante reacciones de balance de masas. Para el cálculo de las transferencias de masas se han seleccionado cinco puntos de agua distribuidos a lo largo de una línea de flujo al oeste de Ksar-El-Kebir (Fig. 1). El primer punto está situado en la zona de Oulad-Ogbane, tiene un agua bicarbonatada-cálcica y conductividad eléctrica inferior a 500 μS/cm. Los cuatro puntos restantes se localizan en la llanura aluvial; de ellos, el punto final está situado en la zona de depresión de la superficie piezométrica y tiene un agua clorurada cálcico-sódica y una conductividad de 2000 μS/cm, aproximadamente.

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para las transferencias de masas entre los cinco puntos de la línea de flujo. Se advierte que las principales reacciones que condicionan esta evolución hidroquímica son la disolución de los minerales calcita, dolomita, yeso y

halita, bajo condiciones de sistema abierto a los gases y acompañadas por un proceso de intercambio catiónico entre sodio y calcio, conducente a un endurecimiento progresivo de las aguas. Estas reacciones son coherentes con los estados de saturación descritos en el apartado anterior.

Estos resultados pueden también apoyarse en la situación en el diagrama de Piper de los puntos de los análisis-tipo (Fig. 2): las aguas de la zona de Oulad-Ogbane, que tienen una facies bicarbonatada cálcica, evolucionan en el sentido del flujo hacia una facies clorurada cálcica y/o sódica.

Discusión

Las cifras obtenidas para la presión parcial de CO₂ son lógicas en relación con suelos con abundante materia orgánica y sometidos a una importante actividad agrícola, como es el caso del área que nos ocupa.

La existencia de procesos de intercambio catiónico es factible en tanto que en el sector modelizado existen intercalaciones arcillosas, cuya composición química debe reflejar las características correspondientes del área fuente. Cabe indicar aquí que las aguas del río Loukkos tienen facies bicarbonatada-clorurada cálcica y escaso contenido salino: aproximadamente 500 mg/l. Por otra parte, en la llanura aluvial existen también horizontes edáficos de naturaleza salina, en parte condicionados por la escasa profundidad del nivel piezométrico y la concentración por evapotranspiración (Boumadi *et al.*, 1995). Estos autores ponen también de manifiesto que en la zona del conoide piezométrico se produce una concentración de flujos subterráneos que tiene como consecuencia la mezcla de aguas de distinta procedencia. Entre tales flujos están, por una parte, los que proceden de alimentación lateral a partir de la formación de Oulad-Ougbane y, por otra parte, las aguas salinas procedentes de los niveles acuíferos inferiores de la llanura aluvial. De hecho, el grado de mezcla entre ambos tipos de aguas está condicionado por determinadas condiciones hidrodinámicas y/o geométricas en los límites del mencionado conoide, de manera que también se observan variaciones temporales significativas en la calidad físico-química del agua bombeada en alguno de los puntos allí situados (Boumadi *et al.*, 1995). Es probable, por último, que el incremento en NaCl que señala la tabla 2 responda a la influencia de las citadas aguas congénitas.

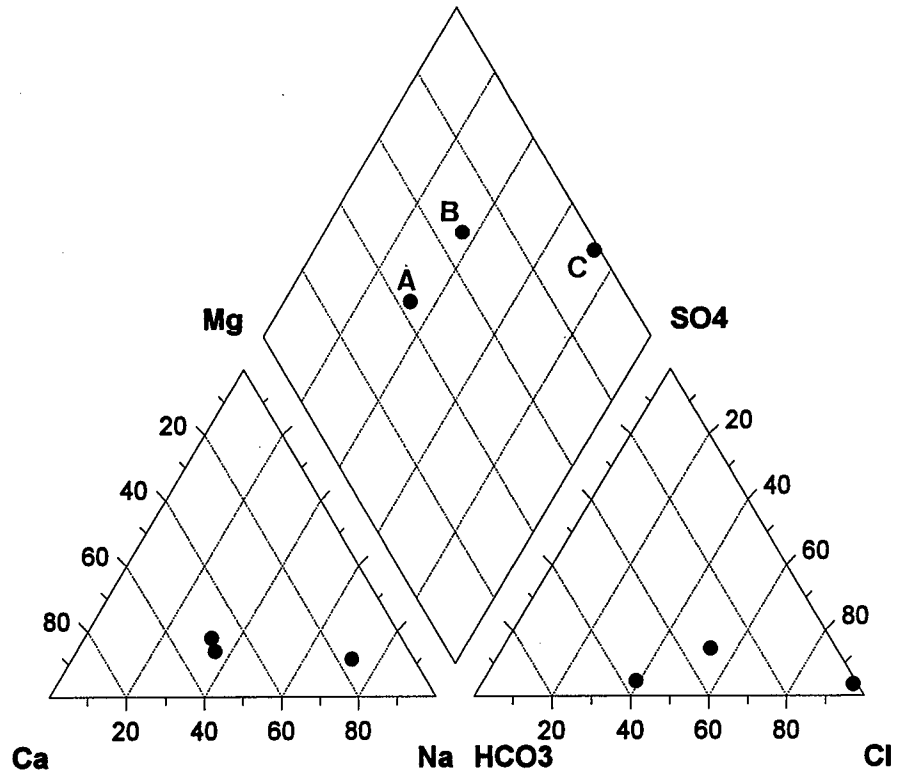


Fig. 2.- Diagrama de Piper para los análisis-tipo de los grupos de agua A, B, C (Tabla 1).

Fig. 2.- Piper diagram for the type-analyses of the groups A, B, C (Table 1).

	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	SiO ₂	TSD	Cond.	t (°C)	pH	Eh (mV)
A/ Oulad-Ogbane													
Media	36,9	8,1	28,2	5,0	50,8	125,8	8,0	14,6	277,5	411,1	23,0	7,0	14,6
STD	15,2	4,9	8,2	6,0	17,7	48,7	1,4	2,4	75,9	105,3	2,9	0,4	22,2
Coef. Var.	41,2	59,8	28,9	119,3	34,8	38,7	17,6	16,1	27,3	25,0	12,6	6,0	152,2
B/ Llanura aluvial													
Media	186,0	31,1	151,5	20,1	312,2	327,6	114,1	14,2	1157,4	1620,6	21,3	6,9	26,5
STD	107,2	19,3	183,7	109,2	274,0	118,7	143,0	3,2	729,8	905,0	0,9	0,3	20,0
Coef. Var.	57,6	60,2	121,6	297,0	87,6	37,4	118,6	22,7	63,0	55,6	4,0	4,6	75,9
C/ Desembocadura													
Media	1828,0	781,3	9446,3	272,5	19871,0	439,4	955,1	6,4	33600,0	41843,0	22,5	7,2	9,3
STD	694,3	262,5	2023,3	72,0	5170,0	245,1	628,6	3,8	8222,8	14099,0	0,4	0,1	5,2
Coef. Var.	38,0	33,6	21,4	26,4	26,0	55,8	65,8	59,3	24,5	33,7	1,8	1,3	55,8

Tabla 1.- Medias, desviaciones típicas y coeficientes de variación de las variables físico-químicas de las tres familias de aguas distinguidas en el área de estudio (concentraciones en mg/l y conductividad eléctrica en µS/cm).

Table 1.- Averages, standard deviations and variation coefficients of the physical-chemical variables for the three groups of waters identified in the study area (concentrations in mg/l and electrical conductivity in µS/cm).

	Calcita	Dolomita	Yeso	CO ₂	NaCl	Cambio Ca/Na
1	-	-	-	-	-	-
2	2.4	0.66	1.30	1.89	4.38	-1.11
3	1.35	0.41	0.77	2.59	7.26	-1.64
4	0.01	0.37	0.93	0.88	1.64	-0.11
5	1.91	0.58	0.21	3.45	11.41	-1.23

Tabla 2.- Resultados obtenidos para las transferencias de masas (expresados en mmol/kg H₂O).

Table 2.- Results for the mass transfer calculations (expressed in mmol/kg H₂O).

Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la síntesis de los datos hidroquímicos y mediante los modelos de especiación y de balance y transferencia de masas, indican que las aguas de la zona de Oulad-Ogbane son poco salinas (menos de 500 mg/l) y se encuentran subsaturadas en los principales minerales que cabe esperar en el sistema (calcita, dolomita, yeso y halita). Las aguas evolucionan hacia condiciones próximas al equilibrio respecto a tales fases a medida que el flujo regional progresa hacia el sector de desembocadura del río Loukkos. En el acuífero aluvial las aguas presentan valores de mineralización to-

tal generalmente del orden de 1 a 2 g/l, aunque en ciertos puntos pueden alcanzar varias decenas de g/l.

Los principales procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar entre la zona de Oulad-Ogbane y el sector donde se concentra la explotación de la llanura aluvial son la disolución de los minerales antes citados, la adquisición de CO₂ y el cambio catiónico de calcio por sodio, además de la posible influencia de aguas congénitas relativamente salinas presentes en ciertos niveles aluviales. Consecuentemente, se produce una evolución química de las aguas en el sentido del flujo desde facies bicarbonatadas cálcicas a facies cloruradas cálcicas y/o sódicas más mineralizadas.

Referencias

- Back, J.W. y Nordstrom, D.K. (1991): *U.S. Geological Survey Open-File Report 91-183*. Menlo Park, California.
- Bouhmadi, B. (1994): *Tesis de Tercer Ciclo* (inédita). Univ. Abdelmalek Essadi, Tetuán, 209 pp.
- Bouhmadi, B., Benavente, J. y Cruz-Sanjulián, J.J. (1994): *Geogaceta*, 16, 11-14.
- Bouhmadi, B., Benavente, J., Cruz-Sanjulián, J.J. y Sanroma A. (1995): *Bol. Geol. Min.*, 106-2: 161-177.
- Messaoud, M. (1961): *Rapport Serv. Ress. Eau* (inédito), Rabat, 47 pp.
- Plummer, L.N., Prestemon, E.C. y Parkhurst, D.L. (1991): *U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 91-4078*. Reston, Virginia.