

# Evolución geoquímica de las aguas subterráneas en el borde meridional de la Sierra de Gádor (Almería)

*Geochemical evolution of groundwaters in the southern edge of Sierra de Gádor (Almería)*

A. Vallejos, A. Pulido Bosch, F. Sánchez Martos, J. Gisbert y L. Molina

Departamento de Hidrogeología. Universidad de Almería. 04120-La Cañada (Almería) [avallejo@ual.es](mailto:avallejo@ual.es)

## ABSTRACT

*The study of the flow paths shows the different hydrogeochemical conditions of carbonate materials in the southern edge of Sierra de Gádor. The study and modelling have consisted on the comparison of the saturation indexes evolution along the supposed flow path and the calculation of the mass balance (dissolution-precipitation processes of different phases) among the different wells analysed. The combination between the calculations of the mass transfer and the groundwater flow time allows to establish the apparent velocity of dissolution with respect to several minerals (calcite, dolomite and gypsum).*

**Key words:** mass balance, flow paths, isotopic characteristics

*Geogaceta, 37 (2005), 99-102  
ISSN:0213683X*

## Introducción

La Sierra de Gádor se sitúa al suroeste de la provincia de Almería. Constituye una gran unidad carbonatada que ocupa una superficie de 320 km<sup>2</sup> en su vertiente Sur (Fig. 1). Las características morfológicas, litológicas y estructurales juegan un papel esencial en la alimentación al Campo de Dalías. El área estudiada se ubica en las Cordilleras Béticas, Zonas Internas, en la denominada Zona Bética s.str. Los materiales prerogénicos aflorantes, pertenecientes al Complejo Alpujárride, comprenden a su vez dos unidades diferentes: Gádor y Felix (Aldaya, 1969). La primera de ellas está constituida por una serie carbonatada, con potencia superior a los 700 m, que reposa sobre metapelitas. La unidad de Felix, cabalgante sobre la de Gádor, incluye un tramo carbonatado, de espesor inferior a 100 m, que descansa sobre un formación pelítica de filitas y cuarcitas. Los carbonatos de las unidades de Gádor y Felix tienen alta permeabilidad. Los esquistos, filitas y cuarcitas de ambas unidades alpujárrides son materiales prácticamente impermeables. Respecto a los materiales postorogénicos, las calcarenitas miocenas y pliocenas, los conglomerados, terrazas marinas y las gravas que constituyen los abanicos aluviales cuaternarios son también permeables. Puede ser considerada igualmente impermeable la potente serie de

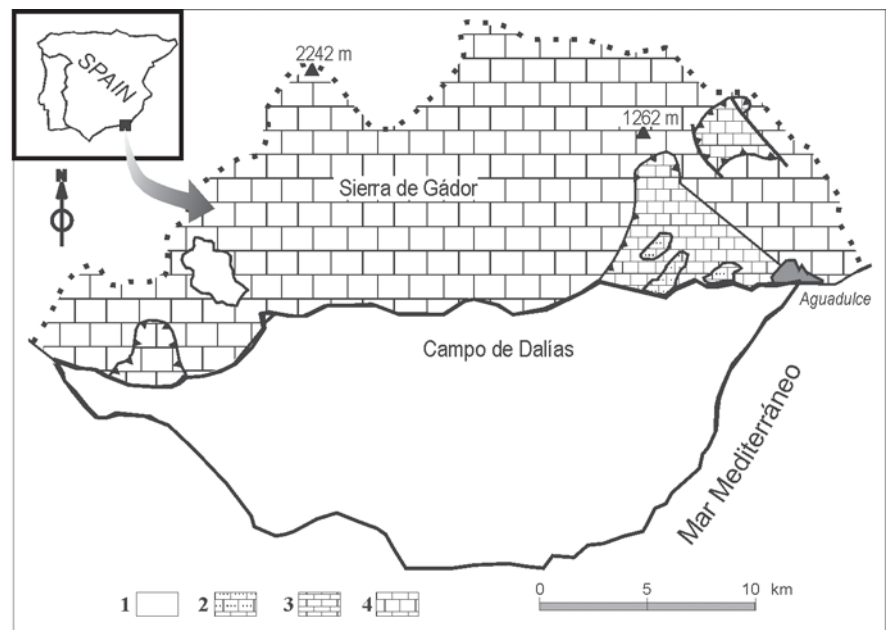
margas marinas pliocenas. Los conglomerados miocenos de cantos de rocas volcánicas son escasamente permeables.

## Procesos Hidrogeoquímicos

Para tener una idea de las facies dominantes en las aguas muestreadas, así como poder inferir la existencia de algún

proceso geoquímico que haya tenido lugar, se han representado sobre un diagrama Piper. En la figura 2 se muestra la situación de todos los puntos acuíferos, incluido el agua de mar.

Como puede verse, en el triángulo de los aniones se deduce la existencia de una gradación desde aguas bicarbonatadas hasta aguas cloruradas, insinuándose una



**Fig. 1.- Situación y esquema hidrogeológico del área de estudio. 1: materiales cuaternarios, 2: calcarenitas miocenas, 3: carbonatos de Felix, 4: carbonatos de Gádor.**

*Fig. 1.- Location and hydrogeological scheme of the study area. 1: quaternary materials; 2: miocene calcarenites; 3: carbonates of Felix; 4: carbonates of Gádor.*

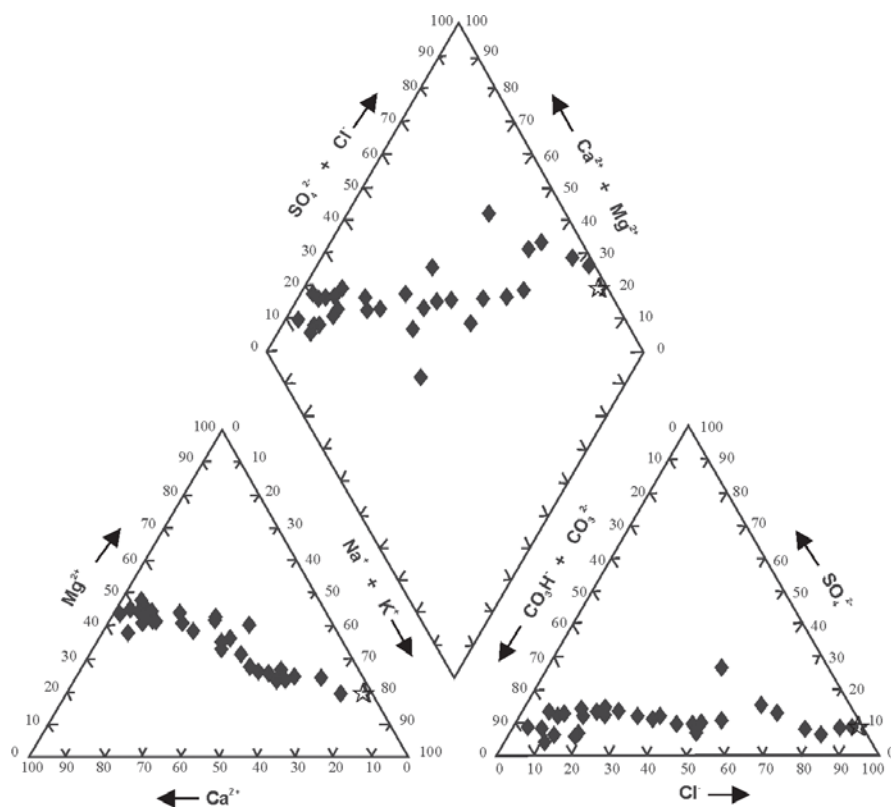


Fig. 2.- Diagrama Piper (☆: agua de mar).

Fig. 2.- Piper diagram (☆: seawater).

rama ascendente en el sentido de aumento del contenido en sulfatos. Tanto en el dominio de los aniones como en el de los cationes se observa claramente la existencia de unas alineaciones indicativas de procesos de mezclas de aguas sódicas con cálcico-magnésicas -en el dominio catiónico-, y cloruradas con bicarbonatadas y/o sulfatadas. El mar parece claro que es uno de los extremos de la mezcla, pero es visible la existencia de un enriquecimiento en sulfatos de origen diferente al mar. La distribución de los puntos dentro del diagrama del conjunto iónico pone de manifiesto la existencia de procesos más complejos: procesos de mezclas, procesos de intrusión y extrusión, y otros procesos modificadores.

Ante el propósito de conocer el funcionamiento del sistema carbonatado de Sierra de Gádor se diseña una red de control constituida por sondeos lo más alejados posible de la influencia de actividades antrópicas, que modifiquen el quimismo de las aguas en su medio natural (Fig. 3).

Las muestras salinizadas por un proceso de intrusión marina, sin la intervención de procesos modificadores, deben alinearse en torno a la línea que representa la mezcla entre el agua dulce y el agua de mar. La intervención de procesos que afecten al contenido de cationes provoca desplazamientos de las muestras en la vertical, respecto a esta mezcla. La figura 4a y b permite reconocer el enriquecimiento de Ca y Mg en todas las aguas,

respecto a la línea de mezcla agua dulce-agua de mar. El exceso aparente de calcio y magnesio hay que relacionarlo con la roca almacén, calizas y dolomías. El mayor distanciamiento respecto al calcio puede estar ligado a la disolución de la calcita que es más rápida que la de la dolomita (Plummer *et al.*, 1978), y a un aporte adicional condicionado por la disolución de yesos. El aumento de las concentraciones de magnesio con el cloruro indica una doble fuente de magnesio, la disolución de dolomita y la mezcla con agua marina.

Además de los procesos que acompañan a la salinización de las aguas como consecuencia de la interacción entre el agua salina y el terreno, las reacciones que se producen en el acuífero debido al desequilibrio entre la fase acuosa, que ha visto modificada su composición química, y la fase sólida, corresponden a procesos relacionados con la precipitación-disolución de carbonatos, intercambio iónico y aporte de sulfatos. Las concentraciones de sulfato y calcio están relacionadas sólo en unas pocas muestras (Fig. 5a). La relación Ca:SO<sub>4</sub> mayor que 1 indica que la disolución del yeso no es la reacción más influyente en la concentración de estos iones, sino la disolución de la roca almacén carbonatada. La distribución sobre la gráfica que representa la relación Mg+Ca:HCO<sub>3</sub> (Fig. 5b) muestra un claro alineamiento de un gran número de muestras sobre la relación 1:1, debido a la ya mencionada fuente doble: disolución de calizas y dolomías. Parece existir una tendencia en las muestras con mayor salinidad a sufrir un descenso en el contenido en bicarbonatos conforme aumenta su concentración en calcio+magnesio. Podría quedar de este modo marcada la tendencia a procesos de dedolomitización.

### Transferencia de Masas

Para calcular la transferencia de masas neta de los elementos químicos entre un agua inicial y un agua final a lo largo del camino del flujo hidrológico en el

Línea de flujo	Δ calcita	Δ dolomita	Δ yeso	C <sup>13</sup> (‰)	C <sup>14</sup> (%)
A	-0.492	0.247	0.090	-8.87	45.01
B	-1.125	0.650	0.217	-8.54	27.91
C	-0.809	0.539	0.358	-6.99	33.14
D	-2.192	0.858	0.974	-8.79	31.29
E	-1.759	1.247	0.583	-8.20	42.93

Tabla I.- Transferencia de masas. Los valores de transferencia de masa vienen dados en milimoles por kg de agua; el signo negativo indica precipitación.

Table I.- Mass transfer (in mmol/kg water; the negative symbol shows precipitation).

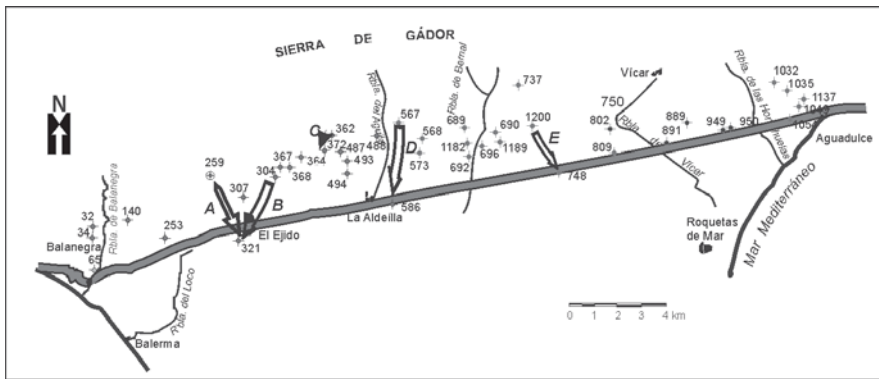


Fig. 3.- Situación de la red de control y líneas de flujo seleccionadas para el cálculo de transferencia de masas.

Fig. 3.- Location of the network and the selected flow paths in order to calculate the mass transfer.

Campo de Dalías hemos empleado PHREEQUE version 2.6.01., versión suministrada por el USGS (U.S. Geological Survey) que permite la ejecución de modelos inversos similares a los que se realizaban con el anterior programa NETPATH (Plummer *et al.*, 1991). Los cálculos que se realizan sirven para interpretar reacciones geoquímicas, proporciones de mezcla, evaporación y/o dilución de aguas, y transferencia de masa mineral en la evolución química e isotópica de las aguas en el medio.

El efecto cuantitativo de las reacciones que tienen lugar, es reflejado en el modelo de transferencia de masas de una fase a otra. Tal modelo evaluará la disolución de minerales y gases, la precipitación de minerales y la desgasificación. La transferencia de masa implicada de la calcita, dolomita y yeso viene dada por:

$$D \text{ calcita} = D \text{ Ca}^{2+} - D \text{ Mg}^{2+} - D \text{ SO}_4^{2-}$$

$$D \text{ dolomita} = D \text{ Mg}^{2+}$$

$$D \text{ yeso} = D \text{ SO}_4^{2-}$$

donde  $D \text{ Ca}^{2+}$ ,  $D \text{ Mg}^{2+}$  y  $D \text{ SO}_4^{2-}$  son las diferencias en las concentraciones totales (mmoles/l) del calcio, magnesio y sulfato

entre dos puntos distribuidos a lo largo de una línea de flujo a una cierta distancia.

Se han considerado 5 líneas de flujo hipotéticas seleccionando puntos de muestreo aguas abajo del área de recarga, para los cálculos de transferencia de masas (Fig. 3). Las limitaciones a la hora de seleccionar dichos puntos son grandes, ya que el régimen está influenciado por una intensa explotación, por niveles acuíferos superiores así como por el mar. Los elementos seleccionados fueron carbono, azufre, calcio, magnesio, sodio y cloruro, mientras entre las fases minerales se encontraban yeso, calcita, dolomita, así como el  $\text{CO}_2$  gas. Para las líneas de flujo B y C las cantidades transferidas de calcita, dolomita y yeso son bastante similares (Tabla I). La magnitud de las reacciones que suceden a lo largo de la línea de flujo D es mayor al resto de las líneas. El modelo del balance de masas indica que la disolución de dolomita y de yeso y la precipitación de calcita controla el contenido en calcio, magnesio y sulfato del agua subterránea, gradiente abajo a lo largo de la línea de flujo.

Los cálculos de transferencia de masas son combinados con el tiempo de flujo del agua (Tabla II), permitiendo determinar la velocidad aparente de disolución de los minerales. Esta velocidad representa un pri-

mer paso para obtener una información cinética sobre las reacciones agua-mineral a partir de los datos de campo. La velocidad de disolución de la dolomita es algo mayor que para el yeso. La disolución de la dolomita oscila desde  $3.24 \times 10^{-5}$  mmol/año/kg de agua hasta  $1.77 \times 10^{-4}$ ; el valor medio se sitúa alrededor de  $8.7 \times 10^{-5}$  mmol/año/kg de agua. La velocidad de disolución para el yeso se mantiene dentro de un mismo rango, variando entre  $1.18 \times 10^{-5}$  y  $7.9 \times 10^{-5}$  mmol/año/kg de agua. Respecto a la calcita, la velocidad de precipitación media está próxima a  $1.5 \times 10^{-4}$  mmol/año/kg de agua. Los resultados obtenidos permiten comprender mejor el sistema de flujo establecido en un acuífero carbonatado afectado por una intensa fracturación y compartimentación, donde las velocidades de reacción pueden ser muy diferentes de acuerdo con el sector en concreto en que nos encontremos.

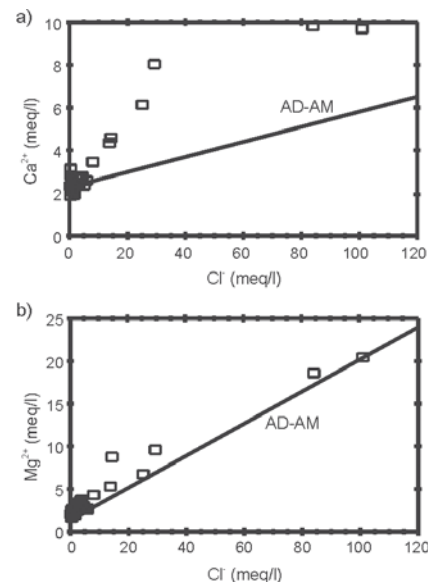


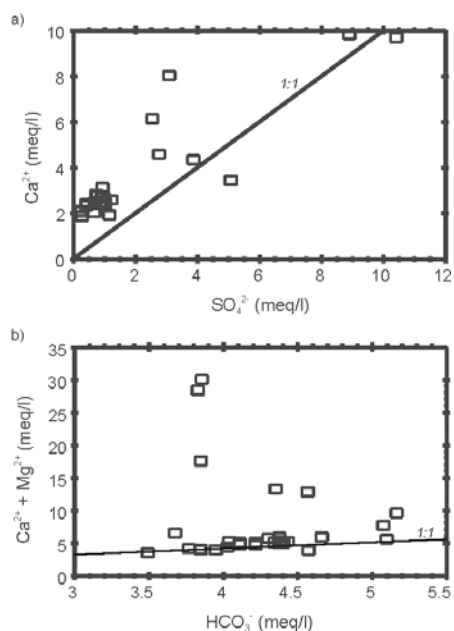
Fig. 4.- a) Relación entre cloruros y sulfatos (en meq/l), b) Relación entre cloruros y magnesio (en meq/l). FW-SW: línea de mezcla agua dulce-agua de mar.

Fig. 4.- a) Relationship Cl/SO<sub>4</sub> (in meq/l), b) Relationship Cl/Mg (in meq/l). FW-SW: Mixing line between fresh and seawater.

Velocidad aparente de reacción				
Línea de flujo	Tiempo* (años)	Dolomita mmol/kg agua/año	Yeso mmol/kg agua/año	Calcita mmol/kg agua/año
A	7622	$3.24 \times 10^{-5}$	$1.18 \times 10^{-5}$	$-6.45 \times 10^{-5}$
B	3671	$1.77 \times 10^{-4}$	$5.90 \times 10^{-5}$	$-3.06 \times 10^{-4}$
C	4511	$1.20 \times 10^{-4}$	$7.94 \times 10^{-5}$	$-1.79 \times 10^{-4}$
D	25683	$3.33 \times 10^{-5}$	$3.79 \times 10^{-5}$	$-8.53 \times 10^{-5}$
E	16838	$7.41 \times 10^{-5}$	$3.47 \times 10^{-5}$	$-1.04 \times 10^{-4}$

Tabla II.- Velocidad aparente de reacción. Tiempo\*: calculado a partir de los datos de la tabla 1. Los valores negativos indican precipitación.

Table II.- Apparent velocity of reaction. Time\*: calculated from data of table 1. The negative symbol shows precipitation.



**Fig. 5.- a) Relación entre sulfatos y calcio (en meq/l), b) Relación entre bicarbonatos y calcio+magnesio (en meq/l).**

**Fig. 5.- a) Relationship  $SO_4/Ca$  (in meq/l), b) Relationship  $HCO_3/Ca+Mg$  (in meq/l).**

El análisis de isótopos medioambientales ( $^{18}O$  y D) indica la presencia de las zonas de recarga con mayor velocidad de flujo, además no se observan variaciones estacionales lo que sugieren un tiempo de residencia del agua subterránea en el acuífero de varios años (Vallejos *et al.*, 1997). Sondeos con contenidos isotópicos ligeros (llega a medirse  $-9.45$  ‰ en  $^{18}O$ ) manifiestan la existencia de un área de recarga localizada a altitud elevada y un flujo rápido. Las edades con radiocarbono estimadas indican un tiempo de residencia en general elevado, aunque es posible detectar en algunos sectores la recarga actual, a partir del contenido en tritio (5.4 y 7.7 UT, en algunos sondeos), la infiltración del agua de lluvia o la intrusión del agua de mar.

### Consideraciones Finales

El análisis de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del borde meridional de la Sierra de Gádor ha permitido identificar diferentes procesos como disolución de NaCl, reacciones de precipitación-disolución de carbonatos, posibles reacciones de dedolomitización, aporte de sulfatos....

Según el modelo del balance de masas, la velocidad de precipitación de la calcita es mayor a la velocidad de disolución de la dolomita y el yeso, adquiriendo un valor medio de  $1.5 \times 10^{-4}$  mmol/año/kg de agua.

### Agradecimientos

El presente estudio se ha hecho en el marco del proyecto REN2002-04517-CO2-01/HID.

### Referencias

- Aldaya, F. (1969). *Los mantos alpujárri-des al sur de Sierra Nevada*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 527 p.
- Plummer, L.N., Presteman, E.C. y Parkhurst, D.L. (1991). *United States Geological Survey Water Resources Investigations*, 91-4078.
- Plummer, L.N., Wigley, T. y Parkhurst, D. (1978). *American Journal of Science*, 278, 179-216.
- Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W. y Calvache, M.L. (1997). *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 1157-1168.