

# Simulación Geoquímica de la Interacción Agua-Roca en el Acuífero de Cabo de Gata (SE de España)

/LINDA DANIELE (1,\*), ANGELA VALLEJOS (2), FERNANDO SOLA (2), MERCÈ CORBELLA (1), ANTONIO PULIDO BOSCH (2)

(1) Departament de Geologia Universitat Autònoma de Barcelona. Unitat de Cristal·lografia i Mineralogia. Edificis C. 08193, Bellaterra (Espanya)

(2) Departamento de Hidrogeología. Universidad Almería. 04120, Almería (Espanya)

## INTRODUCCIÓN.

En la última década la demanda de agua ha aumentado muchísimo en la zona costera del sureste español debido al desarrollo del turismo y al cultivo intensivo en invernaderos. Al ser ésta una zona con clima semiárido, existen problemas de distribución de la escasa agua superficial disponible. El futuro de la zona, por lo tanto, depende en gran parte de la extracción de agua subterránea y/o de plantas desaladoras. El estudio de la relación agua de mar-agua dulce adquiere gran importancia en estos contextos ya que pueden darse procesos fisicoquímicos complejos, que afectan a la mezcla y complican la gestión de las aguas subterráneas. El análisis de 15 muestras de este acuífero revela procesos complejos que indican la presencia de distintos grupos de aguas.

Los materiales que conforman el acuífero de Cabo de Gata, de unos 80 m de espesor, en el entorno de la planta desaladora son sedimentos detríticos cuaternarios (arenas y gravas, limos y arcillas) depositados en la zona de transición marino-terrestre. En esta zona dos grupos de fracturas, unas paralelas a la costa y otras perpendiculares, afectan la geología, siendo la principal de ellas la falla de Carboneras (Sola et al. 2008).

La composición química de las aguas de este acuífero costero puede estar originada por otros procesos a parte de la mezcla con agua de mar (Daniele et al., 2010) y éste es el objetivo del presente trabajo: caracterizar el acuífero del Cabo de Gata e identificar los procesos responsables de la composición química de sus aguas.

## METODOLOGÍA.

Se realizó el muestreo de los 'clusters' y

sondeos de las aguas subterráneas de la zona de estudio en Mayo de 2008. La muestra de agua marina se tomó cerca de la costa en la misma zona. Los 'clusters' consisten en tres piezómetros con diferente profundidad situados entre la costa y la planta desaladora. Se determinaron *in situ* temperatura, conductividad eléctrica, bicarbonatos y pH de las muestras, y se recogieron duplicados de las aguas filtradas con un filtro Millipore de 0.45µm, que se almacenaron en botellas de polietileno a 4 °C. Se analizaron elementos mayoritarios, minoritarios y trazas en el laboratorio ACME (Vancouver, Canadá) con ICP-MS.

La proporción de agua marina en las muestras se calculó siguiendo el método de Fidelibus et al. (1993) calculando el factor de salinidad. En él se asume que el cloro es un elemento conservativo en la mezcla.

El simulador geoquímico Phreeqc con la base de datos PRHEEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) se utilizó para los siguientes cálculos: (1) índices de saturación (SI) de las muestras de agua respecto a diferentes minerales; (2) composición de agua marina evaporada en diferentes grados; (3) composición de mezclas entre agua marina y subterránea, y (4) procesos de precipitación y disolución de varios minerales con diferentes aguas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### Composición de Elementos Mayores.

Los resultados analíticos muestran cierta diversidad de composiciones. La conductividad eléctrica de las muestras varía entre 7.5 mS/cm y 62.7 mS/cm en función de la profundidad. Estos datos indican la alta salinidad de las aguas del acuífero, lo que sugiere una gran influencia marina y algunos otros

procesos, al superar ampliamente la salinidad "normal" del agua de mar. El rango de las temperaturas obtenidas es 21.1-23.5 °C, y el pH es 7.2-7.4. La conductividad eléctrica, temperatura y pH del agua marina analizada son 57.5 mS/cm, 15.3 °C y 8.3, respectivamente. La concentración de Cl varía entre 2344 y 23705 ppm; la de Na, entre 1302 y 14984 ppm; la de Ca, entre 180 y 752 ppm; la de Mg, entre 189 y 1613 ppm y la de S, entre 342 y 1276 ppm.

Se pueden distinguir dos grupos de aguas subterráneas a partir de sus composiciones químicas: las que tienen salinidades y concentraciones inferiores a la marina tanto de sulfato como de calcio (G1) y las que muestran concentraciones parecidas o superiores a la marina de estos componentes (G2). Las concentraciones de S y Na de las muestras G1 parecen estar correlacionadas con las de Cl (Fig. 1). Esta relación puede explicarse mediante la mezcla entre un agua marina y un agua dulce. La relación entre las concentraciones de Ca y Mg respecto al Cl (Fig. 1) sugiere que, además de mezcla de aguas, otros procesos deben influir en su composición química como por ejemplo el intercambio catiónico. Igualmente, es probable que los procesos que han afectado la composición de las aguas G1 y G2 sean diferentes.

### Cálculo de Índices de Saturación.

Los SI calculados para cada una de las muestras respecto a minerales comunes en acuíferos detríticos costeros indican que todas las aguas subterráneas están subsaturadas respecto a anhidrita, calcita, yeso o halita, así como a muchos otros minerales. El agua de mar, en cambio, está saturada respecto a calcita y también a dolomita. Asimismo, hay dos muestras de agua que están saturadas respecto a

**palabras clave:** Acuífero, Mezcla, Simulación Geoquímica, Disolución.

**key words:** Aquifer, Mixing, Geochemical Simulation, Dissolution.

dolomita, mientras la mayoría está subsaturada respecto a este mineral.

### **Cálculo de Proporción de Mezcla.**

A partir de la concentración en Cl<sup>-</sup> de las muestras se calculó el porcentaje de agua marina en cada una. Para estos cálculos se asumió que las aguas eran fruto de una mezcla de agua marina y agua dulce, por lo que toda la salinidad provenía del componente marino.

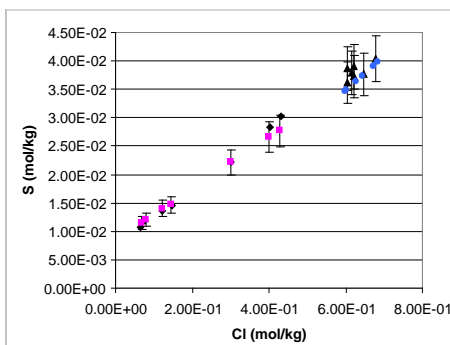
De acuerdo con estos cálculos, se observó que las muestras G1 contenían cantidades variables de agua marina, e inferiores al 70%, pero que las G2 contenían proporciones superiores al 100%. Esto sugiere que deben haber sufrido algún proceso de evaporación o concentración del agua marina, aunque no puede descartarse la mezcla con alguna salmuera.

Con las proporciones de agua marina en cada muestra G1 se calcularon las composiciones químicas de las aguas mezcla. Éstas difieren de las medidas en el acuífero, por lo que un proceso de mezcla simple entre agua dulce y marina no es el único proceso sufrido por las aguas tipo G1.

### **Simulación de Evaporación de Agua Marina.**

Utilizando el programa Phreeqc se calcularon las composiciones finales de aguas, mezclando: a) agua de mar con agua dulce, b) agua de mar, con distintos porcentajes de evaporación, con agua dulce, c) agua de mar con agua dulce modificada. Se obtuvieron unas aguas parecidas a las del tipo G2 con la simulación b y a las del tipo G1 con la simulación c.

### **Modelos de Precipitación y Disolución de Minerales.**



◆ G1 ▲ G2 ■ G1\_PHREEQC ● G2\_PHREEQC

Se examinaron diferentes escenarios de interacción agua-roca en el acuífero del Cabo de Gata para intentar reproducir las composiciones de las aguas G1 y deducir los procesos adicionales a la mezcla que habían sufrido. Se consideró que los minerales susceptibles de cambiar la concentración de sulfato, calcio y magnesio en un acuífero costero debían ser calcita, dolomita y/o yeso. Así, se simularon varias posibilidades de equilibrio de un agua dulce con algunos de estos minerales. Se probaron también diferentes posibilidades de disolución y/o precipitación de ellos sin que el agua dulce llegara a equilibrarse con ellos.

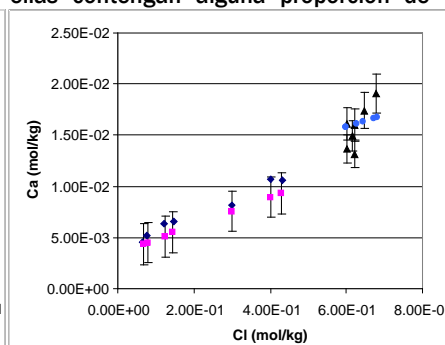
El caso que mejor reproduce la composición final de las aguas muestreadas es aquella en que un agua dulce disuelve yeso y muy poca dolomita, provocando la precipitación de calcita, quedando subsaturada respecto a todos estos minerales, y posteriormente se mezcla con agua marina (Fig. 1).

El resultado de las simulaciones no cambia significativamente si se produce primero la mezcla de aguas que la interacción con los minerales.

Los modelos de precipitación y disolución de minerales a partir de un agua de mar evaporada denotan que la interacción agua-roca, utilizando las mismas cantidades de mineral que en las simulaciones anteriores, no es un proceso que altere en su composición final.

### **CONCLUSIONES.**

Los análisis de las aguas subterráneas del acuífero del Cabo de Gata muestran composiciones diversas que no corresponden ni al agua dulce ni al agua de mar, aunque probablemente todas ellas contengan alguna proporción de



las dos. Se pueden distinguir dos grupos composicionales, uno con salinidades intermedias entre las de agua marina y dulce, y otro con salinidades generalmente superiores a la marina.

El acuífero de Cabo de Gata debe haber sufrido más de un proceso de cambio químico, puesto que las composiciones de todas estas aguas no pueden explicarse por simple mezcla de aguas.

Una mezcla entre agua marina y agua dulce explicaría las relaciones Na-Cl y SO<sub>4</sub>-Cl del primer grupo de aguas. Pero la reproducción de las relaciones Ca-Cl y Mg-Cl mediante modelización geoquímica sugiere que estas aguas subterráneas han sido sometidas a complejos procesos (mezcla con agua marina, disolución de anhidrita y/o dolomita, en menor grado, precipitación de calcita....)

El segundo grupo de aguas, en cambio, puede justificarse, a partir de las simulaciones realizadas, mediante diferentes grados de evaporación y concentración a partir de agua de mar.

La composición de las aguas de este acuífero costero, por lo tanto, además de procesos de intrusión marina reflejan también procesos de interacción agua-roca.

### **AGRADECIMIENTOS.**

Este estudio se encuadra dentro del proyecto CGL2007-63450/HID del MICINN. Las simulaciones geoquímicas se han realizado en la UAB, universidad que financia el contrato de la primera autora como investigadora postdoctoral.

### **REFERENCIAS.**

- Daniele, L. et al. (2010): *Coastal aquifers and desalination Plants: some interpretation to new situations*. BALWOIS Ohrid, Republic of Macedonia pag.25.
- Fidelibus, M.D. (2003): *Environmental tracing in coastal aquifers: old problems and new solutions*. In: *Coastal Aquifers Intrusion Technology: Mediterranean Countries*, vol. II. Publ. IGME, Madrid, pp. 79-111.
- Parkhurst, D.L. & Appelo, C.A.J. (1999): *User's guide to PHREEQC (version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 p.*
- Sola Gómez F. et al. (2008): *Integración de datos litológicos, hidrogeológicos y geofísicos para el estudio del acuífero detrítico costero de Cabo De Gata (Almería, SE, España)*. *Geotemas* **10**, 829-832.

**fig. 1.** Comparación de la composición de las aguas muestreadas y las calculadas a partir de un agua dulce que disuelve yeso y dolomita, precipita calcita y se mezcla con agua marina.