

# Evolución hidrogeoquímica en las salinas de Cerrillos (Almería) y la relación entre aguas subterráneas y salmueras

*Hydrogeochemical processes in the Cerillos saltworks (Almería) and relationship between groundwater and brines*

F. Sánchez Martos, L. Molina Sánchez y A. Vallejos Izquierdo

Dpto. de Hidrogeología, Universidad de Almería. 04120 ALMERÍA

## ABSTRACT

The saltworks of Cerrillos are located in the sea coast. The origin of these waters is essentially marine, but the influence of the groundwater discharge could be significant. The chemical diversity of the water increases by the location of small lakes of human origin developed by mining extraction of gravel in the zone between the salt ponds and the sea coast. These lakes show low salinity sometimes less than salt ponds. Their origin and special hydrochemistry could be related to the direct rain recharge over these endorreic basins and the deep groundwater recharge through the faults affecting the aquifer.

**Key words:** Brines, saltworks, evaporites, wetlands.

*Geogaceta*, 29 (2001), 119-122  
ISSN: 0213683X

## Introducción

Las salinas de Cerrillos se sitúan en el borde costero del Campo de Dalías (Almería). Los materiales geológicos aflorantes en su entorno corresponden con una potente serie margosa recubierta por depósitos regresivos, margas arenosas, arenas y calcarenitas. Los depósitos cuaternarios marinos constan de cuatro niveles marinos Tirrenienses de litología semejante. Se extienden en una banda paralela a la costa a 10-20 m sobre el nivel del mar y condicionan en su mayor parte la morfología actual de la zona. (Fourniget, 1975; Ovejero y Zazo, 1971). En la zona costera existen otros depósitos cuaternarios, de naturaleza limosa, ligados a la dinámica litoral reciente: salinas, lagunas, marismas. Estos materiales ocupan las zonas bajas donde se asientan las salinas que están separadas del mar por playas de acumulación y dunas, algunas relativamente estabilizadas (Esterlech y Trilla, 1980).

En este trabajo se analizan las características físico químicas de las aguas superficiales de las salinas y de las dos áreas cercanas: el mar y las aguas subterráneas del acuífero de Balerna-Las Marinas, cuyos materiales limitan la zona en su extremo septentrional (Pulido Bosch, *et al.*, 1991). A partir de la caracterización química de las aguas y mediante el estudio de una serie de relaciones iónicas se pretenden identificar los procesos hidrogeoquímicos que controlan la diversidad química de las aguas y la posible interrelación entre los diferentes sectores.

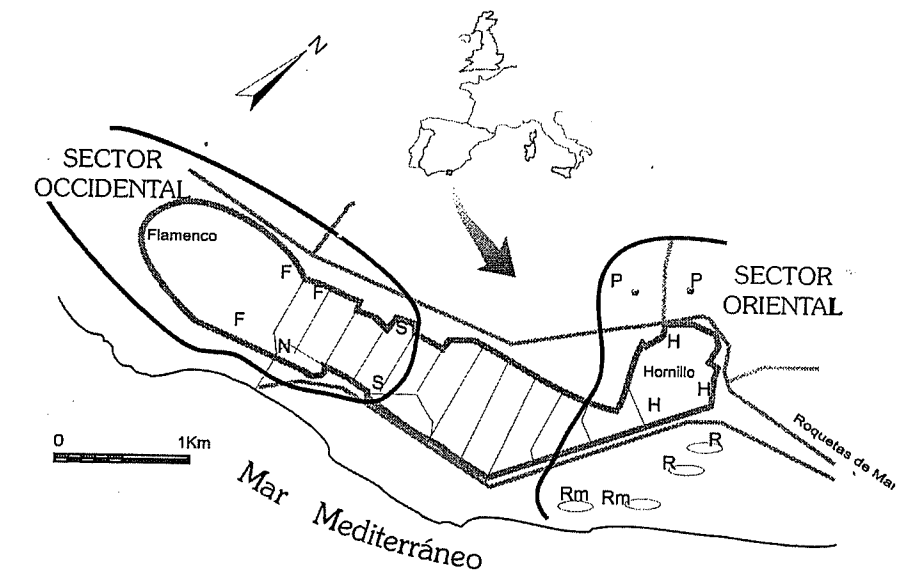


Fig. 1.- Situación de los puntos de muestreo de aguas subterráneas (P), aguas superficiales en las Salinas (F, N, S, H) y en los charcas originadas tras la restauración de las extracciones de arena (R y Rm).

Fig. 1.- Location of groundwater sampling points (P), surface waters in the saltworks (F, N, S, H) and in the ponds restored following sand extraction (R and Rm).

drogeoquímicos que controlan la diversidad química de las aguas y la posible interrelación entre los diferentes sectores.

Pare ello se diseñó una red de control que consta de 13 puntos en aguas superficiales, a lo largo de las diferentes salinas, junto a 2 puntos de muestreo de aguas subterráneas en el acuífero de Balerna-Las Marinas, sobre los que se han efectuado cuatro muestreos en un ciclo anual.

La temperatura, conductividad eléctrica y pH se han determinado en el campo, analizándose en el laboratorio los siguientes parámetros: Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> Br y Total de Sólidos Disueltos.

## Resultados

De acuerdo con el resultados químicos se han diferencia dos sectores, el oc-

	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	TDS
<b>Flamenco (F)</b>										
Media	63505	8998	222	175	35790	2908	1035	1142	595	118785
Desv. Est.	9565	1733	18	115	4909	1386	257	698	348	28867
<b>Noria (N)</b>										
Media	27447	3927	190	108	15606	1268	368	507	125	49326
Desv. Est.	2898	73	12	73	939	862	130	161		4754
<b>Salinas Secas (S)</b>										
Media	101466	8954	210	52	56614	3224	663	3007	568	174087
Desv. Est.	13974	1718	11	53	4297	2332	169	346	33	18959

Tabla 1.- Resumen estadístico de los datos en las aguas superficiales del Sector Occidental (mg·L<sup>-1</sup>).

Table 1.- Summary statistical data of the water in the Western sector (mg·L<sup>-1</sup>).

	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	TDS
<b>Hornillo (H)</b>										
Media	16254	5577	273	56	9582	1090	763	404	43	33916
Desv. Est.	2649	739	284	50	1018	574	190	106	19	4714
<b>Restauración (R)</b>										
Media	2977	633	316	6	1546	257	147	73	9.8	5796
Desv. Est.	288	52	91	2	208	110	48	13	6.2	343
<b>Restauración mar (Rm)</b>										
Media	27641	5755	195	107	16575	1259	538	673	103	52647
Desv. Est.	2276	1208	23	63	1192	277	149	161		4280
<b>Mar</b>										
	20250	2832	148	0	10806	1378	503	419	67	36261

Tabla 2.- Resumen estadístico de los datos en las aguas superficiales del Sector Oriental y el agua de mar (mg·L<sup>-1</sup>).

Table 2.- Summary statistical data of the water in the Eastern sector and the seawater (mg·L<sup>-1</sup>).

	P	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	TDS
Media	1240	306	327	94	793	93	88	40	3.5	40		2826
Desv. Est.	346	56	56	55	212	38	28	10		10		511

Tabla 3.- Resultados estadísticos de las aguas subterráneas (mg·L<sup>-1</sup>).

Table 3.- Summary statistical data of the groundwater (mg·L<sup>-1</sup>).

cidental y el oriental (figura 1). En el sector occidental (tabla 1) se han definido tres grupos con características diferentes y se han identificado de acuerdo con la toponimia local. Las aguas del grupo *noria* (N), presentan la salinidad más baja del sector occidental (50.000 – 70.000 μS·cm<sup>-1</sup>); el grupo *flamenco* (F) posee valores intermedios y el grupo *salinas secas* (S), que presenta aguas estacionalmente, alcanza la conductividad más elevada (170.000-300.000 μS·cm<sup>-1</sup>). En el sector oriental (tabla 2) se han definido tres grupos. El *hornillo* (H), cuyas aguas tienen menor conductividad que las zonas

anteriores (30.000-50.000 μS·cm<sup>-1</sup>). Las lagunas desarrolladas a partir de las extracciones de arena, denominado *restauración* presenta una gran variabilidad química y su salinidad aumenta con la proximidad al mar, por lo que se han diferenciado dos grupos R y Rm. La salinidad de las aguas subterráneas (P) es la más baja del área y su conductividad eléctrica oscila entre 4000 y 5000 μS·cm<sup>-1</sup> (tabla 3).

**Discusión**

Mediante los diagramas de Schoeller-Berkaloff (figura 2) se muestra la similitud

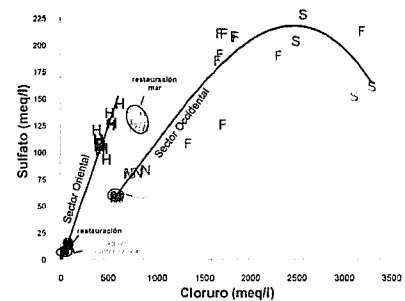


Fig. 2.- Diagrama de Schoeller-Berkaloff que representa los valores medios de cada uno de los sectores definidos comparándolos con el mar. A: aguas menos salinas (H: Hornillo; R: charcas de restauración próximas al Charcón del Hornillo; RM: charcas de restauración próximas al mar). B: aguas más salinas (F: flamenco; N: noria; S: salinas secas).

Fig. 2.- Schoeller-Berkaloff diagram showing the average values of each of the sectors defined compared to seawater. A: Less saline waters (H: Hornillo; R: restored ponds close to Hornillo lagoon; Rm: restored ponds close to the sea). B: More saline waters (F: Flamenco; N: Noria; S: Salinas Secas).

entre todas las aguas del sector oriental. Solamente la relación SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en las aguas menos salinas es más baja, puesto que en las aguas subterráneas (P) y en la zona denominado restauración (R) las concentraciones de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> son más altas. La relación Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup> y Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> es más baja en el *hornillo* (H) al aumentar el contenido en Ca<sup>2+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> con respecto a Mg<sup>2+</sup> y Cl<sup>-</sup>. Este aumento se asocia a la disolución de sales evaporíticas depositadas en el charcón del Hornillo, ya que fue utilizado hasta 1948 como evaporador y debe tener en su base un alto contenido en sales sulfatadas. El descenso de Mg<sup>2+</sup> con respecto a los otros puntos de alta salinidad, puede asociarse a la precipitación de dolomita.

En el sector occidental el grupo más salino, *salinas secas* (S), presenta un modelo ligeramente diferente al resto puesto que las relaciones Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup> son mayores. El aumento de los contenidos en Cl<sup>-</sup> y Mg<sup>2+</sup> se debe a la disolución de las sales cloruradas, puesto que durante los meses de verano se alcanza el ciclo de evaporación completo, y precipitan sales tipo SO<sub>4</sub>Mg o Cl<sub>2</sub>Mg, ricas en iones Cl<sup>-</sup> y Mg<sup>2+</sup>, con alta solubilidad (Dronkert, 1985). Estas sales, más solubles, se disuelven en los ciclos húmedos, sin que se produzca una nueva disolución de las sales sulfatadas, por tanto se aportan mayoritariamente iones Mg<sup>2+</sup> y Cl<sup>-</sup> a la salmuera final.

La distribución relativa entre  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  (figura 3) presenta el modelo de enriquecimiento salino de las aguas puesto que el  $\text{Cl}^-$  tiene un comportamiento conservativo en las primeras fases de la evaporación. Los puntos están dispersos ya que la mineralización de las aguas no sólo está influenciada por la concentración salina ligada a la evaporación directa del agua de mar. Esto hace posible la separación de dos líneas que se ajustan con los dos sectores occidental y oriental. El Sector occidental presenta la evolución Mar  $\rightarrow$  Noria  $\rightarrow$  Flamenca  $\rightarrow$  Salinas secas (M  $\rightarrow$  N  $\rightarrow$  F  $\rightarrow$  S). El Sector oriental muestra la evolución Aguas Subterráneas  $\rightarrow$  Restauración  $\rightarrow$  Hornillo (P  $\rightarrow$  R  $\rightarrow$  H). La disposición curva de los puntos en el sector occidental (figura 3), cuyos valores máximos no superan los 2000 meq/l de  $\text{SO}_4^{2-}$ , se debe a la precipitación de yeso en el *charcón del Flamenca* (F) y las *salinas secas* (S), lo que determina que se establezca la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en la salmuera (Appelo y Postma, 1994). Además los puntos con mayor contenido en  $\text{Cl}^-$  y menor contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  corresponden al verano, cuando la evaporación es completa, y puede producirse la precipitación del yeso.

La disposición de las aguas menos salinas del sector oriental es diferente a la evolución del sector occidental y su relación  $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$  es mayor. En el *charcón del Hornillo* la concentración en  $\text{SO}_4^{2-}$  duplica la que posee el mar, mientras que el contenido en  $\text{Cl}^-$  es algo inferior; por lo que debe existir un aporte de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Este incremento en  $\text{SO}_4^{2-}$  en el *charcón del Hornillo* se relaciona con la disolución de sales sulfatadas, lo que implica un aumento de  $\text{Ca}^{2+}$  con respecto a la tendencia general, considerando exclusivamente la evaporación a partir de agua de mar. La relación  $\text{Ca}^{2+} / \text{Cl}^-$  en las aguas del *charcón del Hornillo* presentan valores más altos que el resto de puntos (Sánchez y Molina, 1997). Las lagunas desarrolladas a partir de las extracciones de arena, denominadas *restauración* presentan la mayor variabilidad química y se han definido dos zonas. La más alejada del mar (R) tiene una salinidad relativamente baja, y los contenidos son cercanos a las aguas subterráneas. La naturaleza de los materiales utilizados en el relleno de estas charcas, calcarenitas pliocenas, y la posible alimentación subterránea, son dos factores que pueden condicionar esta situación. Las lagunas más cercanas al mar (Rm) se disponen en una posición más cercana a la curva que se ajusta al área occidental, si bien las concentraciones en  $\text{SO}_4^{2-}$  son más elevados que el agua de mar (tablas 2

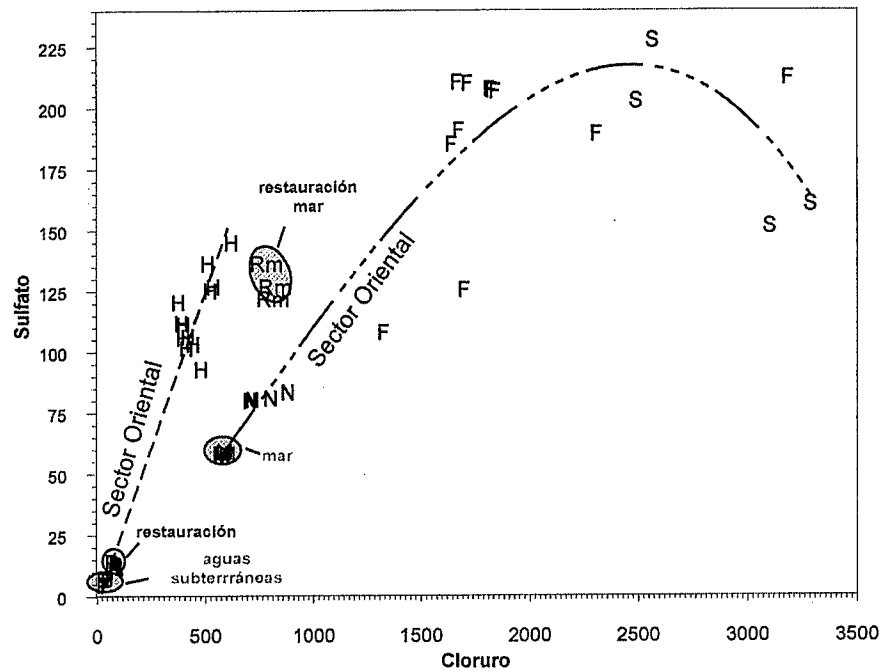


Fig. 3.-Relación  $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$  (meq·L<sup>-1</sup>). Los símbolos corresponden a los grupos definidos anteriormente.

Fig. 3. Relationship chloride versus sulphate (meq·L<sup>-1</sup>). The symbols correspond the the groups defined previously.

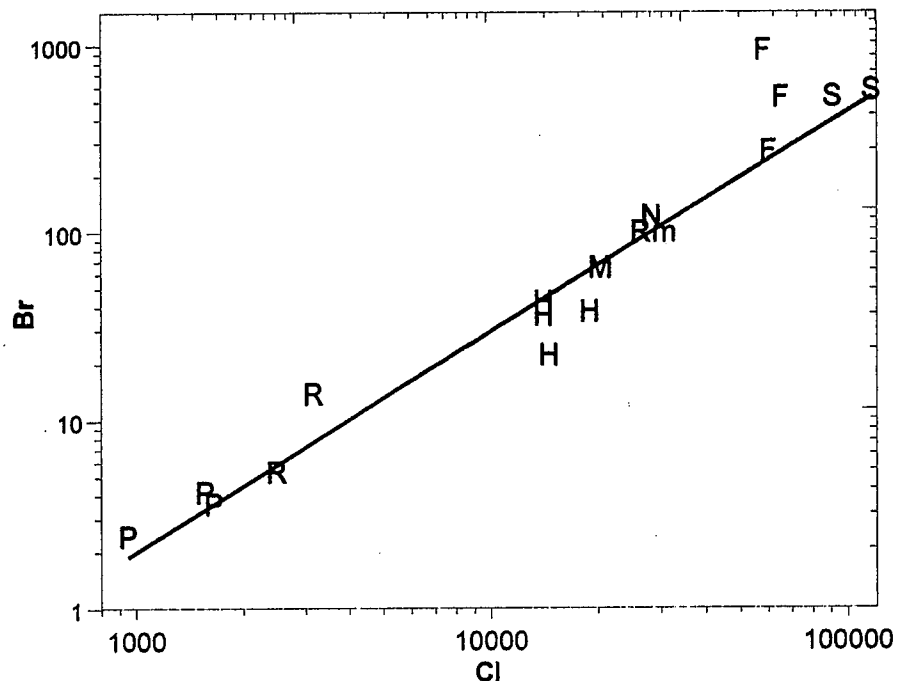


Fig. 4.- Relación  $\text{Cl}^- / \text{Br}^-$  (ppm). Los símbolos corresponden a los grupos definidos anteriormente.

Fig. 4.- Relationship  $\text{Cl}^-$  versus  $\text{Br}^-$  (ppm). The symbols correspond the the groups defined previously.

y 3).

La relación entre  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Br}^-$ , (figura 4) muestran el buen ajuste que tienen estas dos variables ( $r^2 = 0.82$ ), como consecuencia de su origen marino. No obstante, su diferente afinidad en el proceso de

evaporación del agua de mar ha permitido que se hayan utilizado ampliamente para estudiar el proceso de evaporación y salinización de las aguas, especialmente analizando la variación de la relación  $\text{Cl}^- / \text{Br}^-$  con respecto al  $\text{Cl}^-$ , (Whittemore 1995

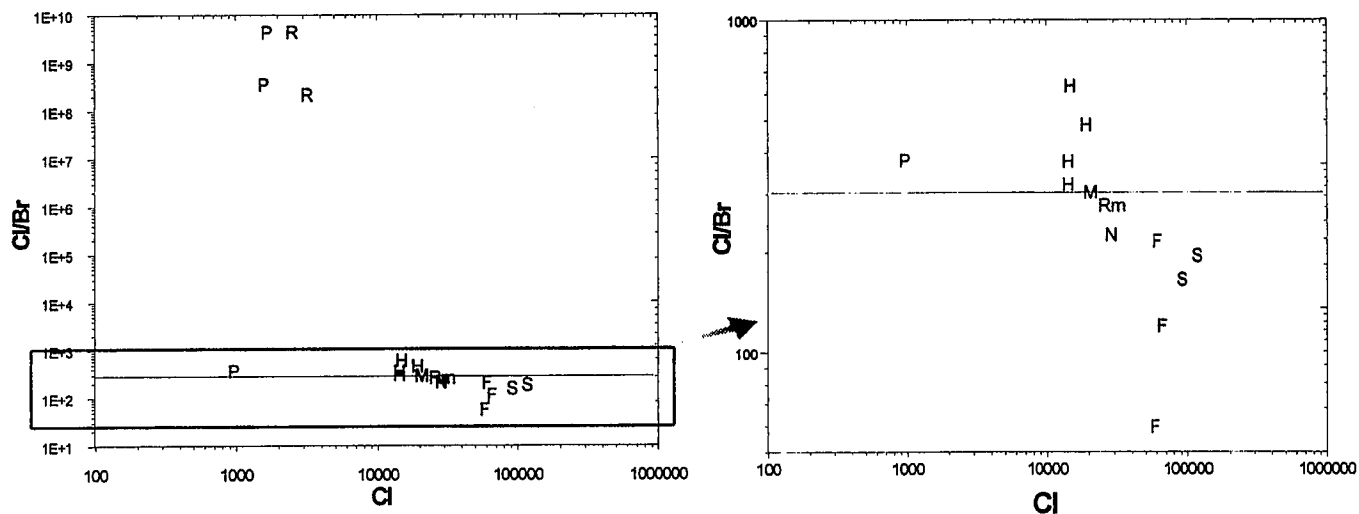


Fig. 5.- B) Relación Cl/Br<sup>-</sup> con respecto al Cl<sup>-</sup> (ppm). Los símbolos corresponden a los grupos definidos anteriormente.

Fig. 5.- Relationship Cl/Br<sup>-</sup> versus Cl<sup>-</sup> (ppm). The symbols correspond to the groups defined previously.

y Davis *et al.* 1998). La figura 5 presenta la gran variabilidad de valores que toma esta relación para las aguas estudiadas. Las aguas subterráneas (P) y las charcas de restauración (R) alcanzan los valores más altos de la relación Cl/Br; En el resto de puntos los valores de esta relación son más bajos y están muy cercanos al agua de mar. Por tanto la salinización que presenta las aguas en estos dos sectores (P y R) está afectada por una serie de procesos diferentes, que implican un aumento del contenido en Cl<sup>-</sup> sobre el Br<sup>-</sup>. En este sentido debe considerarse que en el entorno de las *salinas de Cerrillos* afloran terrazas marinas cuaternarias, que pueden tener materiales salinos de origen marino, con presencia de halita. En las aguas afectadas por disolución de halita se eleva la relación Cl/Br; ya que durante el proceso de evaporación el Br<sup>-</sup> queda en la salmuera residual y no se incorpora a los cristales de la halita (Sonnelfeld, 1984). Además los puntos muestreados correspondientes a las aguas subterráneas están muy próximos a zonas urbanas, por lo que pueden afectarse por procesos de contaminación antrópica, ya que presentan altos contenidos en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ver tabla 3), lo que también eleva la relación Cl/Br (Vengosh y Pankratov, 1998). En el resto de puntos, la relación Cl/Br presenta valores cercanos al agua de mar. Solamente el agua del *charcón del Hornillo* alcanza valores algo más elevados, probablemente asociados con la di-

solución de sales presentes en el sustrato. También puede jugar un papel importante la alimentación subterránea desde el acuífero, cuyas aguas tienen una relación Cl/Br más alta. En el sector occidental (S) se alcanza una elevada tasa de evaporación, con lo que se aumenta la concentración de Br<sup>-</sup> en la salmuera residual y la relación Cl/Br alcanza valores más bajos que el agua de mar, que constituye su principal alimentación.

#### Consideraciones finales

Mediante el uso de una metodología hidrogeoquímica se han identificado los procesos que condicionan la diversidad de aguas existentes en las salinas de Cerrillos. La salinidad de las aguas está relacionada con la diferentes sales presentes en el sustrato de cada una de las charcas y la diferente área de recarga; mayoritariamente de origen marino, pero con influencia subterránea en el *charcón del Hornillo*. Las charcas desarrolladas a partir de las extracciones de áridos presentan una situación más compleja. Su menor salinidad se relaciona con las calcarenitas pliocenas que se han utilizado en el relleno de las extracciones de arenas y la recarga directa a partir de la lluvia. También debe jugar un papel importante la alimentación, en profundidad, desde los materiales acuíferos, dada la similitud química entre las aguas de estas charcas y las aguas subterráneas.

#### Agradecimientos

Este trabajo se ha elaborado en el marco del proyecto HID 99-0597-CO2-02.

#### Referencias

- Appelo, C.A.J. y Postma, D. (1994): *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema ed. 536 p.
- Davis, S.N.; Whittemore, D.O. y Fábrika-Martin, J. (1998): *Ground Water* 36 (2), 338-350
- Dronkert, H. (1985): *GUA papers of geology*, Series 1, 24, 124 - 145
- Estelrich, J. Y Trilla F. (1980): *Proc. I Reunión Nacional Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, 237-246.
- Fourniguet, J. (1975): *Tesis Doctoral Univ. Orleans*. 234 p.
- Sánchez Martos, F. y Molina Sánchez, L. (1997): *IV SIAGA*. Vol III, 453-462
- Ovejero, G. y Zazo, C. (1971): *Quaternaria*, XV, 145-159.
- Pulido Bosch, A., Navarrete, F., Molina, L., Y Martínez Vidal, J.L. (1991): *Wat. Sci. Tech.*, 24 (11), 87-96.
- Sonnelfeld, (1984): *Brines and evaporites*. Academic Press. 613 pag.
- Vengosh, A. y Pankratov, I. (1998): *Ground Water* Vol. 36 (5), 815-824
- Whittemore, D.O (1995): *Environmental Geosciences*, 2 (1), 15-31