

# Rasgos hidrogeoquímicos de las aguas termales en los acuíferos carbonatados del Bajo Andarax (Almería)

*Hydrogeochemical characteristics of thermal waters in the carbonated aquifers of Bajo Andarax (Almería)*

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

Dpto. Hidrogeología y Química Analítica. Universidad de Almería.  
Campus Universitario 04120 Almería. España.

## ABSTRACT

*The carbonate aquifers of the Lower Andarax is a significant geothermal anomaly, as evidenced by the high temperature of the spring waters (22 - 40 °C). The most saline waters (2000 - 3000 mg.L<sup>-1</sup>) correspond to the Deep Aquifer, which presents a sodium chloride sulphate facies, while the least saline (500 mg.L<sup>-1</sup>), with a magnesium calcite bicarbonate type, are found in some sectors of the Carbonate Aquifer. The sectors of the Carbonate Aquifer having less saline waters and which are directly associated with more rapid flows can thus be identified. In the Deep Aquifer, the situation is more complex, as the intense thermal anomaly of the area acts in conjunction with the influence of evaporitic materials and a long residence time of the groundwater, factors which tend to produce the high concentrations of boron and lithium.*

**Key words:** Hydrogeochemistry, Boron, Lithium, Thermal Waters

Geogaceta, 35 (2004), 171-174  
ISSN:0213683X

## Introducción

La cuenca Baja del río Andarax corresponde a un valle rodeado por las Sierras de Gádor y Alhamilla. En Sierra de Gádor aflora fundamentalmente una formación carbonatada alpujárride de elevada porosidad por fisuración y/o karstificación. Los depósitos de relleno de la depresión presentan una estratigrafía compleja con grandes cambios de facies. De acuerdo con esta distribución de materiales se han definido tres unidades acuíferas (Pulido Bosch et al. 1992; Sánchez Martos, 1997): El acuífero detrítico, que se extiende en el sector central del valle e incluye a los sedimentos detríticos cuaternarios y plio-cuaternarios. El acuífero carbonatado de Sierra de Gádor, que está básicamente integrado por materiales calizo-dolomíticos. El acuífero profundo se detectó mediante sondeos en el centro del valle, su litología es calizo-dolomítica con algunos niveles de cuarcitas y está confinado bajo los materiales miocenos de relleno de la depresión (figura 1). Este trabajo se centra exclusivamente en los dos acuíferos de litología carbonatada, que se encuentran muy próximos y presentan diferencias hidrogeológicas significativas. A partir de los datos hidrogeoquímicos y utilizando fundamental-

mente el B y Li se discuten los procesos que condicionan la salinidad de sus aguas.

## Rasgos hidrogeoquímicos

El acuífero carbonatado posee las aguas menos salinas del área y su conductividad alcanza una gran amplitud de valores (570  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  - 3250  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). La temperatura media de las aguas es elevada (25 °C) alcanzando máximos de 40 °C. Considerando estos parámetros se han separado las aguas en dos grupos: área de Alhama y borde occidental. En el área de Alhama se encuentran las aguas menos salinas; su facies es bicarbonatada cálcico-magnésica y su temperatura (40 °C) es la más elevada del acuífero. En el borde occidental de la Sierra de Gádor la temperatura de las aguas es más baja (22.5 °C - 29 °C) y poseen facies mixta, si bien las aguas con más salinidad tienen facies sulfatada cálcica. En el conjunto del acuífero las concentraciones en Li son bajas (< 1 mg·L<sup>-1</sup>) y los contenidos en B son algo mayores, pero inferiores a 2.5 mg·L<sup>-1</sup> (figura 2 y tabla I)

En el acuífero profundo la conductividad oscila entre 2650  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y 3780  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y la temperatura media de sus aguas es 29.7 °C. Entre los iones destaca el SO<sub>4</sub>, que alcanza valores máximos de 1100 mg·L<sup>-1</sup>. La facies predominante es

mixta, mayoritariamente sulfatada-clorurada y cloro-sulfatada sódica. Los contenidos en B y Li son más elevados que los que se alcanzan en el acuífero carbonatado (1.8 mg·L<sup>-1</sup> < B < 7.2 mg·L<sup>-1</sup>; 1.5 mg·L<sup>-1</sup> < Li < 3 mg·L<sup>-1</sup>).

## Discusión

La salinidad total de las aguas subterráneas de estos acuíferos carbonatados está condicionada fundamentalmente por los iones Cl y SO<sub>4</sub> y la representación de todos los puntos considerando solamente estos dos parámetros muestra una amplia dispersión (figura 3). Especialmente en el acuífero carbonatado donde algunos puntos poseen elevados contenidos en SO<sub>4</sub> y bajos en Cl. Esto induce a pensar en dos tendencias hidrogeoquímicas diferentes: una sulfatada que se centra especialmente en el acuífero carbonatado y la otra sulfatada-clorurada, que corresponde al acuífero profundo, donde se produce un incremento de estos iones, probablemente como consecuencia del mayor tiempo de contacto agua roca, incrementándose el contenido en los iones más solubles.

Con el objeto de identificar los diferentes tipos de agua y hacer más visibles las diferencias entre ellas se han estudiado una serie de relaciones iónicas definidas por D'Amore et al. (1983) que se han

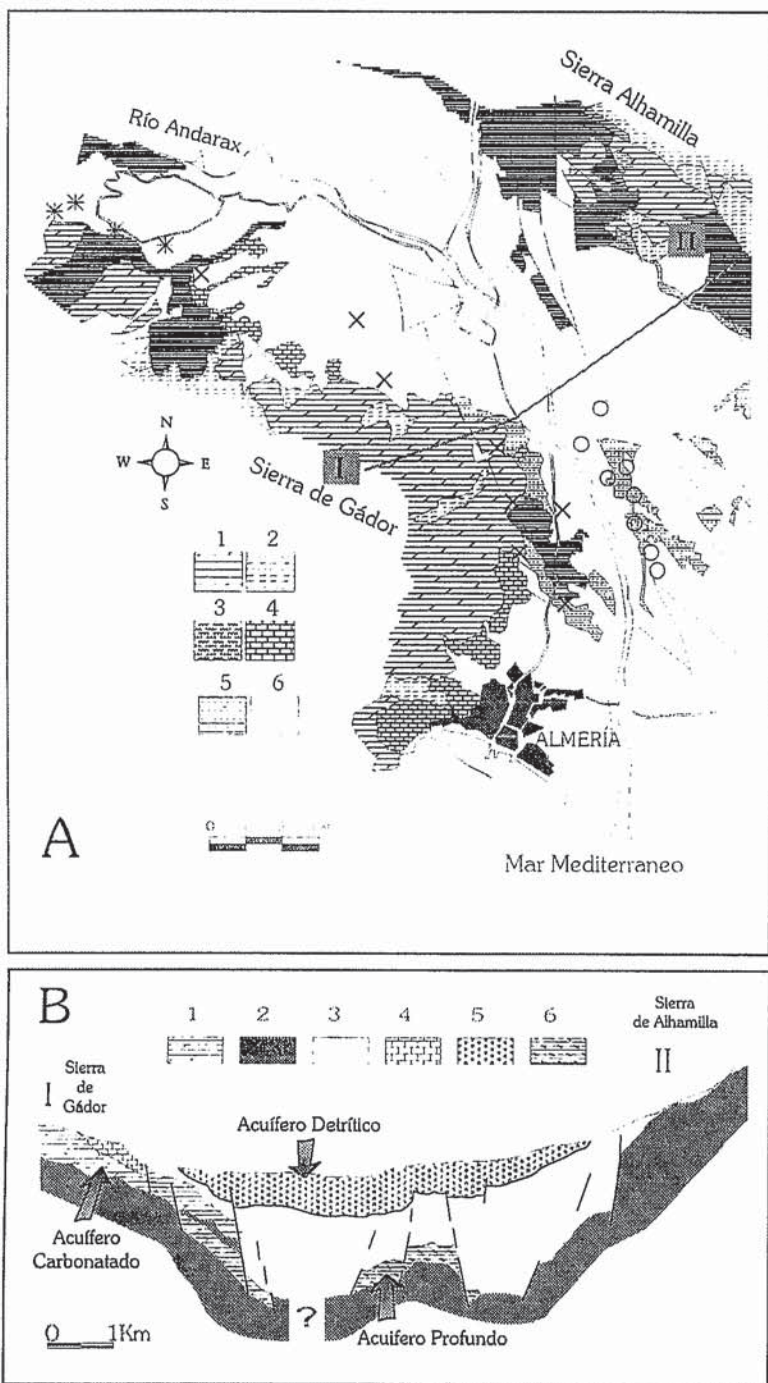


Fig. 1.- (A): Esquema geológico del Borde Oriental de la Sierra de Gádor. 1: Calizas y dolomías; 2: Filitas y calcosquistos; 3: Margas; 4: Calizas y calcarenitas; 5: Arenas, limos y arcillas. 6: Conglomerados, arenas y limos. I-II: situación del corte hidrogeológico representado en figura 1B. Se han identificado los puntos muestreados de acuerdo con los siguientes símbolos: acuífero profundo: O, acuífero carbonatado: (área de Alhama: \*, borde occidental de Sierra de Gádor: X). (B): Corte hidrogeológico transversal en el borde oriental de Sierra de Gádor. 1: Calizas y dolomías; 2: Filitas y calcosquistos; 3: Margas; 4: Calizas y calcarenitas; 5: Conglomerados, arenas, limos y arcillas, 6: Calizas y dolomías.

Fig. 1.- (A) Geological scheme of the Eastern margin of the Sierra de Gádor. 1: Limestones and dolomites; 2: Phyllites and calcoschists; 3: Marls; 4: Limestones and calcarenites; 5: Conglomerates, sands, silts and clays. I-II: Hydrogeological cross-section given in figure 1. Symbols: deep aquifer: O, carbonate aquifer: (Alhama area: \*, western margin of the Sierra de Gádor: X). (B) The location of the sampling points is given, showing the different sectors identified in text. B: Hydrogeological cross-section across the margin of the Sierra de Gádor. 1: Limestones and dolomites; 2: Phyllites and calcoschists; 3: Marls; 4: Limestones and calcarenites; 5: Conglomerates, sands, silts and clays, 6: Limestones and dolomites.

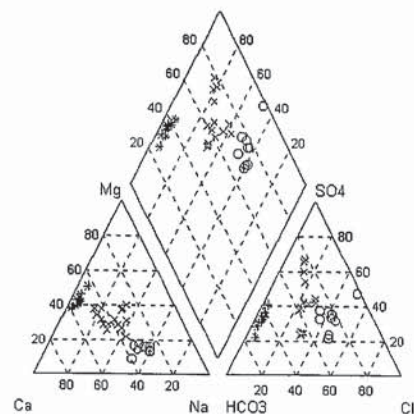


Fig. 2.- Diagrama de Piper correspondiente a las aguas termales de los acuíferos carbonatados del Bajo Andarax. Símbolos: acuífero profundo: O, acuífero carbonatado: (área de Alhama: \*, borde occidental de Sierra de Gádor: X).

Fig. 2.- Piper diagram corresponding to thermal waters of carbonated aquifers of Bajo Andarax. Symbols: deep aquifer: O, carbonate aquifer: (Alhama area: \*, western margin of the Sierra de Gádor: X).

obtenido a partir de los componentes iónicos mayoritarios (tabla I). En la figura 4 se presenta, mediante diagramas rectangulares estos parámetros.

Los dos grupos que se han distinguido en el acuífero carbonatado muestran unas gráficas muy diferentes. Las aguas del área de Alhama se diferencian especialmente en los parámetros A y D, que están asociados con la relación entre  $HCO_3 - SO_4$  y  $Mg - Ca$ . Estas aguas tienen baja salinidad, su facies es bicarbonatada cálcica, como consecuencia de la litología calizo dolomítica del acuífero. El resto de puntos se distribuyen a lo largo del borde occidental de la Sierra de Gádor y poseen una disposición diferente como consecuencia de su carácter sulfatado, que implica un aumento del parámetro D y descenso de A y F. Los cuatro puntos que están separados del resto son las aguas más salinas que tienen facies sulfatada cálcica. En el acuífero profundo el parámetro D es más elevado y el B muy bajo, en relación con la facies clorurada-sulfatada sódica que poseen estas aguas.

Para analizar detalladamente esta diversidad hidrogeoquímica se ha estudiado la variabilidad de los contenidos en B y Li que presentan las aguas (tabla II). Esta variabilidad induce a pensar que los contenidos en B y Li no están asociados exclusivamente con un solo factor, sino que deben influir diferentes condiciones que favorezcan la movilización de cada uno de ellos.

	T.	Cond	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	Na	B	Li	SO4/Cl	B/Li
<b>Acuífero profundo</b>												
Min	25.2	2650	175	46	419	350	54	360	1.7	1.5	0.4	1.8
Max	32.3	3730	332	87.5	871	1100	682	589	7.2	3.0	1.0	38.4
Media	29.7	3407.8	238.1	68.8	627.7	672.2	563.5	492.3	5.6	2.3	0.8	6.6
Des St	2.4	381.6	56.2	13.3	149.0	241.8	195.0	63.1	1.7	0.5	0.2	11.9
<b>Area de Alhama</b>												
Min	25.0	570	64	38	9	85	311	7	0.1	0.0	3.8	0.6
Max	40.0	910	125	53	16	206	377	15	0.2	0.1	11.8	7.2
Media	31.9	743.1	93.5	45.2	12.2	139.6	348.2	9.6	0.1	0.1	8.5	2.4
Des St	3.9	113.4	18.1	4.2	2.0	33.0	25.1	2.6	0.0	0.0	2.4	2.7
<b>Borde occidental</b>												
Min	22.5	1150	78	42	100	163	268	75	0.2	0.1	0.7	0.8
Max	29.0	3250	271	138	310	946	506	270	2.5	1.0	5.5	7.4
Media	25.0	1651.3	145.5	73.1	152.5	424.6	373.8	123.1	0.7	0.3	2.2	2.4
Des St	1.8	558.1	60.7	29.3	57.1	250.1	57.9	52.6	0.6	0.3	1.6	1.6

Tabla I.- Resumen de los datos hidroquímicos correspondientes a las aguas subterráneas de los acuíferos profundo y carbonatado del Bajo Andarax. (Min: valores mínimos; Max: valores máximos; Media: valores medios; Des Std: Desviación estándar. T: temperatura (°C); Cond: Conductividad eléctrica (µS·cm<sup>-1</sup>); Concentraciones en mg·L<sup>-1</sup>.

Table I.- Summary of the hydrochemical data corresponding to the groundwaters of the deep and carbonate Aquifers of the lower Andarax, distinguishing to the three sectors mentioned in the text. (Min: minimum values; Max: maximum values; Aver: mean values; T: temperature (°C); Cond: Conductivity (µS·cm<sup>-1</sup>); Concentrations and ionic rations in mg·L<sup>-1</sup>

Los mayores contenidos en Li se alcanzan en el acuífero profundo, que está confinado y sus aguas han tenido una circulación lenta, con un amplio tiempo de contacto agua-roca que se ha producido a elevada temperatura. Estos factores favorecen el aumento del Li que posee una elevada movilidad geotérmica, por lo que las aguas termales y los flujos regionales de circulación profunda se encuentran enriquecidos en este elemento (Fidelibus et al., 1992).

Sin embargo, en algunos puntos del acuífero carbonatado no hay una relación directa entre temperatura de las aguas y contenido en Li. Este es el caso del área de Alhama, donde existe una notable anomalía geotérmica (24 °C - 40 °C) y las concentraciones en Li son muy bajas (< 0.3 mg·L<sup>-1</sup>). El corto tiempo de residencia de las aguas en el acuífero puede justificar estos valores tan bajos a pesar de tener sus aguas elevada temperatura. En este área debe producirse un flujo rápido, favorecido por las importantes fracturas que existen en el borde de la Sierra de Gádor (Sanz de Galdeano et al., 1985). Estos flujos rápidos se han identificado en la vertiente sur de la Sierra de Gádor, con una situación hidrogeológica semejante y considerando análisis isotópicos (Molina, 1998).

La distribución del B presenta una serie de anomalías muy similares a las descritas para el Li. Algunos puntos cercanos al área de Alhama muestran altos valores en SO<sub>4</sub> y muy bajos en B, mientras que en el acuífero profundo se alcanzan los máximos valores con B con concentraciones muy variables de SO<sub>4</sub>. Esta similitud entre las anomalías del B y Li en los dos acuíferos carbonatados y su relación directa (figura 5) induce a pensar que su origen puede estar controlado por procesos similares. Fundamentalmente en relación con las anomalías geotermales, ya que la temperatura controla la liberación del B por interacción agua-roca, y con la presencia de materiales evaporíticos (Arnor-

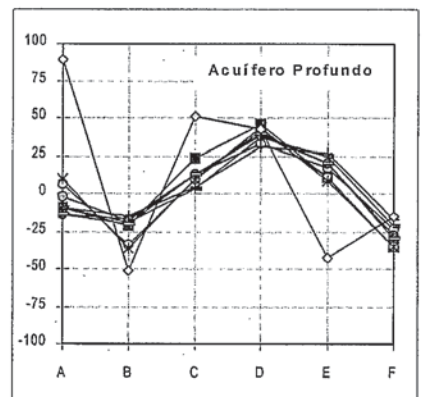
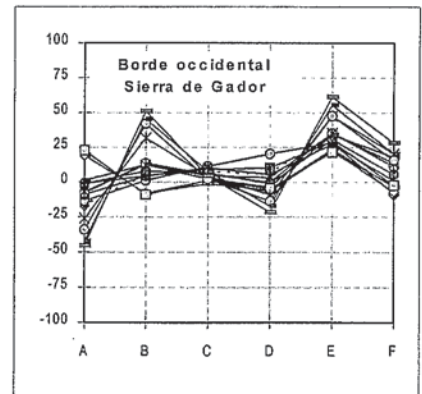
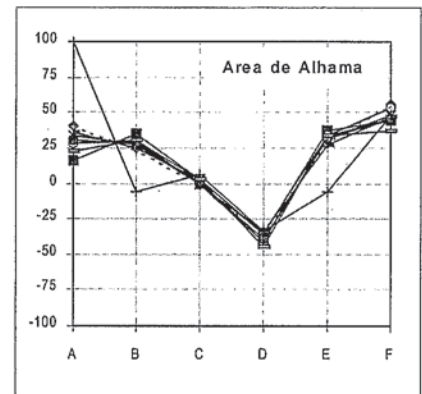


Fig. 4.- Representación gráfica de los parámetros definidos por D'Amore et al. (1983).

Fig. 4.- Graphical representation of the parameters defined by D'Amore et al. (1983).

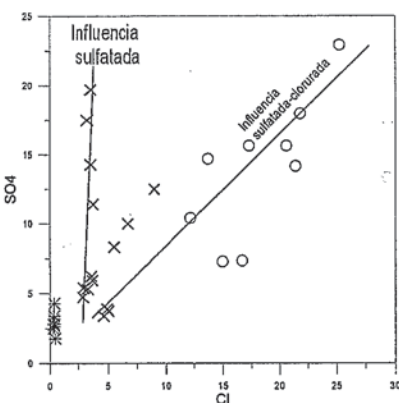


Fig. 3.- Relación entre el SO<sub>4</sub> y Cl (meq · L<sup>-1</sup>). Símbolos: acuífero profundo: O, acuífero carbonatado: (área de Alhama: \*, borde occidental de Sierra de Gádor: X).

Fig. 3.- Plot of SO<sub>4</sub> against Cl concentration (meq · L<sup>-1</sup>). Symbols: deep aquifer: O, carbonate aquifer: (Alhama area: \*, western margin of the Sierra de Gádor: X).

- A 100 x (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)
- B 100 x [(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> / ΣCat) - (Na<sup>+</sup> / ΣAn)]
- C 100 x [(Na<sup>+</sup> / ΣCat) - (Cl<sup>-</sup> / ΣAn)]
- D 100 x [(Na<sup>+</sup> - Mg<sup>2+</sup>) / ΣCat]
- E 100 x [(Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>) / ΣCat - (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> / ΣAn)]
- F 100 x (Ca<sup>2+</sup> - Na<sup>+</sup> - Mg<sup>2+</sup>) / ΣCat

Tabla II.- Parámetros definidos en D'Amore et al. (1983). Σcat y Σan: suma de los cationes y aniones respectivamente. Concentraciones en meq·L<sup>-1</sup>.

Table II.- Parameters defined in D'Amore et al. (1983). Σcat and Σan: Cations and Anions sums, respectively. All concentrations in meq·L<sup>-1</sup>.

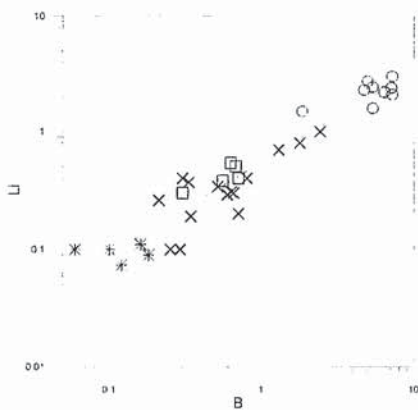


Fig. 5.- B con respecto a Li ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). (Símbolos: acuífero profundo: O, acuífero carbonatado: (área de Alhama: \*, borde occidental de Sierra de Gádor: X).

Fig. 5.- Plot of B versus Li ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Symbols: deep aquifer: O, carbonate aquifer: (Alhama area: \*, western margin of the Sierra de Gador: X).

sson y Andresdottir, 1995; Vengosh et al., 1995). No obstante la relación directa entre B y Li junto a la situación de algunos puntos con contenidos más anómalos dificulta la separación entre los dos procesos, tal y como se ha efectuado en el acuífero detrítico del Bajo Andarax (Sánchez Martos et al., 1999).

Para precisar estas cuestiones se han comparando las relaciones  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  y B/Li, (figura 6). Esta representación separa las aguas en dos grupos. El primero incluye a los puntos del acuífero carbonatado correspondientes al área de Alhama junto algunos puntos cercanos. Este grupo es independiente de la salinidad de las aguas y tiene una relación B/Li < 2. El segundo grupo es más amplio e incluye al resto de puntos muestreados en ambos acuíferos. Sus aguas poseen una relación B/Li más alta. Este enriquecimiento es mayor en los puntos del acuífero profundo, donde la anomalía termal tiene más intensidad y la salinidad de las aguas es más elevada.

La relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  disminuye gradualmente desde el área de Alhama, cuyas aguas presentan los valores máximos ( $3.8 < \text{SO}_4/\text{Cl} < 11$ ) hasta el acuífero profundo, donde se alcanzan los

mínimos ( $0.4 < \text{SO}_4/\text{Cl} < 1.1$ ). Esto induce a pensar en la presencia en el acuífero profundo de materiales salinos con una influencia clorurada, lo que favorece el aumento de Cl con respecto al  $\text{SO}_4$  y el consiguiente descenso de la relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ . Por tanto la mayor concentración de B puede asociarse con el lavado de materiales evaporíticos con presencia de sales cloruradas. Esto ocurre especialmente en el acuífero profundo, cuyas aguas presentan unos valores de la relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  más bajos y B/Li más altos que en el acuífero carbonatado.

### Consideraciones finales

Los factores que controlan la salinidad de las aguas están relacionados fundamentalmente con los procesos geotermales y la presencia de materiales evaporíticos. No obstante, el tiempo de residencia de las aguas en el acuífero es un factor que debe considerarse para interpretar adecuadamente las anomalías hidrogeoquímicas, como es el caso de algunos sectores del acuífero carbonatado cuyas aguas tiene elevada temperatura y presentan los valores de B y Li más bajos de todo el acuífero. En estas áreas debe producirse un flujo subterráneo más rápido, favorecido por las fracturas que limitan los materiales carbonatados en el borde de la Sierra de Gádor, de manera que este flujo más rápido no permite que se movilen el B y Li. Las áreas más salinas se caracterizan por sus altos contenidos en  $\text{SO}_4$  y Cl. Además las aguas que presentan los mayores contenidos en B corresponden a los sectores donde los contenidos en Cl son más elevados. Esto ocurre especialmente en el acuífero profundo, cuyas aguas presentan unos valores de la relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  más bajos y B/Li más altos que en el acuífero carbonatado.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto 280602/PI/08 (Fundación Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia).

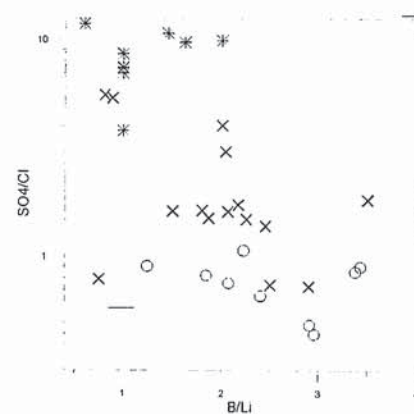


Fig. 6.- Relación entre el  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  con respecto B/Li ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Símbolos: acuífero profundo: O, acuífero carbonatado: (área de Alhama: \*, borde occidental de Sierra de Gádor: X).

Fig. 6.- Plot of  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  ratio against B/Li ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Symbols: deep aquifer: O, carbonate aquifer: (Alhama area: \*, western margin of the Sierra de Gador: X).

### Referencias

- Arnorsson, S. y Andresdottir, A. (1995): *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 59, (20), 4125-4146.
- D'amore, F.; Scandiffio, G. y Panichi, C. (1983): *Geothermics*. 12, 141-148
- Fidelibus, M.D.; Giménez, E.; Morell, I. Y Tulipano, L. (1992): *Study and Modelling of Salt Water Intrusion. Proc. 12th Salt Water Intrusion Meeting*, 267-283.
- Molina, L. (1988): Tesis Doctoral Univ. de Granada. 340 pag.
- Pulido Bosch A., Sánchez Martos F., Martínez Vidal J. L. y Navarrete F. (1992): *Environ. Geol.* 20, 195-205.
- Sánchez Martos, F. (1997): Tesis Doctoral. Univ. de Granada. 290 pag.
- Sánchez Martos, F., Pulido Bosch, A. y Calaforra Chordi, J.M. (1999): *Appl. Geochem.* 14, 735-745.
- Sanz de Galdeano, C., Rodríguez Fernández, J. y López Garrido, A.C. (1985): *Geologische Rundschau.*, 74 (3), 641-675.
- Vengosh, A., Chivas, A.R., Starinsky, A., Kolofony, Y., Zhang Baozhen y Zhang Pengxi. (1995): *Chem. Geol.*, 120, 135-154.