

# Evolución hidroquímica de las aguas superficiales en los tramos alto y medio del río Andarax (Almería)

*Hydrochemical evolution of surface water in the middle and upper watershed of the Andarax river (Almería)*

Francisco Sánchez-Martos, Francisco Navarro-Martínez, Juan Gisbert Gallego, Luis Molina Sánchez y Ángela Vallejos Izquierdo

G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Departamento. Biología y Geología, Universidad de Almería. Campus Universitario, 04120 Almería, España. fmartos@ual.es, fnm206@ual.es, jgisbert@ual.es, lmolina@ual.es, avallejo@ual.es

## ABSTRACT

The Andarax river includes every kind of flow type along its course: perennial, intermittent and ephemeral. This diversity of flow, along with the variable lithology of the area and the influence of groundwater influences the hydrochemistry of the surface water, which exhibits significant rises and falls of salinity over space and time. On the basis of a series of hydrogeochemical data, we discuss the factors that condition the chemical variability, related to the flow type and the outcropping geology of the area.

**Key-words:** Groundwater-surface water interaction, hydrochemistry, Andarax.

## RESUMEN

El río Andarax presenta todos los tipos de corrientes de agua en su cauce: continuas, discontinuas y efímeras. Esta diversidad junto con la variabilidad litológica del área y la influencia de las aguas subterráneas influye sobre la variabilidad química de las aguas superficiales que presentan oscilaciones de salinidad significativas en el espacio y en el tiempo. A partir de una serie de datos hidrogeoquímicos se discuten los factores que condicionan su variabilidad química que guarda relación con el tipo de corriente y la geología del área.

**Palabras clave:** Interacción aguas subterráneas-superficiales, hidrogeoquímica, Andarax.

Geogaceta, 59 (2016), 35-38  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 30 de junio de 2015  
Fecha de revisión: 20 de octubre de 2015  
Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2015

## Introducción

En las áreas semiáridas es frecuente la presencia de ríos temporales dependientes de las aguas subterráneas lo que puede condicionar la variabilidad hidroquímica de sus aguas superficiales (Carol *et al.*, 2010). Dado que las interacciones aguas superficiales-subterráneas puede ser significativa es necesario tener un marco conceptual que las considere adecuadamente para la correcta gestión y conservación los recursos hídricos (van der Kamp y Hayashi, 2009).

El río Andarax constituye un buen ejemplo de río semiárido, con una elevada variabilidad en lo relativo a cantidad y calidad del agua. En su cuenca afloran materiales con litología muy diversa y una gran complejidad tectónica. Todo ello unido a la climatología ha determinado su dinámica hidrológica, que presenta todos los tipos de corrientes de agua (continuas, temporales y efímeras) a distintas escala espacial y temporal.

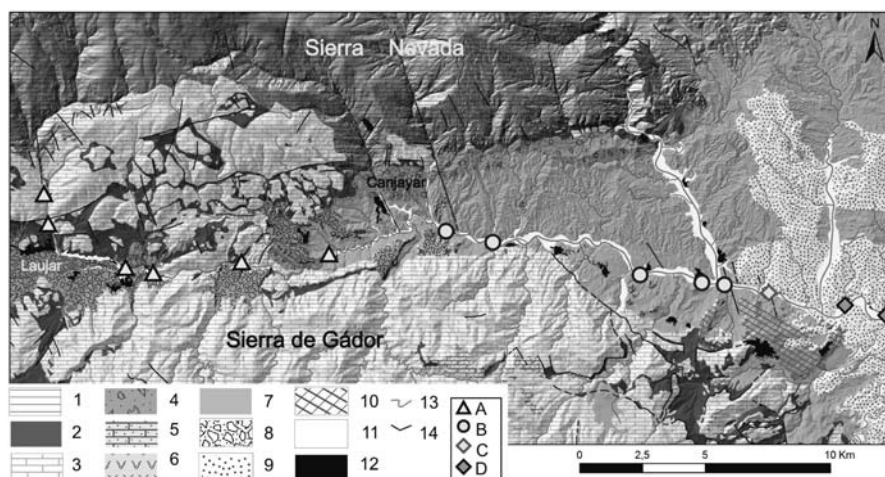


Fig. 1.- Esquema geológico de la cuenca alta y media del río Andarax. 1-11: Litología (1: micaesquistos, 2: filitas, 3: calizas y dolomías, 4: conglomerados rojos, 5: calcarenitas, 6: yesos, 7: margas y arenas, 8: conglomerados arenas y limos, 9: conglomerados cuaternarios, 10: travertinos, 11: arenas y gravas del aluvial), 12: Poblaciones, 13: Fracturas, 14: Red hidrográfica. Puntos de muestreo: A, B, C y D grupos definidos en texto y en Tabla I. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Geological situation of the middle and upper watershed of the Andarax river. 1-11: Lithology (1: meta-pelites, 2: phyllite, 3: limestones and dolomites, 4: red conglomerates, 5: calcarenites, 6: gypsum, 7: marls and sands, 8: conglomerates, sands and muds, 9: Quaternary conglomerates, 10: travertine, 11: sands and gravels alluvial), 12: town, 13: fracture, 14: hydrological network. Sampling points: A, B, C and D are defined groups in text and table I. See colour image on the web.

| Grupos | Cond   | Na | K  | Mg  | Ca  | Cl | SO <sub>4</sub> | HCO <sub>3</sub> | NO <sub>3</sub> | Ca/SO <sub>4</sub> | SO <sub>4</sub> /Cl | Cal.  | Dol.  | Yes.  | Hal.  |     |
|--------|--------|----|----|-----|-----|----|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-----|
| A      | 775    | 20 | 18 | 45  | 112 | 17 | 159             | 401              | 5,5             | 5,51               | 14,39               | 0,73  | 1,18  | -1,04 | -8,16 | (1) |
|        | 461,5  | 8  | 5  | 22  | 70  | 8  | 83              | 227              | 2,4             | 2,41               | 8,08                | 0,15  | -0,14 | -1,49 | -8,91 | (2) |
|        | 113    | 2  | 0  | 9   | 30  | 2  | 14              | 132              | 1,5             | 1,47               | 3,51                | -0,54 | -1,68 | -2,37 | -9,80 | (3) |
|        | 189,7  | 4  | 6  | 11  | 26  | 4  | 41              | 71               | 1,1             | 1,08               | 2,90                | 0,37  | 0,81  | 0,40  | 0,51  | (4) |
| B      | 1140   | 38 | 14 | 119 | 175 | 46 | 501             | 427              | 16,0            | 1,40               | 9,43                | 1,21  | 2,23  | -0,52 | -7,38 | (1) |
|        | 916,8  | 23 | 7  | 62  | 121 | 28 | 314             | 308              | 11,5            | 0,96               | 8,30                | 0,62  | 1,07  | -0,80 | -7,82 | (2) |
|        | 693    | 10 | 2  | 33  | 74  | 13 | 159             | 229              | 8,7             | 0,63               | 6,92                | -0,30 | -0,76 | -1,15 | -8,44 | (3) |
|        | 158,3  | 10 | 5  | 22  | 31  | 9  | 96              | 61               | 2,2             | 0,20               | 0,74                | 0,38  | 0,79  | 0,17  | 0,31  | (4) |
| C      | 1594   | 75 | 16 | 92  | 208 | 90 | 634             | 320              | 20,2            | 0,79               | 5,22                | 0,61  | 1,24  | -0,39 | -6,78 | (1) |
|        | 1325,0 | 57 | 10 | 89  | 170 | 81 | 551             | 303              | 19,5            | 0,73               | 4,99                | 0,41  | 0,70  | -0,52 | -7,00 | (2) |
|        | 1016   | 20 | 4  | 81  | 127 | 63 | 406             | 276              | 18,0            | 0,61               | 4,76                | 0,20  | 0,31  | -0,68 | -7,49 | (3) |
|        | 290,2  | 26 | 6  | 5   | 44  | 13 | 107             | 21               | 1,0             | 0,08               | 0,26                | 0,17  | 0,40  | 0,15  | 0,34  | (4) |
| D      | 1501   | 68 | 19 | 135 | 174 | 81 | 595             | 315              | 21,8            | 0,79               | 5,42                | 1,23  | 2,52  | -0,50 | -6,88 | (1) |
|        | 1399,8 | 53 | 9  | 113 | 159 | 75 | 523             | 299              | 18,7            | 0,73               | 5,12                | 0,83  | 1,67  | -0,57 | -7,04 | (2) |
|        | 1130   | 22 | 4  | 79  | 125 | 65 | 400             | 273              | 15,0            | 0,68               | 4,54                | 0,49  | 0,89  | -0,69 | -7,43 | (3) |
|        | 154,7  | 19 | 7  | 26  | 20  | 6  | 85              | 19               | 3,0             | 0,04               | 0,42                | 0,31  | 0,65  | 0,08  | 0,23  | (4) |

Tabla I.- Parámetros estadísticos básicos de los datos hidroquímicos. Cond: conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ); contenidos iónicos en  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  y  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  en  $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ; Cal., Dol., Yes., Hal.: índices de saturación de calcita, dolomita, yeso y halita (1: valor máximo, 2: media, 3: valor mínimo y 4: desviación estándar).

Table I.- Summary of the hydrochemical data statistics. Cond: electrical conductivity ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ); ionic contents  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  and  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  ratios in  $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ; Cal., Dol., Yes., Hal.: saturation indices of calcite, dolomite, gypsum and halite (1: maximum value, 2: mean value, 3: minimum value, 4: standard deviation).

En este trabajo se aborda el estudio del agua superficial en los tramos alto y medio del río Andarax con un enfoque hidrogeoquímico. Se analiza su variabilidad y se identifican los procesos fundamentales que afectan a las aguas superficiales y su relación con el entorno geológico.

## El área

El río Andarax es un río típicamente mediterráneo y se caracteriza por la variabilidad interanual de su caudal. Las aportaciones medias se han estimado entre 15 - 19  $\text{hm}^3/\text{año}$  (Carrasco y Martín, 1984), pero durante el periodo 1982-1992 oscilaron entre 2,6 - 43,3  $\text{hm}^3/\text{año}$  (Sánchez Martos, 1997). Únicamente presenta circulación superficial en la estación de aforos de Canjáyar durante el periodo Octubre-Junio. Esta variabilidad hidrológica está notablemente condicionada por el irregular régimen de precipitaciones en el área, lo que afecta a la cantidad y calidad de las aguas superficiales en el río Andarax (Navarro Martínez *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista hidrogeológico se diferencian dos grandes acuíferos. El acuífero carbonatado que está inte-

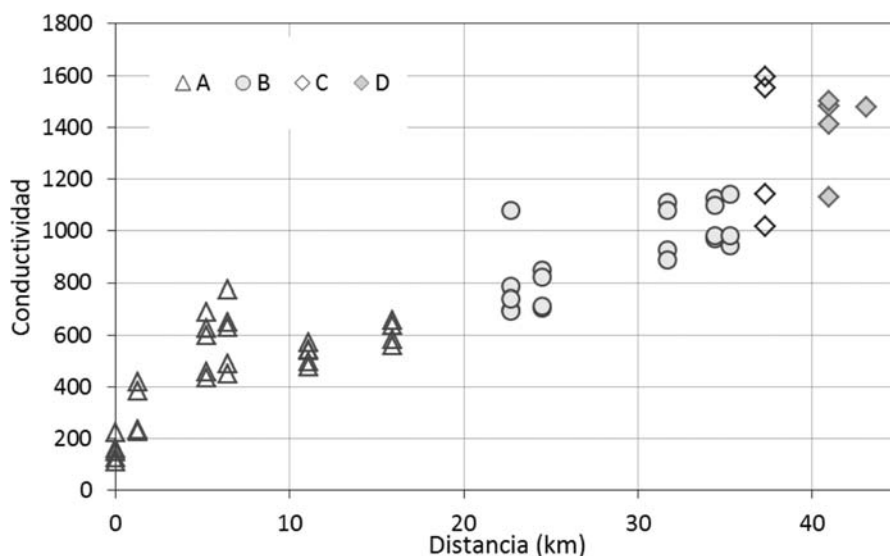


Fig. 2.- Evolución longitudinal de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Los sectores A, B, C y D señalados corresponden a los identificados en la figura 1 y tabla I.

Fig. 2.- Longitudinal evolution of electrical conductivity ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). A, B, C y D correspond to groups identified in figure 1 and table I.

grado por materiales calizo - dolomíticos aflorantes a lo largo del borde de la Sierra de Gádor. El acuífero detrítico se extiende a lo largo del sector central del valle e incluye a los materiales aluviales junto a los conglomerados arenoso - limosos fluvio - deltaicos (Sánchez Martos, 1997).

## Métodos

En las aguas superficiales del río Andarax se tienen datos de 14 puntos de control distribuidos a lo largo de un tramo de 45 kilómetros (Fig. 1). Sobre ellos se han realizado cuatro muestreos durante un ciclo anual y analizan los siguientes parámetros

físico-químicos: conductividad eléctrica, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{NO}_3$ , Na, Mg, Ca y K. Para completar el tratamiento de los datos se ha calculado el estado de saturación de las aguas mediante el programa PRHEEQC (Parkhurst y Appelo, 1999). Un resumen de los parámetros estadísticos básicos se presenta en la tabla I.

## Resultados y discusión

Las aguas superficiales del río Andarax presentan un enriquecimiento salino a lo largo del cauce en el sentido de la corriente y una evolución desde facies bicarbonatada hasta sulfatada. Esta evolución no es gradual y la salinidad muestra una serie de variaciones significativas (Fig. 2). Para identificar y analizar los procesos que pueden afectar a la salinidad de las aguas superficiales se han diferenciado cuatro sectores, utilizando como criterio la continuidad de agua en el cauce, aspecto interesante en áreas semiáridas, donde los ríos no son permanentes en todo su cauce ni en todo el ciclo anual. De acuerdo con ello se distinguen tres tipos de corrientes: continua, discontinua y efímera (Figs. 1 y Tabla I). Las dos áreas con una corriente continua están situadas en el tramo alto (zona A) y medio (zona C). La zona A posee agua con conductividad inferior a  $775 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y facies bicarbonatada cálcico-magnésica. En la zona C, sus aguas tienen la conductividad eléctrica más elevada de todo el río ( $1016 - 1594 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y facies sulfatada cálcico magnésica. La zona B corresponde con el tramo discontinuo y se extiende a lo largo de unos 15 km, entre las zonas A y C. El agua tiene facies sulfatada cálcico magnésica y su salinidad oscila entre  $916$  y  $1140 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La zona D corresponde al tramo medio del río, donde tiene un comportamiento efímero y es perdedor, el agua tiene facies sulfatada cálcico magnésica y su conductividad oscila entre  $1130$  y  $1501 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

Para interpretar esta evolución se analizan una serie de relaciones iónicas y su evolución espacial. Los iones Cl y  $\text{SO}_4$  están asociados directamente con la salinidad de las aguas y muestran una buena correlación ( $r^2 = 0,96$ ) entre los puntos de las zonas A y B (Fig. 3). Las zonas C y D se disponen alejadas de esta alineación y su relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  oscila entre 4,5 y 5,2. Estas dos zonas están situadas en el tramo medio y sus aguas tienen un mayor recorrido a lo

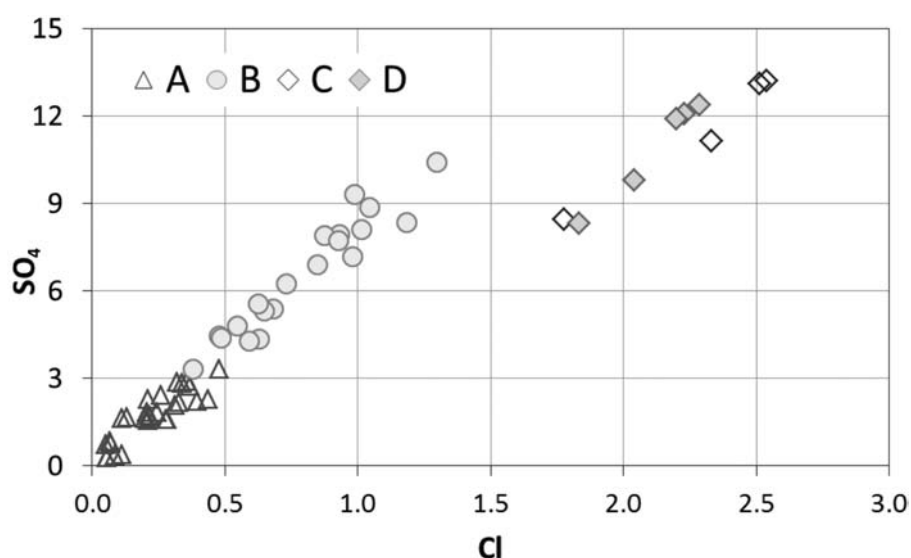


Fig. 3.- Relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  en  $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ . Los sectores A, B, C y D corresponden a los identificados en la figura 1 y tabla I.

Fig. 3.-  $\text{SO}_4$  vs  $\text{Cl}$  in  $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$  in the Andarax river. The sectors A, B, C y D correspond to those identified in figure 1 and table I mentioned in the text.

largo del cauce y reflejan la influencia de los materiales presentes en la cuenca. La evolución implica un aumento del contenido en Cl con respecto a la tendencia general mostrada en las aguas de las zonas A y B.

Mediante el cálculo de los índices de saturación de las aguas se ha estimado el estado de equilibrio de los principales minerales asociados con los depósitos evaporíticos (halita y yeso). Los índices de saturación de la halita son siempre negativos, pero en las zonas C y D alcanzan los valores más altos ( $> -7,49$ ). El grado de saturación del yeso también alcanza los valores más altos y oscilan entre  $-0,69$  y  $-0,39$ . La representación de estos índices con respecto a la relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  (Fig. 4) muestra a los puntos de las zonas C y D agrupados estrechamente y separados del resto, lo que induce a pensar que los procesos que afectan a sus aguas deben ser diferentes a los que afectan a los grupos A y B. Este efecto puede relacionarse con la presencia de depósitos evaporíticos que favorecen un aporte de ion Cl y  $\text{SO}_4$ , lo que justificaría los valores más altos del índice de saturación de la halita y del yeso, con respecto a los puntos situados aguas arriba. Estos materiales son abundantes en las margas arenosas con niveles conglomeráticos que afloran en las zonas cercanas al cauce a lo largo de toda la cuenca y especialmente al sur de Canjáyar. Todo ello puede favorecerse por la descarga difusa de aguas subterráneas

detectada en la zona C que permite que el río en esta área sea permanente todo el año. Esta descarga difusa es la responsable de que

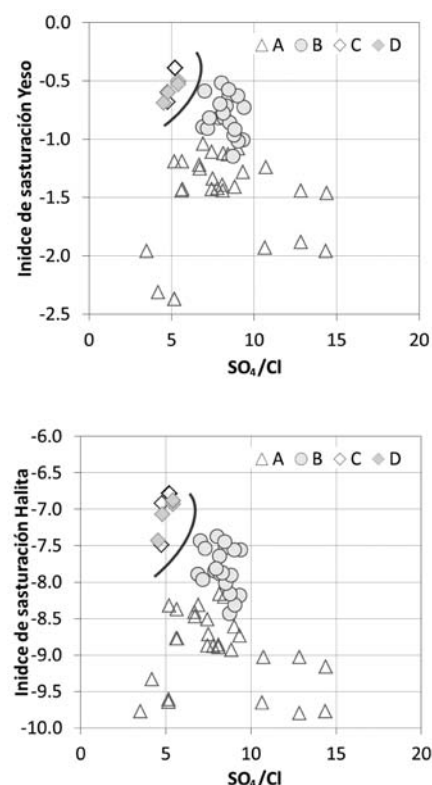


Fig. 4.- Índice de saturación de yeso y de la halita con respecto a la relación  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  ( $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Los sectores A, B, C y D corresponden a los identificados en la figura 1 y tabla I.

Fig. 4.- Saturation index gypsum and halite versus ratio  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  ( $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$  ratio). The sectors A, B, C y D are identified in figure 1 and table I.

se alcancen los contenidos más altos en  $\text{NO}_3$  en las zonas C y D, donde se duplican los valores obtenidos de las zonas A y B (ver Tabla I). Estos valores pueden asociarse a la contaminación de aguas residuales urbanas y con el lavado del  $\text{NO}_3$  asociado con las actividades agrícolas, que se infiltra y posteriormente se moviliza hasta alcanzar las aguas superficiales (Lamontagne *et al.*, 2005).

Los puntos de las zonas A y B muestran una elevada correlación entre los iones  $\text{SO}_4$  y Cl (Fig. 3). Sin embargo, los procesos que afectan a estas dos áreas deben ser diferentes, puesto que la evolución de la salinidad no es lineal y presenta variaciones muy significativas y permanentes en la zona A (Fig. 2). La separación entre estos dos sectores se manifiesta con más claridad al considerar conjuntamente los iones Ca,  $\text{SO}_4$ , Cl y conductividad eléctrica. La relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  en la zona A tiene valores más elevados (1,4 – 5,1) que en la zona B (0,6–1,4). Este descenso en la zona B se asocia directamente con el aumento de la salinidad de las aguas (Fig. 5A), lo que se hace extensivo hasta las zonas C y D donde la relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  alcanza los valores más bajos de toda la cuenca (0,6–0,8) (Fig. 5A). El área de cabecera (Zona A) posee los contenidos más bajos de  $\text{SO}_4$  (Tabla I), por lo que el Ca debe estar asociado fundamentalmente con la disolución de materiales carbonatados aflorantes en Sierra de Gádor y en menor medida la presencia de materiales yesíferos. El descenso de la relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  en la zona B puede asociarse a la influencia de la disolución de rocas evaporíticas, presentes en los materiales margosos que afloran en las proximidades de esta zona de la cuenca. En esta zona las aguas están sobresaturadas en dolomita (Tabla I), lo que puede contribuir a la disminución de la cantidad de Ca disponible en el agua y favorece el descenso de la relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$ .

Considerando conjuntamente la relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  con respecto al  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  (Fig. 5B) también se separan con claridad los grupos C y D del resto. Las aguas de las zonas situadas a cotas más bajas, son más homogéneas y tienen valores inferiores al resto, como consecuencia de la influencia de sales más solubles indicadas anteriormente, lo que puede favorecer el aumento de Cl con respecto a  $\text{SO}_4$ .

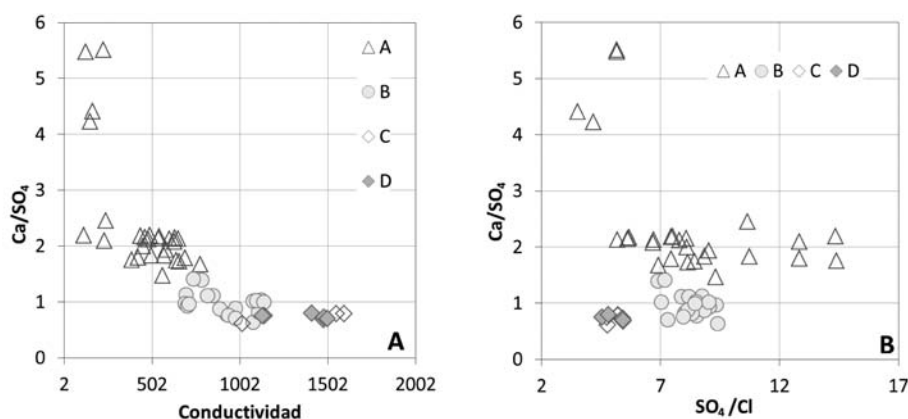


Fig. 5.- A) Relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  con respecto a la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). B) Relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  con respecto  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ . Relaciones en  $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ . Los sectores A, B, C y D corresponden a los identificados en la figura 1 y tabla I.

Fig. 5.- A) Ratio  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  versus electrical conductivity ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). B) Ratio  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  versus  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ . Ratios in  $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ . The sectors A, B, C and D are identified in figure 1 and table I.

## Consideraciones finales

La cuenca media y alta del río Andarax posee versos de tipos de corriente de agua (permanentes, discontinuas y efímeras) con una variabilidad hidroquímica notable. Se han identificado cuatro áreas con características hidroquímicas muy diferentes. En el tramo alto (zona A) las aguas tienen facies bicarbonatada cálcico-magnésica y salinidad inferior. En el tramo medio (zona B) la corriente es discontinua y es un río perdedor. Sus aguas son sulfatadas cálcico-magnésicas y poseen la mayor variabilidad del área. Su salinización está relacionada con la disolución de rocas evaporíticas, fundamentalmente yeso, presentes en los materiales margosos-arenosos que afloran en las proximidades de esta zona de la cuenca. En el tramo medio (zonas C y D) las aguas son las más salinas, tienen facies sulfatada cálcica y sus contenidos iónicos están ligados a la influencia de materiales evaporíticos con un aporte de ion  $\text{SO}_4$  y Cl, lo que las diferencia de las aguas de la zona B. La variabilidad de los procesos identificados está muy relacionada con la litología de los materiales aflorantes en la cuenca y con los factores antrópicos: vertidos de aguas residuales urbanas y el desarrollo de las actividades agrícolas. El conocimiento detallado de todos estos procesos es esencial para una gestión adecuada del agua, especialmente en las zonas semiáridas donde los recursos son escasos.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto P11-RNM-8115 financiado por la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía. Al Dr. Juan Carlos Cerón y al revisor anónimo sus comentarios y sugerencias que han mejorado la calidad final del trabajo.

## Referencias

- Carol, S.E. Kruse, E.E. y Pousa, J.L. (2010). *Environmental Earth Sciences* 60, 749–756.
- Carrasco, A. y Martín, G. (1988). En: *Tecnología sobre la Intrusión en Acuíferos Costeros* 88, II, 37–67.
- Lamontagne, S., Leaney, F.W. y Herczeg, A.W. (2005). *Hydrological Processes* 19, 3063–3080.
- Navarro-Martínez, F., Sánchez-Martos, F., Gisbert Gallego, J., Molina Sánchez, L. y Rigol, J.P. (2015). En: *Simposio Sobre el Agua en Andalucía*. Comunicaciones II, 801–810.
- Parkhurst, D. y Appelo, D. (1999). *Water-Resources Investigation Report 99-4259*. U.S. Geol. Survey.
- Sánchez-Martos, F. (1997). *Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)*. Tesis doctoral, Univ. de Granada, 290 p.
- Van der Kamp, G. y Hayashi, M. (2009). *Hydrogeology Journal* 17, 203–214.