

IDENTIFICACIÓN DE LAS ANOMALÍAS TERMALES EN EL BAJO ANDARAX (ALMERÍA, SE ESPAÑA)

F. Sánchez-Martos ⁽¹⁾, A. Pulido-Bosch ⁽¹⁾, L. Tulipano ⁽²⁾ y M. D. Fidelibus ⁽³⁾.

¹ Departamento de Hidrogeología, Universidad de Almería. Campus Universitario, 04120 Almería. España. fmartos@ual.es, apulido@ual.es

² Dipartimento Idraulica Trasporti e Strade. Università di Roma "La Sapienza" Via Eudossiana 18, I-00184 Roma, Italia. mail: l.tulipano@uniroma1.it

³ Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica. Politecnico di Bari, Via Orabona 4, I-70125 Bari, Italia. d.fidelibus@poliba.it

RESUMEN

En el Bajo Andarax (Almería, SE de España) existe una significativa anomalía termal puesta de manifiesto por la existencia de varios manantiales termales y la elevada temperatura del agua (30 - 52 °C) en numerosos puntos acuíferos. Para analizar estas anomalías termales se han realizado 16 registros verticales de temperatura, lo que suministra información sobre la evolución bidimensional de este parámetro a lo largo de la zona saturada. Las variaciones del gradiente geotérmico y la morfología de las testificaciones representan la variabilidad de las anomalías termales en las aguas subterráneas del Bajo Andarax. Estas situaciones están directamente asociadas con la tectónica activa del área lo que condiciona la distribución del flujo de calor y la disposición de los materiales, que condiciona notablemente el movimiento del agua subterránea, que afecta al régimen termal de las diferentes zonas.

Palabras clave: Aguas subterráneas, aguas termales, tectónica,

ABSTRACT

There is a significant thermal anomaly in the Lower Andarax aquifer (Almería, SE Spain), which is evidenced by the presence of several thermal springs as well as by the elevated water temperature (30 - 52°C) recorded at various aquifer sampling points. Sixteen vertical temperature logs were recorded to analyse these anomalies, and these supplied information in two dimensions about changes in temperature through the saturated zone. Variations in the geothermal gradient and in the morphology of the temperature logs exhibit well the variability in the thermal anomaly of the groundwaters of the Lower Andarax and their relationship with the geology and tectonics of the area. Lastly, it was observed that the zones of confluence of the most active neotectonic and seismic activity correspond to those with the most significant thermal anomalies.

Key words: groundwater, thermal water, tectonics.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca Baja del río Andarax se sitúa en el extremo SE de España y corresponde a un valle rodeado por las Sierras de Gádor y Alhamilla (Fig. 1) en el que existe una anomalía de flujo de calor y una intensa actividad neotectónica (Fernández et al, 1998). Estos dos factores favorecen el desarrollo de abundantes y variadas manifestaciones geotermales (sondeos y manantiales cuyas temperaturas de surgencia oscilan entre 23 °C y 52 °C, gradiente geotérmico elevado) en un área relativamente pequeña (IGME, 1983, Sánchez Martos, 1997 y Sánchez Martos, et al., 1999).

Los materiales aflorantes conforman un conjunto de rasgos muy diversos. En Sierra Alhamilla afloran rocas metapelíticas, su comportamiento es acuicludo, y en su extremo occidental existen algunos afloramientos de materiales carbonatados de comportamiento acuífero. En Sierra de Gádor se desarrolla mayoritariamente una formación carbonatada de elevada porosidad por fisuración y/o karstificación. Los depósitos de relleno de la depresión presentan una estratigrafía muy compleja con grandes cambios de facies. Las margas miocenas y pliocenas se comportan como acuicludos y los depósitos pliocenos deltaicos junto a las formaciones detríticas pliocuaternarias tienen elevada conductividad hidráulica.

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 a lo largo de todo el sector central del valle e incluye a los sedimentos detríticos cuaternarios, aluviales y deltaicos, junto a los conglomerados arenoso-limosos fluvio-deltaicos pliocenos. El Acuífero Carbonatado de Sierra de Gádor está básicamente integrado por materiales calizo-dolomíticos y calcarenitas miocenas que se extienden puntualmente a lo largo de todo el borde de la sierra. Se trata de un acuífero esencialmente libre, aunque posee intercalaciones margosas impermeables que localmente lo confinan. Su geometría es muy compleja y está compartimentado en bloques que se hunden hacia el Este. El Acuífero Profundo se detectó mediante sondeos en el centro del valle; constituye un acuífero confinado, muy compartimentado en bloques. Su litología es calizo-dolomítica con algunos niveles de cuarcitas conectados hidráulicamente (Fig. 1).

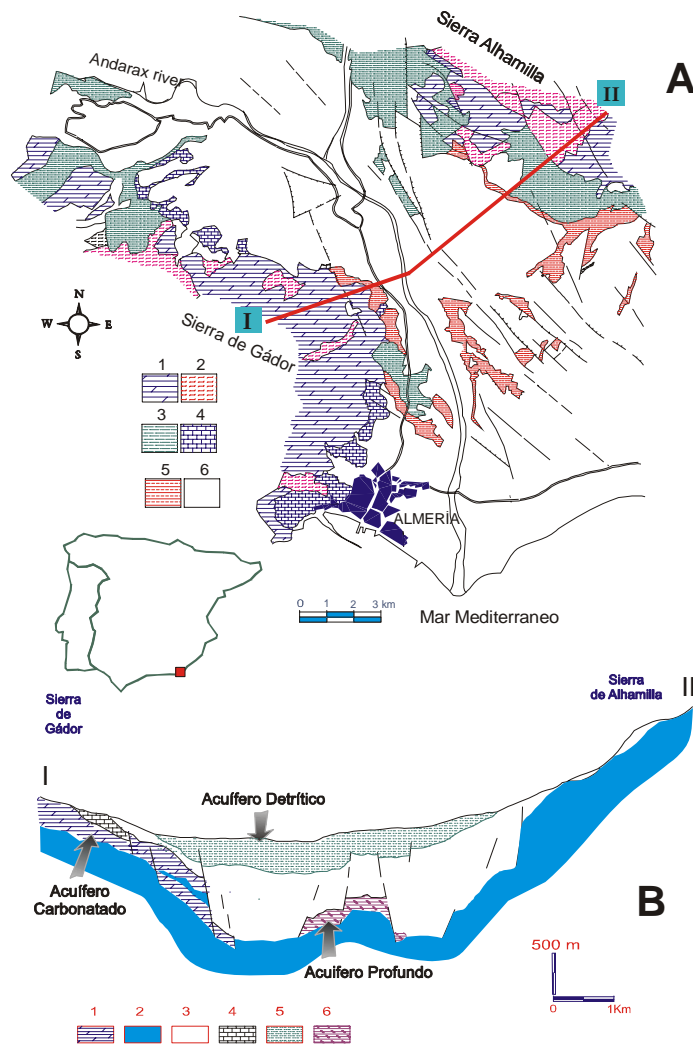


Figura 1.- (A): Esquema geológico del Bajo Andarax. 1: Calizas y dolomías; 2: Filitas y calcoesquistos; 3: Margas; 4: Calizas y calcarenitas; 5: Arenas, limos y arcillas. 6: Conglomerados, arenas y limos. I-II: situación del corte hidrogeológico representado en figura 1B. (B): Corte hidrogeológico transversal en el borde oriental de Sierra de Gádor. 1: Calizas y dolomías; 2: Filitas y calcoesquistos; 3: Margas; 4: Calizas y calcarenitas; 5: Conglomerados, arenas, limos y arcillas. 6: Dolomías.

El estudio de la distribución de la temperatura del agua es un instrumento útil para detectar las áreas de flujo preferencial, identificando sistemas de flujos locales y regionales, considerando exclusivamente la temperatura de bombeo (Taniguchi, *et al.*, 2005) o estudiando las temperaturas en perfiles (Kayane *et al.*, 1985). Incluso mediante la temperatura de las aguas se han identificado los factores que controlan los procesos que intrusión salina en áreas costeras ante el diferente gradiente

termal que presentan las aguas salinas y dulces (Caló y Tinelli, 1995, Custodio *et al.*, 1996). Las testificaciones de temperatura constituyen un medio adecuado para adquirir información suplementaria sobre la heterogeneidad del acuífero, movimiento del agua subterránea y localización de fracturas transmisivas (Michalski, 1989).

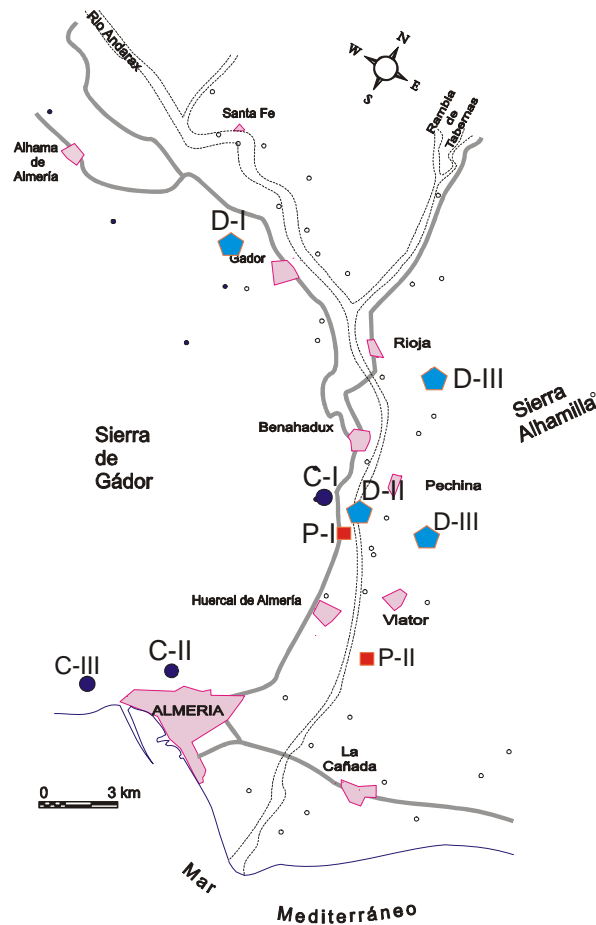


Figura 2.- Situación de los puntos donde se han efectuado los registros verticales. D: Acuífero Detrítico; C: Acuífero Carbonatado; P: Acuífero Profundo.

En este trabajo se analiza la anomalía termal que existe en el Bajo Andarax a partir del estudio de la temperatura del agua subterránea considerando los datos obtenidos en una serie de registros verticales. Con ello se pretende detectar las anomalías geotermales y efectuar una primera valoración a través del estudio de la distribución de la temperatura en profundidad. Los datos de partida corresponden a los 16 registros verticales de temperatura y conductividad eléctrica efectuados en 9 sondeos distribuidos en los tres acuíferos del área: Acuífero Detrítico (8), Acuífero Profundo (4) y en el Acuífero Carbonatado (4) (Fig. 2).

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los registros verticales efectuados se han diferenciado una serie de testificaciones tipo. En el Acuífero Detrítico se identifican 3 tipos de registros (Fig. 3). El sondeo tipo D-I tiene 150 m de profundidad y está situado al norte de Gádor. Este sondeo presenta un gradiente muy bajo, un rasgo característico de las áreas de recarga (Smith y Chapman, 1983; Domenico y Schwartz, 1990). Su situación, en el área de cabecera, sobre terrenos pliocuaternarios detríticos y muy permeables favorece la entrada en el acuífero de aguas más frías relacionadas con el flujo subterráneo a través de los depósitos aluviales del río Andarax y de la rambla de Huéchar, favorecido por la presencia de materiales muy permeables.

El sondeo tipo D-II (Fig. 3) corresponden a un sondeo situado en el cauce del río muy cercano a Viator. Su evolución permite distinguir dos tramos: el superior, a profundidad menor de 60 m, donde su temperatura siempre es inferior a 20.9 °C e incluso en algunas testificaciones se observa un ligero descenso de temperatura, probablemente relacionado con alguna circulación preferencial a través de los niveles más permeables, lo que hace posible una circulación más rápida de agua, que está directamente relacionada con el área de recarga. Su temperatura es más fría, ya que no alcanza el equilibrio térmico con los materiales del acuífero. El tramo inferior, cuya profundidad es mayor de 60 m, presenta un gradiente más elevado (9 °C/100 m) y muy constante. El sondeo tipo D-III se ha definido a partir de una serie de testificaciones efectuadas en 3 sondeos situados en el margen izquierdo del río Andarax, que poseen la temperatura más elevada del Acuífero Detrítico (30 °C), Los gradientes son oscilan entre 4 °C/100 y 2 °C/100 m, aunque en un sondeo existe un tramo, a 40 m de profundidad, donde se eleva hasta 6 °C/100 m, probablemente como consecuencia circulación de agua más caliente relacionada con el aumento del flujo de calor asociado con la confluencia de una serie de fracturas que elevan el substrato de la depresión. Esta área corresponde a una zona tectónicamente elevada donde afloran materiales miocenos y existen algunos sondeos con temperatura más elevada.

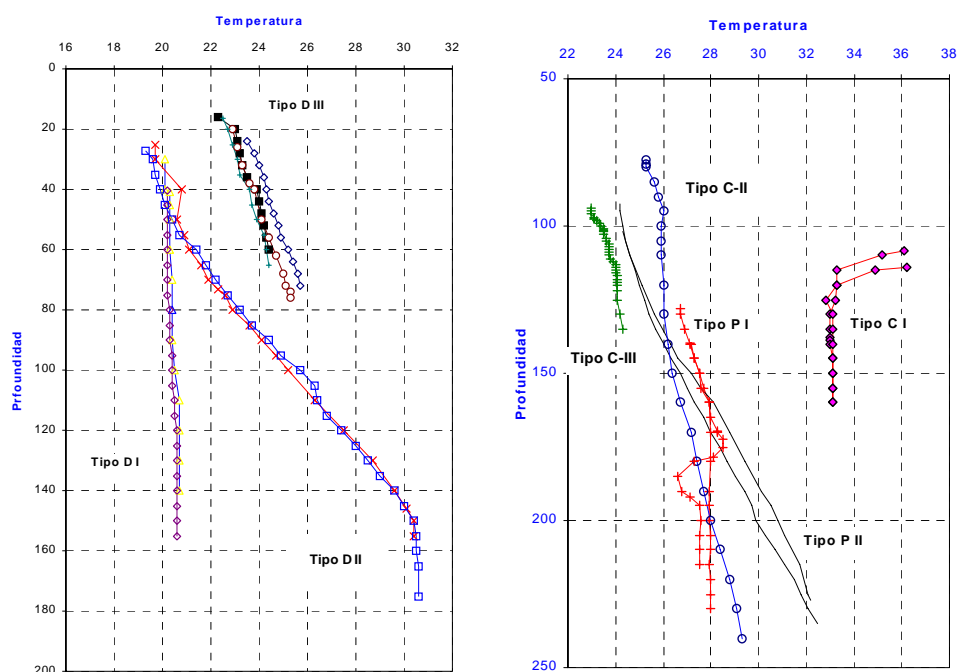


Figura 3.- Distribución de la temperatura en los registros verticales efectuados en el Acuífero Detrítico (D-I, D-II y D-III), Acuífero Profundo (P-I, P-II) y en el Acuífero Carbonatado (C-I, C-II y C-III).

En el Acuífero Carbonatado se han realizado 6 registros verticales que muestran evoluciones muy diferentes y se han agrupado en tres tipos de registros (Fig. 3). El tipo C-I presenta la temperatura más elevada (33 °C) y casi constante. Corresponde a un sondeo situado el sector de Benahadux. En esta zona confluyen dos sistemas de fracturas de importancia regional que se han relacionado con numerosas manifestaciones termales con el ámbito de la cordillera bética (Benavente y Sanz de Galdeano, 1985; Sanz de Galdeano *et al.*, 1995). El tipo C-II (Fig. 3) corresponde a un sondeo situado en la rambla de Belén, al norte de la ciudad de Almería. El tramo superior de la columna está compuesto por materiales calizo-dolomíticos y el resto por filitas con algunas intercalaciones de cuarcitas. La temperatura de las aguas oscila entre 25 °C y 29.5 °C. Su evolución muestra tres sectores muy claros: hasta 90 m de profundidad su temperatura es inferior a 25.8 °C; entre 90 y 130 m se mantiene bastante constante, oscila 25.8 °C y 26 °C; y a profundidades mayores experimenta un incremento constante hasta alcanzar 29.5 °C a 240 m de profundidad. La evolución del primer tramo

corresponde a un incremento normal en relación con la temperatura del exterior. Los otros dos tramos se asocian a situaciones hídricas bien diferentes, puesto que existe un descenso de 0.1 °C a 100 m de profundidad. Este descenso de temperatura induce a pensar en algún flujo rápido de agua, ya que la temperatura desciende y la conductividad es muy baja. En el tramo final, por debajo de 130 m, se produce un incremento gradual y constante de la temperatura, lo que debe corresponder a una situación de equilibrio agua-roca ya que el aumento de temperatura se produce con un gradiente térmico constante.

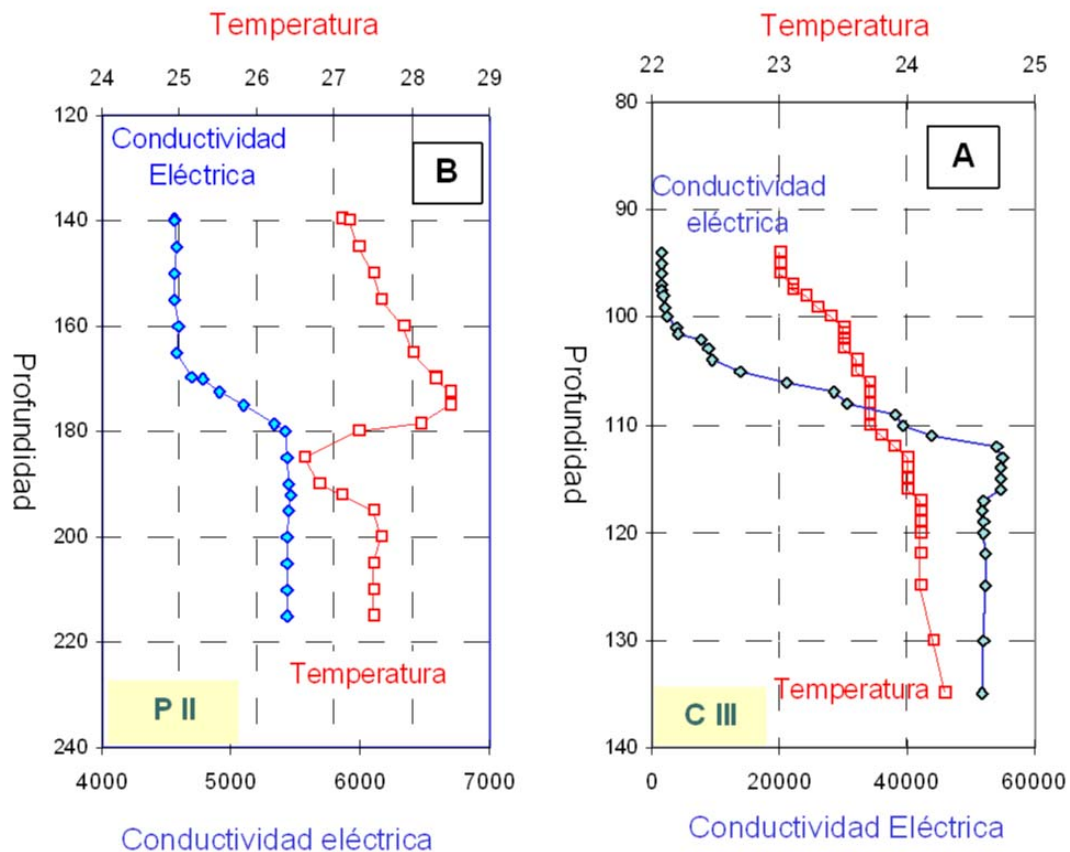


Figura 4.- Distribución vertical de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en el sondeo tipo P-II (Acuífero Profundo) y en el sondeo tipo C-III situado en le barranco de Bayyana (Acuífero Carbonatado).

El tipo C-III (Fig. 3) corresponde a un registro efectuado en un sondeo de 140 m de profundidad situado en la rambla de Bayyana, al oeste de la ciudad de Almería, separado unos 500 m del mar. La temperatura oscila entre 22.5 °C y 25 °C, un valor relativamente bajo considerando la anomalía térmica que existe en el área. Este estrecho rango de variación puede interpretarse como consecuencia de la influencia marina, ya que la temperatura del agua de mar es normalmente menor que la del agua subterránea y en los tramos del sondeo con una relación más directa mar-acuífero, la temperatura del agua subterránea se mantiene constante o incluso desciende ligeramente (Fig. 4). Los tramos con temperatura constante corresponden con bastante exactitud con la zona ranurada del sondeo donde se producen los saltos de salinidad más notables y la conductividad eléctrica alcanza 40000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, como consecuencia directa del agua de mar (Pulido Bosch et al., 2001)

En el Acuífero Profundo se han definido dos tipos de registros (Fig. 3). El registro tipo P-I es muy homogéneo y presenta un incremento continuo de temperatura hasta alcanzar 33 °C a 240 m de profundidad. El tipo P-II posee una mayor variabilidad térmica e incluso muestra un descenso de 2 °C en su temperatura. La circulación de agua más fría y salina modifica totalmente el régimen termal del sondeo, al disminuir su temperatura y elevar la conductividad eléctrica de sus aguas (5200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (Fig. 4).

3. CONSIDERACIONES FINALES

La realización de registros verticales de temperatura en sondeos en áreas con anomalías geotérmicas, constituye una herramienta preliminar de estudio para identificar la magnitud de las anomalías geotermales. El análisis de una serie de testificaciones de conductividad eléctrica y temperatura del agua en una serie de sondeos ha permitido identificar la variabilidad de situaciones termales que presentan las aguas subterráneas del Bajo Andarax. Estas situaciones están directamente asociadas con la tectónica tan activa del área lo que condiciona la distribución del flujo de calor y la disposición de los materiales, que condiciona notablemente el movimiento del agua subterránea, que afecta al régimen termal de las zonas de las diferentes zonas. Así la entrada al sistema de aguas más frías, directamente relacionadas con la recarga a través de los depósitos aluviales y la existencia de sectores donde el flujo es más rápido no permiten que el agua subterránea alcance el equilibrio termal con el acuífero, por lo que se producen áreas con gradientes negativos. En los sectores donde confluyen las fracturas con mayor actividad neotectónica y sísmica se producen áreas con valores más altos de temperatura y gradientes como consecuencia del flujo termal relacionado con este tipo de estructuras. Cuando es posible puede plantearse la cartografía de las isotermas a diferente profundidad para identificar con más precisión las áreas con elevados valores de flujo de calor.

Agradecimientos. Esta comunicación ha sido realizada en el marco del proyecto PO6-RNM-01696, financiado por la Junta de Andalucía.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavente, J. y Sanz de Galdeano, C. (1985): Relación de las direcciones de karstificación y del termalismo con la fracturación en las cordilleras Béticas. *Estudios Geológicos*. 41: 177-185
- Caló, G C. y Tinelli, R. (1995). Systematic hidrogeological study of a hypothermal spring. *Journal of Hydrology*. 165: 185-205.
- Custodio, E.; Manzano, M. y Iglesias, M. (1996). Análisis térmico preliminar de los acuíferos de Doñana. IV SIAGA. Vol II: 89-98
- Domenico, P.A y Schwartz, F. (1990): *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons Inc., New York, 824 pp.
- Fernández, M. Marzan, I. Correia, A. y Ramalho, E. (1998): Heat flow, heat production, and lithospheric thermal regime in the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 291: 29-53
- IGME (1983): *Prospección geotérmica en la depresión de Almería*. Informe inédito IGME. 7 vol.
- Kayane, I. Taniguchi, M. y Sanjo, K. (1985): Alteration of the Groundwater Thermal Regime Caused by Advection. *Hidrological Sciences Journal*. 30 (3): 343-360
- Michalski, A. (1989): Application of Temperature and Electrical-Conductivity Logging in Ground Water Monitoring. *Ground Water Monitoring Review*. 9 (3): 112-118
- Pulido Bosch, A. Sánchez Martos, F. Martínez Vidal, J.L. y Navarrete, F. (1992): Groundwater problems in a semiarid area (Low Andarax river, Almería Spain). *Environ. Geol. Water. Sci.* 20 (3): 195-204.
- Pulido-Bosch A. Pulido-Leboeuf, P. Vallejos, A. Gisbert, J. y Andreu, J.M. (2001): Quelques considérations sur les aquifères karstiques côtiers. *Sciences et Techniques de l'Environnement*, Université de Franche-Comté, mémoire hors-série n° 13: 301-304.
- Sánchez Martos, F. (1997). *Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería)*. Tesis doctoral. Universidad de Granada. 290 pag.
- Sánchez Martos, F. Pulido Bosch, A. y Calaforra Chordi, J.M. (1999): Hydrogeochemical processes in an arid region of Europe (Almería, SE Spain). *Applied Geochemistry*, 14: 735 – 745.
- Sanz de Galdeano, C. (1985): Estructura del borde Oriental de la Sierra de Gádor (zona Alpujarride, Cordilleras Béticas). *Acta Geológica Hispánica*. 20: 145-154

- Sanz de Galdeano, C. Lopez Casado C. Delgado, J, y Peinado, M.A. (1995): Shallow seismicity and active faults in the betic cordillera .A preliminary approach to seismic sources associated with specific faults. *Tectonophysics*. 248: 293-302
- Smith, L. y Chapman, D. S. (1983). On the Thermal effects of groundwater flow. 1. Regional scale systems. *Journal of Geophysical Research*. 88: 593-608
- Taniguchi M, Shimada, J. y Uemura, T. (2005): Transient effects of surface temperature and groundwater flow on subsurface temperature in Kumamoto Plain, Japan. *Physics and Chemistry of the Earth* 28: 477–486
- Tulipano, L. (1986). Temperature logs interpretation for the identification of preferential flow pathways in the coastal carbonatic and Karstic aquifer of the salento peninsula (Southern Italy). *Procc. 21 Congress. IAH Karst hydrogeology and Karst protection*: 956-961