

Caracterización hidrodinámica e hidroquímica de la Fuente Grande de Alfacar (Sierra de la Alfaguara, Granada)

Hydrodynamic and hydrochemical characterization of the Fuente Grande spring (Sierra de la Alfaguara, Granada)

P. Jiménez Gavilán, B. Andreo Navarro y F. Carrasco Cantos

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. 29071 Málaga. pgavilan@uma.es

ABSTRACT

Fuente Grande spring is the main natural discharge point of the carbonate aquifer system of the Sierra de la Alfaguara (Granada, Spain). The hydrodynamic and hydrochemical responses of this spring, with respect to precipitations recorded during the study period (2000-2002), show that the system drained is a fissured system, because slow and little increases in the outflow of the spring, accompanied of a scanty dilution process. The analysis of depletion curves shows that this is a slow process; moreover, the temporal variation of the electrical conductivity of the water and the variation coefficient of this parameter, confirm the low karstification degree of the aquifer.

Key words: carbonate aquifer, Fuente Grande spring, hydrodynamic, hydrochemistry.

Geogaceta, 35 (2004), 159-162
ISSN:0213683X

Introducción. Marco geológico e hidrogeológico

El manantial de Fuente Grande constituye el principal punto de descarga del sector suroccidental del macizo carbonatado de la Alfaguara, que se encuentra situado a 9 km al NNE de la ciudad de Granada (Fig. 1). La altitud media del área de estudio es de 1350 m y los valores medios anuales de precipitación y temperatura son, respectivamente, 800 mm y 11,6 °C.

Desde el punto de vista geológico, en la Sierra de la Alfaguara aparecen representadas varias unidades geológicas pertenecientes a los denominados Complejo Alpujárride, Complejo Maláguide y unidades de transición entre ambos complejos tectónicos de las Zonas Internas de la Cordillera Bética (Sanz de Galdeano *et al.*, 1995).

La estructura geológica de la Sierra de la Alfaguara se caracteriza por el apilamiento de escamas tectónicas con una doble vergencia. Dentro de las unidades se distinguen en algunos sectores pliegues de dirección predominante E-W, pero con vergencias hacia el Norte y hacia el Sur, dependiendo de los afloramientos. El conjunto de unidades tectónicas ha sido afectado posteriormente por dos generaciones de fallas NNW-SSE y NNE-SSW (Sanz de Galdeano *et al.*, 1995; Castillo, 1981).

El modelado exokárstico está pobremente representado en la Sierra de la Alfaguara aunque se conoce un buen número de cavidades kársticas gracias a los trabajos

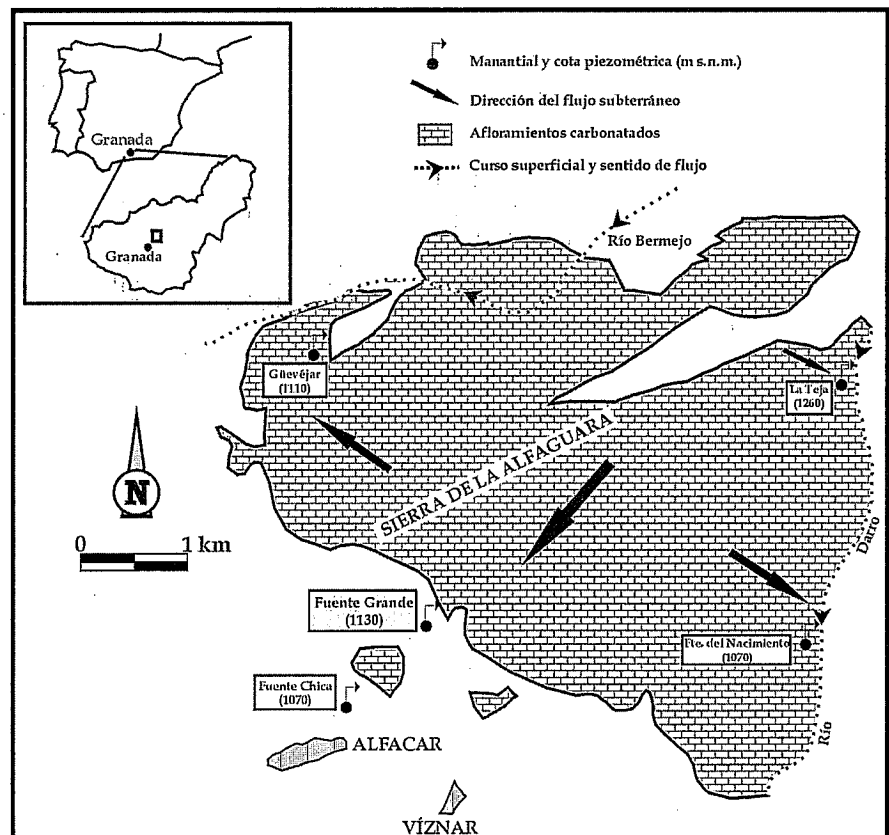


Fig. 1.- Esquema de situación del acuífero de la Sierra de la Alfaguara.

Fig. 1.- Location of Sierra de la Alfaguara aquifer.

espeleológicos desarrollados en la zona (Castillo *et al.*, 1982).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el macizo de la Alfaguara constituye un sis-

tema acuífero (Fernández Rubio, 1964; Castillo, 1981 y Castillo *et al.*, 1982) que ocupa una superficie aproximada de 20 km² y se encuentra limitado, al Norte, por el Río

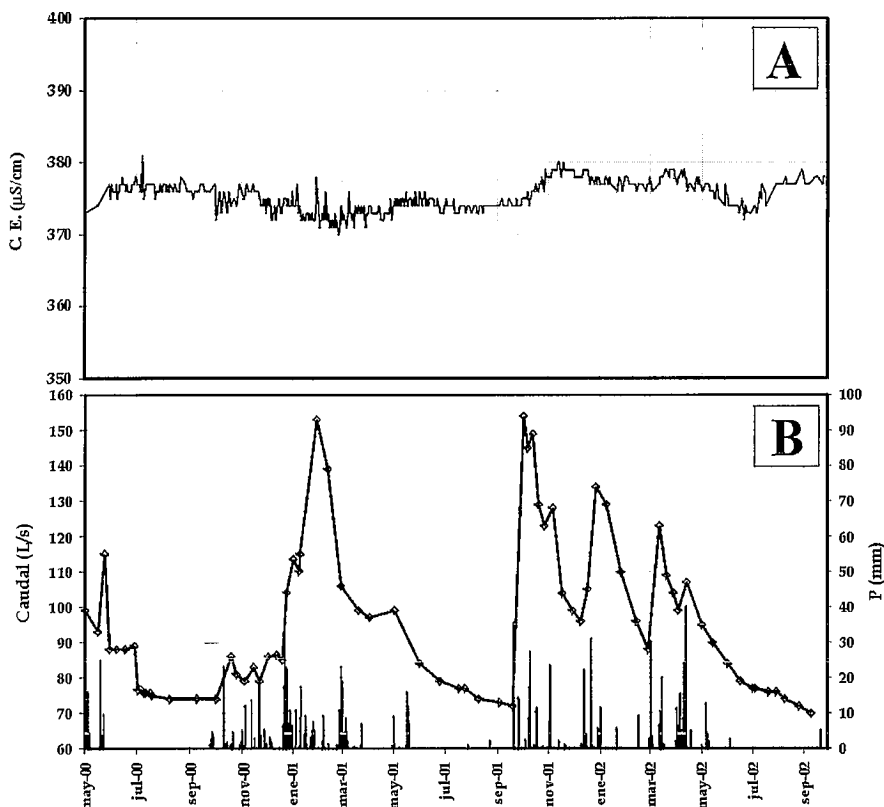


Fig. 2.- Evolución temporal del caudal del manantial de Fuente Grande (B) y de la conductividad eléctrica de sus aguas (A) durante el período de estudio.

Fig. 2.- Time evolution of the outflow (B) and of the electrical conductivity (A) in Fuente Grande spring during the studied period.

Bermejo que se encaja en materiales maláguides de baja permeabilidad; al Este, por el Río Darro que discurre sobre las dolomías alpujarrides y, al Sur y Oeste, por los sedimentos de la depresión de Granada (Fig. 1). Los materiales calizo-dolomíticos que constituyen este sistema acuífero presentan una potencia superior a los 500 m (Castillo *et al.*, 1982).

La recarga del sistema se produce por infiltración del agua de lluvia y, muy ocasionalmente, de nieve, que cae sobre el afloramiento permeable. El acuífero se drena a través de manantiales situados en su bordes meridional y occidental, el más importante

de los cuales es la Fuente Grande de Alfacar. Este manantial surge a una cota de 1130 m (Fig. 1), en el contacto entre los materiales acuíferos carbonatados de este sistema acuífero y los detríticos de baja permeabilidad del relleno de la depresión de Granada.

Desde Mayo de 2000 hasta Septiembre de 2002, se ha llevado a cabo un control hidrodinámico e hidroquímico de esta surgencia, que ha permitido determinar las principales características hidrogeológicas y poder así conocer el grado de organización del drenaje kárstico de este sistema acuífero, lo cual constituye el objetivo principal del presente trabajo.

Caracterización hidrodinámica

El manantial de Fuente Grande durante el periodo estudiado ha presentado un caudal medio de 100 L/s. Su hidrograma (Fig. 2B) se ha elaborado mediante la altura de la lámina de agua en el canal de salida de la surgencia. Al caudal obtenido mediante la correspondiente curva de gastos hay que añadir un caudal de 30 L/s que se deriva en la propia surgencia para abastecimiento a las poblaciones de Víznar y Alfacar. Las lecturas de escala en el canal principal han sido realizadas por la empresa de aguas SE-

RAGUA con una periodicidad variable en función del régimen de precipitaciones. El hidrograma muestra dos crecidas importantes, dentro de las cuales es posible diferenciar las respuestas de la surgencia, aunque éstas se produzcan a pequeña escala y con un cierto desfase, en relación a las lluvias (Fig. 2B). Las crecidas presentan una forma puntiaguda, aunque no existen grandes diferencias de caudal entre el final del agotamiento (70 L/s) y la punta de la crecida (155 L/s), es decir, el caudal se duplica como respuesta a las precipitaciones. Este resultado es muy similar al obtenido por Jiménez *et al.* (2002) en otras surgencias de la Cordillera Bética, las cuales se caracterizan por drenar sistemas de tipo fisurado.

Se ha realizado el análisis de dos curvas de agotamiento del hidrograma de la surgencia (Figs. 3A y 3B), siguiendo la metodología propuesta por Mangin (1970, 1975). El análisis del agotamiento permite constatar que la duración de las curvas analizadas es de 84-87 días, caracterizadas éstas por coeficientes de agotamiento (α) de 1,1 y 1,4 x 10⁻³ días⁻¹, respectivamente (Tabla 1). Estos valores indican que el agotamiento se produce de manera lenta. Así, al representar el porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo (Figs. 3C y 3D), se observa que si se mantuvieran las condiciones del agotamiento se drenaría menos del 35% de dicho volumen al cabo de un año.

El valor del parámetro k (Mangin 1970, 1975), representa la relación entre el volumen dinámico y el volumen emitido en un ciclo medio (volumen de tránsito). Los valores obtenidos para dicho parámetro en ambas curvas son de 2'09 y 1'76 (Tabla 1), lo que traduce el elevado poder regulador de este sistema acuífero y la importancia de la zona saturada. No obstante, los valores de k obtenidos son inusuales, no contemplados en esta clasificación de Mangin (op. cit.) que como máximo alcanza el valor 1, ya que no contempla la posibilidad de que el volumen dinámico sea mayor que el volumen de tránsito (Mangin, 1970). Por lo tanto, parece claro que la metodología de Mangin (1970, 1975) presenta limitaciones cuando se trata de aplicar en regiones con características climatológicas diferentes al área donde fue desarrollada (Pirineo francés), aspecto que ya ha sido puesto de manifiesto anteriormente por varios autores (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1990; Moral, 1992; Andreo, 1997; Jiménez *et al.*, 2002). Aun así, estas limitaciones sólo habría que tenerlas en cuenta en el caso de comparar sistemas acuíferos carbonatados sometidos a distintas condiciones climáticas, por lo que dentro de un mismo ámbito climático sí podría ser utilizado

	D _a (días)	α (días ⁻¹)	k
1 ^{er} agotamiento	84	1,1E-03	2,09
2 ^o agotamiento	87	1,4E-03	1,76

Tabla I.- Resultados del análisis de las curvas de agotamiento del manantial de Fuente Grande. (D_a) duración del agotamiento, (α) coeficiente de agotamiento, (k) parámetro de Mangin (1970, 1975).

Table I.- Results of analysis of depletion curves of Fuente Grande spring. (D_a) depletion time, (α) depletion coefficient, (k) Mangin parameter (1970, 1975).

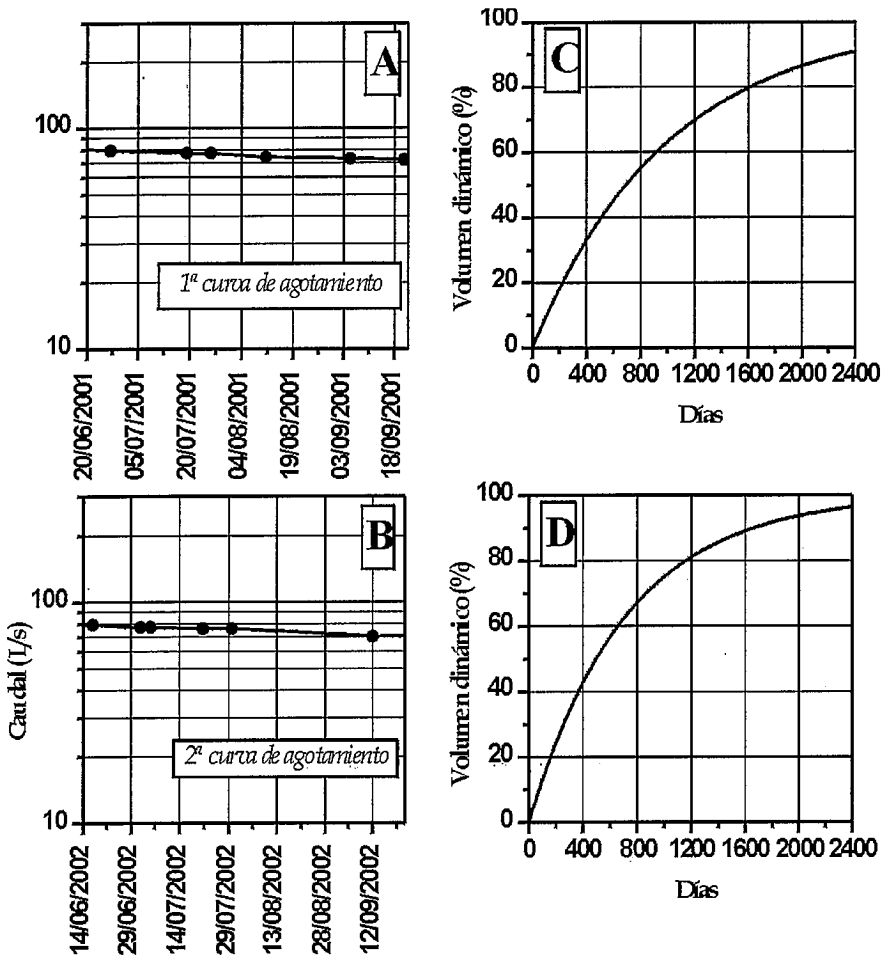


Fig. 3.- A la izquierda (A y B), curvas de agotamiento analizadas en el manantial de Fuente Grande. A la derecha (C y D), porcentaje del volumen dinámico drenado en función del tiempo.

Fig. 3.- On the left (A & B), depletion curves of Fuente Grande spring. On the right (C & D), percentage of dynamic volume drained over time.

como criterio comparativo del poder regulador de diversos sistemas acuíferos.

Caracterización hidroquímica

Además del control del caudal, se ha llevado a cabo un control hidroquímico del agua drenada por la Fuente Grande, para determinar la composición de sus aguas y caracterizar así el funcionamiento del sistema acuífero. Esta metodología, conjuntamente con el análisis hidrodinámico, permite obtener información sobre el grado de organización del drenaje kárstico, ya que existe una estrecha relación entre la variabilidad temporal de la mineralización y el grado de karstificación funcional del acuífero (Shuster y White, 1971; Miserez, 1973; Bakalowicz, 1979; Antigüedad, 1986; Andreo, 1997; Liñán *et al.*, 2001) para cada una de las diferentes situaciones hidrodinámicas.

En el manantial de Fuente Grande se han realizado muestreos, a paso de tiempo quincenal, para estudiar la evolución tem-

poral de la composición química en relación a la respuesta hidrodinámica de la surgencia. Además, se dispone de medidas de conductividad eléctrica del agua drenada por dicha surgencia con una periodicidad prácticamente diaria. Este parámetro, de fácil medida en el campo, aporta una valiosa información acerca de como varía el grado de mineralización de las aguas de un sistema acuífero, y como ya se ha indicado anteriormente, presenta una relación directa con el grado de karstificación funcional y, por tanto, con la importancia de las reservas existentes dentro del sistema (Bakalowicz, 1979).

Las aguas drenadas por esta surgencia son bicarbonatadas cálcico-magnésicas, como era de esperar dada la naturaleza carbonatada de los materiales que drena. Teniendo en cuenta los datos de la tabla 2, puede afirmarse que existe, en general, una gran homogeneidad en las aguas del sistema. Así, la conductividad media de las aguas de lluvia de este sector es de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que la de las aguas drenadas

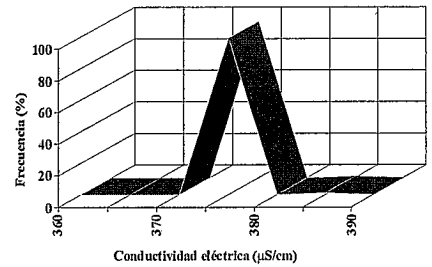


Fig. 4.- Gráfico de frecuencias elaborado a partir de los datos de conductividad eléctrica del agua del manantial de Fuente Grande.

Fig. 4.- Frequency curve for the electrical conductivity of water drained by Fuente Grande spring.

por el manantial es de 375 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 2), lo cual indica que la mineralización de esta agua se adquiere fundamentalmente por disolución del material acuífero. Además, conviene destacar que los valores del coeficiente de variación de dicho parámetro son considerablemente más bajos en las aguas del manantial que en las aguas de lluvia (Tabla 2), lo que pone de manifiesto la capacidad de homogeneización de la señal de entrada por parte del sistema acuífero. La curva de frecuencias de los valores de conductividad eléctrica (Fig. 4), elaborada según la metodología propuesta por Bakalowicz (1979), es marcadamente unimodal, por lo que de acuerdo con el mismo autor, se podría utilizar el coeficiente de variación como criterio para deducir que se trata de un sistema fisurado, poco o nada karstificado.

Las precipitaciones que se registran durante el período de estudio no producen a gran escala variaciones significativas de la conductividad eléctrica (Fig. 2A). No obstante, a escala de detalle (entre 370-380 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y a partir de la representación de la media móvil de rango 9 de los valores de conductividad eléctrica a nivel diario (Fig. 5), sí se observa una sincronía entre las variaciones de caudal y conductividad eléctrica, de manera que paralelamente a las crecidas hidrodinámicas, se evidencian pequeños procesos de dilución por mezcla del agua de lluvia con aguas que presentan un mayor tiempo de residencia dentro del acuífero. Además, a lo largo del período de estudio la conductividad eléctrica presenta también una variación prácticamente sinusoidal (Fig. 2). Esta única variación a escala anual refleja nuevamente una homogeneización por parte del sistema acuífero en cuanto a la respuesta hidroquímica.

Todas estas características indican que se trata de un sistema con escasa karstificación funcional, en el que el agua no circula

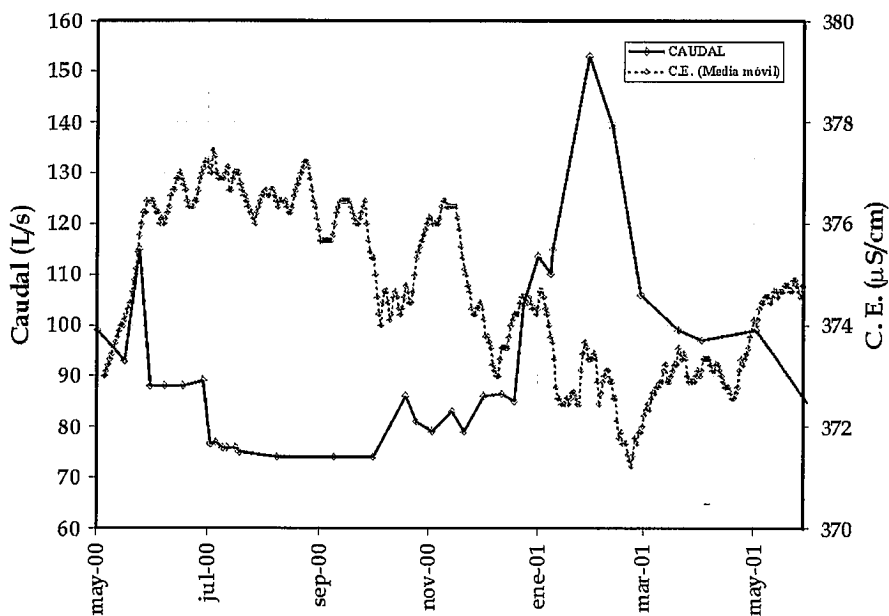


Fig. 5.- Evolución temporal del caudal del manantial de Fuente Grande y de la media móvil de rango 9 de los valores de conductividad eléctrica a nivel diario.

Fig. 5.- Time evolution of the outflow and moving average of the daily electrical conductivity in Fuente Grande spring.

por grandes conductos sino que lo hace fundamentalmente por pequeñas fisuras lo que produce una respuesta tanto hidrodinámica como hidroquímica de pequeña magnitud, sobre todo en el caso de ésta última.

Discusión y conclusiones

Desde Mayo de 2000 hasta Septiembre de 2002, se ha realizado un control hidrodinámico e hidroquímico del manantial de Fuente Grande, el más importante de los que drenan el macizo carbonático de Sierra Alfaguara.

Los eventos pluviométricos registrados durante el periodo analizado producen crecidas que presentan una forma puntiaguda, aunque no existen grandes diferencias de caudal entre el final del agotamiento y la punta de la crecida. Una primera aproximación al funcionamiento hidrodinámico del sistema drenado por el manantial de Fuente Grande ha permitido calcular el coeficiente de agotamiento $\alpha = 1,2 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$, indicativo de un vaciado muy lento. Además, el valor de k obtenido (2) es característico de un sistema con un gran poder regulador, en definitiva, poco o nada karstificado (Mangin, 1975), aunque el valor de "k" pone de manifiesto que esta metodología no es completamente adecuada para la comparación de sistemas acuíferos sometidos a diferentes condiciones climáticas.

Los datos hidroquímicos reflejan la capacidad de homogeneización de la señal de entrada (mineralización del agua de lluvia). Las precipitaciones que se registran durante

el período de estudio producen pequeñas disminuciones de los valores de la conductividad eléctrica, aunque la característica principal, a lo largo del período de estudio, es una única variación a escala anual de este parámetro que refleja nuevamente una homogeneización por parte del sistema acuífero en cuanto a la respuesta hidroquímica. La curva de frecuencias de la conductividad eléctrica, marcadamente unimodal, junto con el coeficiente de variación obtenido son indicativos de un bajo grado de karstificación funcional (Bakalowicz, 1979).

Teniendo en cuenta todos estos datos, se pone de manifiesto que el sistema drenado por el manantial de Fuente Grande presenta una zona saturada extensa capaz de amortiguar las variaciones en el quimismo de la señal de entrada (agua de lluvia), así como una importante regulación de las aportaciones lo que sugiere una escasa jerarquización del drenaje kárstico.

Agradecimientos

Este trabajo constituye una contribución a los proyectos PB98-1397 y REN2002-01797/HID de la DGI e IGCP 448 de la UNESCO, así como al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía. Se agradece al Parque Natural de la Sierra de Huétor (Granada) la cesión de los datos de lluvia de la estación de Puerto Lobo, y a la Empresa SERAGUA por las lecturas de escala y toma de muestras del manantial de Fuente Grande.

	Conductividad eléctrica	
	Lluvia Alfaguara	Fuente Grande
n	20	448
m	25	375
s	13,5	2,2
c.v.	55,2	0,6

Tabla II.- Parámetros estadísticos de la conductividad eléctrica (µS/cm) correspondientes al agua del manantial de Fuente Grande y al agua de lluvia. (n) numero de muestras, (m) media aritmética, (s) desviación típica, (c.v.) coeficiente de variación.

Table II.- Statical summary of the electrical conductivity of the water (µS/cm) in Fuente Grande spring and in rainfall water. (n) number of samples, (m) average, (s) standard deviation, (c.v.) variation coefficient.

Referencias

Andreo, B. (1997): Hidrogeología de acuíferos carbonáticos en las Sierras Blanca-Mijas. SPUMA-CHS, Málaga, 489 p.
 Antigüedad, I. (1986): Tesis Doctoral, Univ. País Vasco, 338 p. y anexos.
 Bakalowicz, M. (1979): Thèse, Univ. P. et M. Curie, París-VI, Géol. Dyn. et Lab. Souterrain CNRS; 269 p.
 Castillo-Martín A., (1981): I Simposio sobre el Agua en Andalucía, Granada, 627-641.
 Castillo-Martín A., Benavente J. y Lozano A., (1982): *Reunión Monográfica sobre el karst*, Larra, 217-229.
 Cruz-Sanjulián, J.J.; Benavente, J.; Moral, F.; Martínez, J. C.; López-Geta, J. A.; Rubio Campos, J. C.; Aragón Rueda, R. y Peinado, T. (1990): *Investigación de acuíferos carbonáticos (Sierras de Cazorla y Segura)*. Universidad de Granada-ITGE, 235 p.
 Fernández-Rubio, R. (1964): *Bol. R. Soc. Esp. de Historia Natural*, 62: 309-341.
 Jiménez, P., Carrasco, F., Andreo, B., Durán, J.J. y López-Geta, J.A (2002): *Karst and Environment*, Nerja (Málaga), 105-113.
 Liñán, C; Carrasco, F. y Andreo, B. (2001): *V Simposio sobre el Agua en Andalucía*, Almería, 2, 63-72.
 Mangin, A. (1970): *Ann. Speleol.*, 25(3): 581-610.
 Mangin, A. (1975): Tesis Doct., Univ. D. En: *Ann. Speleol.*, 29(3): 581-610; 29(4): 495-601; 30(1): 21-124.
 Miserez, J.J. (1973): Tesis Doct.. Univ. Neuchâtel, 313 p
 Moral, F. (1992): Tesis Licenciatura, Universidad de Granada, 126 p.
 Sanz de Galdeano C., Delgado F. y López-Garrido A.C. (1995): *Rev. Soc. Geol. España*, 8(3), 239-250.
 Shuster, E.T. y White, W.B. (1971): *Jour. Hydrol.*, 14, 93-128.