

Caracterización físico-química de las aguas subterráneas de la Sierra de Segura (Cordillera Bética)

Physical and chemical characterization of Sierra de Segura groundwater (Betic Cordillera)

F. Moral Martos ⁽¹⁾, J. J. Cruz Sanjulián ⁽²⁾ y M. Rodríguez Rodríguez ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ciencias Ambientales. Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera, km 1. 41013 Sevilla.

⁽²⁾ Instituto del Agua. Universidad de Granada. C/ Ramón y Cajal n 4. 18071 Granada.

ABSTRACT

Periodic control of several physical and chemical data of Sierra de Segura springs has allowed us to determine that cold (from 9°C to 11°C) and low salinity (0.25 to 0.35 g/L) calcium and calcium-magnesium bicarbonate groundwater prevail in many parts of the aquifer systems. This situation could be related to the peculiar hydrogeological and climatic characteristics of the study area.

Key words: Sierra de Segura, karst aquifer, groundwater temperature, hydrochemistry

Geogaceta, 37 (2005), 83-86
ISSN:0213683X

Introducción. Marco geológico e hidrogeológico

La Sierra de Segura, situada en los confines de las provincias de Jaén, Granada y Albacete, presenta una longitud aproximada de 100 km, entre el Calar del Mundo (al NNE) y la Sierra del Pozo (en el extremo suroccidental) y una anchura media de 30 km.

En estas montañas, que en varios puntos superan los 2000 metros de altitud, tienen sus fuentes los principales ríos del sur de la Península Ibérica: el Segura y sus afluentes Madera, Zumeta, Tus, Taibilla y Mundo y el Guadalquivir (que nace entre la Sierra del Pozo y la de Cazorra) y sus afluentes Borosa, Aguamulas, Guadalimar, Guadalentín, Castril y Guardal.

Desde el punto de vista geológico, la Sierra de Segura pertenece al dominio Prebético Interno, caracterizado por una potente sucesión estratigráfica, con un espesor que supera los 2000 metros, de rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas de naturaleza carbonática y detrítica (Azema *et al.*, 1979; Rodríguez Estrella, 1978). De oeste a este, los afloramientos son progresivamente más modernos, aunque en superficie se observa un claro predominio de los materiales cretácicos.

La estructura, de edad alpina, se caracteriza por pliegues de dirección NNE-SSO, por lo general vergentes al ONO, y fallas de desgarre dextrógiras de dirección perpendicular a los ejes de los plie-

gues. En una etapa distensiva posterior varios sistemas de fallas normales dan lugar a algunas depresiones tectónicas.

En las zonas más altas del macizo segureño afloran extensamente calizas y dolomías, mayoritariamente de edad Cretácico superior y Terciario, que constituyen un único acuífero con varios cen-

tenares de metros de espesor (Cruz Sanjulián *et al.*, 1990; Moral *et al.*, 1992).

Estos afloramientos carbonáticos forman una extensa altiplanicie, situada a una altitud media de 1750 metros, que representa el área de recarga principal de los acuíferos, como se deduce del notable desarrollo de las formas kársticas superficiales.

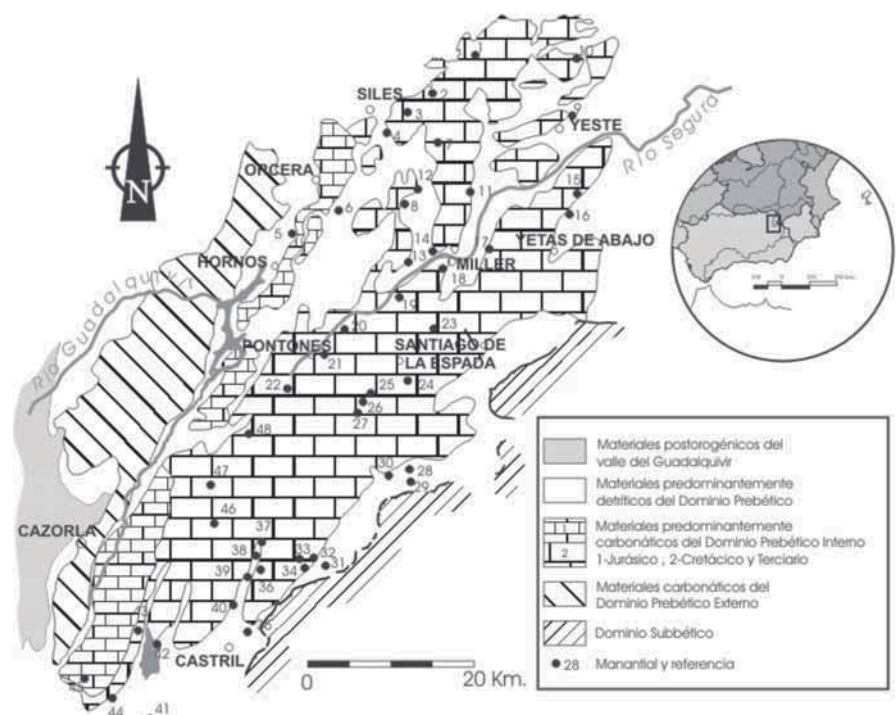


Fig. 1.- Mapa de localización de los afloramientos carbonáticos y de los principales manantiales de la Sierra de Segura.

Fig. 1.- Location map showing carbonate outcrops and major springs of Sierra de Segura.

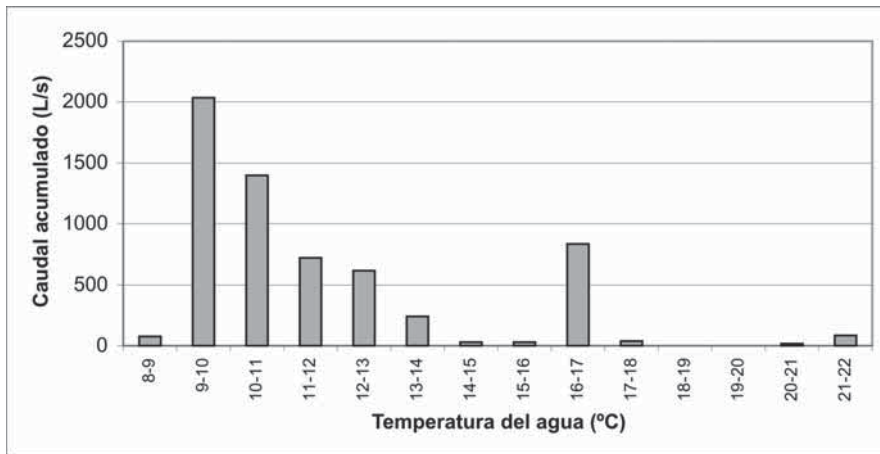


Fig. 2.- Relación entre la temperatura de las aguas subterráneas y el caudal drenado por los acuíferos segureños (manantiales muestreados durante el estiaje de 2002).

Fig. 2.- Groundwater temperature versus accumulated flow drained by Segura aquifers in summer 2002.

Desde el punto de vista climático, las peculiares características topográficas de las Sierras de Cazorla y Segura (las líneas de cumbres son perpendiculares a la dirección de los vientos atlánticos y cierran por el este el Valle del Guadalquivir) determinan una pluviometría sensiblemente mayor que la de las tierras bajas circundantes. En el caso de la Sierra de Segura, además, existe un acusado contraste entre la vertiente de barlovento, en la que la precipitación media suele superar 1000 mm/año, y la de sotavento, donde llegan a registrarse valores medios por debajo de 500 mm/año.

Estas peculiares características geológicas y climáticas de la Sierra de Segura determinan la existencia de numerosos sistemas acuíferos kársticos cuyos recursos hídricos totalizan en conjunto 300 hm³/año.

Los datos físico-químicos aportados en este trabajo corresponden a medidas efectuadas entre los años 1990 y 2002 en 48 manantiales (Fig. 1 y Tabla I).

Temperatura de las aguas subterráneas

Las medidas efectuadas *in situ* permiten concluir que el agua de los principales manantiales de la Sierra de Segura presenta temperaturas comprendidas entre los 8.5 °C de Fuente Segura y los 21 °C de Los Tubos (Tabla I).

De los datos obtenidos en el estiaje de 2002, relativos a la temperatura del agua y al caudal acumulado drenado por los manantiales (Fig. 2) se deduce que la temperatura de las aguas subterráneas casi siempre está comprendida entre 9 y 14 °C y que los manantiales más fríos son espe-

cialmente caudalosos, puesto que más del 50 % del agua drenada presenta una temperatura comprendida entre 9 y 11 °C.

La principal excepción corresponde al manantial del Molino de Peralta, con un caudal próximo a 1000 L/s y una temperatura de 16 °C, y puede ser explicada por el peculiar funcionamiento hidrogeológico de este manantial, en el que casi todo el caudal procede de las filtraciones del embalse de La Bolera.

Por último, cabe destacar la existencia de unas pocas surgencias ligeramente termales (temperatura próxima a 20 °C), relacionadas con flujos profundos en niveles permeables del Jurásico y del Cretácico inferior, entre las que se encuentran los manantiales de Los Tubos, La Toba de Jartos y El Nacimiento.

Comparando la relación entre la tem-

peratura del agua de los principales manantiales segureños, la cota de la surgencia y el gradiente térmico exterior (Fig. 3), se puede concluir que, según el criterio de Schöeller (1962), la mayor parte de los manantiales presentan aguas frías, es decir, que la temperatura del agua es inferior a la temperatura media del aire en el punto de surgencia.

Este hecho puede ser atribuido al efecto refrigerante de las aguas de infiltración frías propias de los karsts activos de las áreas montañosas (Bögli, 1980).

Facies hidroquímica y contenido iónico

Las aguas subterráneas de los acuíferos calizo-dolomíticos del Prebético occidental se caracterizan por presentar una mineralización baja, de manera que el total de sólidos disueltos suele estar comprendido entre 0.25 y 0.35 g/L, con la excepción de los manantiales asociados a sistemas termales en los que llegan a registrarse hasta 0.65 g/L.

Como cabía esperar (Tabla I), esta débil mineralización se manifiesta en unos valores bajos de conductividad eléctrica del agua, que generalmente están comprendidos entre 220 y 420 mS/cm, con la salvedad lógica de las aguas termales, en las que se miden hasta 770 mS/cm (Toba de Jartos).

La figura 4 permite comprobar que existe una correlación positiva relativamente buena entre la temperatura y la mineralización de las aguas.

Evidentemente, en aguas que circulan por materiales calizos y dolomíticos las facies hidroquímicas son muy marcadas

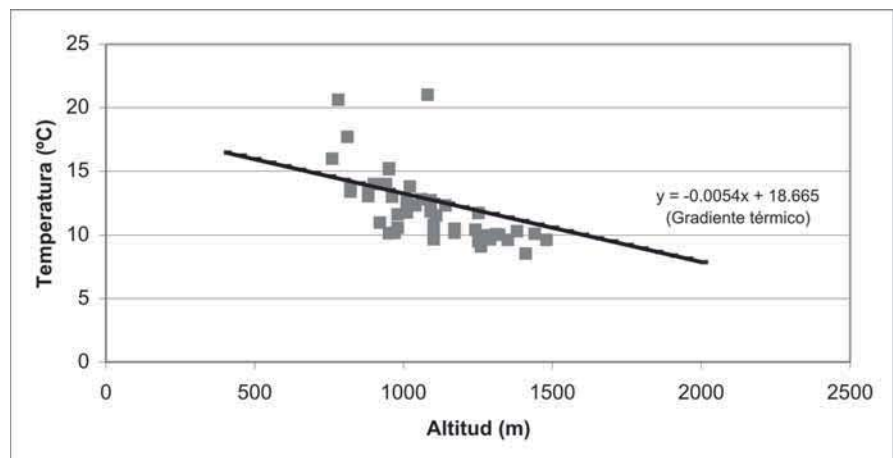


Fig. 3.- Relación entre la temperatura del agua y la cota de surgencia de los manantiales. Se ha representado también el gradiente térmico ambiental a partir de los registros de temperatura de las estaciones termométricas existentes en la Sierra de Segura.

Fig. 3.- Relationship between water temperature and spring altitude. The thermal gradient calculated from temperature records in weather stations of Sierra de Segura is also drawn.

Ref.	Manantial	T(°C)	Cond.	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺
1	El Molino	10.6	253	184.1	3.2	2.0	36.7	11.7	0.9
2	Arroyo Frio	11.8	263	206.8	2.3	1.9	40.5	13.2	0.9
3	San Blas	13.0	305	233.8	3.7	2.1	43.9	15.5	1.1
4	Era del Concejo	14.0	347	277.2	3.3	2.6	54.5	17.4	1.3
5	El Ojuelo	13.4	414	272.2	16.9	4.2	63.4	16.5	2.2
6	La Maleza	13.1	522	337.0	22.5	6.0	57.0	19.5	6.0
7	Las Pegueras	11.0	272	191.0	4.0	4.0	37.0	10.0	3.0
8	El Tejo	10.0	326	243.6	6.2	5.7	50.1	16.8	2.0
9	La Toba de Jartos	20.7	762	347.6	65.0	89.5	69.3	30.8	54.9
10	El Nacimiento	17.8	692	353.0	85.5	46.0	71.0	37.0	30.0
11	Alcantarilla	13.4	209	205.4	3.6	1.6	48.0	9.4	0.9
12	Santa Ana	13.4	335	259.1	5.4	1.6	47.2	18.1	1.1
13	Gorgocin	11.7	282	210.8	4.0	3.4	42.2	17.4	1.7
14	Cuatro Caños	13.7	292	226.2	5.1	4.3	41.7	18.7	2.6
15	El Arroyo	15.3	376	271.6	3.8	5.3	53.8	22.2	3.2
16	Sege	15.2	372	271.0	3.2	5.3	53.8	21.9	3.2
17	Torcal	13.8	360	252.5	2.9	4.8	49.9	20.3	2.5
18	Casa de Arriba	12.3	321	219.3	3.7	3.8	50.9	12.1	1.6
19	La Toba	12.7	278	201.4	5.5	4.4	43.9	13.1	2.0
20	Cueva del Agua	10.4	228	185.2	3.1	3.8	43.9	10.8	1.7
21	Molino de Loreto	10.0	273	204.8	5.1	4.9	45.0	11.8	1.8
22	Fuente Segura	8.5	224	168.7	3.1	4.3	45.6	5.1	1.4
23	Tobos	11.6	328	241.3	4.8	4.5	50.9	14.7	2.4
24	El Cerezo	11.4	360	266.9	4.8	2.4	66.8	14.2	2.0
25	El Berral	9.6	300	217.5	5.3	5.0	48.7	11.4	1.8
26	El Muso	10.1	294	222.3	3.9	4.1	45.9	12.8	1.8
27	Arroyo Frio	9.6	323	236.4	4.0	4.5	47.4	13.3	2.0
28	Los Agujeros	10.1	312	224.3	4.5	4.3	58.1	5.8	1.7
29	Saúco	10.3	304	222.0	2.5	6.5	56.5	4.0	2.0
30	Montilla	9.6	267	188.3	5.6	4.8	56.2	2.4	1.8
31	San Clemente	12.8	400	259.0	10.0	6.0	54.5	14.5	4.0
32	La Natividad	11.8	360	266.7	6.8	5.9	55.8	15.6	3.0
33	Fuente Alta	12.3	298	213.5	7.6	5.4	51.7	9.8	2.8
34	En medio	12.7	282	207.8	5.5	5.0	48.0	10.3	3.3
35	Los Tubos	21.0	534	300.4	23.9	31.9	53.3	28.9	22.0
36	Juan Ruiz	10.2	278	205.1	4.8	4.3	45.2	12.9	1.8
37	Nac. Castril	9.5	246	188.4	5.8	4.6	41.7	11.4	1.6
38	H. del Morcillo	10.8	262	210.3	3.3	4.0	40.0	16.5	2.0
39	La Magdalena	10.1	271	216.8	3.3	4.2	39.0	18.2	1.8
40	Lézar	11.6	328	235.9	6.7	5.3	46.8	17.1	2.3
41	M. de Peralta	16.0	361	226.7	8.2	22.0	44.4	19.1	16.2
42	Fuente Gadalentin	10.2	271	206.2	3.5	5.1	46.3	15.4	2.3
43	Guazalmanco	10.5	381						
44	Siete Fuentes	14.0	419						
45	La Canal			202.9	41.9	7.0	58.1	17.0	15.4
46	Aguas Negras	9.1	291	217.4	5.1	4.7	43.7	14.4	1.7
47	Minicentral	10.1	312	216.0	4.5	4.0	42.0	20.5	2.5
48	Aguamulas	9.7	230	166.9	5.0	4.7	41.8	6.8	1.3

Tabla I.- Valores medios de temperatura, conductividad eléctrica (en mS/cm) y concentración de iones mayoritarios (en mg/L) en los manantiales de la Sierra de Segura.

Table I.- Mean groundwater temperature, electrical conductivity (in mS/cm) and major component contents (in mg/l) of Sierra de Segura springs.

mente bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcico-magnésicas (Fig. 5), de manera que los iones CO₃H⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺ constituyen más del 90 % de los sólidos disueltos en el agua, mientras que los contenidos en cada uno de los restantes constituyentes mayoritarios (SO₄⁼, Cl⁻ y Na⁺) son muy bajos, normalmente inferiores a 6 mg/L. De nuevo, la excepción está representada por las aguas ligeramente termales, aunque la concentración en ellas de estos últimos iones nunca supera los 100 mg/L.

El contenido en calcio está comprendido entre 36.7 mg/L (El Molino) y 71 mg/L (El Nacimiento), aunque aproximadamente el 75 % de las aguas subterráneas drenadas por los acuíferos estudiados presentan concentraciones de 40 a 50 mg/L.

En el caso del magnesio, la variabilidad es mucho mayor: desde 2.4 mg/L (Montilla) hasta 37 mg/L (El Nacimiento), con cerca del 70 % del volumen de agua drenado con concentraciones comprendidas entre 10 y 16 mg/L. Es interesante señalar que, mientras en el caso del calcio la relación entre los valores mínimos y máximos es de 1 a 2, en el del magnesio se eleva de 1 a 15.

Por lo que respecta al tercer ion importante, el bicarbonato, los valores extremos de concentración son 166.9 mg/L (Aguamulas) y 353 mg/L (El Nacimiento) y casi el 70 % del caudal drenado posee una concentración incluida en el rango 180-220 mg/L.

Por último, más del 95 % del flujo de los principales manantiales de la Sierra de Segura presenta contenidos muy bajos, inferiores a 6 mg/L, en cada uno de los restantes iones mayoritarios (SO₄⁼, Cl⁻ y Na⁺), que en buena medida parecen proceder de la concentración por evaporación a partir de los aportes de las aguas de precipitación. Sólo el 5 % restante del caudal drenado posee contenidos más elevados en estos iones, lo que se atribuye a aportes litológicos relacionados con la circulación subterránea a través de materiales distintos a los del acuífero principal del Cretácico superior-Terciario, y casi siempre corresponde a las aguas ligeramente termales.

Discusión y conclusiones

El control de las características físico-químicas principales de los manantiales más caudalosos ha permitido la caracterización de las aguas subterráneas.

Desde el punto de vista térmico las aguas son frías, con temperaturas ligeramente

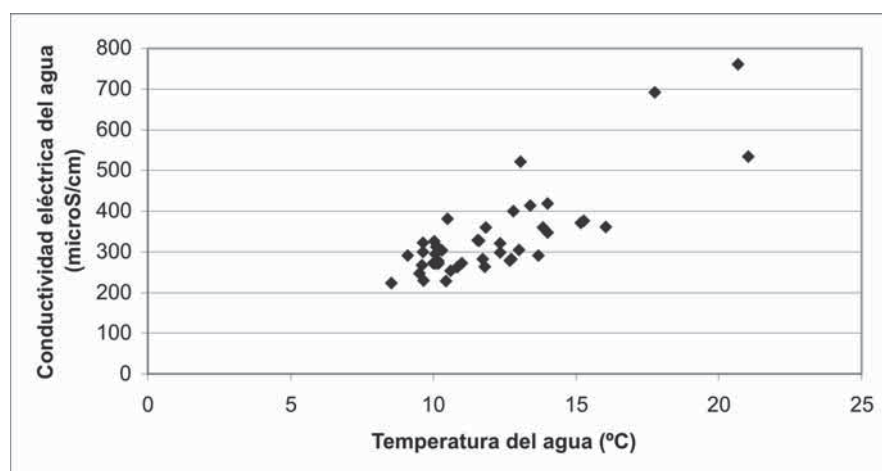


Fig. 4.- Relación entre la temperatura y la conductividad eléctrica del agua de los manantiales.

Fig. 4.- Water temperature versus electrical conductivity of Sierra de Segura springs.

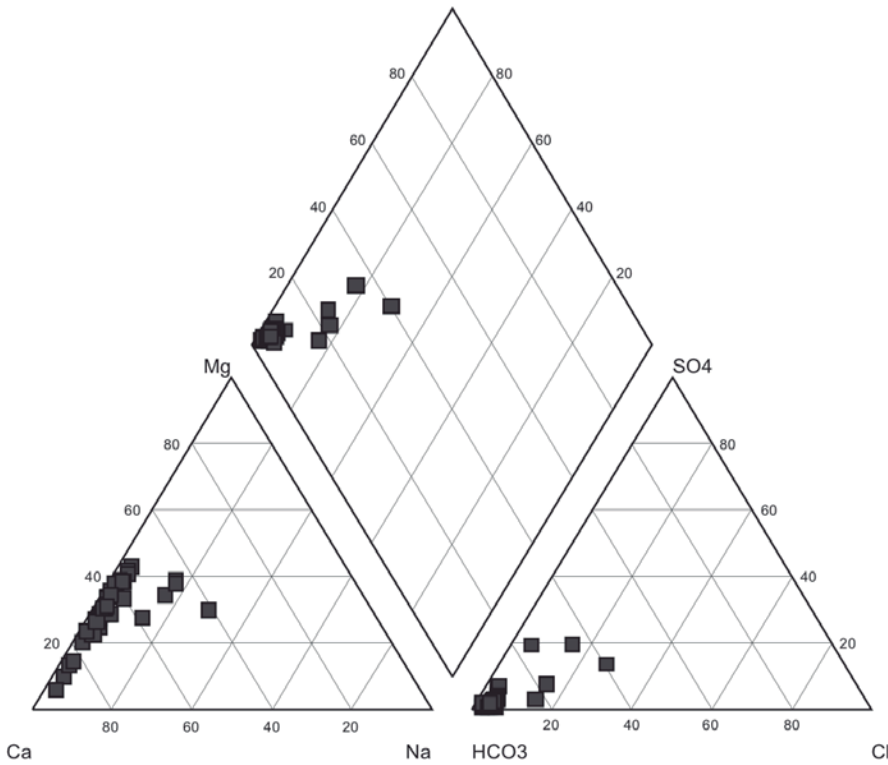


Fig. 5.- Diagrama de Piper del agua de las principales surgencias.

Fig. 5.- Groundwater Piper diagram of the major springs.

mente inferiores a la media ambiental del punto de surgencia.

En cuanto al contenido salino, se trata de aguas poco mineralizadas y de facies hidroquímica bicarbonatada cálcica o bicarbonatada cálcico-magnésica.

La principal excepción está representada por algunos sistemas hidrogeológicos, localizados en los extremos septentrional y meridional del macizo montañoso, que presentan un carácter débilmente termal y una mayor mineralización.

En general, existe una correlación positiva entre la temperatura y el contenido salino de las aguas que puede ser explicada por la especial geometría, condiciones climáticas y funcionamiento de las distintas unidades acuíferas.

En este sentido, cabe destacar la existencia de una zona no saturada de considerable espesor, por lo común más de 500 metros, que condiciona una importante componente vertical descendente del flujo y la gran importancia relativa de la in-

filtración durante los meses de invierno, es decir, de aguas muy frías, con temperaturas sólo muy ligeramente por encima de 0 °C.

A lo largo de la trayectoria descendente las aguas tienden al equilibrio térmico y químico con el medio subterráneo, en definitiva se produce un aumento progresivo de la temperatura y de la mineralización, lo que permite plantear la realización de un balance térmico de los sistemas acuíferos, cuestión que será abordada en posteriores trabajos.

Referencias

Azema, J., Foucault, A., Fourcade, E., García, M., González, J.M., Linares, A., Linares, D., López, A. C., Rivas, P. y Vera, J. A. (1979). *La microfacies del Jurásico y Cretácico de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas*. Univ. Granada, 83 p.

Bögli, A. (1980). *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Springer-Verlag, 283 p.

Cruz Sanjulián, J.J., Benavente, J., Moral, F., Martínez, J.C., López, J. A., Rubio, J.C., Aragón, R. y Peinado, T. (1990). *Investigación de acuíferos carbonatados (Sierras de Cazorla y Segura)*. Univ. Granada-ITGE, 235 p.

Moral, F., Cruz Sanjulián, J.J., Benavente, J. y Aragón, R. (1992). V Simposio de Hidrogeología, XV, 191-205.

Rodríguez Estrella, T. (1978). *Geología e Hidrogeología del sector de Alcaraz-Liétor-Yeste (Prov. de Albacete). Síntesis geológica de la Zona Prebética*. Tesis Doctoral, Univ. Granada, 566 p.

Schöeller, H. (1962). *Les eaux souterraines*. Masson, 642 p.