

# Hidrogeoquímica y microbiología en Los Hervideros del Campo de Calatrava (Ciudad Real)

*Hydrogeochemistry and microbiology of Hervideros (CO<sub>2</sub>-rich waters) in Campo de Calatrava (Ciudad Real).*

J.G., Yélamos(\*), R., Redondo(\*\*), F. De., Castro(\*\*\*), A., Galván(\*\*\*), J., Martínez-Rubio(\*\*\*\*), L., Rebollo(\*\*\*\*\*), P., Ruano(\*\*\*\*), A., Senderos(\*\*\*\*\*), y F.I., Villarroya(\*\*\*\*\*).

(\*) Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. C-VI. Universidad Autónoma. 28049 Madrid.

(\*\*) SIDI. Facultad de Ciencias, C-IX. Universidad Autónoma. 28049 Madrid.

(\*\*\*) Departamento de Microbiología-III. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Complutense. 28040-Madrid.

(\*\*\*\*) TRAGSATEC. C/Ventura Rodríguez, 7. 28008-Madrid.

(\*\*\*\*\*) Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá. 28871-Madrid.

(\*\*\*\*\*\*) Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. 28040-Madrid.

## ABSTRACT

CO<sub>2</sub>-rich springs and wells in the Campo de Calatrava commonly are named Hervideros. This ground water is originated by deep circulation along the fractures of the paleozoic rocks of the area, with residence times longer than 15 years. The hydrochemical facies is mixed-cation bicarbonate and is related to the extinct volcanism of the area. It is a possibility that not all the Hervideros are originated from volcanic or magmatic CO<sub>2</sub>. Bacterial evaluation indicates high values, but probably it is representative of the biomass presence in the proper sampling point instead of the groundwater-microbiology.

**Key Words:** CO<sub>2</sub>-rich water, hydrogeochemistry, groundwater microbiology, Campo de Calatrava.

Geogaceta, 26 (1999), 115-118  
ISSN: 0213683X

## Introducción

La denominación popular de *Hervideros* se aplica a una serie de puntos de agua (manantiales y pozos) que aparecen distribuidos dentro y en las inmediaciones de la región volcánica del Campo de Calatrava, sita en el sector central de la provincia de Ciudad Real. La característica más llamativa de estos puntos de agua es el escape de burbujas de CO<sub>2</sub>, de manera que recuerdan el aspecto de *agua hirviendo*. Estas aguas con desprendimiento de gas carbónico también suelen presentar un elevado contenido de hierro en disolución, lo que les confiere un sabor peculiar de manera que algunas reciben la denominación de *fuentes agrias*.

Distribuidas por toda el área de Campos de Calatrava, existen (o existieron) casi una veintena de puntos de agua con carácter carbónico. Algunos de estos manantiales o pozos dieron lugar a la implantación de balnearios, especialmente durante el siglo pasado (la edad de oro de los establecimientos termales); los más renombrados fueron los Baños del Emperador, los de Fuensanta y los de Villar del Pozo. Actualmente no queda ningún balneario en activo, si bien la Fuente Agría, sita en medio de la localidad de Puertollano, recibe una constante afluencia de vecinos que utilizan sus aguas para bebida.

El presente trabajo recoge un análisis de la composición química de estas aguas subterráneas de naturaleza peculiar, así como un primer estudio de la microbiología presente, basado en la detección de la presencia de bacterias ferruginosas, sulfato-reductoras y microorganismos formadores de biofilms.

## Marco geológico

Los Hervideros, objeto de este trabajo, se localizan en la zona de contacto entre el borde suroriental del Macizo Ibérico y las cuencas cenozoicas por las que discurre el río Guadiana y sus subsidiarios. En dicha región cabe distinguir tres grandes dominios geológicos, de acuerdo con la información suministrada por las hojas MAGNA editadas en la zona.

1) Zócalo paleozoico. Está formado principalmente por cuarcitas y pizarras formando conjuntos de cada una de estas litologías (cuarcita armonicana, pizarras del Llanvirn-Llandeilo) o en alternancias, a las que también se les suman areniscas y conglomerados de cantos de cuarcita. A efectos de este estudio merece indicarse la presencia de cemento ferruginoso en las pizarras y areniscas del Llanvirn-Llandeilo. El conjunto paleozoico se encuentra plegado y fracturado siguiendo directrices hercínicas. Los crestones de

cuarcitas originan destacados relieves residuales.

2) Sedimentos cenozoicos. Constituyen el relleno sedimentario de una serie de cuencas terciarias de pequeña entidad, más o menos desconectadas de la principal cuenca formada por la Llanura Manchega Occidental. Como modelo de relleno más general, la sedimentación comienza con depósitos terrígenos (conglomerados, arenas, areniscas) y finaliza con carbonatos (margas, calizas arenosas y costras calcáreas). Interesa destacar la existencia de brechas con abundante cemento ferruginoso (en ocasiones corazas) fosilizando la superficie de erosión que bisela al zócalo paleozoico. Por último, aparecen terrazas y conos de deyección formados por cantos, arenas y arcillas, así como formaciones superficiales de limos y arcillas en el interior de dolinas y cráteres volcánicos.

3) Rocas volcánicas. Resultado de una actividad volcánica desde el Mioceño hasta el Pleistoceno Inferior, aparecen en la zona lavas, depósitos de piroclastos de caída y piroclastos hidromagmáticos. Petrologicamente corresponden a melilititas olivínicas, nefelinitas olivínicas, basaltos y basanitas. Los volcanes más recientes aún conservan parte de su morfología pero la mayor parte de depósitos aparecen interestratificados con los

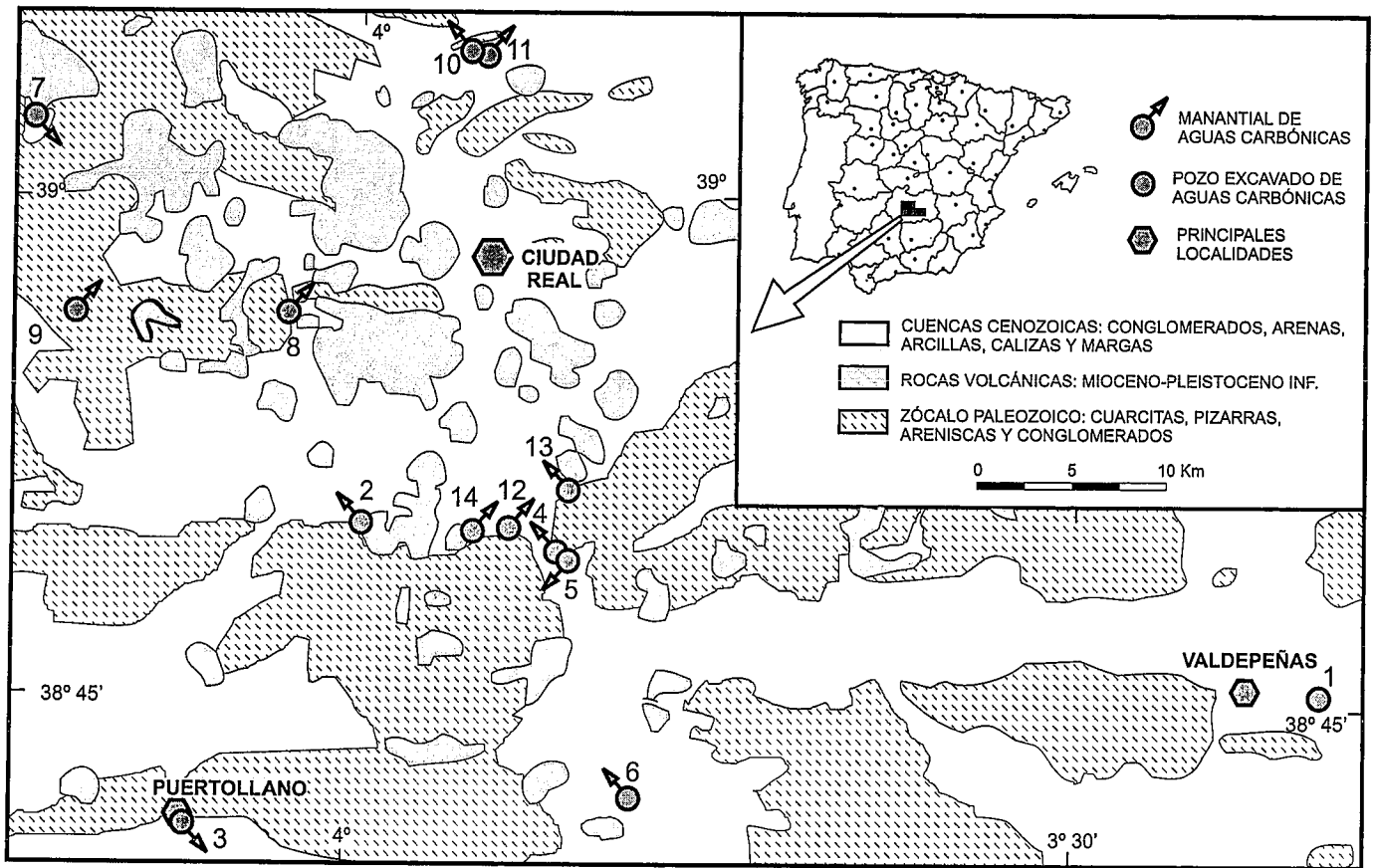


Fig. 1. Mapa geológico simplificado con la localización de los puntos de aguas carbónicas.

Fig. 1. Generalized geological map with location of CO<sub>2</sub>-rich springs and dug wells.

sedimentos cenozoicos.

**Características y génesis de los puntos de agua carbónicos**

De los 14 puntos de agua carbónica que aparecen sobre el mapa de la figura 1 diez se localizan justo en la base de los relieves residuales que originan los materiales paleozoicos (principalmente las cuarcitas), muy próximos al contacto entre el zócalo y los sedimentos terciarios. De esta forma, lo más probable es que estas rocas metamórficas constituyan el área de recarga y de circulación de estas aguas carbónicas.

Aunque los materiales paleozoicos de la zona se consideran impermeables a nivel regional, éstos pueden presentar una suficiente porosidad por fracturación como para permitir la existencia de estos puntos de agua cuyos caudales son más bien bajos: máximo de 0.5-1 l/s en los hervideros de Villar del Pozo.

La correspondencia espacial entre estas aguas carbónicas y la presencia de rocas volcánicas en el Campo de Calatrava, llevó a interpretar a estos puntos de agua como un relicto de esa actividad (Hernández Pacheco, 1932) ya extinguida desde el Pleistoceno Inferior. Bajo este supues-

to de que el CO<sub>2</sub> presente en los hervideros tiene un origen volcánico cabe esperar, en principio, que éste escape a la superficie por las mismas vías que los propios materiales volcánicos. De esta forma, los manantiales carbónicos se deberían encontrar muy próximos o sobre los afloramientos de rocas volcánicas. Esta coincidencia espacial se da muy bien en los casos de los manantiales de Villar del Pozo, Villafranca y los Baños de San Cristóbal. Sin embargo, en otros casos no parece que haya una correspondencia tan buena; como ejemplos pueden citarse el manantial de Colodrilla situado a 4 km del afloramiento de rocas volcánicas más cercano (y junto a los conglomerados ferruginosos del Terciario) y, especialmente, el caso de los Baños de San Joaquín distantes más de 10 km de los afloramientos magmáticos (Fig.1). Esto lleva a proponer la hipótesis de que no todas las aguas carbónicas tengan un CO<sub>2</sub> de origen volcánico.

Algunos de los puntos de agua que muestran emisión de CO<sub>2</sub> podrían corresponder a aguas ferruginosas profundas (medio reductor) que circularían por las fracturas que afectan al zócalo paleozoico y que al aproximarse a la superficie y pasar a condiciones oxidantes, propicia-

rían una precipitación del Fe disuelto en forma de hidróxido férrico, de manera que disminuye el pH a la vez que se desprende anhídrido carbónico.

Esta hipótesis de existencia de aguas carbónicas no ligadas a CO<sub>2</sub> de origen endógeno en el área del Campo de Calatrava, está pendiente de verificación a partir de los resultados de análisis de muestras de <sup>13</sup>C de los Hervideros.

**Hidrogeoquímica**

Dentro de los trabajos del presente estudio se realizó la toma de muestras en nueve puntos agua de naturaleza carbónica, a la vez que se determinaban *in situ* los siguientes parámetros inestables: temperatura, pH, conductividad, bicarbonatos, CO<sub>2</sub>, oxígeno disuelto y Fe en disolución. Los valores obtenidos aparecen en la tabla 1 junto con los datos correspondientes a los análisis de laboratorio. En ninguno de los puntos se detectó la presencia de oxígeno disuelto en concentraciones mayores de 0,1 mg/l, como ya de entrada cabía esperar ante la presencia de hierro en disolución. En los cinco primeros puntos de la tabla también se determinó el contenido de especies reducidas de azufre, sin detectarse su presencia.

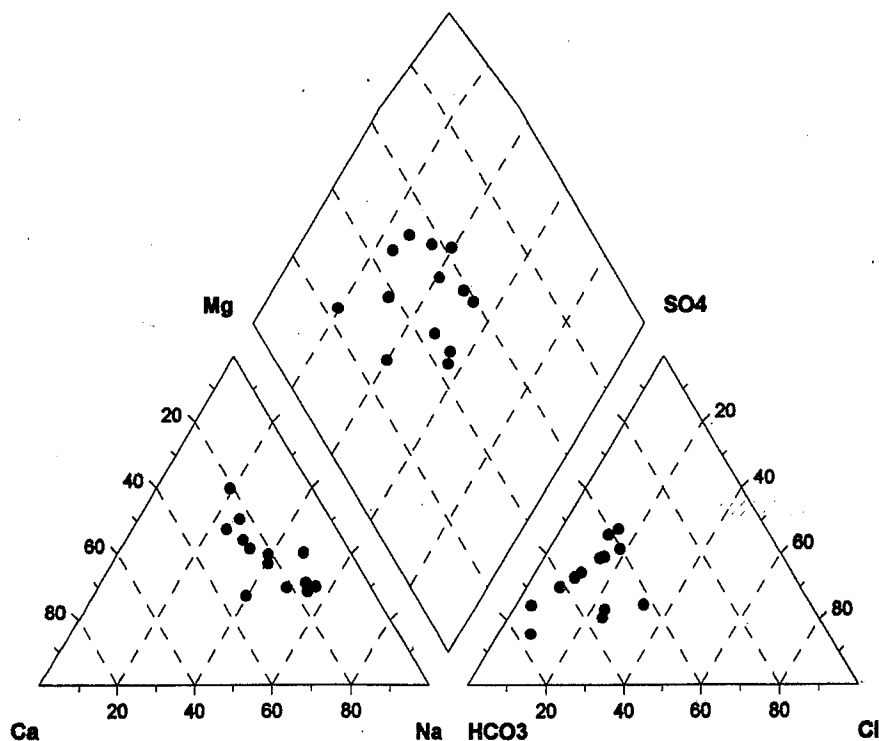


Fig. 2. Representación de las aguas carbónicas del Campo de Calatrava en un diagrama de Piper-Hill-Langelier.

Fig. 2. Piper-Hill-Langelier plot of  $\text{CO}_2$ -rich water of Campo de Calatrava.

Los Baños de Trujillo y del Emperador no son actualmente accesibles al estar cubiertos por las aguas del Embalse de El Vicario, de manera que los análisis químicos que aparecen en la tabla 1 se han tomado de IGME (1985), al igual que los de los Baños de Fuensanta (tampoco accesibles durante la campaña de muestreo) y los de San Cristóbal. Los Hervideros de Villafranca (punto 14 de la Fig. 1) tampoco se pudieron muestrear por estar tapados con basura a fin de evitar la afluencia de visitantes y, en este caso, no disponíamos de análisis previos.

Todos los análisis de la tabla 1 presentan un error en el balance iónico inferior al 10 % y su representación gráfica sobre un diagrama de Piper-Hill-Langelier aparece en la figura 2. A la vista de éste, no se aprecia una tendencia evolutiva clara; la facies hidroquímica aniónica predominante es la bicarbonatada (como cabe esperar en aguas carbónicas) o bicarbonatada sulfatada. La facies catiónica es una mezcla de los tres cationes principales, con un ligero predominio del sodio y en menor medida del magnesio.

En principio se trata de aguas subterráneas bastante evolucionadas, en las que el aporte de  $\text{CO}_2$  de origen volcánico o profundo supondría una gran capacidad para la disolución de los minerales silica-

	Toponimia	Cond.	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	Fe	pH	T°C	$\text{CO}_2$
1	San Joaquín	2870	67	567	2106	0.5	17	430	312	158	4,1	6,91	14,2	2990
2	Villar del Pozo	1085	64	251	501	0.5	10	180	48	50	4,5	6,60	24,5	370
3	Puertollano,	1031	50	240	626	0.5	9,3	99	72	76	9,2	6,54	17,7	1760
4	El Chorrillo.	1935	112	461	1002	7,9	27	369	80	105	0,1	6,75	17,0	1125
5	Piedra de Hierro	3400	259	1233	1406	0.5	47	589	225	191	2,4	7,15	17,2	nd
6	Sacristanfa	1245	97	353	544	0.5	17	107	82	109	0,5	6,89	8,0	nd
7	Piedrabuena	1530	121	526	532	0.5	18	211	99	113	9,4	5,84	18,8	1850
8	Fuentillejo	6500	518	1578	1962	0.5	86	945	247	295	2,7	6,55	7,6	2600
9	Colodrilla	1052	78	269	398	6,3	22	126	61	61	7,4	5,65	15,9	1475
10	Trujillo	6718	1276	1302	2855	nd	87,5	802	521	528	nd	6,7	18,8	1000
11	Emperador	5201	603	814	2379	nd	43,7	401	401	413	nd	6,60	18	1150
12	Fuensanta	4961	596	695	2355	Nd	71,5	735	160	328	nd	7,40	17	180
13	San Cristobal	1259	57	93	936	20	23	107	104	95	nd	7,6	17	47

Tabla 1. Composición química de las aguas de los Hervideros. Valores en mg/l excepto conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), temperatura y pH. Análisis 1 a 9 de este trabajo, 10 a 13 tomados de IGME (1985).

Table 1. Chemical composition of Hervideros. Values mg/l except conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH and temperature. Analysis 1 to 9 from this work, 10-13 from IGME (1985).

Punto de agua	Bacterias ferruginosas	Sulfato reductoras	Formadoras de biofilms
San Joaquín	< 100	10	10000
Puertollano	0	0	0
Villar Del Pozo	180	100	10000
El Chorrillo	260	100	<100
Piedra de Hierro	3200	1000	5000
Sacristanía	5300	100	10000

Tabla 2. Resultados de los análisis microbiológicos. Unidades en células/ml.

Table 2. Microbiology determinations. Units cells/ml.

tados que componen las rocas paleozoicas. El destacado contenido en magnesio que tienen algunos puntos es probable que proceda de que, en su circulación profunda, las aguas se pongan en contacto con las rocas volcánicas básicas.

De la complejidad de la hidrogeoquímica da idea el hecho de que dos manantiales carbónicos separados unos pocos cientos de metros (El Chorrillo y Piedra de Hierro) y brotando sobre la misma litología, presentan diferencias de salinidad del doble (2 y 4 g/l de TSD, respectivamente).

Los valores de temperatura del agua son bajos, generalmente en torno a 16-18 °C, con la excepción de los Baños de Villar del Pozo en los que se alcanzan los 24,5 ° C. Con un gradiente geotérmico medio, esta temperatura supone una circulación del agua a profundidades de al menos 300 m., lo que de nuevo apoya la tesis de que el origen de estas aguas se relaciona con una circulación profunda a través de las fracturas que afectan al zócalo paleozoico. Casi con toda seguridad, los valores tan bajos de temperatura que muestran dos puntos (8 y 7,6 °C) no sean significativos, ya que tuvieron que medirse en aguas semiestancadas.

En el estudio IGME (1985) se hicieron determinaciones de tritio en nueve de los hervideros, obteniéndose valores entre 0,4 y 2,7 U.T.; estos indican que se trata de aguas con un largo tiempo de permanencia en el subsuelo, de al menos una quincena de años.

### Microbiología

Conjuntamente con el muestreo para los análisis químicos de especies mayoritarias, se tomaron muestras para ulterior análisis microbiológico, en recipientes estéri-

les y manteniéndose refrigeradas hasta su determinación analítica.

Los análisis realizados incluyeron la determinación de bacterias ferruginosas, sulfato-reductoras y microorganismos formadores de biofilms. Para los tres tipos se utilizó el método BART (Cullimore, 1993) consistente en unos recipientes de serie con medios de cultivo liofilizados que posibilitan una fácil determinación cualitativa y semicuantitativa; las bacterias ferruginosas también se cuantificaron con cultivos convencionales con recuento en placa. Los resultados se muestran en la tabla 2.

A la vista de dicha tabla se observa que hay una notable presencia de microorganismos en todas las muestras, salvo en la de Puertollano, donde es nula la detección de microorganismos. No parece que haya diferencias significativas de contexto hidrogeológico entre la Fuente Agria de Puertollano y los otros puntos de agua, ni entre la calidad química del manantial de Puertollano y los otros hervideros. El único contraste entre los puntos de agua parece deberse a las propias características del punto de muestreo. La surgencia de Puertollano está protegida por la construcción de una fuente, mientras que los restantes hervideros, al apenas utilizarse, no tienen ningún tipo de protección. Los Baños de San Joaquín y los de El Chorrillo son pozos excavados; los de Villar del Pozo y Sacristanía son albercas de baño, mientras que el de Piedra de Hierro brota en una pequeña charca. Esta circunstancia nos lleva a sospechar que las determinaciones microbiológicas están indicando las bacterias presentes en el agua del propio punto de muestreo, en vez del contenido real de microorganismos en su circulación profunda por las rocas paleozoicas.

Por último, conviene indicar que las determinaciones bacterianas a partir de culti-

vos en un medio nutritivo reflejan la existencia de microorganismos, pero no implican que éstos sean metabólicamente activos en el punto de muestreo. De esta manera se puede explicar el hecho de que aunque en casi todos los puntos aparecen bacterias reductoras de sulfatos, las determinaciones de especies reducidas de azufre fueron nulas.

### Conclusiones

Los Hervideros del Campo de Calatrava constituyen un conjunto de puntos de agua de naturaleza carbónica cuya génesis está, generalmente, relacionada con el extinto vulcanismo de la zona. Son aguas con un tiempo de permanencia en el subsuelo de varios lustros, y cuya circulación se produce, muy probablemente, a través de las fracturas que afectan al zócalo paleozoico. Son aguas de facies hidroquímica compleja cuyo origen parece deberse a un aporte de CO<sub>2</sub> de origen volcánico junto con una circulación profunda, pero no muestran un claro carácter termal. Los análisis de microbiología indican la presencia abundante de distintos tipos de bacterias, pero es posible que estos resultados sólo sean representativos de los microorganismos existentes en el punto de emergencia del agua, en vez de una valoración real de la presencia de microorganismos en estas aguas carbónicas.

### Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido financiado por por la CICYT a través del proyecto HID96-1309

### Referencias

- Cullimore, R. (1992). *Practical Manual of Groundwater Microbiology*. Lewis Publishers, 412 p.
- Hernández-Pacheco, F. (1932). *Mem. Acad. C. Ex. Fis. Nat.*, 235 p.
- IGME (1985). *Prospección geoquímica y termométrica de en la provincia de Ciudad Real*. Informe interno n° 667.
- Portero, J.M.; Ancochea, E., Gallardo, J. y Pérez González, A. (1988): *Mapa Geológico de España 1:50.000 Hoja 784 (Ciudad Real)*. IGME
- Portero, J.M., Alvaro, M. y Ancochea, E. (1989): *Mapa Geológico de España 1:50.000, Hoja 759 (Piedrabuena)*. IGME.
- Ramírez, J.L. y Portero, J.M. (1988): *Mapa Geológico de España 1:50.000, Hoja 785 (Almagro)*. IGME