

EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS  
DE GOTEO DE LA CUEVA DEL CANELOBRE  
(BUSOT, ALICANTE). IMPLICACIONES EN LA  
GESTIÓN AMBIENTAL DE CUEVAS  
TURÍSTICAS

---

# EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS DE GOTEO DE LA CUEVA DEL CANELOBRE (BUSOT, ALICANTE). IMPLICACIONES EN LA GESTIÓN AMBIENTAL DE CUEVAS TURÍSTICAS

---

Trabajo Fin de Máster

Máster en Gestión Sostenible y Tecnologías  
del Agua

Autora: Elena García Antón

Alicante, Junio 2010

Directores:

Dr. D. David Benavente García

Laboratorio de Petrología Aplicada.  
Departamento de Ciencias de la Tierra y  
del Medio Ambiente.  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Alicante

Dr. D. José Miguel Andreu Rodes

Departamento de Ciencias de la Tierra y  
del Medio Ambiente.  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Alicante.



## **AGRADECIMIENTOS**

A David Benavente García, Juan Carlos Cañaveras, José Miguel Andreu, Jaime Cuevas González, Sergio Sánchez del Moral y Ángel Fernández Cortés por su apoyo y colaboración en la ejecución de esta investigación.

Al Departamento de Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente de la Universidad de Alicante. Al grupo de Petrología aplicada de la Universidad de Alicante. Al Departamento de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales por la realización de los análisis químicos.

A Francisca Antón Quíles, José Bernardo García Blanquer, Concepción Pla Bru, Jorge Miralles, Alba Brotons Moyano y Laura García Sánchez por la ayuda prestada en el trabajo de campo.

Al personal de la cueva del Canelobre por su amabilidad y predisposición continuas.

## **ÍNDICE**

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>7</b>
<b>3. RESULTADOS</b>	<b>12</b>
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>21</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>23</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ambientes subterráneos son considerados como sistemas físicos de moderada a alta estabilidad debido a un intercambio relativamente bajo de energía con el exterior, en respuesta a la baja conductividad térmica de las rocas (Heaton 1986). En general, bajo condiciones naturales las cuevas presentan una gran estabilidad microclimática a lo largo del ciclo anual (Cigna, 2004) excepto en las zonas próximas a una conexión directa con el exterior. Esta gran estabilidad contrasta con las fuertes variaciones que experimenta la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y el agua de infiltración de muchas cavidades. Dichas variaciones influyen decisivamente en el sistema geoquímico subterráneo provocando el desarrollo de los procesos de disolución y precipitación mineral.

Los procesos de disolución/precipitación de carbonatados en cavidades kársticas están controlados por la concentración de CO<sub>2</sub> en aire y agua, y tiene su reflejo en la hidroquímica de las aguas de goteo (pH, concentración de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, etc.), siendo la temperatura el factor que controla la solubilidad del CO<sub>2</sub> en agua y las transferencias de masa y energía entre las fase vapor y fase líquida. Las condiciones climáticas externas, especialmente las precipitaciones y la temperatura, influyen directamente en la composición geoquímica y en el grado de mineralización del agua de infiltración (Tooth y Fairchild, 2003). Asimismo, la relación térmica exterior-interior de la cavidad condiciona el movimiento del aire en función de su densidad y por tanto el grado de ventilación de la cavidad.

La visita masiva de cavidades turísticas con un régimen diario de visitas, como es el caso de la cavidad objeto de estudio, influye en el clima de la cavidad.

La Cueva del Canelobre se encuentra situada a 700 m.s.n.m 25 kilómetros al Norte de la ciudad de Alicante (Fig. 1.1). La cavidad kárstica se desarrolla en las calizas jurásicas que conforman el relieve del “Cabeçó d’Or”, nombre que recibe la sierra adyacente a la localidad de Busot. Se trata de una serie de calizas masivas y en bancos potentes con alguna intercalación de niveles de calizas más estratificadas y a veces pequeños niveles de margocalizas arenoso-limosas (Andreu 1997). Los materiales encajantes son de composición predominantemente calcítica con proporciones menores de cuarzo y otros compuestos de naturaleza evaporítica. La cueva consiste en una bóveda de grandes dimensiones, con un desnivel de 70 metros desde la única entrada natural y una altura máxima de techo de 35 metros en la zona más alejada del acceso (Fig. 1.2). En su interior es posible observar una gran colección de espeleotemas carbonáticos tales como coladas, estalagmitas, estalactitas, coraloides, cortinas, columnas y helictitas. Recientemente se han encontrado pequeños espeleotemas de yeso (costras, flores o antofitas), así como pequeños cristales de celestina, fluorita y baritina (Cañaveras et al., 2005). Los espeleotemas de tipo vadoso predominan sobre los freáticos y pueden distinguirse varios ciclos de formación de espeleotemas

controlados por (Cuevas et al., 2010): i) la distribución, cantidad y quimismo de las aguas que percolan a la cavidad a través del acuífero kárstico, y ii) el microclima de la cueva. Estos factores a su vez están controlados por la geometría de la cueva, las propiedades del acuífero, la morfología superficial, la cobertura vegetal externa y el clima exterior.

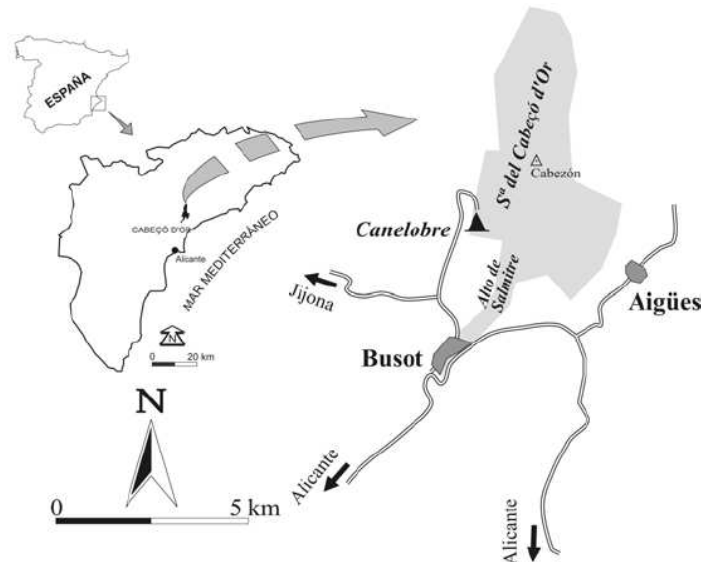


Fig. 1.1: Localización geográfica de la cueva del Canelobre (Andreu et al., 2007)

Durante la Guerra Civil la cueva fue usada como taller de reparación de aviones, para lo que se abrió un túnel (la entrada turística actual) y se ejecutó una plataforma en su extremo interior. Tras este episodio la cueva comenzó a utilizarse como bien turístico, habilitando con este fin instalaciones para facilitar el acceso (Fig. 1.2). Actualmente, el ayuntamiento de Busot se encarga de la explotación turística de Canelobre, recibiendo cerca de 70000 visitas anuales, 38% de las cuales tiene lugar en verano (Andreu et al., 2007). El acceso a la cueva se realiza mediante un túnel con doble puerta excavado de unos 40 m de longitud, por debajo de la entrada natural. Este túnel, como cualquier acceso artificial es un elemento clave en los intercambios energéticos entre la cueva y el exterior, intercambios o flujos principalmente controlados por las diferencias en temperatura y densidad de la atmósfera interior de la cueva y del exterior. El régimen de visitas es abierto durante el horario de apertura establecido (de 10:30 a 17:30 horas de enero a junio y de septiembre a diciembre, y de 10:30 a 19:30 horas el resto del año). El máximo de vistas se suele dar hacia las 13:00 y las 16:00. La modificación artificial de la cueva permite además su uso para eventos multitudinarios tales como conciertos diversos frecuentemente celebrados. La alteración del estado natural de la cueva es evidente, no solo en la morfología sino también en los parámetros característicos microclimáticos (Andreu et al., 2007).

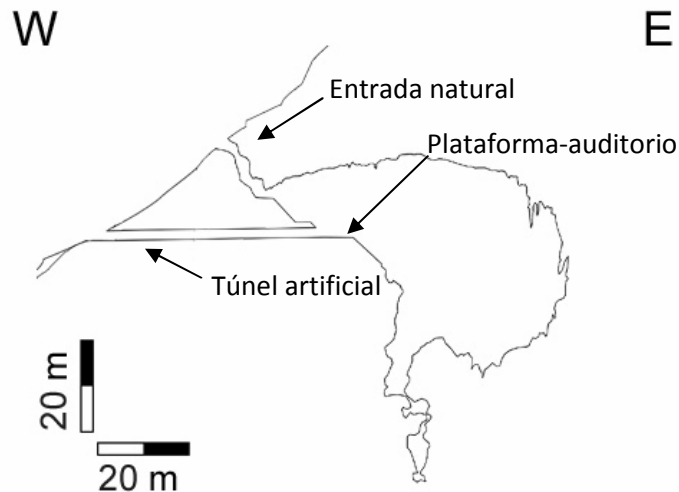


Fig. 1.2: Perfil esquemático de la cueva del Canelobre.

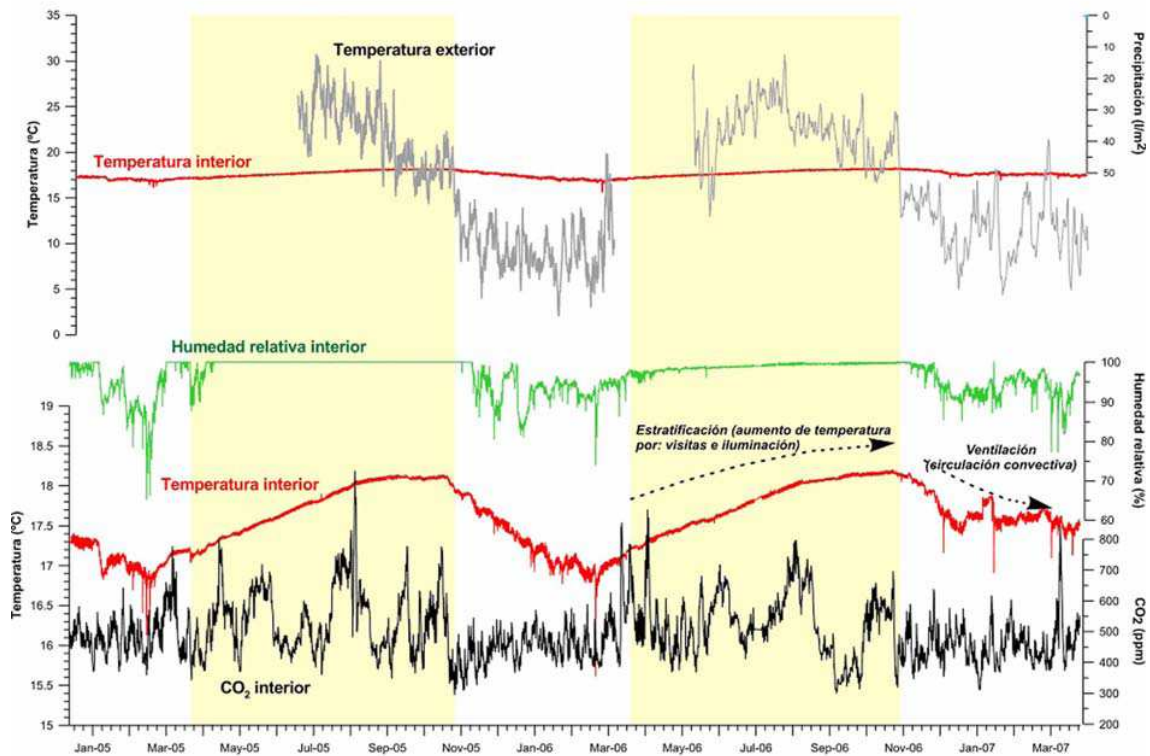
Desde 2003 se ha llevado a cabo el seguimiento de las condiciones climáticas internas y externas de la cueva. Los datos obtenidos del registro continuo de los parámetros ambientales (humedad relativa, CO<sub>2</sub>, temperatura, etc.) han generado numerosos textos científicos (Andreu et al., 2007, Cuevas-González et al., 2009, Fernández-Cortés et al., 2008) que han permitido la caracterización microclimática de la cueva.

En la Cueva del Canelobre, en un ciclo anual, se han diferenciado dos periodos con comportamiento climático diferente (Cuevas-González et al., 2009): verano (mayo-octubre) e invierno (noviembre-abril). En el primer periodo la temperatura externa se mantiene por encima de la temperatura de la cueva, lo que restringe el intercambio de aire con el exterior (Fig. 1.3). En el segundo, la temperatura exterior se mantiene por debajo de la de la cueva. La ventilación de la cueva se produce por la diferencia de densidades entre masas de aire a distinta temperatura, provocando la entrada en la cueva de aire a menor temperatura, de mayor densidad y menos húmedo, disminuyendo significativamente la concentración de CO<sub>2</sub>, la temperatura y la humedad relativa del aire en la cavidad (Andreu et al., 2007). La desgasificación de las aguas al alcanzar la cavidad constituye la fuente natural de CO<sub>2</sub> y humedad relativa, por la que el aire interior se encuentra muy concentrado en estos gases. La tasa de goteo en el interior de la cueva depende de las precipitaciones externas, siendo el otoño y la primavera los periodos donde se registran la mayor parte de las lluvias anuales.

Por lo general, la temperatura en el interior de la cueva se mantiene entre 16 y 18 °C durante todo el año. La humedad relativa del aire dentro de la cueva varía entre



el 70 y el 100%, siendo muy estable y próxima a la saturación (95-100%) a lo largo del periodo de verano (Andreu et al., 2007). La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva presenta un amplio rango de valores pudiendo llegar a alcanzar concentraciones superiores a 1000 ppm.



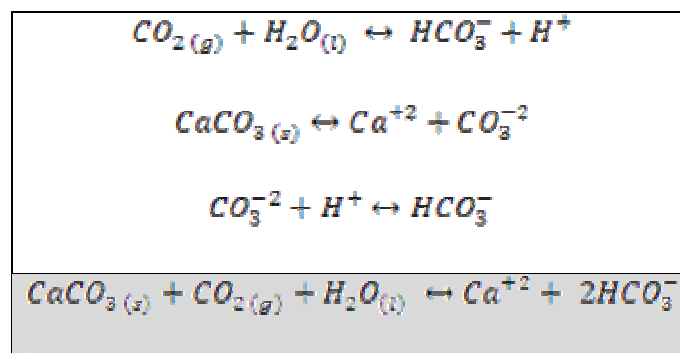
**Fig 1.3:** Evolución temporal del microclima en la Cueva del Canelobre en relación con las condiciones meteorológicas en el exterior, desde 2005 a 2007 (Cuevas-González et al., 2007).

El régimen de visitas diarias a la cueva y la apertura de la puerta de acceso consecuente afectan distintamente a los parámetros microclimáticos (Andreu et al., 2007). Las visitas constituyen una fuente adicional de CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad relativa, aumentando estos en función de la cantidad de personas. La apertura del acceso artificial, aunque en menor medida tras haber sido recientemente modificado para reducir el impacto antrópico, genera procesos de circulación convectiva a través de las dos aperturas de la cavidad. Esto genera la renovación del aire por intercambio energético con el exterior en función del gradiente térmico (y/o de densidad).

En la época en que la temperatura media exterior es mayor que la temperatura del aire de la cavidad los incrementos diarios de temperatura debidos a las visitas no suelen superar la décima de grado. Durante el resto del año estos incrementos pueden duplicarse. Con respecto a la humedad relativa, la influencia del régimen de visitas

produce incrementos de décimas de tanto por ciento en primavera-verano a superiores al 1% en el resto del año. La concentración de CO<sub>2</sub> también se ve influida por el régimen de visitas, alcanzándose incrementos entre 100 y 200 ppm, siendo los periodos de recuperación más largos con respecto a los de temperatura (Andreu et al., 2007).

La formación de espeleotemas (precipitación de carbonato cálcico) a partir de las aguas de goteo en la cueva está determinada por los equilibrios agua-roca-aire. Las rocas carbonáticas (calizas Jurasicas) que conforman la roca encajante de la Cueva de Canelobre, son solubles en aguas ácidas (de origen meteórico). En las aguas naturales (pH entre 5.5 y 8.5) el pH se encuentra fuertemente ligado a la concentración de CO<sub>2</sub>, aumentando el primero con el segundo (Tabla 1.1). El incremento de CO<sub>2</sub> del aire en contacto con el agua, produce un aumento del CO<sub>2</sub> gaseoso disuelto, lo que a su vez aumenta la acidez del agua y con ello la capacidad de disolver la roca carbonatada con la que se encuentra en contacto. La disminución de CO<sub>2</sub> en el aire produciría el efecto contrario, la desgasificación del agua (pérdida de CO<sub>2</sub> disuelto), y con ello la reducción de capacidad de disolver de la fase líquida. Lo que como consecuencia lleva a la precipitación de Carbonato. La temperatura es otro factor importante en los equilibrios químicos que se dan en los sistemas carbonatados. La solubilidad del dióxido de carbono en el agua disminuye con el aumento de temperatura. El aumento de temperatura del agua favorece la desgasificación mientras que la disminución propicia la gasificación (Langmuir, 1997).



**Tabla 1.1:** Equilibrio químico roca carbonatada-agua.

El estudio de la hidrogeoquímica en cavidades kársticas es esencial para comprender los procesos de precipitación-disolución que se dan en su interior. Entender estos procesos es la base fundamental para poder llevar a cabo una reconstrucción paleoclimática y paleohidrológica a partir de los espeleotemas (Tooth, 2003) que ayuden a evaluar las variaciones climáticas en periodos de tiempo

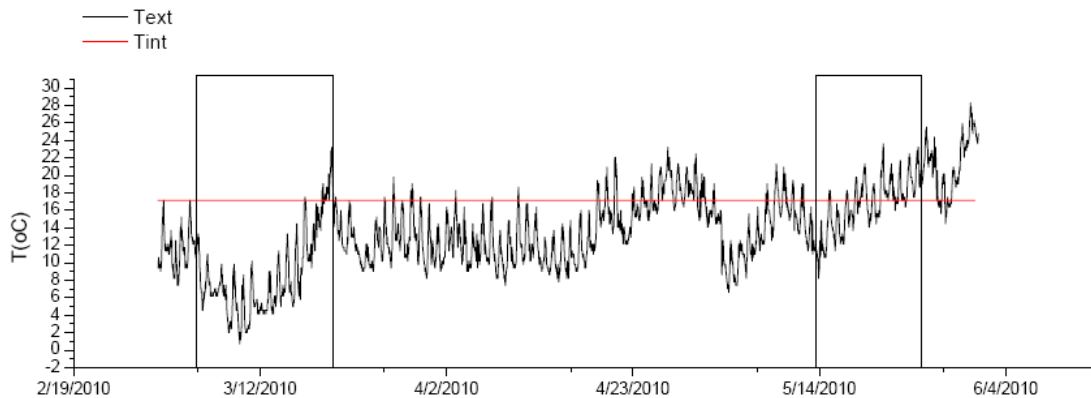
relativamente recientes. Este es el objetivo del proyecto dentro del cual se enmarca este estudio: proyecto CGL2008-05929/BTE (2008-10): “Factores ambientales que controlan el crecimiento de espeleotemas activos en sistemas kársticos: valoración de su uso como marcadores de variaciones climáticas recientes en regiones semiáridas”, cuya ejecución corre a cargo de miembros del Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente (Áreas de Geodinámica Externa y Petrología y Geoquímica) de la Universidad de Alicante.

En este trabajo se pretende observar los cambios que se dan en las características químicas de las aguas de goteo debido a los cambios de los parámetros microclimáticos en el intervalo de tiempo en el que el régimen de la cueva cambia de periodo de invierno al de verano. En ciclos anuales previos a este estudio, se ha observado que este cambio se produce entre los meses de marzo y mayo (Andreu et al., 2007, Cuevas-Gonzalez et al., 2007). Por ello, se evalúa la variación de los parámetros hidrogeoquímicos en dos periodos quincenales ubicados en estos meses. La primera quincena se sitúa en marzo, habiendo un lapso de tiempo de 50 días hasta la segunda toma de muestras en el mes de mayo.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 CAMPAÑAS DE MUESTREO

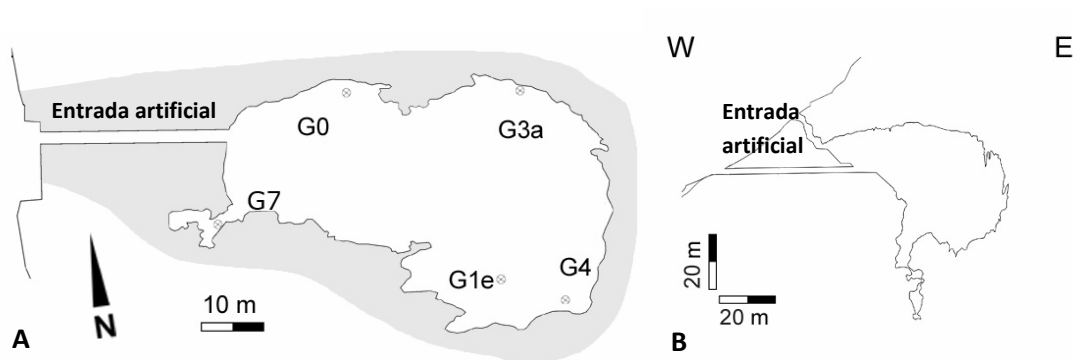
La toma de datos y muestras se realizó en dos quincenas separadas entre sí 50 días. La Primera quincena abarca los días comprendidos entre el 5 y el 21 de marzo de 2010. La segunda quincena comienza el día 14 de mayo y termina el 26 del mismo mes (Fig. 2.1).



**Fig. 2.1:** Relación de la temperatura exterior e interior de la cueva. Representación de los periodos de muestreo. Text: temperatura exterior. Tint: temperatura interior.

Durante la primera quincena de muestreo (marzo), la temperatura de la cueva se mantiene por encima de la del exterior a lo largo de prácticamente todo el periodo. La diferencia de temperaturas llega a alcanzar los 15 grados en los días fríos (Fig.2.1). En los primeros días del periodo de muestreo ubicado en mayo, la temperatura de la cueva se encuentra por encima de la del exterior (Fig. 2.1). Hacia la mitad del periodo (19 de mayo), las curvas de temperatura se cruzan, ubicándose la exterior por encima de la interior el resto de días que dura la segunda fase de toma de muestras. Durante el periodo de marzo la cueva presenta un régimen invernal. El intervalo ubicado en mayo presenta un régimen invernal los primeros días de muestreo y estival en los últimos. La ubicación temporal del cambio presenta este año cierto retraso con los ciclos anuales previamente estudiados (Andreu et al., 2007, Cuevas-González et al., 2009) debido a la situación climática anómala que se ha dado en invierno y primavera.

Para el seguimiento de la hidrogeoquímica se han seleccionado ciertos puntos de goteo (Fig. 2.3) de situación y comportamiento distinto (Fig. 2.2). De acuerdo con la nomenclatura de los goteos seguida en estudios previos (Cuevas-González et al., 2009), los goteos escogidos son GO, G1e, G3a, G4 y G7.



**Fig. 2.2:** (A) Planta esquemática de la Cueva del Canelobre. Situación de los puntos de goteo muestreados. (B) Perfil esquemático de la Cueva del Canelobre.

Los puntos G1e y G7 han tenido un seguimiento continuo en los dos periodos de muestreo mientras que los restantes se han tomado esporádicamente a modo de control (Tabla 2.1). Lo goteos GO y G7 son los más cercanos a las entradas de la cavidad. G1e, G3a y G4 se sitúan en la parte de la cueva que presenta mayor desarrollo en profundidad (Fig. 2.2).

	Puntos de muestreo	Número de muestras
<b>1ª quincena</b>	G0	2
	G1e	7
	G3a	2
	G4	2
	G7	9
<b>2ª quincena</b>	G0	2
	G1e	8
	G3a	2
	G4	2
	G7	8

**Tabla 2.1:** Número de muestras tomadas por cada punto de goteo.

Los puntos G4 y G3a son los goteos más lentos de los estudiados con una tasa constante en los dos periodos de muestreo inferior o igual a 0,15 mililitros por minuto. Tomando en 0.15 ml el volumen de una gota (Genty y Deflandre, 1998). Los goteos GO, G1e y G7 presentan tasas más elevadas, con medias superiores a los 2 ml/min. GO, G1e y G7 son “goteos rápidos” mientras G4 y G3a son “goteos lentos”.

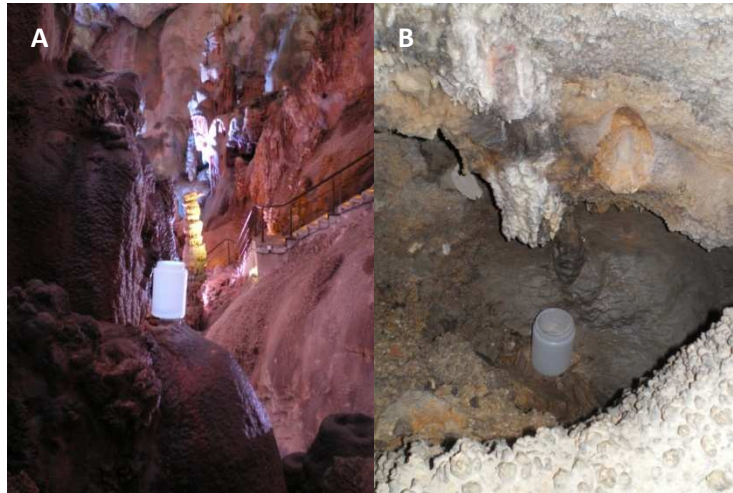


Fig. 2.3: (A) Punto de goteo G3a. (B) Punto de goteo G7.

## 2.2 TÉCNICAS DE MUESTREO Y ANÁLISIS

La obtención de datos se divide en dos fases, una de toma de datos en campo y otra de análisis en laboratorio. El trabajo en campo incluye la obtención de parámetros climáticos en el interior y el exterior de la cavidad y la medición in situ de parámetros geoquímicos de las aguas de goteo. En cada muestreo de los puntos de goteo se tomaron 2 muestras de 50 ml de agua de goteo, herméticamente cerradas, trasladadas en bolsa isotérmica y debidamente almacenadas a 4°C para su posterior análisis. El personal de la cueva de Canelobre, facilitó los datos de visitas de la cueva, también tenidos en cuenta para este estudio.

Los parámetros climáticos se obtuvieron de las estaciones instaladas en el exterior y en el interior de la cueva (Fig. 2.4). Estas consisten en sistemas automáticos de registro continuo de humedad relativa y temperatura, además de la concentración en aire del CO<sub>2</sub>, para la estación interna. Los equipos están constituidos por sensores de estos parámetros acoplados a *dataloggers* autónomos que registran los valores medidos cada diez minutos (Andreu et al., 2007). Además, esporádicamente se tomaron mediciones de humedad relativa, temperatura del aire y CO<sub>2</sub> mediante sensores de campo portátiles. Los datos de pluviometría se obtuvieron de la estación climática cercana de “Pozo Cabezó”, situada en el municipio de Aigües.

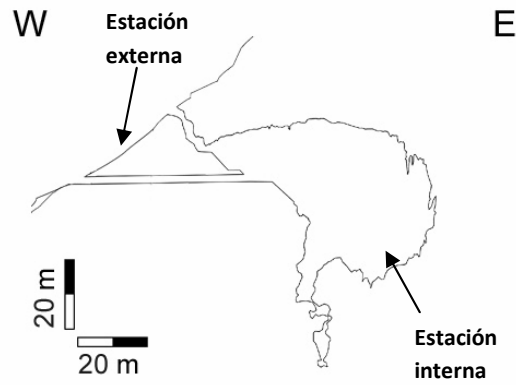


Fig. 2.4: Situación de las estaciones climáticas

En los puntos de goteo, los parámetros físico-químicos susceptibles de sufrir modificaciones por almacenamiento y transporte de las muestras (temperatura, pH o  $\text{HCO}_3^-$ ) fueron determinados in situ. Se utilizaron equipos portátiles de pH y temperatura del agua (sensor Hanna mod. HI 9025 con un precisión de  $\pm 0.02$  unidades) y de conductividad eléctrica (sensor WTW mod. 340i con un precisión de 0.5% del valor medido) (Fig.2.5). Para la determinación de los bicarbonatos disueltos en el agua se realizó una valoración volumétrica con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (0.5N), según la siguiente reacción:



El  $\text{CO}_2$  disuelto se halló mediante valoración con hidróxido sódico (NaOH), según la siguiente reacción:



Fig. 2.5: Muestreo del agua de goteo mediante peachímetro y conductímetro portátiles

El análisis de mayoritarios se realiza en el laboratorio de geoquímica del Museo Nacional de Ciencias Naturales gestionado por el Centro Superior de Investigaciones Científicas. El análisis se realiza mediante valoración estándar (para los bicarbonatos) y electroforesis iónica capilar (para el resto de elementos mayores:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ).

Los datos obtenidos fueron analizados mediante el programa de modelización química PHREEQC, versión 2.17 (Parkhurst y Appelo, 1999). Este programa calcula el estado de saturación de las especies en disolución. En este caso se han hallado los índices de saturación de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y la dolomita ( $\text{MgCO}_3$ ) y la presión de vapor del  $\text{CO}_2$ . Se ha usado la base de datos minteq.v4.dat. La relación iónica  $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$  y representaciones gráficas de las aguas según composición se han obtenido mediante la aplicación INAQUAS (Interpretación de Análisis Químicos de Aguas Subterráneas, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos), versión 1.90.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE GOTEO

La caracterización de las aguas de goteo se ha realizado a partir del análisis de los resultados obtenidos en campo, laboratorio y modelización hidrogeoquímica. El análisis de laboratorio se realizó sobre las muestras de agua obtenidas de los goteos G1e y G7.

	G0		G1e		G3a		G4		G7	
N	2		7		2		2		9	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Tasa de goteo (ml/min)	6.90	3.07	10.86	65.44	0.15	0.00	< 0.15	0.00	2.40	17.40
[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	6.25	5.66	6.00	21.52	4.00	0.00	6.00	0.00	11.78	30.84
Conductividad eléctrica (μS/cm)	461	0.77	247	2.99	338	2.30	293	1.45	430	5.37
pH	7.91	1.97	7.68	1.10	7.71	0.55	7.58	0.28	7.70	1.50
T(°C)	16.40	1.72	16.60	1.15	16.80	0.84	16.95	0.42	16.50	1.30
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)			93.21	4.57					183.60	5.17
Ca <sup>2+</sup> (ppm)			35.56	3.72					66.69	4.43

**Tabla 3.1:** Valores medios y coeficiente de variación (CV) de las principales características físico-químicas de las aguas de goteo de los puntos muestreados durante la primera quincena (marzo). N: número de muestras.

	G1e			G7		
N	7			9		
	media	máx	mín	media	máx	mín
SI calcita	-0.30	-0.20	-0.40	0.23	0.55	0.07
log pCO <sub>2</sub>	-2.77	-2.60	-2.87	-2.51	-2.42	-2.76

**Tabla 3.2:** Índices de saturación (SI) de calcita y logaritmo de la presión parcial de CO<sub>2</sub> en las aguas de los goteos G1e y G7 durante la primera quincena. N: número de muestras.

Durante la primera quincena (marzo) G0 y G1e fueron los goteos más rápidos, siendo el G1e el que mayor coeficiente de variación presenta en la tasa de goteo (Tabla 3.1). Las aguas de los goteos G0, G1e, G3a y G4 presentan concentraciones de CO<sub>2</sub> próximas e inferiores a las del G7. Las aguas del G7 y G0 son las más mineralizadas, con valores de CE superiores a 400 μS/cm. Por el contrario, las aguas de G1e y G4 son los que menor CE muestran con valores medios inferiores a 300 μS/cm. La temperatura y pH presentan valores semejantes entre los puntos de goteo. En cuanto a la concentración de ion calcio y bicarbonato (iones de mayor concentración en las aguas de goteo), G7 es el que mayores valores medios presenta. El agua del goteo G1e muestra índices de saturación negativos (Tabla 3.2). Se encuentra subsaturado en

calcita (<-0.25) o próximo a la saturación ( $\pm 0.25$ ). Las de G7 presenta índices de saturación positivos cercanos a la saturación o en estado de sobresaturación (>0.25). La presión parcial de CO<sub>2</sub> es inferior en G1e.

El valor más bajo de conductividad se asocia a la mayor tasa de goteo, G1e (Tabla 3.1). Este goteo es el que menor concentración de calcio y bicarbonatos presenta. Además el agua se encuentra durante esta quincena subsaturado en calcita (Tabla 3.2).

	G0		G1e		G3a		G4		G7	
N	2		8		2		2		8	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Tasa de goteo (ml/min)	5.93	5.37	3.25	42.73	0.15	0.00	< 0.15	0.00	1.99	7.81
[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	5.00	0.00	7.69	26.23	4.50	15.71	4.50	15.71	16.50	19.71
Conductividad eléctrica (μS/cm)	435	0.65	277	13.65	331	7.26	294	0.48	415	2.47
pH	7.79	0.18	7.79	0.68	7.69	0.37	7.77	0.09	7.71	1.24
T (°C)	17.50	2.42	17.08	0.93	17.20	0.82	17.35	0.41	17.08	1.32
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)			131.86	17.90					201.22	2.43
Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup> (ppm)			45.44	13.91					68.73	1.86

**Tabla 3.3:** Valores medios y coeficiente de variación (CV) de las principales características físico-químicas de las aguas de goteo de los puntos muestreados durante la segunda quincena (mayo). N: número de muestras.

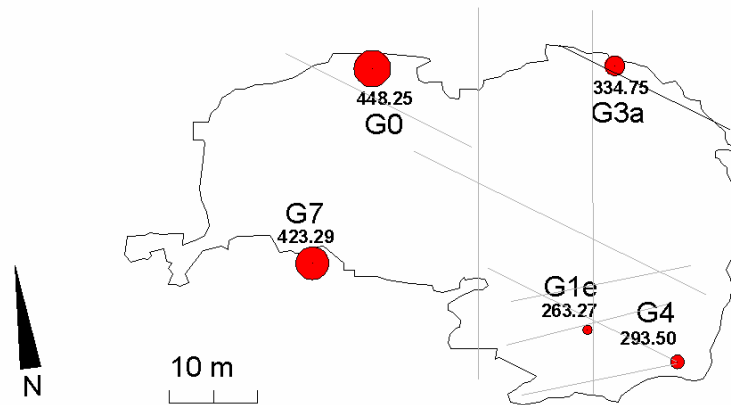
Las relaciones entre los distintos goteos estudiados son análogas a las observadas durante la primera quincena (Tabla 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4). En los goteos G0, G1e y G7 se aprecia una reducción de la tasa de goteo (Tabla 3.1 y 3.3). Esta reducción es más acusada en el goteo G1e. La temperatura del agua ha aumentado ligeramente en todos los goteos. Estos dos cambios marcan el cambio a la estación de verano, caracterizada por escasas precipitaciones y temperaturas más elevadas. Las concentraciones de bicarbonatos y calcio en G1e y G7 han aumentado con respecto a la quincena de invierno.

	G1e			G7		
N	8			8		
	media	máx	mín	media	máx	mín
SI calcita	0.05	0.24	-0.17	0.30	0.48	0.19
log pCO <sub>2</sub>	-2.74	-2.63	-2.93	-2.47	-2.35	-2.66

**Tabla 3.4:** Índices de saturación (SI) de calcita y logaritmo de la presión parcial de CO<sub>2</sub> en las aguas de los goteos G1e y G7 durante la segunda quincena. N: número de muestras.

Los índices de saturación de calcita de las aguas procedentes de los goteos G1e y G7 presentan una media positiva en esta quincena (Tabla 3.4). El goteo G1e se encuentra saturado en calcita, mientras que el G7 presenta valores de este índice sobresaturados o próximos a la saturación. Ambos goteos se desplazan ligeramente hacia la sobresaturación en esta segunda fase de toma de datos con respecto a la primera (Tabla 3.2 y 3.4).

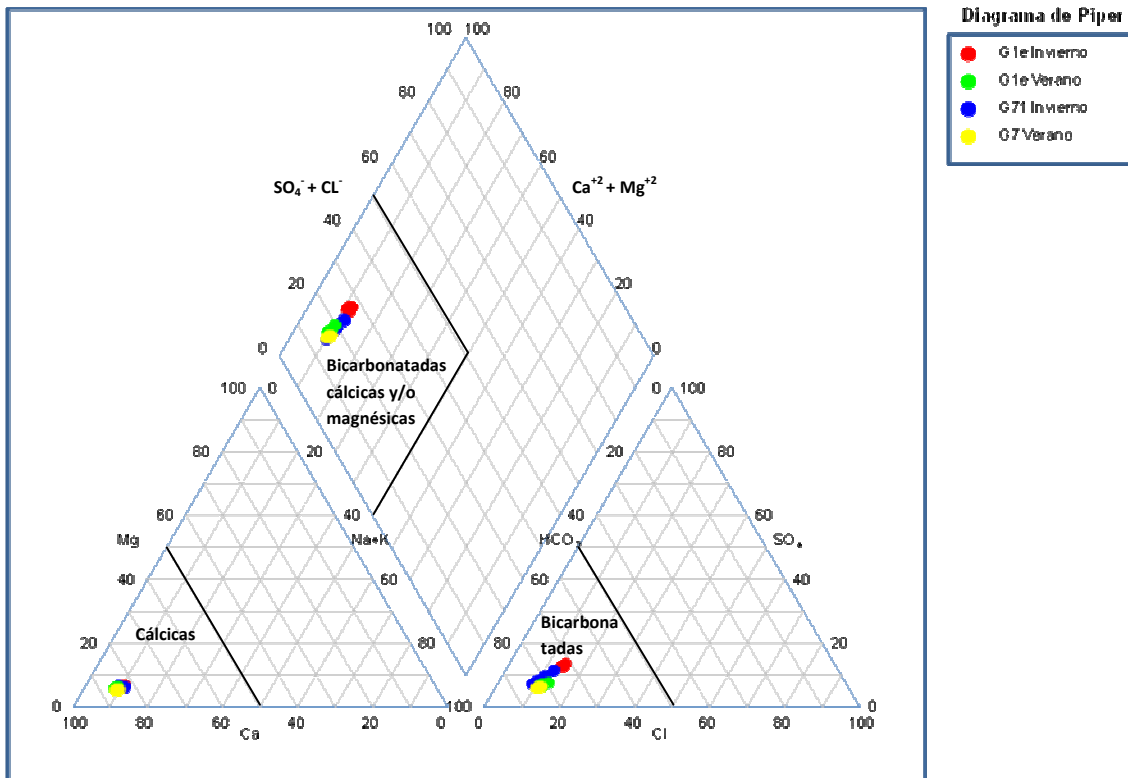
La conductividad eléctrica de las aguas de los puntos estudiados (Tabla 3.1 y 3.3) presenta cierta distribución espacial (Fig. 3.1). Los goteos con aguas mineralizadas se sitúan en la parte alta de la cueva, cercanos a la puerta, y los de menor valor de este parámetro en la zona más alejada. La distribución espacial revela un control hidrogeológico en la química de las aguas de goteo reforzado por la asociación de los tres goteos de menor conductividad (G1e, G4 y G3a) a las fracturas principales de la cueva (Fig. 3.1).



**Fig. 3.1:** Conductividades medias en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de las dos quincenas de muestreo. Proyección en planta de los puntos de goteo y las fracturas principales de la cueva.

En cuanto a la diferencia en la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto que presenta el agua del G7 con respecto a los otros goteos (Tabla 3.1 y 3.3). Esta variación se encuentra ligada a la desgasificación producida en el *splash* de la gota al golpear el suelo (en este caso el bote). El goteo G7 tiene un *splash* mínimo por tener una longitud de recorrido de la gota de 0.5 metros (Fig. 2.2), mientras que esta medida es superior a los 9 metros en el resto de goteos.

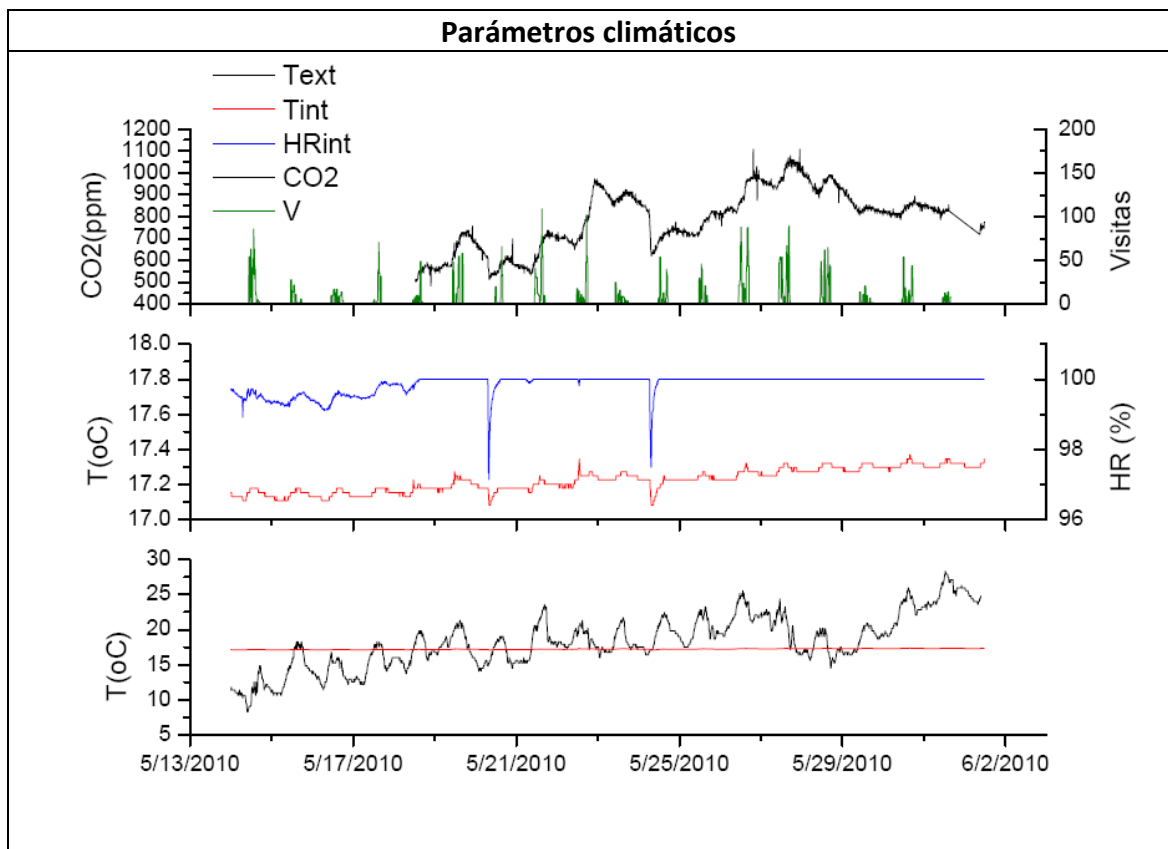
Durante los dos periodos de muestreo las aguas analizadas en G1e y G7 mostraron una facies de tipo bicarbonatada cálcica (Fig. 3.2).



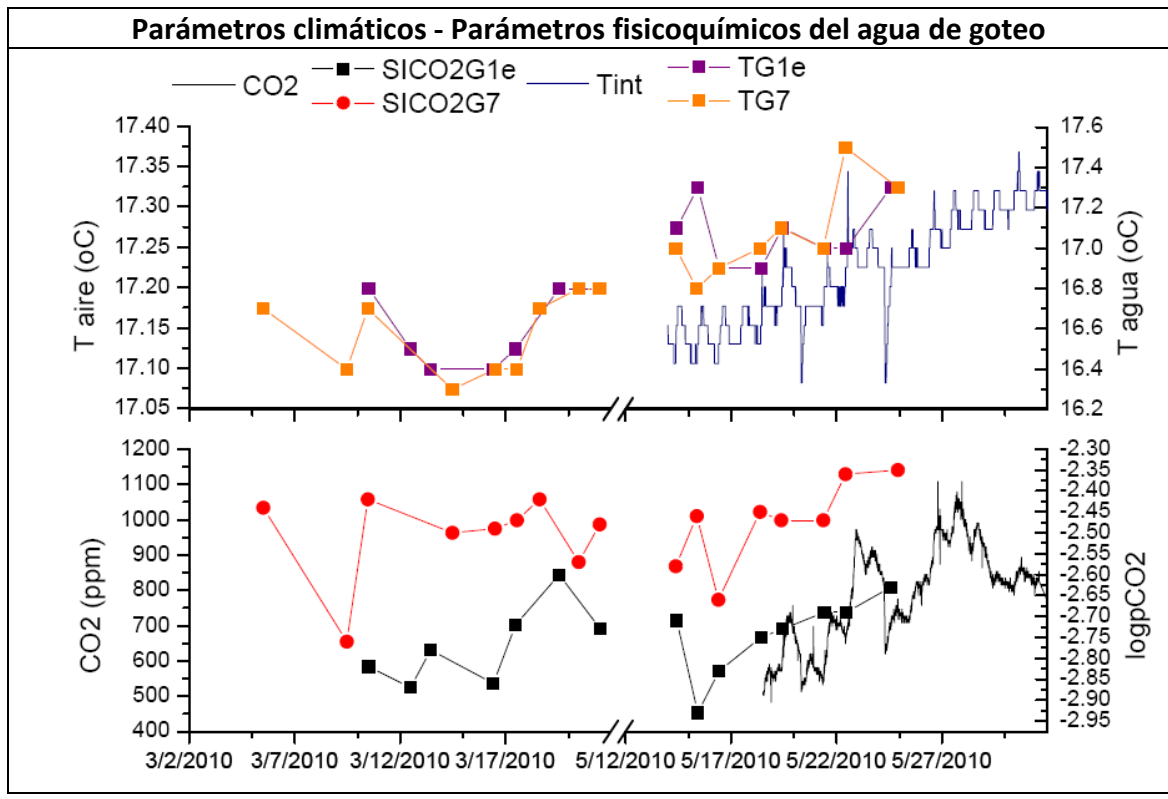
**Fig. 3.2:** Relaciones iónicas de los elementos mayores en las aguas de goteo de los puntos G7 y G1e en las dos quincenas de muestreo.

### 3.2 VARIABILIDAD DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS DE GOTEO Y SU RELACIÓN CON LAS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS E HIDRODINÁMICAS

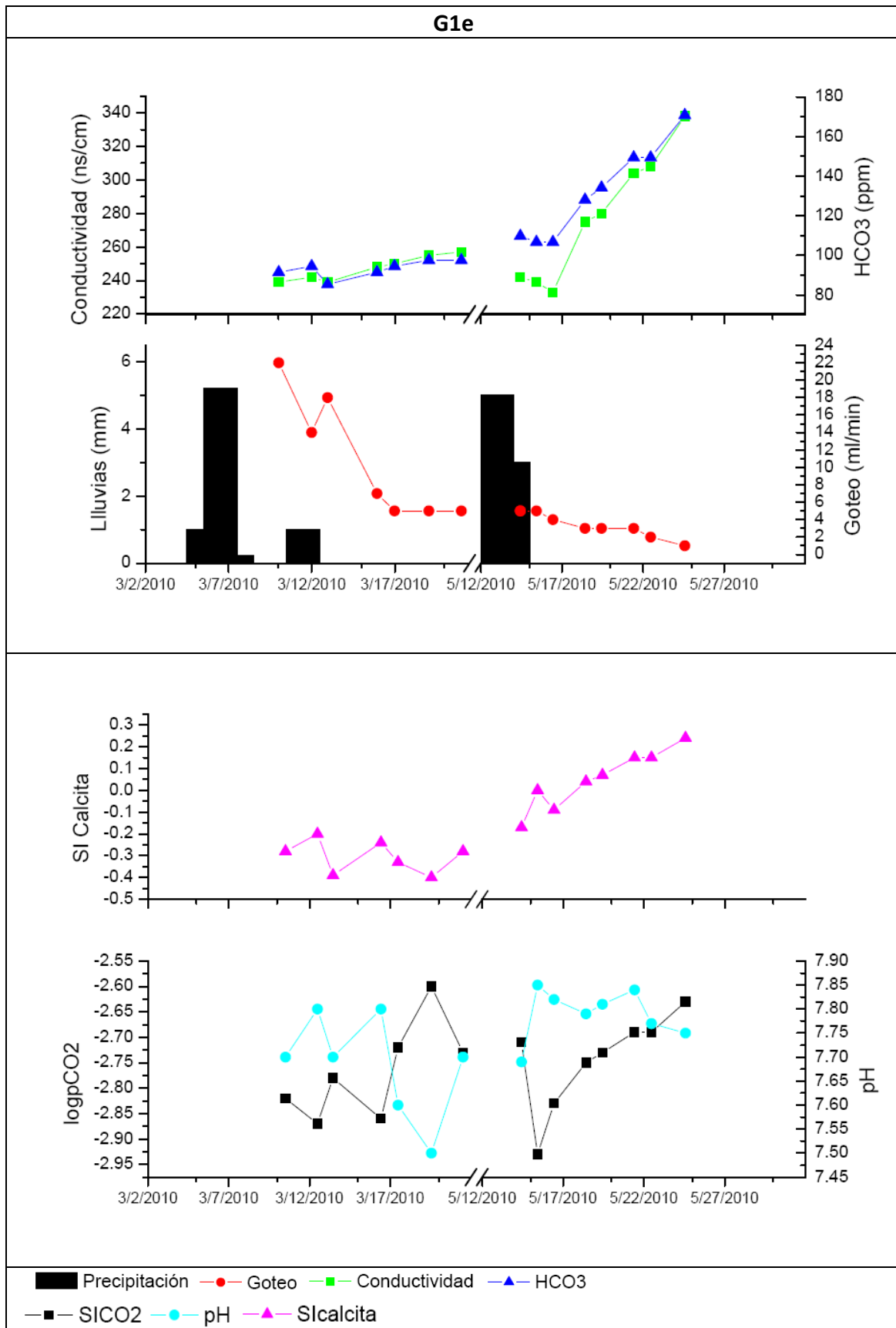
El estudio de los parámetros climáticos, tanto del interior como del exterior de la cueva durante la segunda quincena de muestreo refleja la relación interior-exterior de la cueva y la influencia de las visitas (Fig. 3.3). La temperatura interior del interior de la cavidad está en torno a los 17 °C y presenta muy baja variabilidad en torno a los 17 °C, con una diferencia entre los valores máximo y mínimo de 0.286 °C. Estas variaciones se encuentran controladas por el intercambio energético con el exterior y por la afluencia de visitas. Las fuertes bajadas de temperatura coincidentes con bajadas humedad relativa son evidencias de entrada de aire frío y seco del exterior (Fig. 3.3). Estos picos representados coinciden con el intervalo de temperaturas más bajas en el ciclo diario. Las variaciones diarias coincidentes con las variaciones de humedad (apreciables hasta la saturación en la cueva) y de CO<sub>2</sub> en aire se encuentran relacionadas con los periodos de apertura de la cueva a las visitas. En general se observa durante el periodo representado un aumento leve y progresivo de las temperaturas, el alcance del estado de saturación de la humedad relativa y una tendencia al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire. Este parámetro presenta una gran variabilidad en el periodo estudiado con un valor máximo de 1108 ppm y un valor mínimo de 483 ppm.



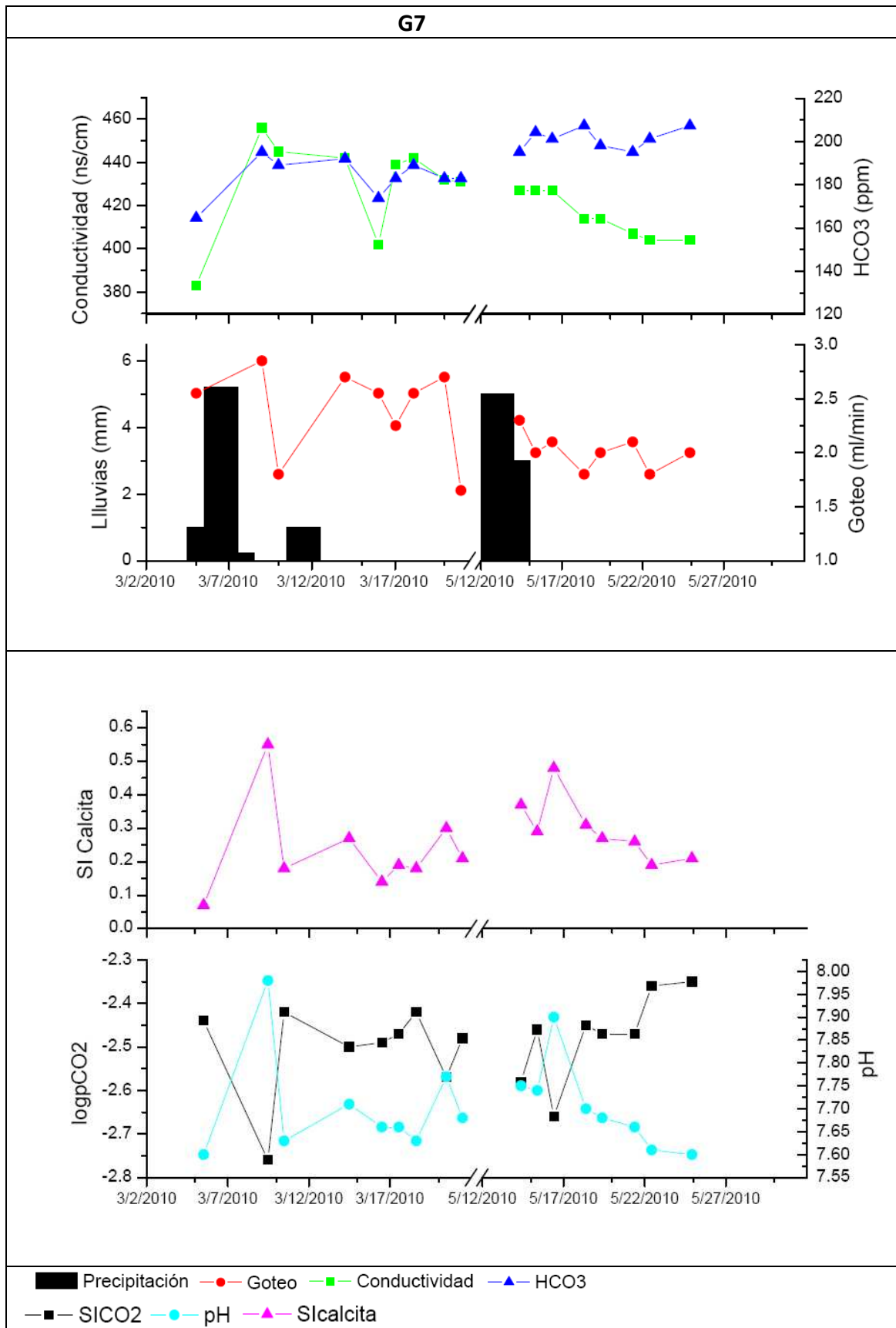
**Fig. 3.3:** Relaciones entre los parámetros climáticos en el exterior e interior de la cueva y afluencia de visitas. Text: temperatura exterior. Tint: temperatura interior. HRint: humedad relativa interior. CO2: concentración de CO<sub>2</sub> en el interior. V: visitas recibidas en la cueva.



**Fig. 3.4:** Relación de la concentración de CO<sub>2</sub> en aire y la presión de vapor en las aguas de goteo. Relación de la temperatura interior y la temperatura del agua. SICO2: logaritmo de la presión de vapor en las aguas de goteo. CO2: concentración de CO<sub>2</sub> en el interior. Tint: temperatura en el interior de la cueva. T: temperatura del agua de los goteos.



**Fig. 3.5:** Goteo G1e. Principales variables químicas del agua, tasa de goteo y pluviometría. HCO<sub>3</sub>: bicarbonatos disueltos, Sicalcita: índice de saturación de la calcita, SICO<sub>2</sub>: logaritmo de la presión parcial de CO<sub>2</sub> en el agua.



**Fig. 3.6:** Goteo G7. Principales variables químicas del agua, tasa de goteo y pluviometría. HCO<sub>3</sub>: bicarbonatos disueltos, Sicalcita: índice de saturación de la calcita, SICO<sub>2</sub>: logaritmo de la presión parcial de CO<sub>2</sub> en el agua.

La representación del parámetro presión parcial de vapor muestra la influencia de las variaciones de CO<sub>2</sub> en la cueva sobre las aguas de goteo (Fig. 3.4). En el periodo de verano se observa el progresivo ascenso del pCO<sub>2</sub> en las aguas de goteo ligado al aumento de CO<sub>2</sub> en el aire de la cueva. La misma tendencia se observa en la temperatura del aire y del agua.

El análisis exploratorio de datos (bivariante y de componentes principales) obtenidos durante los dos periodos de muestreo para el punto de goteo G1e (Fig. 3.5) muestra una relación directa entre la tasa de goteo y la pluviometría, siendo la respuesta del goteo inmediata a las lluvias. La tasa de goteo presenta una fuerte reducción con un valor máximo de 22ml/min al comienzo de la primera quincena y un mínimo de 1 ml/min al final de la segunda (Fig. 3.5). Los valores de conductividad eléctrica y concentración de bicarbonatos presentan una correlación directa muy alta entre sí e inversa con respecto a la tasa de goteo. Esta relación se aprecia también, en el índice de saturación de calcita. En la primera quincena de estudio los valores de presión de vapor de CO<sub>2</sub> y pH se encuentran muy correlacionados, aumentando el primero con el descenso del segundo (Fig. 3.5). En este primer periodo, se aprecia la relación directa pH-índice de calcita. En el segundo periodo la relación pH-índice de saturación de calcita-pCO<sub>2</sub>, no presenta la misma relación que en invierno. La evolución de los parámetros sugiere que la relación aleatoria entre los valores podría estar ligada al aumento de la disolución de calcita. Este aumento es consecuencia de la prolongación los tiempos de residencia del agua en la zona vadosa debido a la disminución de la tasa de goteo. Un aumento de la disolución de calcita podría afectar el pH del agua, reduciendo su acidez. Esto explicaría el desequilibrio entre el pH del agua y la presión parcial de CO<sub>2</sub> del aire (Fig. 3.5).

El estudio de los datos de G7 muestra una relación menos patente de la tasa de goteo con la pluviometría (Fig. 3.6). La tasa de goteo se mantiene muy estable con una media de 2.21 ml/min, un máximo de 2.85 y un mínimo de 1.65 ml/min. La relación conductividad eléctrica-bicarbonatos en la segunda quincena no presenta una relación directa. La conductividad tiende a decrecer y la concentración de bicarbonatos a aumentar (Fig. 3.6). Este efecto puede estar ligado a la evaporación del agua en la zona vadosa como consecuencia del ascenso de temperaturas característico de este periodo de muestreo. La relación pH-pCO<sub>2</sub>- SI Calcita es muy estrecha en los dos periodos estudiado en este goteo, siendo la relación de pH directa con el índice de saturación de calcita e inversa con la presión parcial de CO<sub>2</sub> (Fig. 3.6).

Los goteos G1e y G7 presentan comportamientos químicos distintos estrechamente ligados a sus características hidrodinámicas. Las variaciones en los parámetros de G1e obedecen a la inercia que presenta este goteo a las lluvias. Las características químicas de G7 responden a su comportamiento estable a lo largo del tiempo estudiado. El tiempo de permanencia tan variable en la zona vadosa de las



aguas del goteo G1e explica las variaciones tan elevadas de sus características. La estrecha relación entre los parámetros del goteo G7 refleja elevados periodos de residencia de sus aguas que favorecen los equilibrios químicos.

La influencia del microclima de la cueva se observa en las aguas analizadas de ambos goteos. El aumento de  $\text{CO}_2$  en la cueva aumenta la acidez de las aguas y la disolución de calcita (reducción del índice de saturación). La temperatura también afecta a los equilibrios químicos. Los aumentos de temperatura favorecen la desgasificación del agua. Esto desplazaría las aguas hacia pH más básicos. La influencia conjunta sobre las aguas de estos dos factores (aumento de  $\text{CO}_2$  en agua y de temperatura) ligados al aumento de visitas en la cueva depende de las características cinético-químicas del agua. Los procesos de desgasificación en agua son más lentos que los de gasificación. El equilibrio entre la fase gaseosa con un alto contenido en  $\text{CO}_2$  y la fase líquida pobre en  $\text{CO}_2$  se alcanza en unos pocos minutos (Cuezva, 2008). Una concentración excesiva de visitas, especialmente en el periodo de verano en el que los intercambios energéticos se encuentran restringidos favorecería la acidificación de las aguas de goteo.

#### 4. CONCLUSIONES

Las características químicas de las aguas de goteo se encuentran controladas por la hidrodinámica y las condiciones climáticas de la cavidad. El comportamiento de esta cueva, en cuanto a los intercambios energéticos, es determinante con respecto a las variaciones de los parámetros químicos. Durante el periodo invernal (noviembre-abril) la ventilación de la cueva reduce la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire, desplazando los equilibrios hacia la saturación de calcita. Esta situación confluye con el aumento de la tasa de goteo por el aumento estacional de las precipitaciones. La reducción consecuente de los tiempos de permanencia en la zona vadosa, en aquellos goteos que presenten una rápida respuesta a las pluviometrías, desplaza a su vez las aguas hacia el estado subsaturado.

Durante el periodo estival (mayo-octubre), la ventilación de la cueva queda restringida. La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire tiende a aumentar considerablemente. Esto acidifica las aguas reduciendo el índice de saturación en calcita, aumentando con esto la capacidad para disolver tanto la roca caja como los espeleotemas, ambos de naturaleza predominantemente carbonática. La reducción estacional de precipitaciones aumenta los tiempos de residencia del agua en la zona vadosa en los goteos cuyo comportamiento se encuentra muy vinculado con las precipitaciones. Las elevadas temperaturas características de este periodo favorecen la evaporación del agua de la zona vadosa y con ello la concentración de las especies en disolución, lo que propicia la precipitación de la calcita.

El comportamiento de la cueva a lo largo del año se encuentra condicionado por su uso turístico, afectando los cambios en el microclima consecuentes al quimismo de las aguas. El incremento diario del CO<sub>2</sub>, vapor de agua y temperatura del aire producido por los visitantes en un ambiente con humedad próxima a la saturación, puede provocar modificaciones sustanciales del estado de saturación de las aguas de goteo, especialmente las de flujo más lento. Este efecto es mucho más acusado en verano, en el que los intercambios energéticos con el exterior son mínimos. El acceso artificial a la cueva potencia el intercambio energético con el exterior, favoreciendo la entrada de aire seco y pobre en CO<sub>2</sub>, ya sea frío o caliente. La circulación convectiva generada propiciada por el funcionamiento de las puertas permite la entrada de aire caliente, hecho que sería muy difícil si solo tuviera una entrada natural.

Las variaciones de las condiciones climáticas afectan de distinta manera a las aguas de goteo según la hidrodinámica de los mismos. Las características físico-químicas de las aguas se encuentran muy ligadas a las variaciones microclimáticas a lo largo de todo el año en aquellos goteos que muestran menor variación en su tasa de goteo. Los goteos de tasa variable y dependientes de las precipitaciones presentan, en cambio, un comportamiento más estacional en su relación con el microclima. La

influencia de las variaciones climáticas afecta de manera más acusada a las aguas de goteo en el periodo estival en el que las tasas de goteo se reducen por ausencia de precipitaciones.

Las cuevas son elementos singulares de gran valor científico-cultural. El estudio de los procesos de precipitación-disolución de calcita de los espeleotemas resulta de gran interés en el uso de indicadores de cambios climáticos. Por ello, debe procurarse una gestión adecuada del uso de la cueva que permita la coexistencia de los intereses de la ciencia y la actividad divulgadora de los bienes geológicos, con los socioeconómicos.

Se recomienda, por tanto, el estudio de la regulación del número de visitas, diaria y estacional, ajustándolas de manera que reduzca el impacto sobre la química de las aguas y la formación de espeleotemas. La regulación debería contemplar el valor científico-cultural que en la sociedad tiene la existencia de cuevas turísticas.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

**Andreu, J.M. (1997).** Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid y Cabeçó d'Or (provincia de Alicante). Tesis Doctoral Univ. Alicante, 377 p.

**Andreu, J.M., Cañaveras, J.C., Cuevas, J., García del Cura, M.A., Hernández Bravo, J.A., Muñoz-Cervera, M.C., Soler, V. (2007)** Caracterización microclimática de la Cueva de Canalobre (Alicante). In: Durán JJ, Robledo PA, Vázquez J (eds.). Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible. Publicaciones del IGME, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, nº 24, pp. 105-114.

**Cañaveras, J.C., Andreu, J.M., Muñoz-Cervera, C. y García del Cura, M.A. (2005).** Sulphate speleothems in Canelobre Cave (Alicante, SE Spain). SEM-Macla 3: 59-60.

**Cuezva, S. (2008)** Dinámica microambiental de un medio kárstico somero (Cueva de Altamira, Cantabria): microclima, geomicrobiología y mecanismos de interacción cavidad-exterior. Ph. D. thesis, Universidad Complutense de Madrid.

**Cuevas-González, J., Fernández-Cortés, A., Andreu, J.M., Cañaveras, J.C. (2009)** Condiciones de ventilación e influencia antrópica en la Cueva del Canelobre (Alicante): alteración microclimática en una cavidad turística. In: Durán JJ, Lopez-Martinez J (eds) Cuevas turísticas, cuevas vivas. IGME, Madrid.

**Fernández-Cortés, A., Cuevas-González, J., Cañaveras, J.C., Andreu, J.M., Sánchez-Moral, S., García del Cura, M.A. y Hernández-Bravo, J.A. (2007).** Variación espacio-temporal de Ca-Mg-Sr en el agua de goteo de la Cueva del Canelobre (Alicante): ejemplo de procesos de infiltración en ambientes kársticos semiáridos. Geogaceta 43: 83-86

**Fernández-Cortés, A., Cuevas-González, J., Andreu, J.M., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S. (2008)** Influencia de los cambios microclimáticos en la hidroquímica de los goteos en la Cueva del Canelobre (Alicante). Geotemas 10:1561–1564.

**Fernández-Cortés, A., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Cuevas-González, J., Cuezva, S., Andreu, J.M. (2009).** Variations on seepage water geochemistry induced by natural and anthropic microclimatic changes: Implications for the speleothems growth conditions. Geophysical Research Abstracts, V.11: EGU2009-5868.

**Tooth, A. F. y Fairchild I. J. (2003).** Journal of Hydrology, 273, 51-68.

**Langmuir, D. (1997)** Aqueous environmental geochemistry. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.

**Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J (1999)** User's guide to PHREEQC (v.2)—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259, USGS.