

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

Space-time variations of Ca-Mg-Sr on drip water of Canelobre Cave (Alicante): example of infiltration processes on semiarid karstic areas

A. Fernández-Cortés ^(1,2), J. Cuevas-González ^(1,2), J.C. Cañaveras ^(1,2), J.M. Andreu ⁽¹⁾, S. Sánchez-Moral ⁽³⁾, M.A. García del Cura ^(2,4) y J.A. Hernández-Bravo ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Apdo. Correos, 99. E-03080 Alicante. acortes@ua.es; jaime.cuevas@ua.es; Andreu.Rodes@ua.es; jc.canaveras@ua.es; jahernan@dip-alicante.es.

⁽²⁾ Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada CSIC-UA.

⁽³⁾ Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC). José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. ssmilk@mncn.csic.es.

⁽⁴⁾ Instituto de Geología Económica. CSIC-UCM. Facultad de Geología. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid. angegcura@ua.es.

ABSTRACT

From may/2006 to april/2007 a monthly sampling of the recharge conditions and main hydrogeochemical parameters was conducted at a network of dripping points within Canelobre cave (Alicante). Speleothems are fed by a combination of seepage and fracture water, indicating that the system consists of a matrix with a network of discontinuities (fractures or conduits) with different characteristics. Control of Mg/Ca and Sr/Ca indexes has provided data to identify several water infiltration processes into the vadose zone under arid conditions: ranges of flow-through times to drips, prior calcite precipitation and dissolution of Mg and Sr. Both indexes depend on the discharge intensity, though their variability adjust to a spatial framework determined by cave geomorphology (grade of karst development, stratigraphic contacts and fractures).

Key words: drip water, prior calcite precipitation, speleothem, karst, Canelobre cave.

Geogaceta, 43 (2007), 83-86
ISSN: 0213683X

Introducción

En la actualidad hay un interés creciente por entender los factores que determinan la evolución geoquímica y la variabilidad espacial del agua de infiltración en la zona vadosa de los sistemas kársticos. Un caso particular lo constituyen los estudios hidrogeoquímicos de los goteos en cavidades, encaminados a caracterizar aspectos como el proceso de interacción agua-roca, tipos de recarga del acuífero e influencia del suelo en la geoquímica del agua de infiltración (Musgrove y Banner, 2004). Por otra parte, los procesos actuales de infiltración lenta en cavidades kársticas tienen gran importancia en la interpretación y reconstrucción de las condiciones paleoclimáticas y paleohidrogeológicas (Fairchild *et al.*, 2000; Tooth y Fairchild, 2003).

La heterogeneidad propia de los terrenos kársticos, en términos referentes a la geometría de la zona vadosa y tiempo de residencia, influye en el quimismo del agua de infiltración. Ambos aspectos determinan el grado y procesos de

interacción agua-roca que acontecen en el entorno vadoso próximo a la cavidad. El presente estudio en la Cueva del Canelobre integra las variaciones espacio-temporales del Ca²⁺, Mg²⁺ y Sr²⁺ del agua de infiltración recolectada a través de una amplia gama de goteos en estalactitas. La situación y tasa de descarga (intensidad y variabilidad) de cada goteo han sido consideradas como variables fundamentales a la hora de clasificar diferentes tipos de goteos, en función de los ratios Mg/Ca y Sr/Ca y la presencia de procesos de disolución o precipitación previa de calcita en la zona vadosa.

Contexto geológico y condiciones climáticas

La Cueva de Canelobre (Busot, Alicante) se desarrolla sobre las calizas y calcarenitas del Jurásico terminal-Cretácico basal que constituyen la mayor parte del relieve del Cabeçó d'Or. En superficie el desarrollo de los suelos es muy escaso, aflorando en la mayor parte las calizas a favor de fuertes pendientes.

Morfológicamente la cavidad es una sima en forma de gran bóveda con un desnivel máximo de 70 m, aproximadamente, desde la única entrada natural. La altura máxima de la bóveda se alcanza en la parte más distal de la entrada, llegando a 35 m. La ubicación de los principales goteos es muy diversa, variando desde los situados a una altura media del suelo de 17 m, hasta los goteos de nueva formación cercanos al suelo (tipo "macarrón") con bajas tasas de goteo y un fenómeno de "splash" (diseminación de la gota al golpear el suelo o espeleotema) mínimo.

La precipitación media en el entorno del Cabeçó d'Or es 388 mm/año (Cuevas-González *et al.*, 2007) con un marcado carácter estacional. Durante el periodo de estudio (Mayo 2006-Abril 2007) la precipitación total acumulada fue de 340 mm, con eventos lluviosos poco frecuentes a escala diaria (moda diaria = 0.2 mm) y máximos pluviométricos de 44 mm/día (27/03/2007) (Fig.1).

La temperatura media anual de la zona es de 17.1 °C. Las temperaturas máximas se registran en verano, alcanzándose 33.6

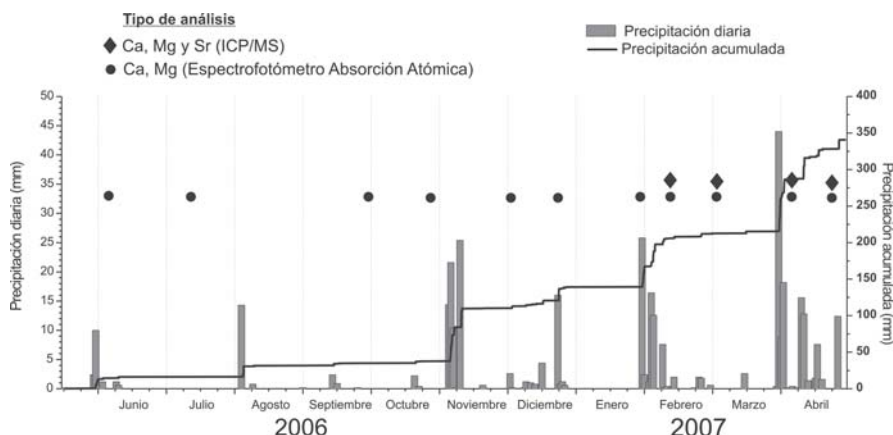


Fig. 1.- Evolución temporal de la precipitación diaria y acumulada en el exterior de la Cueva del Canelobre, junto con la distribución en el tiempo de los diferentes tipos de análisis químicos.

Fig. 1.- Daily and accumulative time series of rainfall behaviour at Canelobre cave, together with the temporal distribution of chemical analyses.

°C, mientras rara vez se desciende por debajo de 0 °C en invierno. La temperatura media diaria oscila entre 4.6 °C (enero) y 29.8 °C (julio-agosto). En el interior de la cavidad, los primeros resultados obtenidos indican que la temperatura del aire se encuentra entre 16 y 18.25 °C, manteniéndose gran parte del año por encima de la media anual exterior. La humedad relativa suele oscilar entre el 70 y el 100% y la concentración media de CO₂ es de 487 ppm.

Metodología

La red de muestreo de aguas de goteo consta de 18 puntos y es espacialmente representativa del conjunto de la cavidad, englobando goteos procedentes de una amplia variedad de espeleotemas y tasas de descarga (estalactitas, estalactitas ali-

neadas en fracturas, pequeñas coladas y “soda straw” de goteo lento o “macarros”). En cada punto de goteo se midió periódicamente las tasas de goteo (nº gotas/min), extrapolando los datos a unidades de caudal según los datos de volumen medio de 0.15 ml/gota calculados en otros estudios similares (Genty y Deflandre, 1998). Cada muestra de agua fue duplicada para su posterior análisis: 125 ml de muestra mediante espectrofotometría de absorción atómica (laboratorio de hidrogeoquímica del MNCN-CSIC, Madrid) y 50 ml de muestra mediante ICP/MS (Acme Analytical Laboratories Lds, Vancouver, Canadá). Todas las muestras fueron almacenadas a 4 °C previo a su posterior análisis. Durante el muestreo de cada punto se midió *in situ* temperatura, pH y conductividad eléctrica del agua de goteo.

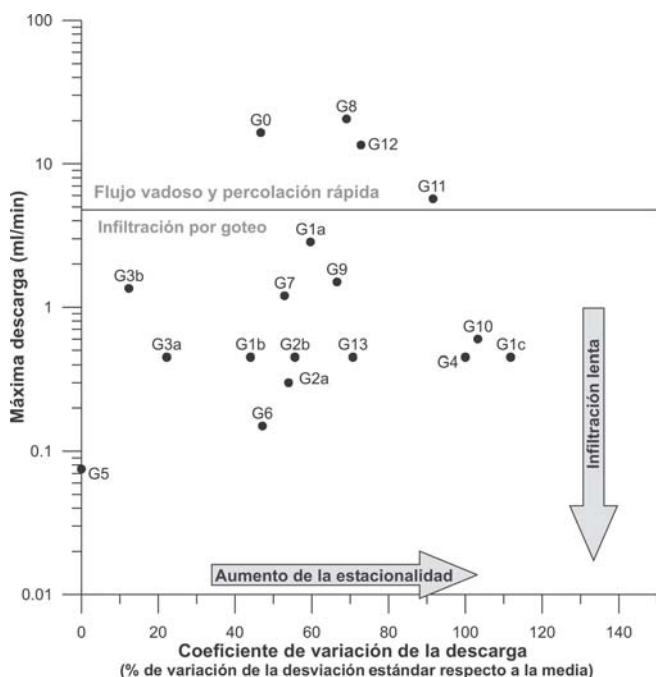


Fig. 2.- Clasificación hidrológica del proceso de infiltración en cada punto de goteo de la Cueva del Canelobre (basado en Smart y Friedrich, 1987).

Fig. 2.- Hydrological classification of infiltration process at each drip point within Canelobre cave (based on Smart and Friedrich, 1987).

El cálculo de CO₃²⁻ y HCO₃⁻ disueltos se realizó mediante una valoración volumétrica con H₂SO₄ (0.5N) en el interior de la cavidad, mediante una bureta digital.

Resultados y discusiones

El agua de goteo en la Cueva de Canelobre es bicarbonatada cálcica y los índices de saturación se encuentran comprendidos entre +0.17 y +0.78 para la calcita, lo que indica que las aguas se encuentran próximas al equilibrio y/o ligeramente sobresaturadas respecto a este mineral.

Para clasificar los procesos de infiltración en una cavidad se ha efectuado una comparación entre el grado y la variabilidad de la descarga, dentro de un mismo año hidrológico o entre varios años (Smart y Friedrich, 1987). En este sentido, la figura 2 caracteriza el tipo de infiltración en la cavidad en función de la intensidad de descarga en cada punto de goteo (tasa de goteo máxima) y el coeficiente de variación de esta descarga en un intervalo de tiempo concreto. El coeficiente de variación corresponde con el porcentaje que representa la desviación típica de la descarga en relación a su media aritmética. De esta forma los eventos de descarga de gran intensidad y elevado coeficiente de variación se corresponderán con procesos de percolación rápida y flujo vadoso a través de conductos preferenciales. Mientras que descargas de menor intensidad se detectarán comúnmente en goteos asociados a reservas de agua procedentes del sistema de microfisuras y poros de la zona vadosa.

El proceso preferencial de infiltración corresponde con goteos asociados a estalactitas de diversa tipología y siempre con tasas por debajo de 24 ml/min (Fig. 2). La mayor parte de los puntos de goteo en la cavidad presentan una intensidad de goteo máxima comprendida entre 0.3 y 13.5 ml/min y con coeficientes de variación inferiores al 80 %. Los puntos con menos tasa de goteo (G5 y G6) corresponden con espeleotemas incipientes tipo “soda straw”. Este tipo de goteos son muy continuos en el tiempo y poco dependientes de las precipitaciones y eventos de infiltración rápida, por lo que presentan un coeficiente de variación inferior al 50%. Los puntos de goteo con mayor tasa de infiltración se sitúan en la zona próxima a la entrada de la cavidad (G0, G8, G11 y G12), correspondiéndose con áreas de infiltración directa y de respuesta rápida a los eventos pluviométricos en el exterior (percolación rápida). De estos cuatro puntos con elevadas tasas de goteo es el G0 el que presenta menor estacionalidad (coefi-

ciente de variación), mientras que el resto de puntos disminuye su descarga, o incluso se anula, durante la época de déficit de agua en el terreno. El fenómeno de estacionalidad también ocurre en goteos con tasas medias o bajas, como por ejemplo los puntos G1c, G4 y G10, cuyo coeficiente de variación de la descarga es superior al 80%. Estos puntos de goteo se activan, o incrementan su descarga, en determinadas épocas del año con lluvias continuadas.

Parámetros como la conductividad eléctrica o el contenido en Ca^{2+} y HCO_3^- (Tabla I) dan una idea del tiempo de residencia del agua de infiltración en la zona no saturada que alimenta al goteo. Los valores más elevados de estos parámetros se presentan en diferentes tipos de goteo (Ej.: G0, infiltración directa y rápida, y G6, de descarga muy lenta tipo "soda straw"). La saturación mineral del agua de infiltración en puntos como el G0 se debe a otros factores, como el desalojo de reservas de agua del sistema de microfisuras y poros de la zona vadosa a través de conductos de mayores dimensiones. Este reservorio de agua ha permanecido más tiempo en la zona vadosa inmediatamente superior a la cavidad, por lo que el agua está más saturada en Ca^{2+} y HCO_3^- .

El enriquecimiento del agua en Mg^{2+} o Sr^{2+} presenta una alta variabilidad espacial, aunque su proporción con respecto al Ca^{2+} , se correlaciona con la intensidad de descarga media en cada punto. Los puntos de goteo con tasas inferiores a 1.5 ml/min, aproximadamente, presentan un ratio Mg/Ca y Sr/Ca elevado, lo que denota un incremento del tiempo de residencia del agua en la zona vadosa. De esta forma, aumenta la proporción de Mg^{2+} y Sr^{2+} respecto al calcio por precipitación previa de calcita.

La variabilidad de los ratios Mg/Ca y Sr/Ca en los puntos de goteo no sigue una pauta definida en función de las tasas de goteo, pero sí sigue un patrón espacial en la cavidad (Fig. 3). Los puntos de goteo con mayores cambios en los ratios Mg/Ca y Sr/Ca se agrupan en la parte más cercana a la entrada de la cavidad. Estos puntos de descarga recogen el agua de zonas con mayor potencia de calizas en la zona no saturada, así como con contactos estratigráficos verticales. Ambos factores favorecen el proceso de infiltración, generando puntos de goteo con mayor inercia al régimen pluviométrico en el exterior y asociados a una compleja red de microfisuras, poros y vías de infiltración, que determina una amplia variación en el contenido y procesos hidrogeoquímicos en los goteos de esta zona. En la parte más distal de la entrada, los puntos de goteos suelen estar alineados a favor de fracturas

Punto de goteo	pH		C.E. ($\mu S/cm$)		HCO_3^- (mg/l)		Ca^{2+} (mg/l)		Mg^{2+} (mg/l)		Sr^{2+} (ppb)	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
G0	7.98	0.22	424.5	37.6	181.0	34.0	64.6	9.5	1.7	0.4	113.5	4.8
G1a	8.01	0.15	294.9	24.7	131.4	27.0	48.8	7.3	1.7	0.7	117.9	23.5
G1b	8.06	0.18	305.6	16.1	122.7	16.5	48.7	4.5	1.8	0.6	122.2	18.5
G1c	8.09	0.15	369.6	68.1	124.3	13.0	59.5	7.8	2.6	0.9	153.7	14.7
G2a	8.03	0.16	273.0	9.7	130.1	13.2	45.0	5.3	1.4	0.3	93.1	9.3
G2b	7.99	0.22	343.0	35.9	125.1	28.5	51.4	3.4	2.2	0.5	-	-
G3a	8.07	0.10	351.2	17.1	119.3	5.5	54.1	5.6	2.1	0.4	132.3	8.0
G3b	8.13	0.11	352.3	8.7	122.6	5.4	53.5	2.5	1.8	0.3	137.2	14.7
G4	8.01	0.15	321.7	20.6	137.9	6.4	53.1	3.4	1.9	0.3	161.0	14.4
G5	8.15	0.13	371.6	17.6	144.3	14.6	53.6	4.8	2.0	0.4	141.8	5.0
G6	8.00	0.06	478.0	46.2	166.0	42.7	68.5	7.4	2.3	0.6	141.3	9.4
G7	8.00	0.12	373.2	21.9	172.1	15.2	61.0	5.7	1.5	0.2	108.5	7.8

Tabla I.- Valores medios y desviación estándar de los principales parámetros hidrogeoquímicos en cada uno de los puntos de goteo con registro completo desde Mayo de 2006.

Table I.- Averages and standard deviations data of main hidrogeochemical parameters at each one of drip points with complete record from May 2006.

(Fig. 3). Estas fracturas delimitan lateralmente la cavidad y el crecimiento de grandes formaciones estalagmíticas. Aunque las fracturas son las vías preferentes de infiltración en esta parte de la cavidad, presenta un menor ángulo de buzamiento (35° y 80°) respecto a los contactos estratigráficos verticalizados en la parte cercana a la entrada. Este hecho supone un mayor tiempo de tránsito del agua de infiltración hasta alcanzar la cavidad y, por lo tanto, un mayor grado de homogeneización hidrogeoquímica del agua (mayor tiempo de residencia) y menor inercia a los eventos pluviométricos.

La disminución de la intensidad de goteo y su mayor inercia a la secuencias de déficit/exceso de agua de infiltración propician la aparición de diferentes procesos hidrogeoquímicos en la parte de

zona no saturada por encima de los puntos de goteo. La figura 4 representa la variación del ión calcio en función de los ratios Mg/Ca y Sr/Ca en tres puntos seleccionados con igual variabilidad en su intensidad (coef. variación = 50%) y diferente valor máximo de descarga: G0 (16.5 ml/min), G2a (0.3 ml/min) y G6 (0.15 ml/min). De forma general, en todos los puntos muestreados aumenta la relación Mg/Ca y/o Sr/Ca y decrece el contenido en Ca^{2+} cuando disminuye la infiltración en la cavidad, representada ésta por la precipitación acumulada en el mes previo. Este comportamiento se detecta, por tanto, en condiciones xéricas debido a un incremento del tiempo de residencia del agua en la zona no saturada, favoreciéndose simultáneamente la precipitación previa de calcita.

Fig. 3.- Distribución espacial de los ratios Mg/Ca (A) y Sr/Ca (B) en la red de puntos de goteo de la Cueva del Canelobre. Ambos ratios están representados en un diagrama tipo Box-Whisker, en el que la longitud de la caja expresa la dispersión de los datos y la mediana de la tasa de goteo divide cada caja (valor de ratio expresado en negrita).

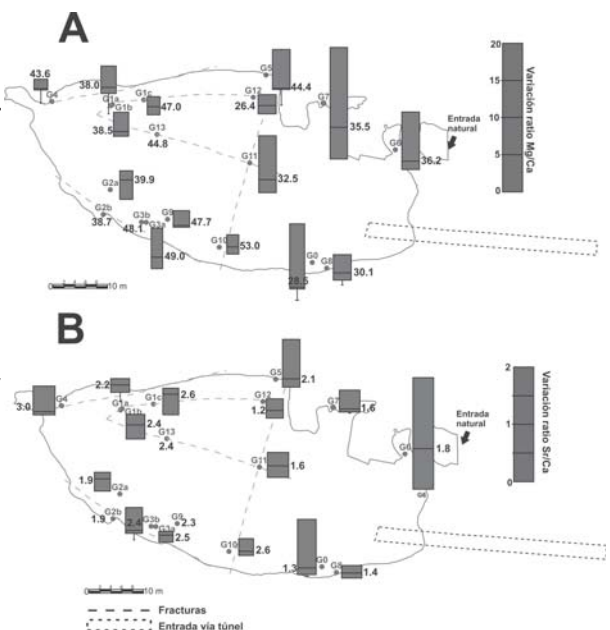


Fig. 3.- Spatial pattern of Mg/Ca (A) and Sr/Ca (B) indexes at drip points' network within Canelobre cave. Both indexes are plotted in a Box-Whisker diagram, which box's size shows the variability of data and the median value of drip rate divides each box (ratio data in bold).

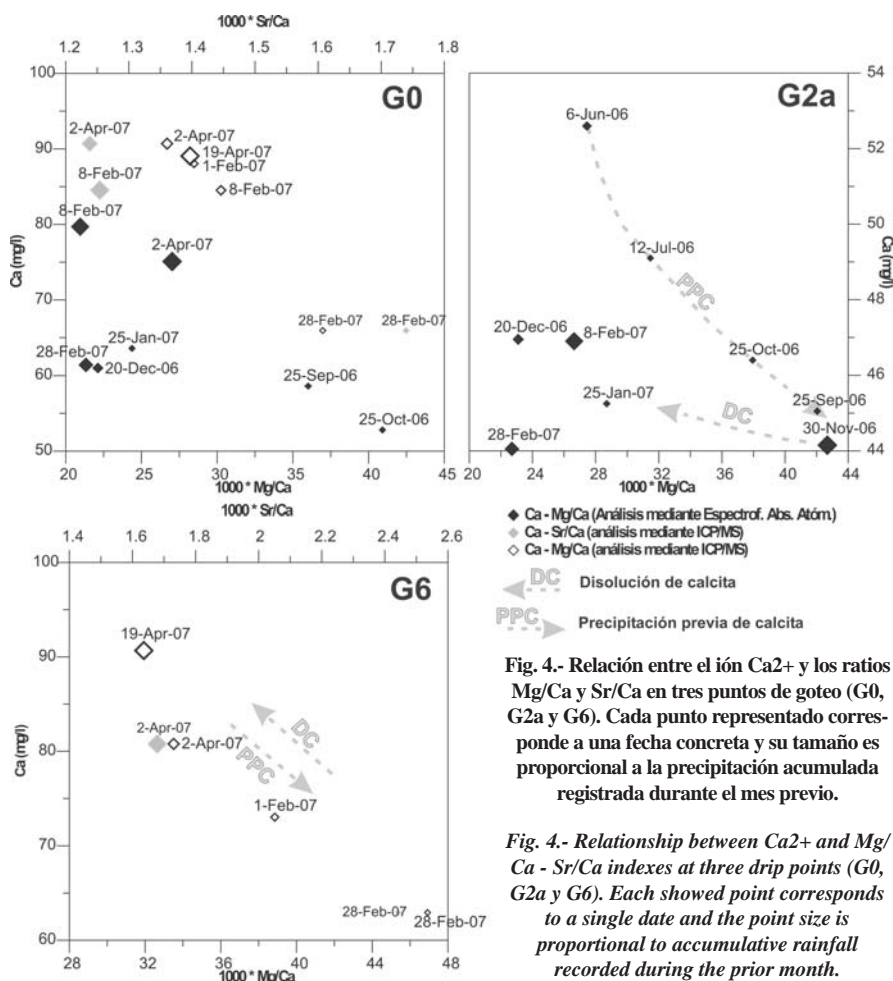


Fig. 4.- Relación entre el ión Ca²⁺ y los ratios Mg/Ca y Sr/Ca en tres puntos de goteo (G0, G2a y G6). Cada punto representado corresponde a una fecha concreta y su tamaño es proporcional a la precipitación acumulada registrada durante el mes previo.

Fig. 4.- Relationship between Ca²⁺ and Mg/Ca - Sr/Ca indexes at three drip points (G0, G2a y G6). Each showed point corresponds to a single date and the point size is proportional to accumulative rainfall recorded during the prior month.

En el caso del punto G0 esta respuesta hidroquímica es más caótica que en el resto de puntos, debido a su mayor inercia a eventos de precipitación puntuales en el tiempo. Este punto de goteo presenta una respuesta rápida y directa a lluvias puntuales, por lo que no se aprecia una secuencia temporal en la relaciones del Ca²⁺ con los ratios Mg/Ca y Sr/Ca. Cuando disminuye la intensidad de goteo, como en el caso de los puntos G2a y G6, la variación de los ratios Mg/Ca y Sr/Ca sí siguen una secuencia temporal indicativa de procesos hidrogeoquímicos preferentes. Así, en el punto G2a, desde junio de 2006 a septiembre se produce una sequía continuada con escasas precipitaciones acumuladas (Fig. 4). Esta situación favorece la precipitación previa de calcita en el camino que recorre el agua de infiltración hasta el goteo, reflejándose en un incremento del ratio Mg/Ca y en una disminución en la concentración del Ca²⁺ disuelto. Este punto entra en carga entre septiembre y noviembre de 2006, pero con un desalojo preferencial de la reserva de agua que ha permanecido un largo periodo en la zona no saturada (enriquecida en Mg²⁺ y empobrecida en Ca²⁺ debido al proceso de precipitación previa de calcita). A partir de esta fecha, el G2a empieza a desalojar el

agua correspondiente a las precipitaciones coetáneas, de forma que el goteo está caracterizado por un agua más agresiva y diluida en Ca²⁺ y Mg²⁺. Este tipo de agua provoca una disolución preferente de calcita. En último lugar, en el punto G6 (goteo de infiltración muy lenta, inferior a 0.15 ml/min) se aprecia una dependencia clara de la hidrogeoquímica del goteo en función de la precipitación acumulada en el mes previo. A pesar de ser un punto con un goteo muy continuo temporalmente (baja estacionalidad y coeficiente de variación de la intensidad de goteo inferior al 50%) se detectan tanto procesos de disolución como de precipitación previa de calcita, lo que desvela cierto control hidrogeológico en los procesos hidrogeoquímicos de este tipo de goteos.

Conclusiones

La zona no saturada que alimenta hídricamente a la Cueva del Canelobre presenta una elevada heterogeneidad estructural, con una compleja red discontinuidades, fracturas y microfisuras que alimentan a espeleotemas con diferentes intensidades de goteo y variaciones en su descarga. En puntos con tasas bajas de goteo el tiempo de trán-

sito del agua en la zona no saturada es mayor y la proporción de fase aérea en la red de conductos aumenta. En este tipo de goteos lentos, el aumento de la estacionalidad en la descarga y la inercia a la pluviometría exterior provocan la aparición de fenómenos de precipitación previa de calcita (detectada por un aumento de los ratios Mg/Ca y Sr/Ca, simultáneo a una disminución de la concentración de Ca²⁺). El fenómeno de precipitación previa de calcita se desencadena por desgasificación en CO₂ del agua de infiltración al aumentar la fase aire en la red de conductos que alimenta a los goteos.

La variabilidad en las tasas de goteo sigue un patrón espacial, agrupándose los puntos de goteo con mayor coeficiente de variación de la descarga en la zona más próxima a la entrada de la cavidad. En esta zona existen vías de infiltración rápida y directa que, como el caso del punto de goteo G0, responden instantáneamente a los eventos pluviométricos en el exterior y presentan una alternancia de procesos de disolución preferente de carbonatos y precipitación previa de calcita.

Agradecimientos

Este trabajo se encuentra dentro del marco de los proyectos CGL2004-05969 y CGL2006-11561/BTE financiados por el MEC, así como, del IGCP-513 de la UNESCO y GV/2007/143 de la Generalitat Valenciana. Fernández-Cortés desarrolla su actividad investigadora en el marco del Programa de Investigación "Juan de la Cierva" financiado por el MEC. Agradecemos al Excmo. Ayto. de Busot y al personal de la cueva la ayuda prestada.

Referencias

Cuevas-González, J., Andreu, J.M., Cañaveras, J.C., Hernández-Bravo, J.A., Sánchez-Moral, S. y García del Cura, M. (2007). *Geogaceta*, 41, 59-62.
 Fairchild, I. J., Borsato, A., Tooth, A. F., Frisia, S., Hawkesworth, C. J., Huang, Y. M., McDermott, F., y Spiro, B. (2000). *Chemical Geology*, 166, 255-269.
 Genty, D. y Deflandre, G. (1998). *Journal of Hydrology*, 211, 208-232.
 Musgrove, M. y Banner, J. L. (2004). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 1007-1020.
 Smart, P. L. y Friederich, H. (1987). En: *Conference on Environmental Problems in Karst Terrains and Their Solution*, 57-87.
 Tooth, A. F. y Fairchild, I. J. (2003). *Journal of Hydrology*, 273, 51-68.