

Determinación experimental del contenido en CO₂ del suelo sobre una cavidad kárstica en clima mediterráneo (Cueva de Nerja, Málaga)

Experimental survey of soil CO₂ content over a karstic cave in mediterranean climate

J. Benavente ⁽¹⁾, K. El Mabrouki ⁽¹⁾, J.L. Molina ⁽²⁾, I. Vadillo ⁽³⁾, C. Liñán ⁽⁴⁾, M. Simón ⁽⁴⁾ y F. Carrasco ⁽³⁾

⁽¹⁾ Instituto del Agua, Universidad de Granada, c/ Ramón y Cajal, nº 4, Edif. Fray Luis de Granada, 18071-Granada, España. jbenaven@ugr.es, kaltoum@ugr.es

⁽²⁾ Instituto Geológico y Minero de España, Oficina de Proyectos de Murcia. Avd. Alfonso el Sabio, Murcia. jlmolina@igme.es

⁽³⁾ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29071 Málaga. vadillo@uma.es, fcarrasco@uma.es

⁽⁴⁾ Fundación Cueva de Nerja. Carretera de Maro s/n. 29787, Nerja (Málaga). cuevanerja@vnet.es

ABSTRACT

The CO₂ content and the temperature of the air have been measured within the scarce soil (although with relatively high organic matter concentration) which partially covers the carbonate outcrops over the Nerja Cave (Málaga). General yearly average values of around 850 ppm and 25 °C have been identified, both using continuous recording devices and separated measures with portable equipment.

Temperature evolution closely follows that of the outside atmosphere. Spatial variations in CO₂ contents are related with the vegetal cover and with the soil depth. Seasonal variations are important, with a maximum of more than 1000 ppm in May (main vegetation development) and minimum (around 350-500) in December. Daily oscillations have also been identified, ranging up to more than 600 ppm in the period of maximum CO₂ production. These results agree with estimates based in hydrogeochemical modelling as well as in the TOC content of drip water to the cave.

Key words: CO₂, soil, Cavity, Karst, Nerja Caves.

Geogaceta, 39 (2006), 95-98

ISSN: 0213683X

Introducción

El conocimiento del contenido, o de la presión parcial, del gas CO₂ en la atmósfera de la franja edáfica en materiales carbonáticos es clave para determinar las características hidroquímicas del agua de infiltración y para explicar su carácter -incrustante, agresivo o equilibrado- respecto a tales materiales. A pesar de este interés, las determinaciones experimentales son relativamente escasas. Cuando interesa aportar algún valor al respecto, por ejemplo en intentos de modelización hidroquímica, se suele recurrir a expresiones empíricas indirectas -como, por ejemplo, la fórmula de Brook *et al.* (1983) en función de la evapotranspiración anual- que ofrecen valores de referencia, los cuales son más o menos modificados en el proceso de ajuste.

En el caso de la cueva de Nerja, importante cavidad karstística del litoral malagueño que se desarrolla en el seno de mármoles calizo-dolomíticos triásicos y que recibe una media aproximada de 500.000 visitantes al año, el contenido de CO₂ es objeto de control

continuo en el interior de la cueva (Carrasco *et al.*, 1999).

El entorno de la cavidad se encuentra bastante antropizado, tanto por existir una importante superficie construida (viviendas

das y el propio aparcamiento de las instalaciones) al sur de la misma, como por la presencia de zonas ajardinadas inmediatamente al norte de la entrada, a lo largo de una franja de unos 50 m. Más hacia el

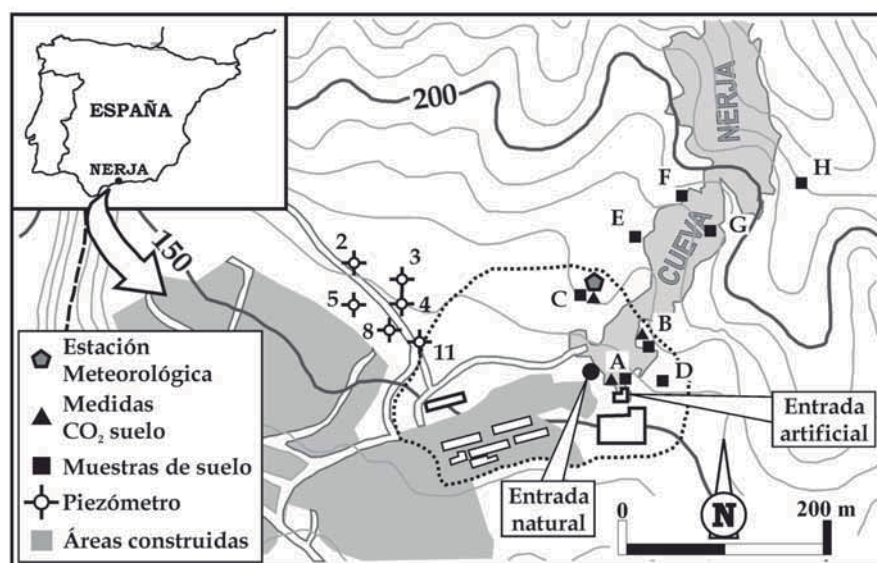


Fig. 1.- Situación de los puntos de control utilizados en este estudio. Se incluye también el contorno aproximado de la cavidad

Fig. 1.- Situation of the monitoring points used in this study. The approximate cave perimeter is also shown

Puntos	CO ₂ (ppm)						T (°C)					
	N	Min	Max	Media	Desv	%CV	N	Min	Max	Media	Desv	%CV
A ₁₅	6	1318	3041	2127	681	32	11	15,0	26,7	20,2	4	19
A ₃₀	15	711	3400	2013	914	45	22	12,7	29,0	20,7	5	23
B ₁₅	15	320	1323	616	223	36	23	11,2	39,6	25,1	8	33
B ₃₀	15	315	1797	877	386	44	22	13,1	37,8	23,9	7	27
C ₁₅	15	271	1032	580	202	35	22	14,1	40,9	26,9	8	29
C ₃₀	15	429	2332	1440	539	37	22	14,0	38,8	26,3	8	30

Tabla I. Resumen estadístico de las medidas de CO₂ y de temperatura en el suelo

Table I. Statistical summary of the soil CO₂ and temperature measurements

norte aparece vegetación natural -matorral con palmitos, sobre todo- que coexiste con algunos sectores de pinar de repoblación. En la figura 1 se representa la topografía de los alrededores de la cueva de Nerja y se indica también el contorno de buena parte de la misma.

Objetivos

En el marco de las investigaciones sobre procesos kársticos y espeleogénesis que se llevan a cabo en esta cavidad, se consideró conveniente establecer un dispositivo experimental que permitiera la cuantificación de los contenidos de CO₂ epigénico en la zona de infiltración y que aportara datos sobre sus pautas de variación espacial y temporal. En este trabajo se presenta dicho dispositivo y se analizan los resultados obtenidos a lo largo de los aproximadamente dos primeros años de control.

Metodología

Una fase previa del presente trabajo ha consistido en la toma de una serie de muestras de suelo del entorno sobre la cueva para analizar su contenido en materia orgánica. La determinación analítica se ha hecho por el método de Tyurin. En la figura 1 se incluye la localización de los puntos de muestreo. Dos de ellos (A y D) están en la zona ajardinada, donde el suelo ha sido modificado con ese fin (aporte de mantillo vegetal). Otro punto (B) está en el límite entre los jardines y una zona de pinar maduro. El resto de los puntos se distribuyen por la zona de matorral autóctono con pinar de repoblación de menor porte. De ellos, el H y el C están en sectores de resalte topográfico; el F y el G en sectores de ladera y el E en una vaguada.

Salvo en las muestras tomadas en los jardines, el resto presentaban poco espesor de materiales de alteración, generalmente inferior a 30 cm, sobre los mármoles muy fisurados. En el punto D, no obstante, se pudieron obtener separadamente

muestras a diferente profundidad: 15 y 30 cm, aproximadamente. Se trata de un suelo rojizo, de granulometría heterogénea y tamaño de grano más frecuente de arena fina, con una capacidad de infiltración elevada (Benavente *et al.*, 1996).

Los puntos A, B y C se seleccionaron para la instalación de unos tubos de PVC de 20 cm de diámetro. La selección obedecía al criterio de caracterizar suelos con diferente grado de antropización: menor en C y mayor en A. En cada punto se instalaron dos tubos de PVC, a los que denominamos «pocillos», provistos de tapadera, abiertos por su extremo inferior y ranurados lateralmente en sus 5 cm finales. El objetivo era poder medir el contenido de CO₂ del escaso suelo a dos profundidades diferentes: 15 y 30 cm. De hecho, a esta última profundidad se encontraba la roca madre.

Las medidas se han efectuado con regularidad aproximadamente mensual desde mediados de 2003, aunque hay algún intervalo en que no se han llevado a cabo. Se ha utilizado un medidor portátil marca TESTO, que permite lecturas de hasta 10.000 ppm en la concentración de CO₂ con precisión de 1 ppm. También se mide simultáneamente la temperatura del aire con precisión de centésimas de grado centígrado. En este instrumento se miden regularmente ambas variables en el interior de la cueva, lo que facilita la comparación de resultados en los dos ámbitos. Hay que advertir que, a partir de noviembre de 2004, las medidas se hacen con otro instrumento, aunque de características similares al primero, que tuvo problemas en su funcionamiento autónomo con baterías.

Las medidas con el medidor portátil se hacen en horas centrales tanto de la mañana como de la tarde. Desde finales de enero de 2004 se ha instalado en el punto C₃₀ un dispositivo de medida de tipo «data-logger» marca TELAIRE.

La infraestructura de control se completa con una serie de sondeos piezométricos con profundidades de varias decenas de metros, que atraviesan

materiales carbonáticos en su práctica totalidad. Se representan también en la figura 1, aunque en el presente trabajo no serán tenidos en cuenta, al tratarse de un ámbito diferente al de los suelos con generación mayoritariamente biogénica de CO₂.

Resultados

Los contenidos de materia orgánica en las muestras de suelo (Fig. 1) están comprendidos entre valores de 2 a 2,5 % (puntos H y F) y un máximo de casi 15 % (punto A). Las muestras C y D₁₅ presentaron contenidos entre 3,5 y 6 %. El resto de las muestras (B, D₃₀, E y G) tienen contenidos entre 6 y 8 %.

Los resultados de las medidas periódicas del contenido de CO₂ y de la temperatura del suelo en el interior de los pocillos se resumen en la tabla I. Hay que advertir que el hecho de que en esa tabla el número de medidas de cada variable sea diferente obedece a que las medidas del contenido de CO₂ realizadas durante 2003 no se han tenido en cuenta para el cálculo de los estadísticos básicos que allí se especifican. Esto se debe a que, al representar gráficamente los datos obtenidos en la serie completa, se comprobó que en el citado año los valores eran bastante más elevados y, además, con una distribución temporal casi opuesta a la que denotan las medidas de 2004 y 2005. Por otra parte, el punto A₁₅ fue accidentalmente destruido tras una primera fase de medidas, y de ahí el menor número de muestras.

Si se toman como referencia las concentraciones medias de CO₂ a 30 cm de profundidad, se advierte que el valor más elevado (2010 ppm) se alcanza en el punto A, seguido del C (1440 ppm) y luego del B (880 ppm). La variabilidad es importante, como denotan los valores elevados del coeficiente de variación (30-50 %). Los valores máximos registrados son del orden de dos veces las cifras medias en cada punto. Los valores mínimos muestran más homogeneidad, al estar en los tres puntos dentro del rango de 300 a 750 ppm. En los puntos B y C se comprueba que la concentración es mayor en los pocillos más profundos. Si se consideran conjuntamente todos los valores medidos en estos dos puntos sin atender a las diferencias de profundidad y se calcula el promedio se obtiene un valor general de 880 ppm, un máximo de 1640 ppm y un mínimo de 330 ppm.

Las medidas de temperatura del suelo son más homogéneas, a tenor de los valores del coeficiente de variación (< 30 %).

Si se toma como referencia comparativa las concentraciones medias a 30 cm de profundidad, se advierte una diferencia apreciable de los valores: entre aproximadamente 21° C (punto A) y 27° C (punto C). El rango de oscilación térmica identificado es menor en el punto A (unos 14° C) y mayor (casi 20° C) en el punto C. La media general en los puntos B y C es de 25,5° C, con extremos de 38° C y 13° C.

Los registros del «data-logger» (Fig. 2) indican que los valores máximos del contenido de CO₂ en el punto C₃₀ se alcanzan en el mes de mayo y los mínimos alrededor de diciembre. Los valores medios aproximados que resultan para estos meses son de 1000 ppm y 500 ppm. El valor medio general en ese punto para el año 2004 según este tipo de registro es de unos 800 ppm. En cuanto a valores extremos, se identifican picos aislados de alrededor de 1600 ppm y mínimos de unos 400 ppm. En la figura se incluye también un ejemplo de registro diario del contenido de CO₂ correspondiente al periodo de valores medios más altos. Las variaciones diarias alcanzan un rango de más de 600 ppm. Es patente el descenso relativo en las horas diurnas.

El registro de temperaturas (Fig. 2) indica valores medios máximos del orden de 35° C alrededor de agosto y mínimos de unos 13° C en enero, con un promedio de aproximadamente 25° C.

Discusión

El valor elevado de contenido en materia orgánica encontrado en la muestra A, correspondiente a una zona con césped de la zona ajardinada, responde a que verosíblemente se añadió mantillo vegetal. El del resto de las muestras es relativamente alto, habida cuenta del escaso desarrollo de los litosoles. Esta circunstancia es invocada asimismo por Batiot *et al.* (2003) para explicar valores de TOC relativamente altos en el agua de goteo.

Las variaciones temporales de la temperatura del aire del suelo se corresponden, sin apenas desfase, con las ambientales, aunque los valores son más elevados que éstas (24° C y 11,4° C son los valores promedio de las temperaturas ambientales máximas y mínimas, según Andreo y Carrasco, 1993), lo cual es lógico habida cuenta de las diferentes características de los enclaves en que se miden. Las diferencias en los valores medios que se han identificado entre puntos, entre 21 y 27° C aproximadamente, deben obedecer sobre todo al distinto grado de insolación así como al efecto refrigerante del

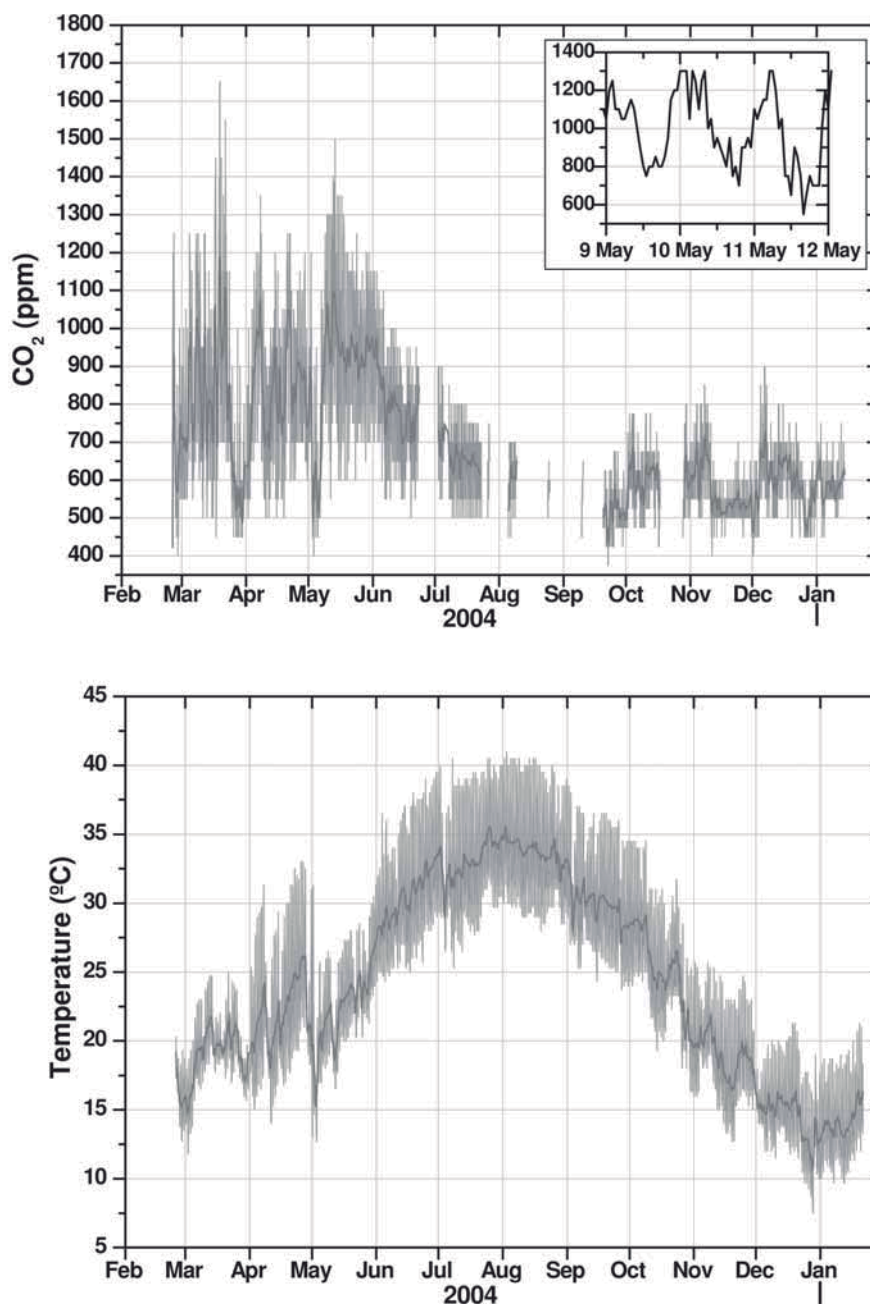


Figura 2. Resultados del control en continuo de la concentración del CO₂ y de la temperatura en el punto C₃₀

Figure 2. Data of the continuous recording of the CO₂ content and temperature in the point C₃₀

riego en el punto A.

Es bien conocido que la fuente principal de CO₂ en el suelo es la respiración o la oxidación de la materia orgánica y que, dependiendo del tipo de vegetación o del ciclo vital de la misma, se producen variaciones espaciales y temporales en el contenido de ese gas. Los contenidos de CO₂ en los suelos sobre la cueva presentan, a la luz de los resultados de este trabajo, ambos tipos de variaciones. Así, los suelos de la zona ajardinada llevan asociados contenidos más elevados de gas

que en los afloramientos donde apenas hay desarrollo edáfico. Para los primeros, que cubren sólo la superficie más cercana a la entrada de la cueva, este estudio ofrece valores medios del orden de 2000 ppm (10^{-2.7} atm), mientras que para los segundos es de unos 850 ppm (10^{-3.0} atm). Un valor intermedio (10^{-2.5} atm) fue utilizado con buenos resultados en la modelización hidrogeoquímica de los procesos que afectan al agua de infiltración hasta que alcanza la cavidad (Cardenal *et al.*, 1999).

El valor obtenido de 850 ppm es algo mayor que la concentración media de CO₂ dentro de la zona visitable de la cavidad (unos 680 ppm: Carrasco *et al.*, 1999). Estos autores ponen también de manifiesto la gran variabilidad en los valores, con máximos de unos 2000 ppm en meses de verano y mínimos de unos 250 ppm en meses de invierno.

En cuanto al incremento del contenido medio en CO₂ con la profundidad, que se pone de manifiesto sobre todo en el punto C, en el que se pasa desde aproximadamente 600 ppm hasta casi 1500 ppm (Tabla I), Batiot *et al.* (2003) también llegaron a la misma conclusión en su estudio sobre el TOC del agua de goteo. Esta tendencia se corrobora con los datos obtenidos a 1 m de profundidad en el sondeo 3 (Fig. 1), donde se encuentra un valor medio de aproximadamente 2000 ppm.

En lo relativo a las variaciones temporales de los contenidos en CO₂, el registro continuo en el punto C durante 2004 ha permitido identificar los máximos en el mes de mayo, coincidiendo con la fase de máximo desarrollo vegetativo de la cobertura vegetal, y los mínimos alrededor de diciembre, coincidiendo con las temperaturas más bajas y la menor actividad vegetal. A nivel diario, son patentes las variaciones entre los periodos diurno (valores mínimos) y nocturno (valores máximos), lo que se relaciona con el efecto de la respiración respecto a la fotosíntesis. El rango de estas oscilaciones llega a superar en mayo los 600 ppm, lo que representa los dos tercios de los valores medios diarios en ese periodo. Según esto, los valores de la tabla I, medidos todos ellos durante el día, representarían una estimación por defecto de la concentración media de CO₂.

Conclusiones

En el entorno de la Cueva de Nerja, los afloramientos de los mármoles triásicos en los que se desarrolla la cavidad se caracterizan, según el ámbito topográfico concreto, por aparecer la roca

desnuda o recubierta de un litosol rojizo de muy escaso desarrollo. Además, la parte de la cavidad más próxima a la entrada se sitúa bajo suelos más o menos antropizados. El contenido en materia orgánica de estos suelos, sobre todo en el caso de la zona de jardines, es elevado.

La temperatura del suelo sigue sin apenas desfase la evolución de la temperatura ambiental, con valores más elevados. La diferencia entre ambas en verano es de unos 10° C y en invierno de unos 2° C.

El contenido de CO₂ del suelo muestra variaciones en el tiempo, de periodicidad diaria y estacional, y en el espacio, tanto entre puntos de muestreo como con la profundidad dentro de los puntos. El contenido medio general que resulta es de aproximadamente 850 ppm. Los valores mínimos se encuentran alrededor del mes de diciembre y son de 300-500 ppm, es decir, escasamente superiores a los de la atmósfera. Los máximos se miden en mayo, con cifras frecuentemente en el rango de 1000-2000 ppm, con un valor medio aproximado de unos 1650 ppm. La diferencia marca las fases extremas del desarrollo de la vegetación natural en el área. Las variaciones diarias alcanzan un rango superior a 600 ppm en mayo, con contenidos más altos durante la noche por efecto conjunto de la respiración y desactivación de la función fotosintética.

Las principales diferencias espaciales en el contenido de CO₂ del suelo se relacionan con los valores más elevados que se miden en la zona ajardinada respecto de la zona de vegetación natural. También se comprueba que, para puntos particulares, el contenido del gas aumenta con la profundidad de las medidas.

Aunque el número de datos de partida es diferente en ambos casos, la comparación de los contenidos medios de CO₂ del suelo con los que se obtienen en el interior de la zona visitable de la cueva indica que éstos son inferiores, aunque las diferencias no son grandes. La localización temporal de los mínimos se centra en el invierno en ambos ámbitos. En cuanto a

la de los máximos, para el suelo corresponde a mayo, en relación con el máximo desarrollo vegetal, mientras que dentro de la cueva se registra en los meses de mayor afluencia de visitantes (julio a septiembre).

Agradecimientos

Investigación financiada por la Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja («Estudio de la génesis actual de espeleotemas en la Cueva de Nerja»). También constituye una contribución al Proyecto 513 del PIGC de la UNESCO.

Se agradece la colaboración de la Lda. Rosa María Muros Esturillo en las primeras fases de obtención y clasificación de los datos.

Los comentarios de un revisor anónimo respecto del documento original han contribuido a mejorar su redacción.

Referencias

- Andreo, B. y Carrasco, F. (1993). En: *Geología de la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, Ed.). 163-187.
- Batiot, C., Liñán, C., Andreo, B., Emblanch, C., Carrasco, F. y Blavoux, B. (2003). *Gophysical Research Letters*, 30, 2179.
- Benavente, J., Almécija, C. y Carrasco, F. (1996). En: *IV SIAGA*. Comunicaciones, I, 91-100.
- Brook, G.A., Folkoff, M.E. y Box, E.O. (1983). *Earth Surface Proceedings*, 79-88.
- Cardenal, J., Benavente, J., Andreo, B. y Carrasco, F. (1999). En: *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico* (B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán, Eds.). Patronato de la cueva de Nerja, 403-412.
- Carrasco, F., Andreo, B., Vadillo, I., Durán, J.J. y Liñán, C. (1999). En: *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico* (B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán, Eds.). Patronato de la cueva de Nerja, 323-334.