Benavente Herrera, J. *et al*. Cuantificación preliminar de los flujos de CO_2 en la Cueva de Nerja (Málaga). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial.* Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 319-326.

Cuantificación preliminar de los flujos de CO_2 en la Cueva de Nerja (Málaga)

J. Benavente Herrera [(1)], I. Vadillo Pérez [(2)], L. Ojeda Rodríguez [(2)], C. Liñán Baena [(2,3)], Y. del Rosal Padial [(3)] y F. Carrasco Cantos [(2)]

[(1)] Instituto de Investigación del Agua, Universidad de Granada, C/ Ramón y Cajal, nº 4. 18071 Granada, jbenaven@ugr.es

[(2)] Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos s/n, 29071- Málaga, vadillo@uma.es, lucia_lor2@hotmail.com, crilinbae@uma.es, fcarrasco@uma.es

[(3)] Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación. C/ Carretera de Maro s/n, 29787-Nerja (Málaga) cbaena@cuevadenerja.es, yolanda@cuevadenerja.es.

RESUMEN

En este trabajo se realiza un balance mensual aproximado de CO_2 en la Cueva de Nerja (Málaga) durante 2015. El balance se ha planteado con el objetivo de tener una estimación del flujo neto de CO_2 entre la Cueva de Nerja y la zona vadosa que la rodea. Los resultados muestran que los dos principales flujos son los relacionados con la ventilación natural: el que sale desde el interior hacia el exterior (del orden de 55 t/año) y el que entra a la cueva desde el exterior (unas 39 t/año). La respiración de los visitantes supone una entrada de unas 14,5 t/año, principalmente durante los meses de verano. Se identifica un flujo neto de gas desde la zona vadosa hacia la cueva de noviembre a abril, asociado a la intensa ventilación convectiva de la cavidad. De mayo a octubre, cuando la ventilación natural se anula prácticamente, el flujo procede desde la cueva hacia la zona vadosa. Ambos flujos resultan ser de magnitud aproximadamente similar (unas 10-11 t en cada periodo), por lo que, a nivel anual, el flujo neto de CO_2 entre la cueva y la zona vadosa circundante presenta un valor casi nulo.

Palabras clave: balance CO_2, Cueva de Nerja, flujos de aire vadoso, ventilación natural.

Preliminary quantification of CO_2 flows in the Cueva de Nerja (Málaga)

ABSTRACT

A CO_2 mass balance has been carried out for the Nerja Cave system during 2015. The balance has been set in order to get an estimation of the net flux between the cavity and the vadose zone which surrounds it. The results indicate that the two main fluxes are those linked to the natural cave ventilation: one leaving the cavity to the exterior (about 55 t/year), and other entering to the cave from outside (some 39 t/year). The breathing of the visitors accounts for about 14.5 t/year, mainly during summer months. Net flux of gas from the vadose zone to the cave seems to occur from November to April, linked to the strong convective ventilation of the cavity. From May to October, when the natural ventilation of the cave is practically inhibited, the net flux is thought to be from the cavity towards the vadose zone. The amount of both fluxes is fairly similar (some 10-11 t in each period), and then the net annual flux of CO_2 results to be nearly nil.

***Key words*:** *CO_2 balance, natural ventilation, Nerja Cave, vadose air fluxes.*

Introducción

La Cueva de Nerja se localiza a unos 800 m del mar Mediterráneo, en el borde meridional de la Masa de Agua Subterránea (MASb) de Las Alberquillas. Esta MASb está integrada por mármoles triásicos karstificados, dolomíticos en la base y calizos a techo, con espesores generalmente superiores a los 500 m. Debajo de esta formación calcárea existe otra potente formación de naturaleza metapelítica. Ambas formaciones están intensamente plegadas y fracturadas, aunque en el entorno de la cueva los mármoles presentan buzamientos suaves hacia el mar.

La Cueva de Nerja presenta una forma en planta sensiblemente alargada en dirección cercana a la N-S. Está abierta a las visitas en aproximadamente un tercio de su volumen (unos 300.000 m^3) y se localiza en la zona vadosa de la MASb antes citada, entre las cotas 127 m y 195 m. La superficie topográfica sobre la cueva alcanza una altitud máxima cercana a los 350 m. El nivel freático del acuífero en el entorno de la cueva debe situarse a unos 10-20 m bajo el fondo de la cueva. Ello se desprende de la cota del cercano manantial de Maro, la principal surgencia de la MASb (unos 120 m) y de la cota del nivel de agua estático en la captación de 150 m de profundidad que se utiliza en las instalaciones de la cueva (105-110 m). Según todo ello, el espesor de la zona vadosa del acuífero en el sector donde se localiza la cueva está comprendido, a grandes rasgos, entre los 50 m y los 150 m.

El incremento en los controles de las variables ambientales en el interior de la Cueva de Nerja, unido a los nuevos datos relativos a la incidencia de la conexión entre la cavidad y el exterior por medio del conducto artificial que conecta con otra cavidad situada poco más al norte (Cueva Pintada), hace que el conocimiento de la ventilación en el sistema Cueva de Nerja se haya establecido con bastante precisión (IICN, 2016). A lo largo de 2015 también se ha avanzado en el estudio sistemático del CO_2 de la zona vadosa en el entorno de la cueva, a partir de una red de sondeos de investigación.

Como intento de explicación de las variaciones estacionales en los contenidos de CO_2 registrados en la red de sondeos antes mencionada (Benavente *et al*., 2010) se planteó un balance de masas aproximado de ese gas en la Cueva de Nerja. Esta labor se ha llevado a cabo en un trabajo reciente (Benavente *et al*., 2015). Para ello se han utilizado datos medios de concentración de CO_2 en las salas de la cueva y del número de visitantes del periodo 2008-2013. Un dato crucial en el balance es el flujo de aire asociado con la ventilación natural de la cavidad. La información al respecto que se ha tenido en cuenta es el dato de 3,21 m^3s^{-1} en el periodo invernal y de 0,04 m^3s^{-1} en el periodo estival (Dueñas *et al*., 1999). El primero se considera de octubre a junio, con flujo del exterior al interior, y el segundo de julio a septiembre, con flujo en sentido opuesto (Liñán *et al*., 2014; Liñán y del Rosal, 2014). El trabajo de Benavente *et al*. (2015) sugería la existencia un flujo neto de CO_2 desde la zona vadosa hacia la Cueva de Nerja de unas 24 t/año, concentrado en el periodo invernal en sentido amplio.

El objetivo del presente trabajo es intentar precisar los resultados anteriormente citados mediante la realización del balance de masas de CO_2 en la Cueva de Nerja. En este caso con datos obtenidos durante 2015 y a nivel mensual.

Metodología

El balance de masas de CO_2 se ha efectuado en el conjunto de la Cueva de Nerja, sin distinguir entre zonas visitable (Galerías Turísticas) y restringida (Galerías Altas y Nuevas). Los datos de partida, procedentes de la red de control del organismo que gestiona la cavidad (IICN, 2016), son los siguientes: número de visitantes mensuales; concentración media mensual y de los días inicial y final de cada mes de las Galerías Turísticas (salas de Belén, Cascada y Cataclismo) y de las Galerías Altas y Nuevas (salas de Hércules, Inmensidad y Montaña); temperaturas medias mensuales del exterior (T_{ext}) y del interior de la cavidad (T_{int}), a partir de las cuales se calcula el índice ΔT (T_{ext} - T_{int}).

Las medias para el conjunto de la cueva se han calculado teniendo en cuenta la diferente proporción de cada zona en el volumen total de la cavidad: aproximadamente un tercio para la zona visitable y dos tercios para la restringida. Para las visitas se ha considerado una duración media de una hora y una exhalación promedio de CO_2 de 17 L/h·persona (Quindos *et al*., 1987). El contenido medio de CO_2 del aire exterior se considera 400 ppm(v).

Como no hay nuevos datos que permitan distribuir a nivel mensual los flujos medios estacionales de ventilación antes citados, se ha adoptado un reparto de los mismos en función del índice ΔT arriba definido. Para el aire exterior que entra en la cavidad se obtiene así un flujo mensual promedio comprendido entre 4,75 m^3s^{-1} (enero 2015) y 1,88 m^3s^{-1} (noviembre 2015). Para el aire interior que sale de la cavidad, el flujo está comprendido entre menos de 0,01 m^3s^{-1} (octubre 2015) y 0,08 m^3s^{-1} (julio 2015). El promedio en el conjunto de meses con $\Delta T < 0$ (noviembre a abril de 2015) y en los que $\Delta T > 0$ (mayo a octubre de 2015) se mantiene en los valores de referencia citados arriba: 3,21 m^3s^{-1} y de 0,04 m^3s^{-1}, respectivamente.

Las entradas de CO_2 a la cueva que se consideran proceden del aire exterior (E_{aext}) cuando $\Delta T<0$, de la exhalación de las visitas (E_{visi}) y de la zona vadosa circundante (E_{zvad}). Las salidas son del aire interior al exterior (S_{aint}) cuando $\Delta T>0$ y hacia la zona vadosa circundante (S_{zvad}). El balance puede plantearse de modo que se obtenga una estimación del flujo neto de CO_2 respecto de la zona vadosa (F_{zvad}):

$$F_{zvad} = E_{zvad} - S_{zvad} = S_{aint} - E_{aext} - E_{visi} \pm \text{Variac. Almacenam.} \quad (1)$$

La última variable se estima a partir de las concentraciones medias iniciales y finales en las salas y del volumen de la cavidad.

Otros posibles flujos de CO_2, como el que se produciría dentro de la cueva asociado a precipitación de $CaCO_3$ por el agua de goteo, no se han tenido en cuenta en el balance por ser de magnitud sensiblemente inferior a las partidas consideradas (Benavente *et al*., 2015).

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los valores mensuales y anuales (totales o promedios) de las variables consideradas en el balance y de su adaptación para ser utilizadas en la ecuación (1) con objeto

AÑO 2015	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Suma/ Promedio
T_{med}	-6,25	-5,76	-4,05	-2,62	1,30	3,52	7,11	6,62	2,77	0,31	-2,47	-4,09	-
Q para T< 0	4,75	4,38	3,08	1,99	-	-	-	-	-	-	1,88	3,11	-
Q para T> 0	-	-	-	-	0,01	0,04	0,08	0,07	0,03	0,00	-	-	-
Cc. CO_2 med	481	529	590	670	819	909	728	871	921	895	591	518	**710**
Cc. CO_2 ini	480	483	628	685	703	904	597	609	619	798	736	513	-
Cc. CO_2 fin	471	582	697	688	885	582	613	602	815	742	525	593	-
Visitantes	10.119	16.380	25.883	37.331	33.092	34.703	57.217	81.754	42.260	36.782	16.367	16.127	**408.015**
Ent CO_2 ext	9.671	8.916	6.273	4.050	29	80	160	149	63	7	3.826	6.338	**39.562**
Ent CO_2 vis	358	580	917	1.322	1.172	1.229	2.026	2.895	1.497	1.303	580	571	**14.451**
Sal CO_2 ext	11.749	11.945	9.353	6.997	60	192	333	385	154	15	6.083	8.450	**55.715**
Var. lmac.	-5	59	40	2	107	-190	10	-4	116	-33	-125	47	**24**
F_{ZVAD}	1.715	2.507	2.204	1.627	-1.094	-1.498	-2.177	-3.049	-1.443	-1.343	1.553	1.587	**589**

Tabla 1. Valores de las variables consideradas en el balance mensual de CO_2 de la Cueva de Nerja en 2015 y estimación del flujo neto de gas respecto de la zona vadosa circundante (F_{ZVAD}). Q: flujo de aire en m^3s^{-1}. Cc.: concentraciones de CO_2 en la cueva en ppm(v). Flujos de entrada (Ent), de salida (Sal), variaciones de almacenamiento y F_{ZVAD} expresados en kg CO_2. Ver texto para más información

de estimar el flujo vadoso neto (F_{zvad}). La estimación de esta variable debe considerarse sólo como un intento de aproximación a las circunstancias reales debido a las hipótesis mantenidas en los cálculos, particularmente la distribución mensual de flujos de aire y su vinculación con las circunstancias de $\Delta T < 0$ ó $\Delta T > 0$.

Recientemente se están efectuando medidas sistemáticas del sentido y la velocidad del aire en distintos puntos de la cueva. En IICN (2016) se mencionan valores en las Galerías Altas comprendidos entre 0,004 y 0,013 m/s, de los que puede obtenerse una media de 0,0085 m/s. Si consideramos para la cueva una sección transversal al flujo de 400 m^2 (aproximadamente 8 m de alto y 50 m de ancho), el flujo medio que resulta es de 3,4 m^3s^{-1}. Este valor es muy similar al valor promedio del flujo de aire considerado en el balance para el periodo "invernal" (en sentido amplio): 3,2 m^3s^{-1}, obtenidos a partir de datos del contenido en ^{222}Rn de la cavidad (Dueñas *et al*., 1999).

La principal entrada de CO_2 en la Cueva de Nerja en el año 2015 se estima en unas 39,5 t/año y corresponde al gas procedente del aire exterior. Esta entrada se produce entre noviembre y abril, periodo en que actúa la ventilación convectiva de la cavidad, inducida por valores negativos del índice ΔT. Entre mayo y octubre este proceso puede considerarse despreciable (entradas conjuntas de gas inferiores al 2 % de la cifra anterior). Las entradas de CO_2 por la respiración de los visitantes se han estimado en unas 14,4 t/año. De ellas, el 70 % se producen entre abril y octubre (periodo con ΔT positivo). El flujo neto procedente de la zona vadosa que resulta del cálculo es poco significativo (del orden de 0,6 t/año) pues el procedimiento de cálculo implica la suma algebraica de entradas (valores positivos) y salidas (valores negativos). Por el contrario, si se consideran los valores de este componente a nivel estacional, los resultados son más informativos. Así, se estima un flujo neto entrante de aproximadamente 11,2 t de CO_2 durante los meses con ΔT negativo.

La principal salida de CO_2 del sistema es por la ventilación natural hacia el exterior (unas 55,7 t/año) y se concentra en el periodo de meses con el índice ΔT negativo. Le sigue la salida desde el interior de la cavidad hacia la zona vadosa en el periodo de mayo a octubre (10,6 t).

En la figura 1 se representan los resultados obtenidos para los flujos calculados, considerados estacionalmente (periodos con valores positivos y negativos del índice ΔT). A nivel anual, la variación de almacenamiento de CO_2, como resulta esperable en este tipo de cálculos, es prácticamente nula.

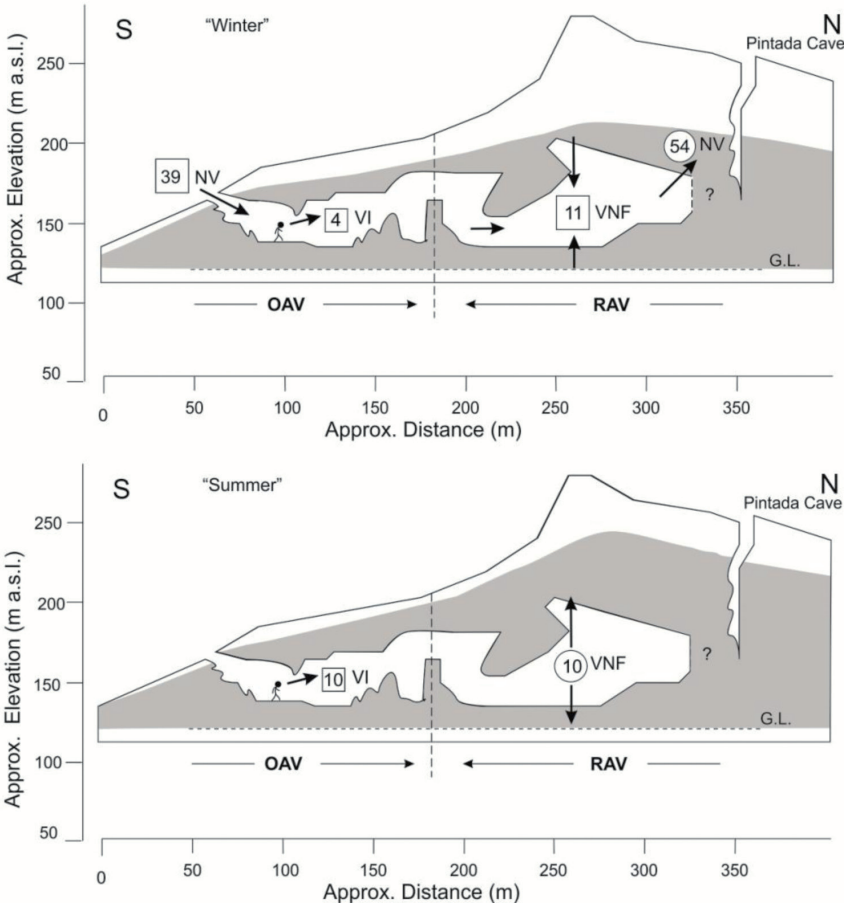

Figura 1. Croquis acotado de la Cueva de Nerja, que incluye una representación esquemática de los principales resultados del balance de masas de CO_2 realizado para el año 2015. Las cifras junto a las flechas indican valores aproximados de flujos de gas (en t) para los dos periodos considerados: "invierno" (meses con $\Delta T < 0$), arriba, y "verano" (meses con $\Delta T > 0$), abajo. Valores inferiores a 2 t/año periodo no han sido representados. Recuadros: entradas. Círculos: salidas. NV: ventilación natural. VI: visitantes. VNF: flujo neto vadoso. OAV: sector abierto a las visitas. RAV: sector de acceso restringido. La trama alrededor de la cueva pretende representar la atmósfera rica en CO_2 de la zona vadosa sobre el nivel freático del acuífero G.L. (línea de trazos) y sus variaciones espaciales medias

Los flujos netos desde y hacia la zona vadosa podrían traducirse en variaciones espaciales (horizontales y verticales) de los contenidos de CO_2 en ese ámbito, aspecto que se esquematiza en la figura 1 y que se intuye a partir de registros esporádicos preliminares (Benavente *et al*., 2010 y 2015), pero que se espera caracterizar con más precisión a partir de registros sistemáticos (Benavente *et al*., en prep.).

Cuantitativamente, y conscientes de su carácter preliminar, puede decirse que estos resultados son coherentes a grandes rasgos con los del balance para un teórico "año medio" realizado en Benavente *et al*. (2015). Los valores obtenidos en el presente trabajo deben considerarse como más fiables, al ser un año "real" el considerado y estar los cálculos referidos a un intervalo de tiempo menor. La entrada debida a los visitantes ofrece valores que apenas difieren. Los flujos debidos a la ventilación natural son inferiores (entre aproximadamente un 50 % y un 70 %) a los obtenidos en el año medio. La diferencia es particularmente destacable en el caso del flujo vadoso neto entrante (11 t/año aquí frente a 31 t/año en el trabajo previo). En todo caso se trata, como se ha dicho, de valores tentativos, que deberán ser confirmados o modificados mediante el uso de medidas más fiables de ciertas variables del balance o a partir de otras técnicas, como el uso de trazadores ambientales controlados en la cavidad y en la zona vadosa que la rodea (^{222}Rn y $\delta^{13}C$ del CO_2).

Como ya se ha apuntado, se considera crucial en este tipo de cálculos disponer de estimaciones de los flujos de aire que entran o salen de la cavidad y que suponen la mayor o menor renovación de su atmósfera interior. La aproximación adoptada aquí, a partir exclusivamente del índice ΔT, es muy simplista, pues de hecho ya en 2015 se ha podido comprobar modificaciones en la dirección de los flujos entrantes y salientes durante periodos de corta duración correspondientes a variaciones de dicho índice que ocurren generalmente en los meses de otoño y primavera (IICN, 2016). El que tales situaciones se produzcan en periodos de duración inferior a un mes hacen difícil considerarlas en el esquema de cálculo que aquí se ha seguido. Si este tipo de cálculos se realizase alguna vez a nivel semanal o diario, es obvio que tales situaciones se deberían tener en cuenta y que los resultados serían considerablemente más fiables.

Conclusiones

Los resultados preliminares obtenidos en un balance de CO_2 en la Cueva de Nerja durante 2015 indican que los principales flujos de CO_2 (entre aproximadamente 40 y 55 t/año) están vinculados a la ventilación natural de la cavidad durante el periodo invernal en sentido amplio (entre noviembre y abril, ambos inclusive). El CO_2 procedente de los visitantes es de 14,5 t/año y se concentra (70 %) en los meses de verano en sentido amplio (mayo a octubre, ambos inclusive).

Los resultados sugieren que, a nivel anual, la cueva tiene un funcionamiento de tipo "*flow-through*" respecto del CO_2 del aire de la zona vadosa circundante, pues el flujo neto que se obtiene para este componente del balance es poco significativo (< 1 t/año). Sin embargo, a nivel estacional, este flujo neto representa unas entradas de aproximadamente 11 t/año durante el periodo invernal y unas salidas muy similares durante el periodo de verano. Estas cir-

cunstancias deberán confirmarse en estudios posteriores con medidas más precisas de ciertas variables o a partir de otras técnicas complementarias.

Agradecimientos

A la Fundación Cueva de Nerja por subvencionar el estudio, que también se encuadra en las líneas de trabajo de los Grupos de Investigación RNM-126 y RNM-308 de la Junta de Andalucía. Se agradecen también los comentarios de un revisor anónimo respecto a una primera versión del trabajo.

Referencias

Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, A., Liñán, C. y Moral, F. 2010. Air CO_2 contents in the vadose zone of a Mediterranean karst. *Vadose Zone Journal,* 29: 647-659.

Benavente, J., Vadillo, I., Liñán, C., del Rosal, Y. y Carrasco, F. 2015. Influence of the ventilation of a karst show cave on the surrounding vadose CO_2 reservoir (Nerja, South Spain*). Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-015-4709-8.

Benavente, J., Vadillo, I., Ojeda, L., Liñán, C. y Carrasco, F. (en prep.). Field assesment of CO_2 fluxes in the vadose zone of a mediterranean karst.

Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S., Carretero, J. y Liger, E. 1999. ^{222}Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave. *Atmospheric Environment*, 33, 501-510.

IICN 2016. Memoria Científica del Instituto de Investigación Cueva de Nerja, año 2015, 571 pp (Inédita).

Liñán C., del Rosal, Y. y Carrasco, F. 2014. Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: Durán, J.J. y Calaforra, J.M. (eds.). *Iberoamérica Subterránea,* 229- 238. ACTE, Madrid.

Liñán, C. y del Rosal, Y. 2014. Natural ventilation of karstic caves: new data on the Nerja Cave (Malaga, S of Spain). En: Andreo, B. *et al*. (eds.). *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Environ Earth Sci 1: 505-511.

Quindos, L.S., Bonet, A., Diaz-Caneja, N., Fernandez, P.L., Gutierrez, I., Solana, J.R., Soto, J. y Villar E. 1987. Study of the environmental variables affecting the natural preservation of the Altamira Cave paintings located at Santillana del Mar, Spain. *Atmospheric Environment*, 21(3): 551-560.