

# Contenidos de CO<sub>2</sub> y de <sup>222</sup>Rn en la zona vadosa de un acuífero kárstico durante un ensayo de inyección de aire atmosférico (cueva de Nerja, Málaga)

*CO<sub>2</sub> and <sup>222</sup>Rn contents in the vadose zone of a karst aquifer for an atmospheric air tracer test (Nerja Cave, Málaga)*

Lucía Ojeda Rodríguez<sup>1</sup>, Iñaki Vadillo Pérez<sup>1</sup>, José Benavente Herrera<sup>2</sup>, Cristina Liñán Baena<sup>1,3</sup> y Sergio Cañete Hidalgo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Hidrogeología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. 29071 Málaga. luciaor@uma.es, vadillo@uma.es, crilinae@uma.es

<sup>2</sup> Instituto de Investigación del Agua y Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada. jbenaven@ugr.es

<sup>3</sup> Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación. Carretera de Maro, s/n. 29787. Nerja, Málaga. cbaena@cuevadenerja.es

<sup>4</sup> Servicio de Instalación Radiactiva, Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación. Bulevar Louis Pasteur, 33, 29071 Málaga. scanete@uma.es

## ABSTRACT

*The vadose air in the surrounding of Nerja cave presents high CO<sub>2</sub> contents (up to 60,000 ppm). The gas injection tests let to identify connections between points within a heterogeneous karst network. In this work, it has been confirmed the connection between wells in an experimental site, and established a mean <sup>222</sup>Rn value in the vadose zone that is between 3 to 10 times higher than those measured inside Nerja cave.*

**Key-words:** CO<sub>2</sub>, <sup>222</sup>Rn, vadose zone, tracer test, karst.

## RESUMEN

*La zona vadosa del acuífero al que pertenece la cueva de Nerja presenta unos contenidos de CO<sub>2</sub> elevados (hasta unos 60000 ppm). Los ensayos de inyección de gas permiten identificar conexiones entre distintos puntos dentro de una red kárstica heterogénea. En este trabajo, además de confirmar la conexión entre sondeos en una parcela experimental, se ha establecido un valor medio de <sup>222</sup>Rn en la zona vadosa que es de 3 a 10 veces mayor que el medido en el interior de la cueva de Nerja.*

**Palabras clave:** CO<sub>2</sub>, <sup>222</sup>Rn, zona vadosa, ensayo de trazador, karst.

*Geogaceta*, 63 (2018), 35-38  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 13 de julio de 2017  
Revisión: 2 de octubre 2017  
Aceptación: 23 de octubre 2017

## Introducción

La concentración de CO<sub>2</sub> gas en la zona vadosa de los acuíferos kársticos es una de las variables principales que controlan el desarrollo de procesos karstogénéticos (Atkinson, 1977). El contenido de CO<sub>2</sub> en el suelo puede ser hasta dos órdenes de magnitud mayor que los valores atmosféricos, y junto con la temperatura y la humedad relativa ha sido ampliamente estudiado en atmósferas subterráneas, principalmente de cuevas (Baldini *et al.*, 2006). Sin embargo, existe menos literatura relacionada con la realización de medidas directas de estas variables en el aire vadoso fuera de las propias cavidades.

En trabajos anteriores, Benavente *et al.* (2010) presentaron los resultados de registros verticales en los contenidos de CO<sub>2</sub>,

temperatura y humedad relativa en la red de sondeos situada en la parcela experimental de la cueva de Nerja (36° 45'N, 3°50'O) situada a unos 200 m al noroeste de la entrada de la misma (Fig. 1). Las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los sondeos alcanzaban valores máximos de unos 60000 ppm, y las variaciones verticales de los contenidos mostraban una tendencia general a su incremento con la profundidad.

El movimiento del aire en la zona vadosa obedece a cambios en la presión atmosférica, la temperatura, la infiltración de agua, el mecanismo de transporte dominante, las propiedades físicas de la zona no saturada y el propio origen del CO<sub>2</sub> (Kuang *et al.*, 2013; Loisy *et al.*, 2013).

Además de CO<sub>2</sub>, el estudio del contenido en radón (<sup>222</sup>Rn) en cuevas ha sido am-

pliamente usado como trazador para determinar los procesos de ventilación y circulación de aire (Hakl *et al.*, 1997; Kowalczyk and Froelich, 2010). El <sup>222</sup>Rn es un gas noble perteneciente a la cadena de desintegración del <sup>238</sup>U y se origina por desintegración de su progenitor, el <sup>226</sup>Ra. Tiene un periodo de semidesintegración de 3,8 d y sus descendientes son metales pesados como el polonio (<sup>214</sup>Po), el bismuto (<sup>214</sup>Bi) y el plomo (<sup>210</sup>Pb). Su contenido es elevado en terrenos kársticos, mientras que en la atmósfera presenta valores comprendidos entre 5 y 15 Bq/m<sup>3</sup>.

Este estudio presenta los resultados obtenidos en la parcela experimental de la cueva de Nerja tras un ensayo preliminar de inyección de aire atmosférico en el interior de un sondeo. Se pretende deter-

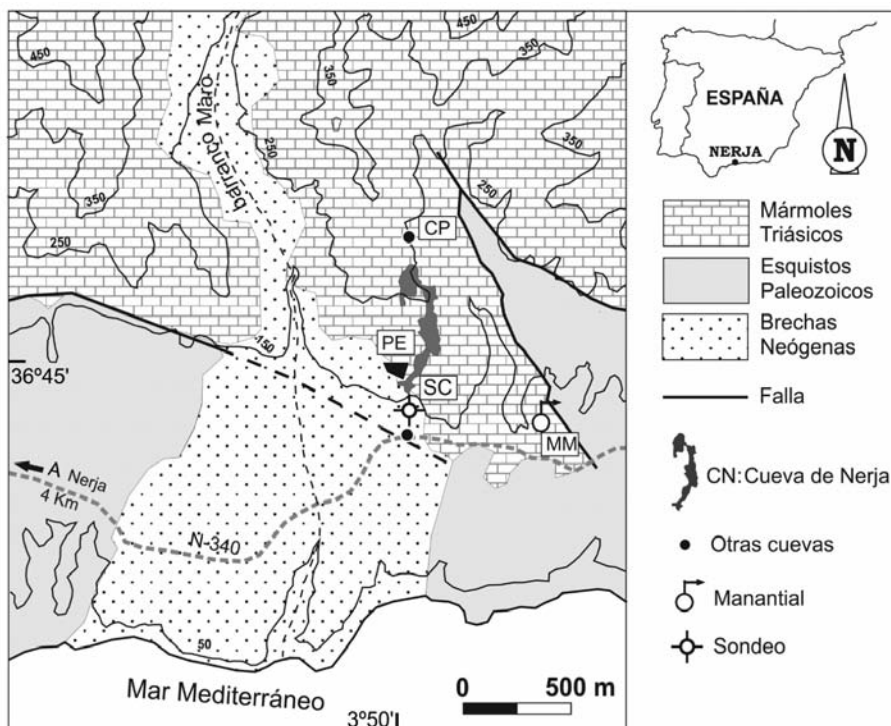


Fig. 1.- Mapa con la situación de la cueva de Nerja, la parcela experimental (PE), el sondeo de la cueva (SC), Cueva Pintada (CP) y el manantial de Maro (MM), junto con litologías y fallas.

Fig. 1.- Map showing the location of Nerja cave, the experimental borehole site (PE), cave borehole (SC), Pintada Cave (CP) and Maro spring (MM), with lithology patterns and faults.

minar la existencia de conexión entre los sondeos de la parcela experimental y preparar un futuro ensayo de inyección de gas de mayor duración que permita estudiar la dinámica de los flujos de  $\text{CO}_2$  en la zona vadosa alrededor de la cueva de Nerja. Además, se presentan los primeros datos de  $^{222}\text{Rn}$  medidos en sondeos de la zona vadosa en los alrededores de la cueva de Nerja que permiten la comparación con los que se vienen obteniendo de forma sistemática en el interior de esta importante cueva turística.

### Descripción de la zona de estudio

La parcela experimental está constituida por nueve sondeos (Fig. 2), ocho de los cuales están perforados en la zona no saturada del acuífero, con profundidades entre 15 m (sondeos 1 y 4) y 30 m (sondeos 3, 5, 6, 8, 9 y 11). La mayoría de ellos cortan cavidades y discontinuidades del sistema kárstico, las cuales pueden llegar a representar hasta el 50% de la longitud del sondeo en los números 1 y 4. Estas cavidades han sido constatadas durante la perforación de los sondeos y mediante técnicas geofísicas (Vadillo *et al.*, 2012)

### Metodología

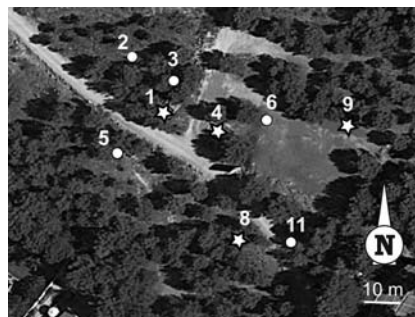


Fig. 2.- Imagen satelital con la situación de los sondeos (1 a 11) en la parcela experimental (PE).

Fig. 2.- Satellite image with the location of the boreholes (1 to 11) in the experimental site (PE).

El experimento consistió en la inyección de aire atmosférico en el sondeo 4. Se eligió este sondeo por su ubicación más o menos central en la red de sondeos (Fig. 2) y porque un 50 % de la columna del mismo está representado por una cavidad. En la boca del sondeo se acopló de manera hermética un extractor con un caudal directo de  $5,2 \text{ m}^3/\text{min}$  y una velocidad de  $10 \text{ m/s}$  una vez ajustado a la reducción de  $10 \text{ cm}$  de la boca del sondeo. La inyección comenzó el día 18 de mayo de 2017 a las 20:53 y finalizó el día 19 de mayo de 2017 a las 15:45.

En los sondeos 1 y 9 se midieron los contenidos de  $\text{CO}_2$ , temperatura y humedad relativa cada 15 minutos con un registrador Vaisala (Modelo GM70, Vaisala Oyj, Helsinki), situado a 13 y 25 m de profundidad, respectivamente. El registrador fue equipado con un sensor HMP45 para las medidas de temperatura del aire y humedad relativa, y con un sensor GMP221 para la concentración de  $\text{CO}_2$  con un rango de medida de 0-5 % de  $\text{CO}_2$  y una precisión de  $\pm 1,5$  % de rango + 2 % de lectura. Se midió la concentración de radón cada 10 minutos usando dos medidores AlphaE (Saphymo GmbH-centro Helmholtz, Munich) colocados en paralelo. Estos medidores presentan un rango de medida de  $20 \text{ Bq/m}^3$  a  $10 \text{ MBq/m}^3$  y una sensibilidad de 3 cph a  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Este tipo de instrumentación tiene unas dimensiones pequeñas ( $108 \text{ mm} \times 68 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ) y un escaso peso ( $165 \text{ g}$ ), ideal para introducir en sondeos. Sin embargo, sus dimensiones limitan el tamaño de la cámara de difusión. Por ende, su tiempo de estabilización es mayor y las medidas son más inerciales. Por esta razón, los valores de las medidas de radón y de temperatura se estabilizaron aproximadamente a las 3 horas desde el comienzo de la inyección.

En el sondeo 8 se midió únicamente la concentración de radón con la misma metodología descrita anteriormente.

### Resultados

La humedad relativa exterior durante el experimento osciló entre el 60 y el 70 %. En cuanto a la temperatura exterior, al comienzo de la inyección fue de  $25,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , y decreció a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  durante la noche. La temperatura al finalizar el experimento rondaba los  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura del aire dentro de los sondeos se estabilizó al cabo de 2-3 horas en  $20,7 \text{ }^\circ\text{C}$  (punto 1) y  $21,0 \text{ }^\circ\text{C}$  (punto 9) y la humedad relativa en el 100 %.

La figura 3A muestra las variaciones de la concentración de  $\text{CO}_2$  en el sondeo 1. La concentración media de  $\text{CO}_2$  es  $6868 \text{ ppm}$ , con un máximo y un mínimo de  $8860$  y  $4980 \text{ ppm}$ . El contenido medio de radón fue de  $648 \text{ Bq/m}^3$ , con máximo y mínimo de  $976$  y  $378 \text{ Bq/m}^3$ .

En cuanto al sondeo 9 (Fig. 3B), en el periodo de inyección de aire atmosférico el

valor máximo de CO<sub>2</sub> alcanzado es de 50150 ppm mientras que el valor mínimo es de 40980. La concentración media es de 46300 ppm. Para <sup>222</sup>Rn, la concentración media es de 799 Bq/m<sup>3</sup>, y sus contenidos varían desde 562 a 1296 Bq/m<sup>3</sup>.

En el sondeo 8, los dos sensores de <sup>222</sup>Rn instalados han dado valores bastante similares. La variación en la concentración promedio de ambos está representada en la figura 3C. Los valores oscilan entre 37,5 y 3372 Bq/m<sup>3</sup> y la media general es de 2623 Bq/m<sup>3</sup>.

### Discusión

El fenómeno de disolución química en ambientes kársticos da como resultado la formación de huecos, fisuras, grandes aperturas y fracturas que pueden o no estar interconectados, dando lugar en ocasiones a la formación de cavidades como la cueva de Nerja. La zona vadosa de los acuíferos kársticos se caracteriza por ser un ambiente altamente heterogéneo. Los métodos geofísicos se han revelado útiles para detectar huecos relativamente grandes, sin embargo su utilidad es limitada si son de tamaño reducido.

La disminución progresiva de los valores de CO<sub>2</sub> que se observa en el sondeo 1 (Fig. 3A) indican una conexión directa con el sondeo de inyección (sondeo 4). El flujo de aire atmosférico con una concentración de CO<sub>2</sub> de 490 ppm diluye el aire vadoso rico en este gas. En este sondeo, la respuesta a la inyección se advierte a las 2,5 horas (Fig. 3A). Durante las 15 horas de duración de la inyección el contenido de CO<sub>2</sub> se redujo en un 44%. Paralelamente, el contenido de radón disminuyó un 59%. La diferencia en el porcentaje de reducción se interpreta como debida a que el aire atmosférico tiene un contenido en radón muy bajo en comparación con la concentración de CO<sub>2</sub>. Además, en este sondeo se observó la presencia de un fuerte flujo vertical de aire vadoso saliendo hacia el exterior del sondeo con un contenido igual al que se estaba midiendo en profundidad. De la red de sondeos de la parcela experimental, los sondeos 1 y 4 son bastante similares en longitud y en el hecho de cortar cavidades a profundidades análogas.

La variación en el contenido de CO<sub>2</sub> en el sondeo 9 (Fig. 3B) no sugiere una conexión directa con el sondeo de inyección. La concentración de CO<sub>2</sub> al finalizar la inyec-

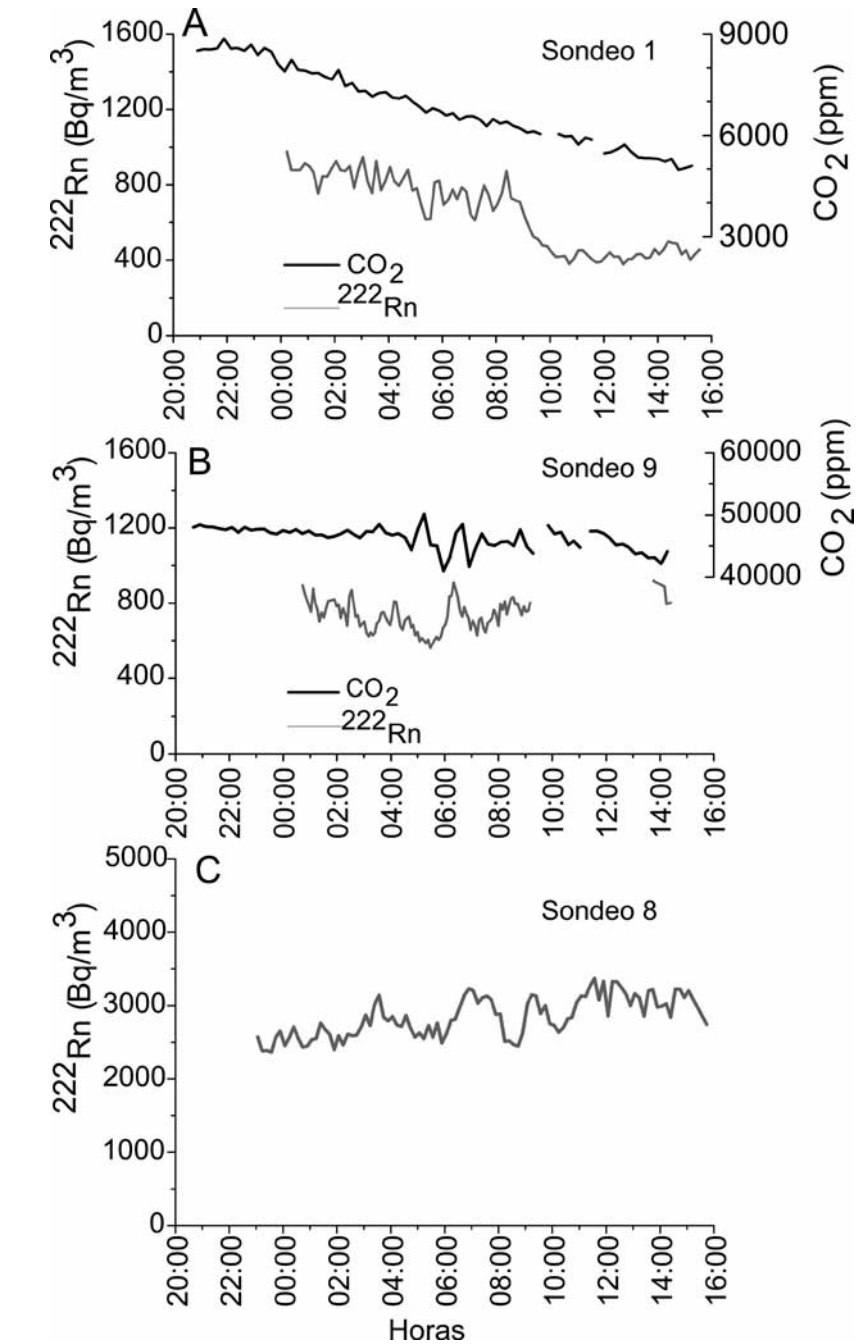


Fig. 3.- A) Variaciones de CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn en el sondeo 1. B) Variaciones de CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn en el sondeo 9. C) Variaciones de <sup>222</sup>Rn medio en el sondeo 8.

Fig. 3.- A) CO<sub>2</sub> and <sup>222</sup>Rn variations in borehole 1. B) CO<sub>2</sub> and <sup>222</sup>Rn variations in borehole 9. C) <sup>222</sup>Rn mean variations in borehole 8.

ción de aire se vio reducida en tan sólo un 12%, y el contenido de radón en un 11%. Esto pone de manifiesto que, si bien existe una red kárstica por la cual el aire vadoso fluye, no está conectada muy eficazmente a través de las discontinuidades abiertas. La distancia al sondeo de inyección es también mayor, por lo que aumentando la duración de la inyección cabría esperar que las concentraciones de ambos gases disminuyeran de una manera más patente.

En el sondeo 9 es posible observar oscilaciones de pequeño periodo del contenido en CO<sub>2</sub> del aire vadoso entre aproximadamente las 03:00 y las 11:00. Esta circunstancia ha sido observada con anterioridad en registros esporádicos con el mismo equipo de medida que el usado en este experimento, aunque con periodicidad horaria, en un sondeo situado en los jardines de la cueva de Nerja (punto SC, Fig. 1). El sondeo SC no estaba sometido a

ninguna presión antrópica o externa en el momento de tales registros, por lo que las mencionadas variaciones se interpretan como de tipo natural, posiblemente asociado a cambios en la presión atmosférica, un aspecto que ya había sido apuntado en Benavente *et al.* (2010).

En la cueva de Nerja, la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  presente en su interior es alta en verano y más baja en otoño-invierno (Dueñas *et al.*, 1999). En 2015, el valor mínimo de  $^{222}\text{Rn}$  fue de  $58 \text{ Bq/m}^3$  y el valor máximo de  $860 \text{ Bq/m}^3$ , medidos en febrero y principio de septiembre, respectivamente, y con una media general de  $206 \text{ Bq/m}^3$  en las salas no visitables y de  $259 \text{ Bq/m}^3$  en las visitables (datos facilitados por Instituto de Investigación de la Cueva de Nerja). En la parcela experimental, el aire de la zona no saturada presenta concentraciones medias que, en los puntos 1 y 9, son aproximadamente tres veces mayores que las citadas cifras medias de la cueva, mientras que en el punto 8 han resultado ser un orden de magnitud superiores. Los contenidos medios del punto 8 son, por otro lado, semejantes al valor medio de  $2800 \text{ Bq/m}^3$  que Hakl *et al.* (1997) midieron en 220 cuevas en todo el mundo.

Lo anterior pone de manifiesto que la ventilación en la cueva de Nerja es alta y es capaz de reducir la concentración de radón en la misma. Los valores de radón y sus variaciones en el sondeo 8 muestran que, como en el sondeo 9, la inyección de aire atmosférico no produce una afección significativa en el contenido de  $^{222}\text{Rn}$ , bien por la duración del experimento o bien por la escasa conexión presente con respecto a la dirección del sondeo de inyección. En oposición a lo que ocurre con el  $\text{CO}_2$ , la fuente de  $^{222}\text{Rn}$  se mantiene constante en el

tiempo, por lo que disminuciones en la concentración de la misma se asocian a procesos de ventilación, los cuales puede que a su vez se traduzcan en diferencias en las direcciones de karstificación. Este es un aspecto sobre el que se está trabajando en la actualidad.

## Conclusiones

Durante el experimento se constata la existencia de un aire vadoso que a los aproximadamente 30 m de profundidad se caracteriza por valores de temperatura de unos  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  y del 100 % de humedad relativa, con contenidos altos de  $\text{CO}_2$ , aunque variables espacialmente.

El uso de ensayos de inyección de gas ayuda a determinar conexiones entre diferentes puntos dentro de una red kárstica heterogénea.

En ensayos futuros similares sería necesario aumentar el período de inyección para tratar de producir afecciones significativas en sondeos a mayor distancia y con una red kárstica más compleja, así como continuar los controles al cesar la inyección. También debería complementarse el muestreo con medidas de la señal isotópica de  $^{13}\text{C}$  del  $\text{CO}_2$ . Esto último permitiría cuantificar el porcentaje de mezcla entre la fuente de aire atmosférico y la señal del aire vadoso.

Las primeras medidas de radón efectuadas en la parcela experimental han permitido establecer valores de concentración que, según los puntos, son entre 3 y 10 veces superior a las medias registradas en el interior de la cueva de Nerja, lo cual indica una ventilación muy efectiva de la propia cavidad, pero variable según los sectores en la zona vadosa que la rodea.

## Agradecimientos

A la Fundación Cueva de Nerja por la financiación del proyecto "Estudio de procesos geoquímicos y flujos de carbono ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) en un medio trifásico (agua, aire y roca). Aplicación a la gestión y conservación del sistema kárstico de la Cueva de Nerja" y a los grupos de investigación de la Junta de Andalucía RNM-308 y RNM-126. Así como a los revisores de este trabajo por sus sugerencias.

## Referencias

- Atkinson, T.C. (1977). *Journal of hydrology* 35, 111-123.
- Baldini, J.U.L., Baldini, L.M., McDermott, F. y Clipson, N. (2006). *Journal of Cave and Karst Studies* 68, 4-11.
- Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, C., Liñán, C. y Moral, F. (2010). *Vadose Zone Journal* 9, 126-136.
- Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S., Carretero, J. y Liger, E. (1999). *Atmospheric Environment* 33, 501-510.
- Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I., Géczy, G., Lénárt, L. y Várhegyi, A. (1997). *Radiation Measurements* 28, 675-684.
- Kowalczyk, A.J. y Froelich, P.N. (2010). *Earth and Planetary Science Letters* 289, 209-219.
- Kuang, X., Jiao, J.J. y Li, H. (2013). *Water Resources Research* 49, 6137-6165.
- Loisy, C., Cohen, G., Laveuf, C., Le Roux, O., Delaplace, P., Magnier, C., Rouchon, V., Cerepi, A. y García, B. (2013). *International Journal of Greenhouse Gas Control* 14, 97-112.
- Vadillo, I., Benavente, J., Neukum, C., Grützner, C., Carrasco, F., Azzam, R., Liñán, C. y Reichert, K. (2012). *Journal of Applied Geophysics* 82, 153-162.