

Physical Speleology

S.05 - Karst hydrogeology, physical chemistry

S.06 - Climatology

S.11 - Pseudokarst

S.14 - Volcanic caves



Actes du 18^{ème} congrès | *Proceedings of the 18th*
international de Spéléologie | *International Congress of Speleology*

Savoie Mont Blanc 2022

Volume III / VI

Karstologia-Mémoires n°23

Caracterización ambiental de la zona epifreática en entornos hipogénicos: un ejemplo de Cueva del Agua (Cartagena, SE España)

José Luis LLAMUSÍ⁽¹⁾, Andrés ROS⁽¹⁾, José Antonio SOTO⁽¹⁾, Fernando GÁZQUEZ⁽²⁾,
José María CALAFORRA⁽²⁾ & Ángel FERNÁNDEZ-CORTÉS⁽²⁾

(1) Centro de Estudios de la Naturaleza y el Mar – CENM, 30394 Cartagena, Spain, jllamusi@gmail.com, aros@blog56.com

(2) Department of Biology and Geology, University of Almeria, 04120 Almeria, jmcalaforra@ual.es, f.gazquez@ual.es, acortes@ual.es

Resumen

Las condiciones ambientales que controlan la espeleogénesis hipogénica en los acuíferos carbonatados costeros apenas han sido monitoreadas in situ. Esto se debe a la inaccesibilidad de las zonas donde el agua subterránea termal interactúa con el agua de mar. La Cueva del Agua (Región de Murcia, sureste de España) representa un ejemplo de un modelo mixto hipogenético-epifreático, donde los flujos más profundos de agua dulce termal (~30°C) de áreas del interior de mayor altitud se ven obligados a elevarse sobre el nivel del mar. La interacción entre las dos masas de agua ha generado una red submarina de 4.600 m de longitud abierta al mar Mediterráneo, cuya espeleogénesis sigue activa. A través de varias campañas de buceo, se ha realizado una monitorización en continuo de la temperatura del aire y el agua y se ha obtenido una base de datos geoquímicos sobre la composición gaseosa de las cámaras de aire estancado de la zona epifreática. Nuestros resultados confirman el aporte de CO₂ endógeno por la degasificación de las burbujas de la capa freática termal (29,2°C) que alcanza una concentración media del 2,3%, dando lugar a condiciones hipóxicas (16,6% O₂ a 28,44°C). Los valores de δ¹³C-CO₂ de -18,3‰ indican mezcla con el CO₂ que se difunde desde la zona vadosa superior. La presencia de CH₄ residual (más bajo que el fondo atmosférico y empobrecido en ¹³C) sugiere la coexistencia de actividad metanogénica y metanotrófica en este ambiente extremo.

Abstract

Environmental characterisation of the epiphreatic zone in hypogenic contexts: an example from the Cueva del Agua (Cartagena, SE Spain). The environmental conditions that control hypogenic speleogenesis in coastal carbonate aquifers have hardly been monitored in situ due to the inaccessibility of areas where thermal groundwater interacts with seawater. Cueva del Agua Cave (Murcia Region, southeastern Spain) represents an example of a mixed hypogenetic-epiphreatic model, where the deeper flows of fresh thermal water (~ 30 °C) from higher altitude inland areas are forced to rise above sea level. The interaction between the two bodies of water has generated a 4,600 m long underwater network open to the Mediterranean Sea, whose speleogenesis is still active. Through various cave diving campaigns, we conducted continuous monitoring of air and water temperatures and compiled a preliminary geochemical database of the gaseous composition of the stagnant air chambers from the epiphreatic zone. Our results confirm the contribution of endogenous CO₂ by the degassing of the bubbles of the thermal water table (29.2 °C) that reaches an average concentration of 2.3%, giving rise to hypoxic conditions (16.6% O₂ at 28.44 °C). The δ¹³C -CO₂ values of -18.3 ‰ indicate mixing with the CO₂ diffusing from the upper vadose zone. The presence of residual CH₄ (lower than the atmospheric background and depleted in ¹³C) suggests the coexistence of methanogenic and methanotrophic activity in this extreme environment.

1. Introducción

La Cueva del Agua, situada en la Región de Murcia (sureste de España) (Figura 1), representa un buen ejemplo de espeleogénesis hipogénica en un acuífero costero no confinado y, por lo tanto, su desarrollo está controlado por las variaciones del nivel freático de agua dulce y del nivel del mar, así como por la interfase entre ambos. Es en esta zona epifreática, la presencia de elevadas concentraciones de CO₂ favorece el aumento de la agresividad del agua termal y un mayor grado de cavernamiento coincidiendo con la

superficie freática, así como la existencia de volúmenes de aire confinado (burbujas) con procesos activos de condensación-corrosión.

La monitorización ambiental de este tipo de ambientes con procesos hipogénicos activos resulta muy complicada por su inaccesibilidad para la toma de muestras, así como para la instalación y mantenimiento de equipos de medición en continuo. En el caso de la Cueva del Agua, con un 97% de su

recorrido inundado por aguas termales, la toma in situ de muestras y datos ha sido realizada por buceadores altamente cualificados en espeleobuceo (LLAMUSÍ et al. 2016). En este trabajo se presentan los resultados más

2. Metodología

Durante el año 2019 se realizó una monitorización de la temperatura del agua y del aire en la zona epifreática de la Cueva del Agua mediante tres estaciones subacuáticas de registro y un termo-registrador ubicado en una cámara de aire confinado a 800 m de la entrada (denominada Burbuja-800). También se tomaron datos de la temperatura del agua, durante los recorridos de los buceadores con equipos de registro de temperatura y posicionamiento (ENC2). Durante estos recorridos se registraron medidas de temperatura cada 2 segundos a lo largo de dos trayectorias con inicio común en la entrada a la cavidad; sureste y noreste (Figura 1). Cada estación subacuática (RC-5 de Elitech) está equipada con un termómetro con precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, una resolución de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, y un logger con capacidad de almacenamiento de 32.000 registros (ROS et al. 2020). Estas estaciones se programaron para la toma de datos de temperatura del agua con una cadencia de 15 minutos. La Estación subacuática 1 se instaló en la zona de la entrada a -9 m de profundidad, la Estación 2 a 400 m de la entrada a -3 m de profundidad y la Estación 3 a 800 m de la entrada a -14 m de profundidad (Figura 1). Como referencia, se ha contado con el registro horario de la temperatura del agua del Mar Mediterráneo (temperatura y posición), perteneciente a una estación de la Autoridad Portuaria de Cartagena ubicada

reseñables que permiten realizar una caracterización preliminar de la zona epifreática de esta cavidad, en relación a sus condiciones térmicas y a la composición gaseosa de aire confinado.

en una boya en el mar, frente a la costa de Cabo de Palos. La temperatura del aire en la Burbuja-800 se controló mediante un termo-registrador SBE56 (SeaBird Sci.). Este equipo ofrece una elevada precisión en las medidas de temperatura: $\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ (entre -5 y $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$), con una resolución de $0.0001\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una estabilidad en las medidas de $0.002\text{ }^{\circ}\text{C/año}$.

En la Burbuja-800 (Figura 1) se realizaron muestreos estacionales del aire desde febrero-2019 hasta mayo-2020, con el objetivo de caracterizar su composición gaseosa. En cada acceso a estas cámaras de aire confinado se realizaron también mediciones de la concentración de O_2 (%) con un equipo multigas Altair 4XR. Para el muestreo de aire subterráneo se utilizó una microbomba de diafragma de 3.1 l-min^{-1} y se almacenó en bolsas Ritter de 1 litro de capacidad, exclusivas para muestras de mezcla de gases en altas concentraciones (LLAMUSÍ et al. 2020). Posteriormente, en un plazo máximo de 72 horas tras el muestreo, se analizaron las concentraciones de CO_2 y CH_4 y se determinó la señal isotópica $\delta^{13}\text{C}$ de ambos gases en las muestras discretas de aire, mediante un espectrómetro CRDS de alta resolución (Picarro G2201-i) en el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Almería (España).



Figure 1. Profile of Cueva del Agua, Cartagena Spain, location of monitoring stations.

3. Resultados y Discusión

Registros de las estaciones subacuáticas

Los registros de las tres estaciones subacuáticas durante un año muestran una temperatura del agua estable a lo largo del año, con una media general de $29.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tabla 1), si bien hay pequeñas diferencias entre las tres estaciones. La Estación 1 y Estación 3 mantienen unas temperaturas similares, con muy poca diferencia entre ellas ($0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$). La Estación 2 presenta una diferencia de $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto a las estaciones 1 y 3, posiblemente debido a su ubicación más

superficial (a -3m respecto al nivel freático). Esta diferencia térmica de la estación 2 indica la existencia de una termoclina entre -3 y -9 m de profundidad, que ha sido también constatada mediante los registros de temperatura obtenidos durante los recorridos de los buceadores con equipos ENC2 (Figura 2). La temperatura media del mar Mediterráneo en la zona y durante el mismo periodo de registro fue $19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con mínimas en Febrero ($\sim 14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y con valores máximos registrados en Agosto ($\sim 27.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) y siempre

inferiores a la temperatura del agua en la cavidad. La amplia diferencia térmica respecto al agua de la cavidad (10°C) y la ausencia de correlación en las variaciones térmicas entre el agua del mar y el agua subterránea, son indicativas del elevado grado de influencia del agua termal en la cavidad y del escaso efecto del gradiente térmico del Mediterráneo sobre el campo de temperaturas de la zona epifrática.

Perfiles de temperatura del agua

La Figura 2 muestra el perfil de temperatura del agua registrado durante el recorrido de buceo de mayor longitud, en concreto que el discurrió por la zona denominada “Galerías Blancas” desde la entrada de la cavidad, en su conexión con el mar, hasta 1912 m en dirección noreste (Figura 1). Esta trayectoria alcanza un mayor porcentaje del desarrollo total de la cavidad respecto al controlado por las estaciones subacuáticas de registro de temperatura en continuo, abarcando las galerías que se adentran hacia el continente y por tanto aumenta progresivamente el espesor de roca por encima del nivel freático. La media de la temperatura del agua en este recorrido fue de 29.65°C, es decir 0.45 °C superior a la temperatura media registrada por las estaciones subacuáticas que cubre los primeros 800m de galerías de la cavidad. Durante el recorrido se registraron tres descensos significativos de la temperatura del agua

(entre 0.6 y 0.7°C) en las siguientes localizaciones (Figura 2): a 124 m de la entrada y a -15.9 m de profundidad, a 560 m de la entrada y profundidad de -3.1 m y a 966 m de la entrada, a una profundidad de -6 m (Figura 2). Los descensos térmicos a mayor distancia de la entrada están relacionados con el registro de la temperatura a cotas superiores respecto a la profundidad media del recorrido de buceo (-12 m) y, por lo tanto, por encima de la termoclina situada entre -3 y -9m de profundidad. En cambio, el primer descenso térmico del recorrido (a 124 m de la entrada) podría corresponderse con una zona preferente de recarga hídrica desde la zona vadosa superior o bien a una zona de intrusión de agua de mar.

Subaqueous station	Water temperature (°C)		
	Average	Minimum	Maximum
1 (cave entrance)	29.5	29.1	29.9
2 (400 m)	28.4	28.3	28.5
3 (800 m)	29.8	29.7	29.9
Mediterranean sea	19.2	27.7	14.5

Table 1. Cave water temperature recorded by the subaqueous stations in Figure 1 and Mediterranean Sea surface temperature at Cabo de Palos, Cartagena during 2019.

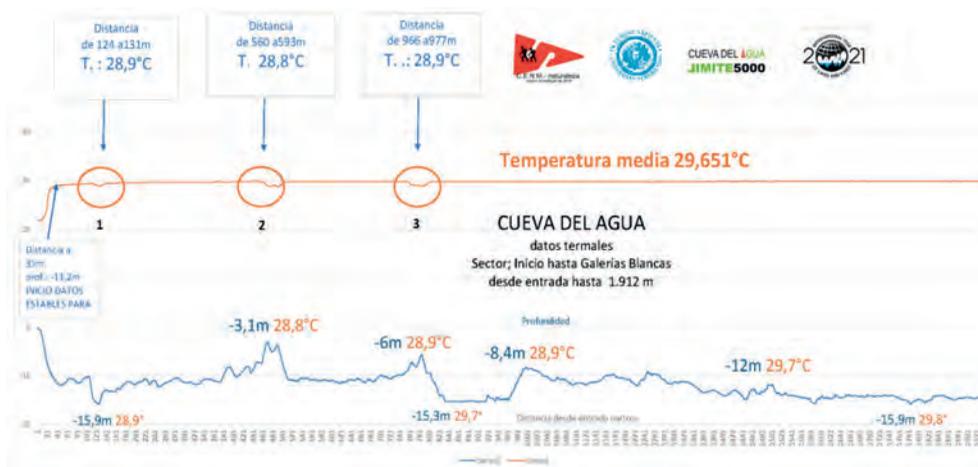


Figure 2. Water temperature data along a northeast profile (1,912m), from the cave entrance to “Galerías Blancas”.

Monitorización termo-gaseosa del aire confinado en la zona epifreática (Burbuja-800)

El registro horario de la temperatura del aire en la burbuja situada a 800 m de distancia de la entrada se realizó en el periodo 10/02/2019-14/01/2020. La temperatura media del aire fue 28.44°C, registrándose un mínimo absoluto de 28.41°C y un máximo absoluto de 28.60°C. Las condiciones de humedad ambiental son muy estables e indican una contantes saturación en vapor de agua (HR=100%). Este máximo es debido a efecto térmicos muy puntuales, posiblemente por influencia de las entradas de buceadores que se aproximaron al termo-registrador (efectos indicados en la Figura 3). Obviando estos incrementos provocados por las visitas, la temperatura máxima no supera los 28.49°C, lo que indica la elevada estabilidad térmica del aire de la burbuja-800. En comparación con los registros de

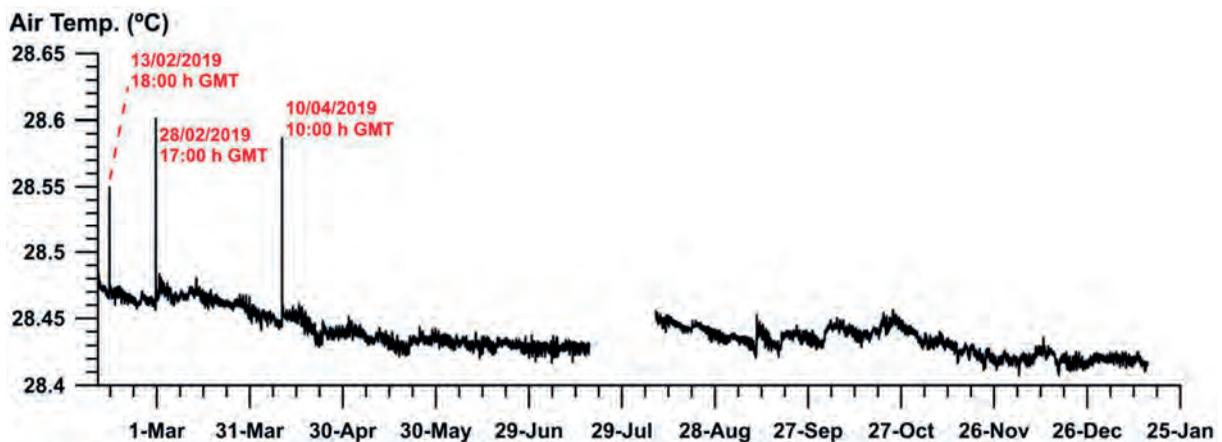
temperatura del agua en la estación más cercana (Estación 2) se constata un enfriamiento en el aire respecto al agua cicundante a la burbuja, en torno a -1.56°C. También se observa una deriva decreciente de la temperatura del aire que indica un paulatino enfriamiento de la atmósfera de la burbuja, sin presentar ciclos estacionales, hecho que podría está relacionado con una progresiva aminoración del termalismo del acuífero o bien a una mayor regulación térmica del agua del mar asociada a un proceso de intrusión marina.

La concentración de CO₂ del aire confinado en la burbuja-800 siempre supera el 2%, muy superior al fondo atmosférico exterior (en torno a 400-450 ppm). La concentración media de CO₂ es 23555 ppm, variando en un rango máximo de 3655 ppm entre muestreos. La señal isotópica de este gas (δ¹³C -CO₂) es muy constante en torno

a $-18.30 (\pm 0.17)\%$. Esta elevada concentración de CO₂ determina que el aire de la burbuja mantenga unas condiciones de hipoxia, con concentraciones de O₂ que varían entre 16.5 y 16.7%. Los niveles de CH₄ son muy constantes, con un promedio de 1.06 (± 0.07) ppm, y siempre inferiores a los registrados en la atmósfera exterior (≈ 1.8 - 2 ppm). Este CH₄ sub-atmosférico se caracteriza por tener una señal isotópica ($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) media de $-76.53 (\pm 6.60)\%$, un valor muy negativo en comparación con los del fondo atmosférico en el exterior ($\approx 50\%$).

Date (dd/mm/yy)	O ₂ (%)	CO ₂ (ppm)	$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ (‰)	CH ₄ (ppm)	$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ (‰)
06/02/2019	16.5	25013	-18.12	0.98	-71.41
06/02/2019		23213	-18.22	1.10	-78.97
10/04/2019	16.7	22435	-18.34	1.17	-79.30
25/07/2019	16.7	24922	-18.42	1.03	-74.91
10/09/2019		25234	-18.22	0.99	-73.45
14/01/2020	16.7	21581	-18.16	1.04	-68.84
15/05/2020	16.7	22487	-18.60	1.12	-88.81

Table 2 : Gaseous composition of confined air in Bubble-800



4. Conclusiones

Los resultados de la monitorización de la temperatura en la Cueva del Agua han revelado que el agua subterránea mantiene una temperatura superior a 29°C por debajo de los -10 m de profundidad del nivel freático, enfriándose progresivamente hacia la zona epifreática y en zonas más cercanas al mar. En la zona noreste, correspondiente a las galerías más lejanas a la línea de costa, se han detectado ligeros descensos térmicos en cotas por encima de los -6m , entre 0.6-0.7°C por debajo de la temperatura media (29,65°C), que indican la existencia de una termoclina muy somera. Con los registros en continuo de la temperatura del agua y de aire confinado en la zona epifreática, se constata el aporte endógeno del agua termal en la cavidad, así como que los cambios térmicos estacionales del agua del mar no interfieren en el campo de temperaturas de esta zona epifreática del acuífero. En este sentido, incluso los mínimos

descensos en la temperatura del agua de la cavidad que se registran en verano (julio-agosto) en las tres estaciones subacuáticas, son coetáneos a los máximos térmicos que se alcanzan en el agua del mar en esos meses.

Los resultados de la composición gaseosa de las cámaras de aire confinado de la zona epifreática confirman el aporte de CO₂ endógeno por la desgasificación de las burbujas de la capa freática termal, que alcanza una concentración media en torno a 2.3%, dando lugar a condiciones hipóxicas. Los valores de $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ ($-18,30 \%$) indican una mezcla con el CO₂ que se difunde desde la zona vadosa superior. La presencia de CH₄ residual (más bajo que el fondo atmosférico y empobrecido en ¹³C) sugiere la coexistencia de comunidades microbianas con actividad metanogénica y metanotrófica en este ambiente extremo.

Agradecimientos

Agradecemos a Alejandro Geti, Javier Ruberte, Andrés Marín, al equipo de buceadores de los GEAS de Cartagena, así como a la Autoridad Portuaria de Cartagena que ha proporcionado los datos de temperatura del agua del mar en Cabo de Palos. Esta investigación ha sido desarrollada en colaboración con el proyecto MINECO PID2019-110603RB-I00 (AEI-FEDER, UE).

Referencias

ROS A, LLAMUSI J.L., FERNANDEZ-CORTES A, CALAFORRA J.M., GAZQUEZ F., SOTO J., (2020). Equipos para la medición de la calidad del aire y el clima en cavidades para espeleólogos. Publicaciones digitales CENM-naturaleza, en www.cenm.es.

LLAMUSI J.L., SANCHEZ J., ROS A., GAZQUEZ F., CALAFORRA J.M., MUNUERA C., PLAZAS J.F., (2016). Cueva del Agua-

sima destapada, Cartagena. Nuevos datos sobre las exploraciones y sus espeleogénesis hipogénicas. Actas espeleomeeting Ciudad de Villacarrillo 53-61.

LLAMUSI J.L., ROS A, FERNANDEZ-CORTES A, CALAFORRA J.M. GAZQUEZ F. SOTO J. (2020) resultados preliminares de la monitorización termo-gaseosa en Cueva de Agua, Cartagena. Publicaciones digitales CENM-naturaleza, en www.cenm.es