

Efecto en la temperatura de las visitas turísticas en la Cueva del Águila, Ávila. Valoración de la viabilidad de la cueva para el estudio térmico de su dinámica natural

Temperature effect caused by visitors in Eagle Cave, Ávila. Suitableness of the cave to monitor natural conditions

David Domínguez-Villar ^(1,2), Rosa M. Carrasco ⁽³⁾, Javier Pedraza ⁽⁴⁾, Ian J. Fairchild ⁽²⁾ y Andy Baker ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geología. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 28871. d.dominguezvillar@bham.ac.uk

⁽²⁾ School of Geography. Earth and Environmental Sciences. University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, Reino Unido. i.j.fairchild@bham.ac.uk

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, 45071. rosa.carrasco@uclm.es

⁽⁴⁾ Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 28040. javierp@geo.ucm.es

⁽⁵⁾ Connected Waters Initiative. Water Research Laboratory. University of New South Wales, Manly Vale NSW 2093, Australia. a.baker@unsw.edu.au

ABSTRACT

The present study focuses on the importance of visitors in Eagle Cave temperature, a tourist cavern in Ávila, central Spain. Cave air temperature was measured during a year and natural and anthropogenic thermal effects were identified. Eagle Cave has a rather stable temperature around 15.6°C with an annual cycle which amplitude is <0.4°C. Recorded seasonality in the cave is related to external temperatures due to thermal conduction through the bedrock, with an expected delay of several years for the external signal to be transferred into the cave. The visitors cause increases in diurnal temperature up to 0.15°C, although thermal anomalies are normally recovered overnight. During vacation periods, where consecutive days with large number of visitors increases, thermal anomalies are prolonged for some days or weeks, with amplitudes <0.1°C. Although visitors have a daily impact on the cave temperature, the effect does not cause long term change in Eagle Cave temperature. The reason for this thermal mitigation is related to the high humidity of the environment, which causes the energy supplied by tourists to be partially transferred as latent heat via evaporation and condensation processes. The current condensation processes are insufficient to cause any discernible condensation corrosion that could be damaging recent stalagmites.

Key words: Temperature, cave, monitoring, condensation, Ávila.

Geogaceta, 49 (2010), 43-46
ISSN: 2173-6545

Fecha de recepción: 15 de julio de 2010
Fecha de revisión: 3 de noviembre de 2010
Fecha de aceptación: 26 de noviembre de 2010

Introducción

En la última década los registros en cuevas, especialmente aquellos preservados en las estalagmitas, se han mostrado como uno de los archivos paleoclimáticos con mayor potencial (Cheng *et al.*, 2009), superando en algunos casos la fiabilidad de los sondeos de hielo en los polos o los sondeos oceánicos (Wang *et al.*, 2001; Domínguez-Villar *et al.*, 2009a). Sin embargo, la interpretación de las series obtenidas requieren de una calibración de los procesos actuales con el clima exterior, ya que cada cueva es muy dependiente de factores locales (Fairchild *et al.*, 2006). Por lo tanto, es recomendable realizar una adecuada monitorización de las cuevas en las que se pretenda obtener fiables series paleoclimáticas.

La apertura al público de cuevas turísticas y la fluencia de visitantes puede modificar las condiciones en las que se depositaron las estalagmitas de dichas cuevas. Esto puede hacer imposible una

calibración de los procesos registrados en las estalagmitas con el clima actual. La temperatura es uno de los parámetros fundamentales para valorar el clima tanto en la superficie como dentro de las cuevas, y a su vez es uno de los más afectados por la presencia de los turistas en las grutas (Fernández-Cortés *et al.*, 2006).

En este trabajo se estudia el efecto que tienen los visitantes en la temperatura de la Cueva del Águila (Ávila) en relación a la variabilidad natural del sistema. Se pretende conocer si las condiciones térmicas actuales pueden ser tenidas en cuenta para la calibración con el clima del exterior y su evolución en el pasado, o si por el contrario la fluencia de visitantes está modificando sustancialmente los valores de temperatura registrados.

Zona de estudio

La Cueva del Águila se localiza en la provincia de Ávila al sur de la Sierra de

Gredos a una altitud de 430 m sobre el nivel del mar (Fig. 1). La cavidad está desarrollada en un pequeño cerro que se levanta frente al arroyo de Avellaneda poco antes de desembocar en el Río Tietar. El cerro está compuesto de dolomías del Cámbrico dentro de una serie dominada por esquistos (Odrizola *et al.*, 1980). Cabe destacar que los carbonatos están afectados por una intrusión granítica lo cual ha producido un scarn (Martín Escorza, 1971) con mineralizaciones de óxidos que dan el color característico a buena parte del sustrato de la cueva.

La cueva está formada por una sala principal comunicada con el exterior por dos estrechos pasadizos situados a igual cota, y pequeñas galerías desarrolladas a partir de la sala principal (Fig. 1). El espesor medio del sustrato sobre el techo de la cavidad es de unos 12 metros, mientras que la altura de la sala no supera por lo general los 5-10 metros. Desde la apertura de la cueva al público en 1964 se colo-

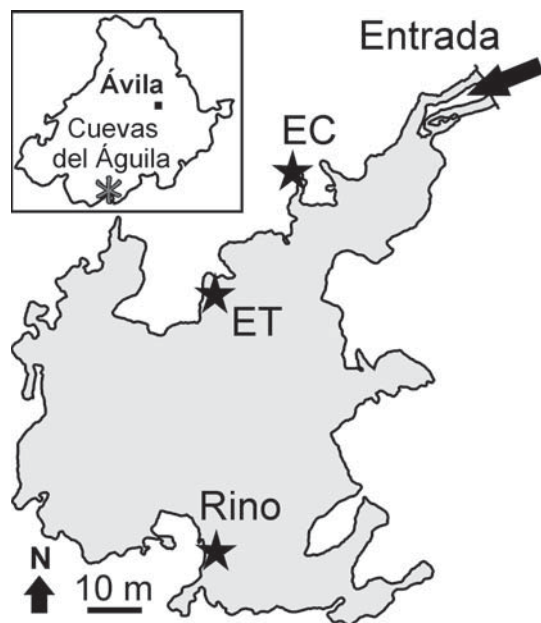


Fig. 1.- Localización de la Cueva del Águila en la provincia de Ávila y mapa de la cavidad con la ubicación de los termómetros.

Fig. 1.- Eagle Cave setting in Ávila province and cavern map with the location of the thermometers.

caron en la entrada dos puertas macizas que permanecen cerradas a excepción del breve lapso de tiempo en el que entran o salen los turistas. Esto favorece que no haya corrientes de aire apreciables con el exterior, lo cual se asemeja a las condiciones previas al descubrimiento de la cueva.

Métodos

La medición de la temperatura se tomó en tres puntos del interior de la cueva así como en un punto en el exterior a intervalos de 10 minutos y a ras de suelo. Dos de los sensores del interior de la cueva se localizaron en la sala principal ET y Rino (Fig. 1), mientras que otro se posicionó en una galería lateral ubicada cerca de la entrada EC. Los sensores utilizados fueron termistor Tinytag Plus2 equipados con memoria integrada. La

sensibilidad de los sensores es de $0,001^{\circ}\text{C}$ y su calibración dentro de la cueva resultó en una precisión mejor de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Resultados

La temperatura de la cueva resultó ser bastante estable con valores que oscilaron entre $15,2$ y $16,2^{\circ}\text{C}$ a lo largo del año 2009, dependiendo de la ubicación del termómetro y de la variabilidad temporal en cada sitio (Fig. 2). Los termómetros dentro de la cueva mostraron una estacionalidad bien marcada con un máximo de temperatura en invierno y un mínimo en verano, con amplitudes medias que oscilan entre $0,25$ y $0,4^{\circ}\text{C}$ en función su localización.

Los termómetros situados en la sala principal (ET y Rino) registran claramente el efecto de los visitantes, mientras que el sensor localizado en la galería anexa

(EC) no registra su impacto pese a estar a menos de 10 metros del pasaje por el que circulan los visitantes. En los termómetros de la sala principal son detectables dos periodos con incrementos de temperatura a lo largo de cada día, que corresponden a las visitas de mañana y tarde (Fig. 2). No obstante, tras el cierre de la cueva a los turistas, los valores de temperatura regresan cada noche al valor de base que cada termómetro registraba antes de la entrada de los visitantes. Aunque el periodo de recuperación térmica es variable su evolución es exponencial, por lo que tras unas pocas horas se alcanzan valores similares a los registrados antes de las visitas. Tan sólo en fines de semana o periodos vacacionales con elevado número de visitantes la cueva no es capaz de recuperar durante la noche los valores de temperatura base que tenía antes de que se produjera la entrada de visitantes (Fig. 2). En este caso, la temperatura de la sala principal asciende y sólo se recupera cuando el número de visitantes disminuye nuevamente.

Se ha calculado el efecto diario de los visitantes en la cueva atendiendo a la diferencia en la temperatura entre el periodo con visitas y los valores de fondo registrados la madrugada previa (Fig. 3). Ocasionalmente se producen anomalías negativas ya que en días con pocos o ningún turista el ruido de la señal es superior a la anomalía térmica, por lo que estos valores han sido filtrados. La influencia de los visitantes en la temperatura de la cueva es muy limitada, con picos diarios $< 0,04^{\circ}\text{C}$ en fines de semana ordinarios que en ningún caso superan los dos días de duración. También se ha calculado el efecto térmico acumulado producido por las visitas, que representa el aumento antropogénico más persistente de la tem-

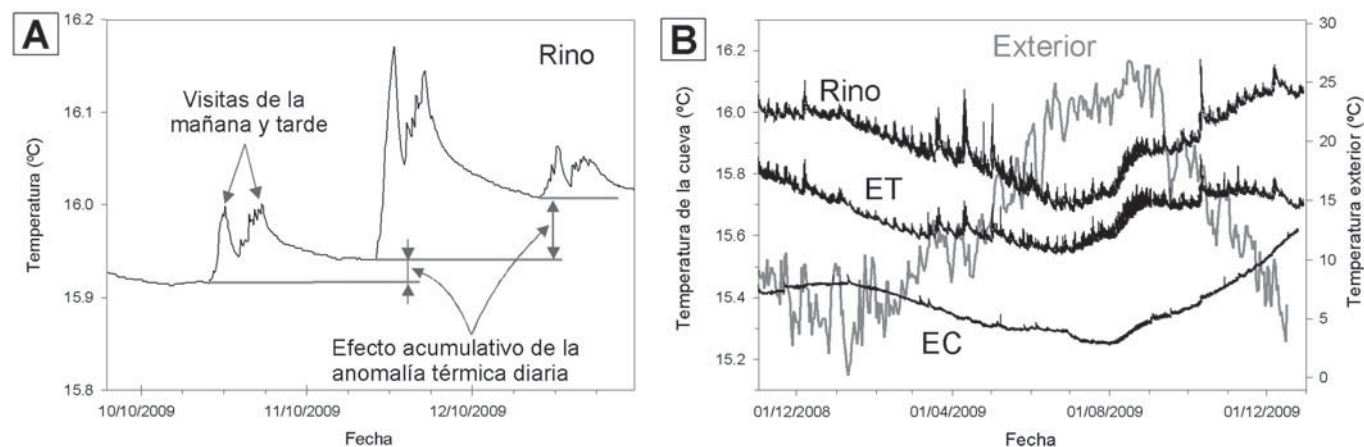


Fig. 2.- Ejemplo de anomalía de la temperatura causada por los visitantes durante tres días (A) y registro anual de las temperaturas en la cueva y el exterior (B).

Fig. 2.- Example of thermal anomaly caused by visitors during a three day period (A) and annual record of cave and external temperatures (B).

peratura de la cueva y por tanto el más significativo en cuanto a los objetivos de este estudio. Para ello se ha tenido en cuenta la diferencia entre las temperaturas diarias registradas en las horas previas a la entrada de los turistas y esos mismos valores una vez aplicado a la serie un filtro semanal. Las anomalías térmicas acumuladas en los fines de semana ordinarios, cuyas magnitudes son siempre inferiores a $0,02^{\circ}\text{C}$, se recuperan en su totalidad en un intervalo que oscila entre uno y tres días. En puentes o periodos vacacionales las anomalías acumuladas alcanzaron valores máximos de $0,1^{\circ}\text{C}$, con una rápida recuperación tras el cese de la fluencia masiva de visitantes. En la figura 3 se representan también las anomalías térmicas naturales. En el caso de aquellos termómetros afectados por la fluencia de visitantes, las anomalías acumuladas producto de los turistas fueron eliminadas de la señal. Las anomalías naturales son por lo general un orden de magnitud superior a aquellas producidas por los visitantes. Solamente en periodos vacacionales los visitantes producen variaciones térmicas acumuladas reseñables, que en cualquier caso siguen siendo muy inferiores a aquellas producidas por la dinámica natural de la cavidad.

Discusión

A lo largo del periodo de monitorización se ha observado un evidente ciclo anual en la temperatura de la cueva. A pesar de que los termómetros EC y ET se localizan próximos a la entrada puede asegurarse que la variación anual registrada no tiene relación con la convección térmica a través de la entrada. La estrechez de la galería que comunica con el exterior y la elevada humedad relativa de la cavidad favorece que la longitud de relajación que afecta a la transmisión de la temperatura (Wigley y Brown, 1971) se restrinja a unas pocas decenas de metros (Domínguez-Villar *et al.*, 2009b). Otros factores como el efecto de la temperatura de goteo o la transmisión de la temperatura por fisuras por medio de convección también han sido descartados como responsables de significativas fuentes de variaciones térmicas en el sistema (Domínguez-Villar *et al.*, 2009b). Por lo tanto, la estacionalidad está relacionada con la temperatura exterior (en la superficie sobre la cueva) que es transmitida a la cavidad a través del macizo rocoso por conducción térmica (Domínguez-Villar *et al.*, 2009b). La amplitud de la estacionalidad será menor cuanto mayor sea la profundidad de la

cavidad, mientras que se incrementará el tiempo necesario para recibir la señal térmica en la cueva. Para la Cueva del Águila, en término medio la amplitud del ciclo térmico exterior se ha reducido a menos de $0,4^{\circ}\text{C}$ tras ~ 12 metros de profundidad y el desfase con el exterior tiene un retardo de $\sim n \cdot p$ años, aunque debido a variaciones en la constante de difusividad térmica estos valores pudieran estar sujetos a pequeñas variaciones interanuales.

Sin embargo, es evidente que la fluencia de turistas en la cueva incrementa la temperatura durante las visitas, aunque sea sólo unas centésimas de grado. A pesar de ello el sistema se recupera con rapidez en pocas horas. El mecanismo de autorregulación térmico de la cueva es complejo e incluye a los visitantes, el aire y las paredes de la cueva como fuentes y/o receptores de calor.

Además, los cambios de fase de la humedad contenida en la atmósfera de la cueva producen que la energía no siempre se transfiera en forma de calor sensible sino como calor latente debido a los cambios de fase del agua. Los procesos de evaporación y condensación se observan cotidianamente sobre diversas superficies de la cueva y por tanto es necesario tenerlos en cuenta para entender el sistema. El incremento de la temperatura por efecto de las visitas conlleva un descenso en la humedad relativa, ya que el aire a mayor temperatura es capaz de incorporar más humedad antes de alcanzar la saturación. Por lo tanto, durante el periodo de visitas se produce una evaporación que conlleva el aumento de la presión parcial de agua en el aire, donde la humedad adicional proviene fundamentalmente de la evaporación del agua disponible en la cueva (gours,

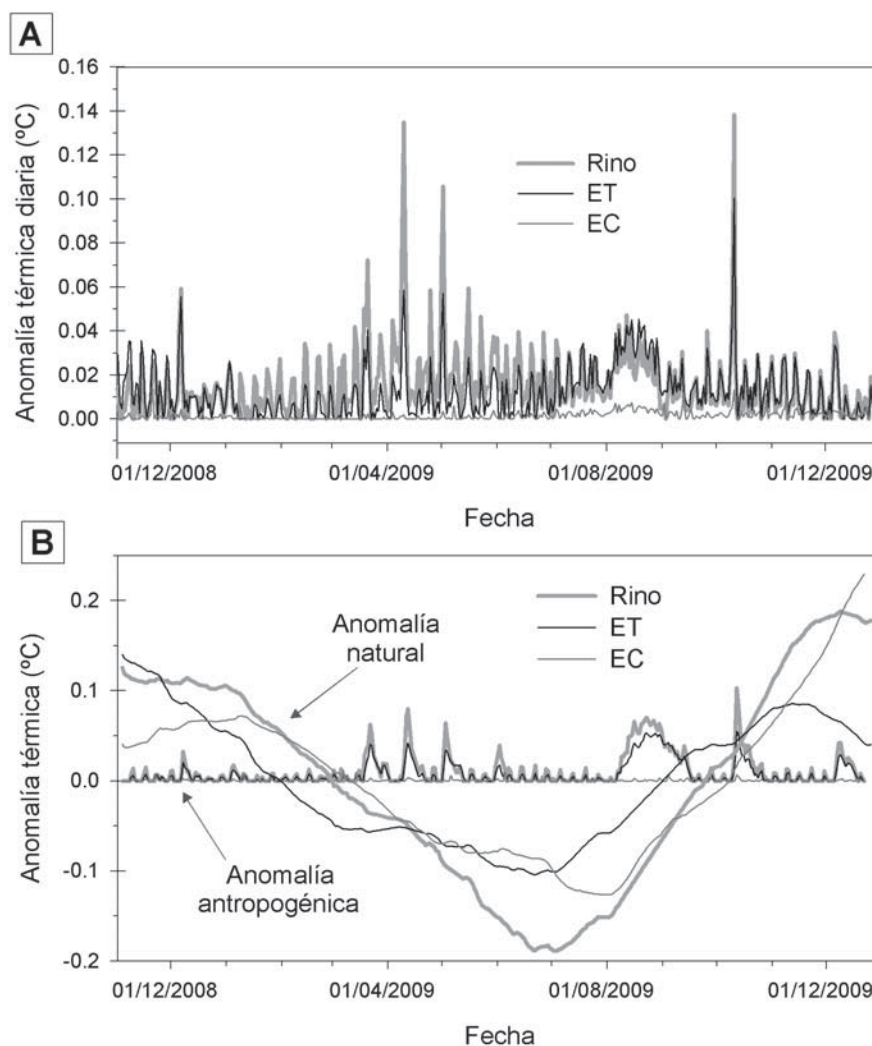


Fig. 3.- Registros anuales de las anomalías térmicas diarias (A) y comparación entre las anomalías térmicas naturales y antropogénicas causadas por el efecto acumulado de los visitantes (B).

Fig. 3.- Annual records of daily thermal anomalies (A) and comparison of natural versus anthropogenic anomalies caused by cumulative effect of visitors (B).

condensaciones en las paredes, etc). Tras el periodo de visitas en la cueva la evaporación persiste hasta que se alcance la saturación de la atmósfera. Entretanto, la temperatura del aire comienza a disminuir para equilibrarse con la temperatura de las paredes, lo que hace más sencillo que se alcance la saturación de la atmósfera, ya que aire más frío es capaz de albergar menos presión parcial de agua. Cuando se alcanza la saturación, sobre las paredes de la cueva comienza a producirse condensación de la humedad del aire de la cueva y el calor del aire ya no se transmite como calor sensible sino como calor latente. De este modo las paredes de la cueva apenas están sujetas a variaciones térmicas, mientras que la recuperación de la temperatura es mitigada por el proceso de condensación. La condensación existente en la actualidad no es suficiente como para producir procesos de corrosión por condensación (Dublyansky y Dublyansky, 1998) de forma perceptible y no se observa daño alguno en las formaciones espeleotémicas recientes.

Conclusiones

La Cueva del Águila tiene unas temperaturas que a lo largo del año 2009 oscilaron entre los 15,2 y 16,2 °C, con variaciones anuales inferiores a los 0,4°C. La mayor parte de la amplitud de dichas variaciones está relacionada con un proceso natural en el que el aire esta en equilibrio con las paredes de la cueva y registra con cierto retraso y muy mitigada la señal térmica del exterior y su estacionalidad. Los visitantes a la cueva aumentan la

temperatura en la cavidad, aunque por lo general las anomalías térmicas se recuperan en unas pocas horas. La excepción lo representan los puentes y periodos vacacionales donde las anomalías térmicas acumuladas llegan a ser reseñables, aunque con amplitudes muy inferiores a las producidas de forma natural, poco duraderas y no persistentes. Por lo tanto, la influencia de los visitantes en la Cueva del Águila no afecta a las variaciones de fondo de la temperatura registrada en la cueva, que están en relación con la variabilidad natural del sistema. En consecuencia, los valores de temperatura de esta cueva pueden utilizarse para calibrar su relación con el clima exterior, así como con los registros de estalagmitas que permitan reconstruir su evolución en el pasado.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido fondos de la Comunidad Europea por medio de un contrato Postdoctoral Marie-Curie (Intra European Fellowship; concedido a DDV) dentro del Séptimo Programa Marco FP7/2007-2013 (concesión nº219891; PROCASET Project). También ha recibido financiación adicional por medio de los proyectos CGL2008-03396 (GLACIOSICE) del MICINN y PII1109-0138-6113 (CRONOGREDOS) de la Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Los autores quisieran agradecer a los responsables de las Cuevas del Águila por todas las facilidades para llevar a cabo este estudio. Este trabajo se ha enriquecido con los comentarios de

Carlos Sancho Marcén así como de un revisor anónimo.

Referencias

- Cheng, H., Edwards, R.L., Broecker, W.S., Denton, J.H., Kong, X., Wang, Y.J., Zhang, R. y Wang, X. (2009). *Science*, 326, 248-252.
- Domínguez-Villar, D., Fairchild, I.J., Baker, I.J., Wang, X., Edwards, R.L. y Cheng, H. (2009a). *Geology*, 37, 1095-1098.
- Domínguez-Villar, D., Fairchild, I.J., Baker, A., Carrasco, R.M., Razola, L. y Pedraza, J. (2009b). En: 17th Karstological School «Classical karst»: cave climate. Abstracts nº17, 56.
- Dublyansky, V.N. y Dublyansky Y.V. (1998). *Journal of Cave and Karst Studies*, 60, 3-17.
- Fairchild I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., McDermott, F. y E.I.M.F. (2006). *Earth-Science Reviews*, 75, 105-153.
- Fernández-Cortés, A., Calaforra, J.M., Jiménez-Espinosa, R. y Sánchez-Martos, F. (2006). *Journal of Environmental Management*, 81, 371-383.
- Martín Escorza, C. (1971). *Boletín Real Sociedad de Historia Natural (Geología)*, 69, 303-327.
- Odriozola, J.M., Peón, A., Ugidos, J.M., Pedraza, J. y Fernández, P. (1980). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 578 (Arenas de San Pedro)*. IGME.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.C. y Dorale, J.A. (2001). *Science*, 294, 2345-2348.
- Wigley, T.M.L. y Brown, M.C. (1971). *Boundary-Layer Meteorology*, 1, 300-320.