

# Aspectos ambientales e hidrogeológicos de la Gruta de las Maravillas (Huelva, España)

W. Martín-Rosales<sup>(1)</sup>, J.C. Cerón<sup>(2)</sup>, M. López-Chicano<sup>(1)</sup> e I. Fernández<sup>(2)</sup>

(1) Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n. 18071. Granada. España.  
E-mails: wmartin@ugr.es - mlopezc@ugr.es

(2) Departamento de Geodinámica y Paleontología. Universidad de Huelva, Campus "El Carmen". 21071. Huelva. España.  
E-mails: ceron@uhu.es - infernan@uhu.es

## RESUMEN

Se exponen los resultados de la investigación realizada en la Gruta de las Maravillas, situada al suroeste de España, en Aracena (Huelva). La intervención humana en la Gruta de las Maravillas ha provocado una serie de afecciones en el agua (descenso del nivel de los lagos por extracciones de agua en sondeos próximos), la atmósfera de la cueva (incremento de la temperatura y de la concentración de CO<sub>2</sub> y descenso de la humedad relativa) y la roca. Además, la colonización vegetal, favorecida por los sistemas de iluminación, ha provocado alteraciones en numerosos espeleotemas. Los procesos de degradación son especialmente intensos en los sectores con menor volumen de aire y deficiente ventilación. El análisis de los espeleotemas mediante microscopía electrónica y en secciones delgadas revelaron que el crecimiento vegetal constituye uno de los agentes más agresivos respecto a los espeleotemas, siendo responsable de degradaciones bioquímicas y biofísicas de primer orden. En relación con las facies hidroquímica del agua, domina la bicarbonatada cálcica, seguida de la bicarbonatada magnésica. Las características químicas observadas muestran aguas cuya composición está relacionada con la litología y con las distintas actividades humanas que tienen lugar. Después de la evaluación de la situación ambiental en la gruta se recomendó un conjunto de medidas correctoras.

Palabras clave: climatología subterránea, Gruta de las Maravillas, impacto antrópico, karst, medidas correctoras

## ***Environmental and hydrogeological aspects of the Gruta de las Maravillas (Huelva, Spain)***

### ABSTRACT

*The results of a research carried out in the Gruta de las Maravillas are exposed. The cave is situated in the southwest of Spain, in Aracena (Huelva province). The human activity on the cave has produced a series of effects on water, air and rock. On the water, they are a fall in the level of the pools due to pumping from nearby wells. On the air, they are an increased temperature and CO<sub>2</sub> concentration as well as decreased relative humidity. On the rock, there is plant colonization, favoured by the lighting system, and has irreversibly altered numerous speleothems. The processes of degradation are especially intense in the sectors with less air volume and limited ventilation. The analysis of the cave deposits by scanning electron microscopy and thin sections analysis revealed that floral pollution constitutes one of the most aggressive agents against the calcite and aragonite speleothems, being responsible for biochemical and biophysical degradation of the first order. The waters are meanly bicarbonate-calcium type, followed by bicarbonate-magnesium type. The hydrochemical study of the water shows that the salinity is conditioned by human activities and lithology. After study of the situation in the cave, we recommended a range of corrective measures.*

*Key words: corrective measures, Gruta de las Maravillas, human impact, karstic cave, underground climatology*

## Introducción

La Gruta de las Maravillas es una de las numerosas cavidades kársticas españolas acondicionadas al turismo. Está situada en el paraje conocido como Cerro del Castillo, dentro del casco urbano de Aracena (Figura 1), población onubense con casi 6000 habitantes y ubicada al noreste de la provincia de

Huelva. El clima predominante es mediterráneo continental templado, con precipitaciones medias anuales de 1000 mm en Aracena, si bien se pueden rebasar con cierta frecuencia los 1500 mm en un solo año. Esta pluviometría, elevada si se tiene en cuenta la relativa aridez que caracteriza el clima del sur de la Península Ibérica, se explica por el efecto barrera ejercido por la Sierra de Aracena, la primera alineación

montañosa que intercepta los vientos húmedos del Atlántico. Las temperaturas presentan valores que oscilan entre 14 y 16 °C, que condicionan veranos cortos y relativamente frescos.

La cueva tiene una longitud conocida de 2130 m y, aunque su desarrollo es predominantemente horizontal, en ella se pueden distinguir al menos tres niveles de karstificación superpuestos; los dos primeros se corresponden en su mayor parte con el recorrido turístico actual, con alrededor de 1000 m de longitud, quedando el tercero y más elevado de ellos inaccesible a las visitas turísticas. El interés turístico de la cavidad reside en dos aspectos fundamentales: por una parte, su gran variedad y abundancia de espeleotemas de calcita y aragonito, sobre todo en el nivel intermedio; el otro gran atractivo viene representado por las galerías inundadas -nivel inferior-, en donde un gran número de lámparas subacuáticas iluminan las diversas formas endokársticas (Martín Rosales *et al.*, 1995).

Desde que en 1911 comenzaran los trabajos de acondicionamiento para el turismo en la cavidad, ésta no ha cesado de recibir visitas. En el período comprendido entre los años 1957-1960 -casi 50 años después de su apertura al público-, visitaron la Gruta un total de 132000 personas, lo que implica una media

de 33000 visitantes por año. Las visitas aumentaron de forma más o menos rápida hasta alcanzarse valores máximos de 160000 y 170000 entradas, correspondientes a los años 1990 y 1991, respectivamente. De haberse mantenido esta tendencia, en el año 1996 se habría superado la cifra de 194000 visitantes, circunstancia que no ha tenido lugar gracias a las primeras medidas de restricción de visitas emprendidas en 1992 por la Administración Local con motivo del deterioro ambiental detectado en la cavidad. De este modo, se ha venido observando un descenso paulatino de visitantes desde 1992 hasta la actualidad, estableciéndose la media de entradas en unos 153000 turistas anuales, lo que la convierte en un recurso geológico de indudable peso en la actividad socioeconómica de la localidad de Arcena (Martín Rosales *et al.*, 1999).

### Consideraciones geológicas

La cueva se encuentra en la Zona de Ossa-Morena, concretamente en las proximidades del contacto entre ésta y la Zona Surportuguesa. Ambas constituyen los dominios más meridionales del Macizo Ibérico y las diferencias entre ellos atienden a criterios petrográficos, litoestratigráficos y estructurales. La Gruta de las Maravillas se desarrolla en un pequeño afloramiento de mármoles de edad Cámbrico Inferior (Figura 2) y que han sido afectados por un metamorfismo regional de alta temperatura y baja presión; éstos se incluyen en el llamado Macizo de Arcena, que representa el borde meridional de Ossa-Morena (Crespo Blanc, 1991). Este afloramiento de mármoles está limitado al norte por gneises cuarzo-feldespáticos y, al sur, por los denominados "Gneises de la Fuente del Oro", unas tonalitas anatócticas con restitas de cuarzitas. Sobre la superficie del relieve residual carbonatado donde se aloja la Gruta de las Maravillas se observa un sistemático conjunto de diaclasas de dirección subperpendicular a la de la  $S_0$ . Esta  $S_0$  tiene una dirección N120E, aproximadamente y, al parecer, es la foliación que controla las principales direcciones de karstificación (Del Val y Hernández, 1989). También se pueden observar diversas manifestaciones kársticas, principalmente formas de absorción, todas ellas de reducidas dimensiones. Generalmente se trata de pequeñas depresiones de tamaño decimétrico con forma cónica y cilíndrica y paredes lisas, cuyo fondo frecuentemente se encuentra relleno de arcillas de descalcificación. En el sector meridional del cerro del Castillo existen restos del desmantelamiento de antiguas cavidades, consistentes en falsa ágata, brechas, espeleotemas y otros pre-

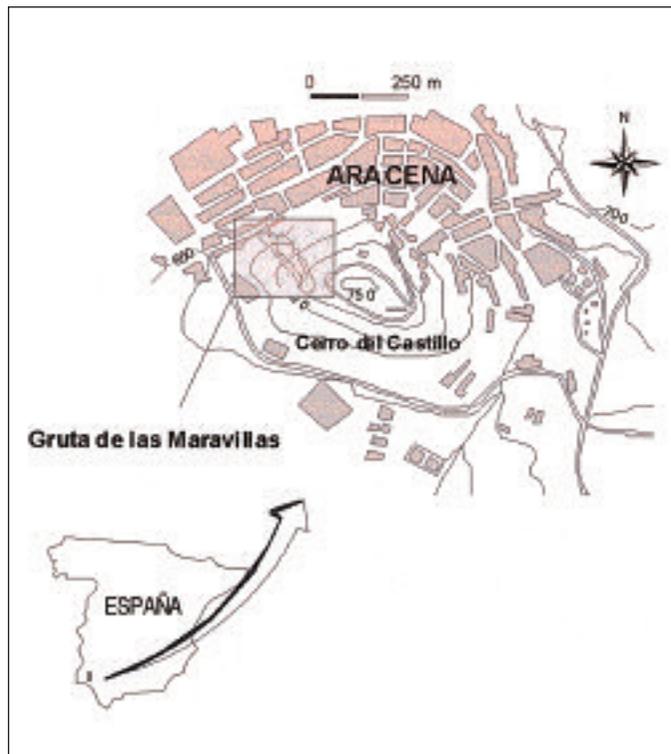


Fig. 1. Situación geográfica de la cueva  
Fig. 1. Geographical location of the cave

cipitados de calcita. Es característica además la presencia de mineralizaciones de óxidos y sulfuros de hierro asociadas al diaclasado y, en menor medida, a la dirección de la foliación.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los mármoles donde se encuentra situada la cueva constituyen un acuífero carbonatado con porosidad por fracturación y karstificación. En la actualidad no se conoce con precisión la geometría y los límites del sistema acuífero, si bien se considera que hay una conexión hidráulica de este afloramiento con otro también carbonatado, situado 400 m al este, a través de un pequeño afloramiento de materiales detríticos cuaternarios (Figura 2). Su recarga procede fundamentalmente de la infiltración de las precipitaciones sobre el acuífero. El nivel piezométrico del acuífero coincide con el del nivel de inundación de las galerías más bajas (galería de los Lagos). Existen además niveles de agua "colgados" dentro de la Gruta, como las llamadas "Sala del Volcán" y la "Cristalería de Dios" (Figura 3), situados en la actualidad por encima del nivel piezométrico.

### Métodos de estudio

El incremento paulatino del número de visitantes y la degradación ambiental detectada en distintos sectores de la cavidad, fueron los causantes de la puesta en marcha de un proyecto de investigación encaminado a identificar y evaluar los principales impactos ambientales de origen antrópico y establecer las oportunas medidas correctoras. La primera acción desarrollada en el marco de dicho estudio fue la evaluación o diagnóstico del grado de alteración de los espeleotemas, para lo cual se llevó a cabo un análisis basado en estudios petrográficos de los mismos y su posible afección por algas y líquenes, tanto de las zonas sujetas a visitas, como de aquéllas no contempladas en el itinerario turístico, consiguiendo así un análisis comparativo de las mismas. Se tomaron para ello veinticinco muestras de espeleotemas y roca de caja, siendo posteriormente analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía de luz polarizada (Martín Rosales *et al.*, 1994).

Se estableció una red de control y seguimiento de parámetros ambientales con el fin de caracterizar el estado ambiental actual de la Gruta y evaluar la influencia de los visitantes en su evolución futura (Figura 3). Esta red de control y seguimiento de parámetros ambientales constaba inicialmente de cinco sensores para medir la temperatura y la humedad del aire con una periodicidad de 15 minutos, que coincidía con la frecuencia de visitantes en los días de

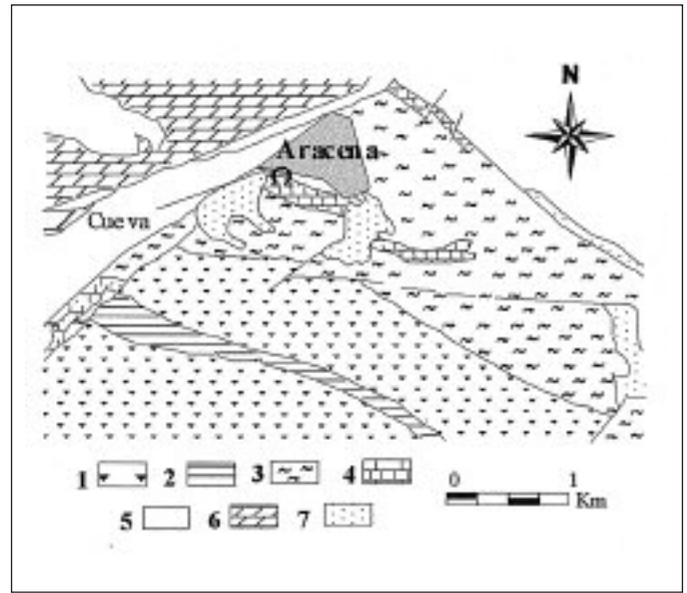


Fig. 2. Localización geológica de la cueva. 1: ofiolitas y anfibolitas; 2: cuarcitas y esquistos; 3: gneises; 4: mármoles; 5: rocas vulcanosedimentarias; 6: dolomías; 7: arenas y gravas. Tomado de Apalategui *et al.*, (1979)

Fig. 2. Geological location of the cave. 1: ophiolites and amphibolites; 2: quartz-schistes; 2: gneiss; 4: marbles; 5: vulcanosedimentary rocks; 6: dolomites; 7: sands and gravels. From Apalategui *et al.*, (1979)

máxima afluencia. Posteriormente se registró con data logger el contenido en CO<sub>2</sub> del aire y la evolución del nivel piezométrico en los lagos (Martín Rosales *et al.*, 1996). Lamentablemente, los altos valores de humedad relativa que se suelen presentar en la mayor parte de la cavidad (próximos al 100%) inutilizaron los equipos de registro de dióxido de carbono atmosférico a los pocos meses de su puesta en funcionamiento.

Paralelamente se registraron de forma automática en el exterior de la cavidad la temperatura y humedad relativa del aire, así como las precipitaciones. Además, se han realizado numerosos perfiles con equipos portátiles a lo largo de la Gruta, en los que se midió la humedad relativa, temperatura y velocidad del aire. Dado que era preciso comparar los parámetros medidos con los de los sectores menos influenciados por el hombre, se instaló un equipo de medida de temperatura y humedad relativa en el tercer nivel de karstificación, alejado del recorrido turístico. Finalmente, se recogieron muestras de agua a fin de caracterizar, desde el punto de vista hidroquímico, las aguas del acuífero en el interior de la cavidad, así como en un manantial próximo; también se muestrearon aguas de goteo en el interior de la cavidad y en diversos gours de la misma, representativos de la

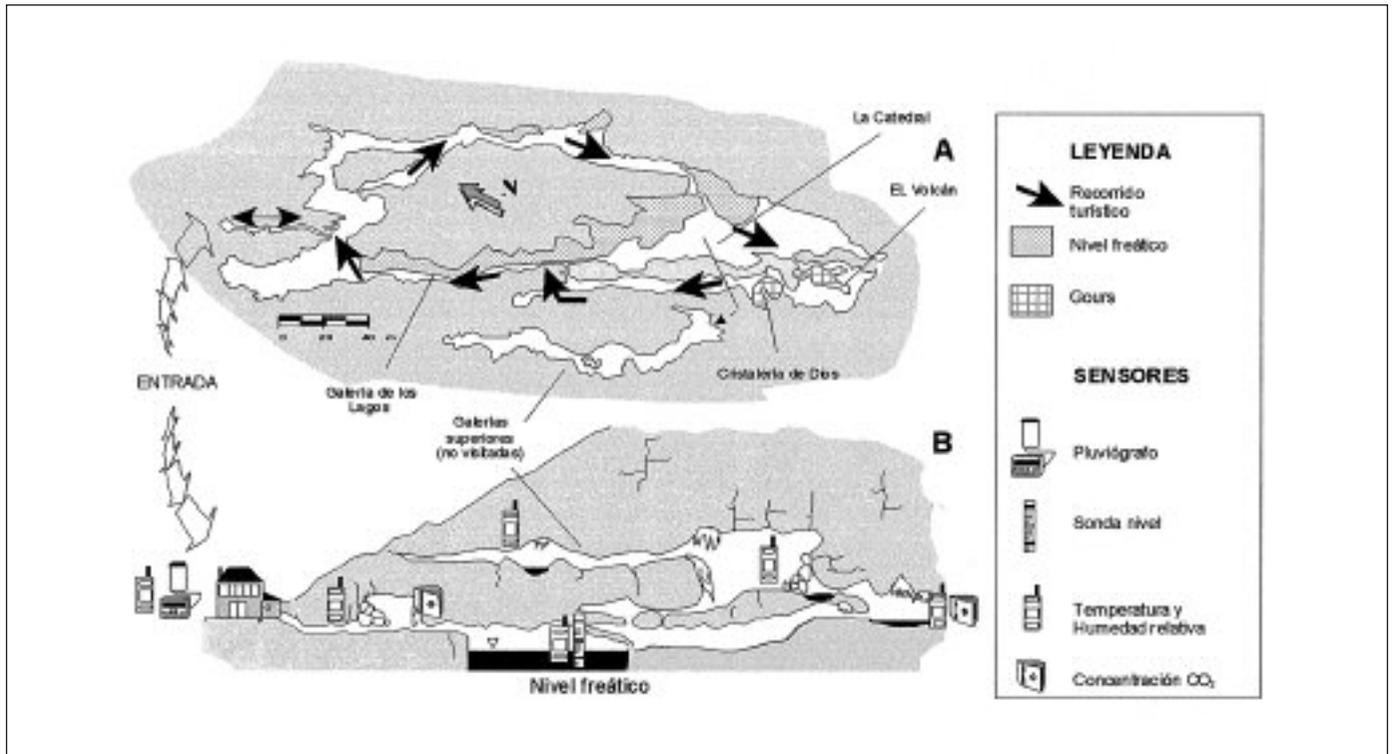


Fig. 3. Sección esquemática y red de control de la Gruta de las Maravillas. Topografía realizada en 1987 por el Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (GES-SEM)

Fig. 3. Approximate schematic section and monitoring network of the Gruta de las Maravillas. Topographic plan drawn in 1987 by the Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga (GES-SEM)

zona no saturada del acuífero. La red de muestreo estaba compuesta por 15 puntos, en los cuales se obtuvieron "in situ" datos de las variables conductividad eléctrica, temperatura y pH. Los equipos empleados fueron un conductivímetro marca WTW modelo LF 318/Set y un pH-metro de igual marca y modelo 330/SET-1. Con respecto a los iones mayoritarios, éstos se determinaron en las muestras tomadas en 15 puntos acuíferos representativos. De este modo, en el laboratorio se analizaron los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , y según los métodos estándar ASTM (1985).

## Resultados

El estudio, en sus fases iniciales, puso de manifiesto la existencia de sectores donde la alteración de los espeleotemas adquiría mayor importancia, coincidiendo con zonas de reducidas dimensiones y deficiente ventilación, así como abundancia de algas, consecuencia de una densa red de focos de luz artificial. Los primeros análisis efectuados revelaron que en los sectores más alejados del recorrido turístico

los espeleotemas no presentaban indicios de disolución avanzada, si bien ya se observaba en algunos casos la presencia de numerosos elementos extraños en la superficie de los cristales. Sin embargo, las muestras afectadas por procesos de colonización vegetal presentaban una microtopografía completamente distinta a las anteriores e indicadora de corrosión orgánica (Pulido Bosch *et al.*, 1997). Las muestras de aragonito acicular extraídas de sectores próximos a los anteriores también mostraban procesos de alteración importantes, fundamentalmente corrosión y disgregación mecánica. Los sectores donde la alteración de las concreciones adquiría mayor importancia, coincidían con galerías y salas de reducidas dimensiones y deficiente ventilación, así como abundancia de algas.

En general, se observó una zonificación de la temperatura del aire en distintos sectores de la Gruta, registrándose los mayores valores en las partes más alejadas de la entrada a la misma. Las temperaturas más bajas se han medido en las Galerías de los Lagos, con valores comprendidos entre 15.7 °C y 16.1 °C, y que son muy similares al del agua subterránea (entre 15.9 °C y 16.3 °C). En las partes más alejadas de

la entrada, y en el nivel intermedio, la temperatura puede llegar a rebasar 19.5 °C (Figura 4), correspondiendo a zonas con menores volúmenes de aire y condiciones de ventilación poco favorables (Sala del volcán y Cristalería de Dios). En el nivel superior, no accesible a las visitas turísticas, la temperatura vuelve a alcanzar valores relativamente bajos. Las oscilaciones térmicas en esta galería se dedujeron a partir del registro correspondiente a casi un año, obteniéndose un valor medio de 16.8 °C con valores máximos y mínimos de 17.4 y 16.2 °C, respectivamente, correspondiente al período 03/94 - 01/95.

Los impactos más altos sobre la temperatura del aire tienen lugar durante el período estival (Julio y Agosto), el más caluroso del año y el de mayor afluencia de visitantes (Figura 4). Lógicamente, a ello hay que añadir la energía calorífica aportada por los sistemas de iluminación, que permanecen en funcionamiento durante un mayor intervalo de tiempo debido al paso continuado de visitantes. La temperatura del aire de la cavidad muestra una estrecha relación con la afluencia de visitas, presentando un coeficiente de correlación de 0.7, mayor que con la temperatura exterior ( $r = 0.4$ ), tal y como se ha evidenciado en estudios anteriores (Pulido Bosch *et al.*, 1997).

Por otra parte, el aumento de la temperatura lleva aparejado un descenso de la humedad relativa del aire. Este parámetro se mantiene en una estrecha franja comprendida entre el 97% y el 100%. El sistema actual de iluminación, al igual que los visitantes, contribuye no sólo a aumentar la temperatura ambiente, sino que provoca una disminución de la humedad

relativa del aire. Estas variaciones pueden llegar a adquirir una gran importancia en sectores reducidos, muy localizados, tal y como han evidenciado diversos experimentos realizados con sensores de medida instalados a poca distancia de los focos (Martín Rosales *et al.*, 2002).

De igual modo que ocurre con la temperatura, la concentración de CO<sub>2</sub> del aire se incrementaba notablemente con los visitantes, llegando incluso a triplicar los valores previos a la visita. En la sala más próxima a la entrada las concentraciones de este gas oscilaban entre 500 y 600 ppm, mientras que en las partes más alejadas y peor ventiladas el valor más bajo fue de 1500 ppm. La influencia de los visitantes se traducía en un aumento de la concentración, pudiendo alcanzar valores de hasta 5000 ppm; hay que indicar, no obstante, que el sensor de medida se instaló a pocos cm del suelo, por lo que los valores medios de la sala deben ser sensiblemente menores.

Las características hidroquímicas del agua se resumen en la Tabla 1, donde se indican los valores mínimos, máximos, medios y desviaciones típicas de los parámetros de campo y laboratorio medidos. El ion CO<sub>3</sub><sup>=</sup> no se encontró en las muestras.

Con respecto a los parámetros de campo, y en relación con la conductividad, éstos varían en un rango relativamente amplio, entre 246 y 600  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , si bien sus valores son bajos. Dichos valores son inferiores en las muestras tomadas en el lago (zona saturada del acuífero), en relación con la surgencia, mientras que los valores mínimos se obtuvieron en los gours. La diferencia de temperatura medida en las

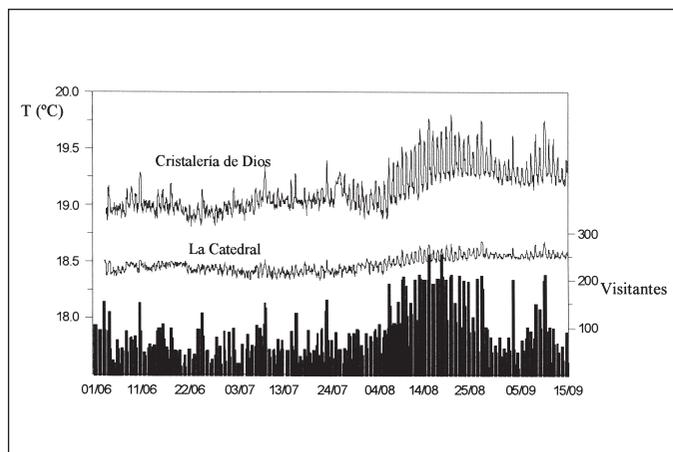


Fig. 4. Visitantes por hora y temperatura media horaria del aire en la Cristalería de Dios, La Catedral, correspondiente al período junio-septiembre de 1995

Fig. 4. Hourly visitors to the cave and records of air temperature in the God's Glassware Chamber and the Cathedral, during June-September 1995

	Mínimo	Máximo	Media	D.T.
Conductividad	246	600	407	148.82
Temperatura	16.3	20.2	18.2	1.43
pH	7.6	8.3	8.1	0.29
Cl <sup>-</sup>	14	43	26	9.58
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	9	59	31	17.31
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	244	150	54.31
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2	42	21	13.29
Ca <sup>2+</sup>	25	67	44	14.20
Mg <sup>2+</sup>	1	47	21	16.51
Na <sup>+</sup>	2	31	10	9.80
K <sup>+</sup>	0.2	4	2.8	1.09

Tabla 1. Valores mínimos, máximos, medios y de desviación típica (D.T.) de las variables determinadas en las muestras de agua tomadas en el interior de la gruta de las Maravillas (conductividad en  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , temperatura en °C e iones en  $\text{mg L}^{-1}$ )

Table 1. Minimum, maximum, mean and standard deviation of the variables of the sampled water from the Gruta de las Maravillas (conductivity in  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , temperature in °C and ions in  $\text{mg L}^{-1}$ )

muestras llega a ser de casi cuatro grados centígrados; en este caso las más elevadas se registran en las muestras tomadas en los gours (zona no saturada). El pH varía entre 7.6 y 8.3, siendo en general más bajo en las muestras correspondientes a la zona saturada.

En relación con los aniones determinados, el bicarbonato es el que presenta valores de concentración más elevados, alcanzando los 244 mg L<sup>-1</sup>, seguido en contenidos mucho más bajos por el sulfato (con un máximo de 59 mg L<sup>-1</sup>) y el cloruro, que llega hasta 43 mg L<sup>-1</sup>. El contenido en ion nitrato se muestra muy variable; así, se tienen valores bastante bajos en algunas muestras, próximos a 2 mg L<sup>-1</sup>, pero que en otras son moderadamente altos a altos, llegando a medirse hasta 42 mg L<sup>-1</sup>. Los valores más altos se dan en las muestras obtenidas en la zona saturada del acuífero.

Con respecto a los cationes, es el calcio el que presenta la concentración más alta (de hasta 67 mg L<sup>-1</sup>), seguido con valores un poco más bajos por el magnesio (con un máximo de 47 mg L<sup>-1</sup>) y el sodio (de hasta 31 mg L<sup>-1</sup>). El potasio presenta concentraciones bajas a muy bajas (varía entre 4 y 0.2 mg L<sup>-1</sup>).

Otros impactos que cabe resaltar son de origen externo; fundamentalmente se trata de descensos en el nivel freático como consecuencia de bombeos en pozos próximos, así como la existencia de vertederos de residuos sólidos en materiales permeables próximos a los mármoles donde se desarrolla la cavidad (hoy eliminado por completo). También caben destacar algunos proyectos de urbanización en sectores

cercanos que podrían haber puesto en peligro la estabilidad mecánica de la cavidad, de no haber sido por la correspondiente prohibición por parte de la autoridad municipal.

### Conclusiones

La zonificación térmica del interior de la cavidad responde a diversos factores, entre los que se consideran más importantes: la morfología de la cavidad, que influye en la capacidad de ventilación; la distancia respecto a la entrada, la afluencia de visitantes y la proximidad a las zonas inundadas. En efecto, las masas de agua ejercen un efecto termorregulador, de tal forma que un descenso importante del nivel piezométrico podría tener como consecuencia un aumento de la temperatura en los sectores adyacentes, de ahí que se recomendase al Organismo Gestor de la cavidad que paralizase las extracciones situadas en las inmediaciones de las mismas. En cuanto a los visitantes, su efecto es, como cabía esperar, el incremento positivo de la temperatura así como el aumento de la concentración de dióxido de carbono, entre otros. Es evidente que un incremento en la concentración de dicho gas en el aire podría llegar a generar aguas de condensación agresivas, y por tanto provocar procesos de corrosión en los espeleotemas. El establecimiento del límite máximo de visitantes se llevó a cabo a partir del método propuesto por Andrieux (1988), aplicado en los años ochenta en la Gruta de Niaux (Francia), basado en la cuantificación de la producción y consumo energéticos de los visitantes, así como en el tiempo necesario para su disipación. Como resultado de la aplicación de dicha metodología, se recomendó que los grupos de visitantes no excedieran de 35 personas y con una frecuencia mínima de entrada de 30 minutos. Teniendo en cuenta el protocolo actual de visitas, quiere ello decir que el número máximo de visitantes diarios es de 490.

Sin embargo, a esta degradación producida por fenómenos de disolución inorgánica habría que añadir la derivada de la acción biológica. Gracias a la energía luminosa emitida por los focos, estos microorganismos sintetizan los componentes necesarios para desarrollar sus funciones vitales, adquiriendo incluso elementos minerales a partir del substrato sobre el que se instalan. Una vez desarrolladas su resistencia a las condiciones ambientales es muy elevada. Pueden permanecer activas durante largos períodos de tiempo incluso en condiciones de total falta de luz (Ruiz *et al.*, 1991). Fruto de la actividad rea-

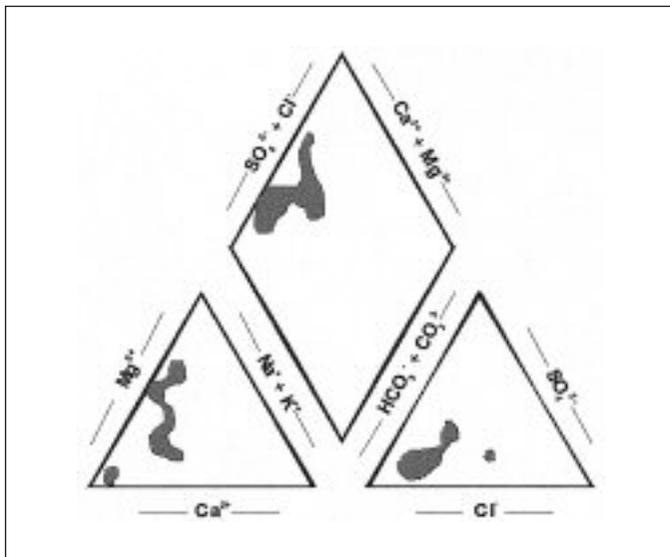


Fig. 5. Diagrama de Piper de las muestras de agua  
Fig. 5. Piper diagram showing the composition of the water samples

lizada por estos organismos es la progresiva descomposición de la roca sobre la que actúan dos grupos de mecanismos fundamentales; por un lado una alteración química o bioquímica producida por la acción de ácidos orgánicos, seguida de una alteración biofísica, responsable de la desintegración mecánica del substrato (Viles, 1985; Cooks y Otto, 1990; Moses et al., 1995). Por ello, se recomendó la sustitución del sistema actual de iluminación, compuesto por más de 2500 puntos de luz, por un nuevo sistema compuesto por "luces frías", con menor impacto térmico y mayor rendimiento, si bien relativamente costoso. Dicho sistema, implantado actualmente en los sectores más vulnerables antes citados, ha comenzado a surtir sus efectos (Martín Rosales et al., 2002).

En relación con las facies hidroquímica del agua dominan la bicarbonatada cálcica, seguida de la bicarbonatada magnésica. Los valores de conductividad más elevados, detectados en el manantial situado en las inmediaciones de la cavidad, se deben fundamentalmente al mayor tiempo de contacto del agua con la roca, mientras que los valores mínimos, medidos en la zona no saturada (gours), se explican por la mayor velocidad de renovación del agua en este sector. Las aguas se encuentran relativamente enriquecidas en sulfatos, lo que podría explicarse por la presencia de sulfuros (pirita y calcopirita) en la roca de caja, tal y como sugieren Del Val et al., (1999). En cuanto a los nitratos, hay que indicar que en casi todas las muestras pertenecientes a la zona saturada superaron el nivel guía, aunque no llegó a rebasarse la concentración máxima admisible ( $50 \text{ mg L}^{-1}$ ), correspondiente a una calidad deseable de agua potable. Dada la proximidad de numerosas viviendas con respecto a la cueva, se sospecha que la presencia de estos nitratos, sólo detectada en la zona saturada, pueda deberse a vertidos líquidos urbanos o pérdidas en la red de saneamiento.

Finalmente, se recomendó el mantenimiento de una red de observación de parámetros ambientales y seguimiento de la recuperación del medio, a fin de valorar la eficacia de las medidas correctoras propuestas. Hay que indicar que muchas de estas medidas se encuentran en fase de aplicación, por lo que se espera que los impactos producidos vayan minimizándose a medio plazo. De entre todas estas medidas, tiene especial relevancia el seguimiento de la recuperación del medio y control de los parámetros ambientales, por ser la única herramienta utilizable para corroborar en el futuro la eficacia de las soluciones adoptadas. Su utilidad es manifiesta no sólo como instrumento de vigilancia, sino además como mecanismo de detección de impactos no previstos y de

impactos residuales, entendiendo como tales los resultantes tras la aplicación de las medidas correctoras y protectoras.

## Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Excmo. Ayuntamiento de Aracena por los medios aportados para la realización de este trabajo, así como a los revisores del original inicialmente enviado.

## Referencias

- Andrieux, C. 1988. Influence de l'homme sur l'environnement climatique souterrain. *Actes des Journées Félix Trombe, Moulis*, 1:96-122.
- Apalategui, O., Barranco, E., Contreras, F., Delgado, M., y Roldán, F.J. 1979. Mapa Geológico de España a escala 1:50000. Plan MAGNA. Hoja 917 (Aracena). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Cooks, J. and Otto, E. 1990. The weathering effects of the lichen *Lecidea Aff Sarcogynoides (koerb.)* on *Magaliesberg quartzite*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 491-500.
- ASTM 1985. *Annual Book of ASTM Standard*. Part 31 Water. Ed. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- Crespo Blanc, A. 1991. *Evolución geotectónica del contacto entre la Zona de Ossa Morena y la Zona Surportuguesa en las Sierras de Aracena y Aroche (Macizo Ibérico Meridional)*: un contacto mayor en la Cadena Hercínica Europea. Tesis Doct. Univ. de Granada, 326 p.
- Del Val, J. y Hernández, M. 1989. El karst en el Macizo Hespérico. En: J.J. Durán y J. López Martínez (eds.). *El Karst en España*. Monografía 4, Sociedad Española de Geomorfología, Madrid, 217-229.
- Del Val, J., Durán, J.J., y Ramírez-Trillo, F. 1998. La Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). En: J.J. Durán y J. López Martínez (eds.). *Karst en Andalucía*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 183-187.
- Martín-Rosales, W., Rodríguez, C.M., López-Chicano, M., Pulido-Bosch, A. y Vallejos, A. 1994. Análisis de la influencia antrópica sobre la Gruta de las Maravillas, Aracena, España. Resultados preliminares. En: J.R. Fagundo, A. Pulido Bosch, J.E. Rodríguez e I. Morell (eds.). *El karst y los acuíferos kársticos*. Ejemplos y métodos de estudio. Cuba, 375 p.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez, C.M. y Pulido-Bosch, A. 1995. Morfología, espeleotemas y climatología de la Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva). *Espeleotemas*, 5:1-12.
- Martín-Rosales, W., Pulido-Bosch, A., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C.M. y Vallejos, A. 1996. Principales impactos antrópicos en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). *Geogaceta*, 20 (5): 1162-1164.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., Calaforra, J.M., Gómez-Jiménez, I. y

- Rodríguez-Navarro, C.M. 1999. Explotación turística y conservación de la Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva). *XII Jornadas del Patrimonio de la Comarca de la Sierra*. Aracena (Huelva), 655-662.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., y Cerón, J.C. 2002. Experiencias de conservación en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). En: F. Carrasco, J.J. Durán y B. Andreo (eds.). *Karst and environment*, Málaga, 539-545.
- Moses, C., Spate A.P., Smith D.I. y Greenaway A. 1995. Limestone weathering in eastern Australia. Part 2. Surface micromorphology study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 501-514.
- Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M. y Vallejos, A. 1997. Human impacts in a touristic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31 (3/4): 142-149.
- Ruiz, J., Marín, F., Ojeda, F., Marín, F., Berros, J., y Marín, E. 1991. Estudio macroscópico "in situ" y microscópico de algas verdes y verdeazuladas del interior de la cueva de Nerja. En: F. Carrasco y F. Marín (eds), *Investigación biológica y edafológica de la cueva de Nerja (Málaga)*. Málaga, 113-117.
- Viles, H. (1987). Blue-green algae and terrestrial limestone weathering on Aldabra Atoll: an SEM and light microscope study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 319-330.

Recibido: Enero 2003  
Aceptado: Junio 2003