

# Estudios geomicrobiológicos en la cueva de Altamira (Cantabria, N España)

J.C. Cañaveras<sup>(1)</sup>, S. Sánchez-Moral<sup>(2)</sup>, J. Bedoya<sup>(2)</sup>, V. Soler<sup>(3)</sup> y J. Lario<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. CC. de la Tierra y del Medio Ambiente. Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada CSIC-UA, Universidad de Alicante, Apdo. 99. 03080 Alicante

<sup>(2)</sup> Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC). José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid

<sup>(3)</sup> Instituto de Productos Naturales y Agrobiología (CSIC). La Laguna, Tenerife

<sup>(4)</sup> Dpto. Ingeniería Geológica y Minera. Facultad de Ciencias del Medio Ambiente. Universidad de Castilla-La Mancha. 45071 Toledo

## RESUMEN

La colonización biológica es uno de los grandes problemas de conservación de representaciones artísticas en ambientes hipogeos. Un aspecto fundamental para los estudios de conservación en la Cueva de Altamira ha sido, pues, la identificación y cuantificación de las poblaciones microbiológicas presentes en la cueva, así como la valoración de su interacción con el soporte (pinturas, espeleotemas, etc.) y con las aguas de infiltración. Los estudios geomicrobiológicos han puesto de manifiesto que las comunidades microbiológicas que colonizan la roca soporte de la Cueva de Altamira ven favorecido su desarrollo bajo condiciones de alta humedad y CO<sub>2</sub> ambiental. Asimismo, se ha comprobado que la actividad metabólica de las colonias de microorganismos presentes en la cavidad causan la desintegración parcial o total de la superficie del sustrato (roca encajante, espeleotemas o pigmentos) y genera precipitados químicos que cubren o deterioran el sustrato, incluidas las pinturas. Su crecimiento y desarrollo viene generado y/o favorecido por el aporte de materia orgánica disuelta en las aguas de infiltración así como por su introducción en el sistema por efecto de las visitas. Un ejemplo de la acción de los microorganismos consiste en el desarrollo de encostramientos y depósitos tipo moonmilk constituidos por cristales de hidromagnesita, calcita y aragonito. Cálculos geoquímicos basados en datos microclimáticos e hidroquímicos han permitido establecer un origen bioinducido de estos precipitados.

**Palabras clave:** biodeterioro, Cueva de Altamira, geomicrobiología, microclima, moonmilk

## ABSTRACT

Microbial colonization is one of the main problems in the conservation tasks of prehistoric art. Therefore, a key factor in the conservation studies in Altamira Cave was the identification and quantification of microbial populations in the cave, as well as the assessment of their interaction with substrata (rock paintings, speleothems, etc) and infiltration waters. Geomicrobiological studies revealed that the growth of microbial communities is favored under hypogean environment (high RH and air CO<sub>2</sub> content). Likewise, the partial or total destruction of substratum surface (hostrock, speleothems, pigments) as well as the development of chemical precipitates by microbial activity was also revealed. Microbial growth is favored by organic matter dissolved in infiltration waters and by visitors influence. An example of microbial action in Altamira Cave is the formation of carbonate (calcite, aragonite, hydromagnesite) coatings and moonmilk deposits. Geochemical calculation, based on microclimate and hydrochemical data, allowed us to establish a bio-mediated origin for these precipitates.

**Key words:** Altamira cave, biodegradation, geomicrobiology, microclimate, moonmilk

## 1. INTRODUCCIÓN

En comparación con otros tipos de ambientes, hay relativamente pocos estudios que traten de la geomicrobiología de ambientes hipogeos (Danielli y Edington, 1983; Jones, 1995; Cunningham *et al.*, 1995; Northup *et al.*, 1997; Northup y Lavoie, 2001). Los microorganismos son, a menudo, agentes dañinos para representaciones artísticas (e.g.: pinturas rupestres), ya que están relacionados tanto con procesos constructivos (precipitación mineral) como destructivos (disolución) que afectan a diferentes sustratos (encajante, espeleotemas, pigmen-

tos,...) (Monte y Ferrari, 1993; Dornieden *et al.*, 2000; Cañaveras *et al.*, 2001). Por este motivo, los estudios geomicrobiológicos, enmarcados en estudios multidisciplinares (geología, microclima, hidroquímica,...etc), son necesarios para establecer el papel que juegan los microorganismos en las interacciones mineral-microbio en ambientes hipogeos, así como para elaborar medidas de gestión adecuadas para la conservación de cuevas turísticas. En este artículo se exponen los resultados más relevantes de los estudios geomicrobiológicos que se han llevado a cabo durante los últimos años en la Cueva de Altamira (N España).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. La Cueva de Altamira

La Cueva de Altamira se sitúa en el norte de la Península Ibérica (fig. 1), y se encuentra en la zona superior de un pequeño cerro calcáreo (158 ms.n.m.) correspondiente a calcarenitas parcialmente dolomitizadas de edad Albiense. Esta cueva pertenece a la zona vadosa de un sistema kárstico tabular, poligénico y senil de edad Pliocena, cuyas cavidades superiores (Altamira) se encuentran muy próximas a la superficie, siendo su alimentación hídrica por infiltración directa de agua de lluvia a través de fracturas y fisuras. Esta cueva es famosa por poseer una valiosa colección de pinturas y grabados paleolíticos, en especial los situados en el techo de la Sala de Polícromos, los cuales han sido calificados como la Capilla Sixtina del arte cuaternario. Esta pequeña sala tiene un volumen de unos 326m<sup>3</sup>, con una superficie interna de 150m<sup>2</sup> y una altura media de 2,4m (ver fig. 1).

Las óptimas y excepcionales condiciones de preservación de las pinturas de la Sala de Polícromos, inmediatamente después de su descubrimiento, se debieron principalmente a la confluencia de dos condicionantes

muy favorables. Por un lado, la baja tasa de infiltración de agua a través de los estratos calcáreos que separan la Sala de los Polícromos y la superficie exterior, y por otro, al mantenimiento de unas condiciones microclimáticas estables desde el cierre natural de la cueva hasta su descubrimiento.

Desde el descubrimiento a finales del siglo XIX, la cueva de Altamira se ha visto sometida a un alto régimen de visitas. La masiva afluencia de visitantes, que superaban frecuentemente la cifra de 100.000 por año, especialmente durante los años 50, 60 y principios de los setenta provocaron la alteración de las condiciones microambientales naturales y con ello un alto deterioro de las pinturas paleolíticas, lo que llevó a su cierre en 1977. Tras una serie de estudios microclimáticos a principios de los años 80, la cueva fue nuevamente abierta al público en 1982 con un régimen de visitas restringido (9440 visitantes por año) y unas medidas de control que actualmente siguen en vigor. Los estudios y observaciones posteriores (Hoyos 1993; Cañaveras *et al.*, 1999, Sánchez-Moral *et al.* 1999) han puesto de manifiesto la necesidad de revisar los criterios empleados para la definición del régimen de visitas actual ya que los procesos de deterioro seguían en progreso.

### 2.2. Caracterización del soporte y precipitados

La caracterización mineralógica del soporte, espeleotemas (moonmilk, coraloides, frostworks y costras) y pigmentos se ha llevado a cabo principalmente mediante difracción de rayos X. La caracterización petrográfica de los mismos se ha realizado mediante microscopía óptica convencional y microscopía electrónica de barrido (MEB). Análisis geoquímicos semicuantitativos de todas las muestras se han obtenido mediante EDS. Especial cuidado se ha tenido durante el muestreo y preparación de las muestras de MEB. Para evitar la formación de artefactos, las muestras fueron fijadas in situ con glutaraldehído, y en laboratorio, deshidratadas y secadas gradualmente.

### 2.3. Hidroquímica

La temperatura, conductividad eléctrica y pH de las muestras de agua fueron medidos in situ, así como los contenidos en CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> mediante técnicas de valoración estándar. Posteriormente, en laboratorio (Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC) se realizaron análisis químicos completos mediante absorción atómica y electroforesis (QUANTA 4000). Los cálculos geoquímicos y de especiación se obtuvieron usando el código PHRQPITZ (versión 0.2, 1990).

### 2.4. Microclima

Mediante el diseño e instalación de un sistema de medi-

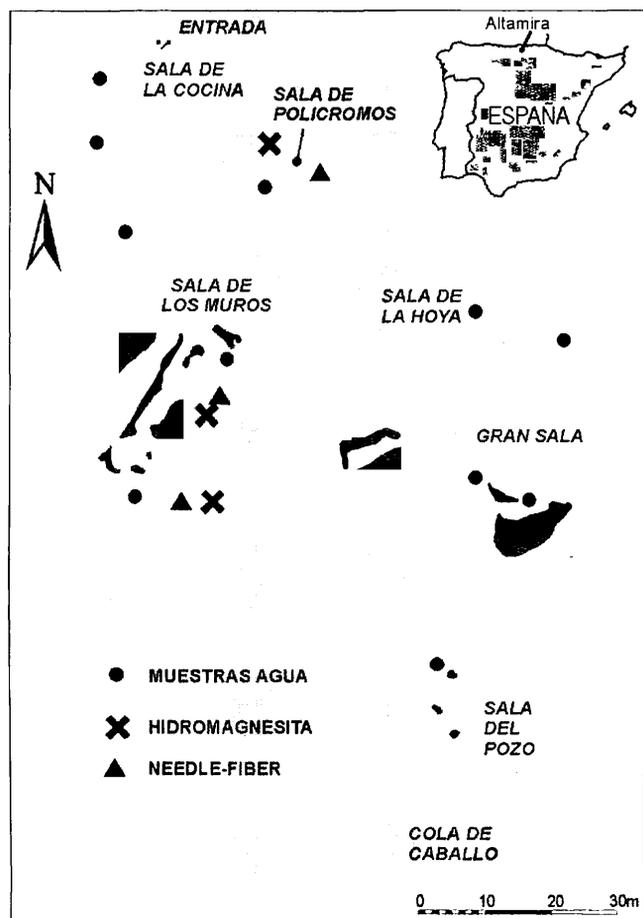


Fig. 1. Plano de la Cueva de Altamira con localización de los puntos de agua y de los depósitos tipo "moonmilk" muestreados

das de parámetros microambientales, innovador, de amplio espectro y alta resolución (Soler *et al.*, 1999) se ha podido llevar a cabo un estudio microclimático de la cavidad, recogiendo automáticamente datos de temperatura (aire, roca), CO<sub>2</sub>, radón y humedad (relativa y absoluta).

### 2.5. Estudios microbiológicos

La identificación y cuantificación de las poblaciones microbiológicas presentes en la cueva se ha realizado mediante el aislamiento y cultivo con técnicas estándar (ver Groth *et al.*, 1999; Laiz *et al.*, 1999) de las diferentes muestras tomadas. La caracterización de las sales formadas en los cultivos realizados a tal efecto se realizó mediante DRX y MEB (EDS).

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterización del soporte

La Cueva de Altamira se desarrolló sobre calizas fosilíferas (packstone-grainstones) parcialmente dolomitizadas de edad Cretácica, donde los componentes menores (3-10%) son terrígenos (cuarzo, feldespato, óxidos-hidróxidos de hierro (principalmente goetita) y arcillas (ilita, esmectita, caolinita). Los tipos de espeleotemas mayormente relacionados con las pinturas rupestres corresponden a depósitos tipo moonmilk, coraloides, frostwork y costras. La mineralogía de estos espeleotemas es mayoritariamente carbonato cálcico (aragonito y/o calcita), a excepción de algunos depósitos tipo moonmilk y costras que también pueden estar compuestos de hidromagnesita (Cañaveras *et al.*, 1999) (fig. 2A y B). Los pigmentos, generalmente rojos y negros, están constituidos por arcillas ricas en hierro, goetita, granos de carbonato y restos carbonosos.

### 3.2. Microclima

El sistema de adquisición de datos microambientales permite un seguimiento en continuo, detallado y de alta precisión de los parámetros estudiados (Soler *et al.*, 1999). La temperatura del aire en la zona interna de la cueva es muy homogénea con una amplitud térmica de 1.6°C, de los cuales un 15% es debido a la entrada de los visitantes. Se observa un fenómeno de inversión térmica respecto a la temperatura exterior (temperatura mínima a principios del verano) relacionado con la inercia térmica de la roca encajante del karst. Las máximas concentraciones de CO<sub>2</sub> en aire son próximas a las 6000 ppmv durante el invierno. Los valores más bajos de la concentración de CO<sub>2</sub> en aire de la cueva se producen durante la época estival coincidiendo con un período de estabilidad en la presión atmosférica, la etapa de valores mínimos en la concentración en <sup>222</sup>Rn y máximos en la

diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de la cueva. Los visitantes producen un incremento medio diario de 500 ppmv, hecho que, unido a los incrementos de temperatura y al mantenimiento de la humedad relativa del aire en la cueva próxima a la saturación durante todo el año favorece el desarrollo de los procesos de microcorrosión de la roca soporte de las pinturas (Sánchez-Moral *et al.*, 1999).

### 3.3. Hidrogeoquímica

Las aguas de infiltración son mayoritariamente del tipo Ca-HCO<sub>3</sub> con relativamente altas concentraciones de especies disueltas totales, con excepción de algunos goteos en la Sala de Polícromos donde son del tipo Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>, posiblemente en relación con la actividad microbiana (Cañaveras *et al.*, 1999). Los cálculos geoquímicos muestran que las aguas de infiltración presentan valores de Pco<sub>2</sub> mayores que los del aire. No obstante, muestras de agua en contacto con colonias microbianas en el techo de Polícromos proporcionan unos valores de Pco<sub>2</sub> menores que las aguas de goteo, incluso que los del aire, mostrando también una disminución en las relaciones Ca/Mg y en los contenidos en iones calcio y bicarbonato.

Otro aspecto a destacar en la hidroquímica de las aguas de Altamira es que durante décadas ha existido una explotación ganadera dentro del área de protección de la cueva de Altamira. Esta actividad ha dado lugar a la formación de un fango orgánico y altas tasas de CO<sub>2</sub> en la cobertera edáfica exterior. A partir del seguimiento estacional de las características geoquímicas del agua de infiltración, en 1996 se detectó la presencia de compuestos nitrogenados (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), altos contenidos en CO<sub>2</sub> disuelto, y materia orgánica disuelta y en suspensión (Hoyos, 1998).

### 3.4. Comunidades microbianas y biofilms

La colonización biológica de la cueva de Altamira decrece hacia zonas progresivamente más alejadas de la entrada, siendo relativamente intensa en las paredes y techo de la sala de la Cocina y de las galerías que comunican ésta con Polícromos y la sala de los Muros.

La colonización por organismos fototróficos es escasa, dada la ausencia de iluminación permanente en toda la cueva, aunque en antiguos puntos de luz quedan restos de una colonización más severa. Los microorganismos fototróficos más comúnmente identificados son cianobacterias calcificantes (*Scytonema julianum*, *Geitleria calcarea*, *Gloethece sp.*) y algunos géneros de diatomeas.

Dentro de las bacterias heterótrofas, los microorganismos

mos identificados mas abundantes corresponden al orden Actinomycetales, especialmente *Streptomyces* (Groth y Saiz-Jiménez, 1999; Groth *et al.*, 1999; Laiz *et al.*, 1999), tanto sobre el sustrato como en las aguas de infiltración. Cuando están sobre el soporte aparecen como colonias redondeadas (1-3mm de diámetro) de coloraciones blancas, amarillas o grises. Aunque estas colonias son detectables a simple vista, hay que destacar que la colonización orgánica está mucho mas extendida, y que en la mayor parte de las muestras de espeleotemas y pigmentos estudiados son abundantes los entramados de hifas y filamentos y los biofilms.

Como se acaba de mencionar, existen entramados de filamentos (generalmente de actinomicetos) y biofilms masivos (aspecto musoco o gelatinoso) que cubren la superficie de los minerales de las muestras observadas al MEB. Estos entramados son especialmente abundantes en costras y depósitos tipo moonmilk, especialmente los compuestos de cristales aciculares (needle-fiber) de calcita y/o aragonito (Cañaveras *et al.*, 1999).

En los cultivos de laboratorio de colonias de actinomicetos se han precipitado agregados cristalinos de fases carbonáticas metaestables (e.g.: vaterita), tanto en medio líquido como en medio sólido (agar). La vaterita en un polimorfo metaestable de  $\text{CaCO}_3$ , raramente encontrado en la naturaleza (e.g: Giralt *et al.*, 2001; Falini *et al.*, 1996; Friedman y Schultz, 1994), aunque si

comúnmente sintetizado en laboratorio a partir de soluciones fuertemente sobresaturadas (Plummer y Busenberg, 1982), en medios orgánicos (Falini, 2000), en cultivos microbiológicos (Groth *et al.*, 2001) o mediante técnicas de electroprecipitación (Gabrielli *et al.*, 1999). La mayoría de los cristales sintetizados por estos métodos, al igual que en nuestros cultivos, presentan una morfología típica globular o esférica, con unos diámetros que no suelen sobrepasar la centena de micras. Cuerpos globulares de estas características han sido comúnmente identificados en las muestras del techo de Polícromos de Altamira, asociadas con biofilms filamentosos de actinomicetos y otros microorganismos, generalmente cercanos al sustrato.

### 3.5. Fábricas asociadas con la actividad microbiológica

Las colonias microbianas son capaces de producir, directa o indirectamente, una gran variedad de procesos constructivos (atrapado y ligado de partículas, biomineralización, precipitación bioinducida, etc.) y/o destructivos (disolución, desagregación, etc.) que dan como resultado la formación de una serie de fábricas. En la Cueva de Altamira se han reconocido las siguientes fábricas constructivas (Cañaveras *et al.*, 2001): (i) microorganismos calcificados, dentro de los que se incluyen filamentos y células cocoides total o parcialmente encastradas o cubiertas por cristales de carbonato

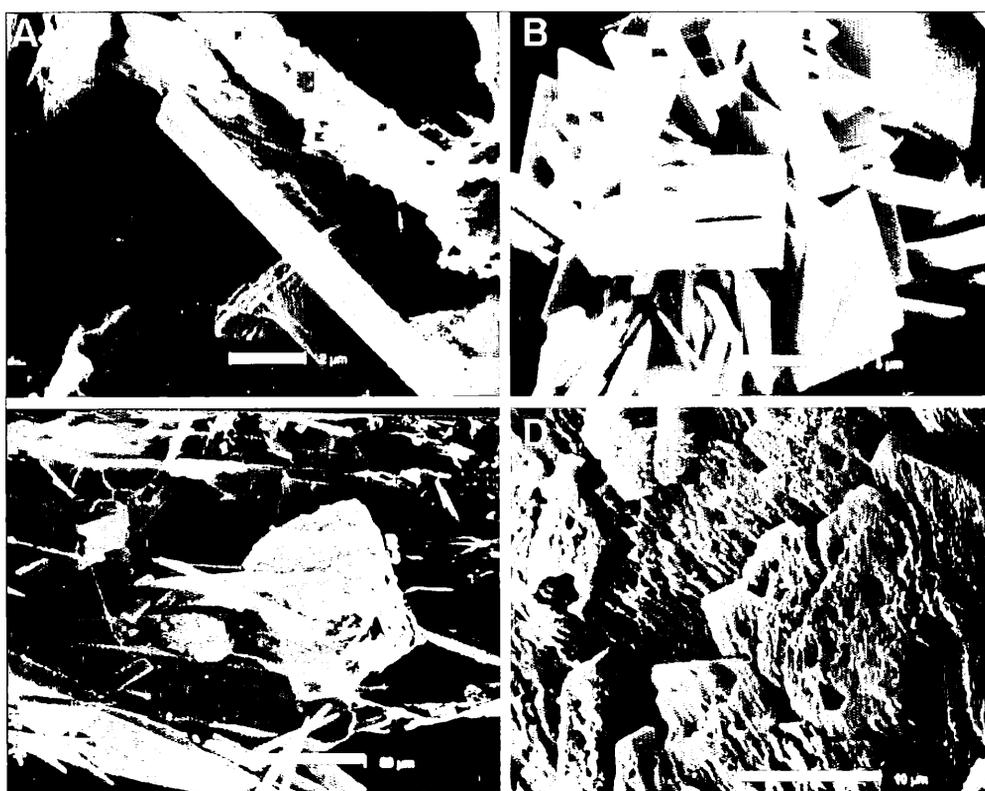


Figura 2. A) Detalle de fibrillas (needle-fiber crystals) de aragonito correspondientes a un depósito de moonmilk. Pasillo a Sala de los Muros. (barra escala: 2 $\mu\text{m}$ ). B) Detalle de cristales de hidromagnesita. Moonmilk Sala de Polícromos. (barra escala: 5 $\mu\text{m}$ ). C) Fábricas constructivas. Agregado cristalino calcítico creciendo sobre cristales aciculares de aragonito. Frostwork, pasillo a Sala de los Muros. (barra escala: 50 $\mu\text{m}$ ). D) Fábricas destructivas. Microperforaciones sobre cristales de calcita. Sala de Polícromos. (barra escala: 10 $\mu\text{m}$ )

(fig. 2C); (ii) precipitados cristalinos, como fibrillas (needle-fiber) de calcita y aragonito derivadas de la calcificación de hifas de hongos, que constituyen gran parte de los entramados de cristales que conforman los moonmilk tipo needle-fiber (Cañaveras *et al.*, 1999); cristales de carbonato magnésico (principalmente hidromagnesita) que se asocian también a depósitos tipo moonmilk; y agregados en roseta o nido, compuestos de cristales euhedrales de calcita; y (iii) miniestromatolitos formados por entramados de filamentos que engloban fragmentos del substrato (roca encajante, pigmentos, espeleotemas) y restos orgánicos. Con respecto a las fábricas destructivas (fig. 2C), se han reconocido fábricas tipo "etching", microperforaciones, "spiky calcite" (Folk *et al.*, 1985) y "blocky calcite" (Jones, 1987); aunque su discriminación con respecto a fábricas de microcorrosión puramente inorgánica no es siempre fácil (Sánchez-Moral *et al.*, 1999).

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las condiciones ambientales hipogeas de alta humedad, temperatura relativamente baja y estable, junto con unas aguas con un pH cercano a 7 y con materia orgánica disuelta, parecen favorecer la colonización y proliferación de microorganismos en la cueva de Altamira, especialmente de bacterias heterótrofas tipo actinomiceto.

La interacción entre microorganismos y substrato depende, entre otros factores, de las características del substrato (mineralogía, tamaño de grano, etc). Esto es especialmente relevante en el caso de los pigmentos, formados en gran parte por arcillas, dado el importante papel que pueden llegar a jugar las mismas en procesos de biomineralización (Schmittner y Giresse, 1999).

Como ya se apuntó en la introducción y se ha constatado con los resultados de los estudios microbiológicos en Altamira, la contaminación biológica es uno de los principales agentes responsables de degradación en pinturas rupestres. Los daños que la colonización biológica ejerce sobre las pinturas rupestres pueden ser varios: (i) cubriéndolas, ya sean las mismas microcolonias, o los precipitados orgánicos e inorgánicos provocados por su actividad; (ii) alterándolas químicamente (disolución); y (iii) alterándolas físicamente (rotura y escamado del substrato). Estas acciones de los microorganismos y biofilms asociados se traducen en una serie de fábricas (destructivas y constructivas) entre las que se han reconocido en Altamira: microorganismos calcificados, precipitados cristalinos (incluyendo algunos tipos de espeleotemas); miniestromatolitos y fábricas de microdisolución ("etching", "pits", "spiky calcite" y "blocky calcite"). Es de destacar la capacidad de los microorganismos y biofilms asociados de generar 'biocostrucciones', aspecto este ya contrastado en otros ambientes exógenos (Pedley, 1992); en especial cuando la actividad microbiana es capaz de mediar y controlar

la nucleación y el crecimiento cristalino. Un caso claro de esto, reconocido en Altamira, es la influencia biológica en la formación de algunos depósitos tipo moonmilk, como son los formados por cristales tipo "needle-fiber" (Verrecchia y Verrecchia, 1994; Cañaveras *et al.*, 1999; Loisy *et al.*, 1999) o por placas de hidromagnesita (Cañaveras *et al.*, 1999). Las costras de hidromagnesita que se encuentran en el techo de Polícromos también están relacionadas con un origen orgánico, dado que los cálculos geoquímicos basados en la composición de las aguas (goteo y condensación) de Polícromos, junto con los datos microclimáticos de la cavidad, niegan la posibilidad de una precipitación inorgánica para este tipo de carbonato magnésico. La actividad de los microorganismos (principalmente actinomicetos) reconocidos en este tipo de depósitos son capaces de crear y mantener una condiciones microambientales locales (de mayor alcalinidad y baja  $P_{CO_2}$ ) que permiten la precipitación de hidromagnesita (Cañaveras *et al.*, 1999).

Asimismo, en referencia a los cuerpos globulares de  $CaCO_3$  comúnmente reconocidos en las muestras estudiadas, existen una serie de factores que pueden sugerir un origen bioinducido en relación con bacterias heterótrofas: (i) su semejanza con partículas de vaterita sintetizadas en laboratorio a partir de cultivos de microorganismos aislados de las paredes de la cavidad; (ii) las evidencias, basadas en datos y cálculos hidrogeoquímicos, microclimáticos y petrológicos, de que estos microorganismos consumen pequeñas cantidades de  $CO_2$ ; esto explica que las aguas en contacto con los microcolonias tengan una  $P_{CO_2}$  menor que la del aire en contacto y que se generen unos microambientes fuertemente sobresaturados donde fases metaestables como la vaterita puedan generarse.

#### Agradecimientos

Dedicado a M. Hoyos y a su incalculable conocimiento en estos temas. Es una contribución al IGCP-448 y a la INQUA Commission on Carbon. Agradecemos a J.A. Lasheras, Director del Centro de Investigación y Museo de Altamira la colaboración y facilidades prestadas para su realización.

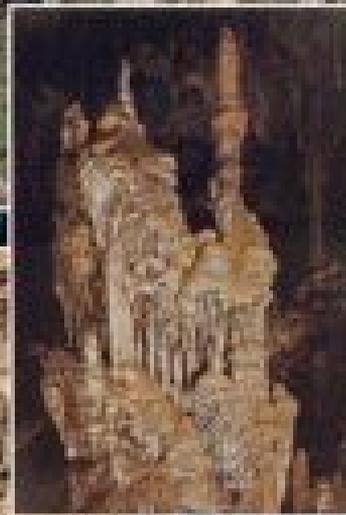
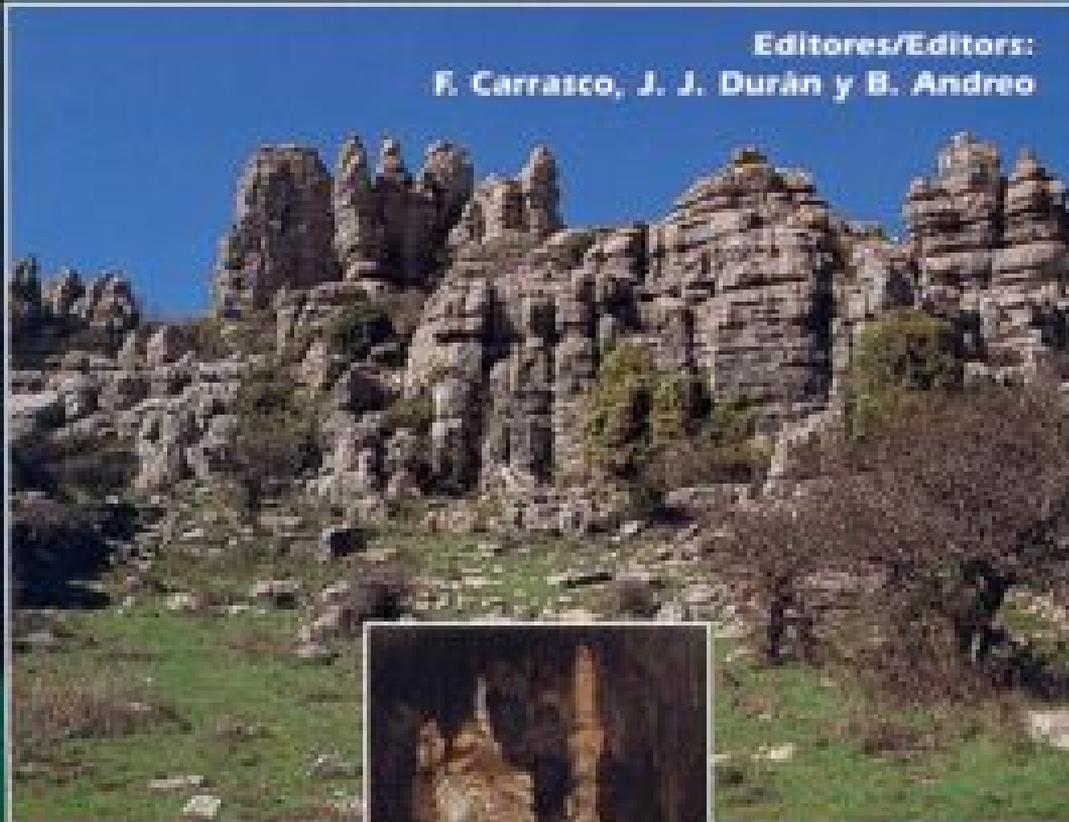
#### REFERENCIAS

- Cañaveras, J.C., Hoyos, M., Sánchez-Moral, S., Sanz-Rubio, E., Bedoya, J., Soler, V., Laiz, L., Groth, I., Schumann, P., González, I. y Saiz-Jiménez, C. (1999) Microbial communities associated to hydromagnesite and needle-fiber aragonite deposits in a karstic cave (Altamira, Spain). *Geomicrobiology Journal*, 16: 9-25.
- Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., Soler, V. y Saiz-Jiménez, C. (2001) Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls. *Geomicrobiology Journal*, 18: 223-240.

- Cunningham, K.I., Northup, D.E., Pollastro, R.M., Wright, W.G. y LaRock, E.J. (1995) Bacteria, fungi and biokarst in Lechugilla Cave, Carlsbad Caverns Nat. Park, New Mexico. *Environmental Geology*, 25:2-8.
- Danielli, H.M. y Edington, M.A. (1983) Bacterial calcification in limestone caves. *Geomicrobiology Journal*, 3:1-16.
- Dornieden, Th., Gorbushina, A.A. y Krumbein, W.E. (2000) Biodecay of cultural heritage as a spece/time-related ecological situation- an evaluation of a series of studies. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46: 261-270
- Falini, G. (2000) Crystallization of calcium carbonates in biologically inspired collagenous matrices. *International Journal Inorganic Materials*, 2: 455-461
- Falini, G., Albeck, S., Weiner, S. y Addadi, L. (1996) Control of aragonite or calcite polymorphism by mollusk shell macromolecules. *Science*, 271:67-69.
- Folk, R.L., Chafetz, H.S. y Tiezzi, P.A. (1985) Bizarre forms of depositional and diagenetical calcite in hot-spring travertines, central Italy. In: Schneidermann, N. y Harris, P.M. (Ed.): *Carbonate cements*. SEPM Special Publication, 36: 349-369.
- Friedman, G.M. y Schultz, D.J. (1994) Precipitation of vaterite (CaCO<sub>3</sub>) during oil field drilling. *Mineralogical Magazine*, 58:401-408.
- Gabrielli, C., Maurin, G., Poindessous, G. y Rosset, R. (1999) Nucleation and growth of calcium carbonate by an electrochemical scaling process. *Journal of Crystal Growth*, 200: 236-250.
- Giralt, S., Juliá, R. y Klerkx, J. (2001) Microbial biscuits of vaterite in Lake Issyk-Kul (Republic of Kyrgyzstan). *Journal of Sedimentary Research*, 71: 430-435.
- Groth, I. y Saiz-Jiménez, C. (1999) Actinomycetes in hypogean environments. *Geomicrobiology Journal*, 16: 1-8.
- Groth, I., Vettermann, R., Schuetze, B., Schumann, P. y Saiz-Jiménez, C. (1999) Actinomycetes in karstic caves of Northern Spain (Altamira and Tito Bustillo). *Journal of Microbiological Methods*, 36: 115-122.
- Groth, I., Schumann, P., Laiz, L., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C. y Saiz-Jimenez, C. (2001) Geomicrobiological study of the Grotta dei Cervi, Porto Badisco, Italy. *Geomicrobiology Journal*, 18: 241-258.
- Hoyos, M. (1993) Procesos de alteración de soporte y pintura en diferentes cuevas con arte rupestre del norte de España: Santimamiñe, Arenaza, Altamira y Llonín. En: Fortea, J. (Ed.): *La protección y conservación del arte rupestre paleolítico* [Mesa redonda hispano-francesa, Colombres-Asturias, 1991], Principado de Asturias: 51-74.
- Hoyos, M. (1998) *Informe sobre la procedencia de contaminantes de origen orgánico en las aguas del interior de la cueva de Altamira y sus consecuencias*. Informe inédito al Museo y Centro de Investigación de Altamira. Dpto. Geología MNCN - CSIC. Madrid.
- Jones, B. (1987) The alteration of sparry calcite crystals in a vadose setting, Grand Cayman Island. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24: 2292-2304.
- Jones, B. (1995) Processes associated with microbial biofilms in the twilight zone of caves: examples from the Cayman Islands. *Journal of Sedimentary Research*, A65: 552-560.
- Laiz, L., Groth, I., González, I. y Saiz-Jimenez C. (1999) Microbiological study of the dripping waters in Altamira cave (Santillana del Mar, Spain). *Journal of Microbiological Methods*, 36:129-139.
- Loisy, C., Verrecchia, E.P. y Dufour P. (1999) Microbial origin for pedogenic micrite associated with a carbonate paleosol (Champagne, France). *Sedimentary Geology*, 126: 193-204.
- Monte, M. y Ferrari, R. (1993) Biodeterioration in subterranean environments. *Aerobiologia*, 9:141-148.
- Northup, D.E. y Lavoie, K.H. (2001) Geomicrobiology of caves: a review. *Geomicrobiology Journal*, 18: 199-222.
- Northup, D.E., Reysenbach, A. y Pace, N. (1997) Microorganisms and speleothems. In: Hill, C. y Forti, P. (Ed.): *Cave Minerals of the World*. NSS, Huntsville: 261-266.
- Pedley M. (1992) Freshwater (phytoherm) reefs: the role of biofilms and their bearing on marine reef cementation. *Sedimentary Geology*, 79: 255-274.
- Plummer, L.N. y Busenberg, E. (1982) The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model form the system CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 46: 1011-1040.
- Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Sanz-Rubio, E., Soler, V., Van Grieken, R. y Gysels, K. (1999) Inorganic deterioration affecting Altamira Cave. Quantitative approach to wall corrosion (solution etching) processes induced by visitors. *The Science of the Total Environment*, 243: 67-84.
- Schmittner, K-E. y Giresse, P. (1999) Micro-environmental controls on biomineralization: superficial processes of apatite and calcite precipitation in Quaternary soils, Rousillon, France. *Sedimentology*, 46: 463-476.
- Soler, V., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Sanz-Rubio, E., Lasheras, J.A. y Lario, J. (1999) Microenvironmental monitoring system at Altamira cave (northern Spain). *2nd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin*. París, France.
- Verrecchia, E.P. y Verrecchia, K.E. (1994) Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. *Journal of Sedimentary Research*, A64:650-664.

# Karst and Environment

Editores/Editors:  
F. Carrasco, J. J. Durán y B. Andreo



Nerja, Málaga, 2002