

# CUEVATUR 2016

## VI CONGRESO ESPAÑOL SOBRE CUEVAS TURÍSTICAS

*El karst y el hombre:  
Las cuevas como Patrimonio Mundial*

CONVOCA



ORGANIZA



Editores:  
Bartolomé Andreo Navarro  
Juan José Durán Valsero



# **El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial**

B. Andreo y J. J. Durán (Editores)

Nerja (Málaga), 2016

Trabajos del Sexto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas,  
celebrado en Nerja (Málaga), en septiembre/octubre de 2016

El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial / B. Andreo y J. J. Durán, eds. - Nerja (Málaga): Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), 2016.

528 pags.; 24 cm.

ISBN: 978-84-617-4702-3

Portada:

Columna de la Sala del Cataclismo (Cueva de Nerja). Foto de Mariano Ibáñez.

Contraportada:

Goteo de agua de infiltración en la Cueva de Nerja. Foto de Mariano Ibáñez.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier otro sistema de almacenar información sin el previo permiso escrito del autor o editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

© Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE)

Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID

ISBN: 978-84-617-4702-3

Depósito Legal: MA 995-2016

---

Imprime: Imprenta Luque, S.L. - [www.imprentaluque.es](http://www.imprentaluque.es)

Impreso en papel ecológico

# Comité Organizador

## Coordinador:

- **Manuel Durán Hidalgo**, *Presidente de la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE)*

## Vocales:

- **Ángel Ruiz Ruiz**, *Gerente de la Fundación Cueva de Nerja*
- **Rafael Pagés Rodríguez**, *Vicepresidente de ACTE*
- **Ovidio Altable Argüelles**, *Secretario de ACTE*
- **Pedro Agustín Robledo Ardila**, *IGME*
- **Luis Efrén Fernández Rodríguez**, *Conservador-Arqueólogo de la Cueva de Nerja*
- **Cristina Liñán Baena**, *Técnica geóloga, Fundación Cueva de Nerja*
- **Yolanda Rosal Padial**, *Técnica bióloga, Fundación Cueva de Nerja*





## Comité Científico

### Coordinador:

- **Bartolomé Andreo Navarro**, *Universidad de Málaga*

### Vocales:

- **Ana María Alonso Zarza**, *Universidad Complutense-CSIC, Instituto de Geociencias*
- **José Miguel Andreu Rodes**, *Universidad de Alicante*
- **Arancha Aramburu Artano**, *Universidad del País Vasco*
- **José Benavente Herrera**, *Universidad de Granada*
- **José María Calaforra Chordi**, *Universidad de Almería*
- **Juan Carlos Cañaveras Jiménez**, *Universidad de Alicante*
- **Francisco Carrasco Cantos**, *Universidad de Málaga*
- **Hipólito Collado Giraldo**, *Consejería de Cultura de la Junta de Extremadura*
- **Manuel Corrales Aguilar**, *Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía*
- **José Antonio Crispim**, *Universidad de Lisboa*
- **Juan José Durán Valsero**, *Instituto Geológico y Minero de España*
- **Luis Efrén Fernández**, *Museo de Nerja*
- **Ángel Fernández Cortés**, *Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC)*
- **Joaquín Ginés Gracia**, *Universitat de les Illes Balears*
- **Antonio González Ramón**, *Instituto Geológico y Minero de España*
- **Mariona Hernández Mariné**, *Universidad de Barcelona*
- **Concepción Jiménez de Cisneros**, *Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC)*
- **Montserrat Jiménez Sánchez**, *Universidad de Oviedo*
- **Valme Jurado Lobo**, *Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (CSIC)*
- **Cristina Liñán Baena**, *Fundación Cueva de Nerja y Universidad de Málaga*
- **Jerónimo López Martínez**, *Universidad Autónoma de Madrid*
- **Wenceslao Martín Rosales**, *Universidad de Granada*
- **Roberto Ontañón Peredo**, *Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de Cantabria - Museo de Prehistoria y Arqueología y de las Cuevas Prehistóricas de Cantabria*
- **Arturo Pérez Plaza**, *Conservador del Patrimonio Histórico de la Junta de Andalucía*
- **Joaquín Rodríguez Vidal**, *Universidad de Huelva*

- **Mónica Roldán Molina**, *Universidad Autónoma de Barcelona*
- **Yolanda del Rosal Padial**, *Fundación Cueva de Nerja*
- **Ángel Ruíz Ruíz**, *Fundación Cueva de Nerja*
- **Cesáreo Sáiz Jiménez**, *Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (CSIC)*
- **Sergio Sánchez Moral**, *Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC)*
- **Carlos Sánchez de las Heras**, *Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía*
- **José Luis Sanchidrián Torti**, *Universidad de Córdoba*
- **Albert Soler Gil**, *Universidad de Barcelona*
- **Alberto Tinaut Ranera**, *Universidad de Granada*
- **Iñaki Vadillo Pérez**, *Universidad de Málaga*



## Índice

N Jorge. El Turismo Subterráneo en Portugal . . . . .	13
H. Rodrigues de Araujo, M. L. Estêvão-Rodrigues e H. Augusto Santos-Lobo. Grutas turísticas de Portugal: análise da legitimidade e aplicabilidade dos instrumentos jurídicos do Estado . . . . .	21
F. M. Mesa· A. J. Pérez y P. Oromí. La Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife). Recopilatorio de su catálogo faunístico y subfósil . . . . .	35
A. Lainez Concepción. Las Cuevas Turísticas en las Islas Canarias, su importancia y distribución.	49
A.M. Alonso-Zarza, A. Martín-Pérez, R. Martín-García, I. Gil-Peña, P. Muñoz-Barco, E. Martínez-Flores y A.I. Casado. La Cueva de Castañar y su Centro de interpretación . . . . .	61
F. Álvarez-Gómez, Y. del Rosal, R. Guzmán, S. Mohamed, S. Merino, M. Hernández-Mariné, N. Korbee y F.L. Figueroa. Selección de sistemas de iluminación LEDs en Cuevas basado en los espectros de acción de la fotosíntesis: reducción del biodeterioro de espeleotemas por biofilms de algas y cianobacterias. . . . .	71
R. Guzmán Sepúlveda, S. Mohamed Mohamed, F. López Figueroa, M. Hernández Mariné, F. Álvarez Gómez, Y. del Rosa Padial, C. Liñán Baena, S. Merino Córdoba, F. Guzmán Navarro y M. Trillo López. Iluminación y adecuación de la zona peatonal de la Cueva de Nerja. . . . .	81
C. Liñán Baena, Y. del Rosal Padial, L.E. Fernández Rodríguez, A. Atencia Prieto, D. Jimena Fernández y A. Ortega Jiménez. Trabajos de investigación y conservación en Cueva Pintada (Nerja, Málaga) . . . . .	91
Y. del Rosal Padial, V. Jurado Lobo, M. Hernández Mariné, M. Roldán Molina y C. Sáiz Jiménez. Biofilms en cuevas turísticas: la Cueva de Nerja y la Cueva del Tesoro . . . . .	103
I. Ayuso y J.M. Calaforra. Balizamiento de bajo impacto en cavidades con actividad espeleológica . . . . .	115
A. Hernáiz Gómez, C.J. Tejedor Martínez, M.A. Gómez Marquina y R. Zangróniz Cantabrana. Sistema de gestión integral para cavidades turísticas . . . . .	129
I. Fuente-Merino, W. Martín-Rosales, L. Quindós-López, G. Alcaín-Martínez, M. D. Conejo-García, M. José González-Ríos, L. Santiago Quindós-Poncela y E. García-Cuenca. Contenido de Radón en aire en la Cueva de las Ventanas (Píñar, Granada) . . . . .	143
O. A. Dumitru, B. P. Onac, J. J. Fornós, C. Cosma(+), A. Ginés y J. Ginés. Evaluación de las concentraciones de radón y su variabilidad estacional en cuevas turísticas de Mallorca. . . . .	157
M. P. Dorado, F. J. Fernández y R. Pagés. Extremadura Subterránea: el potencial turístico de su espeleodiversidad . . . . .	169
A. Ros Vivancos, J. L. Llamusí Latorre, J. Sánchez Ortega, F. Gázquez Sánchez y J. M. Calaforra Chordi. Hypogenic morphology APP: Una aplicación libre para la identificación de cuevas hipogénicas. . . . .	181
I. Álvarez González, J. Moreno García, A. Aranburu Artano, M. Arriolabengoa Zubizarreta, M. del Val Blanco, P. Bilbao Lasa, I. Yusta Arnal, y E. Iriarte Avilés. Topografía 3D y análisis geológico de la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista (Bizkaia, España) . . . . .	191

R. Giménez Portero y L. Ezquerro Ruiz. Aspectos geológicos y morfológicos de la cueva de las Güixas (Villanúa, Huesca) . . . . .	205
F. J. Martínez-Moreno, W. Martín-Rosales, M. López-Chicano, J. Galindo-Zaldívar, R. Rodríguez-Durán, R. Hidalgo-Fernández y M. Guerra-González. Descubrimiento de una cavidad durante los trabajos de delimitación del Perímetro de Protección de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva) . . . . .	217
M. Meléndez Asensio, D. Ballesteros Posada, M. Jiménez-Sánchez, M. García-Díez y R. Obeso Amado. Caracterización geomorfológica preliminar de la Cueva La Covaciella (Asturias) . . . . .	231
L. Jordá-Bordehore. Aportación a la evaluación de la estabilidad de cuevas naturales mediante métodos empíricos y clasificaciones geomecánicas, primeros resultados . . . . .	243
L. Jordá-Bordehore, A. Riquelme, R. Tomás y M. Cano. Análisis estructural y geomecánico en zonas inaccesibles de cavernas naturales mediante técnicas fotogramétricas: aplicación en la entrada de la cueva de Artá (Mallorca) . . . . .	255
A. González-Ramón, C. Fernández-Leiva, A. Segura-Herrero, T. Sánchez-Díaz, A. Ignatenko, V. García-Benzal, P. Pérez-Martínez, R.D. Gea-López, J. Llamas-Sánchez e I. Quesada. Espeleogénesis por ácido sulfúrico en el SE de España. Caracterización preliminar de la Sima de Peñas Blancas (Lorca-Murcia) . . . . .	267
F. Gázquez, J. M. Calaforra, T. Rodríguez-Estrella, A. Ros, J. L. Llamusí y J. Sánchez. Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia) . . . . .	283
F. Gázquez, J.M. Calaforra, F. Rull, J. Medina, A. Ros, J. L. Llamusí y J. Sánchez. La Cueva del Orón-Arco (Cartagena, Región de Murcia): una cavidad costera con génesis y espeleotemas singulares . . . . .	295
S. Cuezva, A. Fernández-Cortés, V. Jurado, C. Saiz-Jimenez, R. Ontañón, P. Arias, I. Hernandez-Vicente y S. Sánchez-Moral. Investigación aplicada a la conservación preventiva del sistema kárstico de La Garma (Omoño, Ribamontán al Monte, Cantabria) . . . . .	307
J. Benavente Herrera, I. Vadillo Pérez, L. Ojeda Rodríguez, C. Liñán Baena, Y. del Rosal Padial y F. Carrasco Cantos. Cuantificación preliminar de los flujos de CO <sub>2</sub> en la Cueva de Nerja (Málaga). . . . .	319
I. Vadillo Pérez, L. Ojeda Rodríguez, J. Benavente Herrera, C. Liñán Baena, F. Carrasco Cantos e Y. del Rosal Padial. Datación del CO <sub>2</sub> mediante <sup>14</sup> C del aire de la zona no saturada en la parcela experimental de la Cueva de Nerja (Andalucía, Málaga) . . . . .	327
C. Liñán Baena y Y. del Rosal Padial. Procesos de ventilación natural Cueva de Nerja - Cueva Pintada (Nerja, Málaga). . . . .	335
G. Carrasco-Huertas, F.J. Fortes-Román· C. Liñán-Baena, F. Carrasco Cantos y J. Laserna. Estudio de las alteraciones del soporte rocoso y de los espeleotemas de la Cueva de Nerja (Málaga) mediante tecnología LIBS. . . . .	347
A. González-Ramón, C. Jiménez de Cisneros, A. Arribas-Herrera, J. J. Durán-Valsero, P. A. Robledo-Ardila· A. Segura-Herrero, T. Fernández-Díaz y P. Pérez-Martínez. Variabilidad paleoclimática a partir de un registro espeleotémico pleistoceno (Sierra de El Mencal, sur de España). Resultados preliminares . . . . .	361

C. Jiménez de Cisneros, A. González-Ramón, B. Andreo, A. Segura y T. Sánchez-Díaz. La Sima del Saliente: reconstrucción paleoclimática mediante registro isotópico en coladas espeleotémicas (Sierra del Saliente, Almería, Sur de España) . . . . .	371
P.A. Robledo Ardila, J. J. Durán Valsero y Hai Cheng. Deducciones paleoclimáticas a partir del estudio de una estalagmita en el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep, La Vall d'Uixó, Castellón, España . . . . .	383
R. Jordá-Bordehore, L. Navas-Guzmán, L. Jordá-Bordehore, P. L. Romero-Crespo, y J.J. Durán-Valsero. Turismo subterráneo en Ecuador . . . . .	395
V. Otero-Collazo, A. González-Ramón, J. J. Valdés-Ramos, J. M. Pajón-Morejón, M. Alons-Martínez, O. Chávez-Bonor, M. Sluka, G. García-Pulpeiro y A. Pou-Royo Aspectos geomorfológicos del sistema cavernario Majaguas-Cantera. Campañas de exploración y topografía 2012-2016 (Pinar del Río, Cuba occidental). . . . .	407
J. A. Domínguez Sánchez, R. Morales García, L. Vega Martín, J. J. Durán Valsero, L. Rodríguez Hernández, M. Fernández Mejuto y J. A. Hernández Bravo. Un recorrido por el patrimonio hidrogeológico de Alicante. Las formaciones kársticas y su potencial turístico . . . . .	423
R. Morales García, J.A. Domínguez Sánchez, J.J. Durán Valsero, L. Vega Martín, L. Rodríguez Hernández, J.A. Hernández Bravo y M. Fernández Mejuto. Génesis de los enclaves kársticos de mayor interés patrimonial de Alicante. Una aproximación para su geoconservación y aprovechamiento sostenible . . . . .	437
L. Garai Urteaga, B. Abarategi Badiola, M. Zumalde Kortabarria e I. Altube Egaña. Geoizkorri: Iniciativa geoturística para la valorización del patrimonio geológico del Macizo de Aizkorri-Aratz (Guipúzcoa) . . . . .	451
F.J. Fernández Amo y R. Pagés Rodríguez. Las Minas de Burguillos del Cerro: Turismo subterráneo y patrimonio geominero. . . . .	461
R.M. Ruiz-Márquez, R. Moreno-Jimenez, J.L. Sanchidrián-Torti, M.A. Medina-Alcaide, Y. del Rosal-Padial, C. Liñán-Baena, J.M. Cobos-Pastor, C. Molina-Crespo, J.A. Peña-Villaverde y A. Torres-Riesgo. La Cueva de El Morrón (Torres, Jaén): Medidas para su conservación, protección y puesta en valor. . . . .	471
F. Pavón López, E. González Caraballo y M. Ruiz Ortega. Para la pequeña historia. . . . .	483
J. Pereña Ortiz, C. Liñán Baena y Y. del Rosal Padial Proyecto de recuperación y adecuación del sendero de la Cueva de Nerja-Sierra Almirajara (Nerja, Málaga) . . . . .	489
J.L. Sanchidrián Torti, L.E. Fernández Rodríguez, M.A. Medina-Alcaide, R.M. Ruíz Márquez, J.M. Cobos Pastor y A.J. Torres Riesgo. Arqueología en el Proyecto de Conservación de Cueva de Nerja. . . . .	497
P. Turrero García, M.J. Domínguez Cuesta y M. Jiménez Sánchez. Inventario de cuevas con yacimientos arqueológicos en Asturias . . . . .	509
A. Martínez-Villa, P. Solares Villar y A. Alvarez Vena. Nuevos descubrimientos de arte paleolítico en cuevas de la comarca de Picos de Europa en Asturias (Benia de Onís). Recursos patrimoniales y geológicos para un turismo cultural y sostenible desde el Ecomuseo Centro de la Fauna Glacial de Avín (Onís, Asturias, España) . . . . .	515





## Presentación

Las cuevas en general y las turísticas en particular son elementos del medio físico que conforman un activo importante del patrimonio ambiental en el más amplio sentido (tanto natural como cultural), al tiempo que constituyen motores del desarrollo económico de los entornos donde se sitúan. España es un país muy relevante en este sentido. Destaca en el concierto internacional en lo relativo a cuevas consideradas patrimonio de la humanidad, sobre todo en lo relacionado con su contenido arqueológico y paleontológico. También ocupa un lugar destacado en las cifras de turistas del medio subterráneo, que suman cada año más de cinco millones de visitantes a su cincuentena de cuevas (y minas) turísticas. Obviamente, la repartición espacial de las cuevas está relacionada con las características geológicas del territorio, pero la elevada geodiversidad de las diferentes regiones españolas hace posible que todas las comunidades autónomas dispongan de una oferta de cavidades turísticas que permite a españoles y extranjeros conectar con las singularidades del medio subterráneo. España es un país donde las cuevas adquieren, desde hace décadas, una importancia creciente y fundamental, contribuyendo de forma notable a las economías locales, comarcales y, en algunas ocasiones, regionales.

En ese contexto, es evidente que la comunidad científica, técnica y de gestión relacionada con las cavidades ha de tener un foro donde presentar novedades e intercambiar experiencias. Ese foro es CUEVATUR, el congreso español sobre cuevas turísticas, que desde el año 2005 se ha organizado periódicamente en distintas ciudades españolas. Pese al carácter nacional de este foro, desde su inicio CUEVATUR posee una ambición internacional, pues en este congreso se presentan contribuciones de otros países, participan personas venidas del extranjero y se organizan talleres y otras actividades donde colaboran representantes de varios países, como ocurre en esta edición de CUEVATUR-2016, con Francia, Italia y Portugal.

En la edición de CUEVATUR correspondiente al año 2016, celebrada en la localidad de Nerja (Málaga), las comunicaciones revisadas y aceptadas por el Comité Científico han sido 45. Tratan sobre temas diversos relacionados con el medio kárstico.

Buena parte de las comunicaciones versan sobre aspectos relacionados estrictamente con las cuevas turísticas españolas, pero también de otros países (Portugal, Ecuador, Cuba). Entre las cuevas turísticas españolas que son objeto de comunicación se encuentran algunas de Asturias, Cantabria, Aragón, Comunidad Valenciana, Baleares, Extremadura, Andalucía y Canarias.

Los aspectos directamente relacionados con la conservación de las cuevas, como la iluminación, seguridad, alteración de las paredes y espeleotemas, ventilación, divulgación, museística, etc. se abordan en diversas comunicaciones, de gran interés para apoyo a la gestión. Otras están dedicadas a gases como el CO<sub>2</sub> y el Radón, por su interés a la hora de caracterizar los procesos de ventilación y la seguridad de los visitantes y trabajadores. También las cuestiones relativas a la estabilidad de los macizos rocosos en los que se desarrollan las cuevas son abordadas en varias contribuciones.

Otro grupo de comunicaciones se centra en la génesis y evolución de las cavidades, tanto de las que se desarrollan por karstificación gravitacional (clásica), como de otros procesos más singulares (hidrotermal y por ácido sulfúrico). Los depósitos de precipitación química (espeleotemas) que se producen en las cuevas son objeto de varias aportaciones, dado el interés que presentan las investigaciones geoquímicas para el estudio de las variaciones climáticas e hidrológicas del pasado, durante el tiempo que se produjo su depósito, pero también como indicadores de posibles cambios climáticos futuros.

El patrimonio cultural y arqueológico que atesoran las cuevas constituye el objeto de varias comunicaciones centradas en excavaciones de yacimientos actualmente en curso y también en hallazgos de arte parietal prehistórico de gran valor.

Las cuevas son manifestaciones naturales que están en un determinado contexto y, es un hecho cada vez más patente, la visita a cuevas se suele combinar con la visita a enclaves o áreas de gran interés ambiental, ampliando así la oferta para el turismo de naturaleza que está en claro avance. En este sentido, en la presente edición de Cuevatur se han presentado varias comunicaciones que, no tratando estrictamente sobre cuevas turísticas, sí plantean recursos alternativos o complementarios en ciertas áreas kársticas, de rica geodiversidad, como grandes exponentes del patrimonio geológico y natural.

En definitiva, este libro constituye una actualizada recopilación del elenco de temas de interés relacionados con las cuevas turísticas, que puede ser de gran utilidad a las administraciones y a los gestores del mundo subterráneo, sin olvidar a los investigadores y al público en general. Este libro ha sido posible gracias al trabajo de los autores, a la magnífica labor desinteresada de los revisores (miembros del comité científico), al apoyo de José Manuel Nieto López en el formateo unificado de las comunicaciones, y a las instituciones y entidades participantes en la organización.

Bartolomé Andreo Navarro  
Juan José Durán Valsero,  
Editores



## El Turismo subterráneo en Portugal

N. Jorge <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Director Grutas de Mira de Aire, SA. Av. Dr. Luciano Justo Ramos, 470. 2485-050 Mira de Aire (Portugal),  
geral@grutasmiradaire.com

---

### RESUMEN

El artículo 84º de la Constitución de la República de Portugal define las cavidades naturales como un bien público. En 2009 existían 16 cuevas turísticas en Portugal, cuatro de las cuales ya están cerradas al público. El mundo subterráneo siempre estuvo presente en el desarrollo de la especie humana, como un local espiritual, abrigo o local de explotación de sus necesidades. El hombre no solo ha vivido y decorado el interior de cuevas, sino que ha explotado el subsuelo desde tiempos inmemorables para sacar los minerales que le hacían falta. Con el pasar del tiempo, el hombre fue buscando estos lugares para escapar al estrés de las ciudades, como un retorno primordial a sus orígenes, al campo, a la naturaleza y al subsuelo. Tras el ejemplo de otros países, Portugal no fue excepción y empezó a abrir al público su patrimonio geológico después de los años 50. Hoy, a las 12 cuevas abiertas al público se añaden cerca de 121 lugares de interés geológico, entre minas, museos y canteras. De las cuevas turísticas, incluidas en un Rutero de Minas y Puntos de Interés Minero y Geológico, a la posibilidad de una red de puntos de interés geológico, el turismo subterráneo está en creciente desarrollo y el futuro parece sonreír aquellos que buscan las maravillas del mundo Subterráneo.

**Palabras clave:** cuevas turísticas, espeleoturismo, minas turísticas, patrimonio geológico.

## *The underground tourism in Portugal*

### ABSTRACT

*The 84th article of the Portuguese Constitution of the Republic defines natural cavities as a public asset. In 2009 there were 16 show caves in Portugal; four of those are already closed to the public. The underground world has always been present in the development of the human species, as a spiritual place, shelter or place to explore their necessities. Man has not only lived and painted the inside of caves; he has also explored the underground from unmemorable times to withdraw the minerals that he needed. As time passed, man searched these places to escape from city life stress, with a primordial return to its origins, to the countryside, to nature and to the underground. Following the examples of other countries, Portugal was no exception, and started to open its geological heritage to the public during the 50's. Today, to the 12 show caves, we join 121 sites of geological interest, between mines, museums and quarries. From show caves to a Guide for Mines and Sites of Mining and Geological Interest, the possibility of the creation of a network of places of geological interest, the underground tourism is growing and future seems to smile to those that search for the wonders of the world below.*

**Key words:** *geological heritage, speleotourism, show caves, touristic mines.*

En el X Congreso de la Asociación Portuguesa de Agencias de Viaje, (Fátima, 1984) Manuel Poças das Neves, en ese momento secretario general de la Región de Turismo de Leiria y Gerente de las Cuevas de Mira de Aire, empezó su presentación hablando de los principios del espeleoturismo en Portugal con la apertura al público de las cuevas de Alvados, Santo António, Moeda y Mira de Aire. Decía entonces qué desde hace mucho tiempo el turismo dejó de

ser un lujo de las clases privilegiadas que paseaban su ociosidad, su esnobismo o, incluso su tedio, para ser un verdadero fenómeno de masas, íntimamente ligado al crecimiento de las aglomeraciones urbanas.

La evasión dominical de gente de las ciudades, motivó una impresionante red de servicios. La necesidad de buscar nuevos incentivos por los creadores de circuitos turísticos de un solo día, provocó el nacimiento de restaurantes junto a los puntos focales de visita que, como es obvio, hizo nacer puntos de venta de artículos regionales. Ese éxodo nació, en primer lugar, de la imperiosa necesidad fisiológica de cambiar de aires, cada vez más pesados por la vida en las grandes urbes. Más que descanso, se procura libertad para el sistema nervioso sobrecargado de ruido, excitaciones y estrés.

Localizaciones que ejercen mayor atracción a esta multitud carente, son aquellas impuestas por la naturaleza. Al precipitarse en las carreteras, los turistas de fin de semana, encuentran una respuesta para sus necesidades instintivas, ancestrales, de ruptura con el habitual, la rutina monótona, en la amplitud del campo, de las florestas, de las montañas y de las cuevas. Es, como alguien ya afirmó, la eterna tentativa del hombre de escapar a sí mismo.

Las cuevas juegan en esta coyuntura un papel primordial. Contestan perfectamente a las más simples ansiedades, sin dejar de responder a las exigencias más exquisitas. Se puede decir que el visitante analfabeto o erudito, encuentra en ellas la respuesta a sus necesidades de diversión, cultura y mismo de recreo espiritual.

En ese año existían en Portugal solo 6 cuevas abiertas al público, si bien el turismo subterráneo en Portugal empezó con la apertura al público de las Grutas de Santo António, en el Macizo calizo extremeño en 1958, y del Algar do Carvão en la isla Terceira (Azores) en 1967. El hallazgo de las Grutas do Escoural (Évora) con grabados rupestres, trajo grandes expectativas en la región con la apertura, en 1970, de una nueva ala del museo de Évora dedicada a la cueva y la apertura de la cueva a las visitas. Siguieron las Cuevas de Alvados, 1971, Mira de Aire y Moeda en 1974 y posteriormente São Vicente, Madera en 1996, Algar do Pena en 1997, Cueva de Natal, Azores en 1998, Cueva de Torres, Azores en 2005, Cueva do Carvão, 2007 y Furna do Enxofre en 2011.

José Brandão (2009) en su trabajo "Grutas turísticas: património, emoções e sustentabilidade" presentó una lista de 16 cuevas turísticas en Portugal, 4 gestionadas por operadores privados, 1 por el Instituto de Gestión del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico, 1 por el Instituto de Conservación de la Naturaleza, 5 por autarquías, 1 por una empresa pública y 4 por asociaciones. De estas, 3 están cerradas al público y otra por ser de gestión conjunta entre la autarquía y una asociación local no tiene monitorización.

En el estudio sobre Espeleoturismo en Portugal realizado por Hugo Araújo (2016), un estudiante de Doctorado en Turismo del Instituto de Geología y Ordenamiento del Territorio en la Universidad de Lisboa, identificó 12 cuevas abiertas al público en Portugal. El enfoque de este estudio fue sobre las cavidades naturales con visita organizada.

Cueva	Pasarelas suspendidas y escaleras	Barandilla	Señalización indicativa	Señalización de interpretación	Iluminación	Otro
Cuevas de Santo Antonio	X	X			X	
Algar do Carvão	X	X			X	
Cueva de Natal	X				X	
Cueva do Escoural	X	X			X	
Cueva da Moeda	X	X			X	
Cueva das Torres	X	X				
Cuevas de Mira de Aire	X	X	X	X	X	Ascensor
Furna do Enxofre	X	X	X		X	
Cueva do Carvão	X				X	
Cuevas de San Vicente	X	X			X	
Cueva de Alvados	X	X			X	
Cueva Algar do Pena	X		X		X	

*Tabla 1. Infraestructuras internas de las cuevas turísticas de Portugal (Araújo, 2016)*

Cueva	Restaurante	Baños	Alojamiento	Tienda de Recuerdos	Aparcamiento	Centro de recepción y interpretación	Museo	Auditorio
Cuevas de Santo Antonio	X	X		X	X			
Algar do Carvão	X	X		X	X	X		
Cueva de Natal	X	X		X	X	X		
Cueva do Escoural					X			
Cueva da Moeda	X	X		X	X	X	X	X
Cueva das Torres		X		X		X		X
Cuevas de Mira de Aire	X	X	X	X	X	X	X	X
Furna do Enxofre		X		X	X	X		
Cueva do Carvão	X			X	X	X		
Cuevas de San Vicente	X	X		X	X	X	X	
Cueva de Alvados	X	X		X	X			
Cueva Algar do Pena		X			X	X		X

*Tabla 2. Infraestructuras y servicios alrededor de las cuevas turísticas de Portugal (Araújo, 2016)*



El artículo 84º de la Constitución de la República de Portugal define las cavidades naturales como un bien público. La apertura de una cueva se hace por concesión a empresas explotadoras que tengan una carta de empresa de animación turística y ahí se acaban las leyes de explotación. Hasta 2005 las reclamaciones se gestionaban por la Dirección General de Turismo, actual Turismo de Portugal, IP. Hoy las reclamaciones son direccionadas a la Autoridad de Seguridad Alimentaria y Económica. Y lo mismo en términos de nomenclatura, el Sistema de Información y Clasificación Portugués de las Actividades Económica considera a las cuevas como una Actividad de los Sitios y Monumentos Históricos, pero al contrario de éstos que están exentos de IVA, una visita a las cuevas paga el 23% de impuestos.

En 2009 nació en una iniciativa de la Dirección General de Energía y Geología y de la Empresa de Desarrollo Minero, el "Itinerario de Minas y Puntos de Interés Minero y Geológico de Portugal", con 21 lugares y más de 70 puntos de interés geológico.

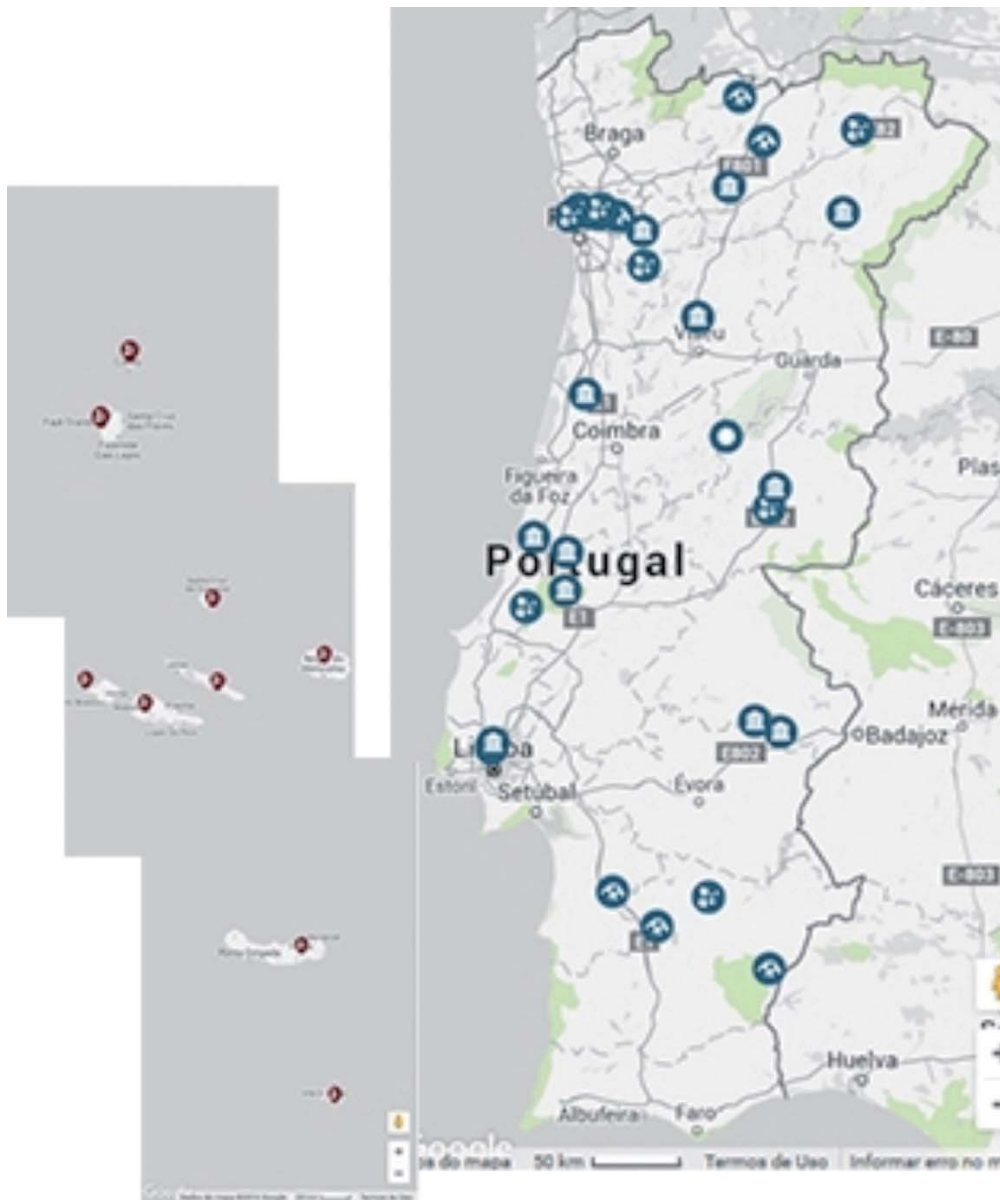


Figura 1. Distribución de los Lugares de Interés Geológico de Portugal

Esta iniciativa tiene como objetivos:

- promover el conocimiento científico de las diferentes localizaciones basado en la información existente;
- promover la visita a estos lugares (a través de su posicionamiento en planta digital con indicaciones de apoyo al visitante);
- apoyar la cualificación de la oferta turística local.

Este itinerario ha sido creado para servir las necesidades del público en general y de especialistas en sus áreas, hay lugares incluso donde solo se pueden hacer visitas con alumnos de ingeniería en fase final de curso. Se incluyen museos, centros de interpretación, centros de investigación y desarrollo, locales de salud, paisajes naturales y locales de deportes de naturaleza, con un total de 124 lugares distribuidos en 4 clases: minas, museos, puntos de interés geológico y otros.

Son 22 lugares asociados a 9 minas, en 5 se pueden visitar galerías, en 5 minas y 13 tienen equipo exterior, pero no todas pueden ser visitadas por el público. Hay también 62 lugares asociados a 12 puntos de interés geológico, algunos con visita acompañada, otros de visita libre. De estos hay 9 lugares en las islas de Azores, de los que 2 son cuevas visitables ya señaladas y 1 son las Cuevas de Moeda, cerca de Fátima. Por otra parte hay 39 museos asociados a 26 lugares, 2 de ellos en cuevas en calizas: el Centro interpretativo de las Cuevas de Moeda y el Centro de Ciencia Viva, Carsoscópio en el manantial de Alviela, en Alcanena. 9 museos están asociados a la explotación minera, 5 de Universidades e Institutos de enseñanza superior, y 2 museos nacionales. Finalmente, hay dos que no encuadran directamente en las otras clases, una réplica a escala del Sistema Solar en el Centro de Ciencia Viva de Estremoz y la tienda de cristales de la mina de Panasqueira.

Los objetivos generales de este itinerario son:

- hacer una contribución positiva al desarrollo local;
- complementar la oferta turística con un conjunto de iniciativas innovadoras;
- contribuir a la salvaguarda y rentabilidad del patrimonio;
- mejorar la imagen pública de la actividad minera;
- promover la manutención y seguridad de los locales;
- dar visibilidad a las iniciativas existentes;
- promover el conocimiento científico de los locales;
- apoyar al visitante, con posibilidad de hacer rutas de visita, con información de otros locales a visitar, restauración y alojamiento.

Además, se intenta hacer un modelo de gestión eficiente reconocido por todas las entidades gestoras, que mantenga un nivel motivacional elevado como grupo, que tenga la posibilidad de implementar mecanismos de control de calidad aceptados y reconocidos por todos y que

la innovación sea constante. Con esto se busca que la demanda sea cada vez mayor, que se facilite la búsqueda de clientes por localizaciones de interés y crezca la calidad.

Se prevé que el futuro del itinerario pase por la creación de una “Red de Minas y Puntos de Interés Minero y Geológico de Portugal”, casi como una asociación con un sistema de adhesión voluntaria, con niveles de integración mínimos, progresivamente cualificados, con complementariedad y cooperación, capacidad de gestión central y bajo coste.

En las 12 cuevas turísticas que existían en el año de 2015 hubo cerca de 427.000 visitantes. A estas 12 cuevas hay que unir la Cueva de Soprador do Carvalho con una experiencia diferente. La empresa que hace su explotación ha hecho una apuesta por visitas pequeñas con grupos de 8 personas y solo 2 visitas al día. En 2015 ha tenido 350 visitantes.

En la tabla 3 se puede ver una comparación entre 4 locales mineros y 4 cuevas turísticas:

Año/ visitantes	Fojo das Pombas Valongo	Minas Castromil	Mina Tresminas	Museo Minero São Pedro da Cova	Grutas Mira de Aire	Grutas Moeda	Grutas São Vicente	Grutas Santo António
<b>2011</b>	1885	551	505	4500	89623	84000	86599	25804
<b>2012</b>	1481	652	388	5000	72002	85000	87107	19963
<b>2013</b>	1340	1127	639	5000	77451	85000	92699	17717
<b>2014</b>	1428	1531	1794	5000	85164	85000	106068	19452
<b>2015</b>	2053	1807	2949	7600	92660	86000	114935	19824

Tabla 3. Comparación de número de visitantes entre minas y cuevas

Grutas de São Vicente	23
Grutas da Moeda	15 a 30
Grutas de Santo António	12
Grutas de Mira de Aire	10 a 30
Algar do Carvão	5
Gruta de Alvados	4 a 6
Gruta Algar do Pena	4
Furna do Enxofre	4
Gruta do Carvão	4
Gruta das Torres	2 a 5
Gruta do Natal	2
Gruta do Escoural	1

Tabla 4. Número de trabajadores de las cuevas turísticas de Portugal. (Fuente: elaboración propia).

En muchos de estos casos se verifica una gran estacionalidad, como es normal en casi todas las localizaciones turísticas y el número de trabajadores va cambiando con las estaciones.

Al contrario que en las cuevas turísticas que tienen de 1 a 23 trabajadores directos como se puede ver en la Tabla 4, hay lugares como el Fojo (Escollo) das Pombas donde las visitas son hechas por los ingenieros del municipio o el Museo Minero de São Pedro da Cova que tiene un funcionario y un aprendiz para gestionar las visitas.

Aparte de estos datos, existen otros tipos de visitas turísticas (Crispim, 2010), como la Cueva da Furninha en Peniche o la Cueva da Furninha, donde se hacen paseos turísticos, la Boca del Infierno, en Cascais y varias cuevas marinas en el Algarbe, entre Lagos y Armação de Pêra, donde se hacen paseos de barco y los barqueros hacen de guías, se inventan historias y atribuyen denominaciones a cada roca como les da la gana.

En los parques naturales hay también algunas cuevas donde se puede hacer deporte de naturaleza y visitas organizadas para grupos de espeleólogos y empresas de animación turística, y otras de libre acceso sin ningún tipo de control.

El proyecto de Ciencia Viva de la Agencia Portuguesa para la Divulgación Científica y Tecnología, junto con algunas asociaciones científicas y otras de investigación, hace también visitas regulares al subsuelo dentro del proyecto Geología de Verano, en visitas a cuevas y lugares de interés geológico, con geólogos como guías.

Igual que en España, los mecanismos de promoción turística muchas veces se olvidan de promocionar las cuevas pero, al contrario de España, Portugal no tiene aún una asociación de promoción al turismo subterráneo. Actualmente se está participando en ferias como la Bolsa de Turismo de Lisboa, con instalaciones en stands de asociaciones o de promoción como las Regiones de Turismo, o bien eventos diferentes y originales que llamen la atención de los medios de comunicación.

Es un esfuerzo continuo hacer que las gentes no se olviden de la existencia de las cuevas, pero es un esfuerzo que hacemos gustosamente cuando sirve para que nuestros clientes salgan felices de las visitas y sigan retornando. Como alguien ya ha dicho, las cuevas son una droga maravillosa que vuelve a la gente esclava de la Espeleología.

## **Referencias**

- Araújo, H. R. (2016). *Espeleoturismo em Portugal: Panorama Geral do Uso Turístico das Cavidades Naturais*. <http://www.roteirodeminas.pt/>
- Brandão, J. M. (2009). *Grutas turísticas: património, emoções e sustentabilidade*. Geonovas
- Crispim, J. A. (2010). Las cuevas turísticas de Portugal. *CUEVATUR2010*, pp. 323-334.





## **Grutas turísticas de Portugal: análise da legitimidade e aplicabilidade dos instrumentos jurídicos do Estado**

H. Rodrigues de Araujo <sup>(1)</sup>, M. L. Estêvão-Rodrigues <sup>(2)</sup> e H. Augusto Santos-Lobo <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa. Avenida Prof. Gama Pinto. 1649-003 Lisboa. (Bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, Brasil), hugo.araujo@campus.ul.pt

<sup>(2)</sup> Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa. Avenida Prof. Gama Pinto. 1649-003 Lisboa, luisa.rodrigues@campus.ul.pt

<sup>(3)</sup> Departamento de Geografia, Turismo e Humanidades. Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba. Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110. 18052-780 Sorocaba/SP, heroslobo@ufscar.br

---

### **RESUMO**

Em Portugal, há mais de meio século entidades privadas e do terceiro setor iniciaram a exploração de determinadas cavidades naturais subterrâneas, transformando-as em grutas turísticas. Em tempos mais recentes, foram as empresas públicas quem mais assumiram esse papel. Atualmente, existem no país 12 grutas turísticas, sendo cada uma gerida por uma entidade pública, privada ou do terceiro setor. Essas grutas recebem um total aproximado de 420.000 visitantes/ano. Diante da fragilidade das cavidades naturais e, ao mesmo tempo, sua importância para humanidade, este estudo buscou identificar os instrumentos jurídicos incidentes sobre o turismo em cavernas, bem como analisar a eficácia de sua aplicabilidade. A pesquisa envolveu revisão da literatura e entrevista das entidades gestoras de 3 grutas turísticas localizadas no Maciço Calcário Estremenho (MCE): Grutas Mira de Aire, Grutas da Moeda e Grutas de Santo António. Os dados obtidos foram analisados de forma predominante qualitativa. Os resultados demonstraram que, apesar das cavidades naturais serem consideradas pela Constituição da República Portuguesa como bens de domínio público, os órgãos nacionais responsáveis pela gestão dos recursos naturais e do turismo não dispõem de normas e regulamentos específicos para sua transformação em grutas turísticas, bem como não exercem o monitoramento das atividades que são desenvolvidas nesses ambientes. Entretanto, há uma série de leis e instrumentos jurídicos que poderiam ser aplicados pelo Estado, visando assegurar a sustentabilidade do uso desse patrimônio natural.

**Palavras-chave:** Espeleoturismo, Grutas da Moeda, Grutas de Santo António, Grutas Mira de Aire, turismo espeleológico.

### ***Show caves of Portugal: analysis of legitimate and applicability of the legal instruments of State***

#### **ABSTRACT**

In Portugal, more than half a century private and third sector started the operation of certain natural underground cavities, turning them into show caves. In more recent times, they were public companies who have taken over this role. Currently, there are 12 show caves in the country, with each managed by a public entity, private or third sector. These caves receive a total of approximately 420,000 visitors / year. Given the fragility of the natural cavities and at

the same time, its importance for humanity, this study sought to identify the legal instruments incident on tourism in caves, and analyze the effectiveness of its applicability. The research involved literature review and interview of the managing bodies of 3 tourist caves located in the Maciço Calcário Estremenho (MCE): Mira de Aire, Moeda, and Santo António caves. The data were mainly analyzed qualitatively. The results showed that despite the natural cavities being considered by the Portuguese Constitution as public assets, the national bodies responsible for the management of natural resources and tourism do not have specific rules and regulations for its transformation in tourist caves and do not perform the monitoring of the activities that are developed in these environments. However, there are a number of laws and legal instruments that could be applied by the State to ensure the sustainable use of this natural heritage.

**Key words:** Mira de Aire Caves, Moeda Caves, Santo António Caves, speleological tourism, speleotourism.

## Introdução

Gruta é a denominação mais utilizada em Portugal para as cavidades naturais subterrâneas com abertura suficiente que permita acesso a seres humanos. Pode ter desenvolvimento horizontal ou vertical, em forma de galerias e salões (Rodrigues, 2007). As grutas incidem, principalmente, nos denominados terrenos cársticos, ou seja, áreas onde a litologia predominante compreende rochas solúveis, calcárias em especial, embora, podem se referir também a paisagens similares em outras rochas solúveis (Rodrigues, 2007). A formação das grutas em áreas carbonáticas depende, sobretudo, de fatores como a existência de água, do gradiente hidráulico e da solubilidade da rocha (Ford e Williams, 2007).

Em Portugal, as grutas ocorrem com maior frequência no Maciço Calcário Estremenho (MCE), localizado na região central do país, enquadrado pelas cidades de Leiria, Alcobaça, Rio Maior, Torres Novas e Ourém (Brandão, 2009). O MCE corresponde a um grande bloco de calcários jurássicos com cerca de 160 Ma, que se apresenta como um grupo compacto de montanhas, composto de serras e planaltos (Rodrigues, 1998; Martins, 1949). Ao longo do tempo, a rocha calcária –que ocupa mais de dois terços do Maciço– foi sendo modelada através de processos geomorfológicos, dando origem a mais de 1.500 grutas (Carvalho *et al.*, 2011).

Devido as características morfológicas e estruturais do MCE, além de constituir-se na região cárstica mais importante do país, também, representa uma área importante de mineração. São alvo de exploração industrial para diferentes fins: calcários ornamentais (blocos e calçada), cal, rações para animais e britas. Os principais núcleos de exploração encontram-se em Pé da Pedreira, Codaçal, Moleanos, Salgueiras (Arrimal-Mendiga), Cabeça Veada e Fátima (Carvalho *et al.*, 2011).

Acontece que, a grande beleza e dimensão de algumas grutas descobertas no MCE, ao mesmo tempo em que despertou a preocupação com relação a salvaguarda do ambiente, fez também surgir o interesse comercial de exploração através do turismo, assim como já ocorria em alguns países da Europa, desde o século XIX. De acordo com Cigna e Forti (2013), a caverna Postojna, na Eslovênia, é considerada a primeira do mundo a ser estruturada para visita turística, desde 1818, sendo iluminada a partir de 1918.

Nessa perspectiva, no início da segunda metade do século XX, algumas cavidades do MCE sofreram adaptações físicas para facilitar o acesso das pessoas, como instalação de passarelas, corrimãos e iluminação artificial, as visitas passaram a ser controladas por alguma entidade

particular, e assim surgiram as primeiras grutas turísticas de Portugal. Atualmente, existem 12 grutas turísticas no país, sendo cada uma gerida por uma entidade, cuja natureza jurídica pode ser pública, privada ou do terceiro setor. No total, essas grutas recebem um fluxo turístico de aproximadamente 420.000 de visitantes/ano. Especialmente, no MCE encontram-se quatro grutas turísticas geridas por entidades privadas (Grutas Mira de Aire; Grutas da Moeda; Grutas de Alvados; Grutas de Santo António), e o Algar do Pena que está inserido no Parque Natural das Serras de Aire e Candeeiros (PNSAC), sob responsabilidade do Instituto da Conservação da Natureza e Florestas (ICNF) (Araujo *et al.*, 2016).

De acordo com Lobo (2014), as atividades turísticas desenvolvidas em grutas geram encantamento nas pessoas, e possibilita oportunidades singulares de estudar diversos ramos do conhecimento, sobretudo, compreender a história da Terra e dos seus antigos habitantes, através dos fósseis de animais e plantas, e demais vestígios das sociedades já extintas, que são encontrados nesses ambientes. Esse tipo de turismo ficou conhecido como turismo espeleológico, ou simplesmente, espeleoturismo (Lobo, 2014).

Além da importância científica e cultural, as grutas também têm grande valor para a humanidade em geral, como reservatório subterrâneo de água doce, fonte de extração de diferentes minerais, habitat de espécies endêmicas de animais e plantas, dentre outros (Marra, 2001). Contudo, as grutas possuem um ecossistema extremamente adaptado as condições particulares do ambiente subterrâneo, ou seja, ausência parcial ou total de luz, elevada umidade, e pouca variação de temperatura (Cigna e Forti, 2013).

Por conseguinte, as grutas se tornam um desafio para o planejamento turístico no que se refere a sustentabilidade, pois qualquer atividade mal planejada, seja de caráter científico, recreativo, esportivo ou meramente contemplativo, pode provocar alteração no ambiente e causar danos irreversíveis ao patrimônio espeleológico (Lobo, 2014; Cigna, 2011).

Em Portugal, assim como ocorre em outros países, as cavidades naturais subterrâneas foram reconhecidas pela Constituição da República como bens de domínio público (Artigo 84º da Constituição da República Portuguesa). Nesse caso, fica subentendido que o uso das grutas está condicionado ao interesse coletivo da sociedade e as normas e regulamentos infringidos pelo Estado, com o intuito de prevenir e controlar os impactos, para assegurar a sua proteção.

Assim sendo, verificou-se no presente estudo a seguinte questão: Qual a legislação que se aplica sobre as grutas turísticas de Portugal, e quais as formas de controle exercidas pelo Estado? Diante da ausência de literatura a respeito e das respostas discrepantes obtidas de especialistas no assunto, o presente estudo procurou reunir um conjunto de informações para tentar esclarecer esse questionamento.

## **Materiais e métodos**

Este estudo corresponde a uma pesquisa exploratória dividida em duas etapas. A primeira etapa, envolveu revisão da literatura sobre bens de domínio público e formas de utilização por particulares. Em seguida, compilou-se os instrumentos jurídicos nacionais (leis, decretos,

portarias, normas, dentre outros), que incidem sobre as grutas turísticas, enquanto bens de domínio público. Para aprofundar a investigação, na segunda etapa foram selecionadas três grutas turísticas situadas no Maciço Calcário Estremenho, como objetos de estudo. Optou-se por escolher as três grutas que registram maior fluxo turístico anual, de acordo com Araujo *et al.* (2016): 1. Grutas Mira de Aire (Grutas de Mira de Aire – Empreendimentos Turísticos e Espeleológicos, SA); 2. Grutas da Moeda (Grutas da Moeda e Fátima Lda.); 3. Grutas de Santo António (Privada (Sógrutas - Sociedade Turística das Grutas de Santo António, S.A.).

As entidades gestoras dessas três grutas turísticas foram entrevistadas por meio de correio eletrônico. A mensagem encaminhada continha uma contextualização do problema da pesquisa e um conjunto de perguntas abertas, elaboradas com base nas questões centrais. Posteriormente, para tratamento dos dados obtidos utilizou-se a análise de conteúdo qualitativa, com a finalidade de reduzir os dados de maneira que sobrassem apenas os conteúdos essenciais, tendo em vista a seleção entre tópicos pela sua maior ou menor importância para a pesquisa (Alves e Silva, 1992).

A composição dos resultados ancorada na literatura forneceu um conjunto de informações importantes para preencher uma lacuna do conhecimento a respeito das grutas turísticas de Portugal.

### **Enquadramento legal das grutas turísticas**

Em Portugal, assim como ocorre em qualquer Estado de Direito Democrático, o edifício normativo encontra-se regulado por diversos instrumentos jurídicos, ordenados conforme a lei fundamental - a Constituição da República Portuguesa. Assim, todos os demais instrumentos, como os decretos, resoluções, portarias, despachos, entre outros, devem obedecer ao ordenamento legal definido pela Constituição.

No que concerne ao presente estudo, designadamente o enquadramento jurídico de grutas (cavidades naturais subterrâneas) submetidas à exploração turística, a Constituição da República Portuguesa determina na alínea c) do artigo 84.º que “Os jazigos minerais, as nascentes de águas mineromedicinais, as cavidades naturais subterrâneas existentes no subsolo, com exceção das rochas, terras comuns e outros materiais habitualmente usados na construção” são bens do domínio público (Prata, 2016).

Tradicionalmente, os bens são classificados em públicos e privados. Segundo Alves (2009), a classificação de um bem como público ou como privado depende do regime jurídico a que este esteja sujeito. O bem público está afeto à satisfação dos interesses do Estado, ou seja, da administração pública, pois são bens que visam a realização do interesse público. Já os bens privados pertencem às pessoas jurídicas de direito privado, ou às pessoas físicas (Fernandes, 1991).

Portanto, o domínio público abrange bens que, por seu interesse coletivo, estão sujeitos a uma especial tutela jurídica, associada especialmente ao fato de estarem fora do comércio privado, ou seja, serem insusceptíveis de redução à propriedade particular, inalienáveis, imprescritíveis

e impenhoráveis (Carvalho, 2014). Todavia, como afirma Alves (2009) esta incomercialidade privada não inviabiliza o aproveitamento, pelos particulares, dos bens de domínio do Estado, pois estes destinam-se a prestar uma utilidade pública. Logo, e em ordem a preservar a produção dessa utilidade pública, não se podem constituir direitos privados enquanto fizerem parte do domínio público, mas podem-se constituir direitos de utilização.

O Artigo 27º do Decreto-Lei nº 280/2007 de 07 de agosto, estabelece que, por meio de ato (licença) ou contrato (concessão) administrativos podem ser atribuídos a particulares, durante um período determinado de tempo, poderes exclusivos de fruição de bens do domínio público, mediante o pagamento de taxas. Sendo que, o prazo da concessão, salvo estipulação em contrário devidamente fundamentada, não pode ser prorrogado. A atribuição de uso privativo deve, além de estar de acordo com as regras de publicidade e de concorrência previstas na legislação aplicável, observar os princípios gerais da atividade administrativa, em especial, os princípios da igualdade, da imparcialidade, da transparência e da boa-fé (Decreto-Lei nº 280/2007).

Além disso, as atividades exercidas ao abrigo de uso privativo estão sujeitas à fiscalização pelos serviços da entidade administrativa emitente. Sendo que, o pessoal incumbido da fiscalização tem livre acesso à área e a todas as instalações abrangidas pelo uso privativo. A licença de uso privativo pode ainda ser revogada a qualquer momento, por razões de interesse público, designadamente quando a atividade autorizada produza dano aos bens em causa ou se revele incompatível com atividades de maior interesse público ou com o uso comum efetivo (Decreto-Lei nº 280/2007).

### **Instrumentos jurídicos que se aplicam, ou deveriam ser aplicados pelo estado**

Uma das funções do Estado é “proteger e valorizar o património cultural do povo português, defender a natureza e o ambiente, preservar os recursos naturais e assegurar um correcto ordenamento do território” (Artigo 9º da Constituição da República Portuguesa). Segundo a Constituição, “todos têm direito a um ambiente de vida humano, sadio e ecologicamente equilibrado. Sendo que, o Estado é responsável por defender esse direito, através de organismos próprios e com o envolvimento e a participação dos cidadãos” (Artigo 66º da Constituição da República Portuguesa).

Nesse sentido, a política de ambiente (Lei n.º 19/2014, de 14 de abril), torna-se um referencial para o cumprimento do disposto nos artigos 9º e 66º da Constituição. Tal política visa a efetivação dos direitos ambientais através da promoção do desenvolvimento sustentável, que obriga à satisfação das necessidades do presente sem comprometer as das gerações futuras (Lei n.º 19/2014, de 14 de abril). O Estado deve adotar medidas guiadas pelos princípios da prevenção e da precaução, com “o objetivo de obviar ou minorar, prioritariamente na fonte, os impactos adversos no ambiente, com origem natural ou humana, tanto em face de perigos imediatos e concretos como em face de riscos futuros e incertos” (Artigo 3º da Lei n.º 19/2014, de 14 de abril).

Para isso, o Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro, determina que os programas, planos e projetos, públicos ou privados, que possam afetar o ambiente, o território ou a qualidade de vida dos cidadãos, tem que passar por um processo de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). O intuito da AIA é garantir que o processo de tomada de decisão considere, dentre outros aspectos, os impactos relevantes em termos biofísicos, econômicos, sociais, culturais e políticos. Quando aprovadas, posteriormente o Estado deve exercer o controle das atividades suscetíveis de ter algum impacto negativo no ambiente, através do monitoramento, fiscalização e inspeção, visando, nomeadamente, assegurar o cumprimento das condições estabelecidas.

O fato das grutas serem utilizadas como recursos turísticos pressupõe, também, que se desenvolvam com base nas normas reguladoras da política nacional de turismo, que tem como princípios gerais: a sustentabilidade; a transversalidade; e competitividade (Decreto-Lei n.º 191/2009 de 17 de Agosto).

Em especial, o princípio da sustentabilidade traduz-se na adoção de políticas que fomentem:

- a) A fruição e a utilização dos recursos ambientais com respeito pelos processos ecológicos, contribuindo para a conservação da natureza e da biodiversidade; b) O respeito pela autenticidade sociocultural das comunidades locais, visando a conservação e a promoção das suas tradições e valores; c) A viabilidade económica das empresas como base da criação de emprego, de melhores equipamentos e de oportunidades de empreendedorismo para as comunidades locais (Artigo 4º do Decreto-Lei n.º 191/2009 de 17 de Agosto).

Mantendo o discurso com referência ao desenvolvimento sustentável, o Artigo 20º do citado Decreto-Lei n.º 191/2009 de 17 de Agosto, determina que os fornecedores de produtos e serviços turísticos são obrigados a:

Cumprir a legislação específica aplicável às respectivas actividades; (...) Desenvolver a sua actividade com respeito pelo ambiente, pelo património cultural e pelas comunidades locais; Assegurar a existência de sistemas de seguro ou de assistência apropriados que garantam a responsabilidade civil dos danos causados aos turistas e consumidores de produtos e serviços turísticos, assim como a terceiros, ocorridos no âmbito do exercício da actividade turística; Adoptar as melhores práticas de gestão empresarial e de qualidade de serviço e procedimentos de controlo interno da sua actividade (...).

O Turismo de Portugal, I. P., é a entidade pública responsável por organizar e manter atualizado o Registro Nacional dos Agentes de Animação Turística (RNAAT), que contém as empresas de animação turística e operadores marítimo –turísticos, com título válido para o exercício da atividade.

As empresas de animação turística são pessoas singulares ou coletivas que desenvolvem, com caráter comercial, as atividades lúdicas de natureza recreativa, desportiva ou cultural, que se configurem como atividades de turismo de ar livre ou turismo cultural e tenham interesse turístico para a região em que se desenvolvem. Um operador marítimo-turístico, por sua vez, é uma empresa sujeita ao Regulamento da Atividade Marítimo-Turística (RAMT) que desenvolva



alguma das seguintes atividades de animação turística: a) Atividades de turismo de ar livre - também chamadas atividades outdoor, de turismo ativo ou turismo de aventura; b) Atividades de turismo cultural - atividades pedestres ou transportadas, que promovam o contato com o património cultural e natural através de uma mediação entre o destinatário do serviço e o bem cultural usufruído, para partilha de conhecimento (Decreto-Lei n.º 108/2009, de 15 de maio, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 186/2015, de 3 de setembro).

Em princípio, apenas as empresas que tenham realizado a mera comunicação prévia ou a comunicação prévia com prazo através do RNAAT, podem exercer e comercializar, as atividades de animação turística (Decreto-Lei n.º 108/2009, de 15 de maio, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 186/2015, de 3 de setembro).

Nas situações em que as atividades de animação turística se desenvolvam em áreas integradas no Sistema Nacional de Áreas Classificadas (SNAC) ou outras com valores naturais, passam a ser designadas por atividades de turismo de natureza. Todavia, este tipo de atividade tem de ser reconhecido como tal pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). Sendo que, este reconhecimento é obrigatório quando uma empresa de animação turística pretenda efetuar atividades de turismo de natureza em áreas integradas no SNAC, e fora deste território o reconhecimento é facultativo (Decreto-Lei n.º 108/2009, de 15 de maio, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 186/2015, de 3 de setembro).

Para serem reconhecidos como turismo de natureza, os empreendimentos e as atividades de animação turística devem adotar um conjunto de boas práticas ambientais, que permita uma utilização eficiente dos recursos naturais. Em alguns casos, deve também apoiar pelo menos um projeto de conservação da natureza reconhecido pelo ICNF. A designação turismo de natureza e o respectivo logotipo podem ser usados apenas por empreendimentos turísticos reconhecidos como tal (Decreto-Lei n.º 108/2009, de 15 de maio, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 186/2015, de 3 de setembro).

Por fim, embora seja facultativo, os empreendimentos e atividades turísticas reconhecidas como Turismo de Natureza pelo ICNF, também podem se adequar as Normas Portuguesas (NP) de Qualidade de Serviços de Turismo de Natureza (NP 4507:2012 – Empreendimentos de Turismo de Natureza; e NP 4520:2013 – Atividades de Turismo de Natureza). Estas normas visam a promoção de práticas ambientais de excelência. A atividade de acreditação é da responsabilidade do Instituto Português de Acreditação (IPAC) e consiste na avaliação e reconhecimento da competência técnica de entidades para efetuar atividades específicas de avaliação da conformidade.

## **Resultados**

### ***Grutas de Mira de Aire***

As Grutas de Mira de Aire localizam na freguesia Mira de Aire. Essas grutas começaram a ser exploradas em 1947, quando moradores locais descobriram um pequeno algar que levava a

uma grande sala. Em 1974, após a construção dos primeiros acessos em madeira buscando oferecer maior conforto e segurança aos visitantes, a gruta foi oficialmente aberta ao público, por iniciativa da Grutas de Mira de Aire - Empreendimentos Turísticos e Espeleológicos, entidade privada que se mantém responsável pela gestão (Sousa, 2014).

A parte visitável das grutas abrange um percurso com mais de meio quilómetro de extensão e cerca de 100 metros de desnível. Atualmente, a infraestrutura interna é composta de passarelas, escadas, corrimões, sinalização (indicativa e explicativa), iluminação artificial e elevador. Na parte externa, dispõe de estacionamento, centro de recepção, restaurante, auditório, sala exposição, loja de souvenir, bangalôs, parque aquático, dentre outros equipamentos. Há também um espaço dentro das grutas destinado para realização de eventos diversos, como exposições, espetáculos, reuniões, apresentação de produtos, jantares e outros.

As Grutas Mira de Aire recebem aproximadamente 100.000 visitantes por ano, sendo permitido até 350 pessoas visitarem a gruta, ao mesmo tempo. A entidade gestora emprega 10 funcionários. Segundo os gestores, na época da abertura do empreendimento não foi exigido por parte do poder público qualquer estudo de avaliação de impacto ambiental da gruta. Contudo, foi realizado um projeto com o apoio científico da Sociedade Portuguesa de Espeleologia, que sinalizou os locais mais sensíveis da cavidade. Esse estudo resultou na criação de uma área de proteção ao redor da maior sala da gruta, sendo proibido qualquer tipo de infraestrutura neste local, e no restante foi permitido a construção parcial de modo que o solo permaneça permeável.

Os gestores afirmaram que os impactos causados pela visita são combatidos através da aplicação de tratamentos não corrosivos nas formações rochosas das grutas. Além disso, estão sendo realizadas experiências com iluminação LED. De acordo com Cigna (2011), este tipo de iluminação gera menor calor, por conseguinte causa menos impacto no ambiente cavernícola. Recentemente, também foi realizado a análise das águas que chegam à gruta por suspeita de poluição.

Com relação a atuação do Estado, de acordo com os gestores o único órgão público que fiscaliza a gruta é a ASAE (Autoridade para a Segurança Alimentar e Económica), autoridade administrativa nacional especializada no âmbito da segurança alimentar e da fiscalização económica.

Não obstante a falta de fiscalização da atividade turística em si, as Grutas Mira de Aire estão registradas como atividade de Animação Turística concedido pelo Turismo de Portugal e, também, possuem o registro de Turismo de Natureza conferido pelo ICNF. Além disso, de acordo com os gestores, as atividades desenvolvidas nas grutas seguem as Normas Portuguesas de Qualidade de Serviços de Turismo de Natureza.

### ***Grutas da Moeda***

As grutas da Moeda localizam na freguesia de São Mamede. A sua descoberta aconteceu em 1971 por dois caçadores que descobriram um algar no meio do mato e a partir daí iniciou a

exploração, descobrindo-se assim muitas galerias, lagos e percursos, que hoje fazem parte da área visitável (Sousa, 2014). Em 1974, as grutas foram oficialmente abertas ao público. Desde então, a Grutas da Moeda e Fátima Lda. é entidade privada responsável pela sua gestão.

A extensão visitável das grutas é de 350 metros e a sua profundidade é de 45 metros abaixo da cota de entrada (Sousa, 2014). A estrutura interna das grutas compreende passarelas, escadas, corrimãos e iluminação artificial. Na parte externa, a área comercial abrange estacionamento, loja de souvenir, banheiro, restaurante, centro de recepção, auditório, dentre outros equipamentos.

As grutas da Moeda recebem aproximadamente 100.000 visitantes por ano, sendo permitido no interior da gruta no máximo 25 visitantes, ao mesmo tempo. O número de funcionários da gruta varia de 15 a 30, em decorrência dos períodos de sazonalidade dos visitantes.

A respeito dos possíveis impactos causados pela visita, a entidade gestora afirmou que os monitora através da medição dos níveis de CO<sub>2</sub> e umidade. Para uso turístico da gruta foi necessário apresentar vários tipos de estudo, porém os gestores não especificaram quais. Com relação a atuação do Estado, segundo os gestores não há qualquer fiscalização do uso turístico da gruta.

### **Grutas de São António**

As grutas de Santo António localizam na freguesia de Alvados, e foram descobertas em 1955. Inicialmente, o único acesso a estas grutas era feito pelo algar, descoberto por um jovem de cinco anos com a ajuda de um grupo de trabalhadores de uma pedreira local que, ao investigarem esse algar, perceberam que este daria acesso a uma gruta de grande dimensão e beleza (Sousa, 2014).

Ao longo dos primeiros anos, as grutas passaram a ser visitadas, mas sem oferecer condições seguras para isso. Com o aumento do número de visitantes, urgiu melhorar os acessos das grutas, que até então eram feitos por uma longa escada de madeira colocada no mesmo algar, de onde iniciou a sua exploração. Assim sendo, foi escavado um túnel artificial que liga a superfície ao interior das grutas e estruturado o percurso visitável (Sousa, 2014). Em 1971, as grutas foram oficialmente abertas ao público, por iniciativa da Sógrutas.SA - Sociedade Turística das Grutas de Santo António, entidade privada responsável pela gestão até os dias atuais.

Atualmente, as grutas têm uma área visitável de 6.000 metros quadrados. A estrutura interna da gruta compreende passarelas, escadas, corrimãos e iluminação artificial. Na parte externa, há estacionamento, loja de souvenir, banheiro e restaurante.

Por ano, cerca de 30.000 pessoas visitam as Grutas de Santo António. No interior das grutas é permitido no máximo 40 visitantes, ao mesmo tempo. A entidade gestora emprega 12 funcionários. De acordo com os gestores, o Governo nunca exigiu algum estudo de avaliação de impacto ambiental da gruta. Os possíveis impactos causados pela visita não são monitorados pela entidade gestora, tão pouco, por parte do Estado.

Segundo os gestores, as Grutas da Moeda estão passando pelo processo de registro como “Agentes Animação Turística”, portanto, por enquanto ainda não são reconhecidas como atividade de Turismo de Natureza, assim como, não seguem as Normas Portuguesas de Qualidade de Serviços de Turismo de Natureza.

## **Discussão dos resultados**

O referencial teórico desse estudo apresentou uma compilação das leis, decretos, regulamentos e demais instrumentos jurídicos existentes em Portugal que incidem sobre o aproveitamento turístico de uma gruta existente no país. Verificou-se que existe a possibilidade de uma entidade privada obter o direito de utilização de um bem de domínio público, assim como as grutas, desde que seja destinado a prestar uma atividade de interesse coletivo (Alves, 2009; Fernandes, 1996).

Nesse sentido, acredita-se que o espeleoturismo possui características para ser enquadrado como uma atividade de interesse coletivo. Conforme afirma Lobo (2014), as visitas às grutas possibilitam estudar e admirar o fascinante ambiente subterrâneo, suas plantas e animais, assim como as manifestações culturais, passadas e presentes, encontradas nestas áreas. Segundo Cigna (2011), é uma ótima oportunidade de discussão dos valores da sociedade em relação ao meio ambiente.

Todavia, a atribuição de uso privativo de um bem público deve ocorrer através de ato (licença) ou contrato (concessão) administrativos, obedecendo os princípios da igualdade, da imparcialidade, da transparência e da boa-fé (Decreto-Lei nº 280/2007). No caso pesquisado, nenhuma das três entidades gestoras entrevistadas obtiveram licença ou concessão de uso das grutas, uma vez que tal obrigação ainda não existia na época em que os empreendimentos iniciaram. A legislação atual, também, não prevê o que se fazer nestes casos.

Logo, para abertura da gruta ao público não foi exigido das entidades gestoras qualquer tipo de estudo de carácter preventivo, com o intuito de avaliar de forma integrada, os possíveis impactos ambientais decorrentes da execução dos projetos turísticos. Apesar disso, os gestores das Grutas Mira de Aire e das Grutas da Moeda alegaram terem realizado por conta própria estudos com esse intuito.

Para Lobo (2014), a necessidade de realização de um estudo cuidadoso deve-se sobretudo as características físicas, espaciais e ambientais peculiares das grutas em relação aos demais ambientes onde o turismo se desenvolve. As informações advindas desses estudos servirão para definir medidas destinadas a evitar, minimizar ou compensar os impactos causados.

Além disso, as atividades exercidas ao abrigo de uso privativo de um bem público estão sujeitas à fiscalização pelos serviços da entidade administrativa emitente (Decreto-Lei nº 280/2007). Entretanto, todas as entidades gestoras afirmaram que o Estado não fiscaliza as atividades turísticas que decorrem nas grutas, com exceção das Grutas Mira de Aire que mencionou a ASAE (Autoridade para a Segurança Alimentar e Económica). Esse fato causa preocupação,

diante da fragilidade ambiental das grutas, e a sua importância cultural e científica (Lobo, 2014; Cigna e Forti, 2013).

Quanto aos instrumentos jurídicos específicos do turismo, atualmente, apenas as Grutas Mira de Aire possui o registro de empresa de animação turística, concedida pelo Turismo de Portugal e o registro de atividade de Turismo de Natureza, concedido pelo ICNF. Da mesma forma, ocorre em relação as Normas Portuguesa de Qualidade de Serviços de Turismo de Natureza, uma vez que, somente as Grutas Mira de Aire afirmou atendê-las.

Decerto que as grutas que foram abertas para visitação há mais de meio século, assim como as entrevistadas, sofreram no início s rios impactos, sobretudo decorrentes das diferenças culturais acerca das preocupa es com a conserva o, que eram menores na época. Hoje em dia, com todo aparato disponível pelo Estado não há razão para a ausência de controle sobre as atividades que são exercidas nas grutas, principalmente, a partir da promulga o da Constitui o da República Portuguesa em 1976, que inseriu as cavidades naturais subterr neas na lista dos bens de domínio público (Artigo 84 ).

Permitir que o mercado exerça o seu próprio controle pode ser muito arriscado para manuten o da integridade de um bem público t o delicado como as grutas. Nas últimas décadas, verifica-se a expansão da atividade econ mica em todo mundo, e conseqüentemente o aumento da pressão sobre os recursos naturais. A falta de controle por parte dos órgãos fiscalizadores pode levar as entidades gestoras a fazer uso de um comportamento oportunista, apostando na falha da fiscaliza o do Estado.

Por isso, acredita-se que para fortalecer o espeleoturismo em Portugal, primeiramente, faz-se necessário a regulamenta o e fiscaliza o efetiva do uso turístico das grutas, por meio da defini o de normas e diretrizes claras, que sirvam de referência para as entidades gestoras durante as tomadas de decisões e, ao mesmo tempo, para o próprio controle do Estado.

## **Considera es finais**

O presente estudo reuniu as informa es para compreensão acerca do enquadramento legal do uso turístico de grutas em Portugal, bem como o controle exercido pelo Estado sobre essa atividade. Verificou-se que em Portugal existe a possibilidade de uso privado de um bem público previsto na Constitui o, assim como as grutas. Entretanto, não há leis ou regulamentos específicos para transforma o de cavidades naturais em grutas turísticas. Existe uma série de instrumentos jurídicos que poderiam ser aplicados pelo Estado, cuja aplica o prática não foi constatada. As informa es obtidas por meio das entrevistas levam a entender que as grutas turísticas abertas para visita o em meados do século passado continuam até os dias atuais a praticarem suas atividades sem a devida fiscaliza o por parte do Estado. Espera-se que os resultados deste estudo contribuam para conscientizar os gestores públicos e a sociedade em geral, sobre a importância de regulamenta o e fiscaliza o das grutas turísticas.

## Referências

- Alves, Z. M. e Silva, M. H. 1992. Análise qualitativa de dados de entrevista: uma proposta. *Paidéia (Ribeirão Preto)*, (2), 61-69.
- Araujo, H.R., Rodrigues, M.L. e Lobo, H.A. 2016. Espeleoturismo em Portugal: panorama geral do uso turístico das cavidades naturais. In: Henrique, C. (Coord.) *Anais da II Conferência Internacional de Turismo e História*, pp 1-11. Universidade do Algarve, Faro.
- Alves, J. M. e Carvalho, J. B. 2009. *Os bens do domínio público em Portugal*, 19/04/2016. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1557/1/Os%20Bens%20de%20Dom%20C3%ADnio%20P%C3%ABlico%20em%20Portugal.pdf>
- Brandão, J. M. 2009. Grutas turísticas: património, emoções e sustentabilidade. *Geonovas*, 22, 35-43.
- Carvalho, A.C. et al. 2014. *Direito administrativo*, 27/05/ 2016. [http://www.cej.mj.pt/cej/recursos/ebooks/Administrativo\\_fiscal/Direito\\_Administrativo.pdf](http://www.cej.mj.pt/cej/recursos/ebooks/Administrativo_fiscal/Direito_Administrativo.pdf)
- Carvalho, J. M., Midões, C., Machado, S., Sampaio, J. e Costa, A. 2011. *Maciço Calcário Estremenho: Caracterização da Situação de Referência*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 13/05/2016. <http://onlinebiblio.lneg.pt/multimedia/associa/base%20mono/35027.pdf>
- Cigna, A. e Forti, P. 2013. Caves: the most importante geotouristic feature in the world. *Tourism and Karst Areas*, 6 (1), 9-26.
- Cigna, A. 2011. Show cave development with special references to active caves. *Tourism and Karst Areas*, 4 (1), 7-16.
- Decreto-Lei n.º 280/2007. *Estabelece as disposições gerais e comuns sobre a gestão dos bens imóveis dos domínios públicos do Estado, das Regiões Autónomas e das autarquias locais*. Diário da República, 1.ª série. N.º 151 (07-08-07), 5048-5066.
- Decreto-Lei n.º 151-B/2013. *Aprova o regime jurídico da Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) dos projetos públicos e privados suscetíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente*. Diário da República, 1.ª série. N.º 211 (31-10-13), 6328(6)-6328(31).
- Decreto-Lei n.º 191/2009. 2009. *Estabelece as bases das políticas públicas de turismo e define os instrumentos para a respectiva execução*. Diário da República, 1.ª série. N.º 158 (17-08-09), 5336-5341.
- Decreto-Lei n.º 186/2015. *Procede à quarta alteração ao Decreto-Lei n.º 39/2008, de 7 de março, que estabelece o Regime Jurídico da Instalação, Exploração e Funcionamento dos Empreendimentos Turísticos, e à segunda alteração ao Decreto-Lei n.º 108/2009, de 15 de maio, que estabelece as condições de acesso e de exercício da atividade das Empresas de Animação Turística e dos Operadores Marítimo-Turísticos*. Diário da República, 1.ª série. N.º 172 (03-09-15), 6947-6982.
- Fernandes, J.P. 1991. *Dicionário Jurídico da Administração Pública* (2 th ed.). Coimbra Editora, Coimbra, 448 pp.
- Lei n.º 19/2014. *Define as bases da política de ambiente*. Diário da República, 1.ª série. N.º 73 (14-04-14), 2400-2404.
- Lobo, H.A. 2014. *Fundamentos básicos do espeleoturismo*. Dourados: UEMS.
- Marra, R.J.G. 2001. Planejamento e a Prática do Turismo em Cavernas. In: *Actas do 13th International Congress of Speleology*, Brasília, 15-22 de jul. 2001.



- Martins, A. F. 1949. *Maciço Calcário Estremenho. Contribuição para um Estudo de Geografia Física*. Dissertação de Doutoramento em Ciências Geográficas, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Prata, A. 2016. *A tutela constitucional da autonomia privada*. Almedina, Coimbra, 216 pp.
- Rodrigues, M. L. (org.). 2007. *Glossário ilustrado de termos cársticos*. Edições Colibri, Lisboa, 167 pp.
- Rodrigues, M. L. 1998. *Evolução geomorfológica quaternária e dinâmica actual - Aplicações ao ordenamento do território. Exemplos no Maciço Calcário Estremenho*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Sousa, J.I.V. 2014. *Caracterização acústica de grutas turísticas – estudo de casos as grutas das Serras de Aire e Candeeiros*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal.



Mesa, F. M., et al. La Cueva del Viento (Icod de los vinos, Tenerife). Recopilatorio de su catálogo faunístico y subfósil. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 35-48.

## **La Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife). Recopilatorio de su catálogo faunístico y subfósil**

F. M. Mesa <sup>(1)</sup>, A. J. Pérez <sup>(2)</sup> y P. Oromí <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Visitantes Cueva del Viento, Ctra. De los Piquetes 51, Icod de los Vinos. Tenerife, Islas Canarias, fmesaluis@gmail.com

<sup>(2)</sup> Dpto. Biología Animal y Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, c/Astrofísico Sánchez s/n, 38206 La Laguna, Tenerife, Islas Canarias, ajperez.delgado@gmail.com; poromi@ull.es

---

### **RESUMEN**

La Cueva del Viento es un tubo volcánico situado en Icod de los Vinos (Tenerife, Islas Canarias). Es el quinto más largo del mundo (18,5 km topografiados) y el más largo de Europa. Constituye una enorme red laberíntica de pasajes subterráneos, en tres niveles, siendo innumerables las ramificaciones aún sin explorar. Esto es producto de sucesivas etapas eruptivas, de coladas basálticas procedentes de Pico Viejo, junto al Volcán Teide. Los tubos volcánicos y las simas, únicos espacios accesibles para las personas, no son sino una parte del ecosistema subterráneo. El ámbito que abarca dicho medio ha sido frecuentemente objeto de controversia, y actualmente se tiende a considerar como tal todo espacio existente bajo la superficie del suelo. Estos hábitats disponen de unas características ambientales muy singulares, donde habita una rica fauna invertebrada. Se hace una recopilación de la información, tanto publicada como inédita, sobre la fauna de la Cueva del Viento. También se relacionan los restos de animales vertebrados ya extintos encontrados en esta cueva, junto a los de aves actuales que hoy en día no pueblan la Isla. Con este trabajo se pretende poner en valor el trabajo realizado por una serie de científicos que, a lo largo de muchos años y muchas visitas a este complejo, nos han abierto las puertas a las generaciones venideras en el conocimiento geológico y biológico de este peculiar ecosistema.

**Palabras clave:** fauna cavernícola, subfósiles, tubo volcánico.

### ***Viento Cave (Icod de los Vinos, Tenerife, Spain). Compilation of its faunal and subfossil catalog***

#### **ABSTRACT**

*Cueva del Viento is a lava tube located in Icod de los Vinos (Tenerife, Canary Islands). It is the fifth longest in the world (18.5 kilometers mapped to date) and the largest in Europe. It is a huge labyrinthine network of underground passages, in three different levels, with many unexplored branches. This is the product of successive stages of eruptive basaltic lava flows from the first eruptive phase of Pico Viejo volcano, which is next to Mount Teide. Lava tubes and volcanic pits, the only underground spaces wide enough to allow access to the people, are just a small part of the subterranean environment which is mainly consistent of a vast network of cracks. The area covered by this environment has often been controversial, and currently tends to be considered as such all spaces under the soil surface. These habitats have very unique environmental characteristics, and are inhabited by a rich invertebrate fauna. A compilation of both published and unpublished information on the Cueva del Viento fauna has been made. The remains of extinct vertebrate animals found until date in this cave are also listed together with some birds not living nowadays on Tenerife. This work aims to value the work done by a number of scientists, which over many years and many visits*

*to this cave have opened the doors to future generations in the geological and biological knowledge of this unique ecosystem.*

**Keywords:** *cave fauna, subfossils, lava tube.*

## Introducción

La cueva del Viento se encuentra en el municipio de Icod de los Vinos (Tenerife, Islas Canarias). Este tubo volcánico se formó hace 27.000 años por lavas basálticas procedentes del volcán Pico Viejo, situado junto al Teide (Carracedo, 2008). De acuerdo con el G.E.T. Benisahare y el Wessex Caving Club, la cueva tiene 18,5 km topografiados hasta el momento, en tres niveles de galerías superpuestas. Todo ello le confiere ser la cavidad volcánica más larga de Europa y la quinta del Mundo. Destaca por sus características geomorfológicas, con una amplísima variedad de estructuras de origen primario (gotas de lava, terrazas laterales, cornisas, cascadas lávicas, etc.), así como por concreciones exógenas de diferente composición.

Para delimitar los diversos usos que podría darse a la cueva, fue delimitada en siete tramos.

- Cueva de los Piquetes
- Galería de Breveritas (superior e inferior)
- Galería de Belén
- Galería de Breveritas Profunda
- Cueva del Sobrado (superior e inferior)

La cavidad dispone además de siete bocas de entrada. El conjunto de galerías es transitable continuamente salvo en tres lugares, interceptadas por dos derrumbes y por una pared de mampostería construida para hacer una bodega.

Los tubos de lava son cavidades subterráneas frecuentes en territorios volcánicos basálticos jóvenes en los que, además, también hay simas y una amplia red de grietas, que junto con el denominado medio subterráneo superficial (MSS) (ver Figura 1) conforman unos hábitats con características ambientales muy singulares. En estos ambientes subterráneos habita una rica fauna invertebrada que se ha desarrollado independientemente a la del continente africano próximo, y cuyas especies son todas endémicas.

Las especies animales estrictamente cavernícolas (troglóbios o troglóbiontes) se han originado independientemente y son exclusivas de cada isla, o incluso de una zona dentro de la isla cuando existen barreras subterráneas que impiden su dispersión. Si no hay tales barreras, la misma especie puede estar presente en cuevas distantes, que, aunque aparentemente no estén conectadas entre sí, lo están de hecho por una red de grietas profundas, y sobre todo por el MSS, que permite la dispersión incluso en terrenos desprovistos de tubos volcánicos.

## El medio subterráneo terrestre

En el presente se tiene una visión amplia del medio subterráneo y se considera que toda cavidad, cualquiera que sea su tamaño (cuevas, tubos volcánicos, red de fisuras, microespacios,

cavidades artificiales, etc.) es un hábitat potencial para las especies subterráneas terrestres, siempre que cuente con los parámetros ambientales apropiados y disponga de fuentes de alimentación. Las cuevas y galerías no son sino una parte del ecosistema subterráneo, cuyas dimensiones internas permiten acceder a las personas; pero el medio subterráneo es mucho más extenso. Para distinguir los diferentes espacios existentes en el medio subterráneo de terrenos volcánicos Howarth (1973) acuñó los términos microcavernas (de pocos milímetros), mesocavernas (de pocos centímetros) y macrocavernas, estas últimas equivalentes a nuestro concepto de cueva. El ámbito que abarca el medio subterráneo ha sido frecuentemente objeto de controversia, y actualmente se tiende a considerar todo espacio existente bajo la superficie del suelo. Pero es importante distinguir entre el medio endógeno o edáfico, que incluye el suelo en sí (horizontes A y B) y es la capa más superficial, y el medio hipogeo constituido por la roca madre subyacente (Fig. 1). La distinción es significativa, dadas las condiciones ambientales diferentes en ambos medios, y también la fauna que los ocupa. Dentro del medio hipogeo hay que distinguir entre el medio subterráneo profundo (en adelante MSP) formado por la roca madre compacta, y el denominado medio subterráneo superficial (en lo sucesivo MSS) constituido por una capa de roca fragmentada interpuesta entre roca madre compacta y el suelo edáfico.

El MSS puede tener varios orígenes y, al quedar aislado del medio exterior por una superficie de capa de suelo, puede tener las condiciones ambientales parecidas al hábitat cavernícola. El descubrimiento del MSS, inicialmente en Francia (Juberthie *et al.*, 1980) y más tarde en otros

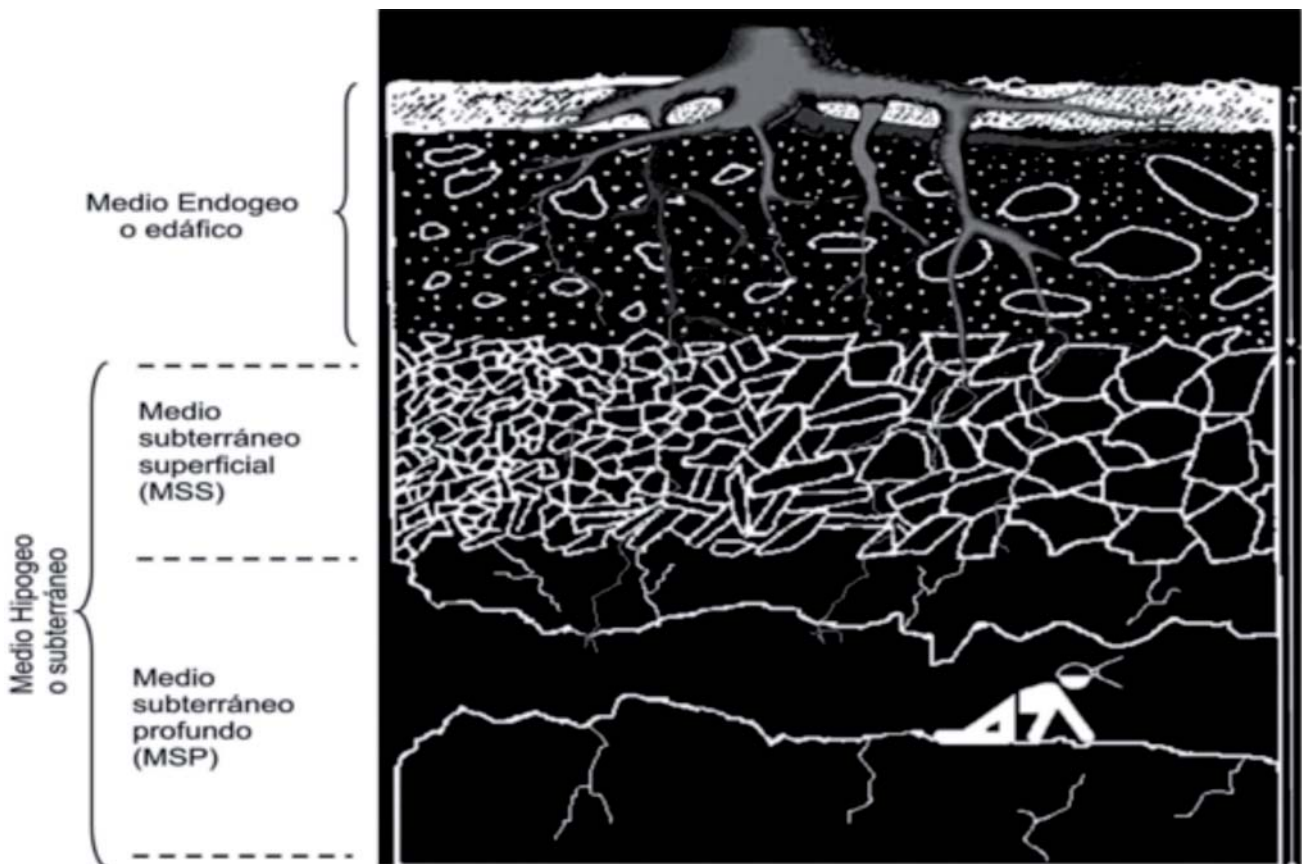


Figura 1. Situación del medio endógeno o edáfico, y del medio hipogeo o subterráneo

lugares, incluyendo Canarias (Oromí et al., 1986), sirvió no solo para ampliar notablemente los límites y la extensión del medio subterráneo, sino que además contribuyó a explicar el desplazamiento y la dispersión de las especies bajo tierra.

Las condiciones ambientales en el MSP son muy marcadas, conformando una serie de hábitats muy peculiares. Existe una oscuridad total perpetua; una elevada humedad relativa; en ocasiones hay elevadas concentraciones de dióxido de carbono y otras mezclas de gases (incluyendo gases letales); el contenido de oxígeno disuelto en las aguas es bajo.

### Proceso colonizador de las lavas estériles

Curiosamente es la fauna lavícola la que coloniza las lavas abióticas después de las erupciones, la que también ocupa inicialmente los tubos volcánicos muy recientes y secos, para ir siendo sustituida por la fauna realmente cavernícola a medida que van surgiendo transformaciones debidas a la sucesión ecológica.

Con el paso del tiempo, serán las sucesivas etapas del proceso de sucesión ecológica las que irán transformando las lavas estériles en terrenos más maduros, donde se formará un suelo y finalmente se asentará la vegetación potencial de la zona y su fauna climácica. Las primeras etapas de la sucesión vegetal las marca el asentamiento de algunos líquenes y algunos briófitos. Estos productores de alimentos proporcionan nuevas posibilidades para algunas especies como los colémbolos de los géneros *Entomobrya* y *Pseudosinella*, que pueden alimentarse de ellos (Martín y Oromí 1990).

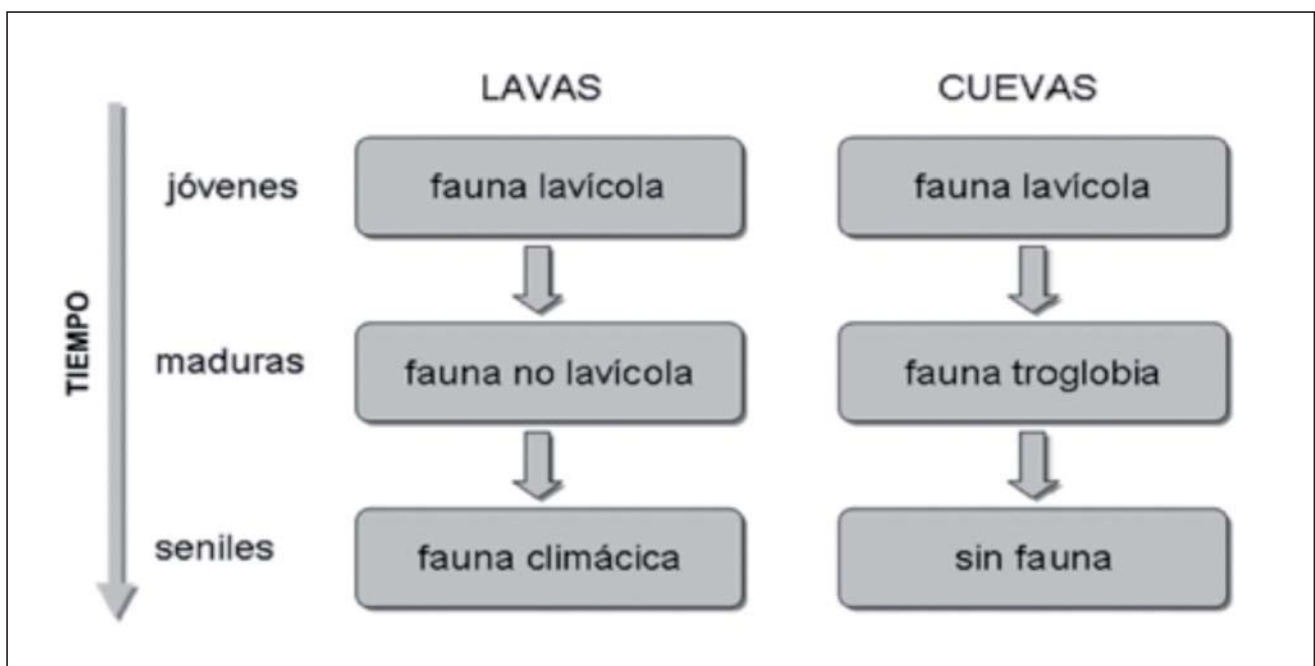


Figura 2. Representación esquemática de la sucesión animal que tiene lugar en las lavas y cuevas, en ambos casos iniciada por la fauna lavícola



Sin embargo, a medida que las plantas comienzan a colonizar las lavas, empieza a reducirse la presencia de lavícolas. El declive de la fauna lavícola se debe a la competencia que ejerce la fauna climácica que se hará dominante con el asentamiento de las plantas. Al irse colonizando la superficie de la lava por plantas, los lavícolas se internan en las cuevas subyacentes, todavía secas, donde las nuevas especies invasoras no pueden penetrar por la escasez de alimento.

Cuando en fases más avanzadas la lava se cubre de suelo y abundante vegetación, la cueva se aísla mejor del medio exterior y aparecen las condiciones extremas de alta humedad y estabilidad térmica, y es colonizada por especies cavernícolas preexistentes en el medio subterráneo circundante, que desplazarán a los lavícolas de la cueva (Oromí, 2010). Así, tubos volcánicos de pocos cientos de años pueden estar ocupados por troglobios originados evolutivamente mucho antes en otros medios subterráneos. Estas cavidades, a largo plazo, acabarán por colmatarse y destruirse, desapareciendo finalmente de ellas la fauna adaptada. Así pues, las especies lavícolas son primocolonizadoras tanto de lavas como de cuevas recientes, pero en estas últimas permanecerán más tiempo porque los cambios de tipo trófico tardan más en aparecer que en la superficie (Ashmole *et al.*, 1992; Oromí, 2010) (fig. 2).

La principal fuente de alimento con que cuentan los habitantes de los tubos volcánicos es la materia orgánica procedente de la superficie, fácilmente transportada hasta ellos por el agua y



*Figura 3. Raíces pendiendo del techo en Cueva del Viento Sobrado superior*

la gravedad gracias a la estrecha y agrietada capa de roca que separa la cueva de la superficie. La fauna adventicia, tanto los propios organismos como sus cadáveres y sus producciones, también forman parte del aporte de materia orgánica disponible para los cavernícolas.

Los tubos volcánicos deben ser considerados como estructuras geológicas efímeras puesto que se construyen a veces en pocas horas o días, y desde un principio se inicia su proceso de destrucción. El techo de los tubos, al estar muy próximo a la superficie, puede ser fácilmente erosionado y desplomarse, formando las entradas que en Canarias se conocen como “jameos”. Con el tiempo el propio tubo colapsa o se colmata con arcillas, suponiendo el final de la cavidad. Howarth (1973) calculó que en Hawaii los tubos volcánicos en zonas de escasa pluviometría podrían alcanzar una edad máxima de 500.000 años antes de su destrucción, y bastante menos en zonas húmedas. En Canarias podrán aplicarse valores similares, aunque se conocen algunos tubos bastante más antiguos (Fernández et al., 2015).

La proximidad de los tubos a la superficie permite que con frecuencia las porciones terminales de raíces de las plantas de la superficie atraviesen el techo de la cavidad, lo que supone un aporte importante de materia orgánica para la fauna de la caverna (fig. 3).

### **Adaptaciones morfológicas: troglomorfismo**

Para la fauna subterránea se utiliza una terminología especializada que, desde las propuestas iniciales de Schiner (1854) y Racovitza (1907) hasta hoy (Sket, 2008), han sufrido ciertas variaciones. Actualmente se denomina troglobios o troglobiontes a los animales que han evolucionado adaptándose a la vida en el medio hipogeo, donde llevan a cabo todo su ciclo vital, no pudiendo salir nunca al exterior; son residentes obligados y permanentes en este medio (ver Figs. 4 y 5). Son especies que proceden de ancestros que habitaban el medio epigeo, y que se han introducido paulatinamente en el medio hipogeo tras un largo proceso evolutivo. Una



Figura 4. *Domene vulcania*, una de las especies más troglomorfas de Canarias. (Fotografía: P. Oromi)





*Figura 5. Macho de Troglolyphantes oromii. (Fotografía: P. Oromí)*

vez originados, podrán ir ocupando distintos medios hipogeos que en terrenos volcánicos se forman y destruyen con relativa rapidez.

Se distinguen de los denominados troglófilos, que suelen vivir en cuevas, pero pueden salir de ellas para dispersarse o para otros menesteres. Se suele distinguir entre eutroglófilos cuando



*Figura 6. Meta bourneti es una araña típicamente troglófila, que conserva sus ojos y pigmentación. (Foto: A. Lainez)*

son residentes permanentes pero facultativos de hábitats subterráneos; y subtroglófilos los que, bien siendo obligados o facultativos de medio subterráneo, están asociados con medios epigeos en parte de su ciclo vital (p. ej. los murciélagos, que deben alimentarse en el exterior).

Finalmente, los troglóxenos se hallan en el medio subterráneo de forma accidental y esporádica, y no presentan ningún tipo de carácter o modificación adaptativa particular.

Entre los representantes de la fauna subterránea de las islas Canarias, la araña *Meta bourneti* (Fig. 6) constituiría un ejemplo de troglófilo, y las cucarachas *Loboptera cavernicola* y *Loboptera subterranea* de troglobios. Los troglóxenos siempre serán fauna epígea y no deberían considerarse representantes de la fauna subterránea por su condición de ocasionales.

## La fauna hipogea terrestre de las Islas Canarias

La diversidad de fauna troglobia conocida en cada isla depende de las características geológicas, edafológicas y climáticas, así como del esfuerzo de muestreo realizado en cada una (ver tabla I). Desde el punto de vista geológico es más importante la edad de las rocas en superficie que la edad absoluta de la isla, puesto que los terrenos modernos tienen mayor abundancia de subsuelos aptos para construir un medio hipogeo habitable (Oromí et al., 1991; Oromí y Martín, 1992, Oromí, 2004). Los ambientes subterráneos de terrenos volcánicos más antiguos (generalmente MSS de coluvios y de roca meteorizada) son de extensión mucho más limitada, resultando en general más pobres en fauna troglobia que los de terrenos modernos (cuevas y MSS volcánico). La velocidad de adquisición de caracteres troglomorfos no depende solamente del tiempo transcurrido, sino también de la presión de selección a que está sometida una especie dependiendo del tipo de hábitat subterráneo que ocupe.

El primer troglobio terrestre descubierto en los tubos volcánicos de Canarias se encontró en la Cueva del Viento. Se trataba de una cucaracha anoftalma y despigmentada que más tarde se describió como *Loboptera subterranea* (ver Martín y Oromí, 1987). Sin embargo, este descubrimiento, realizado en la década de 1960 por un grupo de espeleólogos aficionados, no tuvo ninguna transcendencia científica, y antes de que dicha especie fuera estudiada y descrita, ya se conocían otros troglobios de cuevas de El Hierro y de Tenerife.

En 1982 la cueva del Viento fue objeto de un minucioso estudio por parte de biólogos de la Universidad de la Laguna (ver Martín, 1984) en el que por primera vez se hizo un análisis de tipo ecológico. La organización de la comunidad animal se describió atendiendo a sus valores de riqueza específica, diversidad y grupos tróficos dominantes, comprobándose la importancia de los saprófagos como seres más abundantes.

El estudio indicado se realizó sólo en la llamada "cueva Superior", más concreto en las galerías de Belén, Breveritas Superior, Breveritas Inferior y Breveritas Profunda. En total se descubrieron 37 especies animales, entre ellas nueve troglobias. En 1987 se llevó a cabo un nuevo estudio biológico de la cueva, cuyos resultados permitieron realizar un catálogo de puesta al día de las especies conocidas de la cueva.

Hasta 1994 se conocían 23 troglobios, de los cuales 20 eran especies muy raras, con poblaciones poco densas. En la actualidad se tiene registrados un total de 92 especies en toda la cueva. De estas 33 son troglobios, 25 son troglófilos, 34 troglóxenos.

Desde el punto de vista cualitativo, la categoría trófica dominante es la de los zoófagos con 47 especies; luego sigue la de los saprófagos con 35 especies, rizófagos con cinco, omnívoros con tres, y herbívoro con una. Pero desde el punto de vista cuantitativo (número de individuos), los saprófagos son el grupo dominante, y dentro de estos destacan los troglófilos. Esto evidencia la fuerte relación de dependencia que hay entre el ecosistema subterráneo y los más superficiales, endogeo y epigeo.

	<b>Familia</b>	<b>Especies</b>	<b>Caracterización ecológica y trófica</b>	
Oligoquetos	Lumbricidae	Gen. sp. indet.	trogloxeno, saprófago	
Gasterópodos	Zonitidae	Oxychilus alliarius (Miller)	troglófilo, omnívoro	
Pseudoescopiones	Syarinidae	Microcreagrina subterranea Mahnert	troglobio, zoófago	
Araneidos	Chthoniidae	Paraliochthonius setiger (Mahnert)	troglobio, zoófago	
		Paraliochthonius superstes (Mahnert)	troglobio, zoófago	
		Chthonius ischnocheles (Hermann)	troglófilo, zoófago	
		Geogarypus canariensis (Tullgren)	troglófilo, zoófago	
	Dysderidae	Dysdera ambulotenta Ribera, Ferr. y Blasco	troglobio, zoófago	
		Dysdera esquiveli Ribera y Blasco Dysdera labradaensis Wunderlich	troglobio, zoófago troglobio, zoófago	
Araneidos	Dysderidae	Dysdera sibyllina Arnedo	troglobio, zoófago	
		Dysdera unguimmanis Ribera, Ferr. y Blasco	troglobio, zoófago	
		Dysdera volcania Ribera, Ferr. y Blasco	troglófilo, zoófago	
	Liocranidae	Agraecina canariensis Wunderlich	troglobio, zoófago	
	Linyphiidae	Metopobactrus cavernicola Wunderlich	troglobio, zoófago	
		Troglohyphantes oromii (Ribera y Blasco)	troglobio, zoófago	
		Walckenaeria cavernicola Wunderlich	troglobio, zoófago	
		Palliduphantes rubens (Wunderlich)	trogloxeno, zoófago	
		Nesticidae	Canarionesticus*quadridentatus Wunderlich	troglófilo, zoófago
		Eidmanella pallida (Emerton)	troglófilo, zoófago	
		Tetragnathidae	Meta bourneti Simon	troglófilo, zoófago
	Sparassidae	Olios canariensis (Lucas)	trogloxeno, zoófago	
		Pholcus opilionoides (Schrank)	troglófilo, zoófago	
Pholcidae	Pholcus ornatus Bosenberg	troglófilo, zoófago		
	Spermophorides reventoni Wunderlich	troglófilo, zoófago		
Diplópodos	Polydesmidae	Propolydesmus laevidentatus Loksa	troglófilo, saprófago	
	Blaniulidae	Blaniulus guttulatus (Fabricius)	troglófilo, rizófago	
		Choneiulus palmatus (Nemec)	trogloxeno, saprófago	
	Glomeridae	Glomeris speobia Golovatch y Enghoff	troglobio, saprófago	
	Julidae	Dolichoilulus ypsilon Enghoff	troglobio, saprófago	
Ommatoiulus moreleti (Lucas)		trogloxeno, saprófago		

Sínfilos  Quilópodos	Scutigerellidae	Scutigerella armata Hansen	trogloxeno, zoófago
	Scutigeridae	Scutigera coleoptrata (L.)	troglófilo, zoófago
	Cryptopsidae	Cryptops hortensis atlantis Pocock	troglófilo, zoófago
	Geophilidae	Geophilus carpophagus Leach	trogloxeno, zoófago
	Himantariidae	Haplophilus dimidiatus Meinert	troglófilo, zoófago
	Lithobiidae	Lithobius speleovulcanus Serra	troglobio, zoófago
		Lithobius pilicornis Newport	troglófilo, zoófago
	Porcellionidae	Porcellio martini Dalens	troglobio, saprófago
Porcellionides sp.		troglófilo, saprófago	
Isópodos	Armadillidae	Venezillo tenerifensis Dalens	troglobio, saprófago
	Armadillidiidae	Eluma caelata (Miers)	trogloxeno, saprófago
	Trichoniscidae	Trichoniscus bassoti Vandel	troglobio, saprófago
Dipluros	Campodeidae	Campodea sp.	trogloxeno, saprófago
	Colémbolos	Arrhopalitidae	Arrhopalites sericus Gisin
Sminthuridae		Disparrhopalites patrizii (Cass. y Del.)	trogloxeno, saprófago
		Troglopedetes cavernicola Delamare	troglobio, saprófago
Paronellidae		Troglopedetes vandeli Cassagnau y Delamare	troglobio, saprófago
		Pseudosinella sp.	trogloxeno, saprófago
Entomobryidae		Lepidocyrtus curvicollis Gisin	trogloxeno, saprófago
		Heteromurus nitidus (Templeton)	trogloxeno, saprófago
Hypogastruridae		Hypogastrura denticulata (Bagnal)	trogloxeno, saprófago
Onychiuridae	Onychiurus ghidini Denis	trogloxeno, saprófago	
Isotomidae	Folsomia candida Willem	trogloxeno, saprófago	
Blatarios	Blattellidae	Loboptera subterranea Martín y Oromí	troglobio, omnívoro
		Loboptera troglobia Izquierdo y Martín	troglobio, omnívoro
Psocópteros	Psyllipsocidae	Psyllipsocus ramburii Selys-Longchamps	troglófilo, saprófago
Hemípteros	Cixiidae	Tachycixius lavatubus Remane y Hoch	troglobio, rizófago
Coleópteros	Carabidae	Lymnastis subovatus Machado	troglobio, zoófago
		Lymnastis thoracicus Machado	troglobio, zoófago
		Spelaeovulcania canariensis Machado	troglobio, zoófago
		Wolltinerfia* martini (Machado)	troglobio, zoófago



Coleópteros	Carabidae	Wolltinerfia* tenerifae (Machado)	troglobio, zoófago
		Dicrodontus brunneus Dej.	trogloxeno, zoófago
		Domene alticola Oromí y Hernández	troglobio, zoófago
		Domene vulcanica Oromí y Hernández	troglobio, zoófago
		Alevonota oromii Assing	troglobio, zoófago
		Alevonota outereloi Gamarra y Hernández	troglobio, zoófago
	Staphylinidae	Athena sp.	trogloxeno, zoófago
		Aloconota philonthoides (Wollaston)	trogloxeno, zoófago
		Megalinus hesperius (Erichson)	trogloxeno, zoófago
		Quedius simplicifrons Fairmaire	trogloxeno, zoófago
Sepedophilus lusitanicus Hammond		trogloxeno, zoófago	
Oromia* hephaestos Zarazaga		troglobio, rizófago	
Curculionidae	Laparocerus ellipticus Woll	trogloxeno, herbívoro	
	Alloplinthus musicus (Wollaston)	trogloxeno, fitófago	
Lepidópteros	Bothrideridae	Anommatus duodecimstriatus (Müller)	trogloxeno, saprófago
	Cryptophagidae	Cryptophagus impressus Wollaston	trogloxeno, zoófago
		Cryptophagus distinguendus Sturm	troglófilo, saprófago
	Monotomidae	Rhizophagus ferrugineus Paykull	troglófilo, zoófago
	Noctuidae	Scharankia costaestrigalis (Stephens)	troglófilo, rizófago
		Hypena obsitalis Hübner	trogloxeno, rizófago
Dípteros	Psychodidae	Pericoma sp.	trogloxeno, saprófago
	Trichoceridae	Trichocera sp.	troglófilo, saprófago
	Sciaridae	Gen. sp. indet.	trogloxeno, saprófago
		Megaselia bistruncata Schmitz	troglófilo, saprófago
	Phoridae	Megaselia rufipes Meigen	troglófilo, saprófago
		Megaselia sp.	troglófilo, saprófago
	Heleomyzidae	Suillia oceana Becker	trogloxeno, saprófago
	Calliphoridae	Calliphora vicina Rob.Desv.	trogloxeno, saprófago
Sphaeroceridae	Leptocera caenosa (Rondani)	trogloxeno, saprófago	
Himenópteros	Braconidae	Aspilota sp.	trogloxeno, zoófago

*Tabla 1. Catálogo faunístico de las especies conocidas de la Cueva del Viento. (\*): género endémico canario. Datos de Martín (1999), Oromí et al. (2001) y propios*

## Vertebrados subfósiles y restos de vertebrados vivos

En Canarias, al igual que en otros archipiélagos volcánicos, las cavidades volcánicas son los mejores yacimientos paleontológicos de vertebrados. En 1994 se da a conocer el hallazgo de un nuevo e importante yacimiento de vertebrados fósiles (Rando y López, 1996) durante 10 visitas, en las que fueron recolectados restos óseos en la cueva del Viento, en un depósito que se encuentra en la galería de los Pájaros, de unos 600 m de longitud, que parte de la denominada sala de la Cruz (Breveritas Superior). La acumulación de restos se produjo por la existencia de una antigua boca (probablemente la de la galería Belén), que se sitúa a unos 700 m s.n.m. y que actualmente se encuentra sepultada por rocas y sedimentos. En total se recolectaron restos de más de 200 individuos distribuidos a lo largo de toda la galería. De ellos el 6% corresponde a reptiles, el 48% a aves y el 46 % a mamíferos (ver Tabla II). Todos los restos han sido depositados en la Colección de Vertebrados del Dpto. de Biología Animal de la Universidad de la Laguna.

Los aborígenes (cuya llegada se estima hace unos 2500 años) introdujeron cabras, dos clases de perros, cochinos, y probablemente ratones. El efecto de estas especies introducidas, e incluso la propia caza por los pobladores afectaron a las especies nativas. La posterior reducción de su posible hábitat, el bosque de laurisilva, y la introducción de predadores terrestres en la isla, parecen ser las razones de su extinción (Rando et al., 1999). El segundo gran impacto fue la llegada de los europeos en el siglo XV, con la transformación de zonas boscosas en tierras de cultivo, y sobre todo la llegada con ellos de ratas y gatos.

Grupos	Nombre científico	Nombre común
Mamíferos	*Canariomys bravoii Crusafont y Petter	Rata gigante de Tenerife
	Rattus rattus (Linnaeus)	Rata negra
	Oryctolagus cuniculus Linnaeus	Conejo
	Canis familiaris Linnaeus	Perro
	Mus musculus Linnaeus	Ratón
Reptiles	*Gallotia goliath (Mertens)	Lagarto gigante de Tenerife
	*Coturnix gomerae Jaime et al.	Codorniz de Canarias
	*Emberiza alcoveri Rando et al.	Escribano patilargo.
Aves	Buteo buteo (Linnaeus)	Aguililla, ratonero
	Accipiter nisus (Linnaeus)	Gavilán
	**Clamydotis undulata (Jacquin)	Hubara
	**Pyrhocorax pyrrhocorax (Linnaeus)	Chova piquirroja, graja
	Columba sp.	Paloma
	Turdus sp.	Tordo, mirlo

Tabla 2. Restos óseos de animales encontrados en la Cueva del Viento (de varios autores)

## Agradecimientos

A los compañeros de la Cueva del Viento. A Juan Carlos Rando por proveer información sobre restos de vertebrados.

## Referencias

- Ashmole, N.P., Oromí, P., Ashmole, M.J. y Martín, J.L. 1992. Primary faunal succession in volcanic terrain: lava and cave studies in the Canary Islands. *Biological Journal Linnean Society*, 46: 207-234.
- Carracedo J.C., Baldiola, E., Paris, R., Torrado, F., González, A. y Socorro, J.S. 2008. *Erupciones del edificio central*. (cap. 12) En: Carracedo, J.C. (Ed). El Volcán Teide. Tomo 3: Análisis de las erupciones y excursiones comentadas. Ediciones y Promociones Saquiro, S.L. Santa Cruz de Tenerife. 109-195.
- Fernández, O., Naranjo, M. y Martín, S. 2015. Cueva de Aslobas: hallazgo del tubo volcánico más antiguo de las islas Canarias. *1a Convenció Internacional d'Espeleologia Barcelona 2015*.
- Hernández, J.J., Oromí, P., Lainez, A., Ortega, G., Pérez, A.E., López, J.S., Medina, A.L., Izquierdo, I., Sala, L., Zurita, N., Rosales, M., Pérez, F. y Martín, J.L. 1995. *Catálogo espeleológico de Tenerife*. Cabildo de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife, 168 pp.
- Howarth, F.G. 1973. The cavernicolous fauna of Hawaiian lava tubes. 1. Introduction. *Pacific Insects*, 15 (1): 139-151.
- Juberthie, C., Delay, B. y Bouillon, M. 1980. Extension du milieu souterrain en zone non-calcaire: description d'un nouveau milieu et de son peuplement par les coléoptères troglobies. *Mémoires de Biospéologie*, 7: 19-52.
- Martín, J.L. 1984. *El medio cavernícola en las Islas Canarias. Estudio ecológico de dos cavidades volcánicas de la isla de Tenerife: La Cueva del Viento y la Sima Robada*. Memoria de Licenciatura depositada en el Dpto. de Biología Animal de la Universidad de la Laguna (No publicada): 1-141.
- Martín, J.L. y Oromí, P. 1990. Fauna invertebrada de las lavas del Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote, Islas Canarias). *Ecología*, 4: 297-312.
- Oromí, P., Medina, A.L. y Tejedor, M.L. 1986. On the existence of a superficial underground compartment in the Canary Islands. *Act. IX Congr. Int. Espeleol. Barcelona*, 2: 147-151.
- Oromí, P. 2010. La fauna subterránea de Canarias: un viaje desde las lavas hasta las cuevas. Pp. 63-98. En J. Afonso Carrillo (Ed.) *Volcanes, mensajeros del fuego, creadores de vida, forjadores del paisaje*. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. Puerto de la Cruz.
- Racovitza, E. 1907. Sur les problèmes biospéologiques. *Archives Zoologie Expérimentale Générale*, 4 (6): 371-488.
- Rando, J.C. y López, M. 1996. Un nuevo yacimiento de vertebrados fósiles en Tenerife (islas Canarias). *7th. International Symposium on Vulcanospeleology*. Santa Cruz de la Palma. 171-173.
- Rando, J.C., Alcover, J.A. y Illera, J.C. 2010. Disentangling ancient interactions: a new extinct Passerine provides insights on character displacement among extinct and extant island finches. *PLoS ONE* 5 (9): 1-11.

- Schiner. J.R. 1854. *Fauna der Adelsberg. Lüger und Magdalener-Grotte. Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Lüe, Planina und Laas*. A. Schmidl Ed., Wien.
- Sket, B. 2008. Can we agree on an ecological classification of subterranean animals? *Journal Natural History*, 42 (21-22): 1549-1563.
- Varios autores. 1995. *La Cueva del Viento*. (Coord. P. Oromí). Consejería de Política Territorial, Viceconsejería de Medio Ambiente. 98 pp.

## Las cuevas turísticas en las Islas Canarias, su importancia y distribución

A. Láinez Concepción <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Responsable-Guía Intérprete de la Cueva del Viento, Icod de los Vinos, Tenerife. Centro de Visitantes Cueva del Viento, Camino los Piquetes nº 51. Icod de los Vinos. Cp: 38480. Santa Cruz de Tenerife, [alfrelainez@hotmail.com](mailto:alfrelainez@hotmail.com)

---

### RESUMEN

En España el gran porcentaje de cavidades turísticas están representadas por formaciones de tipo kárstico, donde abundan los espeleotemas de estalactitas, estalagmitas y sus ríos subterráneos que las han formado a través de un proceso geológico de erosión y descomposición química. Pero hay otro gran tipo de variedad únicas en el mundo y son las formadas por los volcanes y sus lavas, que son los tubos volcánicos. El archipiélago canario es muy rico y representativo en este tipo de cavidades, destacando entre ellas, la Cueva del Viento, situada en la isla de Tenerife, con 18,5 Km. topografiados, es a su vez la 5ª cavidad volcánica más grande del mundo después de las otras 4 que hay en Hawái. A través del equipo humano que formamos la Cueva del Viento y con el apoyo de los Organismos Oficiales y la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (A.C.T.E), se está realizando un gran trabajo con la misma, que se ve refrendado en sus logros, premios y número de visitantes. Esta labor se está intentando también llevar al resto de cavidades turísticas canarias que tenemos en nuestro archipiélago. Entre ellas destaca por ser la pionera y por su gran número de visitantes, La Cueva de los Verdes y Los Jameos del Agua, en la isla de Lanzarote. La Cueva del Llano en la isla de Fuerteventura, uno de los tubos volcánicos más antiguos de Canarias. La Cueva de Guinea, en la isla de El Hierro, un pequeño tubo volcánico, representativo en el Municipio de Frontera. Y la Cueva de Las Palomas o Todoque, en la isla de La Palma, última cavidad volcánica que abrirá sus puertas al público próximamente en el municipio de Los Llanos de Aridane. Todas estas cavidades volcánicas nos hablan de la importancia y riqueza que tiene el archipiélago canario en su mundo subterráneo. Es una labor de todos los amantes a la espeleología y naturaleza, darlo a conocer al visitante ávido en emociones, sensaciones y respeto al medio natural. En un futuro próximo se podrán habilitar algunos tubos volcánicos más en el archipiélago canario.

**Palabras clave:** Cavidades volcánicas, cueva del viento, cuevas turísticas, lava, Tenerife.

## *The show caves in the Canary Islands, its importance and distribution*

### ABSTRACT

*In Spain the large percentage of tourist caves are represented by karstic formations made by numerous speleothems stalactites, stalagmites and underground rivers, that have created them through a geological process of erosion and chemical breakdown. But there is another type of caves of unique kind in the world, formed by volcanoes and lavas, known as volcanic or lava tubes. The Canarian archipelago is very representative in this type of caves, highlighting among them, la Cueva del Viento, located on the island of Tenerife, with 18.5 Km in extend, is itself the 5th largest volcanic cavity in the world after prior four located in Hawaii. Through the human team that formed the Cueva del Viento and with the support of the Government Agencies and the Association of Spanish Tourist Caves (A.C.T.E.), is being done a great job with it, which is endorsed in their achievements, awards and number of visitors. This work is also trying to take the rest of the Canary Islands tourist caves we have in our archipelago. Among them Wind Cave*

*stands out as a pioneer and its large number of visitors, La Cueva de los Verdes and Jameos del Agua, on the island of Lanzarote. La Cueva del Llano on the island of Fuerteventura, one of the oldest volcanic tubes of the Canaries. La Cueva de Guinea on the island of El Hierro, a small volcanic tube, in the municipality of Frontera. And the Cueva de Las Palomas or Todoque, on the island of La Palma, the last volcanic cave that will open its doors to public soon in the town of Los Llanos. All these volcanic caves speak of the importance and richness of the Canary Islands underworld. It is a task for all lovers of caving and nature, make it known to avid visitor emotions, feelings and respect for the natural environment. In the near future we may enable some more volcanic tubes in the Canary Islands.*

**Key words:** *Cueva del Viento., show caves, lava, Tenerife, volcanic caves.*

## Introducción

El archipiélago canario conocido a nivel mundial por su amplia riqueza natural y geológica, entre las que destaca tener cuatro parques nacionales de los 15 que tiene el estado español, además varias islas han sido declaradas Reserva de la Biosfera. Y estos últimos años se han nombrado a las islas de El Hierro y Lanzarote con su archipiélago Chinijo como Geoparques a nivel mundial. Todo esto nos habla de la gran importancia que tiene este archipiélago canario y se está consagrando como un destino de Geoturismo a nivel internacional.

La naturaleza volcánica de las islas es importante, y sus volcanes han labrado la configuración de las islas, y en las entrañas de sus lavas han formado una variedad única en el mundo de tubos volcánicos, (Láinez y Rijo, 1990), entre ellos destaca la Cueva del Viento, en Icod de los Vinos, Tenerife, 5ª cavidad volcánica más grande del mundo después de las otras 4 que están en Hawaii (Socorro, *et al.*, 2010). Y otras muchas más que han sido exploradas, topografiadas y estudiadas, en el resto de islas canarias, por parte de los espeleólogos del Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare, otros colectivos espeleológicos, bioespeleólogos de la Universidad de La Laguna y otros científicos.

Toda esta gran importancia de cavidades volcánicas, (Láinez, *et al.*, 2006) ha hecho que se abran al público algunas de estas grandes cavidades para que se conozca el mundo subterráneo volcánico. En la actualidad en Canarias están abiertas al público La Cueva de los Verdes y Jameos del Agua en La isla de Lanzarote. Cueva del Llano en la isla de Fuerteventura. Cueva del Viento en la isla de Tenerife. Cueva de Guinea en la isla de El Hierro. Y dentro de muy poco se abrirá la Cueva de Las Palomas, en la isla de La Palma. Hay otras iniciativas para hacer algunas más turísticas como la Cueva de Don Justo en la isla de El Hierro o Cueva de San Marcos en la isla de Tenerife.

Las islas con gran interés espeleológico tienen una amplia representación de este tipo de cavidades, en cambio otras islas con un vulcanismo más antiguo como las de Gran Canaria y la Gomera, tienen pocos tubos volcánicos debido a su colmatación por su antigüedad geológica.

De todas estas cavidades volcánicas en el archipiélago canario, solo la Cueva del Viento, en Tenerife, está asociada a la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (A.C.T.E.) desde su apertura en el año 2008, realizando una gran labor en el campo del conocimiento del medio natural y subterráneo, por parte del equipo humano y administraciones, que ha sido refrendado



por los numerosos visitantes con los premios de ganadores de excelencia por el importante buscador internacional Tripadvisor en los años 2015 y 2016.

Esto nos hace ver la gran relevancia que tiene a nivel mundial las cuevas turísticas volcánicas que tenemos en nuestro estado español y concretamente en el archipiélago canario, que son visitadas anualmente por más de un millón de turistas, y el trabajo que tenemos que realizar entre todos, por darlas a conocer, protegerlas y nombrarlas patrimonio natural de la humanidad.

## Distribución de las cuevas turísticas por islas

### Lanzarote: Cueva de los Verdes

Dentro del complejo de la Cueva de los Jameos con 7,6 km. de desarrollo, se encuentra la Cueva de los Verdes, que es un tramo de este tubo volcánico. Ubicado en el paraje natural del volcán de la corona, que no es más que la abertura o boca del terreno que permite el acceso a las diferentes entradas, en las que están otros tramos como los Jameos de Arriba, Jameo del Puente Soto, Jameo de la Puerta Falsa, Jameo de la Gente, Jameo Redondo, Jameo Cumplido, Cueva de los Verdes, Cueva de los 7 Lagos, Jameos del Agua, Jameo Trasero, y su continuación

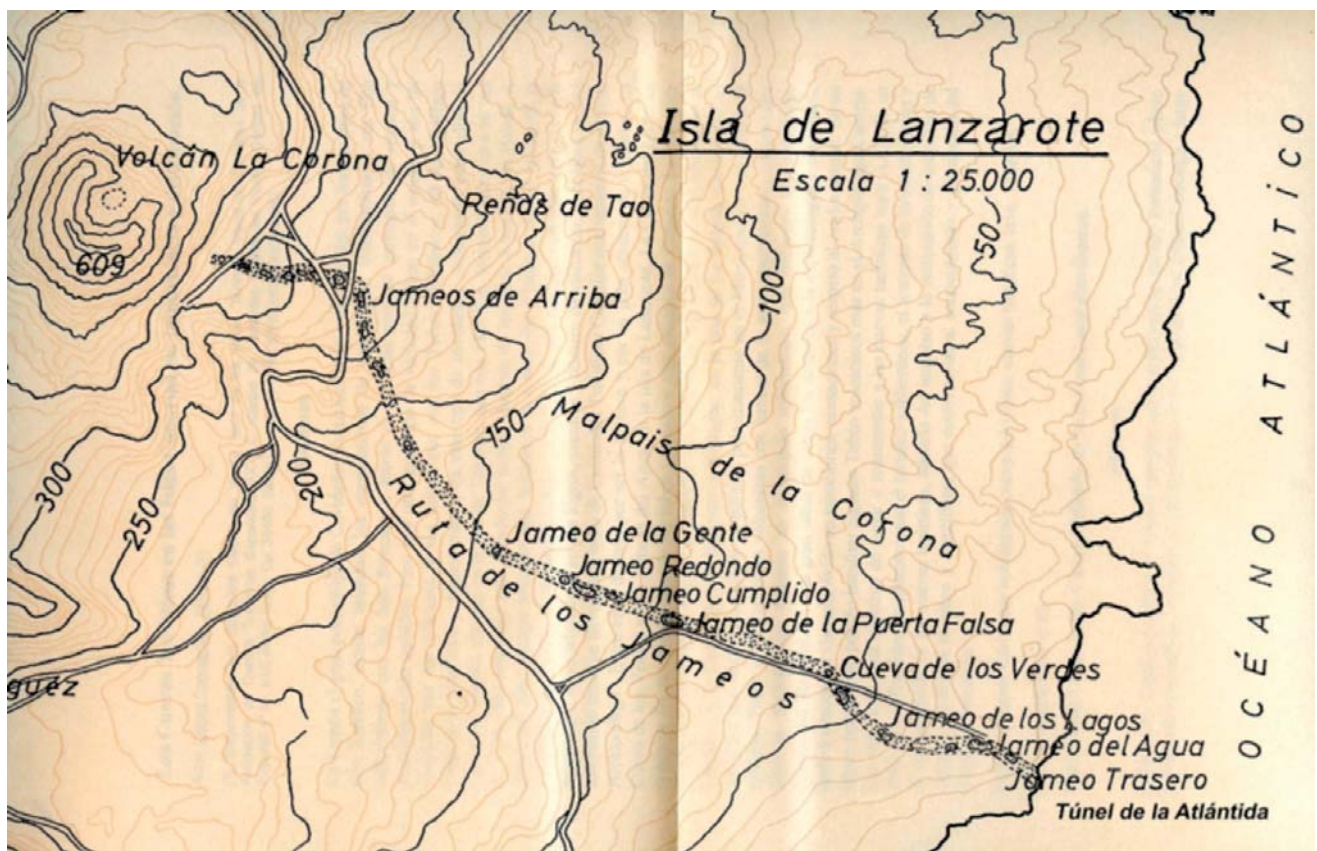


Figura 1. Cueva de Los Jameos, con las diferentes entradas, una de ellas la Cueva de los Verdes. Lanzarote. (Bravo, 1964)

bajo el mar a través del Túnel de la Atlántida (Bravo, 1964). Está situada en el norte de la isla, en el municipio de Haría.

El tubo volcánico se formó por grandes coladas basálticas procedentes del Volcán de la Corona, una vez vaciado el tubo por la lava, se produjeron numerosos hundimientos en su techo, que los aborígenes lo denominaron "jameos".

Unos de los últimos trabajos de datación de las lavas que formaron la Cueva de los Verdes, (Carracedo, *et al.*, 2003), han dado una edad de  $21 \pm 6,5$  Ka, según dicho estudio se da importancia a que la formación del tubo de los Jameos es un raro ejemplo de coincidencia de una erupción con el último periodo de glaciación, y pone de manifiesto la presencia en Canarias de importantes descensos del nivel marino en correspondencia con los cambios climáticos globales.



Figura 2. Entrada principal de la Cueva de Los Verdes, Lanzarote. (Fotografía: A. Láinez)

Además de esta relevante característica geológica, que hace del tramo final del tubo el más notable ejemplo de interfaz marítimo-cavernícola del archipiélago de la Macaronesia, no menos destacada es la importancia histórica que la Cueva de los Verdes ha tenido en la isla de Lanzarote, sobre todo en los siglos XVI y XVII, por el azote e invasiones de los piratas desde la costa norteafricana. Varios autores recogen en las crónicas de la época, como los sinuosos pasadizos de la Cueva de los Verdes sirvieron como escondite y refugio a la diezmada población insular cuando se producían estos hechos. El relato de los mismos se introduce en los comentarios que los guías hacen del espectacular recorrido de un kilómetro de desarrollo por sus diferentes pisos, apreciándose secciones de hasta 25 metros de diámetro en las que es posible disfrutar de una variada muestra de fenómenos y espeleotemas volcánicos. Este reco-



rido, es fruto del gran artista lanzaroteño Jesús Soto, fue inaugurada en febrero de 1964 por el Cabildo Insular de Lanzarote y se optó por el modelo de adecuar un sendero de cemento con algunos tramos de sustrato original e iluminación y música ambiental. Los turistas, sin necesidad de equipamiento alguno, realizan en unos 45 minutos un recorrido guiado circular cuyas bocas de entrada y salida se encuentran muy próximas en el interior de un gran jameo donde se localizan igualmente la caseta de los guías y venta de tickets. Las visitas se hacen conjuntamente en grupos grandes en español, inglés y alemán. El número de visitantes se aproxima anualmente las 450.000 personas/año.

### ***Jameos del Agua***

Los Jameos del Agua, al igual que la Cueva de los Verdes, se localizan en el interior del túnel volcánico generado por la erupción del Volcán de la Corona. Se encuentran situados en la sección de este túnel más cercano a la costa. Deben su nombre a la existencia un lago interior que constituye una formación geológica singular. Se origina por filtración al encontrarse por debajo del nivel del mar. Por este Jameo se accede al conocido tramo sumergido conocido como el "Túnel de la Atlántida" que se adentra en el mar en un tramo submarino de 1,6 km.



*Figura 3. Bajando a los Jameos del Agua, lago del Jameito. Lanzarote. (Fotografía: A. Láinez)*

Está formado por al menos tres jameos o aberturas en el terreno. El "Jameo Chico" por donde se realiza el acceso al interior y da paso a la Laguna de los Jameitos, el "Jameo Grande", que se encuentra urbanizado a modo de un oasis artificial con una piscina y un tercero, denominado "Jameo de la Cazuela". Una vez superado el Jameo Grande se accede a un espectacular auditorio aprovechando una gran sala descendente y que marca el final del recorrido del enclave volcánico sobre el que operan dos figuras de protección medioambiental. De una parte se encuentra dentro del Monumento Natural del Volcán de la Corona, y de otra, está declarado

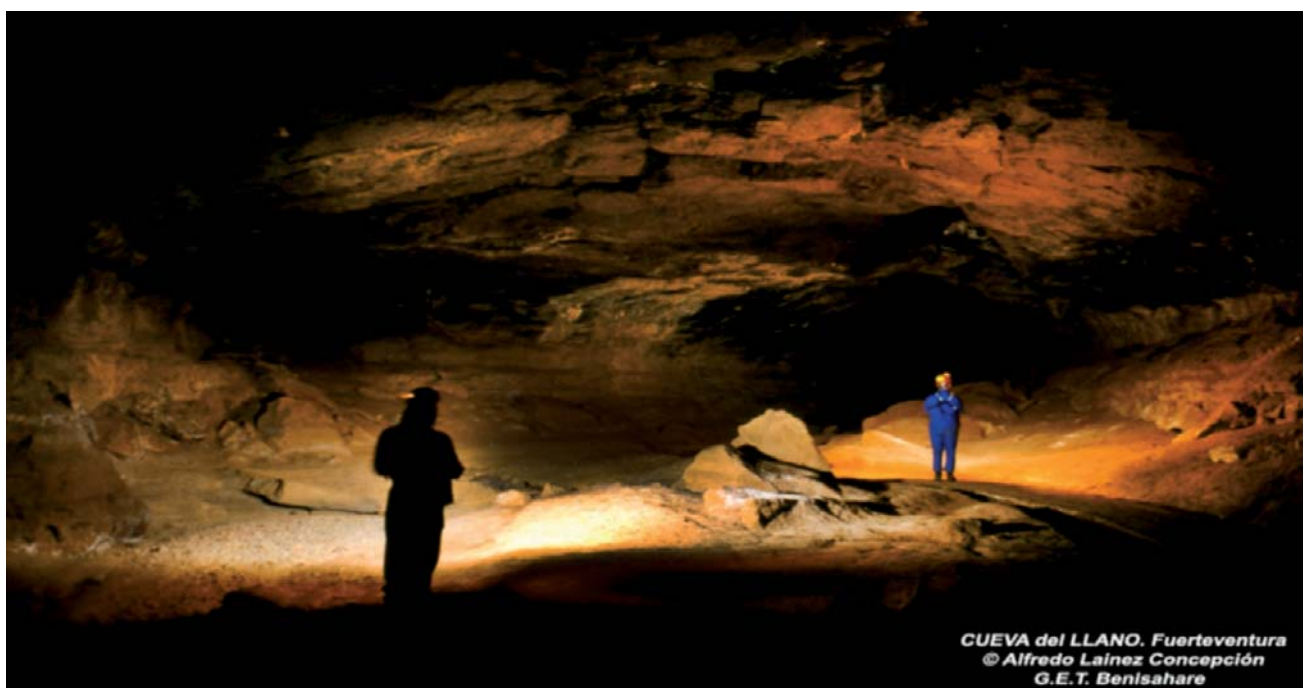
como sitio de interés científico debido a la presencia de más de 20 especies endémicas de gran interés científico entre las que destaca el “jameito” (*Munidopsis polymorpha*), los célebres cangrejos ciegos despigmentados que se observan sobre el fondo rocoso del lago. Este endemismo de apenas un centímetro de longitud, sirve como símbolo turístico de los Jameos del Agua. A estas figuras de protección se les suma la declaración de Bien de Interés Cultural con la categoría de Jardín Histórico, concedida por sus importantes valores patrimoniales al igual que otras obras espaciales de gran Artista Cesar Manrique, que diseñó este maravilloso conjunto, dentro del tubo volcánico. Se abrió al público sus primeras fases en el año 1966. A lo largo de la siguiente década se realizaron numerosos cambios, hasta que en 1977 quedó establecida la actual estructura general de los Jameos del Agua, incluyéndose un Auditorio. A estas instalaciones en el año 1987, se les ha añadido en su parte superior “La Casa de los Volcanes”, se trata de un espacio museístico que se dedica a una gran labor científica y didáctica sobre la volcanología en general, como Centro de Interpretación tanto de la Cueva de los Verdes como de los propios Jameos del Agua.

Las visitas a todas estas instalaciones son libres, sin guías, el precio para realizar las visitas son los mismos que la cercana Cueva de los Verdes. Cabe destacar entre sus instalaciones se encuentran varias cafeterías, tiendas, restaurante y un auditorio que ofrece una programación diversificada a lo largo del año. Si es notable la afluencia de visitantes a la cercana Cueva de los Verdes, en los Jameos del Agua es espectacular, con casi 750.000 personas por año, que no necesitan de equipamiento alguno para la visita, la cual no precisa de guiado específico y como tal no se oferta, aunque muchos turistas reciben este servicio desde sus propias agencias.

### **Fuerteventura: Cueva del Llano**

Situada en las proximidades de Villaverde, término municipal de la Oliva (al norte de la isla), fue abierta al público el 11 de febrero del 2006 por el Cabildo de Fuerteventura, esta cavidad es un caso único entre los tubos volcánicos de Canarias. Constituye un testimonio especial de proceso erosivo, que atesora animales fósiles atrapados entre sus sedimentos. Estos restos convierten a la Cueva del Llano en el yacimiento paleontológico con mayor concentración de huesos de aves, roedores y lagartos, entre otros, en tubos volcánicos de Canarias, (Rando, et al., 2011). La Cueva del Llano ha funcionado durante miles de años como sumidero de una pequeña cuenca. Las sucesivas corrientes de agua vertidas en su interior han llenado la cavidad de sedimentos y han reducido paulatinamente su longitud; la cueva se ha comportado como un barranco subterráneo. Otra singularidad que ofrece es su propia existencia, ya que el largo proceso erosivo que ha sufrido Fuerteventura ha borrado la mayor parte de las estructuras volcánicas de la isla. Tan solo se conservan algunos ejemplos de las manifestaciones eruptivas de los últimos cuatro millones de años. También es un ecosistema interesante extremadamente frágil, ya que sus condiciones de humedad y temperatura pueden variar fácilmente con la intervención humana. Además, las poblaciones de fauna subterránea suelen ser escasas y a menudo limitadas a una sola cavidad, como sucede con el *Maiores randoi*, un endemismo exclusivo de la Cueva del Llano, hasta que espeleólogos del Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare descubrieron una nueva especie cuando estaban topografiando la cavidad, en el año 2004, a unos 648 metros de la entrada, estos ejemplares fueron donados para su posterior estudio a los bioespeleólogos de la Universidad de la Laguna, que la han determinado co-

mo nueva y única especie *Coletinia majorensis*, sumándose al otro endemismo de la cavidad. La Cueva del Llano tiene casi un millón de años; cuando se formó la isla de El Hierro, acababa de nacer. Es un tubo con un único ramal, salvo un pequeño tramo que se bifurca para confluir nuevamente a los pocos metros. Su longitud topografiada por el Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare hasta ahora es de 648 metros, aunque los últimos 200 metros son de difícil exploración, al estar casi obturados por sedimentos. La pendiente es mínima, de apenas un grado. La zona transitable del tubo es de dimensiones considerables, con anchuras de 7 a 12 metros y alturas entre 3 y 5 metros. Las paredes, carcomidas por el paso del tiempo, tienen marcas de barro que señalan los diferentes niveles de inundación que ha sufrido la cavidad. A unos 40 metros del jameo de entrada hay otro, que apenas se nota en el exterior, por el que colaba la mayor parte del agua y barro. El derrumbe del jameo que sirve de entrada hizo de contención, de manera que el tramo entre ambos quedó casi lleno de sedimentos.



*Figura 4. Interior de la sala y sedimentos de la Cueva del Llano. Fuerteventura. (Fotografía: A. Láinez)*

Antes de adentrarse en las profundidades de la cueva, los visitantes podrán descubrir en el centro de interpretación toda la variedad geológica de Fuerteventura, la isla de mayor antigüedad de todo el archipiélago canario, la riqueza de sus suelos y sorprenderse al conocer que la Maxorata es uno de los pocos lugares en el mundo en el que se encuentran en superficie las rocas plutónicas. Las visitas son guiadas en grupos de 15 personas y en diferentes idiomas. El recorrido es de unos 400 metros, y se aprovecha un sendero de cemento que había anteriormente en la cueva para transitar por él, no tiene luz artificial. Los visitantes realizan la visita equipados con cascos y linternas tipo leds, para así preservar este ecosistema único y disfrutar del tubo volcánico como espeleólogos. El número de visitantes anuales era de unas 15.000 personas al año. Actualmente solo se puede visitar el Centro de Interpretación de la Cueva del Llano, porque hubo un gran derrumbe en su tramo inicial en las últimas inundaciones en la isla, y está cerrada su visita por seguridad, por parte del Cabildo de Fuerteventura.

### **Tenerife: Cueva del Viento**

La cavidad volcánica está situada en el barrio de la Cueva del Viento, del Municipio de Icod de los Vinos, al norte de la isla. La cavidad se formó hace unos 27.000 años por lavas basálticas de las primeras fases del Volcán Pico Viejo, situado junto al Teide, dentro del Parque Nacional. El nombre de la cavidad se debe a las notables corrientes de aire que se producen en el interior, debido a la diferencia con las temperaturas exteriores. Actualmente se tienen topografiados 18.500 metros sin publicar por parte del Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare, en un futuro se podría encontrar la unión con otra cavidad cercana pasando a tener 21.500 metros de desarrollo, ya que esta sigue siendo explorada y topografiada por este grupo por sus numerosos laberintos subterráneos. La Cueva del Viento también destaca por sus características geomorfológicas únicas, ya que su red de galerías se dispone en tres niveles superpuestos, fenómeno que no está descrito en ningún otro lugar del mundo (Socorro, *et al.*, 2010). Además, presenta una amplia variedad de estructuras de origen primario tales como goterones de lava, estafilitos, cascadas lávicas, terrazas laterales y lagos de lava, entre otras, así como concreciones secundarias de diferente composición (carbonato cálcico y otras sales). Asimismo, debemos de destacar la gran riqueza biológica de esta cavidad que continuamente se enriquece con nuevos hallazgos, albergando hasta el momento, unas 190 especies (Oromí, P. 1995). La mayoría invertebrados y de las cuales 48 son troglobias. Entre estas especies, 15 han resultado ser nuevas para la ciencia (Oromí, 1995). En su interior también se encuentran restos de algunos fósiles de animales vertebrados ya extinguidos, como la rata (*Canariomys bravori*) y el lagarto gigante (*Gallotia goliath*), y otros restos óseos de especies desaparecidas, como el escribano patilargo (*Emberiza alcoveri*), la graja y la hubara, conocidas gracias a la presencia de sus restos en la Cueva del Viento, (Rando y López, 1996). La labor de los espeleólogos y científicos en los diferentes trabajos de exploración, topografía, publicaciones, protección, a nivel nacional e internacional han colocado a la Cueva del Viento como un referente, propiciando que la cavidad tenga un Plan de Ordenación de Recursos Naturales (PORN) aprobado mediante Decreto 53/1998, del 17 de Abril, un requisito establecido en el artículo 15 de la Ley 4/1989, 27 de Marzo, de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres, para proceder a la declaración como Espacio Protegido. Su Anteproyecto de Ley de Declaración como Reserva Natural Especial de la Cueva del Viento-Sobrado, cuenta con informe favorable del Consejo Consultivo de Canarias. Sin embargo y a día de hoy, la figura de protección propuesta se encuentra precisamente a ese nivel, el de propuesta, llevando en esa inexplicable situación más de década y media, con el agravante de contar con todos los condicionantes favorables al dictado de esta protección legal, (Láinez, *et al.*, 1992); (Láinez, *et al.*, 2006). Esto sigue siendo la gran asignatura pendiente en Canarias donde la Ley sigue siendo insuficiente para proteger nuestro valioso patrimonio subterráneo canario (Láinez, 2012).

El 20 de junio del 2008 bajo el impulso del Cabildo de Tenerife a través del Museo de Ciencias Naturales, la empresa Ideco S.A. y con la colaboración del Ayuntamiento de Icod, se abre al público un tramo visitable de 200 metros. La visita comienza en el Centro de Visitantes ubicado en el Barrio de los Piquetes, en grupos de 16 personas y en diferentes idiomas por ruta (español, inglés, alemán y francés) se da al visitante unas primeras pinceladas mostrando el fascinante mundo de los volcanes y lavas que formaron esta cavidad. Posteriormente se traslada al visitante con unos microbuses a las cercanías de la cueva, entre pinos canarios y canales de lava. El recorrido transcurre por un sendero donde se van realizando diferentes explica-



ciones, que va haciendo que el visitante vaya adentrándose en la naturaleza de los volcanes y la riqueza del patrimonio natural de este entorno. Este recorrido sorprende a los visitantes nacionales y extranjeros. El recorrido por un camino real nos habla del uso y costumbres de los antiguos habitantes de Tenerife y nos acerca a la entrada de la cueva. La cavidad no está iluminada artificialmente y se ha adoptado el sistema de cascos e iluminación tipo leds, para que el público pueda admirar y visitar como un espeleólogo. Estas circunstancias y condiciones particulares hacen que el viaje a las entrañas del volcán, sea único y especial. Los guías van realizando diferentes paradas, donde el visitante va comprendiendo y viendo la obra que realizó la lava en el interior de la tierra. Una actividad final hace al visitante experimentar lo que es el mundo del silencio y la oscuridad.



*Figura 5. Niveles de lava, terrazas y pisos superiores de la Cueva del Viento. Tenerife. (Fotografía: A. Láinez)*

Desde que abrió sus puertas en el año 2008, el número de visitantes no ha dejado de incrementarse. En la actualidad ha sido visitada por 100.000 personas, entrando el año 2015 16.200 visitantes. Un logro por parte del equipo humano de guías-intérpretes que trabajamos en la Cueva del Viento, y de los diferentes Organismos que colaboran, (Láinez, *et al.*, 2014). Por el público se nos ha premiado a través de Tripadvisor concediéndonos los premios de Ganadores de Excelencia 2015 y 2016, por su gran valoración en la interpretación de la ruta y respeto al medio natural y subterráneo. En un futuro próximo se tiene pensado abrir un tramo más de 200 metros del piso inferior, y acondicionar un nuevo Centro de Visitantes, e incrementar el número de guías, rutas y horarios, manteniendo esta misma filosofía que está haciendo que la Cueva del Viento sea un recurso natural único, para la isla de Tenerife y la comarca

de Icod de los Vinos. Se trabaja también con grupos de escolares, o grupos especiales como: invidentes, personas de movilidad reducida, grupos de atención especial, que han conseguido que la naturaleza, la cueva, el silencio y la oscuridad se les abra para ellos, a través de la gran labor de los guías-interpretes.

### ***La Palma: Cueva de las Palomas o Todoque***

Situada en el municipio de Los Llanos de Aridane, es una de las cavidades más jóvenes de Canarias. Hace unos años era conocida por el nombre de Cueva de Todoque, pero al ubicarla correctamente se vio que la cavidad estaba en otro municipio y la gente del lugar la llamaba la Cueva de Las Palomas. El tubo de las Palomas se formó como resultado de la erupción volcánica acaecida en 1949, la del Volcán de San Juan, en concreto en la corriente de dicha erupción que afloró en el Llano del Banco y vertió hacia el lado oeste de la isla; el drenaje de la lava que fluía por el interior del conducto provocó la formación de esta galería. Cuenta con más de diez bocas que aportan luz natural en varios puntos del recorrido, siendo algunas de estas bocas antiguas fumarolas (más específicamente, orificios de desgasificación) por las que hubo escapes de lava y gases durante la formación del tubo. Las dimensiones están en torno a los tres metros de ancho por unos 560 de longitud, esta topografía la realizó el Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare con su sección en La Palma, en el año 1998, (Dumpierrez, *et al.*, 1998) aunque una topografía más concienzuda posiblemente ampliaría su longitud por encima de los 600 metros. El tubo posee, a su vez, una continuación, denominada Cueva de las Palomas II, situada en su extremo oeste y no conectada subterráneamente con el resto del tubo. Esto se debe a un movimiento de tierras realizado en 1987 con la intención de destruir la cavidad, que acabó vertiendo una cantidad considerable de escorias y fragmentos de lava por una boca natural (un orificio de desgasificación), lo que ocasionó una obstrucción en el interior. No obstante, el tramo las Palomas II, que tiene una longitud de 154 metros, posee una boca independiente por la que es posible acceder a su interior. Toda la zona superficial y adyacente a la cueva, es casi tan espectacular como el interior, es un magnífico ejemplo de colada reciente, con confluencias de lavas cordadas (pahoehoe) y tipo malpaís (lavas AA) con prácticamente el conjunto de estructuras geomorfológicas que suelen estar representadas en estas coladas. Las visitas a la cueva se realizan previa autorización a través de La Consejería de Medio Ambiente del Cabildo de La Palma que abrió las puertas del tubo volcánico Cueva de las Palomas el día 15 de septiembre del 2015. Las visitas al tubo volcánico, se harán de forma regulada y cumpliendo con una serie de normas. Así, los grupos no podrán exceder de 15 personas y los visitantes tendrán que ir acompañados de un guía y deberán seguir una serie de recomendaciones en relación con la iluminación, protección y calzado que deben llevar durante el recorrido. Los interesados pueden visitar y conocer un sector de una colada de carácter basáltico originada durante la penúltima erupción histórica de la Isla, en 1949, y que conforma el Área protegida por la Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos en forma de Monumento Natural y por la normativa europea Red Natura 2000 conformando la Zona de Especial Conservación. El departamento de Medio Ambiente, continúa trabajando para ultimar las obras del Centro de Interpretación del Tubo y abrir las instalaciones de la Cueva de las Palomas al público en general y facilitar la entrada a todos aquellos visitantes que tengan interés

por este patrimonio natural, el objetivo es hacer un uso racional y ordenado de la cavidad, de manera que se compatibilice su conservación, que es prioritaria, con las visitas.

### ***El Hierro: Cueva de Guinea***

En la zona norte de la isla, en el Municipio de Frontera se abrió al público el 23 de Julio del 2014, por parte del Cabildo de El Hierro, dentro de las instalaciones Ecomuseo de Guinea y Lagartario, un pequeño tubo volcánico de 90 metros. Es el primero que se abre en la isla, y que se incorpora al itinerario que se realizan en estas instalaciones. Su acondicionamiento, situado bajo la Fuga de Gorreta, en pleno Valle de El Golfo, está incluido dentro del Plan de Competividad Turística "Islas Canarias una experiencia Volcánica II". La puesta en marcha de este espacio contribuye a impulsar el patrimonio geológico insular como reclamo turístico y sirvió para postular la candidatura de la isla a la red Europea y Mundial de Geoparques. Se entra por una abertura artificial, que da acceso a parte de un antiguo tubo volcánico que se encuentra debajo del poblado. El recorrido es guiado, y se realiza con cascos, está iluminado con diferentes luces que le dan colorido, el suelo es de cemento, se ve una gran bóveda, se sale por otra apertura artificial, subiendo unas escaleras que nos llevan al exterior. El asentamiento aborígen de "poblado de Guinea", donde se encuentra la Cueva de Guinea, es uno de los conjuntos arqueológicos más destacados de la vertiente septentrional y del patrimonio arqueológico de El Hierro. Está integrado por un núcleo habitacional en cuevas naturales que se complementan con otros espacios al aire libre de carácter doméstico y artesanal.

### **Conclusiones**

Queda comprobado que el mundo de los volcanes, la naturaleza, sus lavas y cuevas volcánicas fascina al turista en el archipiélago canario. Hay varios modelos de gestión de estas cavidades, unas con un mayor volumen de visitantes como son la Cueva de los Verdes y Jameos del Agua, en Lanzarote. Y otras dedicadas más al conocimiento del medio natural, como son la Cueva del Viento, en Tenerife y la Cueva de El Llano, en Fuerteventura, y otras de momento como son la Cueva de Las Palomas, en la isla de La Palma y Cueva de Guinea, en la isla de El Hierro, que aún no están bien definidos su modelo de gestión. La explotación turística de las cavidades volcánicas en canarias se revela como un eficaz instrumento de educación ambiental, puesta en valor de los recursos naturales de las islas, divulgación de aspectos generales, cultura, etnografía, y específicos del vulcanismo insular. Además de constituir una importante fuente de ingresos para las instituciones públicas que gestionan las cuevas. La unificación de criterios, la inestimable ayuda de la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (A.C.T.E), unido al control y la regulación, darían como resultado la protección del patrimonio subterráneo. El deseo, es que en un futuro próximo se realicen desde la Cueva del Viento, Tenerife, las Jornadas en Cavidades Volcánicas y CUEVATUR junto con A.C.T.E y organismos oficiales. La mejor forma de dar a conocer nuestro patrimonio subterráneo canario.



## Agradecimientos

Al Equipo Humano de la Cueva del Viento: Francisco Mesa, Conny Finke, Dragan Milenkovic, Ancor Láinez, France Gavarone, Suzana Milenkovic, Monika Rosemeier, Rayco González, Petra Kriesch, Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare y A.C.T.E.

## Referencias

- Bravo, T. 1964. *El Volcán y el malpaís de la Corona. La Cueva de los Verdes y Los Jameos*. Publicaciones Cabildo Insular de Lanzarote. 31 pp.
- Carracedo, J.C., Singer, B., Jicha, B., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Meco, J., Pérez Torrado, F. J., Gimeno, D., Socorro, S. y Láinez, A. 2003. La erupción y el tubo volcánico del volcán de la corona (Lanzarote, Islas Canarias). *Estudios Geol.*, 59: 277-302.
- Dumpierrez, F., Fernández, M., Fernández, O., García, R., Govantes, F. Hernández, Mata, J. y Muñoz, M. G.E.T. Benisahare, Vulcania, Volumen 2, 1998. *Las cavidades volcánicas de los términos municipales de Los Llanos de Aridane y Tazacorte. La Palma. Islas Canarias*, 18-26.
- Láinez, A. y Rijo, F. G.E.T. Benisahare. 1990. Las cavidades volcánicas en el archipiélago de las Islas Canarias. España. Consideración sobre su distribución en las islas. *V Congreso Español de espeleología*. Santander, 106-113.
- Láinez, A., Rijo, F., Bonilla, J.A. y Trujillo, F.J. G.E.T. Benisahare. 1992. Destrucción del ecosistema de la Cueva del Viento. Icod de los Vinos. Tenerife. Islas Canarias. *VI Congreso español de espeleología*. A Coruña. 101-111.
- Láinez, A., Rijo, F., Bonilla, A. y Yanes, J.C. G.E.T. Benisahare. 2006. La Vulcano-espeleología en Canarias. Viaje a las entrañas del volcán. Vulcanismo. Ecosistemas cavernícolas. *1er. Congres Valencia d'espeleología*. Alcoy. 367-400.
- Láinez, A., Rijo, F., Bonilla, A., Yanes, J.C. y de la Concepción, G. G.E.T. Benisahare. 2006. *Estudio medioambiental del complejo Cueva del Viento-Sobrado y Cueva Felipe Reventón*. Icod de los Vinos. Tenerife. 151-222.
- Láinez, A. 2012. La Cueva del Viento, cuna de la espeleología en las Islas Canarias: iniciativas de protección y legislación del patrimonio subterráneo español. *IV Congreso español sobre cavidades turísticas*. A.C.T.E. Palencia. 389-400.
- Láinez, A., Mesa, F., Conny, F. y Milenkovic, D. 2014. La Cueva del Viento, otra forma de interpretar y percibir el mundo subterráneo turístico. *V Congreso español sobre cavidades turísticas y 1º Iberoamericano*. A.C.T.E. Aracena. Huelva. 169-178.
- Oromí, P. 1995. *La Cueva del Viento*. Red canaria de espacios naturales protegidos. Tenerife, 98 pp.
- Rando, J.C. y López, M. 1996. Un nuevo yacimiento de vertebrados fósiles en Tenerife (Islas Canarias). *7 th. International Symposium on Vulcano-espeleology*. S/C. de La Palma. 171-173.
- Rando, J.C., Alcover, J.A., Navarro, J.F., Michaux, J. y Hutterer, R. 2011. *Poniendo fechas a una catástrofe: 14C, cronologías y causas de la extinción de vertebrados en Canarias*. El indiferente 21.6-15.
- Socorro, J.S., Láinez, A. y Mesa, F. 2010. Parque geológico Cueva del Viento (Icod de los Vinos, Tenerife). Una ruta interpretativa turística. *III Congreso español sobre cavidades turísticas*. A.C.T.E. Aracena. Huelva. 279-291.

## La Cueva de Castañar y su centro de interpretación

A.M. Alonso-Zarza <sup>(1)</sup>, A. Martín-Pérez <sup>(2)</sup>, R. Martín-García <sup>(1)</sup>, I. Gil-Peña <sup>(3)</sup>, P. Muñoz-Barco <sup>(4)</sup>,  
E. Martínez-Flores <sup>(4)</sup> y A.I. Casado <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Dpt. Petrología y Geoquímica. Fac. CC. Geológicas. IGEO-CSIC. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid,

alonsoza@ucm.es; rmarting@ucm.es; acasadogomez@ucm.es

<sup>(2)</sup>Institute of Palaeontology. Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts (ZRC SAZU) Novi trg, 2. SI-1000 Ljubljana, Eslovenia,  
andreamp@zrc-sazu.si

<sup>(3)</sup>Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas 23. 28003 Madrid,  
i.gil@igme.es.

<sup>(4)</sup>Dirección General de Medio Ambiente. Junta de Extremadura. Avda. Luis Ramallo s/n. 06800, Mérida,  
pedro.munoz@gobex.es; esperanza.martinez@gobex.es

---

### RESUMEN

La Cueva de Castañar constituye una cavidad única tanto por la variedad de minerales y formas de sus espeleotemas, como por el tono rojizo de sus paredes. Estas dos características responden a las características de los materiales sobre los que se desarrolla la cueva. Son materiales correspondientes al Ediacárico (635-541 M.a.), que incluyen una amplia variedad de rocas (dolomías, magnesitas, pizarras y areniscas). Estos materiales, muy ricos en magnesio y sílice, son los que se disuelven y alteran para dar lugar a la formación de la cavidad y de sus espeleotemas. La alteración de las pizarras y areniscas, la disolución de las dolomías y magnesitas y la infiltración de arcillas desde el suelo dan lugar a la formación de un fino tapiz de color rojo intenso que se deposita sobre las paredes de la cueva, sobre el que muchas veces nuclean los espeleotemas. La disolución de las dolomías y magnesitas aporta mucho magnesio a las aguas que circulan por la cueva, lo cual favorece la formación no sólo de calcita (que es lo habitual), sino también de aragonito. Pero además la composición de las aguas no se ha mantenido constante, lo que ha favorecido que se produjeran muchas transformaciones entre los minerales ya formados. En definitiva, el amplio espectro mineralógico y las variadas transformaciones mineralógicas que se observan en la cueva, hacen de esta un laboratorio natural y por tanto una cavidad única, que se debe conocer, para así poderla conservar en las mejores condiciones posibles. Estas condiciones son las que hacen que el número de visitantes sea muy limitado, por ello el Centro de Interpretación inaugurado en 2010, cumple sobradamente la labor de dar a conocer los valores únicos de la Cueva de Castañar.

**Palabras Clave:** aragonito, centro de interpretación, Cueva de Castañar, dolomita, transformaciones

### *Castañar Cave and its Interpretation center*

#### ABSTRACT

*Castañar Cave is a unique cavity due to the variety and morphology of the speleothems it contains, as well as to the red colour of their walls. These characteristics are due to the hostrocks in which it developed, Ediacaric (635-541 M.a) dolostones, magnesites and siliciclastic rocks. These materials very rich in Mg and silica, weather and dissolve to give place to the formation of the cavity and their speleothems. The weathering of the siliciclastic rocks, the dissolution of dolostones and magnesites and the infiltration of the clays from the overlying soil, allows the formation of a thin red (clays and Fe-oxides) layer that coats the cavity, and constitute the nucleation site for many speleothems. The dissolu-*

*tion of dolostones and magnesites supplies Mg to the cave waters enabling the formation not only of calcite, but also aragonite and dolomite (which are rarer in caves). In addition water cave composition has changed over time, allowing many transformations between the previously formed minerals. When relatively more dilute waters prevail aragonite transforms into calcite or even both can dissolve, forming the large pores visible in some speleothems. On the contrary Mg-rich minerals (huntite, dolomite and Mg-rich clays) form in more concentrated waters. In short, the wide mineralogical spectra and their transformations make this cave a unique cavity and a natural lab, whose detailed study will help to preserve it under the best possible conditions. This is why the number of visitors is very limited; however the renewed Centro de Interpretación shows in great detail the characteristics of the Castañar Cave.*

**Key Words:** aragonite, interpretation center, Castañar Cave, dolomite, transformation

## Introducción

La Cueva de Castañar se localiza en el municipio de Castañar de Ibor, perteneciente a la comarca de las Villuercas, situada al sureste de la provincia de Cáceres. La cueva fue descubierta el 14 de marzo de 1967 cuando el agricultor Máximo Alonso estaba arando su tierra y de repente su mula quedó como sentada en el suelo, pues la mula con sus patas hizo un pequeño agujero por el que salió un chorro de vapor que permitió descubrir ese impresionante universo de colores y formas que constituyen la Cueva de Castañar.

La boca de la Cueva de Castañar de Ibor se encuentra a una cota de 660 m, se accede a ella desde la carretera local que conduce al Camping Los Ibores y de allí se toma el sendero que conduce a la entrada de la caseta. La formación y las características de la Cueva de Castañar están íntimamente relacionadas con la estructura geológica y las rocas en las que se forma. La cueva está entallada en unas finas capas carbonáticas, que están intercaladas entre pizarras y areniscas. La sedimentación de estos materiales se produjo durante el Ediacárico (635-541 M.a.), pero durante el enterramiento sufrieron transformaciones importantes que dieron lugar a que las calizas, que inicialmente se depositaron en aguas marinas, no muy profundas se transformaran primero en dolomías y posteriormente en magnesitas (Herrero et al., 2011; Alonso-Zarza et al., 2015). Estas rocas carbonáticas (dolomías y magnesitas) son solubles, es decir que cuando circula agua por ellas las disuelve, formando cavidades de distinto tamaño y forma, una de ellas es la Cueva de Castañar. Además, al disolverse las rocas carbonáticas, las rocas que tienen encima no tienen donde sujetarse y se rompen y sus bloques caen al fondo de las cavidades. Por tanto, la Cueva de Castañar se debe a dos procesos fundamentales: disolución y colapso de bloques. Por otra parte, la estructura geológica, con pliegues y fracturas principales con direcciones N150°E, y otras fracturas perpendiculares a éstas, es la que condiciona la forma laberíntica de la cueva y el hecho de que sus principales cavidades sigan también esas direcciones. Esto se debe a que las fracturas son las zonas en las que el agua subterránea circula más fácilmente y por ello la disolución se produce siguiendo esas direcciones.

## Morfología de la cueva

La Cueva de Castañar es una cavidad kárstica de reducidas dimensiones; se han topografiado unos 2.135 m distribuidos en salas y galerías que dibujan un entramado de oquedades de escasa altura que constituyen la cavidad. Para acceder a la cueva se desciende por una escalera metálica que nos conduce al pasillo de entrada, desde el que se llega a la Sala Nevada. A partir



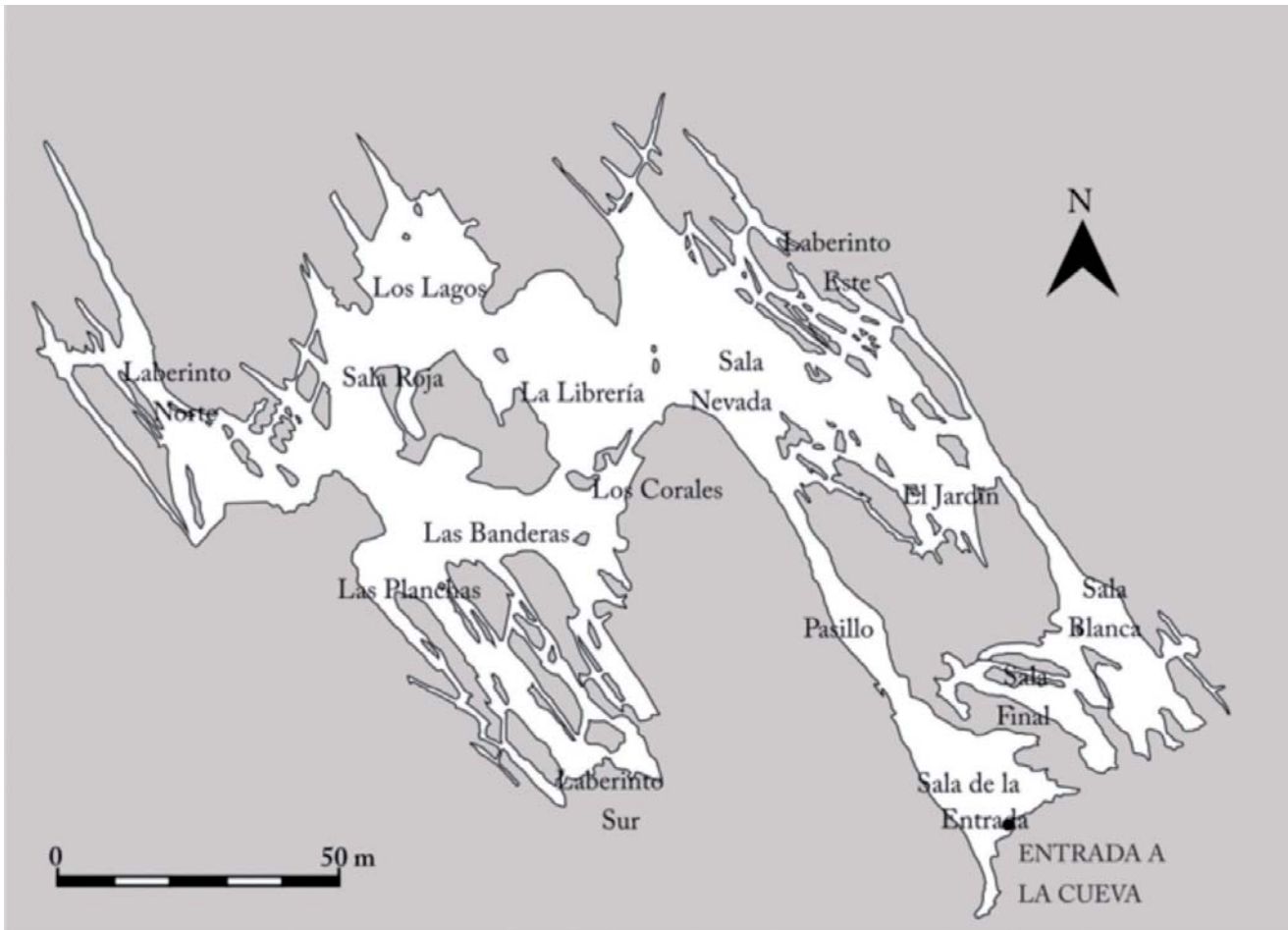


Figura 1. Mapa de la Cueva de Castañar

de la Sala Nevada se puede hacer un itinerario por el sector oriental de la cueva, que nos lleva al Laberinto Este, Sala del Jardín, Sala Blanca y Sala Final. La Sala del Jardín es la que ofrece uno de los espectáculos más sorprendentes al visitante por la belleza, variedad y abundancia de sus espeleotemas. El otro itinerario nos lleva a la zona occidental de la cueva compuesta por las Salas de La Librería, Los Lagos, Roja, Laberinto Norte, Las Planchas, Laberinto Sur y Los Corales.

### Morfología y mineralogía de los espeleotemas

Los espeleotemas de la Cueva de Castañar de Ibor son muy frágiles debido a sus dimensiones, pero también por las ubicaciones donde se ha producido su crecimiento. Se han reconocido diferentes tipos de espeleotemas, formados por distintos minerales.

Coladas: Formaciones generalmente de calcita que se generan en zonas donde hay, o ha habido, un importante flujo de agua.

Banderas o cortinas: De calcita normalmente. Se forman en las zonas de salida de agua a través de diaclasas (fracturas con escasa apertura) o pequeñas fracturas. Cuelgan de las paredes como velos.

**Varillas:** De aragonito o calcita. Cuelgan del techo. Tienen forma de tubo y un canal central por el que gotea el agua. En muchas ocasiones surgen de ellas otras varillas de morfología excéntrica o arborescente, sobre todo en las zonas inferiores.

**Estalactitas:** Mayoritariamente de calcita. Formas cónicas o cilíndricas que cuelgan del techo y tienen un canal central por el que gotea el agua. Algo mayores que las varillas; también pueden crecer en su superficie formaciones arborescentes.

**Excéntricas:** Espeleotemas alargados con un canal central; crecen en cualquier dirección desde el techo y las paredes. Pueden medir desde 2-3 cm a varios decímetros, con unos 2-3 cm de diámetro.

**Estalagmitas:** Crecen desde el suelo si hay goteo desde una estalactita. Su composición es calcítica y aragonítica.

**Columnas:** Se forman a partir de la unión (coalescencia) de una estalactita y una estalagmita, o de sus formaciones fibrosas.

**Gours:** Pequeñas presillas alargadas y sinuosas que se forman sobre zonas en pendiente –como las coladas-. Forman pequeñas terrazas donde queda retenida el agua.

**Formas fibrosas:** Son las formaciones más características de la Cueva de Castañar, y de las más abundantes. Se trata de cristales aciculares de aragonito, aunque localmente pueden haberse transformado en calcita. Sus dimensiones son variadas, desde no más de 2 milímetros de longitud, hasta 10 cm y pueden llegar a tener un grosor de hasta 5 milímetros. El tamaño y la densidad de los cristales definen sus diferentes nombres:

A – ramificados

B – flores y guirnaldas – también llamados *Frostwork*

C – tapizados fibrosos

**Moonmilk:** Este espeleotema se desarrolla sobre otros previos en su zona más externa. Formado por huntita, dolomita, magnesita y a veces hidromagnesita. Tiene forma de glóbulos de color blanco mate y puede tener gran contenido en agua intercrystalina. El *moonmilk* puede formarse sobre cualquier otro tipo de espeleotema.

Pero además de todos estos espeleotemas llama la atención el hecho de que las paredes de la cueva estén tapizadas por arcillas de color rojizo, lo que hace que el contraste de los espeleotemas sea aún mayor.

Los espeleotemas no se han formado de forma aleatoria. En la Cueva de Castañar las coladas se forman donde hay más aporte de agua, que fluye a través de fracturas –Sala de la Librería. Las estalagmitas se sitúan en zonas donde hay goteos de agua más continuos, al igual que las estalactitas. Sobre cualquier espeleotema o sobre la roca-caja o las arcillas se forman fibrosas de aragonito y sobre ellas, flores y tapizados fibrosos. Estos últimos espeleotemas se forman en zonas con escasa circulación de agua (Alonso-Zarza et al., 2011).

## La formación de los espeleotemas: minerales primarios y minerales secundarios

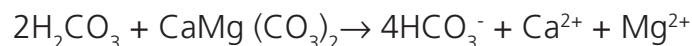
En la Cueva de Castañar los espeleotemas están formados por dos tipos de minerales. 1) Los minerales que se forman por precipitación directa en el agua (lagos, goteos) de la cueva (minerales primarios) y 2) los minerales que se forman por transformación de los minerales primarios y forman otros que son más estables (minerales secundarios).

Los *minerales primarios* más abundantes en los espeleotemas de la Cueva de Castañar son: Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y aragonito ( $\text{CaCO}_3$ ). La calcita y aragonito son polimorfos (misma composición pero cristalizan en sistemas cristalográficos distintos). En menores proporciones y difíciles de reconocer de *visu* también hay: huntita,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_4$ ; magnesita,  $\text{MgCO}_3$ ; hidromagnesita,  $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$  y sepiolita ( $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ ).

La mayor parte de los espeleotemas están formados por aragonito, y son los más característicos de la cueva. Los cristales de aragonito son siempre fibrosos y sus puntas tienden a abrirse, por eso los encontramos formando abanicos tridimensionales o "pompones de aragonito". Estos cristales fibrosos también forman parte de otros espeleotemas como estalactitas, estalagmitas, varillas, coladas, etc... Junto con el aragonito, el otro mineral dominante en la cueva es la calcita, formada por cristales más equidimensionales (las tres dimensiones son similares) y menos transparentes. En muchas de las estalactitas, estalagmitas, columnas, banderas, coladas o incluso en algunos pequeños lagos, también hay calcita.

En muchos de los espeleotemas de la Cueva de Castañar se observa que unos minerales se desarrollan sobre otros. Si miramos algunas formaciones de algunas estalagmitas vemos que en estas las zonas más altas (pegadas al techo) están formadas por cristales milimétricos de color beige y bastante poligonales (de calcita) (Fig. 1). Sobre estos cristales y también hacia la parte mas baja de las estalactitas y de muchas varillas, vemos fibras de varios milímetros de cristales muy brillantes y transparentes (aragonito). Por último, sobre estas fibras vemos unas masas más o menos esferoidales, blancas y mates que forman parte del moonmilk, es la huntita. Esta secuencia de formación está condicionada por la presencia de Mg en el agua que circula dentro de la cueva (Alonso-Zarza y Martín-Pérez, 2008; Fernández-Cortés *et al.*, 2010; Martín-Pérez, 2012). Las reacciones implicadas serían:

Reacción de disolución de dolomita:



Y la de precipitación de aragonito o calcita:



Como se observa, cuando precipitan calcita o aragonito queda magnesio en el agua de la cueva. La secuencia de precipitación que hemos descrito se debe a que según va precipitando la calcita, el agua se carga en magnesio y puede formarse aragonito (si hay magnesio no se suele formar calcita y en su lugar se forma aragonito), a pesar de que ni calcita ni aragonito tienen magnesio en su composición. Cuando ya queda muy poca agua y tiene mucho más

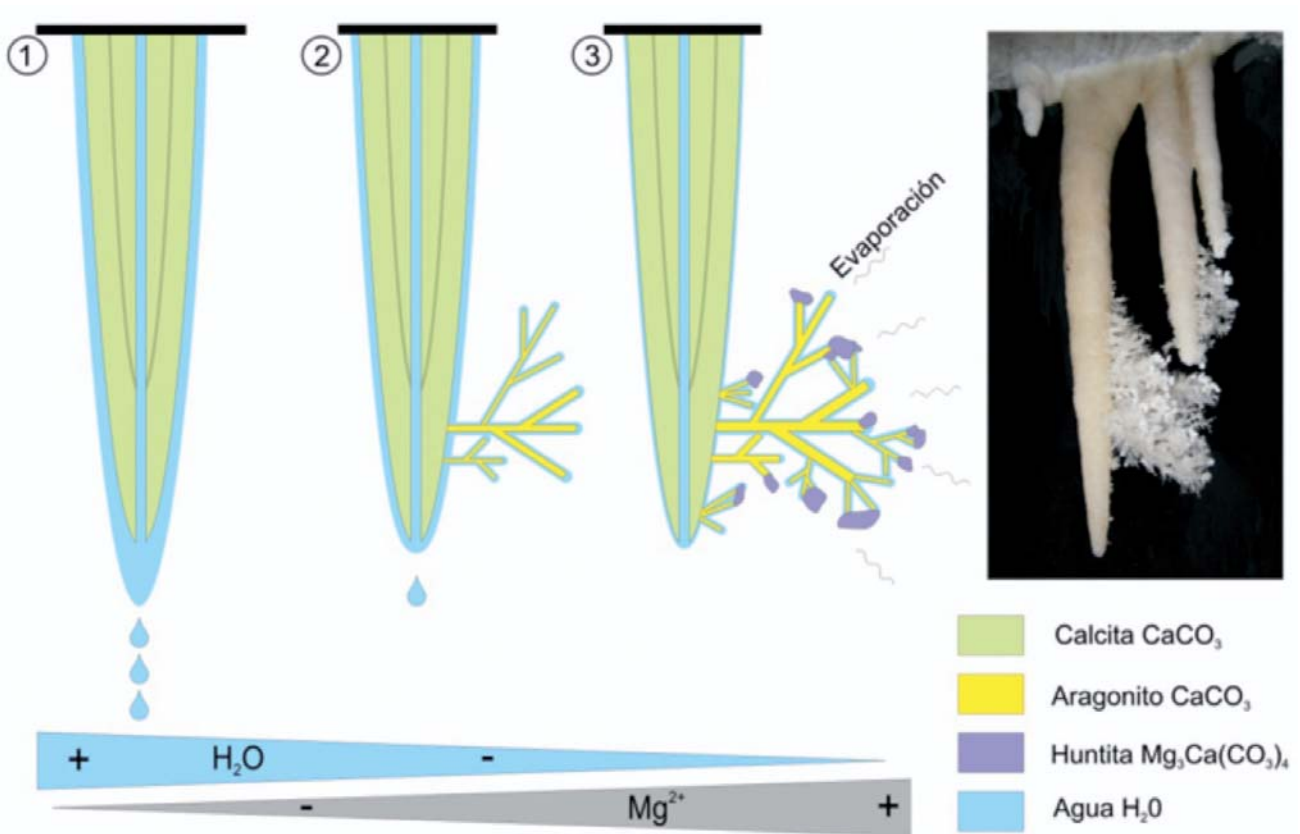


Figura 2. Secuencia de formación de los minerales primarios

magnesio se formará huntita. Tenemos que insistir que la presencia de magnesio procedente de las formaciones de dolomías y magnesitas es la que favorece que en nuestra cueva se formen aragonito, huntita o dolomita.

Los minerales que son poco estables como el aragonito o la huntita tienden a transformarse en otros más estables (minerales secundarios) (Martín-Pérez et al., 2012). Señalamos a continuación algunos ejemplos de estas transformaciones (Fig. 3):

1.- El aragonito es el polimorfo del carbonato cálcico metaestable en condiciones ambientales, por eso tiende a transformarse en calcita. La transformación es bastante más complicada de lo que se piensa y tiene varias fases. Por lo que hemos observado, primero nuclean pequeños cristales de calcita sobre las fibras de aragonito, los cristales de calcita se hacen más grandes y engloban a los de aragonito, que se transforman casi totalmente en calcita, pero nos dejan ver algunas de sus fibras incluidas en los grandes cristales de calcita y muchas de ellas son ya de calcita (Martín-García, 2012). Estas fibras son relictos del aragonito. Este proceso se llama inversión polimórfica.

2.- La huntita también es metaestable, y se va a transformar en dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), un carbonato que también tiene calcio y magnesio, y que es más estable. La transformación de huntita en dolomita hace que el *moonmilk*, que normalmente es blando pase a ser más duro, y por eso a veces forma pequeñas costras. Como la huntita suele recubrir los cristales de aragonito, una vez que toda la huntita se ha transformado en dolomita, la formación de dolomita



sigue avanzando y empieza a “comerse” los cristales de aragonito. La transformación de huntita y/o aragonito en dolomita es un proceso de reemplazamiento, pues cambia la composición química, y se llama dolomitización. La presencia de dolomita en cuevas es muy poco frecuente. Además la dolomita de la cueva de Castañar se forma en un contexto muy distinto a las habituales, por ello estamos ante un nuevo modelo de dolomitización.

3.- Además de estos cambios que hacen variar la composición de los espeleotemas, hay otros cambios que hacen cambiar su aspecto externo. Si el agua está muy subsaturada tanto aragonito como calcita se pueden disolver, y dejan poros, de tamaño milimétrico o decimétrico, como los que se ven en algunas banderas de La Sala de Las Banderas. A este proceso se le denomina disolución. Si el agua esta subsaturada, pero cerca de la saturación, la disolución se produce sólo a pequeña escala, y lo que pasa es que cristales más grandes se transforman en cristales más pequeños. Estos cristales forman una masa blanca y opaca que tapiza la superficie de muchos espeleotemas grandes (banderas, estalactitas, estalagmitas) y les hace perder brillo y transparencia. A este proceso se le denomina micritización.

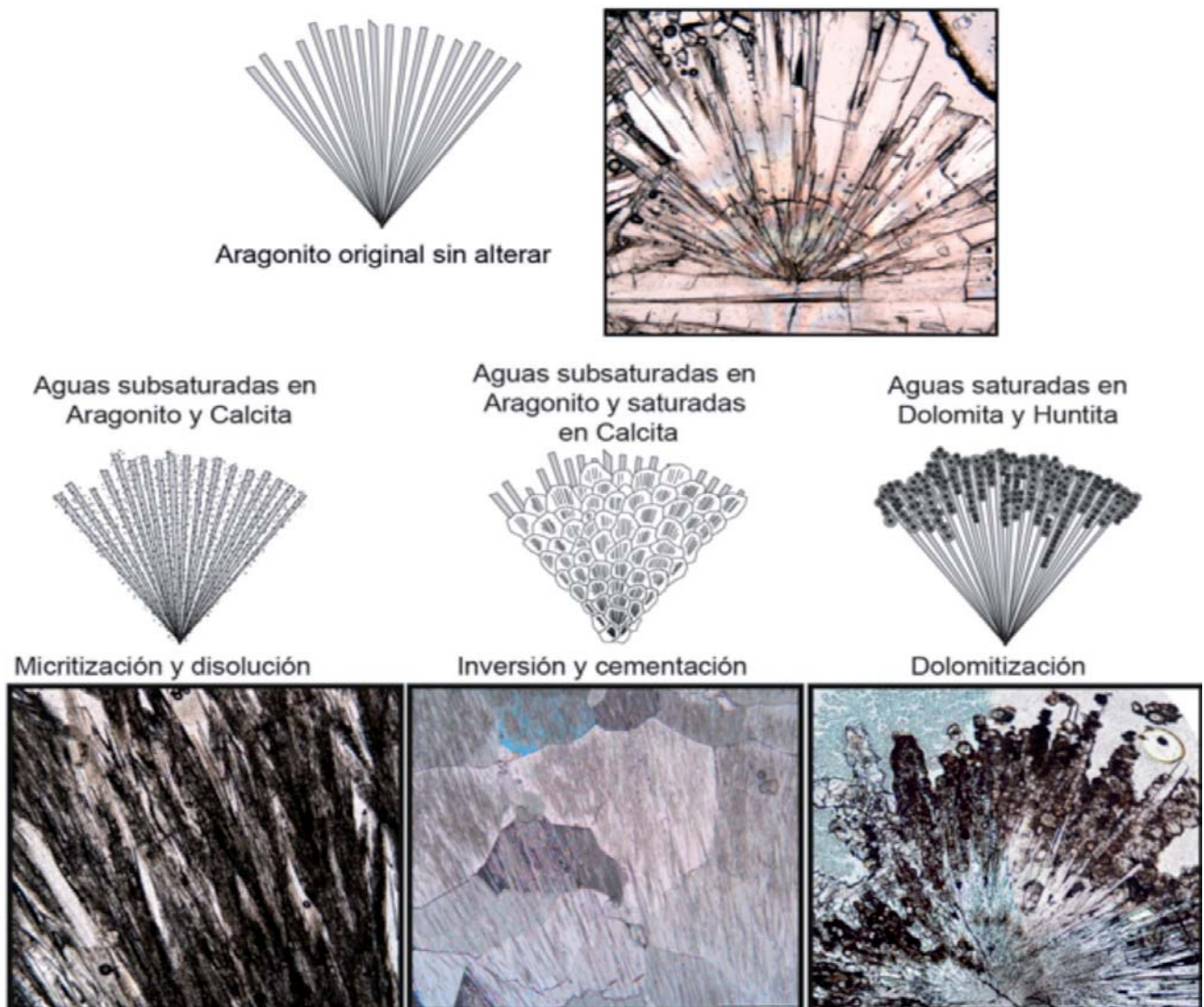


Figura 3. Transformaciones que pueden sufrir los cristales de aragonito, dependiendo de disponibilidad de agua y también de la cantidad de magnesio

## El centro de interpretación

La declaración de la Cueva de Castañar como espacio natural protegido dio lugar a la construcción de un centro de interpretación que fue equipado y dotado de contenidos con objeto de informar al visitante sobre los valores geológicos y ambientales que motivaron la declaración del Monumento Natural. En el año 1999, la Junta de Extremadura, promovió la construcción de un edificio sencillo con una nave para exposiciones, un espacio dedicado a reproducir una cueva kárstica, aseos y almacén. Las dificultades para realizar visitas a la cueva así como la existencia de nueva y actualizada información sobre los procesos geológicos y las características físicas y ambientales del espacio natural, resultado de los estudios científicos que se vienen desarrollando desde el año 2003, motivaron la remodelación del centro de interpretación durante el año 2010 (Muñoz-Barco *et al.*, 2006). Se realizó una redistribución del espacio en distintas salas cada una de ellas dedicada a una temática y se amplió la superficie destinada a la exposición. El nuevo centro se organizó en cinco salas con información referente a: Geología y Geografía; Prehistoria, Historia, Etnología y Medio Biótico; Réplica de la cueva y La Cueva de Castañar. La primera sala dedicada a geología y geografía tiene como objetivo informar sobre la Historia Geológica de la Tierra en general y de Las Villuercas en particular. En la siguiente sala se han instalado paneles y audiovisuales sobre la ocupación del hombre en la comarca (Prehistoria e Historia), los recursos geológicos y el hombre y etnografía. Completa la sala información referente a la fauna y vegetación de la comarca. A continuación se sorprende al visitante con una réplica de la cueva donde se reproducen espeleotemas que destacan por su belleza y singularidad, como son los cristales de aragonito, estalactitas, estalagmitas, columnas, coladas, gours, etc. Los juegos de luces, texturas y colores pretenden sumergir al visitante en un espacio que simule la cueva y aporte sensaciones parecidas a la visita real. La siguiente sala ofrece una amplia y detallada información sobre la cueva. Hace un recorrido desde su descubrimiento en el año 1967 hasta los últimos datos sobre la geología y el microambiente de la cavidad obtenidos de la realización de los estudios científicos. Así en esta sala se muestran audiovisuales sobre el karst, génesis de la cueva, parámetros microambientales medidos en su interior, interpretación de los datos registrados e influencia de las visitas sobre el sistema físico-químico que reina en el interior de la cueva. La visita al centro de interpretación culmina con una recreación virtual del interior de la cavidad mediante la proyección de un audiovisual en 3D. Se proyectan imágenes de gran belleza y calidad que permiten al visitante tener la sensación de estar dentro de la cueva, escuchando los peculiares sonidos, viendo y casi tocando las formaciones. El centro de interpretación del Monumento Natural "Cueva de Castañar" además realiza la función de centro de información sobre otros espacios naturales de la Comarca y como centro colaborador del Geoparque Villuercas-Ibores-Jara. En el centro se lleva a cabo una importante labor de educación ambiental no solo mostrando el centro a los grupos concertados de estudiantes de educación primaria y secundaria así como visitantes procedentes de otros ámbitos, sino también organizando distintos tipos de talleres. Asimismo desde el centro se ofrece la posibilidad de realizar rutas senderísticas para conocer los valores naturales del entorno como el caso del "Sendero a la Cueva" y la ruta de "Los Castaños de Calabazas". "El Sendero de la Cueva" muestra información geológica de los materiales sobre los que se ha formado la cueva con fotografías, dibujos explicativos y diagramas. La ruta de "Los Castaños de Calabazas" parte de la entrada sur de la localidad ascendiendo suavemente por un buen camino forestal entre huertas y densos bosques de castaños y robles.



## Conclusiones

La Cueva de Castañar es un laboratorio natural en el que los minerales que se han formado (calcita, aragonito, dolomita, huntita, arcillas,...) a lo largo de cientos de miles de años siguen formándose y transformándose. Muchos de estos minerales son tremendamente frágiles, por ejemplo las fibras de aragonito o las arcillas que tapizan las paredes. Cualquier alteración del sistema puede hacer que los procesos que se han producido durante tanto tiempo se paralizen.

El equilibrio que hay actualmente en la Cueva de Castañar es muy delicado y se debe mantener para no alterar los procesos que de forma natural tienen lugar en la Cueva. El régimen de visitas que se ha establecido tiene en cuenta el estado de conservación, los procesos de formación y transformación de los espeleotemas y, por supuesto, las modificaciones ambientales que producen los visitantes. Los estudios científicos llevados en la cueva, los que están en marcha y los futuros, serán claves para poder mantener ese equilibrio necesario para hacer sostenibles las visitas. Por otra parte, el Centro de Interpretación cuenta con unas instalaciones muy adecuadas, con una amplia información y con importantes recursos didácticos que facilitan el conocimiento de la cueva y su delicado mundo de espeleotemas, sin tener que acceder a ella.

## Agradecimientos

Este trabajo se incluye en los proyectos: "Estudio ambiental y geológico del Monumento Natural Cueva de Castañar", financiado por fondos FEADER (contrato Gobierno de Extremadura y CSIC) y CGL2014-54818P del MINECO.

## Referencias

- Alonso-Zarza, A.M., Muñoz Barco, P. y Martínez Flores, E. (Coords). 2015: *Monumento Natural Cueva de Castañar: Un laboratorio natural*. Junta de Extremadura. 186 pp. ISBN: 978-84-8107-087-3.
- Alonso-Zarza, A.M. y Martín-Pérez, A. 2008: Dolomite in caves: Recent dolomite formation in oxic, non-sulfate environments. Castañar Cave, Spain. *Sedimentary Geology*: 205, 160-164.
- Alonso-Zarza, A.M., Martín-Pérez, A., Martín-García, R., Gil-Peña, I., Meléndez, A., Martínez-Flores, E., Hellstrom, J. y Muñoz-Barco, P., 2011: Structural and host rock controls on the distribution, morphology and mineralogy of speleothems in the Castañar Cave (Spain). *Geological Magazine*: 148, 211-225.
- Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Benavente, D., Cañaveras, J.C., Martínez-Flores, E., Muñoz-Barco, P. y Sánchez-Moral, S., 2010: Monitorización de las condiciones microambientales, hidrogeoquímicas y de conservación del monumento natural "Cueva de Castañar". In: Durán, J.J. y Carrasco, F. *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, 113-128 pp. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Herrero, M.J., Martín-Pérez, A., Alonso-Zarza, A. M., Gil-Peña, I., Meléndez, A. y Martín-García, R., 2011: Petrography and geochemistry of the magnesites and dolostones of the

Ediacaran Ibor Group (635 to 542 Ma), Western Spain: Evidences of their hydrothermal origin. *Sedimentary Geology*: 240, 71-84.

Martín-García, R. 2012: *La diagénesis de los espeleotemas de las Cuevas de Castañar, Cáceres y Basajaún Etxea, Navarra. Implicaciones para el estudio del registro paleoclimático*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 194 p.

Martín-Pérez, A. 2012: *Formación de dolomita y otros carbonatos magnésicos en condiciones de exposición subáerea. La Cueva de Castañar de Ibor (Cáceres)*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 242 p.

Martín-Pérez, A., Martín-García, R. y Alonso-Zarza, A.M., 2012. Diagenesis of a drapery speleothem from Castañar Cave: from dissolution to dolomitization. *International Journal of Speleology*: 41, 251-266.

Muñoz-Barco, P., Alonso-Zarza, A.M., Sánchez-Moral, S., Martínez-Flores, E., Cuezva, S., Gil-Peña, I., Lario, J. y Martín-Pérez, A., 2006. Los estudios científicos como herramienta para la conservación y gestión del Monumento Natural Cueva de Castañar. *Trabajos de Geología*: 26, 175-185.

Álvarez-Gómez, F., *et al.* Selección de sistemas de iluminación LEDs en Cuevas basado en los espectros de acción de la fotosíntesis: reducción del biodeterioro de espeleotemas por biofilms de algas y cianobacterias. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 71-80.

## Selección de sistemas de iluminación LEDs en cuevas basado en los espectros de acción de la fotosíntesis: reducción del biodeterioro de espeleotemas por biofilms de algas y cianobacterias

F. Álvarez-Gómez <sup>(1)</sup>, Y. del Rosal <sup>(2)</sup>, R. Guzmán <sup>(3)</sup>, S. Mohamed <sup>(3)</sup>, S. Merino <sup>(4)</sup>, M. Hernández-Mariné <sup>(5)</sup>, N. Korbee <sup>(1)</sup> y F.L. Figueroa <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. Ecología y Geología, Universidad de Málaga, Málaga (España),  
felix\_alvarez000@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Fundación Cueva de Nerja, Málaga (España)

<sup>(3)</sup> Dpto. Expresión Gráfica, Diseño y Proyecto, Universidad de Málaga, Málaga (España)

<sup>(4)</sup> Dpto. Matemática Aplicada, Universidad de Málaga, Málaga (España)

<sup>(5)</sup> Dpto. Botánica, Universidad de Barcelona, Barcelona (España)

---

### RESUMEN

En las cuevas turísticas, la presencia de luz natural y/o artificial junto con elevados valores de humedad relativa y de CO<sub>2</sub>, pueden inducir el desarrollo de microorganismos fotosintéticos sobre estructuras kársticas, identificables por su color verdoso y que pueden producir meteorización biológica de los materiales naturales presentes en la cueva. En la Cueva de Nerja (Málaga), el nivel de CO<sub>2</sub> (variable en función del número de visitantes), humedad relativa y temperatura, condicionan la tasa de actividad fotosintética y por lo tanto, el crecimiento de algas y cianobacterias que junto a otros microorganismos heterotróficos, constituyen los biofilms (mal verde). Los métodos químicos empleados con anterioridad para reducir los biofilms (peróxido de hidrógeno, ozono, hipoclorito sódico, etc.), suelen ser muy agresivos para los materiales endokársticos que componen la cueva produciendo por ende, meteorización físico-química. También, la aplicación de agua a presión como método físico, podría incluso producir un mayor desarrollo de microorganismos al incrementar la humedad de los biofilms potenciando su crecimiento. Por otro lado, la reducción de los periodos de iluminación podría reducir la proliferación de algas pero no impediría su reparación, ya que no es posible eliminar la iluminación en su totalidad por los fines turísticos que la cueva persigue. Una alternativa, es la utilización de una iluminación que reduzca la actividad fotosintética y que a su vez, produzca un estrés fisiológico en los organismos fotosintéticos aminorando su crecimiento. En este estudio, se presenta un procedimiento basado en el conocimiento fotobiológico de algas y cianobacterias (espectros de acción de la fotosíntesis) para seleccionar diferentes fuentes de luz LED (RGB) y sus diferentes combinaciones que resulten más efectivas en la reducción de la fotosíntesis y por lo tanto, en la reducción de las tasas de crecimiento de microalgas y cianobacterias que conforman los biofilms. Esta primera aproximación teórica, permitiría conocer a priori, las fuentes de iluminación basadas en la tecnología LED para posteriormente, adaptar de un modo sencillo, la calidad y la intensidad de la luz empleando combinaciones programables de fuentes de luminarias LEDs de distinta composición espectral con el fin de reducir al nivel máximo posible, de acuerdo a la irradiancia efectiva, el rendimiento y producción fotosintética.

En este trabajo se presentan diferentes combinaciones de LEDs (rojo, verde, azul) que producen una disminución/aumento de la actividad fotosintética en 7 especies de algas y cianobacterias cuyos espectros de acción se encuentran publicados en la literatura científica. La efectividad fotosintética de estos LEDs se expresa a través del rendimiento de asimilación fotónico (APP %) en base a la diferentes calidades espectrales estudiadas.

**Palabras clave:** biofilms, cianobacteria, espectros de acción, fotosíntesis, LEDs, microalgas

## ***Selection of LED lighting systems in caves based on action spectra of photosynthesis : reducing biodeterioration of speleothems by biofilms of algae and cyanobacteria***

### **ABSTRACT**

*In tourist caves, the presence of natural and/or artificial light in addition to high values of relative humidity and CO<sub>2</sub>, can induce the development of photosynthetic microorganisms on karstic structures, identifiable by its green color. They can produce biological weathering natural materials in the cave. In the Cueva de Nerja (Malaga), CO<sub>2</sub> levels (it is variable depending on the number of visitors), relative humidity and temperature, determine the rate of photosynthetic activity and therefore the growth of algae and cyanobacteria and with other heterotrophic microorganisms, they conform the biofilms (maladie verte). Chemical methods previously used to reduce biofilms (hydrogen peroxide, ozone, sodium hypochlorite, etc.), are usually very aggressive for endokarstic materials in the cave producing thus physicochemical weathering. Also, the application of pressurized water as a physical method could even produce a further development of microorganisms due to the increase the humidity of biofilms favouring its growth. On the other hand, reducing periods of lighting could reduce algal blooms but not prevent their recurrence, since it is not possible to remove lighting entirely due to the touristic use of the cave. An alternative is the use of lighting that reduces photosynthetic activity and which in turn, produces a physiological stress on photosynthetic organisms decreasing its growth. In this study, a procedure based on the photobiological knowledge of algae and cyanobacteria (action spectra of photosynthesis) and the selection of different LED light sources (RGB) is presented. Different LED combinations which are most effective in reducing photosynthesis and therefore, in reducing growth rates of microalgae and cyanobacteria that form biofilms are analyzed. As a first approach, it is evaluated the useful of light sources based on LED technology to then adapt in a simple manner, the quality and intensity of the light sources using programmable combinations of LEDs luminaries of different spectral composition in order to reduce as maximal as possible, according to the effective irradiance, the photosynthetic yield and production.*

*In this work different combinations of LEDs (red, green, blue) that produce a decrease/increase in photosynthetic activity in 7 species of algae and cyanobacteria whose action spectra are published in the scientific literature are presented. Photosynthetic effectiveness of these LEDs is expressed through photonic absorption performance (APP %) based on the different spectral qualities studied.*

**Key Words:** *action spectrum, biofilms, cyanobacteria, microalgae, LEDs, photosynthesis*

### **Introducción**

Las algas y cianobacterias son organismos autótrofos que junto con otros organismos heterótrofos (hongos y bacterias) conforman comunidades complejas denominadas biofilms (Stewart y Franklin, 2008). Estos ecosistemas microbianos organizados pueden causar meteorización biológica en materiales naturales o artificiales alterando en este caso, el patrimonio de interés geológico, arqueológico y cultural. Así pues, es de vital importancia conocer las respuestas fisiológicas a las variables ambientales procedentes de la fracción autótrofa del biofilms para poder diseñar estrategias preventivas y correctoras que disminuyan el impacto que estos biofilms generan sobre las geoformas. La luz, entre otros, es la variable más importante relacionada con la producción de organismos fotosintéticos. La irradiancia, calidad espectral, distribución y utilización de la luz en el proceso fotosintético, es un aspecto básico en la producción o disminución del crecimiento a través de la fotosíntesis. El uso de LEDs para el crecimiento de organismos fotosintéticos se ha incrementado en los últimos años ya que esta tecnología de iluminación permite crear composiciones o formas espectrales de banda estrecha, con un menor tamaño y volumen para la fuente emisora de luz y con una mayor vida útil (Bula et al.,

1991; Brown *et al.*, 1995) . Por consiguiente, la característica más deseable de la radiación para disminuir la asimilación fotónica es en base a los fundamentos teóricos de los espectros de acción, combinando mediante tecnología LED, bandas de emisión que no se encuentren entre las bandas espectrales más efectivas para la fotosíntesis y además, conocer el efecto interactivo de la intensidad de luz y la forma espectral de las fuentes de iluminación sobre la fotosíntesis de las especies con un impacto potencial sobre bienes de interés cultural. Además, la iluminación LED tiene una serie de ventajas con respecto a la iluminación tradicional:

- Eficiencia: alta eficiencia por tener una alta luminosidad por energía consumida (LEDs de hasta 150 lm/W).
- Reproducción cromática: poseen una gran disipación térmica, incrementando su durabilidad e Índices de Reproducción Cromática (CRI) por encima del 80%. Un CRI por debajo del 80% perjudica la visión, aspecto importante en Cuevas turísticas con Patrimonio cultural. Por otro lado, las zonas expuestas con un CRI por debajo del 80%, no cumplen las exigencias en prevención de riesgos laborales.
- Gama de colores: existen una amplia gama de colores, desde 2700 K hasta más de 6000 K
- Alta durabilidad: los LEDs se pueden montar en un encapsulado de alto rendimiento que reduce el calor acumulado pudiendo disipar entre 250-400 mW aunque los más habituales en el mercado solo disipan 150 mW. En cada diodo LED puede haber dos puntos de luz o núcleos que permiten un menor consumo y un bajo esfuerzo térmico con lo que se consigue una mayor durabilidad en el producto final (más de 50.000 horas) con unas pérdidas de luminosidad mínimas (30% de caída en 50.000 horas).
- Encendido-Apagado: Se pueden programar de forma sencilla, ciclos de encendido y apagado, así como combinaciones espectrales que más interesen dependiendo de la comunidad fotosintética de un momento concreto.

Es por esto que, es de gran interés determinar el efecto de la calidad espectral (además de la irradiancia) sobre la fotosíntesis de algas y cianobacterias que conforman los biofilms pues proporcionan una información clave para definir con rigor la estrategia de control del crecimiento de los biofilms, esto es, la de incorporar fuentes de luz que disminuyan las tasas fotosintéticas y por lo tanto el crecimiento y expansión de los biofilms sobre las formaciones geológicas de interés (patrimonio natural y cultural). Además, se debe escoger una fuente de luz que disminuya la actividad fotosintética sin comprometer la calidad visual y la seguridad de los visitantes.

## **Material y métodos**

Para este estudio, se utilizaron LEDs tipo RGB (por sus siglas en inglés de *red, green, blue*, en español «rojo, verde y azul»). Estos diodos presentan 3 semiconductores por diodo para cada color (rojo, verde y azul) (Figura 1). Mediante el control de estos colores primarios, es posible obtener diferentes combinaciones mediante la regulación de la corriente eléctrica que atraviesa uno u otro semiconductor. Por ejemplo, si solo circula corriente por los semiconductores rojo y verde (no circulando por el azul) el color resultante será el amarillo. El principio optoelec-



trónico por el que funciona este tipo de LEDs se conoce como electroluminiscencia y el color de la luz (correspondiente a la energía del fotón) se determina a partir de la banda de energía del semiconductor. Las configuraciones espectrales estudiadas fueron las 3 conformadas por los colores básicos (rojo, verde y azul) y 12 combinaciones de estos. (Figura 2).

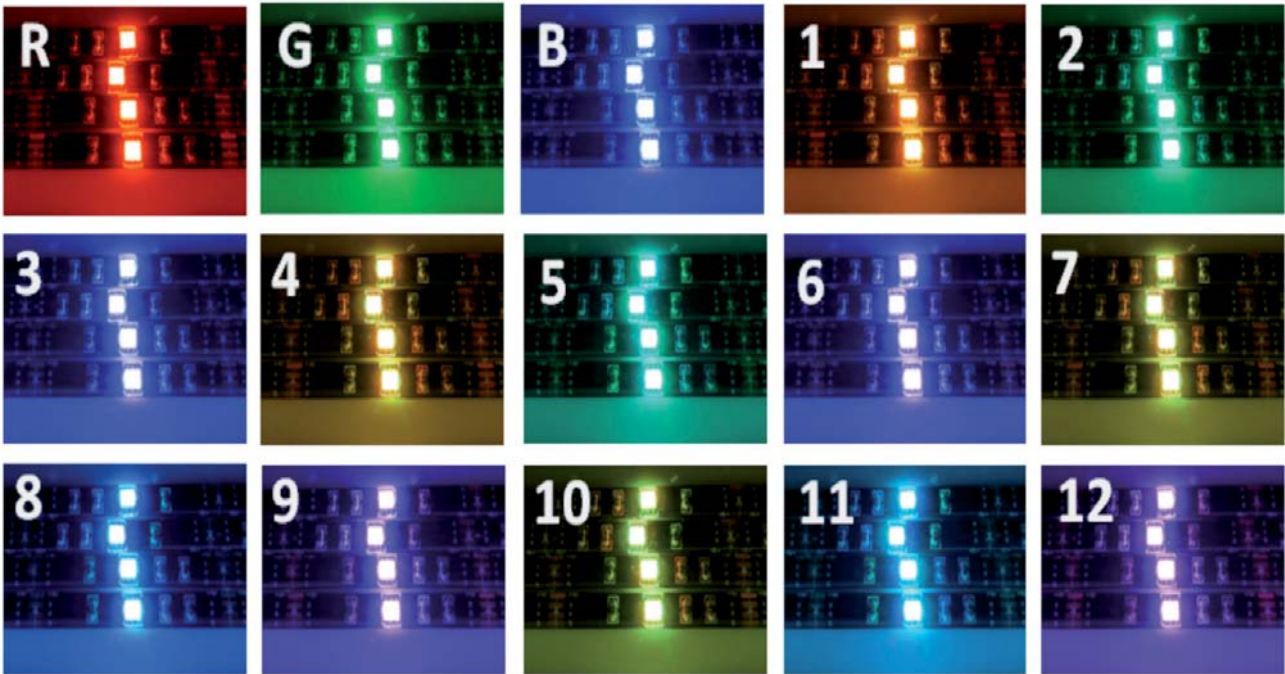


Figura 1. Fotografías de las fuentes lumínicas para los colores primarios (RGB) y de las combinaciones resultantes entre ellos

Las configuraciones espectrales fueron medidas con un espectrorradiómetro (Sphere Optics, Contoocook, NH, USA). Este instrumento permite cuantificar la energía asociada a cada longitud de onda (nm) en  $W m^{-2}$  posteriormente convertida a unidades fotónicas ( $\mu mol \text{ fotones } m^{-2} s^{-1}$ ) a partir de la Ley de Planck (De Vos, 2008). La temperatura de color (K) fue calculada a partir de la longitud de onda máxima ( $\lambda_{max}$ ) utilizando la Ley de Desplazamiento de Wien (Lang, 2013). La iluminancia expresada como Lux ( $lumen m^{-2}$ ) fue calculada a partir de la constante fototópica (Stockman and Sharpe, 2008) (Figura 2). Las medidas fueron tomadas a 20 cm de la fuente lumínica.

Para este estudio, se utilizaron 7 espectros de acción (Figura 3) obtenidos de la bibliografía para diferentes organismos fotosintéticos (Tabla 1) a fin de cubrir todo el intervalo espectral PAR (radiación fotosintéticamente activa; 400-700 nm). Es importante recalcar que, en función de la división a la que pertenezcan los organismos fotosintéticos, tendrán un patrón pigmentario diferente así como otros compuestos accesorios que ayuden a la producción fotosintética mediante la absorción de otras longitudes de onda diferentes a la clorofila a (Rowan, 1989). El espectro de acción para una especie, guarda una estrecha relación con el espectro de absorción en cuanto a su forma pero es necesario destacar que una mayor absorción por parte del equipo pigmentario a una determinada longitud de onda, no tiene porqué corresponderse con una mayor acción fotosintética en dicha longitud de onda pues no solo influye la cantidad y calidad pigmentaria si no su distribución energética en los dos fotosistemas.



Podemos decir que el espectro de acción de la fotosíntesis, es la eficiencia relativa en la generación de una respuesta biológica en función de la longitud de onda incidente como por ejemplo, la liberación de oxígeno o la tasa de transporte electrónico durante el proceso fotosintético. (Haxo and Blinks, 1950; McCree, 1972).

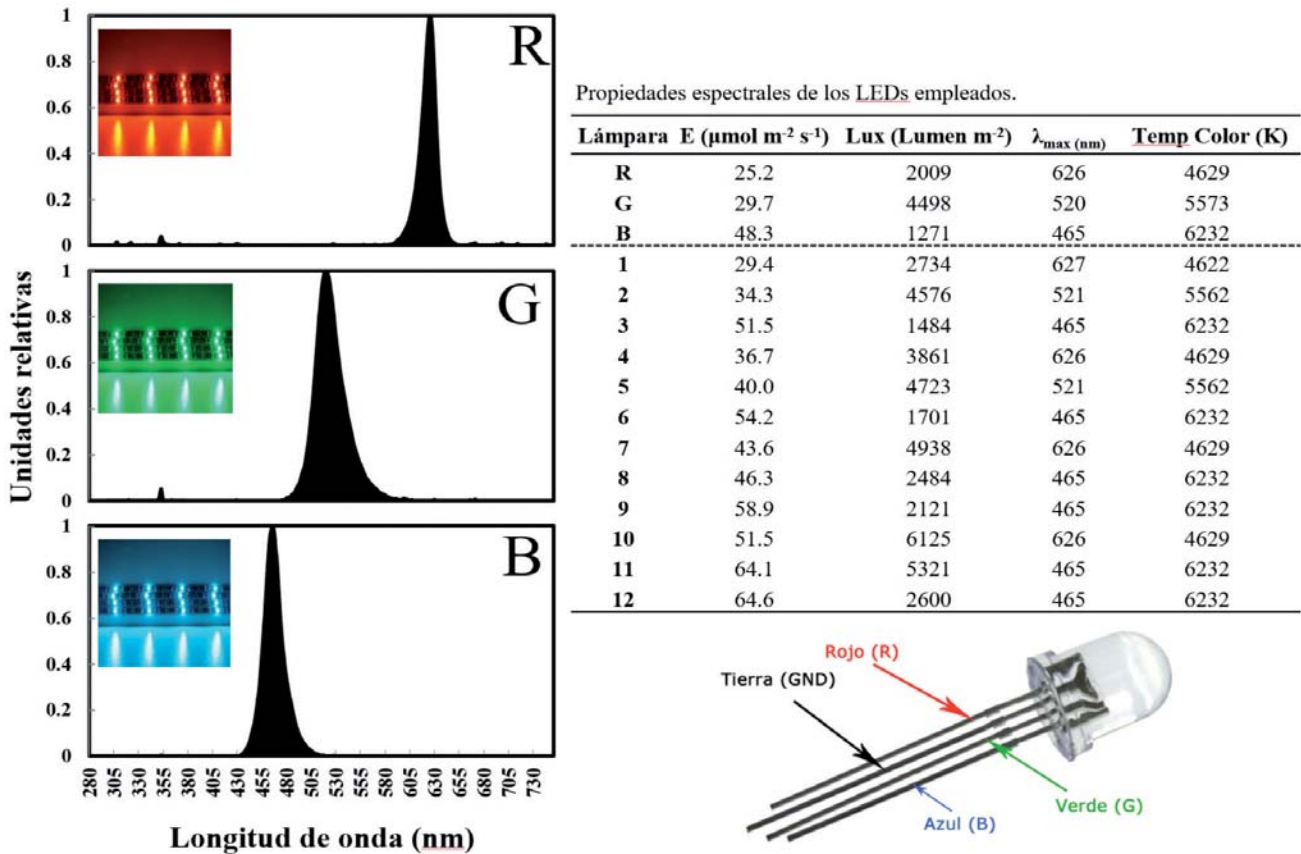


Figura 2. Espectro electromagnético (280-730 nm) para los LEDs primarios (RGB) medido para cada uno de los colores básicos de forma independiente y expresado en unidades relativas

División	Especie	Abreviatura	Referencia
Heterokontophyta	<i>Chaetoceros</i> sp.	C	Neori <i>et al.</i> , 1986
Chlorophyta	<i>Ulva taeniata</i>	Ut	Luning and Dring, 1985
Rhodophyta	<i>Porphyra perforata</i>	Pp	Haxo and Blinks, 1950
Rhodophyta	<i>Porphyra perforata</i> *	Pp*	Haxo and Blinks, 1950
Cyanophyta	<i>Microcoleus</i> sp.	M	Jorgensen, 1987
Cyanophyta	<i>Trichodesmium theibautii</i>	Tt	Subramaniam, 1999
Cyanophyta	<i>Thichodesmium erythraeum</i>	Te	Subramaniam, 1999

\* Indica la porción verde del talo (carente en biliproteínas)

Tabla 1. Taxonomía, abreviaturas, y referencias para los espectros de acción empleados

Así pues, el espectro efectivo de la fotosíntesis ( $E_{ef}$ ) se obtiene multiplicando, para cada longitud de onda (nm), el espectro absoluto de la fuente LED ( $E_{LED}$ ) expresado en unidades de energía ( $W m^{-2}$ ), por el espectro de acción ( $E_{acción}$ ) para cada una de las 7 especies.

$$E_{ef} = \sum (E_{LED} \times E_{acción}) \quad (1)$$

El rendimiento de asimilación fotónico expresado en tantos por ciento (APP %) (por sus siglas en inglés de Assimilation Performance Photons), es el cociente entre el espectro efectivo y el espectro de trasmisión absoluto de la fuente LED) multiplicado por 100.

$$APP (\%) = (E_{ef} / E_{LED}) * 100 \quad (2)$$

Valores más altos de APP (%), indican un mayor aprovechamiento de los fotones incidentes por parte de una fuente lumínica en el proceso fotosintético.

### Resultados

Para el 71% de las especies estudiadas en base a sus espectros de acción (Figura 3), la luz azul presenta la calidad espectral que menos favorece el rendimiento de asimilación fotónico (APP %). De lo contrario, para el 57% de estas especies, la luz verde es la calidad espectral que más favorece el APP % (Tabla 3).

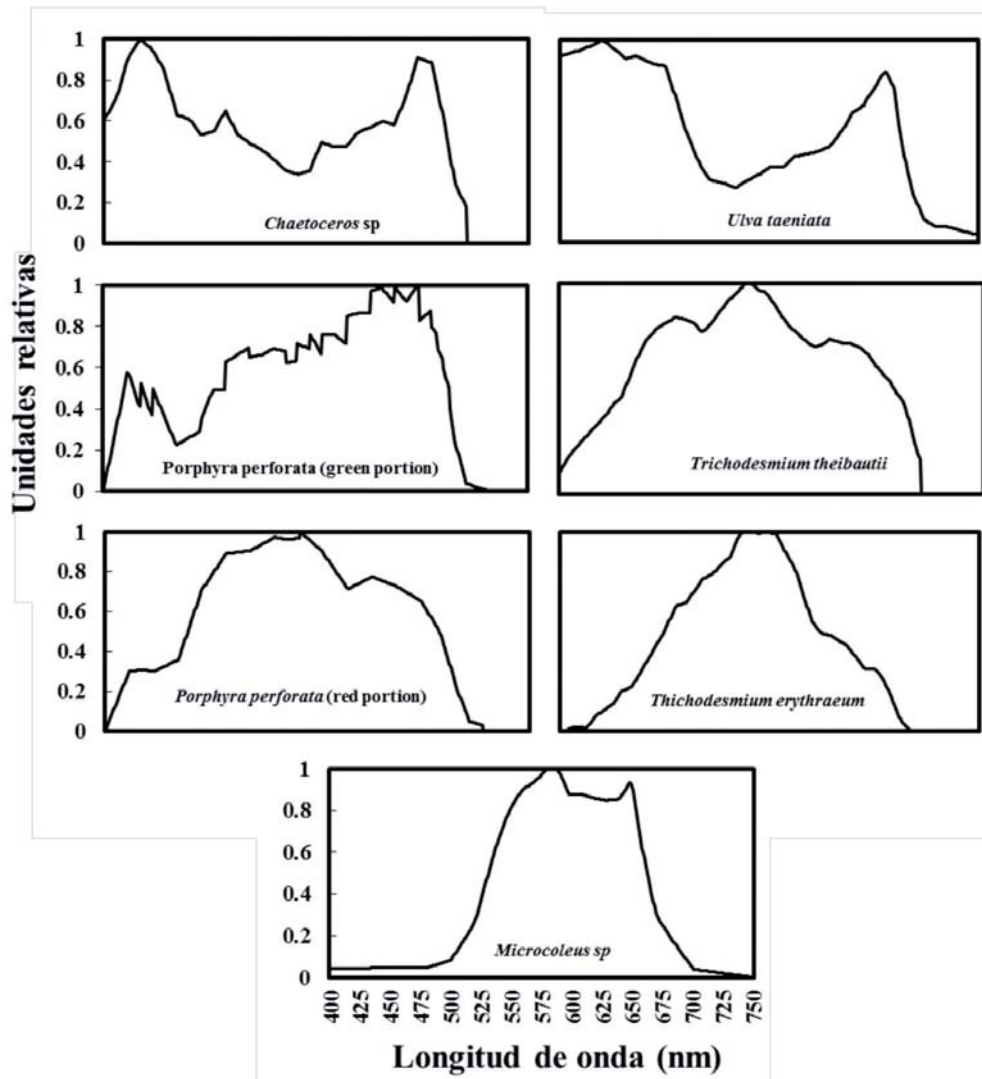


Figura 3. Espectros de acción normalizados para las 7 especies de organismos fotosintéticos empleados en este estudio

## Discusión

El procedimiento teórico descrito en este estudio permite la selección de fuentes espectrales más apropiadas para el control del crecimiento de los biofilms de algas y cianobacterias en base a sus espectros de acción. Así la luz verde es la menos favorable para la producción fotosintética en diatomeas y algas verdes. En el alga roja *Pophyra perforata* en cambio es la luz azul la menos efectiva representando solo el 29.5% en la parte verde del talo (sin biliproteínas). En cianobacterias también la luz azul es la que tiene menor efectividad habiendo diferencias en el rendimiento de asimilación fotónico dependiendo de la especie.

Combinación	C	Ut	Pp	Pp*	M	Tt	Te
R	57.5	48.1	75.3	92.7	72.0	49.5	39.0
G	<b>47.9</b>	<b>37.9</b>	92.1	66.1	84.3	78.5	73.9
B	63.1	89.8	<b>50.3</b>	<b>29.5</b>	<b>66.2</b>	<b>31.6</b>	<b>12.8</b>
1	55.7	45.8	78.8	88.3	74.4	54.8	45.4
2	49.9	45.3	86.3	60.7	81.8	71.8	65.1
3	63.0	87.8	51.5	32.5	66.4	32.4	14.1
4	54.1	44.1	81.5	83.8	76.5	59.7	51.3
5	51.8	51.7	81.1	56.2	79.6	66.0	57.7
6	62.7	85.8	52.8	35.6	66.7	33.3	15.3
7	53.0	43.0	83.3	80.9	77.8	62.9	55.2
8	59.8	78.4	59.5	37.5	70.1	41.8	26.2
9	62.2	82.1	55.0	41.3	67.3	34.8	17.6
10	52.2	42.3	84.6	78.6	78.8	65.3	58.1
11	56.2	66.3	69.3	46.1	74.4	52.8	40.5
12	61.7	78.8	57.0	46.4	67.8	36.3	19.6

Tabla 3. Rendimiento de asimilación fotónico (APP %) para las especies de este estudio en base a la calidad espectral de los LEDs (RGB) y sus combinaciones (1-12). Los valores marcados en negrita indican los valores de APP % más bajos obtenidos en cada una de las especies

Schuerger *et al.* (1997) indicaron el papel de la luz azul en la inhibición del crecimiento y cambios anatómicos en la morfogénesis de tallos y hojas de plantas de pimiento. Mortensen and Stromme, (1987) también observaron inhibición de crecimiento de los brotes bajo luz azul en varios cultivos de invernadero. Tanaka *et al.* (1998) observaron en un experimento donde se irradiaron plantas de *Cymbidium* sp. con LED rojo, azul y verde ( $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), que aquellos individuos expuestos a LED azul mostraban menor longitud de raíces (-30%), menos biomasa radicular (-60%) y menos biomasa área (-20%) con respecto a individuos expuestos a LED rojo y LED verde. Esto supone un 30 % menos de crecimiento de la biomasa total. Senger, (1982) enfatiza sobre el rol de la luz azul en el desarrollo de cloroplastos, la síntesis de clorofila y la formación de estomas en plantas superiores. En el alga roja *Gracilaria tikvahiae*, Kim *et al.* (2015) observaron un descenso del 78 % en la tasa de crecimiento ( $\% \text{ día}^{-1}$ ) para las algas crecidas bajo LED azul con respecto al crecimiento en algas irradiadas con LED rojo y LED verde. Estos

hallazgos concuerdan con los resultados teóricos encontrados en este estudio para el alga roja *Porphyra perforata* en ambos fenotipos (rojo y verde). Lüning y Dring (1985) reportaron que en algas rojas, la luz azul no favorece el rendimiento fotosintético en comparación con luz verde o roja. La luz azul estimula la acumulación de biliproteínas en el alga roja *Porphyra umbilicalis* pero inhibe el crecimiento en contraste con la luz roja (Figueroa et al., 1995)

El uso de fuentes de luz con efectividad fotosintética reducida permitiría aminorar y controlar el crecimiento de los biofilms fotosintéticos como agentes potenciales de biodeterioro y meteorización biológica del patrimonio arqueológico en cuevas turísticas. Para la validez de esta aproximación bio-óptica teórica es necesario determinar la efectividad fotosintética *in situ* a las irradiancias PAR que se alcanzan en los espeleotemas en la Cueva de Nerja y valorar el riesgo de colonización por algas y cianobacterias. El procedimiento descrito en este estudio sería aplicable a cualquier patrimonio cultural sometido a radiación artificial con potencialidad de ser colonizado por organismos fotosintéticos.

Este estudio es una primera aproximación teórica sobre los espectros de acción de la fotosíntesis y su eficiencia en la utilización en sistemas de iluminación que disminuyan el crecimiento de biofilms fotosintéticos que puedan causar biodegradación de materiales geológicos con interés cultural. En un futuro, se realizarán experimentos *in situ* en la Cueva de Nerja usando esta como laboratorio natural y sometiendo los biofilms que crecen sobre los espeleotemas, a diferentes calidades espectrales escogidas en base a los resultados de este estudio teórico. Se demostrará experimentalmente, mediante medición de la fotosíntesis, el efecto que esta calidad espectral tiene sobre el crecimiento del biofilm.

## Referencias

- Brown, CS., Schuerger, AC. y Sager JC. 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. American Society for Horticultural Science, 120, 808–813.
- Bula, RJ., Morrow, RC., Tibbitts, TW., Barta, DJ., Ignatius, RW. y Martin, TS. 1991. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience*, 26, 203–205.
- De Vos, A. 2008. *Thermodynamics of solar energy conversion*. John Wiley & Sons.
- Figueroa, FL., Aguilera, J. y Niell FX. 1995. Red and blue light regulation of growth and photosynthetic metabolism in *Porphyra umbilicalis* (Bangiales, Rhodophyta). *Eur. J. Phycol.*, 30, 11-18
- Haxo, FT. y Blinks, LR. 1950. Photosynthetic action spectra of marine algae. *The Journal of general physiology*, 33, 389–422.
- Jorgensen, BB., Cohen, Y. y Des Marais, DJ. 1987. Photosynthetic action spectra and adaptation to spectral light distribution in a benthic cyanobacterial mat. *Applied and Environmental Microbiology*, 53, 879–886.
- Kim, JK., Mao, Y., Kraemer, G. y Yarish, C. 2015. Growth and pigment content of *Gracilaria tikvahiae* McLachlan under fluorescent and LED lighting. *Aquaculture*, 436, 52–57.
- Lang, KR. 2013. *Radiation. Essential Astrophysics*. Springer Berlin Heidelberg, 33–67.

- Lüning, K. y Dring, MJ. 1985. Action spectra and spectral quantum yield of photosynthesis in marine macroalgae with thin and thick thalli. *Marine* 87, 119–129.
- McCree, KJ. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, 10, 443–453.
- Mortensen, LM. y Stromme, E. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. *Scientia Horticulturae*, 33, 27–36.
- Neori, A., Vernet, M., Holm-Hansen, O. y Haxo, FT. 1986. Relationship between action spectra for chlorophyll a fluorescence and photosynthetic O<sub>2</sub> evolution in algae. *Journal of Plankton Research*, 8, 537–548.
- Rowan, KS. 1989. *Photosynthetic pigments of algae*. CUP Archive.
- Schuerger, AC., Brown, CS. y Stryjewski, EC. 1997. Anatomical Features of Pepper Plants (*Capsicum annuum* L.) Grown under Red Light-emitting Diodes Supplemented with Blue or Far-red Light. *Annals of Botany*, 79, 273–282.
- Senger H. 1982. The effect of blue light on plants and microorganisms. *Photochemistry and Photobiology*, 35, 911–920.
- Stewart, PS. y Franklin, MJ. 2008. Physiological heterogeneity in biofilms. *Nature Reviews Microbiology*, 6, 199–210.
- Stockman, A. y Sharpe, LT. 2008. The dependence of luminous efficiency on chromatic adaptation. *Journal of vision*, 8 (16), 1-1
- Subramaniam, A., Carpenter, EJ. y Falkowski, PG. 1999. Bio-optical properties of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. II. A reflectance model for remote-sensing. *Limnology and Oceanography*, 44, 618–627.
- Tanaka, M., Takamura, T., Watanabe, H., Endo, M., Yanagi, T. y Okamoto, K. 1998. In vitro growth of *Cymbidium* plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 73, 39–44.





## Iluminación y adecuación de la zona peatonal de la Cueva de Nerja

R. Guzmán Sepúlveda <sup>(1)</sup>, S. Mohamed Mohamed <sup>(2)</sup>, F. López Figueroa <sup>(3)</sup>, M. Hernández Mariné <sup>(4)</sup>, F. Álvarez Gómez <sup>(3)</sup>, Y. del Rosa Padial <sup>(5)</sup>, C. Liñán Baena <sup>(3,5)</sup>, S. Merino Córdoba <sup>(6)</sup>, F. Guzmán Navarro <sup>(7)</sup> y M. Trillo López <sup>(8)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Expresión Gráfica Diseño y Proyectos, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Málaga. Avda. Doctor Ortiz Ramos s/n, rguzman@uma.es

<sup>(2)</sup> Alumno Máster Propio Universitario de Domótica, Gestión de la Energía y Gestión Técnica de Edificios. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Málaga. Avda. Doctor Ortiz Ramos s/n sulimmm91@gmail.com

<sup>(3)</sup> Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n, Málaga felix\_lopez@uma.es; felix\_alvarez000@hotmail.com

<sup>(4)</sup> Departamento de Botánica, Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona. Av. Diagonal 643, Barcelona, marionahernandez@ub.edu

<sup>(5)</sup> Instituto de Investigación, Fundación Cueva de Nerja. Ctra. de Maro s/n, Nerja, Málaga, yolanda@cuevadenerja.es

<sup>(6)</sup> Departamento Matemática Aplicada, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n, Málaga, smerino@uma.es

<sup>(7)</sup> Departamento de Ingeniería eléctrica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Málaga. Avda. Doctor Ortiz Ramos s/n, f\_guzman@uma.es

<sup>(8)</sup> Empresa CIVITASUR Ingenieros., Málaga (España). C/ Canada nº 46. Poligono Industrial el Viso (Málaga), civitasur@civitasur.es

---

### RESUMEN

La Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja, entre sus cometidos tiene la conservación, gestión y explotación de la cavidad, declarada Bien de Interés Cultural. Con este propósito encarga la realización de un proyecto de mejora de las instalaciones interiores, que abarque tanto el diseño de un nuevo sistema de iluminación, como el desarrollo de un sistema de barandillas y escaleras que mejore la seguridad de las instalaciones, con las premisas de durabilidad, mantenimiento mínimo y conservación del medio subterráneo. La barandilla, que discurrirá por todo el recorrido turístico, se pretende utilizar como medio de transporte de las instalaciones eléctricas, sistema de telecomunicaciones y demás elementos necesarios para los servicios de la Cueva. Previo a la selección de los materiales, tema muy importante debido a las condiciones particulares que se dan en este tipo de espacios, se estudiaron tanto las condiciones ambientales como la normativa existente al respecto, de manera que el diseño final fuese respetuoso con el entorno y con las necesidades técnicas que requerían las instalaciones necesarias. Los puntos fuertes de este proyecto son, por tanto, la elección de los materiales apropiados, junto con el diseño de sistemas versátiles que faciliten cubrir las necesidades de una cueva tan visitada y que permita el uso racional de este singular espacio natural y cultural. En definitiva, nos hemos decantado por el uso de prefabricados por pultrusión (polimerización) en caliente de un perfil conformado en hilera y contiene hasta un 70% de fibra de vidrio, para la fabricación de las barandillas y escaleras.

Para el sistema de iluminación, se propone tecnología led alojada en el interior de los pasamanos de las barandillas, con unas características determinadas en función de la curva de crecimiento de las especies de organismos fotosintéticos más abundantes en la Cueva.

**Palabras clave:** conservación, diseño, fotobiología, iluminación, materiales.

## ***Lighting and adequacy of the pedestrian zone of the Cueva de Nerja***

### **ABSTRACT**

*Nerja Cave Public Services Foundation has, as one of their duties, the conservation, management and exploitation of this protected space. For this purpose, ensures the realization of a project to improve indoor installations, covering both the design of a new lighting system and development of a system of handrails and stairs to improve the safety of installations, with the premises of durability and minimal maintenance. Taking advantage of the installation of the railing, which will run throughout the tour, is to be used as a means of transport of electrical installations, telecommunications system and other elements necessary for the services of the Cave. Before the selection of materials, subject very important because of the particular conditions that occur in these spaces, both environmental conditions as the existing regulations in this regard were studied, so the final design was environmentally friendly and with all the necessary technical requiring by installations. The strength of this project is the choice of appropriate materials, with the design of versatile systems that facilitate the needs of so visited cave and allow the balance between use and respect for the natural conditions of space. Definitively we have opted for the use of prefabricated by pultrusión (hot polymerization of a profile forming die and contains up to 70% of glass fiber) for making railings and stairs. And LED technology accommodated inside the handrails of the railings, with certain characteristics depending on the growth curve of the most abundant species in the Cave.*

**Keywords:** conservation, design, lighting, materials, photobiology

### **Introducción**

Las cavidades kársticas se ven afectadas por cualquier actividad desarrollada tanto en su interior, como en la zona de influencia exterior. En condiciones naturales, las cuevas no presentan luz natural, salvo en las zonas más próximas a la entrada. La luz favorece la aparición de organismos fotosintéticos (algas, líquenes, musgos y plantas) que actúan como fuente de nutrientes para el desarrollo de otros organismos heterótrofos y cuya presencia va disminuyendo conforme avanzamos hacia el interior.

Como sucede en todas las cuevas turísticas, para su explotación es necesario realizar diversas obras de acondicionamiento, tanto en el exterior (construcción de restaurante, servicios, aparcamientos...), como en el interior de la propia cueva (construcción de caminos, instalación de sistemas de iluminación, impermeabilización de suelos...). La sensibilidad de las cuevas a las actuaciones que se desarrollen tanto en su interior como en el exterior, hacen que la fase fundamental de este tipo de proyectos sea el diseño y la estrategia a seguir para la realización del trabajo.

En el caso que nos ocupa, presentamos el proyecto elaborado para llevar a cabo la instalación de iluminación de la zona transitable, incluyendo el alumbrado de emergencia y la instalación eléctrica necesaria para dar servicio a dicha iluminación, el diseño de una nueva escalera que una la Sala del Belén y la Sala de la Cascada, así como el diseño y colocación de una nueva

barandilla en la zona transitable, que cumpla con el doble objetivo de mejorar la seguridad de los usuarios y de proteger la fauna y estructuras geológicas. Además, usaremos las barandillas para albergar las instalaciones eléctricas y de comunicaciones.

## **Diseño de escaleras y barandillas perimetrales de la zona de visitantes**

Los dos condicionantes fundamentales tenidos en cuenta para la elección de los materiales de la escalera y las barandillas fueron: las condiciones ambientales del entorno y la necesidad de usar estas infraestructuras como transporte para las redes eléctricas y de comunicaciones:

### ***Condiciones de ambientales de la cueva***

El valor medio de la humedad relativa del aire de las Galerías Turísticas varía, aproximadamente, entre el 78 y el 90 %, según la proximidad al exterior. A escala anual, este parámetro muestra valores mínimos en otoño invierno, más elevados en primavera y máximos en verano, alcanzándose valores de saturación, como consecuencia del incremento del caudal de goteo. A nivel diario existen pequeños incrementos en la humedad relativa del aire del orden del 2 al 3 %, como consecuencia de la entrada de visitantes (Carrasco *et al.*, 1999, 2002). Este grado de humedad nos obligaba a elegir entre materiales no corrosivos, de entre las dos posibilidades más lógicas había que decantarse entre acero inoxidable muy usado en otras cuevas, o PRFV (plásticos reforzados con fibra de vidrio) menos conocido pero que tiene unas características muy interesantes:

1. Acero inoxidable: es uno de los más usados en cuevas en la actualidad y aunque puede soportar las condiciones ambientales del entorno, implicarían la mecanización en el interior de la cueva, con la realización de soldaduras, pulido del material tras el mecanizado. Además, tiene el gran inconveniente de obligarnos a realizar una red de tierra, si como se pide en el proyecto, se quiere utilizar las barandillas y las escaleras como medio de transporte de las instalaciones eléctricas y de comunicaciones.

2. PRFV: se trata de un material inalterable a las condiciones ambientales de la cueva, además de tratarse de un material clase II (no requieren puesta a tierra), estas condiciones lo hacen idóneo para utilizarlo en cuevas, nos permitirán la utilización como soporte para las instalaciones eléctricas y de telecomunicaciones, sin riesgo eléctrico para los usuarios. Por otro lado, nos permite el montaje/desmontaje previo de los tramos en taller y realizar posteriormente el ensamble de las piezas en la cueva de manera sencilla y minimizando la alteración al entorno.

### ***Instalación eléctrica***

El Real Decreto Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), exige la puesta a tierra de las partes metálicas externas de las instalaciones eléctricas. Cabe considerar que, aunque la cueva es un recinto cerrado, el alumbrado de la misma puede ser considerado como alumbrado público.

El terreno de la cueva es rocoso, por lo que conseguir la resistencia de difusión exigida en el REBT es casi imposible, a menos que se enterrase un conductor de cobre desnudo de 35 mm<sup>2</sup>

con picas o placas cada 5 m con una longitud estimada de 500 m. de longitud, en una zanja de 40 cm rellena de material facilitador de la difusión de la corriente. Esto implica una obra interior que, a nuestro entender, no es realizable teniendo en cuenta las características del entorno en donde nos encontramos, además del elevado coste que supone.

Debemos considerar que, además, si queremos utilizar la barandilla como portador de los conductores, en el caso de utilizar material metálico, el riesgo de la rotura del aislamiento al deslizar los conductores, aunque esta operación la realicen operarios cualificados, es muy común. Esto implica un peligro añadido para los usuarios de la instalación.

Por todo lo anterior, se consideró recomendable la colocación de barandilla de fibra de vidrio, por tratarse de material clase II, lo que evita la colocación de la citada red de tierra.

### **Escaleras**

Tras la visita a la cueva se comprueba que la escalera actual, que une las salas de Belén y de la Cascada, presenta una inadecuada pendiente, así como un suelo resbaladizo, que unido a los diferentes tamaños de huella la hacen peligrosa para los usuarios. Con estas premisas se ha diseñado una escalera que: a) permite el tránsito seguro y conforme a normas de los múltiples usuarios que transitan a diario por la cueva, b) sea inalterable a las condiciones ambientales de esta y c) que no afecte a la conservación.

Para la construcción de la nueva escalera se ha optado por montar, sobre la existente, una estructura de PRFV cuyo peldañado, zanquín, tabica, etc. estará formado por perfiles prefabricados por pultrusión (polimerización en caliente de un perfil conformado en hilera y contiene hasta un 70% de fibra de vidrio). La matriz de mezcla está realizada a base de resina poliéster isostática y es el componente que compacta y protege el esfuerzo estructural, conforme a normas AFNOR y ASTM. La estructura de refuerzo mecánico está realizada con fibra de vidrio unidireccional tipo ROVING continuo de tipo E. Cada uno de los perfiles pultruidos, en su tecnología de producción, utiliza refuerzos a base de tejidos continuos multidireccionales que permiten aumentar las características mecánicas transversales. Se encapsulan en la superficie con una capa de poliéster, esto evita que afloren las fibras a la superficie y garantiza la protección contra rayos UV y agentes atmosféricos. Los diversos elementos, irán unidos mediante tornillería, que serán de acero inoxidable, conforme a normas antes relacionadas. La fijación al suelo, se hará sobre la losa de hormigón existente, mediante tacos químicos de alta resistencia, de forma que el piso propio de las cuevas no se vea afectado (Fig. 1).

Teniendo en cuenta la fragilidad del entorno en el que nos encontramos, se prevé que el montaje de dicha escalera se realice previamente en taller, de tal manera que los cortes y preparación necesaria para su montaje se produzcan fuera de la cueva, al objeto de minimizar la influencia sobre esta. El montaje se realizará de abajo-arriba, trasladándose únicamente el material necesario diario al interior de la cueva y en tramos. Previo al montaje del tramo diario, la empresa instaladora deberá plantear en taller dicho tramo, así como prever cómo quedará unida la nueva parte instalada a la escalera existente, de tal manera que esta pueda ser usada al día siguiente con total normalidad y seguridad por parte de los visitantes a las instalaciones de la cueva



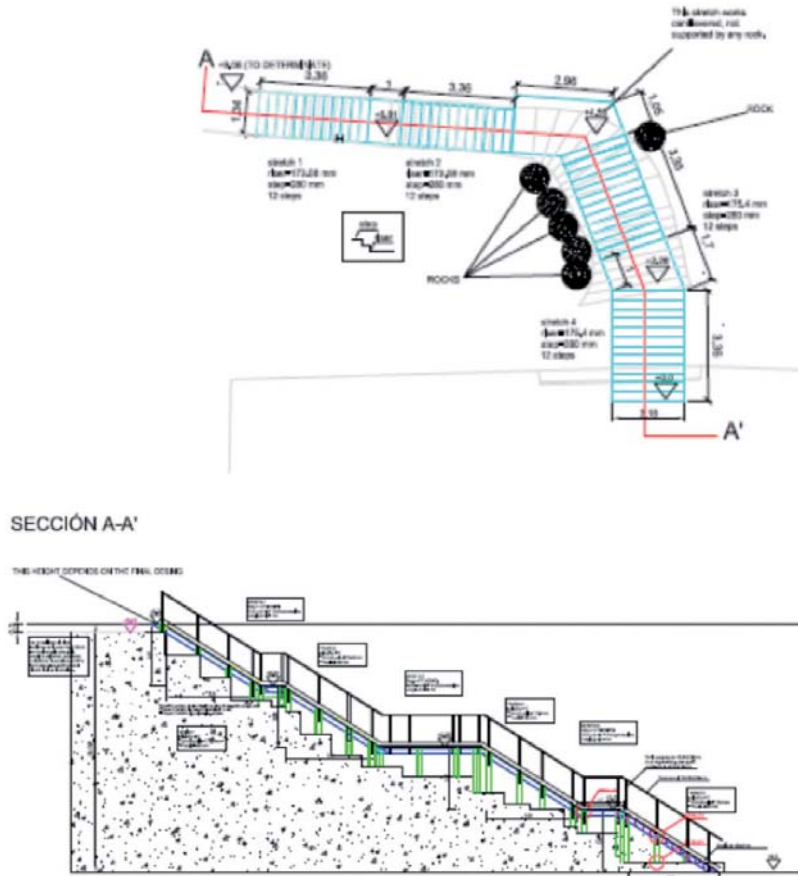


Figura 1: Nueva escalera montada sobre la existente. Replanteo

## Barandillas

Para dar uniformidad y por las características expuestas con anterioridad se optó por PRFV igualmente.

## Diseño de la iluminación en pasillos y escaleras

Las algas y cianobacterias forman biofilms fotosintéticos que se desarrollan en el entorno de los focos de luz eléctrica de la zona turística de la cueva. Este desarrollo, conocido como *mal verde* puede causar biodeterioro del sustrato y dañar el patrimonio natural y cultural de la cueva. Así pues, resulta de vital importancia conocer las respuestas fisiológicas de estos microorganismos a las variables ambientales que permitan diseñar medidas preventivas y correctoras destinadas a evitar y/o reducir el impacto que generan (del Rosal *et al.*, 2014)

La luz, entre otros, es el factor de producción más importante en los organismos fotosintéticos. La irradiancia, calidad espectral, distribución y utilización de la luz en el proceso fotosintético es un aspecto básico en la producción o disminución del crecimiento a través de la fotosíntesis. El uso de fotodiodos (LEDs) para el crecimiento de organismos fotosintéticos se ha incrementado en los últimos años dado que esta tecnología de iluminación permite crear composiciones

o formas espectrales de bandas estrechas, así como combinaciones para aumentar o disminuir el rendimiento fotosintético. Por consiguiente, la característica más deseable de la radiación, al objeto de disminuir la asimilación fotosintética con LEDs, es la de combinar bandas de emisión que no se encuentren entre las bandas espectrales más efectivas para la fotosíntesis de estos organismos.

Teniendo en cuenta lo indicado anteriormente para la zona peatonal debemos diseñar un sistema que:

- genere el nivel lumínico necesario para desarrollar la tarea (desplazamiento seguro de los visitantes), teniendo en cuenta que si utilizamos menos intensidad lumínica en la zona peatonal, esta disminución nos permitirá bajar también el nivel lumínico de la iluminación ornamental y artística.
- presente un espectro de emisión de la fuente, que nos permita pasear con tranquilidad y seguridad pero que, en lo posible, se encuentre distante de los picos de máxima absorción de los biofilms.
- ilumine sólo la zona peatonal, de manera que disminuya en lo posible la intrusión lumínica en zonas no deseadas.

Dado que, como se ha indicado, uno de los principales agentes que determinan el crecimiento de algas y cianobacterias es la luz y según los estudios realizados, uno de los parámetros fundamentales es la cantidad de ésta, nos hemos decantado por usar niveles de iluminación bajos, de alrededor de 10 lux, lo que teniendo en cuenta el factor de reflexión del suelo, puede suponer alrededor de 0,7 cd/m<sup>2</sup>. En este rango de luminancia nos encontraríamos en lo que en luminotecnia se denomina visión Mesópica (se produce cuando nos encontramos en situaciones de niveles lumínicos 0,003 y 10 cd/m<sup>2</sup>), en este tipo de visión trabajan de una manera simultánea los conos y bastones (células fotosensibles que se encuentran alojadas en la retina). Esto permitirá ver mejor el color de los objetos y, además, ver mejor por contraste.

### ***Espectro de emisión***

En relación con el espectro de emisión, se ha desarrollado una luminaria en la que se combinan dos tipos de LEDs, que se van alternando uno a uno (Fig. 2).

- OSRAM BU-BUCQ-57H-1, con temperatura de color de 4000K.
- OSRAM LV T6SG, con emisión en 505 nm.



*Figura 2. Prototipo de luminaria*

La longitud de onda resultante de la combinación de fuentes en la luminaria es de unos 507 nm, que como se puede ver en la imagen que se presenta a continuación (Fig. 3), permite además el mejor funcionamiento de los bastones, que son los fotorreceptores que utilizamos a bajos niveles lumínicos.

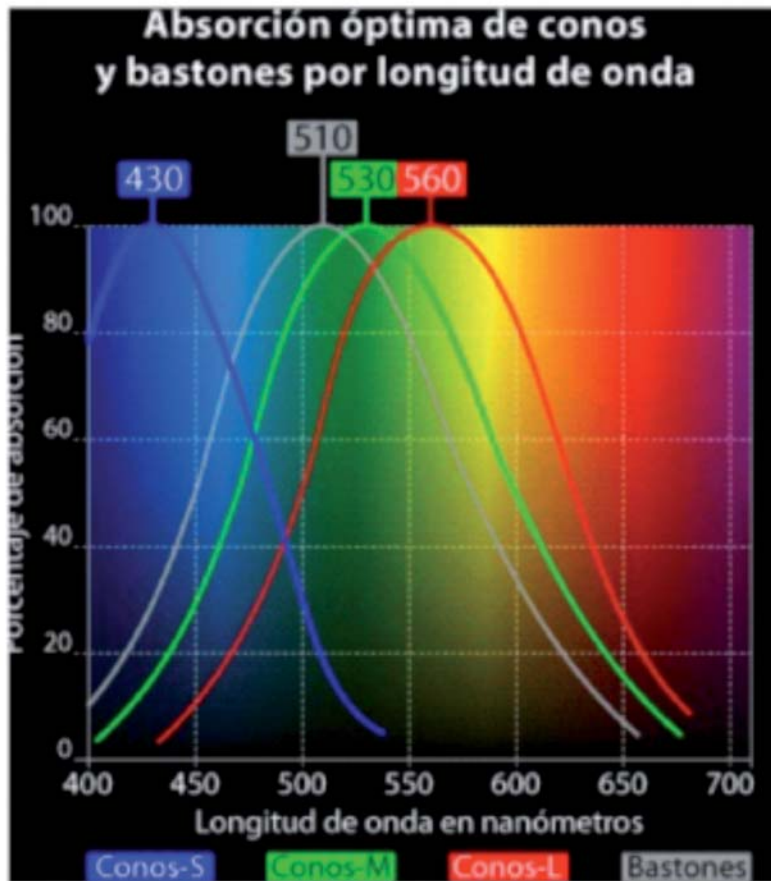


Figura 3. Grafica de absorción óptica de ojo humano por longitud de onda

### **Intrusión lumínica**

Uno de los problemas que nos encontramos en la Cueva de Nerja es la falta de uniformidad en la zona peatonal encontrándonos con zonas muy iluminadas y otras oscuras, para ello nos hemos decantado por la colocación de tiras LEDs orientadas adecuadamente, que además de proporcionarnos esta uniformidad, evitará la intrusión lumínica en las zonas no deseadas de los alrededores del paseo. Para evitar en lo posible, la intrusión lumínica en zonas no deseadas, utilizaremos un sistema de anclaje que permita el giro de la luminaria bajo el pasamanos, lo que nos posibilitará llegar con la luz de manera uniforme a las distintas anchuras que nos encontramos en el recorrido, además de controlar el alcance y limitar la iluminación a la zona deseada. El nivel bajo de iluminación va a permitir reducir también el nivel lumínico de la iluminación artística, que permite ver las maravillas que encierra la cueva, con el consiguiente ahorro energético y la disminución de afectación al entorno natural, además de reducir, en parte, el desarrollo de los biofilms fotosintéticos.

En base a lo expuesto, las características de la luminaria propuesta para el recorrido turístico serían:

- luminaria lineal para diferentes espacios en cueva indicada por su formato para pasillos, fosos, escaleras, etc.
- dotada de dos tipos de leds en luz visible y luz para combatir el *mal verde*, se posiciona como una excelente luminaria que ayuda a ralentizar el crecimiento de organismos en las rocas, en las que se proyecta la luz.
- unión entre sí mediante conectores IP. Perfil de aluminio anodizado en color plata, difusores opal. Integra un recubrimiento coating, especialmente formulado para protección en condiciones de trabajo muy agresivas.

Estas luminarias lineales se dispondrán en los pasamanos de las barandillas y tendrán longitudes de 0,5, 1 y 2 metros según necesidad, correspondiendo a cada longitud las siguientes potencias:

HAZLED NERJA 500mm	3W
HAZLED NERJA 1000mm	6W
HAZLED NERJA 2000mm	12W

Siguiendo con el criterio del resto de la cueva, la iluminación de la explanada de la Sala de la Cascada se realizaría mediante una iluminación perimetral, colocada sobre barandilla de menor altura, obteniendo de esta manera un bañado de la superficie del suelo, que permitirá un mayor contraste con el entorno.

En relación en la iluminación de seguridad y por tratarse de una instalación especial y teniendo en cuenta los recorridos tan largos que nos encontramos en la zona visitable, nos hemos decantado por la utilización de un SAI para el cuadro A y otro para el cuadros secundario B (cuadros secundarios que son necesarios instalar para abastecer de energía eléctrica a la instalación). Estos SAIs serán de tecnología On-Line, lo que permite que la carga se alimente permanentemente de la energía que genera el propio SAI/UPS exista o no suministro eléctrico. Se calculan los SAIs para asegurar la iluminación durante un período de una hora, ya que se estima que este es tiempo más que suficiente para la evacuación de los visitantes por los trabajadores de la cueva. Los SAIs proyectados poseen las siguientes características: SAI marca Salicru modelo SLC-4000TWN pro B1 con una potencia de 4000VA con una autonomía de 75 min., con tecnología Online, formato torre, doble conversión, sin transformador, compuesto por rectificador con corrector de factor de potencia, cargador de baterías, ondulator, bypass automático e interfaz de comunicación. Equipo paralelable hasta un máximo de 4 uds de 4 KVA. Las propias luminarias LEDs, al estar alimentadas por el SAI harán las veces de luminarias de emergencia, puesto que, desde el corte de suministro eléctrico tendríamos al menos una hora para la evacuación de la cueva sin perder el suministro de iluminación de viales.

## Conclusiones

En definitiva, se trata de un trabajo en el que se ha tratado de conjugar el aspecto técnico con las condiciones especiales de la cueva, dando lugar a una solución equilibrada en cuanto a calidad y cantidad de luz, elección de los materiales y teniendo en cuenta el entorno en donde debe realizarse la reforma.

## Referencias

- Carrasco, F., Andreo, B., Vadillo, I., Durán, J.J. y Liñán, C. 1999. El medio ambiente subterráneo de la Cueva de Nerja (Málaga). Modificaciones antrópicas. En: Andreo, B. Carrasco, F. y Durán, J.J. (Eds.). *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja, Nerja (Málaga), 323-334.
- Carrasco, F., Andreo, B., Vadillo, I. y Liñán, C. 2000. Human influence on the karst water of the Nerja Cave. En: Drew, D. y Hotzl, H. (Eds.). *Human impacts and Karst Groundwater: International Contribution to Hydrogeology*, 20, 168-173.
- Fairman, H. S., Brill, M. H. y Hemmendinger, H. 1997. How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from the Wright–Guild Data. *Color Research and Application*, 22, 11-23.
- Fairman, H. S., Brill, M. H. y Hemmendinger, H. 1998. Erratum: How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from the Wright–Guild Data. *Color Research and Application*, 23, 259-259.
- Guild, J. 1932. The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 230, 149-187.
- Harris, A. C. y Weatherall, I. L. 1990. Objective evaluation of colour variation in the sandbrowsing beetle *Chaerodes trachyscelides* White (Coleoptera: Tenebrionidae) by instrumental determination of CIE LAB values. *Journal of the Royal Society of New Zealand (The Royal Society of New Zealand)*, 20, 253-259.
- Katsuura, T., Jin, X., Baba, Y., Shimomura, Y. y Iwanaga, K. 2005. Effects of Color Temperature of Illumination on Physiological Functions. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*. 321-326.
- Del Rosal, Y., Roldán, M. y Hernández-Mariné, M. 2014. Phototrophic microorganisms in the tourist cave of Nerja. En: Rogerio-Candelera, M.A. (Ed.). *Science, Technology and Cultural Heritage. Proceedings of the Second International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*. Sevilla, 229-235.





## Trabajos de investigación y conservación en Cueva Pintada (Nerja, Málaga)

C. Liñán Baena <sup>(1,2)</sup>, Y. del Rosal Padial <sup>(1)</sup>, L.E. Fernández Rodríguez <sup>(1)</sup>, A. Atencia Prieto <sup>(3)</sup>, D. Jimena Fernández <sup>(3)</sup> y A. Ortega Jiménez <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Investigación, Fundación Cueva de Nerja. C/ Carretera de Maro, s/n. 29787-Nerja, Málaga, cbaena@cuevadenerja.es. yolanda@cuevadenerja.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n, 29071, Málaga, crilnbae@uma.es

<sup>(3)</sup> Club de Espeleología Cueva de Nerja. C/ Jacinto Benavente, nº 2. 29780-Nerja, Málaga.

---

### RESUMEN

La Cueva Pintada (250 m.s.n.m.) se desarrolla dentro del Área de Protección Integral del Bien de Interés Cultural Cueva de Nerja, a pocos metros al norte de ésta. Alberga una sima artificial de casi 100 m de profundidad que, en base a los trabajos de topografía disponibles, se encontraría próxima a las salas más internas de la Cueva de Nerja. Las exploraciones espeleológicas realizadas en la década de los 70 fueron infructuosas, pues no se localizó ninguna vía de comunicación practicable entre ambas cuevas. Sin embargo, el patrón de ventilación natural observado actualmente en la Cueva de Nerja, con flujos de aire de direcciones opuestas durante los períodos de verano y de invierno, es característico de cuevas que presentan entradas a diferente altura, por lo que se planteó la hipótesis de una conexión Cueva de Nerja-Cueva Pintada que permitiera, al menos, el intercambio de aire. Los resultados de la monitorización ambiental de ambas cavidades permitieron confirmar la comunicación entre ambos espacios subterráneos y, en base a ello, diseñar y poner en práctica un protocolo de actuación destinado a la protección y conservación de Cueva Pintada, como parte del sistema kárstico de la Cueva de Nerja. En dicho protocolo, autorizado por la Consejería de Educación, Cultura y Deporte de la Junta de Andalucía, se incluye la mejora del sistema de cerramiento, la retirada de residuos antrópicos y la monitorización ambiental de la cavidad. La complejidad de algunas tareas incluidas en el protocolo y la singularidad del lugar de trabajo motivó la participación en las mismas del Club de Espeleología Cueva de Nerja. En la actualidad, prosiguen los trabajos en Cueva Pintada dirigidos, por una parte, a la actualización de la topografía conocida hasta el momento y, por otra, a la realización de investigaciones multidisciplinares que permitan aumentar el conocimiento de la cavidad y de su entorno.

**Palabras clave:** conservación, Cueva de Nerja, Cueva Pintada, parámetros medioambientales, protocolo de actuación.

### ABSTRACT

*La Cueva Pintada (250 m.s.n.m.) develops within the Area of Integral Protection of Cultural Interest Cueva de Nerja, a few meters north of it. Houses an artificial gap of almost 100 m of depth, based on the work of surveying available, would find next to the innermost of the Cueva de Nerja rooms. Speleological explorations in the 70s were unsuccessful, as no practicable means of communication between the two caves were not located. However, the pattern of natural ventilation currently observed in the Cueva de Nerja, with airflows from opposite directions during periods of summer and winter, it is characteristic of caves that have entrances at different heights, so it was hypothesized a cave Cueva Pintada Nerja-connection that would allow at least air exchange. The results of environmental monitoring of both cavities possible to confirm communication between underground spaces and, on that basis, to design and implement a protocol for the protection and conservation of Cueva Pintada, as part of the karstic system Cueva de*

*Nerja. In that authorized by the Ministry of Education, Culture and Sport of the Junta de Andalucía, protocol improved enclosure system, withdrawal of anthropic waste and environmental monitoring of the cavity is included. The complexity of some tasks included in the protocol and the uniqueness of the workplace motivated the participation therein Caving Club Cueva de Nerja. Currently, work is continuing in Cueva Pintada aimed, on the one hand, updating the topography known so far and, secondly, to the realization of multidisciplinary research to increase awareness of the cavity and its environment.*

**Key words:** *conservation, Cueva de Nerja Cueva Pintada, environmental parameters, performance protocol.*

## Introducción

Cueva Pintada es una pequeña cavidad que se desarrolla dentro del Área de Protección Integral del Bien de Interés Cultural Cueva de Nerja, pocos metros al norte de ésta. En el contexto científico, aparece citada por primera vez en las Actas de la Sociedad Española de Historia Natural, correspondientes a la sesión del 9 de febrero de 1898 (Jordá Pardo, 2004). Actualmente forma parte del Patrimonio Arqueológico de Andalucía, ya que en ella se han documentado cerámicas y otros útiles del Calcolítico (Suárez *et al.*, 1998).

En 1976, en el marco de las exploraciones espeleológicas que se desarrollaban en la Cueva de Nerja y en su entorno, se decidió explorar Cueva Pintada, principalmente para tratar de localizar una nueva vía de acceso a la Cueva de Nerja, dada la proximidad entre ambas cavidades. Sin embargo, estas exploraciones resultaron infructuosas, pues no se localizó ninguna vía de comunicación practicable (G.E.M.A., 1976). En 1979 comenzaron los trabajos de perforación de un pozo en Cueva Pintada, con el objetivo de conectar artificialmente ambas cavidades. En 1982 se dio por finalizado el proyecto, sin haber encontrado una conexión practicable entre las dos cuevas.

En 2013, el Instituto de Investigación de la Cueva de Nerja inició la investigación sistemática de Cueva Pintada, con objeto de comprobar la participación de esta última en la ventilación natural de la Cueva de Nerja. En la boca del pozo artificial se instaló un sensor para medir, en continuo, la temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> del aire y se iniciaron las medidas puntuales de la dirección de los flujos de aire. Los resultados de la monitorización ambiental de Cueva Pintada y, en paralelo, de la Cueva de Nerja, confirmaron la comunicación entre ambos espacios subterráneos (Liñán *et al.*, 2014; Liñán y del Rosal, 2014).

La existencia de esta nueva vía de acceso, no practicable, a la red kárstica de la Cueva de Nerja, ha hecho necesario el diseño y puesta en práctica de un protocolo de actuación destinado a la protección y conservación de Cueva Pintada, que se describe en el presente trabajo.

## Estado de conservación de Cueva Pintada tras los trabajos de perforación

Los trabajos de perforación del pozo artificial en Cueva Pintada produjeron un importante impacto antrópico en la misma (Fig. 1). La entrada natural de la cavidad fue aumentada considerablemente para facilitar la salida del material excavado y numerosos espeleotemas resultaron dañados, por las propias voladuras, por roturas intencionadas y por la instalación del



Figura 1. Imágenes de las dos caras del muro que cerraba parcialmente la entrada a la Cueva Pintada (arriba) y del estado de la misma en abril de 2013. En la última imagen se aprecia el relleno sedimentario próximo a la boca



cableado eléctrico y otras infraestructuras. Parte del relleno sedimentario de la entrada, en el que actualmente se observan cantos autóctonos y moluscos continentales, fue eliminado, sin documentarse desde el punto de vista arqueológico.

Tras el fin de los trabajos, se instaló una reja en la entrada de la cueva que, posteriormente, fue sustituida por un muro de ladrillo pero que cerraba la entrada sólo parcialmente. Tampoco se retiró parte de la infraestructura utilizada, principalmente la ubicada en el interior del pozo artificial, constituida por tableros de aglomerado y elementos metálicos que sustentaban las paredes del pozo o servían para progresar en el mismo (Fig. 2). Estos elementos fueron deteriorándose con el paso del tiempo, generando una gran cantidad de residuos perjudiciales desde el punto de vista de la conservación. El riesgo de accidente para las personas era también alto, dada la presencia de un pozo de unos 90 m de profundidad sin señalización alguna, en una cueva con acceso relativamente fácil.



*Figura 2. Aspecto del interior del pozo artificial. El material de color marrón oscuro que se observa en las fotos es el serrín que formaba los tableros de aglomerado*

### **Protocolo de actuación para la protección y conservación de la Cueva Pintada**

En abril de 2013, el Instituto de Investigación emite un informe relativo al estado de Cueva Pintada y redacta un protocolo de actuación, que integra un conjunto de medidas preventivas



y correctoras destinadas a mejorar la protección y el estado de conservación de la cavidad y a prevenir posibles accidentes. En concreto, las medidas propuestas fueron las siguientes:

(1) Instalar un nuevo cerramiento en Cueva Pintada, que acorde a las directrices marcadas por las administraciones encargadas de velar por la protección de zonas con valor arqueológico y natural. Al mismo tiempo, el cierre propuesto debe permitir la ventilación de la cavidad y de las posibles cuevas conectadas a ella, impedir el acceso a personas no autorizadas, permitir el paso a los murciélagos y no aumentar los riesgos de predación.

En base a estas premisas, se consideró como sistema de cierre más adecuado un enrejado de naturaleza inoxidable, a instalar en la entrada de la cueva, por encima del muro de ladrillo, donde se habilitaría una puerta para el acceso del personal autorizado. Los barrotes del enrejado debían anclarse al muro ya existente y tener una separación horizontal mínima de 15-16 cm y una separación vertical de, al menos, 60 cm. La presencia de quirópteros en la cavidad, entre ellos la especie *Miniopterus schreibersii*, motivó que la parte superior del cerramiento de la entrada quedara libre de rejas (Garrido *et al.*, 2008). Esta zona se correspondería con la entrada natural de la cavidad según testimonios orales de trabajadores que participaron en la perforación del pozo. Para evitar el acceso de personas por esta zona, se recomendó la instalación de una fila de hierros verticales con un ángulo de 45°.

(2) Colocar un panel informativo en la entrada de la cavidad, en el que se informe de la protección legal de la cueva, así como los organismos implicados en el cerramiento, teniendo en cuenta su ubicación, dentro del Bien de Interés Cultural Cueva de Nerja.

(3) Mientras se lleva a cabo el cerramiento, instalar carteles informativos en la entrada y en el interior de la cavidad, que adviertan de la prohibición y peligro que conlleva el acceso sin autorización. Esta actuación se llevó a cabo en mayo de 2013 (Fig. 3).

(4) Restaurar, en la medida de lo posible, el aspecto original de Cueva Pintada, retirando de la misma los residuos, de los cuales, la mayoría tenían relación con los trabajos de construcción del pozo (escombros, escaleras, sujeciones metálicas, etc).

(5) Continuar los trabajos de investigación en la cavidad, relativos a la monitorización ambiental, control hidrogeológico, de flujos de aire, de fauna y de incidencias de conservación.

(6) Iniciar la investigación arqueológica: prospección sistemática de paredes y suelo de la cueva, cartografía de vestigios de la ocupación prehistórica y documentación de los mismos.

(7) Realizar una topografía de Cueva Pintada, ya que la información topográfica disponible es muy escasa y, aparentemente, inexacta.

(8) Solicitar la autorización pertinente a la Consejería de Educación, Cultura y Deporte de la Junta de Andalucía, antes del inicio de las actuaciones propuestas.

(9) El equipo de trabajo estará constituido por el personal del Instituto de Investigación Cueva de Nerja y los miembros del Club de Espeleología Cueva de Nerja.



Figura 3. Señalizaciones instaladas en Cueva Pintada en el muro de entrada (izqda.) y en el interior (centro), antes de llegar a la boca del pozo artificial (dcha.)

## Resultados

Tras obtener la autorización de la Consejería competente, se llevaron a cabo los trabajos contemplados en el protocolo de actuación, centrados en la mejora del cerramiento de la cavidad, la limpieza de escombros y otros residuos, la retirada de antiguas escalas y sujeciones metálicas del pozo y la actualización de la topografía de la cueva (en curso).

### a) Mejora del cerramiento de Cueva Pintada

En primer lugar, se procedió a la instalación de un nuevo sistema de cerramiento (Fig. 4) que mantuvo el muro original y habilitó una puerta metálica con cerradura de seguridad. Sobre el muro se instaló un enrejado galvanizado de barras horizontales y verticales, con una última fila de barras verticales terminadas en ángulo de 45°. La única modificación del diseño inicialmente previsto fue la instalación de barrotes verticales en la abertura original de la cueva (flechas



Figura 4. Cerramiento actual de Cueva Pintada. Las imágenes de la derecha muestran un detalle de la abertura superior, que permite el paso libre de los murciélagos más sensibles a las rejas, y el candado de seguridad que cierra la puerta

en figura 4) para prevenir la entrada de personas no autorizadas por esa zona, tras comprobar que la abertura que resultaba era suficiente para el paso de los murciélagos.

### **b) Limpieza de escombros y residuos. Retirada de antiguas escalas y sujeciones metálicas del pozo artificial**

Las tareas de limpieza de escombros y residuos del interior de la cueva y del pozo artificial fueron realizadas por los miembros del Club de Espeleología Cueva de Nerja, bajo la supervisión del Instituto de Investigación (Fig. 5). Destacamos la dificultad de la retirada de los elementos metálicos del pozo artificial, por su tamaño métrico, su avanzado estado de oxidación y su propia ubicación, en el interior del pozo. Los residuos retirados de la cueva fueron, posteriormente, trasladados a la villa de Nerja, para su adecuado procesado y eliminación.

### **c) Investigaciones interdisciplinares**

Finalizada la limpieza y el acondicionamiento del pozo para su exploración espeleológica, en la actualidad se están llevando a cabo trabajos topográficos que permitirán actualizar la información disponible al respecto y dotar al B.I.C. Cueva de Nerja de una nueva herramienta que facilite el control efectivo y la gestión del área protegida.

Por otro lado, la retirada controlada de las infraestructuras que, en su día, fueron abandonadas en la cavidad, también ha hecho posible la inspección visual de algunos tramos del suelo que permanecían parcialmente inalterados. El lateral izquierdo de la galería principal de la cavidad ha conservado parte de los depósitos arqueológicos, aunque, evidentemente, desplazados por arrastre desde sus posiciones originales. A pesar de las numerosas alteraciones sufridas por la fracción arqueológica, aún se reconocen en superficie restos materiales, como fragmentos de cerámica elaborada a mano y algunas evidencias de malacofauna, que se corresponden con formas de consumo propias de la Prehistoria Reciente, documentadas en la Cueva de Nerja desde las postrimerías del Neolítico hasta bien entrada la Edad del Cobre, siempre en términos de cronología relativa convencional (Suárez *et al.*, 1998). Aun tratándose de materiales desplazados por efecto de arrastres naturales y antrópicos, su importancia debe valorarse adecuadamente, dado que se ven complementados con hallazgos de cerámicas dispersas en la superficie del sendero que enlaza la Cueva de Nerja y Cueva Pintada. A pesar de que se trata de unos terrenos muy denudados por la erosión de superficie, la zona más elevada presenta una morfología de pequeñas terrazas. En estos sectores de relativa horizontalidad se han conservado varios vestigios cerámicos que presentan fracturas muy alteradas.

El grueso del material es un conjunto de cerámicas atípicas de cocciones oxidantes continuas y tratamientos que debieron ser bruñidos. En cualquier caso, en algunos ejemplares se puede reconocer una clara tipología que se corresponde con fuentes y platos de carena baja y perfiles de tendencia entrante. Estas piezas se corresponden con el "Horizonte de las Fuentes Carenadas", *Taças carenadas* de la terminología acuñada en el suroeste peninsular por los investigadores portugueses. Son los tipos guía que definen en lo vascular la facies Tardía del Neolítico.



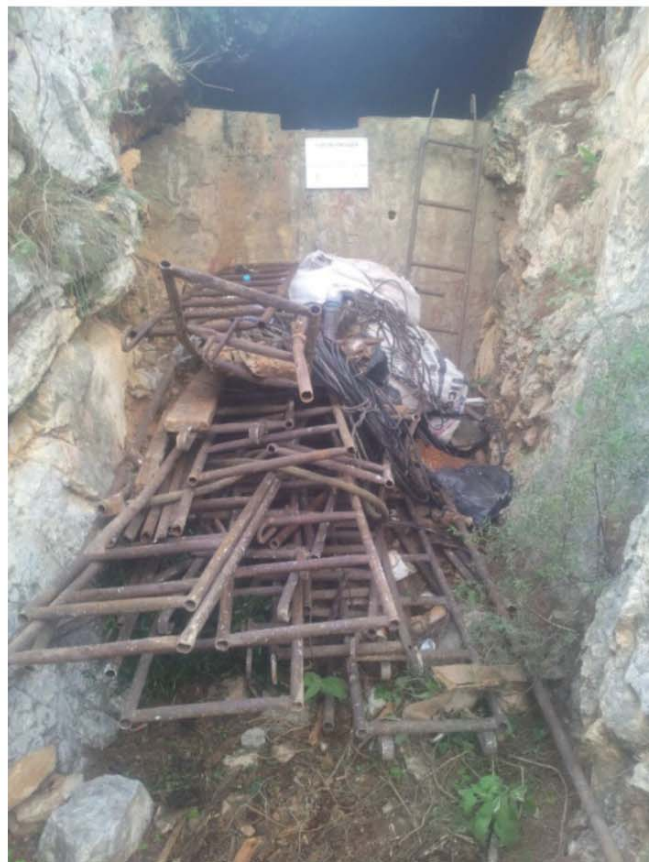
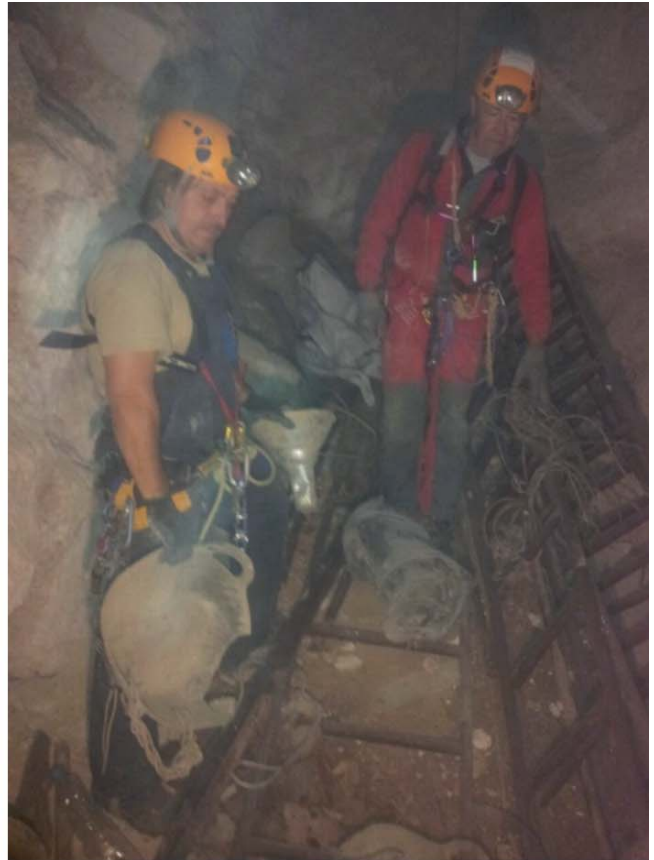


Figura 5. Proceso de limpieza del pozo de Cueva Pintada y residuos retirados del interior de la cavidad

Este horizonte está muy bien representado en los niveles de la Cueva de Nerja, sobre todo los identificados en las salas de Vestíbulo y la Torca, del mismo modo que en la mayor parte de los yacimientos de similar definición cultural, tanto de la costa como del hinterland malagueño. En términos absolutos se fecha con bastante precisión en la segunda mitad del IV milenio ANE. El hallazgo abre nuevas perspectivas para la organización de futuras investigaciones relativas a la Prehistoria Reciente de la Cueva, debiendo prestar atención a la zona exterior de la cavidad.

Por otro lado, la monitorización medioambiental de la cavidad, en paralelo a la de la Cueva de Nerja, está aportando datos de gran interés, que han permitido confirmar hipótesis previas sobre la relación existente entre ambas cuevas y precisar el modelo de ventilación natural de la Cueva de Nerja (I.I.C.N., 2015). De igual modo, se han localizado en Cueva Pintada diversos ejemplares de fauna (Fig. 6), entre los que se incluyen algunos troglobios, pendientes de investigación y catalogación.



*Figura 6. Imágenes de fauna observada en el interior de Cueva Pintada*



## Consideraciones finales

Los trabajos desarrollados en Cueva Pintada han supuesto una mejora considerable en relación a los requisitos patrimoniales y ambientales de una cavidad que forma parte del área de protección integral del Bien de Interés Cultural Cueva de Nerja y que, además, juega un papel fundamental en su proceso de ventilación natural.

El nuevo cerramiento de Cueva Pintada evita el libre acceso a la cavidad y, en consecuencia, el riesgo de caída accidental al pozo artificial, cuya profundidad aproximada es de 90 metros. Además, el nuevo cierre disminuye considerablemente la probabilidad de actos vandálicos en Cueva Pintada y ha permitido reanudar el control ambiental iniciado en 2013, con la instalación de un nuevo equipo de medida de parámetros ambientales y detectores pasivos de radón, sin riesgo de ser sustraídos, como ya sucedió en ocasiones previas. Por otro lado, el diseño del cierre respeta el tránsito de murciélagos entre la cueva y el medio exterior y garantiza la adecuada ventilación de la red kárstica.

Los trabajos de retirada de residuos de Cueva Pintada han permitido recuperar, en la medida de lo posible, el paisaje subterráneo y las condiciones ambientales que debe tener una cueva que forma parte de un Bien de Interés Cultural. La retirada de todo el material antrópico presente en el interior del pozo era, igualmente, un trabajo indispensable para poder realizar los trabajos de topografía del pozo artificial sin asumir riesgos físicos innecesarios.

En la actualidad, prosiguen los trabajos en Cueva Pintada dirigidos, por una parte, a la actualización de la topografía conocida hasta el momento y, por otra, a la realización de investigaciones multidisciplinares que permitan aumentar el conocimiento de la cavidad y de su entorno.

## Agradecimientos

Al Club de Espeleología Cueva de Nerja, por su compromiso con la conservación del medio subterráneo y por su inestimable ayuda.

## Referencias

- Garrido, J.A., Ibáñez, C., Fijo, A., Migens, E., Nogueras, J. y Quetglas, J. 2008. Los quirópteros cavernícolas de Andalucía. En: Calaforra y Berrocal (Eds.) *El karst de Andalucía*, 59-65.
- G.E.M.A. 1976. Exploración en la Cueva de Nerja. *Jábega*, 13: 60- 68.
- I.I.C.N. 2015. *Memoria Científica del Instituto de Investigación Cueva de Nerja, año 2015*, 571 pp (inédita).
- Jordá Pardo, J.F. 2004. Análisis geomorfológico y paleogeográfico de la Costa del Sol Oriental en los alrededores de Nerja (Málaga, Sur de España). *Zona Arqueológica*, 4 (I Geología): 52-71.
- Liñán C., Carrasco F. y Rosal, Y. del. 2014. Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: Calaforra, J.M.

y Durán, J.J. (eds.). *Iberoamérica subterránea*. Actas del I Congreso Iberoamericano y V Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, 229-238.

Liñán, C. y Rosal, Y. del. 2014. Ventilación natural de cuevas kársticas: nuevos datos sobre la Cueva de Nerja (Málaga, S de España). En: Andreo, B. et al. (eds.), *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*, 1: 505-511.

Suárez, J., Fernández, L., Santamaría, J., Soto, A., Sánchez, J. y Navarro, I. 1998. Informe de la prospección arqueológica superficial: Autovía del Mediterráneo (Málaga-Adra), Tramo Frigiliana/Maro. *Anuario Arqueológico de Andalucía* 1993. Tomo II. Actividades de Urgencia, 527-534.



## Biofilms en cuevas turísticas: la Cueva de Nerja y la Cueva del Tesoro

Y. del Rosal Padiál <sup>(1)</sup>, V. Jurado Lobo <sup>(2)</sup>, M. Hernández Mariné <sup>(3)</sup>, M. Roldán Molina <sup>(4)</sup> y C. Sáiz Jiménez <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Investigación, Fundación Cueva de Nerja. C/ Carretera de Maro, s/n, 29787 Nerja, Málaga, yolanda@cuevadenerja.es

<sup>(2)</sup> Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. IRNAS-CSIC. Avda. Reina Mercedes, 10, 41012, Sevilla, vjurado@irnase.csic.es; saiz@irnase.csic.es

<sup>(3)</sup> Biología, Sanidad y Medio Ambiente. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona. Av. de Joan XXIII, 27-31, 08028, Barcelona marionahernandez@ub.edu

<sup>(4)</sup> Servicio de Microscopía. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Barcelona. Servicio de Microscopía, Edificio C, 08193, Bellaterra, Barcelona, monica.roldan@uab.es

---

### RESUMEN

La geomorfología del medio subterráneo depende de su historia geológica, y de los fenómenos que lo modelan, como la erosión y otros agentes externos. Además, sobre los sedimentos, las paredes o los espeleotemas de cuevas se desarrollan poblaciones de microorganismos que modifican la superficie mineral. Así, la colonización de este medio estará en función de las condiciones ambientales, del grupo de microorganismos en cuestión y de la biorreceptividad de los sustratos. Las cuevas se consideran espacios especializados que se caracterizan por una temperatura uniforme, elevada humedad y escasos recursos nutricionales y energéticos. Las cuevas turísticas presentan mayor disponibilidad de energía, generada por la luz artificial y la entrada de materia orgánica, y favorecen la presencia de un mayor número de organismos fotosintéticos y heterótrofos. El desarrollo de microorganismos sobre las paredes y los espeleotemas de las cuevas pueden producir procesos de biodeterioro, es decir, cambios indeseables en el sustrato. En este trabajo se presenta la información obtenida sobre la microbiota que coloniza espeleotemas iluminados de dos cuevas turísticas, la Cueva de Nerja y la Cueva del Tesoro (Málaga), mediante el empleo combinado de la microscopía y del análisis molecular. Los resultados ponen de manifiesto que los microorganismos se organizan en comunidades estructurales complejas denominadas biofilms. El empleo de la microscopía ha permitido conocer la composición del sustrato y su relación con el biofilm, así como observar procesos de biodeterioro relacionados con cambios físicos y químicos del sustrato tales como decoloración, pérdida de consistencia, ruptura y disolución. En relación con la composición de los biofilms, se ha observado una biodiversidad dominada por cianobacterias y microalgas, junto con actinobacterias, proteobacterias, arqueas, hongos e incluso protozoos y pequeños artrópodos. El análisis molecular revela la presencia de nuevas especies de microorganismos en ambas cuevas. El conocimiento de estas comunidades, así como sus mecanismos de biodeterioro permite el diseño de medidas preventivas y correctoras destinadas al control y a una adecuada conservación del patrimonio natural y cultural de ambas cuevas.

**Palabras clave:** biodeterioro, biofilms, conservación, cuevas, microorganismos.

### *Biofilms in show caves : Nerja Cave and Tesoro Cave*

#### ABSTRACT

The geomorphology of the subterranean environment depends on its geological history, and phenomena such as erosion and other external agents. Moreover, in the caves the development of microorganisms can change the surface of sediments, walls and speleothems. Therefore, the colonization of a cave will depend on the environmental conditions, the type of microorganisms involved and the substrata bioreceptivity. Caves are considered specialized areas characterized by a uniform temperature, high humidity and low nutritional and energy resources. Visited caves have more available energy, produced by artificial lighting and the input of organic matter, and these conditions allow the growth of photosynthetic and heterotrophic organisms. The development of microorganisms on the cave walls and speleothems may produce biodeterioration, i.e., undesirable changes in the substratum. This work provides information on the microbiota that colonizes illuminated speleothems in two tourist caves, Nerja and Tesoro (Málaga), through the combined use of optical and electron microscopy, together with molecular analysis. The results showed that, in both caves, microorganisms are organized into complex structural communities called biofilms. The microscopic approach provides data on the substratum composition and its relationship with the biofilm. Biodeterioration processes related to physical and chemical changes of the substratum such as discoloration, loss of consistency, breaking and dissolution, were also observed. The biofilms were dominated by cyanobacteria and microalgae together with actinobacteria, proteobacteria, archaea, protozoa, fungi and even small arthropods. Moreover, molecular analysis revealed the presence of new species of microorganisms in both caves. Knowledge about these communities and their mechanisms of biodeterioration allows the design of preventive and corrective actions, according with a proper conservation of natural and cultural heritage of both caves.

**Key words:** biodeterioration, biofilms, conservation, caves, microorganisms.

## Los microorganismos y el medio subterráneo

Los microorganismos forman el conjunto de seres vivos con mayor cantidad de biomasa y también el más extendido por el planeta. Gracias a su gran capacidad de adaptación a las condiciones ambientales han colonizado la práctica totalidad de los ecosistemas, incluidos los extremos. Las cuevas son ambientes muy específicos, con escasos recursos nutricionales y energéticos por lo que resultan hábitats hostiles para muchos grupos de microorganismos (Barton y Northup, 2007). Un amplio espectro de microorganismos ha sido identificado en el interior de las cuevas: bacterias, arqueas, hongos, levaduras y algas, que constituyen los principales organismos que forman los biofilms aerobios de cavidades (Jurado et al., 2010a). Las bacterias son los microorganismos más representativos del ambiente subterráneo, principalmente las actinobacterias de los géneros *Agromyces*, *Arthrobacter*, *Microbacterium*, *Nocardia*, *Nocardioides* y *Streptomyces* (Jurado et al., 2010a). Aunque menos numerosos, también se han realizado trabajos sobre arqueas en cavidades que identificaron filotipos diferentes de Crenarchaeota y Euryarchaeota (Chelius y Moore, 2004). Los hongos más comunes encontrados en cuevas son de morfología filamentosa (Northup y Lavoie, 2001), como los géneros *Penicillium*, *Aspergillus* o *Cladosporium*. En la cueva de Lascaux (Francia) el desarrollo masivo del hongo *Fusarium solani* dio lugar a una serie de crisis biológicas en la cavidad que han provocado un cambio irreversible en las condiciones ecológicas de la cueva así como el cese de la actividad turística (Bastian et al., 2010). Los microorganismos fotosintéticos de las cuevas incluyen cianobacterias, algas, briófitos, helechos y líquenes que se localizan en la zona más externa, con disponibilidad de luz natural, o en el entorno de focos de luz eléctrica. En las zonas más profundas las cianobacterias suelen ser el grupo dominante y presentar adaptaciones para soportar escasa iluminación y humedad. Estas pátinas reciben el nombre de *flora de las lámparas* o *lampenflora* y forma recubrimientos en sedimentos, paredes y espeleotemas (Lefèvre 1974; Roldán et al., 2004; Roldán y Hernández Mariné, 2009; Albertano, 2012; Hauer et al., 2015, entre otros). Finalmente, los virus son endoparásitos estrictos que dependen fisiológicamente



de una célula viva y que han sido descritos asociados a microorganismos fotosintéticos en la Cueva del Tesoro (Jurado *et al.*, 2014).

Casi todas las especies de microorganismos disponen de mecanismos mediante los cuales pueden adherirse a las superficies y a otros microorganismos (Hernández-Mariné y Roldán, 2005) y formar comunidades estructuradas, denominadas biofilms o biopelículas, que representan la forma habitual de crecimiento bacteriano en la naturaleza. En general, los biofilms que colonizan las cuevas suelen ser poco diversos, con una estructura sencilla y muy sensibles a cambios ambientales (Chelius *et al.*, 2009). Las interacciones entre los biofilms y el sustrato son complejas y, en ocasiones, conllevan un cambio en las propiedades del sustrato que, cuando es indeseable, se denomina biodeterioro (Hueck, 1965). En las cuevas, los procesos de biodeterioro pueden poner en riesgo la conservación de su patrimonio natural y/o cultural. La literatura científica cuenta con numerosos trabajos que ponen de manifiesto la relación entre la alteración de monumentos pétreos y obras de arte con la presencia de comunidades de microorganismos, tales como bacterias, hongos, líquenes y algas (Warsheid y Braams, 2000). En cuevas, también han sido documentados casos en los que el desarrollo de microorganismos ha representado un factor de riesgo para la conservación de su patrimonio natural y/o cultural como, por ejemplo, los de la cueva francesa de Lascaux (Bastian *et al.*, 2010) o los de las cuevas españolas de Tito Bustillo, (Sáiz-Jiménez, 1999), Castañar de Ibor (Jurado *et al.*, 2010b) o Altamira (Saiz-Jimenez *et al.*, 2011). Prevenir o, en su caso, combatir este tipo de procesos precisa del diseño de actuaciones basadas en el análisis integral de la microbiota que informe sobre su diversidad, estructura, fisiología y relación con el soporte (Albertano y Urzi, 1999).

## **La Cueva de Nerja y la Cueva del Tesoro**

Los datos que se presentan en este trabajo corresponden a observaciones de muestras naturales y de cultivos de biofilms que se desarrollan en espeleotemas iluminados por luz eléctrica. Las muestras de los biofilms fueron obtenidas en la Cueva de Nerja (Nerja) y en la Cueva del Tesoro (Rincón de la Victoria). Ambas cavidades kársticas se localizan en la costa de la provincia de Málaga (España), son turísticas y albergan un importante patrimonio natural y arqueológico. La Cueva de Nerja se desarrolla en mármoles dolomíticos y, a efectos prácticos, se divide en dos zonas: las Galerías Turísticas y las Galerías Altas y Nuevas. Las primeras son las únicas habilitadas para la visita y ocupan un tercio del cavernamiento total. La monitorización ambiental ha permitido determinar, en ambas cuevas, un gradiente de temperatura y humedad relativa del aire que aumenta hacia las zonas más internas. En la zona visitable de la Cueva de Nerja, el valor medio anual de la temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono del aire es de 18,2 °C, 82 % y 667 ppm respectivamente (Liñán *et al.*, 2014). El caudal de goteo en el interior de la cueva es muy bajo, con registros máximos en verano y mínimos en invierno (Liñán *et al.*, 1999). El agua de infiltración es de naturaleza meteórica salvo en la zonas más próxima a la entrada donde el agua de goteo procede del riego de los jardines del exterior. Por otro lado, la Cueva del Tesoro se desarrolla en calizas blancas y alberga volumen subterráneo formado por varias cavidades naturales unidas artificialmente. El valor medio anual de temperatura y humedad relativa del aire es de 19,3 °C y 92,5 %, respectivamente, y la concentración de dióxido de carbono oscila entre 375-20.000 ppm (Hoyos *et al.*, 1996).

El agua de infiltración procede de la lluvia y accede a la cueva a través de las fisuras y torcas durante el invierno (Hoyos *et al.*, 1996), con pocos puntos de goteo activos en la actualidad.

El estudio realizado a los diferentes biofilms permitió conocer aspectos relativos a la biodiversidad de ambas cuevas y su relación con los procesos de biodeterioro. La información obtenida resulta una eficaz herramienta para el diseño de un sistema de gestión acorde con la adecuada conservación del patrimonio cultural y natural de ambas cavidades.

## Material y métodos

Las muestras analizadas corresponden a dos zonas en la Cueva de Nerja, una de ellas aparentemente seca y la otra con agua de escorrentía temporal a lo largo del año. En la Cueva del Tesoro, las muestras obtenidas corresponden a una zona con escorrentía constante. En todos los casos, las zonas se encontraban iluminadas por luz artificial durante unas ocho horas al día. En las zonas de muestreo se observaron biofilms que recubrían la superficie y mostraban diferentes tonalidades (azuladas, verdes o pardas). La metodología de estudio abarcó técnicas de análisis filogenético y microscópico cuyos resultados permitieron conocer la diversidad de organismos presentes, sus requerimientos de supervivencia y pautas de colonización así como los procesos de afección al sustrato. La observación directa de material de campo se llevó a cabo mediante un microscopio óptico Axioplan (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany) y las imágenes fueron captadas mediante una cámara digital AxioCam MRc5 y procesadas con el software Axioplan LE. La microscopía estereoscópica ofreció información morfológica de la muestra, relacionada con la estructura y textura superficial y permitió determinar el estado de conservación de la superficie o las consecuencias de biodeterioro (pátinas, costras, cavidades, pérdida de material, etc.). El análisis mediante microscopía electrónica de barrido se basó en del Rosal *et al.* (2012) y empleó un equipo Quanta 200, FEI  $\beta$  EDAX que permitió utilizar las técnicas complementarias de energía dispersiva de rayos x (EDS) y electrones retrodispersados (BSE). Estas técnicas ofrecieron información sobre la composición elemental de la muestra y la naturaleza de sus componentes.

La caracterización de las comunidades microbianas se realizó utilizando técnicas de biología molecular. La extracción de los ácidos nucleicos se realizó siguiendo el método de Griffiths *et al.* (2000). La identificación de cianobacterias, bacterias y arqueas se realizó mediante la secuenciación del gen ARN ribosómico 16S. La identificación de eucariotas se realizó con el gen ARN ribosómico 18S. Los genes se amplificaron mediante PCR empleando las parejas de cebadores Cya 106F (5'-CGG ACG GGT GAG TAA CGC GTG A-3') y Cya 781R (5'-GAC TAC TGG GGT ATC TAA TCC CAT T-3') para cianobacterias (Nübel *et al.*, 1997), 616F (5'-AGA GTT TGA TYM TGG CTC AG-3') y 907R para bacterias (Juretschko *et al.*, 1998; Teske *et al.*, 1996), Arch109F (5'-ACK GCT CAG TAA CAC GT-3') y 915R para arqueas (Großkopf *et al.*, 1998) y, EUKA (5'-AAC CTG GTT GAT CCT GCC AGT-3') y EUKB (5'-TGA TCC TTC TGC AGG TTC ACC TAC-3') para eucariotas (Diez *et al.*, 2001). A continuación, se construyeron genotecas a partir de los productos de PCR purificados de los genes ARNr 16S y 18S, y empleando el kit comercial TOPO TA Cloning Kit for Sequencing (Invitrogen, California, USA) según las instrucciones del fabricante. Los clones fueron procesados por las empresas MacroGen Europa (Amsterdam, Holanda) y Secugen (Madrid, España). Las secuencias obtenidas se editaron empleando el

programa BioEdit Sequence Alignment Editor versión 7.0.5.3 (Hall, 1999) y se analizaron en busca de posibles estructuras quiméricas empleando el paquete de software *mothur* (Schloss *et al.*, 2009). Después de este análisis, todas las secuencias se compararon con las secuencias de las bases de datos del GenBank en el NCBI (National Centre for Biotechnology Information; <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), que utiliza el algoritmo BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) (Altschul, *et al.* 1990).

## Resultados y discusión

En la zona seca los biofilms mostraron textura pulverulenta mientras que en las zonas con agua líquida la textura fue gelatinosa. Esta diferencia textural, también se relacionó con dife-

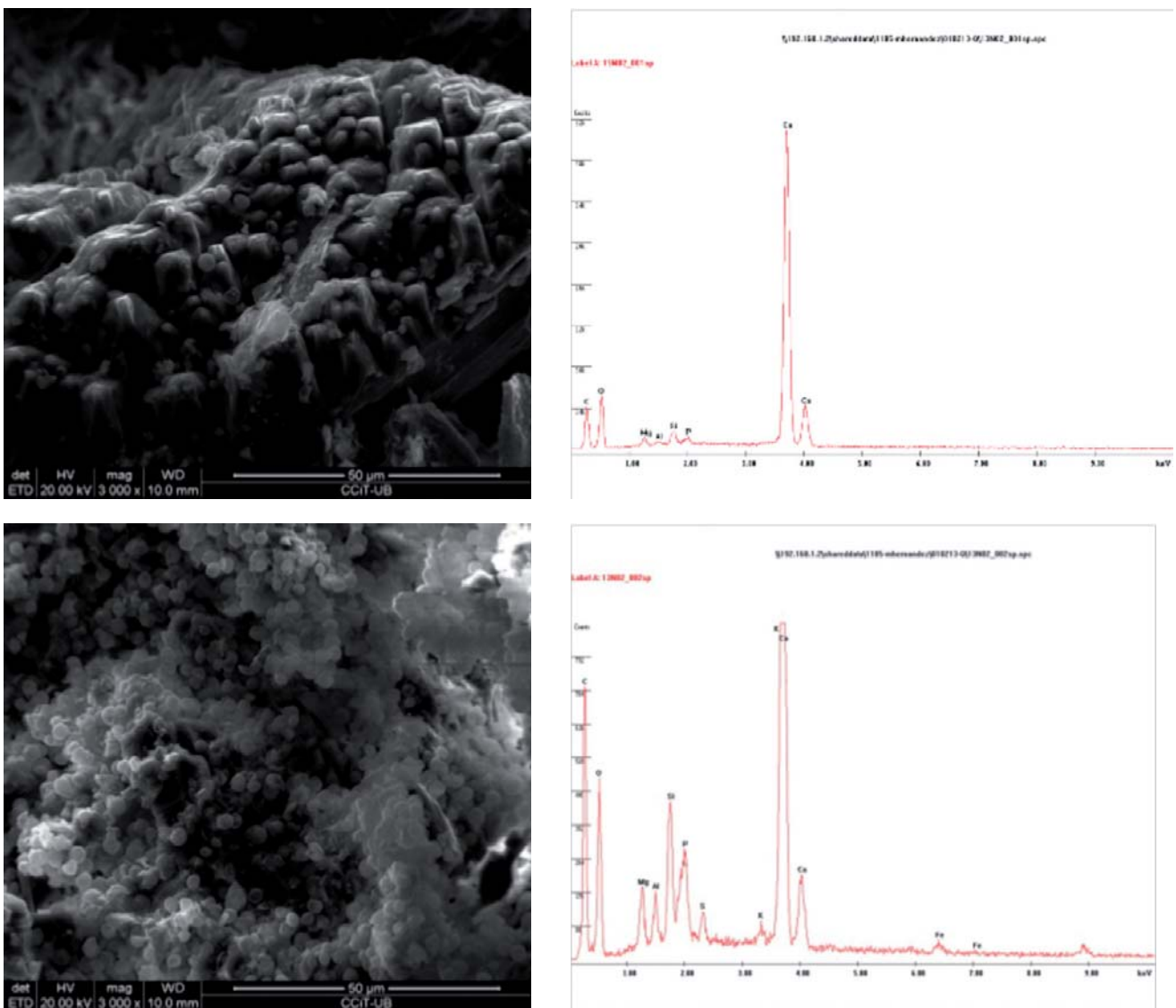


Figura 1. A la izquierda, microfotografías SEM correspondientes a dos puntos de una zona seca de la Cueva de Nerja. A la derecha, espectros EDS de estos puntos. Las imágenes superiores presentan mayor proporción de cristales y menor número de organismos. Por el contrario, las imágenes de abajo muestran mayor proporción de arcilla y mayor crecimiento superficial de organismos

rencias en la biodiversidad de los biofilms, siendo los más sencillos los de textura pulverulenta. En la zona seca fueron identificados dos grupos de organismos fotosintéticos, uno representado por la cianobacteria *Chroococciopsis* sp. y, el otro, por la rodofita *Cyanidium* sp., con propiedades de organismo mesófilo (Ciniglia et al., 2004). Ambos organismos se observaron formando biofilms mono-específicos o combinados, y en este último caso *Cyanidium* sp. ocupando la parte inferior. Esta escasa diversidad de organismos de los biofilms es una característica habitual cuando se desarrollan en condiciones ambientales extremas (Potts, 2001). En las zonas con agua líquida (ocasional o habitual) se identificaron mayoritariamente clorofíceas, representadas por *Jenufa* sp. y *Desmococcus endolithicus* en la Cueva de Nerja y por *Friedmannia* sp. y *Chlorella* spp. en la Cueva del Tesoro. También se identificaron, en menor proporción, cianobacterias con gruesas vainas mucilaginosas como *Aphanothece* sp. y *Gloeothece* spp. así como las filamentosas *Leptolyngbya* spp., *Nostoc punctiforme* o *Phormidium* sp. En esta cueva también se identificó el musgo *Eucladium verticilatum*. Asociados a estos organismos autótrofos también se identificó una abundante comunidad de heterótrofos (bacterias y arqueas) que se nutren de las sustancias sintetizadas y excretadas por los primeros. El análisis molecular confirmó la presencia de estos organismos, además de abundantes especies difíciles de asignar a grupos taxonómicos concretos. Por ejemplo, en ambas cuevas se detectó un gran número de clones (secuencia del gen ARNr 16S) correspondientes a los géneros *Cyanothece*, *Gloeothece* y *Pleurocapsa*. En la Cueva de Nerja ocurrió lo mismo con los géneros *Microcoleus* y *Halothece*, entre otros, sin que pudieran asignarse a una especie determinada. Este hecho puede deberse a que un número elevado de cianobacterias y algas presentes en ambas cuevas pudieran representar nuevas especies aún por describir y cuyas secuencias de ADN no se encuentran disponibles en las bases de datos existentes.

Los espectros de las muestras determinaron una mayor colonización microbiana de los sustratos más porosos y con mayor cantidad de arcilla que podría estar relacionada con una mayor protección y aporte de humedad por parte de estos sustratos hacia los biofilms, así como una mayor presencia de nutrientes, asociados a material arcilloso (Fig. 1). Según Guillitte (1995) la textura del sustrato es una de las principales propiedades que determinan su biorreceptividad, es decir, su potencialidad de ser colonizado por microorganismos. Así, los sustratos porosos, con capacidad de retener agua incrementan el periodo favorable de crecimiento de los microorganismos (Sáiz-Jiménez y Ariño, 1995).

En ambas cavidades, los biofilms mostraron un desarrollo epilítico y casmoendolítico, es decir, sobre la superficie y en las grietas y oquedades del sustrato (Figs. 2a, 2b). El desarrollo casmoendolítico se observó, principalmente, en las zonas más secas, probablemente debido a la presencia de agua de condensación y la necesidad de agua líquida de la mayoría de los organismos identificados para llevar a cabo el proceso de reproducción. La presencia de organismos entre los cristales del sustrato (Fig. 2c) favorece la pérdida de consistencia del mismo e incrementa su porosidad y, con ello, las zonas más propicias para la condensación de agua superficial, que podría inducir procesos de corrosión del sustrato (de Freitas y Schmekal, 2006). Los filamentos de hongos y protonemas de musgos pueden penetrar activamente en el sustrato y, del mismo modo, favorecer la condensación de agua en los huecos generados. En el caso de los musgos, ocasionalmente desarrollan tallo y filidios. En la Cueva del Tesoro se identificó el musgo *Eucladium verticilatum* mientras que en los biofilms de la Cueva de Nerja no se detectó la presencia de musgos. La pérdida de consistencia del sustrato también se

produce cuando los organismos actúan como núcleos de condensación de agua y favorecen la precipitación de cristales en su superficie, contribuyendo a la travertinización del sustrato. La capacidad de precipitar cristales en su superficie ha sido documentada en cianobacterias de los géneros *Scytonema*, *Geitleria* y *Chroococidiopsis* (Albertano, 2012) así como en algas que habitan en rocas calcáreas (Pouličková y Hašler, 2007). Estos organismos se relacionan con biofilms delgados y con poco mucilago envolvente que integran taxones con filamentos, pues sobreviven mejor en estas condiciones (Lamprinou *et al.*, 2012). En nuestro estudio, se observaron, puntualmente, depósitos de cristales sobre la vaina de cianobacterias en Nerja y de forma más evidente en la Cueva del Tesoro.

Además, los biofilms observados se caracterizaron por presentar una vaina de polisacáridos extracelular (EPS) que los envolvía, de forma individual o comunitaria, y que permitía su adhesión al sustrato y su protección frente a la desecación, gracias a la capacidad de la vaina para almacenar agua (Macedo *et al.*, 2009). La adherencia al sustrato y los cambios de volumen de estas vainas se relacionaron con procesos de tensión superficial y disgregación de las capas más superficiales (Warsheid y Braams, 2000) (Fig. 2d).

Según Sand y Bock (1991), otra forma de biodeterioro de la piedra se debe a la acción de los ácidos orgánicos e inorgánicos producidos como subproducto del metabolismo microbiano, que pueden reaccionar con el calcio de la piedra para formar otros minerales. En las rocas carbonatadas, el ácido sulfúrico producido por bacterias del azufre puede formar yeso (sulfato de calcio dihidratado), mientras que el ácido oxálico, producido por muchos hongos, líquenes y algunas bacterias, puede formar minerales de oxalato cálcico. En muestras de la Cueva de Nerja, se determinó la presencia de yeso en el sustrato, aunque este hecho no pudo ser relacionado con la presencia de bacterias del azufre. Aunque no pudieron ser constatados cambios en la composición del sustrato debido a la presencia de los biofilms, sí se observaron morfologías que podrían corresponder a procesos de disolución inducida por los organismos (Fig. 2e). En ambas cuevas, las zonas con disolución y precipitación de minerales y crecimiento de microorganismos mostraban que parte del material superficial de las paredes y espeleotemas iluminados se debía a la mezcla de la calcita con la materia orgánica producida por los microorganismos.

Finalmente, cabe destacar que los biofilms analizados constituyen, además, una fuente de materia orgánica disponible (macromoléculas, bacterias muertas, depósitos de polvo, etc.) que favorece el desarrollo de organismos heterótrofos tales como hongos o actinobacterias. Así, con frecuencia se observaron numerosas actinobacterias y otros organismos filamentosos heterótrofos, en especial, en las muestras que procedían de la Cueva del Tesoro (Figs. 2e, 2f).

## **Conclusiones**

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, en ambas cavidades, los microorganismos se organizan en comunidades estructurales complejas (biofilms) que les confiere, entre otros beneficios, mayor protección frente a condiciones ambientales desfavorables. En relación con la composición, la identificación de los organismos presentes, realizada mediante técnicas de microscopía y de análisis molecular ha mostrado una biodiversidad dominada por cianobacte-



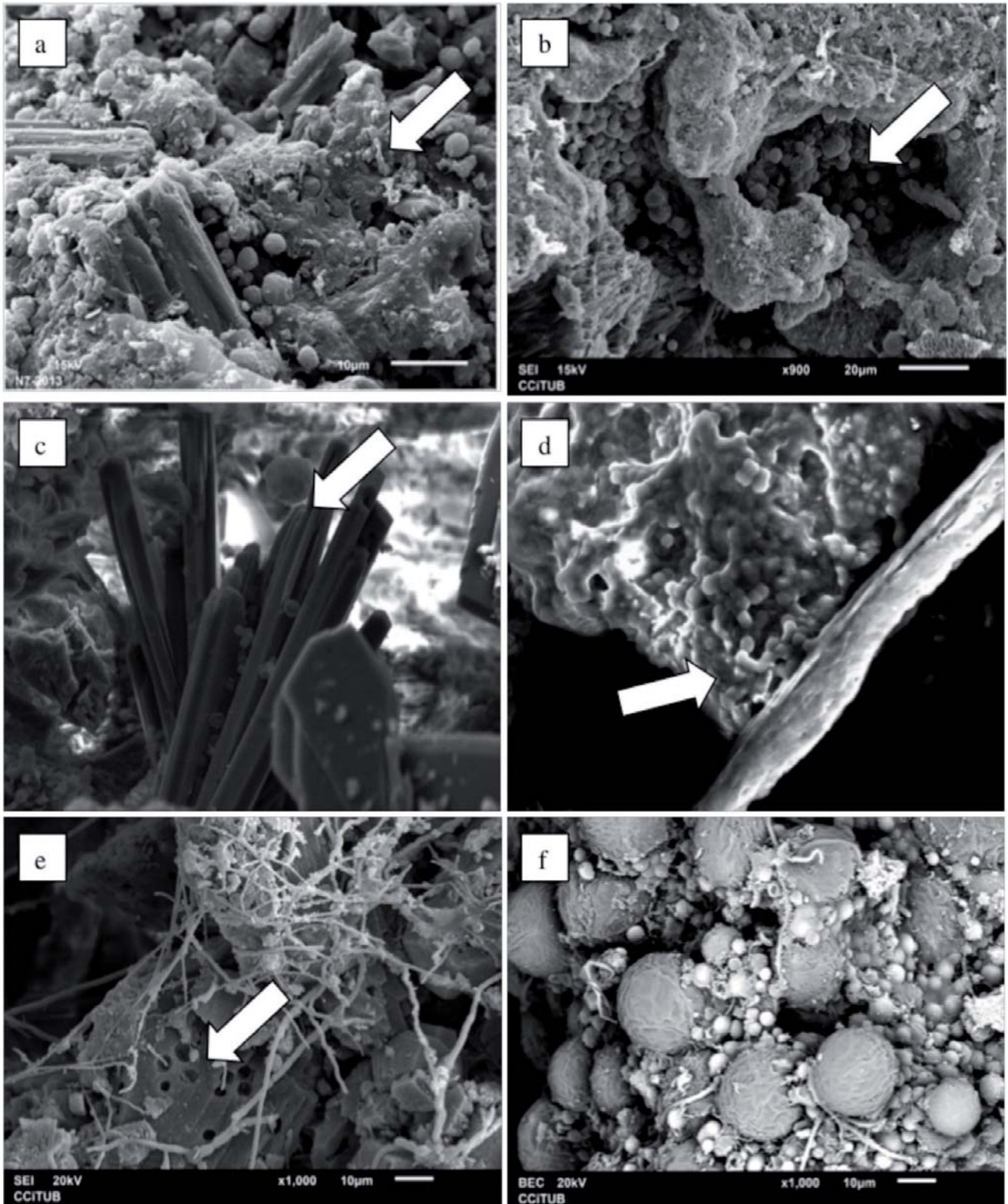


Figura 2. El microscopio electrónico de barrido reveló un sustrato calcítico con evidencias de biodeterioro: a) sustrato colonizado con superficie muy alterada, b) desarrollo de microorganismos casmoendolíticos en las oquedades del sustrato, c) organismos entre láminas de cristal del sustrato, d) biofilm con vaina de polisacáridos extracelulares que permite su adhesión al sustrato, e) sustrato colonizado por microorganismos y morfologías que podrían relacionarse con procesos de disolución, f) biofilm con compleja y diversa estructura de la comunidad microbiana

rias y microalgas, junto con actinobacterias, proteobacterias, arqueas, hongos e incluso protozoos y pequeños artrópodos, con biofilms más complejos y diversos en la Cueva del Tesoro, en los que destaca la abundancia de actinobacterias. En cambio, los biofilms de la Cueva de Nerja mostraron escasa biodiversidad que se relacionó con la presencia de un medio pobre en nutrientes. Así, los sustratos secos sólo permiten el desarrollo de dos taxones, adaptados a una sequía estacional y considerados extremófilos en la bibliografía, mientras que los más húmedos mostraron una mayor biodiversidad, también relacionada con la presencia de sustratos arcillosos. Las técnicas de microscopía han permitido identificar diferentes procesos y morfologías relacionadas con el biodeterioro, ocasionado por alteraciones físicas y químicas de la capa más superficial del sustrato, tales como decoloración, pérdida de consistencia, disolución y precipitación de minerales, entre otras.

El desarrollo de los biofilms analizados deriva de actuaciones antrópicas en el interior de ambas cuevas, como es la instalación de un sistema de iluminación. Estas comunidades biológicas, además de alterar el sustrato, pueden desplazar la microbiota natural de la cueva y alterar su ecosistema. Por tanto, una adecuada gestión del medio subterráneo como recurso turístico debe contar con medidas preventivas y correctoras destinadas al control y conservación del patrimonio natural y cultural de la cueva, entre ellas, la protección de su microbiota autóctona.

## Referencias

- Albertano, P. 2012. Cyanobacterial biofilms in monuments and caves. En: Whitton, B.A. (Ed.), *Ecology of Cyanobacteria II. Their Diversity in Space and Time*. Durham: Springer, 317-343.
- Albertano, P. y Urzì, C. 1999. Structural interactions among epilithic cyanobacteria and heterotrophic microorganisms in Roman hypogea. *Microbial Ecology*, 38, 244-252.
- Altschul, S.F., Gish, W., Miller, W., Myers, E.W. y Lipman, D.J. 1990. Basic local alignment search tool. *Journal of Molecular Biology*, 215, 403-410.
- Barton, H.A. y Northup, D.E. 2007. Geomicrobiology in cave environments: Past, current and future perspectives. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69, 163-178.
- Bastian, F., Jurado, V., Novakova, A., Alabouvette, C. y Saiz-Jimenez, C. 2010. The microbiology of Lascaux Cave. *Microbiology*, 156, 644-652.
- Ciniglia, C., Yoon, H.S. Pollio, A. Pinto G. y Bhattacharya, D. 2004. Hidden biodiversity of the extremophilic Cyanidiales red algae. *Molecular Ecology*, 13, 1827-1838.
- Chelius, M.K. y Moore, J.C. 2004. Molecular phylogenetic analysis of Archaea and Bacteria in Wind Cave, South Dakota. *Geomicrobiology Journal*, 21, 123-134.
- Chelius, M.K., Beresford, G., Horton, H., Quirk, M., Selby, G., Simpson, R.T., Horrocks, R. y Moore, J.C. 2009. Impacts of alterations of organic inputs on the bacterial community within the sediments of Wind Cave, South Dakota, USA. *International Journal of Speleology*, 38, 1-10.
- Diez, B., Pedros-Alio, C., Marsh, T.L. y Massana, R. 2001. Application of denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) to study the diversity of marine picoeukaryotic assemblages and comparison of DGGE with other molecular techniques. *Applied and Environmental Microbiology*, 67, 2942-51.
- de Freitas, C.R. y Schmekal, A. 2006. Studies of condensation/evaporation processes in the Glowworm Cave, New Zealand. *International Journal of Speleology*, 35, 75-81.

- Griffiths, R.I., Whiteley, A.S., O'Donnell, A.G. y Baile, M.J. 2000. Rapid method for coextraction of DNA and RNA from natural environments for analysis of ribosomal A- and rRNA-based microbial community composition. *Applied and Environmental Microbiology*, 66, 5488-5491.
- Großkopf, R.F., Janssen, P.H. y Liesack, W. 1998. Diversity and structure of the methanogenic community in anoxic rice paddy soil microcosms as examined by cultivation and direct 16S rRNA gene sequence alignments. *Bioinformatics*, 20, 2317-2319.
- Guillitte, O. 1995. Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. *Science of Total Environment*, 167, 215-220.
- Hall, T.A. 1999. BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, 41, 95-98.
- Hauer, T., Mühlsteinová, R., Bohunická, M., Kaštovský, J. y Mareš, J. 2015. Diversity of cyanobacteria on rock surfaces. *Biodiversity and Conservation*, 24, 759-779.
- Hernández-Mariné, M. y Roldán, M. 2005. Adherence of hormogonia to substrata is mediated by polysaccharides produced by necridic cells. *Algological Studies*, 117, 239-249.
- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sánchez, S., y Sanz, E. 1996. *Estudio de la delimitación de las áreas de protección de las cuevas del Tesoro-Higuerón-Rincón de la Victoria (Rincón de la Victoria, Málaga)*, Informe no publicado. MNCN-CSIC, Madrid.
- Hueck-van der Plas, E.H. 1965. The biodeterioration of materials as a part of hylobiology. *Material und Organismen*, 1, 5-34.
- Lamprinou, V., Danielidis, D.B., Economou-Amilli, A. y Pantazidou, A. 2012. Distribution survey of Cyanobacteria in three Greek caves of Peloponnese. *International Journal of Speleology*, 4, 267-272.
- Liñán, C., Andreo, B., Carrasco, F. y Vadillo, I. 1999. Hidrodinámica e hidroquímica de las aguas de goteo de la Cueva de Nerja. En: Andreo, B., Carrasco, F. y Durán, J.J. (Eds). *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*, 393-402.
- Liñán, C., del Rosal, Y. y Carrasco, F. 2014. Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: Calaforra y Durán (Eds.). *Iberoamérica subterránea. Actas del I Congreso Iberoamericano y V Congreso español sobre cuevas turísticas*, ACTE, 229-238.
- Lefèvre, M. 1974. La "maladie verte" de Lascaux. *Studies in Conservation*, 19, 126-156.
- Juretschko, S., Timmermann, G., Schmid, M., Schleifer, K.-H., Pommering-Röser, A., Koops, H.-P. y Wagner, M. 1998. Combined molecular and conventional analyses of nitrifying bacterium diversity in activated sludge: *Nitrosococcus mobilis* and *Nitrospira*-like bacteria as dominant populations. *Applied and Environmental Microbiology*, 64, 3042-3051.
- Jurado, V., Laiz, L., Rodríguez-Nava, V., Boiron, P., Herrnosín, B., Sánchez-Moral, S. y Saiz-Jimenez, C. 2010a. Pathogenic and opportunistic microorganisms in caves. *International Journal of Speleology*, 39, 15-24.
- Jurado, V., Porca, E. y Sáiz-Jiménez, C. 2010b. Control de un brote fúngico en la Cueva de Castañar de Ibor. En: Durán, J.J. y Carrasco, F. (Eds.). *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, Madrid, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, 611-620.
- Jurado, V., Novakova, A., Hernández Mariné, M. y Saiz-Jimenez, C. 2014. Cueva del Tesoro, Rincón de la Victoria, Málaga: A treasure of biodiversity. En: C. Saiz-Jimenez (Ed.). *The Conservation of Subterranean Cultural Heritage*, 207- 213.



- Macedo, M.F., Miller A.Z., Dionísio, A. y Saiz-Jimenez C. 2009. Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin: an overview. *Microbiology*, 155, 3476-3490.
- Northup, D.E. y Lavoie, K.H. 2001. Geomicrobiology of caves: A review. *Geomicrobiology Journal*, 18, 199-222.
- Nübel, U., Garcia-Pichel, F. y Muyzer, G. 1997. PCR primers to amplify 16S rRNA genes from cyanobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 63,3327-32.
- Potts, M. 2001. Desiccation tolerance: a simple process? *Trends in Microbiology*, 9, 553-559.
- Pouličková, A. y Hašler, P. 2007. Aerophytic diatoms from caves in central Moravia (Czech Republic). *Preslia*, 79, 185-204.
- Roldán, M., Clavero, E., Castel, S. y Hernández-Mariné, M. 2004. Biofilms fluorescence and image analysis in hypogean monuments research. *Algological Studies*, 111, 127-133.
- Roldán, M. y Hernández-Mariné, M. 2009. Exploring the secrets of the three-dimensional architecture of phototrophic biofilms in caves. *International Journal of Speleology*, 38, 41-53.
- del Rosal, Y., Roldán, M., Liñán, C., Garrido, A. y Hernández Mariné, M. 2012. Tecnologías de microscopía: una ventana al conocimiento del biodeterioro. En: Durán, J.J. y Robledo, P.A (Eds.). *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*, Madrid, ACTE, 359-372.
- Sand, W. y Bock, E. 1991. Biodeterioration of mineral materials by microorganisms-biogenic sulfuric and nitric acid corrosion of concrete and natural stone. *Geomicrobiology Journal*, 9, 129-38.
- Sáiz-Jiménez, C. y Ariño, X. 1995. Colonización biológica y deterioro de morteros por organismos fototrofos. *Materiales de construcción*, 45 (240), 5-16.
- Saiz-Jimenez, C. 1999. Biogeochemistry of weathering processes in monuments. *Geomicrobiology Journal*, 16, 27-37.
- Saiz-Jimenez, C., Cuezva, S., Jurado, V., Fernandez-Cortes, A., Porca, E., Benavente, D., Cañaveras, J.C. y Sanchez-Moral, S. 2011. Paleolithic art in peril: Policy and science collide at Altamira Cave. *Science*, 334, 42-43.
- Schloss, P.D., Westcott, S.L., Ryabin, T., Hall, J.R., Hartmann, M., Hollister, E.B., Lesniewski, R.A., Oakley, B.B., Parks, D.H., Robinson, C.J., Sahl, J.W., Stres, B., Thallinger, G.G., Van Horn, D.J., Weber, C.F. 2009. Introducing mothur: Open Source, platform-independent, community supported software for describing and comparing microbial communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 75, 7537-41.
- Teske, A., Wawer, C., Muyzer, G., Ramsing, N.B. 1996. Distribution of sulfate-reducing bacteria in a stratified fjord (Mariager Fjord, Denmark) as evaluated by most-probable-number counts and DGGE of PCR-amplified ribosomal DNA fragments. *Applied and Environmental Microbiology*, 62, 1405-1415.
- Warsheid, T.H. y Braams, J. 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, 343-368.





## Balizamiento de bajo impacto en cavidades con actividad espeleológica

I. Ayuso <sup>(1)</sup> y J.M. Calaforra <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Espeleo-Club Almería. C/ Los Castillos 21, 04009 Almería. espeleoclubalmeria@gmail.com

<sup>(2)</sup> Departamento de Biología y Geología, CAESCG Cambio Global - Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04720, España. jmcalforra@ual.es

---

### RESUMEN

El objetivo que se pretende con el balizamiento de bajo impacto es minimizar el deterioro ambiental que se produce en las cavidades de uso espeleológico, bien en tramos habilitados como "turismo aventura" en cavidades turísticas o en cuevas que solo son frecuentadas por practicantes de la espeleología. El balizamiento pretende la señalización de los caminos o vías recomendados dentro de las cavidades para que el visitante circule por un lugar habilitado, respetando aquellos entornos en los cuales una simple pisada o golpe fortuito podría destruir de manera irreversible espeleotemas o bienes culturales de gran valor. De manera añadida se ayuda a la regeneración natural de pequeños espacios donde se haya producido un deterioro previo del entorno. Como ejemplo de balizamiento se han elegido algunas de las cavidades más frecuentadas por espeleólogos en el Paraje Natural del Karst en Yeso de Sorbas y que poseen una extremada fragilidad, debido intrínsecamente a la facilidad de alteración y degradación del yeso como mineral, al reducido tamaño de sus ambientes subterráneos y por suponer un ecosistema subterráneo único y en frágil equilibrio. Se han realizado numerosas pruebas con distintos materiales que pudieran ser aptos para este tipo de balizamiento. En el presente trabajo se aportan las características de los elementos que han demostrado ser más adecuados y eficientes en cuanto a la rapidez de instalación, economía, durabilidad, visibilidad y adaptabilidad a este entorno subterráneo. Consideramos que el balizamiento de bajo impacto debe ser una práctica que debiera extenderse al menos a todas las cavidades turísticas que oferten "visitas espeleológicas" y en los entornos protegidos donde se permita el acceso a cavidades puesto que no solo supone la protección del medio subterráneo sino también una herramienta de indudable valor desde el punto de vista de la educación ambiental.

**Palabras clave:** balizamiento, educación ambiental, protección de cavidades.

### *Low-impact track marking of caves with speleological activity*

#### ABSTRACT

*The objective of marking caves with low-impact tracks is to minimize the environmental deterioration that occurs in the cavities with speleological activities both as adventure tourism and exploration or visits by cavers. Marking paths in the wild caves allow visitors walking on the same route and facilitate the conservation of adjacent speleothems, sediments, cultural items or other elements of great value that could be destroyed accidentally. In addition, the track marking method should also help to the natural regeneration of some spaces that have been previously damaged. As an example of the marking method that we are using we have chosen some of the most popular caves by cavers in the Natural Park of the Gypsum Karst of Sorbas, with a high rate of speleological visits. The gypsum caves has an extreme fragility inherently to their lithological characteristics. Alteration and degradation of gypsum, as main mineral of walls and speleothems, is very easy from chemical and mechanical point of view. We have performed many tests with different marking materials that could be suitable for this type of track marking. The characteristics of the elements that have been proved to be the most suitable and efficient in terms of speed of installation, economy, durability, visibility and adaptability to this underground environment is provided in this communication. We believe that low-impact cave*

*tracks should be a practice that must be extended at least to all tourist cave offering, "Speleological visits" and also in protected cave environments where access to the caves is regulated by the environmental administration. Finally, we consider to install these type of tracks in both natural or show caves can be a tool of great value from the point of view of environmental education too.*

**Key words:** cave protection, environmental education, marking, paths, tracks.

## Introducción

EL Karst en yeso de Sorbas, situado en el levante andaluz, en el extremo oriental del corredor subdesértico Tabernas-Sorbas (Almería-España), es el espacio kárstico más árido de Europa. En un aparente yermo y árido paisaje, se esconde uno de los entornos subterráneos más singulares de Andalucía. Se trata de un mundo labrado por la acción milenaria del agua subterránea sobre una potente serie estratigráfica yesífera sedimentada hace más de 5 millones de años, que ha dado lugar a un paisaje kárstico de frágil e inusitada belleza. Más de 1000 cavidades, gran cantidad de ellas interconectadas, y un espectacular y diverso universo de singulares formaciones cristalinas, estalactitas, estalagmitas, bolas de yeso, columnas y corales, con un enorme valor espeleológico, científico y didáctico han convertido a este Paraje Natural en uno de los karst en yesos más importantes del mundo, una de las joyas geológicas del planeta. El agua de lluvia es capaz de disolver lentamente la roca de yeso, generando abundantes depresiones cerradas en superficie. En ellas aparecen las dolinas y simas, que conectan la árida superficie con la compleja red de galerías subterráneas. El agua, que penetra por estas ventanas, continúa su acción erosiva y moderadora, definiendo el sistema subterráneo más grande de España y el segundo del mundo explorado en yeso: El Sistema de la Cueva del Agua, que cuenta actualmente con más de 9000 metros de recorrido topografiado. Este entorno kárstico ocupa una extensión de 12 km<sup>2</sup> y posee una altísima densidad de cavidades, estando en la actualidad catalogadas 1625 en el inventario base del CATSORBAS que realiza y mantiene el Espeleo club Almería y que sirve de base al inventario global CATFAE que gestiona la Federación Andaluza de Espeleología.

Este singular Paraje, fue declarado Paraje Natural de Interés Espeleológico por la Junta de Andalucía en 1989 y constituye uno de los karst evaporíticos más bellos de todo el mundo. Sin embargo, en este entorno influyen negativamente tres factores: la intensa actividad minera, la gran afluencia de visitas y la falta de un plan ambiental que gestione de forma real el gran potencial de recursos de toda la zona.

La depresión de Sorbas-Tabernas es una de las zonas más desérticas de Europa y contiene una de las reservas de yeso más importantes del mundo. El afloramiento de yeso se viene explotando masivamente desde hace más de 20 años. En la actualidad, España es el cuarto productor de yeso del mundo y la provincia de Almería aporta la mitad de la producción nacional, que supone el 4% de la producción mundial. Esta intensa actividad minera está perjudicando y amenazando seriamente la integridad del karst. De hecho, ya han sido destruidas y seriamente degradadas una gran cantidad de cavidades, ubicadas tanto en la zona de extracción como en zonas cercanas a los límites de la explotación, debido a factores tales como la alteración del régimen hídrico en la zona. Por otro lado la difusión dentro del colectivo espeleológico, así como en otros grupos, de la importancia de este Paraje, de los peculiares y bellos espeleotemas que

albergan sus cavidades, así como la enorme variedad de formas kársticas exteriores de gran singularidad, y la particular y extraordinaria flora y fauna del entorno, hacen que las visitas a las cavidades del Karst en yeso de Sorbas sean continuas, tanto es así que es la segunda zona más visitada de Almería después del Parque Natural de Cabo de Gata – Níjar.

Sin embargo estas cavidades, generalmente son ambientes pequeños, frágiles y muy delicados, que sometidos a visitas constantes sin la adecuada regulación ni normativa, se van alterando y degradando. En ellas se van modificando las características físico-químicas del equilibrio en que se formaron y mantuvieron durante miles de años. Se han realizado varias campañas de difusión para solicitar la creación de una figura de protección más específica a la que existe actualmente, que claramente es insuficiente para garantizar la protección que el Karst en Yeso de Sorbas necesita. Se pretende que el Karst en yeso de Sorbas sea declarado "Parque Natural Subterráneo", con el objetivo de preservar el entorno y conseguir los apoyos necesarios dentro del colectivo espeleológico, de la ciudadanía y de las diferentes administraciones, autonómicas, nacionales y europeas, para que este Paraje Natural tenga asegurada su continuidad y protección en el futuro.

## **Antecedentes**

Las exploraciones e investigaciones espeleológicas en el Karst en yeso de Sorbas se remontan a los años 60, cuando los primeros grupos de Espeleología almerienses acometen los trabajos de prospección, exploración y topografía de las cavidades existentes en el karst. Progresivamente otros grupos tanto andaluces como nacionales y de diferentes puntos de Europa se interesan por las singulares cavidades de yeso existentes en esta zona y poco a poco, el Karst en Yeso de Sorbas se va configurando como un entorno kárstico yesífero único, de gran interés espeleológico. En 1989 el karst es declarado por la Junta de Andalucía Paraje Natural de Interés Espeleológico. Desde entonces la importancia de este karst evaporítico empieza a traspasar fronteras y, en aras de su defensa y protección, se organizan intercambios espeleológicos con grupos que trabajan e investigan en otros importantes karst en yeso del mundo, como son el Karst de Bolonia, en la Emilia Romagna (Italia) y el Karst de Podolia (Ucrania). Los trabajos en Sorbas se hacen mucho más organizados y sistemáticos, de manera que poco a poco se va conociendo en profundidad la configuración de todo el sistema de cavernamiento, perfilándose la gran importancia de la zona.

Todo ello provoca que el Karst de Sorbas sea cada vez más y más conocido, por la belleza y singularidad de sus cavidades que albergan en su interior espeleotemas y formaciones únicas como son: los abetos de yeso, las estalagmitas huecas, las bolas de yeso, y multitud de formaciones coraloides, así como túmulos y micro-lapiaces en el exterior, y las peculiares características de la génesis de estos sistemas kársticos. Numerosos espeleólogos se ven atraídos por este universo de extraordinaria belleza y acuden a visitar sus cavidades cada vez con mayor frecuencia y en grupos cada vez más numerosos. Las cavidades son un medio muy estable, con unas condiciones de temperatura y humedad casi constantes en el tiempo si se comparan con las variaciones en el exterior. El simple hecho de que entremos en ellas supone la modificación de estas condiciones de estabilidad. Nuestro calor corporal, la luz de los cascos, hasta las pisadas, pueden cambiar o destrozar en un momento todo este entorno.

Hay que intentar minimizar los efectos negativos de las actividades en el interior de las cavidades. Lo ideal para lograr este objetivo sería conocer previamente las condiciones y características físico-químicas de las cavidades y su variabilidad. Hasta la fecha, Medio Ambiente no ha realizado en el karst de Sorbas ningún estudio tendente a confirmar la magnitud de la afección que se está produciendo en las cavidades más frágiles y frecuentemente visitadas. Determinar con argumentos convincentes qué efecto en las cuevas tienen las visitas, y si algunas de ellas por su peculiar fragilidad no son visitables, qué número de personas puede visitarlas y con qué cadencia, etc., debió ser la primera labor a realizar tras la declaración de Paraje Natural del Karst en Yeso de Sorbas. Actualmente se tiende a imponer unas condiciones lo más restrictivas posibles para la visita a las cavidades, pero aun así no se puede saber si ya se ha hecho un daño irreparable. Lamentablemente, en la actualidad no existe en el Paraje una infraestructura real de protección.

Entre las muchas cavidades que alberga el Karst en yeso de Sorbas, existen algunas que son extremadamente sensibles y frágiles, que sin embargo están siendo muy visitadas por la belleza de sus espeleotemas y galerías. Es en estas cavidades donde se ha centrado este proyecto de balizamiento. Se trata de preservar al máximo posible el estado original y propio de las cavidades y reducir al mínimo el deterioro de las mismas.

Los impulsores de este método de balizamiento de bajo impacto como forma de protección y conservación de cavidades han sido el Club Cántabro de Exploraciones Subterráneas, quienes sentaron las bases y la forma para la realización de balizado dentro de las cavidades (Club Cántabro de Exploraciones Subterráneas, 2013) así como la propia Federación Cántabra de Espeleología (FCE, 2013). Este método ha sido recogido y puesto en marcha en otras cavidades emblemáticas como la Sima de la Higuera en Pliego, Murcia (Federación de Espeleología de la Región de Murcia, 2010). El Espeleo Club Almería comenzó los trabajos de balizamiento en 2014 en algunas de las cavidades más sensibles del Karst en yeso de Sorbas (Espeleo Club Almería, 2014)

## **Metodología**

El balizamiento de bajo impacto es un método que propicia la conservación de las cavidades y aminora el impacto negativo que ocasionan los visitantes cuando acceden a estos frágiles entornos. El objetivo de este balizamiento es tutorizar los recorridos dentro de las cavidades, de forma que se preserven todas las zonas susceptibles de una mayor degradación, o formaciones y espeleotemas situados en zonas de paso fácilmente accesibles por parte de los espeleólogos.

Es muy común en las visitas a cavidades que los espeleotemas más espectaculares acaparen la atención de los visitantes, de forma que no se perciben otras formaciones igualmente singulares pero de aspecto más humilde cuya presencia ha sido eclipsada pasando desapercibida; son por ello más susceptibles si se encuentran en zonas de paso de degradarse rápida y fácilmente.

La señalización de los caminos recomendados dentro de las cavidades propicia que los visitantes puedan observar la cavidad con todo detalle, pero respetando aquellas zonas cuyo acceso no aporta mayor interés, ayudando a la conservación y regeneración de estos pequeños espa-

cios. Asimismo, estas señalizaciones permiten limitar las zonas de acceso a los espeleotemas más espectaculares, reduciendo de esta forma la probabilidad de que descuidos o accidentes imprevistos puedan dañar irreversiblemente estas formaciones milenarias. El balizamiento de bajo impacto consiste en señalar las zonas recomendadas de acceso a los visitantes en las cavidades, creando caminos que los espeleólogos pueden recorrer para admirar formaciones y galerías respetando al máximo las condiciones de estabilidad de la cavidad.

## ***Materiales***

Para realizar el balizamiento en el interior de las cavidades seleccionadas, se han buscado elementos cuya acción antrópica sea lo más reducida posible, intentando que dichos materiales sean lo más inertes posible dentro de la gama de elementos adecuados para este objetivo. En el balizamiento propiamente dicho se han utilizado los siguientes elementos: (1) varillas de fibra de vidrio (6 mm). Utilizadas en los diferentes tramos dependiendo de las condiciones de la galería o sala a balizar. Se han utilizado de diferentes tamaños (50, 33, 25 cm) (2) hilo de poliéster amarillo de 10 mm con el que se señalizan los recorridos entre las varillas, protegiendo el acceso a espacios diferentes a los definidos en el balizamiento, (3) capuchones de plástico con los que se unen los tramos de hilo a las varillas. En las zonas inicial y final de los balizamientos se señalizan los caminos recomendados con carteles plastificados que advierten de la señalización (Figura 1).

En esta primera fase estos son los elementos que se colocan. Sin embargo está previsto en una segunda fase colocar carteles plastificados explicativos con información relevante acerca de los recorridos balizados, aspectos y espeleotemas importantes por los cuales se ha hecho necesario el balizamiento. Asimismo se han utilizado diferentes tipos de cepillos, más suaves o rígidos, para la limpieza de las formaciones que lo permitían, así como en tramos de costras yesíferas cercanas a espeleotemas que presentaban signos de deterioro provocado por el paso sobre ellas de los visitantes.

## ***Diseño***

El balizamiento se ha diseñado con el objeto de preservar la cavidad y las formaciones que contiene, pero siempre intentando conjugar esta protección con un sendero tutorado que permita contemplar y disfrutar de todos los aspectos importantes de las salas y galerías, así como los espeleotemas y formaciones singulares que en ellas existen, Por este motivo, los caminos van recorriendo la cavidad zigzagueando en los recodos donde espeleotemas y formaciones así lo requieren, creándose ambientes más amplios y miradores desde donde contemplar todo aquello que debe ser objeto de especial cuidado y cuya regeneración está en curso. Se ha procurado que las formas de los caminos se integren al máximo con la forma de salas y galerías, causando de este modo el menor impacto visual posible. Los recorridos balizados son determinados previamente, se hace un reconocimiento inicial tras su exploración y topografía, analizándose asimismo la existencia o no de formaciones frágiles o ambientes sensibles susceptibles de deterioro con las visitas espeleológicas. Serán la morfología de las galerías y el grado de fragilidad y deterioro de los espeleotemas los que definirán el nivel de balizamiento,



así como su trazado. La composición de la roca y su dureza, la densidad de espeleotemas y la afluencia de visitantes a una determinada cavidad determinará el trabajo de balizamiento a llevar a cabo.

### Cavidades balizadas

En esta primera fase se han elegido aquellas cavidades más frecuentadas por los espeleólogos actualmente, y que poseen una extrema fragilidad y una gran facilidad de alteración y degradación del ecosistema subterráneo.

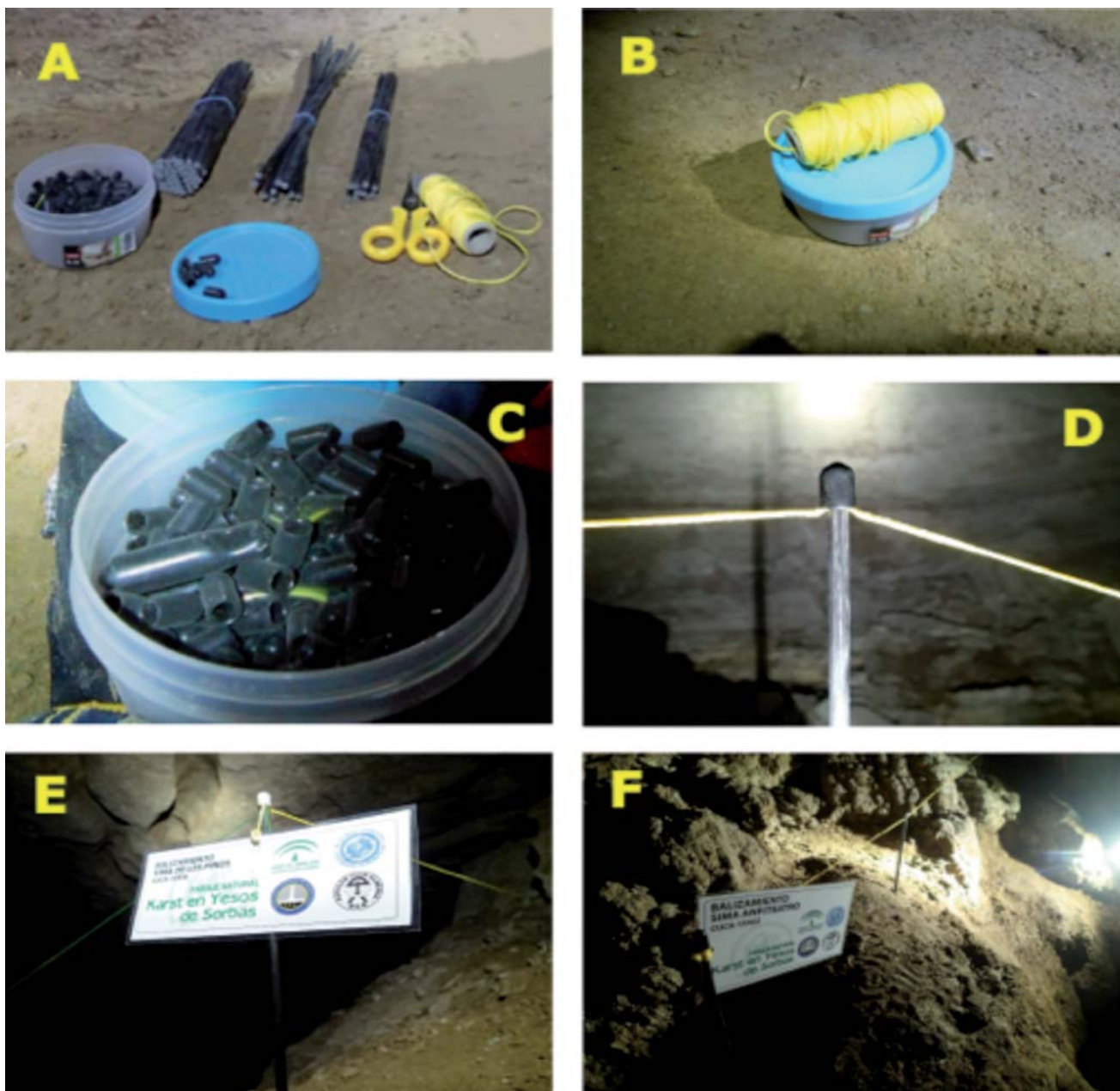
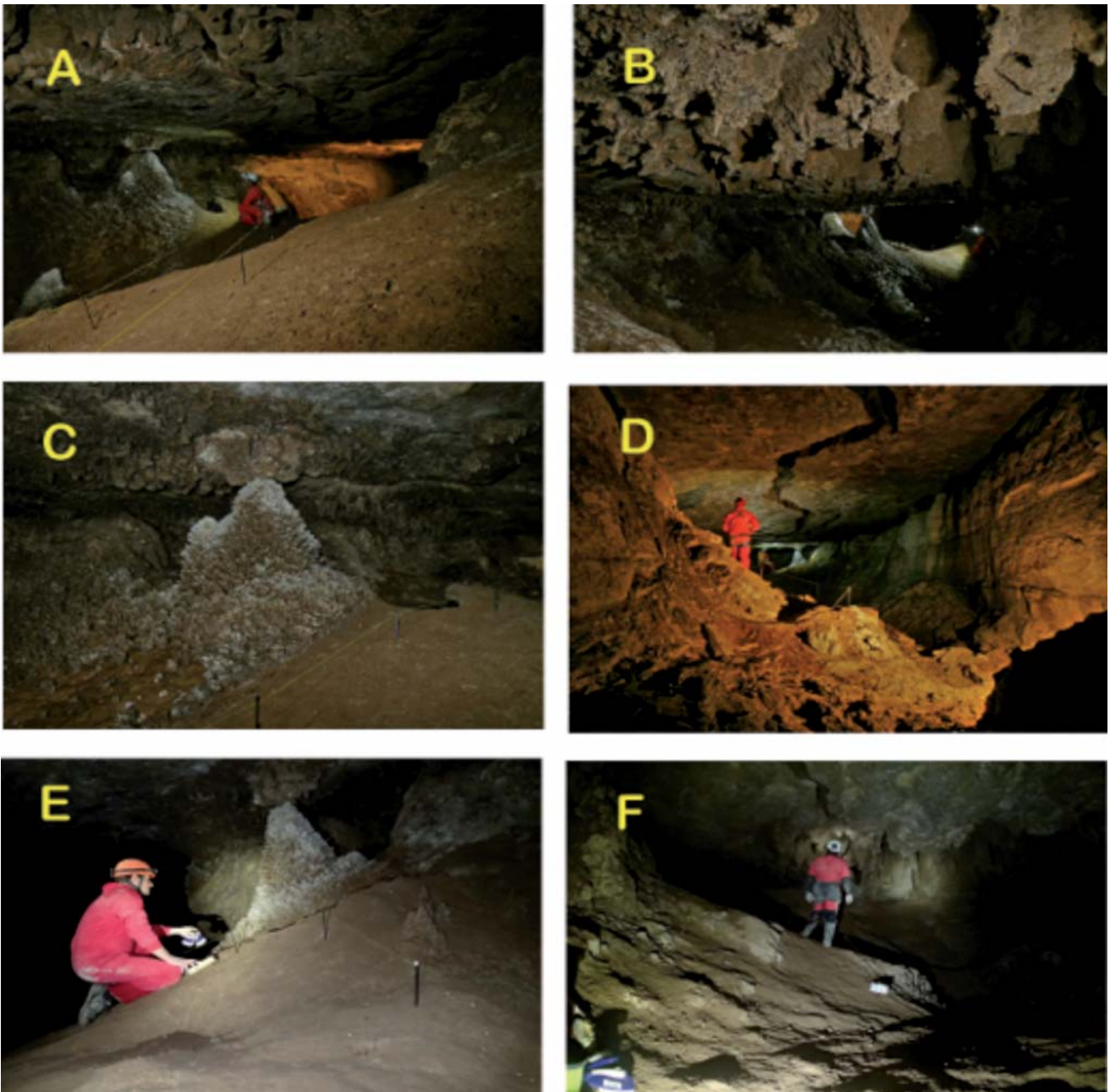


Figura 1. Distintos materiales utilizados en el balizamiento de cavidades: A. Varillas de fibra de vidrio de diferentes medidas y capuchones, B. Hilo de poliéster para definir el camino, C. Detalle de capuchones, E. y F. Carteles señalizadores. (Fotografías: Espeleo Club Almería)

### ***Sima de Los Pinos***

La Sima de Los Pinos fue descubierta y explorada por el Espeleo Club Almería en 2006, durante los trabajos de exploración y prospección realizados en el Sector Tesoro Norte, Zona Ciervo. La topografía de la Sima de Los Pinos fue realizada por el Espeleo Club Almería. Esta cavidad está situada en una pequeña dolina donde además se han identificado otras cinco entradas, fenómenos kársticos de menor magnitud y en su mayoría impenetrables. El pozo de entrada tiene un desnivel de -13,48 metros y un diámetro medio de aproximadamente 4 metros, que en su parte final se estrecha y se desplaza ligeramente adquiriendo una forma meandriforme.



*Figura 2. Detalle del balizamiento de la sima de Los Pinos. A., B., C. y E.: Sala del Pino, D. y F.: Galería del Tronco. (Fotografías: Espeleo Club Almería)*

De su base parte la Galería de La Piña que tiene un recorrido de 50 metros. La parte inferior de esta galería tiene aporte hídrico, y la superior se encuentra en un estado fósil.

Este tramo desemboca en la Galería del Tronco que tiene aspecto de embudo ojival y está formada por un gran talud con una inclinación bastante pronunciada de margas, que termina en un meandro desfondado que encauza las aguas y termina en el Pozo Flor de Valencia. Tiene una longitud de unos 25 metros y su ancho oscila entre 4 y 6 metros. Desde aquí podemos divisar la Sala del Pino con la espectacular formación bautizada con el mismo nombre que alcanza casi dos metros de altura. La sala del Pino se encuentra a -17 metros de la superficie y posee unas proporciones medias de 2x10 metros aproximadamente. Además del espectacular Abeto de Yeso se pueden apreciar una gran cantidad de bellas formaciones tapizando todo el entorno, así como los Pendants que decoran parte del techo de la galería.

La formación de los espeleotemas denominados "Abetos de Yeso" ("*Christmas Trees*" en la literatura anglosajona) responde a una singular conjunción de procesos espeleogenéticos que hace de éstos un espeleotema enormemente peculiar. De hecho, los dos únicos lugares del mundo donde se han encontrado y descrito ejemplos notables son el Karst en Yeso de Sorbas y el de Nuevo México (Calaforra y Forti, 1994). Este espeleotema formaría parte del grupo genérico denominado "coraloides". La complejidad de los procesos que intervienen en su formación hace de estas formaciones espeleotemas únicos. El balizamiento en esta cavidad, no presenta ninguna dificultad, se trata de una amplia galería y una sala de dimensiones considerables donde es relativamente sencillo ir colocando las varillas en el material margoso del pavimento donde quedan suficientemente fijas. El balizado comienza al principio de la Sala del Tronco, discurre por el margen izquierdo en una senda que bordea y salva la grieta que comunica con niveles inferiores, y finaliza en la Sala del Pino, donde se ha señalado un mirador para poder apreciar el Abeto de Yeso (Figura 2).

### **Sima Fe**

Sima Fe fue descubierta y explorada por el Espeleo Club Almería en 2007, durante los trabajos de exploración y prospección de cavidades realizados en el sector Tesoro Norte, zona Ciervo. Se la identificó con el número CUCA 15467 dentro del CatSorbas y del CATFAE. El pozo de entrada a la cavidad de 18 metros da acceso a una sala de grandes dimensiones, aproximadamente 400 metros cuadrados. Esta sala está decorada con bellas formaciones, entre las que destaca el conjunto que forma la "Cristalería", zona coraloides repleta de espeleotemas muy cercana a la base del pozo de entrada. También muy cercano se encuentra el acceso al Pozo Cano, un tubo que tras unos 25 metros se estrecha considerablemente. Este pozo es muy húmedo y con un pequeño charco de agua en su base. Este punto es el que conecta Sima Fe con Sima Cano, formando uno de los sistemas más singulares del Karst en Yeso de Sorbas.

La sala a la que da acceso el pozo de entrada se denomina Sala del Pino Blanco, toma el nombre de la formación que se encuentra al fondo de dicha sala: un abeto de yeso de pequeñas dimensiones, rodeado de coraloides de coloración blanquecina, sobre el que existe un fuerte goteo. Tras esta sala, a través de una corta gatera muy concrecionada, se abre otra pequeña de forma redondeada denominada Sala del Pino Rojo debido a la presencia de otro pequeño



abeto de yeso de tonos rojizos, muy concrecionado y sobre el que también existe un gran goteo. Estos dos espeleotemas pertenecen a los denominados "*Christmas Tree*", con la misma génesis que el abeto de yeso que se encuentra en la Sima de Los Pinos. Estos abetos son de menor envergadura, alcanzando aproximadamente un metro de altura. Toda la sima es en general muy húmeda y con goteos constantes, y posee una gran variedad de espeleotemas. La topografía de Sima Fe fue realizada por el Espeleo Club Almería en las campañas de trabajo durante los años 2012 y 2013.

Se ha realizado un balizamiento en la base del pozo de entrada, en la zona de La Cristalería debido a la gran profusión de cristales existentes. Hacia el interior de la cavidad, el camino balizado comienza al principio de la Sala del Pino Blanco donde se ha colocado el cartel señalizador, y discurre por el margen izquierdo de la sala llegando hasta el Pino Blanco. Aquí se ha realizado un mirador para que pueda regenerarse el pavimento de costras y cristales de yeso, así como de pequeños gours que rodean la formación y que estaban sufriendo un serio deterioro debido a las pisadas de las visitas. El balizamiento continúa por la sala hacia el paso de la gatera, también balizado por las bonitas formaciones que presenta este angosto tramo, y llega hasta la Sala del Pino Rojo donde se ha construido un mirador para poder apreciar la belleza de este singular espeleotema. Se ha elegido la topografía de Sima Fe como ejemplo para plasmar uno de los balizamientos realizados (Figura 3).

### ***Sima del Anfiteatro***

La Sima del Anfiteatro fue descubierta y explorada por el Espeleo Club Almería en 2007, durante los trabajos de exploración y prospección realizados en el sector Viñicas, zona Oeste. La topografía de la cavidad comenzó a realizarse en ese mismo año y se finalizó en diciembre de 2013, durante las Jornadas de Exploración y topografía organizadas por el Espeleo Club Almería.

El pozo de entrada de 5 metros finaliza en una pequeña repisa de un meandro desfondado que, a través de una pequeña ventana aérea, da paso a otro pozo de unos 10 metros que finaliza en una gran sala de aproximadamente 500 metros cuadrados, de sección triangular, en cuya base se desarrolla una grieta meandriforme que da paso a los niveles inferiores finalizando en un pequeño lago que se sifona a los pocos metros. Esta gran sala está muy concrecionada, con gran variedad de espeleotemas: estalactitas, estalagmitas, coraloideas, bolas de yeso, pequeños abetos, etc. El techo de la sala también presenta bellos canales de bóveda, son formaciones de gran belleza. Al fondo de la sala, por la parte izquierda, se accede mediante una gatera de 4 metros a otra galería de menores dimensiones que la sala anterior y también de sección triangular. Esta galería presenta en sus paredes laterales una gran cantidad de agujas de yeso, con algunos ejemplares de tamaño considerable. El balizamiento de esta cavidad se ha realizado en la *Gran Sala*, comenzando en los coraloideas de entrada a la sala y definiendo un camino que bordea la grieta meandriforme central por su lado izquierdo. El balizamiento se prolonga hasta una pequeña hornacina natural donde se han formado pequeños abetos cristalinos y otros espeleotemas de gran belleza y fragilidad. Como espeleotemas singulares presenta pequeños abetos de yeso y numerosas agujas de yeso en los sedimentos y margas. Desde la Gran Sala y tras un corto paso estrecho, se accede a una nueva galería de materia-

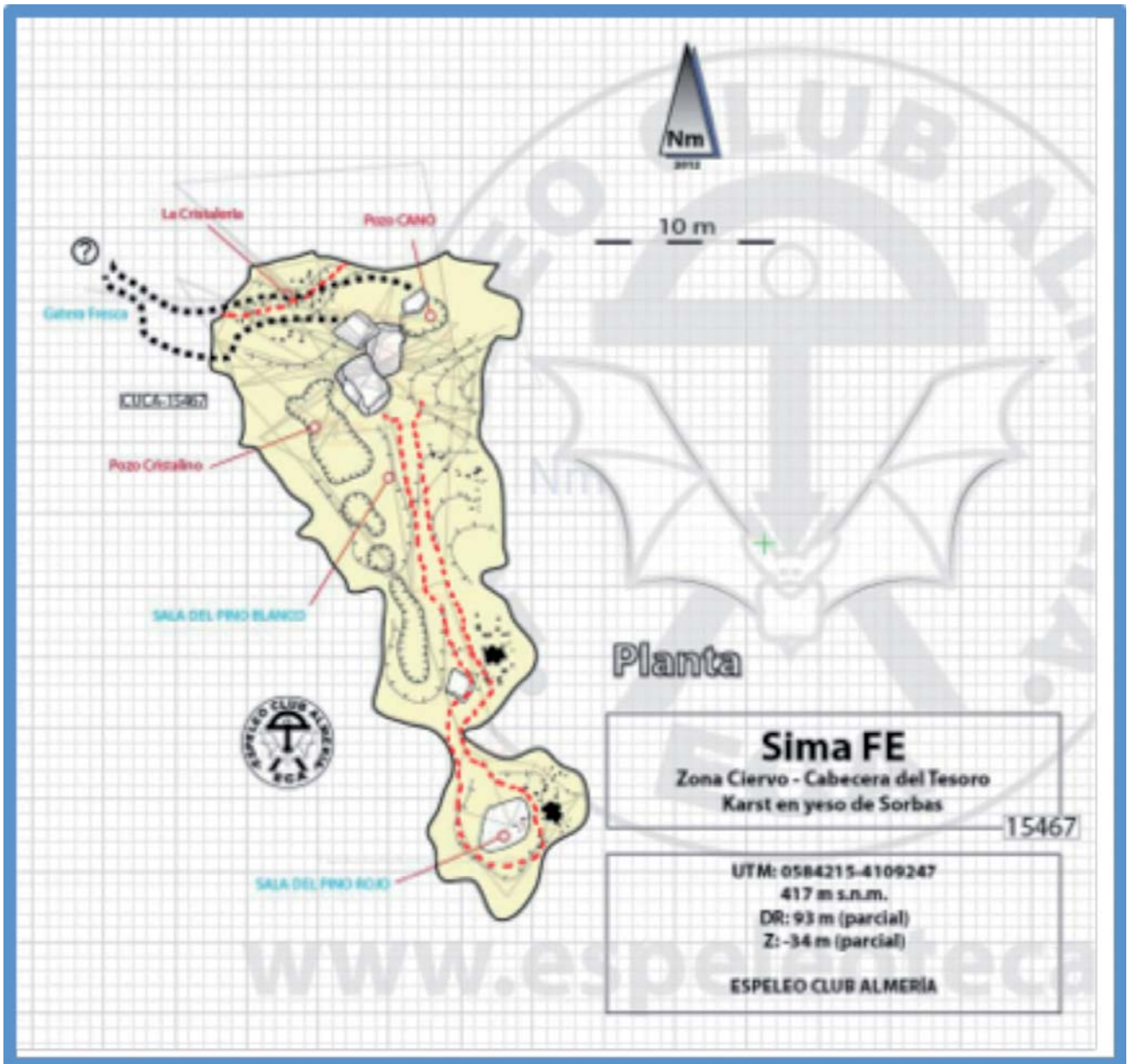


Figura 3. Topografía con balizamiento de Sima Fe. Diseño: Espeleología Club Almería

les muy margosos que termina en un talud. Esta galería también ha sido balizada en ambos márgenes, ya que los laterales presentan abundantes agujas de yeso de diferentes tamaños.

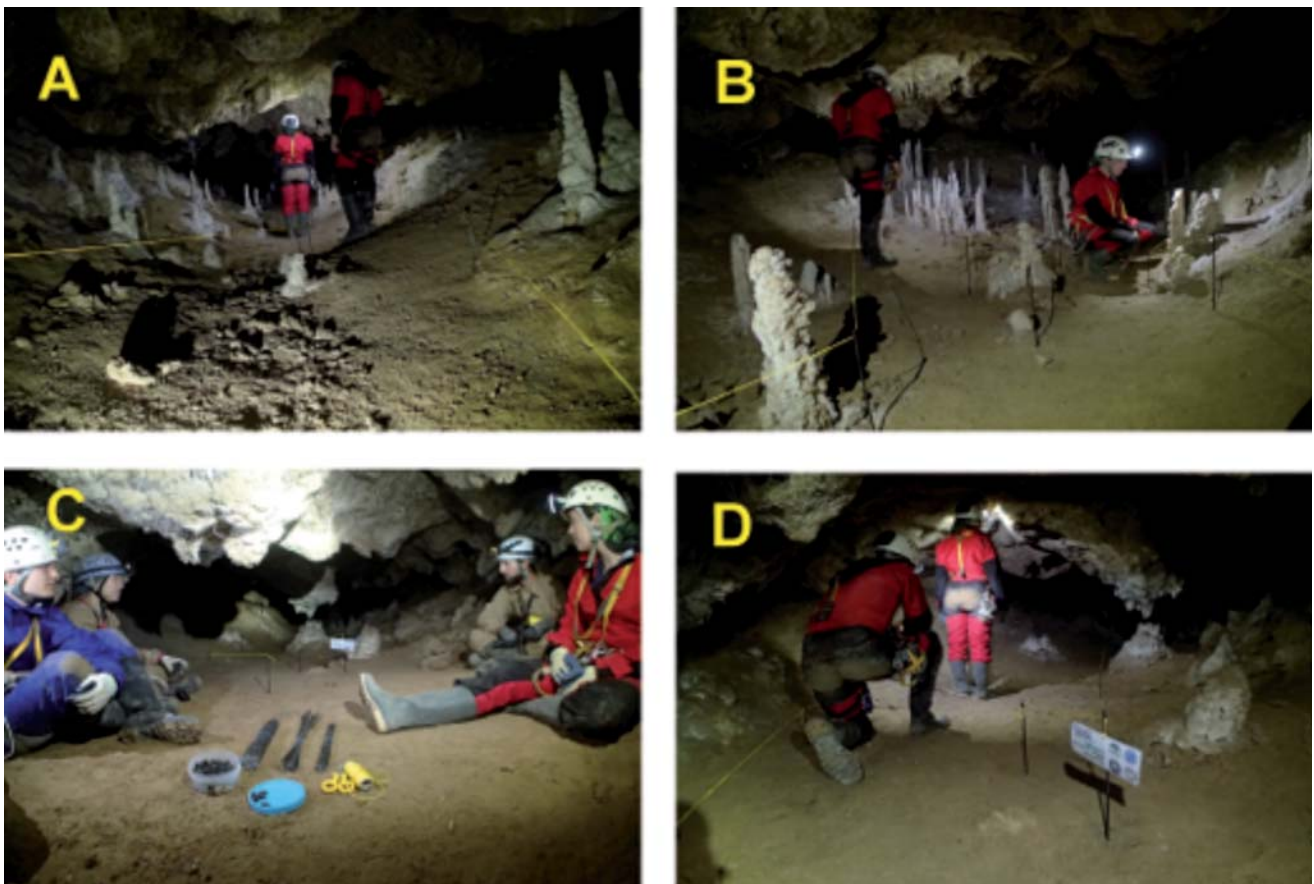
### **Sistema Covadura (Galería del Bosque)**

El Sistema Covadura se localiza en el Sector Tesoro Norte, Zona Avellanas. Este Complejo kárstico está compuesto por nueve bocas de acceso, situadas en la cabecera del Barranco del tesoro. La topografía de este sistema fue realizada por dos grupos: La SECAM y el SIS de Tarrasa, siendo la realizada por este último grupo la que finalmente se publicó en 1978. Aunque el acceso principal del sistema es a través del Pozo Basilio (CUCA 15112), para acceder a la Galería del Bosque la entrada más sencilla y directa es a través de la entrada con el mismo nombre:



Sima del Bosque (CUCA 15116). Tras un pequeño destrepe en la misma dolina, se accede a la cabecera de un pozo de unos 10 metros. El descenso de este pequeño pozo intersecta una galería de sección triangular y grandes superconos en el techo. A la izquierda nos dirigimos a la Galería del Bosque donde tendremos la oportunidad de observar las extrañísimas estalagmitas huecas. En este pequeño tramo de galería tenemos el mejor ejemplo de las mismas conocido en el mundo. Estas formaciones son extremadamente frágiles. El balizamiento se ha realizado en el centro de la galería, dejando ambos laterales, donde se encuentran los espeleotemas protegidos del paso (Figura 4).

Hay dos espeleotemas que merecen especial atención en esta galería: estalagmitas huecas y bolas de yeso. Las estalagmitas huecas son uno de los espeleotemas más llamativos del Karst en yeso de Sorbas, sólo han sido descritas en este entorno. Su formación está relacionada con procesos simultáneos de precipitación y disolución del yeso, pero con la particularidad de encontrarse ligadas genéticamente con estalactitas de calcita (Calaforra y Forti, 1990b). Las "bolas de yeso" son espeleotemas formados por procesos capilares de "exudación" desde la matriz yesífera. A favor de pequeñas grietas y poros, el agua cargada en sulfato cálcico, accede al interior de la cavidad donde inicia su evaporación y precipitación del yeso. (Calaforra y Forti, 1990a). Las formas son concéntricas y frecuentemente se encuentran rellenas de material arcilloso arrastrado desde el estrato de yeso. En ocasiones se puede observar su estructura



*Figura 4. Detalle del balizamiento de la Galería del Bosque (Sistema Covadura). A. y B. Detalle del camino, C. Detalle de los materiales de balizamiento y F. Inicio del balizado con el cartel señalizador. (Fotografías: E.C.A.)*

con un hueco central relleno de arcilla y un depósito de yeso que recubre a modo de costra la formación. Esta galería presenta un techo muy bajo que dificulta las tareas de balizamiento, y la presencia de las estalagmitas huecas, de gran fragilidad hacen que a veces el camino se estreche para dejar un margen suficiente entre el paso de los visitantes y las formaciones.

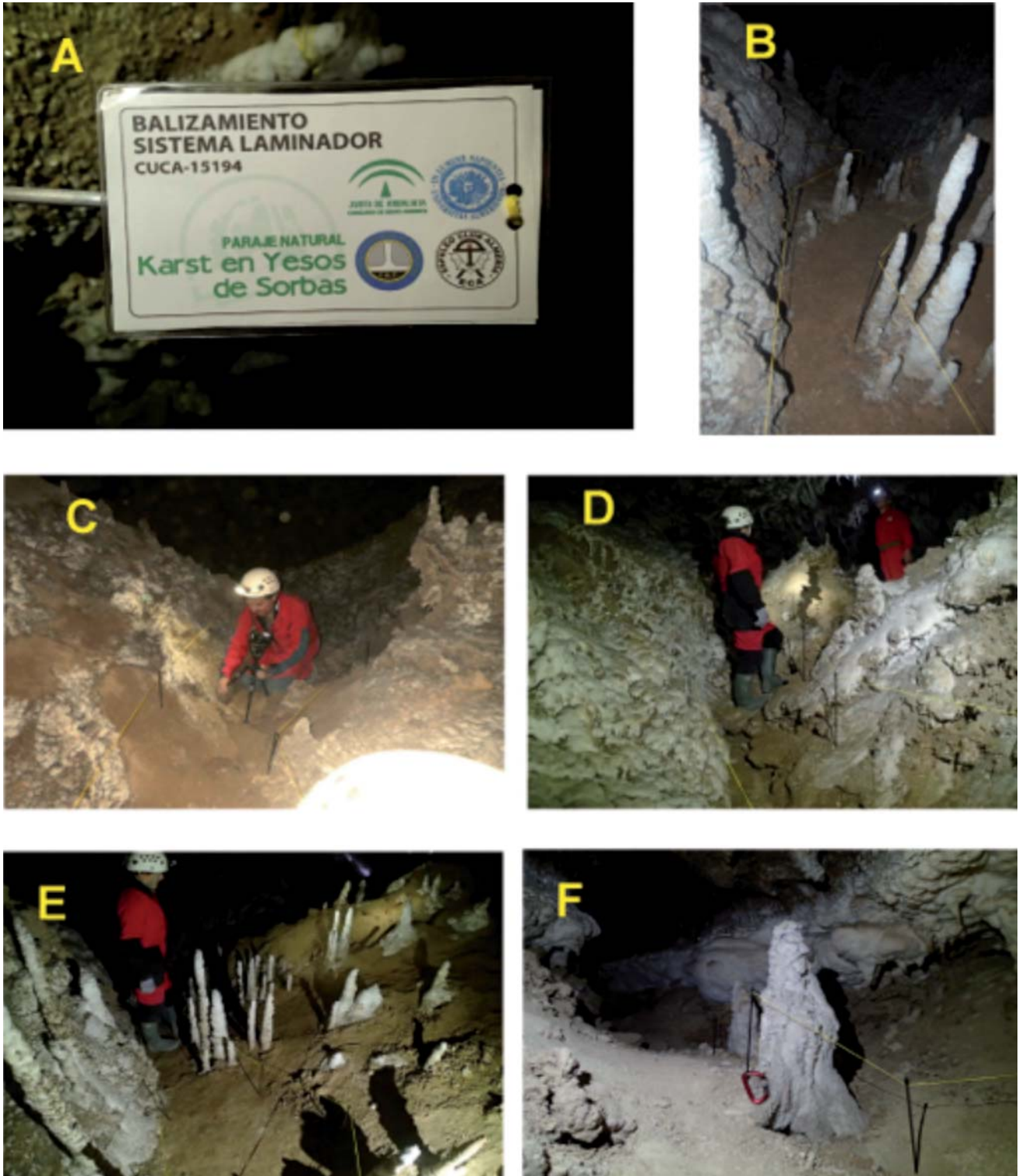


Figura 5. Balizamiento de Sistema Laminador. A. Cartel señalizador. B. C. y D. Balizado del recorrido. E. y F. Detalle del balizado de espeleotemas. (Fotografías: Espeleo Club Almería)

## **Sistema Laminador**

El Sistema Laminador está situado en el Sector Viñicas, Zona Oeste. Fue descubierta en 2007 por el Espeleo Club Almería que inició su exploración en 2008. Se retomó su exploración en 2010 durante las primeras Jornadas de Exploración y Topografía que el Espeleo Club Almería organizó en el karst en yeso de Sorbas. La topografía de esta cavidad, realizada por el Grupo de Espeleólogos Granadinos y el Espeleo Club Almería se finalizó en 2011. El conjunto está formado por tres cavidades 15193-Sima Inocentes I, 15194-Sima Luis y 15195-Sima La Foret, todas ellas muy cercanas entre sí. La entrada más cómoda al sistema es Sima Luis. El pozo de entrada de 12 metros conecta directamente con la galería principal mediante un pequeño péndulo. Esta galería de discretas dimensiones al principio, va ampliándose progresivamente hasta llegar a la Sala La Foret donde la cantidad, variedad y belleza de los espeleotemas cristalinos que posee la convierten en una de las Salas más espectaculares.

Los espeleotemas que contiene son muy variados: estalactitas, excéntricas, coraloides, pequeños abetos, estalagmitas... un sinfín de formas cristalinas que decoran toda la galería. Cerca de la base del pozo de acceso una pequeña ventana comunica esta sima con otra de las entradas cercanas. Este paso está profusamente decorado con estalactitas y estalagmitas, así como blanquísimas costras cristalinas, constituyendo un reducido pero espectacular conjunto de espeleotemas yesíferos. Como espeleotemas singulares cabe destacar pequeños abetos de yeso y estalagmitas de gran envergadura. Una vez descendido el pozo de entrada, se accede a través de un paso estrecho a la parte de la cavidad con gran densidad de espeleotemas. Es conveniente dejar en este punto los arneses y aparatos de progresión vertical, ya que pueden fácilmente tropezar con las estalagmitas provocando su rotura. En esta cavidad el balizamiento se ha realizado definiendo un camino que discurre entre los grandes espeleotemas existentes lo que hace que el trazado sea abrupto e irregular dada la densidad de espeleotemas que existen en todo el recorrido. Aquí han tenido que combinarse varillas de diferentes tamaños para conseguir un camino relativamente uniforme. Las varillas han sido colocadas en tramos de diferentes y variadas longitudes para poder crear un paso de suficiente amplitud entre estalagmitas (Figura 5).

## **Conclusiones**

El balizamiento realizado en cavidades con alto nivel de actividad espeleológica ha demostrado ser un buen método para preservar y proteger los entornos más sensibles y frágiles de estos ambientes subterráneos. Se ha comprobado que los visitantes respetan las señalizaciones, ya que periódicamente se han realizado actividades para el mantenimiento y comprobación del balizado, no detectándose ningún deterioro en el mismo, excepto en casos muy concretos de descuidos involuntarios al tropezar con las varillas que determinan el camino. En general, el balizamiento ha demostrado ser una alternativa muy válida, ya que además de proteger las formaciones más delicadas, es una forma muy efectiva de conservar en su estado natural todas aquellas zonas de las galerías que quedan fuera del camino balizado, pudiendo de esta forma regenerar sus espeleotemas deteriorados y proteger aquellos que no son evidentes al visitante y que al ser inadvertidos son susceptibles de una rotura involuntaria con el paso de los espeleólogos visitantes. Además, los materiales utilizados y el diseño de los balizamientos



se integran en gran medida en el paisaje general de la cavidad, de forma que constituyen el menor impacto visual posible, permitiendo una visita natural. El balizado de bajo impacto en cavidades se muestra como una herramienta muy útil tanto para cavidades turísticas con actividades de espeleo-turismo como en cavidades con solo visitas de carácter espeleológico.

## Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de los espeleólogos del Espeleo Club Almería que han participado en los trabajos de balizamiento de estas cavidades, así como a todos los que desde otros clubes andaluces han querido participar en las tareas de balizamiento con nosotros. Especial mención queremos hacer a los fotógrafos especialistas en el Medio Subterráneo Francisco Hoyos Méndez y Víctor Ferrer Rico, que desinteresadamente han colaborado con nosotros para dar forma gráfica tanto a los balizamientos como a la singularidad de los espeleotemas y formas cristalinas que con estos trabajos se intenta proteger. También un especial agradecimiento a nuestros compañeros y amigos de CENM (Centro de Estudios de la Naturaleza y el Mar) de Cartagena, que nos han apoyado en estas tareas. Por último, queremos dejar constancia del apoyo recibido por la Federación Andaluza de Espeleología que ha colaborado con el proyecto y lo ha difundido en todos los foros espeleológicos a su alcance.

## Referencias

- Calaforra, J.M. y Forti, P. 1990a. Espeleotemas yesíferos: "The gypsum balls", una nueva forma de concrecionamiento en los yesos de Sorbas (Almería). *V Congreso Español de Espeleología*, Cuaderno de resúmenes, 10-11. Camargo (Santander).
- Calaforra, J.M. y Forti, P. 1990b. Le pale di gesso e le stalagmite cave: due nuove forme di concrezionamento gessoso scoperte nelle grotte di Sorbas (Andalusia, Spagna). *Le Grotte d'Italia*, (4) XV: 73-88.
- Calaforra, J.M. y Forti, P. 1994. Two news types of gypsum speleothems from New México: gypsum trays and gypsum dust. *Nat. Speleol Soc Bull* 56: 32-37.
- Club Cántabro de Exploraciones Subterráneas. 2013. *Balizado de cavidades. Conservación, Conferencia Internacional de Topografía Digital y Conservación de Cavidades*, Topo Murcia 2013.
- Espeleo Club Almeria. 2014. *Balizamiento de Sima Fe*. Andalucía Explora. Federación Andaluza de Espeleología. ([andaluciaexplora.blogspot.com.es](http://andaluciaexplora.blogspot.com.es))
- Federación Cántabra de Espeleología. 2013. *Balización de cavidades. Materiales y técnicas para la protección del Patrimonio Subterráneo*. ([www.espeleocantabria.net](http://www.espeleocantabria.net)).
- Federación de Espeleología de la Región de Murcia. 2010. *Sistema de balizamiento para visitas reguladas y conservación en Sima de la Higuera, Pliego- Murcia*. ([www.Simadelahiguera.es](http://www.Simadelahiguera.es)).

## Sistema de gestión integral para cavidades turísticas

A. Hernáiz Gómez <sup>(1)</sup>, C.J. Tejedor Martínez <sup>(2)</sup>, M.A. Gómez Marquina <sup>(2)</sup> y R. Zangróniz Cantabrana <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento Comercial, Servinet Sistemas y Comunicación SL, Cuenca (España)

<sup>(2)</sup> Departamento I+D+i, Servinet Sistemas y Comunicación SL, Cuenca (España)

<sup>(3)</sup> Instituto de Tecnologías Audiovisuales, Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca (España)

---

### RESUMEN

La tecnología está actualmente en nuestro día a día, el sector turístico se ha adaptado progresivamente a esta realidad y ha hecho uso de esta tecnología en la mejora constante de sus servicios. La complejidad del entorno subterráneo ha impedido que la absorción de esta tecnología haya seguido el mismo ritmo de implantación que en el resto de los sectores turísticos. In Location cubre estas necesidades con el desarrollo de una plataforma ideada para su implantación en los entornos subterráneos, la empresa Servinet en colaboración con la Universidad de Castilla la Mancha dan respuesta a gran parte de las necesidades de las cavidades turísticas con tecnología desarrollada pensando en ellas. Esta plataforma está compuesta por un sistema de localización en tiempo real (RTLS, por sus siglas en inglés) soportado sobre una red de sensores. El sistema de localización junto a una red de sensores inalámbrica (WSN, por sus siglas en inglés), controla y almacena en un servidor los datos de visitas y medioambientales. Los visitantes perciben un nivel de seguridad adicional en su visita, gracias al sistema de localización, con contenidos multimedia que aportan un valor añadido a su experiencia adaptándose a las nuevas tecnologías. Así mismo, el sistema de audio guiado autónomo que es activado por el guía permite mejorar la experiencia del usuario y suprimir las barreas idiomáticas. Además, gracias a la conectividad desplegada a lo largo de las instalaciones, los usuarios pueden estar comunicándose mediante internet y dar notoriedad a su visita en las redes sociales. A su vez, el sistema dispone de alarmas proactivas, si se produce una caída o un visitante se desvía del trazado se envía una alerta al responsable de la instalación. Finalmente, se puede controlar la iluminación de una forma inteligente con un conjunto de actuadores, que se activan en función de la presencia de visitantes y todo ello controlado a través de una aplicación móvil.

**Palabras clave:** contenidos, localización en interiores, multimedia, red de sensores, seguridad, sensorización.

## *Integrated management system for show caves*

### ABSTRACT

*Technology is nowadays in our daily lives, the tourism sector has gradually adapted to this reality and has used this technology for constant improvement of its services. The complexity of the underground environment has prevented that the absorption of this technology has kept pace of implementation as in other tourist sectors. In Location meets these needs with the development of a platform designed for its implementation in underground environments. The company Servinet, in collaboration with the University of Castilla La Mancha, provides answers to many of the needs of tourist caves with technology developed thinking of them. This platform consists of a tracking system in real time (Real Time Location Systems - RTLS) supported on a network of sensors. The location system, with a network of wireless sensors or WSN (Wireless Sensor Network), controls and stores in a server the data about visits and environmental information. Visitors receive an additional level of security during their visit, thanks to the location, with multimedia content that add value to their experience and adapting to new technologies. Likewise, the self-guided audio system that is activated by the guide improves the user experience and eliminates idiomatic barriers. Besides, thanks to connectivity deployed along the facilities, users can be communicating through the internet and give visibility to their visit on social networks. In turn, the system offers proactive alarms, if a fall occurs or a visitor deviates from the route,*



*an alert is sent to the person responsible for the installation. Finally, you can control the lighting in an intelligent way with a set of actuators, which are activated depending on the presence of visitors and all controlled through an APP.*

**Keywords:** RTLS, security, sensorization, smart cave, WSN.

## Introducción

El turismo de cavidades ha experimentado un considerable aumento en los últimos años, se han abierto nuevas instalaciones y se han acondicionado otras tras el cierre de su actividad principal, como era la minería. Este aumento de instalaciones requiere del desarrollo de nuevas tecnologías para dar respuesta a las necesidades de los visitantes, garantizar su seguridad y ofrecerles una experiencia única en su visita.

Fuera de las cavidades hay tecnologías que cubren parte de las necesidades: existen sistema de localización basado en etiquetas activas [1] implantados en el entorno hospitalario; otros sistemas WIFI [2] permiten ofrecer un acceso a Internet a los visitantes, GPS, sensores de toma de datos que requieren acceder físicamente a ellos para obtener las mediciones, etc. Sin embargo, todas estas tecnologías se pensaron para otros entornos que no tienen las particularidades de las cavidades turísticas.

In Location viene a cubrir este hueco con un desarrollo orientado a las cavidades turísticas, se trata de una plataforma integral desarrollada para cubrir las necesidades específicas de este tipo de instalaciones. Su eje central es un sistema de localización en tiempo real (RTLS, por sus siglas en inglés) cuya finalidad es realizar el seguimiento en tiempo real de la ubicación de las personas dentro de la cavidad, utilizando una moderna red de sensores.

Adicionalmente cubre otras necesidades, como la monitorización de parámetros ambientales o dar respuesta a singularidades que se producen en la cavidad gracias al uso de alarmas proactivas. También permite la integración de actuadores; facilitando, por ejemplo, la gestión del alumbrado dentro de la instalación. Finalmente, incluye un sistema de gestión de contenidos multimedia que son ofrecidos a los visitantes a través dispositivos con pantalla a color especialmente diseñado para soportar las condiciones de las cavidades.

## Objetivos del sistema

Los objetivos de este sistema de localización en tiempo real habitualmente están orientadas a la mejora de procesos, a la seguridad y protección, a la gestión de inventarios o a la combinación de todas las anteriores. En el caso de las cavidades turísticas este sistema aporta una mayor seguridad a los visitantes, permite conocer en todo momento donde están los grupos evitando las aglomeraciones o prestando información puntual.

## Seguridad

En el sector turístico, y más concretamente en las cavidades turísticas, se puede usar sistemas de localización para ayudar a mejorar la seguridad de los visitantes, realizando un seguimien-

to en tiempo real de los mismos dentro de la cavidad. En el caso de que se produzca alguna caída o un visitante se aleje del recorrido fijado se puede enviar una alerta al responsable de la instalación, incluso a las unidades de emergencia.

### **Sensorización**

In Location no solo puede hacer el seguimiento de la localización de los usuarios o personal dentro de la cavidad, sino que también puede hacer el seguimiento de las condiciones dentro de la misma; como pueden ser la temperatura, la humedad, el nivel de radón, etc. La plataforma dispone de sensores propios integrados en los nodos de la red. A su vez, permite integrar la información de los sensores comerciales más utilizados e integrar las medidas en la base de datos central.

### **Control**

En una cavidad turística, usar un sistema de localización permite conocer la ubicación de los visitantes y del personal propio. También con el uso de actuadores se pueden controlar procesos, como por ejemplo la iluminación de las distintas zonas de visita. Por otra parte, la plataforma se integra con los sensores de distintos fabricantes y permite recopilar la información suministrada por estos sin necesidad de acceder físicamente a ellos, evitando viajes a la cavidad a los investigadores y gestores, agilizando su trabajo y permitiendo la deslocalización del mismo.

### **Rentabilidad**

La plataforma In Location permite ahorrar costes de una cavidad turística con su sistema de alumbrado inteligente. Este sistema consiste en un conjunto de actuadores que permiten controlar la iluminación en función de la presencia de visitantes. Así mismo, se puede reducir el personal que presta labores de apoyo dentro de la instalación, como también nos permite tener una visita en diferentes idiomas sin necesidad de que el guía los conozca.

### **Funcionamiento del sistema**

Las distintas soluciones de localización actuales varían en función de muchos factores: tipos de etiquetas usadas para realizar el seguimiento, red central que soporte el sistema, etc. In Location forma parte de los sistemas que usan etiquetas activas.

Los sistemas que utilizan etiquetas activas aportan una precisión superior frente a los sistemas que usan etiquetas pasivas. Las activas permiten transmitir información y recibirla, convirtiéndose en un sistema bidireccional de información.

Además, las etiquetas activas tienen un rango de lectura mayor que las pasivas; por lo tanto son más útiles para aplicaciones de seguimiento de activos (personas, maquinaria, artículos,

etc.) que necesitan ser reconocidas en distancias mayores. Habitualmente las etiquetas activas son alimentadas por baterías de larga duración; del orden de meses o incluso años.

El funcionamiento del sistema In Location está basado en una infraestructura fija y en un conjunto de etiquetas activas móviles (estas etiquetas activas se denominan localizadores). Los localizadores envían una baliza de posición que es capturada por los nodos fijos distribuidos a lo largo de la cavidad subterránea. Cada nodo fijo, a su vez, transmite el valor de la intensidad de señal recibida por el localizador a un agente. Finalmente, este agente realiza los cálculos necesarios y establece la posición del localizador.

Esta infraestructura fija está basada en una red de sensores, por lo que se obtiene una doble ventaja. Por un lado, se dispone de una red mallada que permite intercambiar datos de los distintos sensores y actuadores ubicados en la instalación; por el otro, esta infraestructura sirve de referencia para el sistema de localización en tiempo real, como puede apreciarse en la Figura 1.

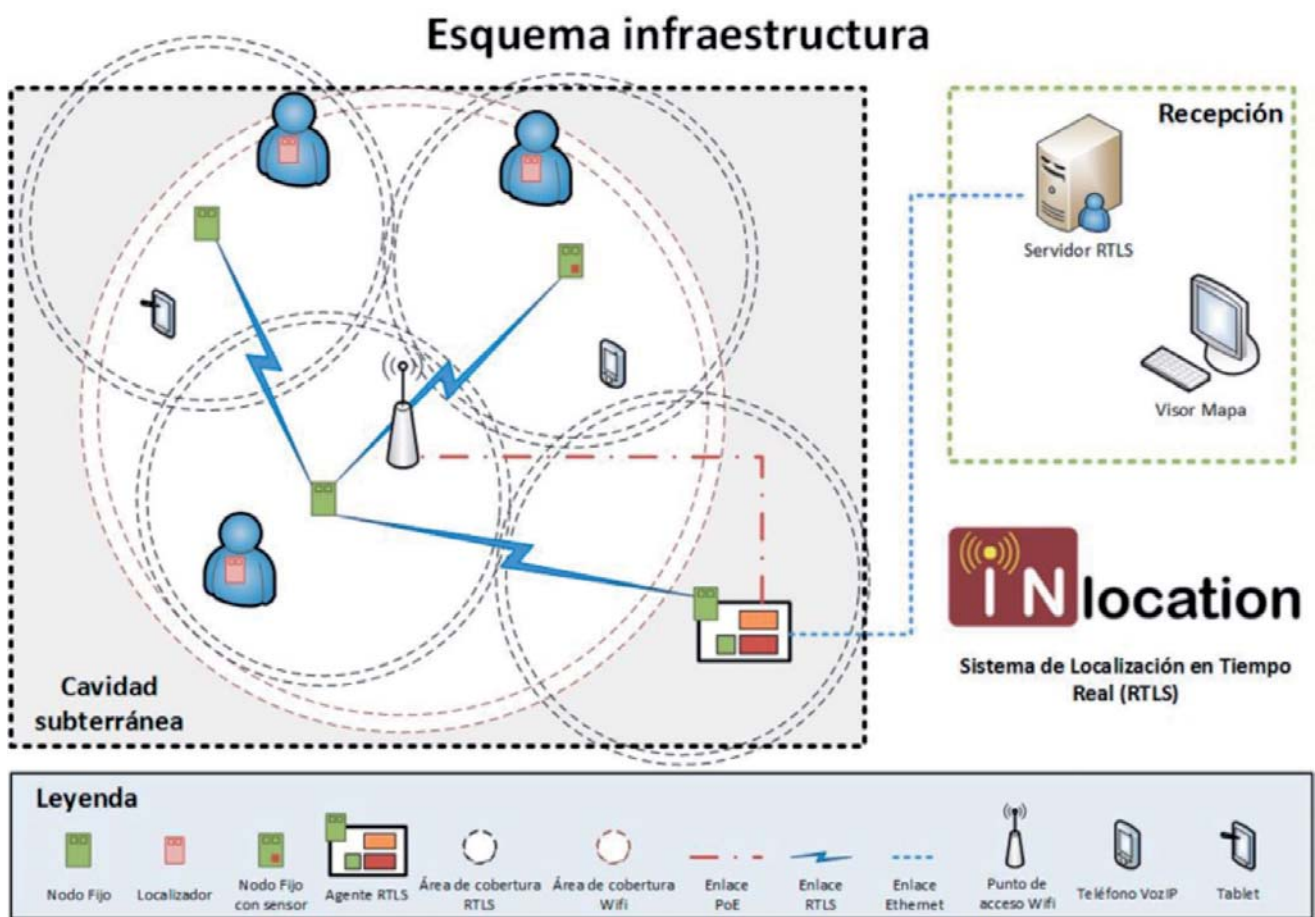


Figura 1. Esquema de infraestructura plataforma In Location

Toda la información recopilada por la red de sensores es transmitida a un servidor central que se encarga de almacenarla en una base de datos, esto nos permite tener en un solo sitio, no solo la información de posición, también toda la información referente al resto de actuadores de la cavidad, como luces y mediciones de parámetros ambientales, al tenerlo todo centralizado nos permite que la toma de decisiones sea ágil y efectiva.

La gestión de todo el sistema se lleva a cabo desde una interfaz web que permite definir los parámetros de la instalación, los distintos niveles, la ubicación de los nodos fijos, la definición de las alarmas y la gestión de los actuadores. También, se incluye una aplicación compatible con los principales dispositivos móviles desde donde se pueden realizar las tareas de administración y control sin precisar de estar en un ordenador.

Por otra parte, la plataforma dispone de un sistema de gestión de contenidos multimedia desde donde se puede configurar los distintos puntos de interés de la visita. Estos puntos de interés pueden contener información en varios idiomas, contenido multimedia como fotografías o vídeos, etc. Los visitantes pueden utilizar un dispositivo multimedia adaptado a las condiciones físicas de la cavidad, gracias a su nivel de protección IP 68 y resistencia a golpes. La activación de los puntos de la visita se puede realizar de forma automática, en función de la posición, o de forma manual por el guía, en cualquier caso este sistema nos permite tener una visita homogénea y en diferentes idiomas.

### ***Herramientas de gestión***

El sistema de localización In Location posee potentes herramientas de gestión que permiten controlar las instalaciones así como todo lo relacionado con las mismas. Desde un moderno interfaz Web o una App se realiza la parametrización inicial del sistema y el mantenimiento posterior del mismo. Adicionalmente, In Location dispone de un software que permite integrar herramientas de terceros con la plataforma e integra una herramienta de inteligencia de negocio (BI) que permite obtener datos significativos y generar informes.

### ***Portal de administración***

La herramienta de administración permite controlar de un simple vistazo la posición y estado de cada uno de los dispositivos y usuarios de la instalación, también permite comprobar los valores que éstos ofrecen así como editarlos.

Igualmente, desde un mismo panel de administración se pueden controlar varias instalaciones a la vez de una forma visual mediante un mapa. Posteriormente se puede acceder a cada una de ellas y a sus componentes de manera rápida, sencilla e intuitiva.

Como se observa en la Figura 2, también dispone de una visualización de datos de los dispositivos en tiempo real; para conocer información sobre los mismos, como registros de valores medioambientales, número de usuarios dentro de la instalación, conocer si han pasado por determinadas zonas de la instalación o la posibilidad de recibir alertas en caso de necesidad.

Esta herramienta es fundamental a la hora de parametrizar los valores iniciales del sistema de localización. Algunos de estos parámetros son: posición de nodos fijos, datos de localizadores, definición de alarmas, asignación de permisos, etc.

Desde esta herramienta también se configura los contenidos multimedia que se desean prestar a los usuarios a lo largo de su visita. Inicialmente se cargan los puntos de interés, que corresponden con los nodos fijos definidos previamente en el mapa, posteriormente se asocian las explicaciones con estos puntos.

Dentro de una misma visita se pueden definir diferentes usos, en función de los contenidos que incluyan y aportar una experiencia diferente en función del público al que va dirigida. Por ejemplo, se puede definir una aplicación con contenidos de índole divulgativos y otra con contenidos enfocados al mundo académico. Estos contenidos pueden tener audios, videos en varios idiomas. Además, los textos son adaptados para invidentes con la inclusión de subtítulos.

Finalmente, la herramienta de gestión incluye un sistema de inteligencia de negocio (BI, por sus siglas en inglés) que permite obtener información relevante para el personal encargado de realizar las labores de administración y gestión.



Figura 2. Herramienta de gestión In Location

Funcionalidades del portal de administración:

- Gestión de instalaciones, permite definir los datos generales de la instalación además de incluir los mapas de los distintos niveles que la conforman



- Definición de tipos de dispositivos
- Gestión de dispositivos
- Gestión de agentes
- Gestión de actuadores
- Control de las versiones del firmware de los dispositivos
- Asistente de actualización del firmware de los dispositivos
- Control de tablas auxiliares
- Definición de alarmas
- Definición de disparadores de alarmas
- Gestión de localizadores
- Gestión de nodos fijos
- Control de asignaciones de localizadores
- Control de usuarios
- Asignación de permisos
- Panel de control
- Gestor de contenidos

### ***Aplicación móvil de gestión***

Con el fin de que la gestión de la instalación sea lo más efectiva posible, y se pueda llevar a cabo desde cualquier lugar, se ha desarrollado una aplicación móvil multiplataforma para smartphone y tablet, cuya finalidad es poder controlar los valores desde cualquier sitio.

Esta aplicación está disponible tanto para iOS como para Android y permite, a través de una interfaz muy intuitiva y fácil de utilizar, tener todo el control de su instalación en la palma de la mano. Tan solo se debe seleccionar qué tipo de dispositivo se quiere observar y comprobar sus datos, tales como últimas posiciones, estado del dispositivo, posición en el mapa y calibración; además de los ajustes básicos de los mismos.

La app posee un sistema de alertas que avisa cuando alguno de los dispositivos sufre cualquier tipo de incidencia, pudiendo actuar rápidamente en consecuencia, en muchas ocasiones sin necesidad de desplazarse hasta la propia instalación.

Porque no todas las instalaciones son iguales ni tienen las mismas necesidades, tanto el Portal de Administración como la App de Gestión se pueden adaptar a los futuros requerimientos del usuario, añadiendo nuevas funcionalidades y mejoras. Puesto que una de nuestras premisas es mantener siempre nuestros productos adaptados a nuestros clientes.

## **Interfaz de programación de aplicaciones In Location**

Gracias a una interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) se pueden introducir datos del sistema en la web del usuario. A modo de ejemplo, se podría incluir la temperatura de la instalación en la web o también se podría mostrar la posición de los usuarios dentro de la instalación en tiempo real.

Nos aporta la opción de extraer información de nuestro sistema y mostrar en un entorno público aquellos datos que consideremos relevantes, al igual que nos permitiría mostrar otros datos de interés, por ejemplo, a la comunidad científica, donde aportemos datos en una web con acceso restringido.

## **Dispositivos In Location**

La configuración del sistema puede variar en función de los requerimientos del cliente. Éstos pueden ir desde necesitar únicamente prestar contenido multimedia a los usuarios, localizar individuos dentro de una instalación hasta prestar información relacionada con la ubicación de los mismos, incluyendo la toma periódica de valores medioambientales. Algunos de estos valores son: la temperatura, la humedad, la cantidad de radón acumulado, etc.

Para dar respuesta a todas las necesidades In Location está diseñado de forma modular, es decir, existe un dispositivo para cada necesidad y estos dispositivos permiten configurar la instalación a las necesidades del cliente. A continuación se detallan las características técnicas de los mismos.

## **Nodo Fijo**

Este dispositivo es la base del sistema In Location y realiza las funciones de localización y establecimiento de la red mallada que permite la comunicación entre todos los nodos. Están pensados para su ubicación en entornos donde hay mucha humedad y temperaturas extremas gracias a su nivel de protección IP 67. Tienen unas dimensiones reducidas: 8,5 cm de largo, 5,5 cm de ancho y 2,5 cm de alto por lo que gracias a su tamaño se pueden ocultar fácilmente. Las características técnicas se enumeran en la Tabla 1.

Existen tres versiones de este dispositivo: versión *router*; versión con sensor de humedad y temperatura; y versión con sensor de radón.

La actualización de estos dispositivos se realiza de forma inalámbrica, lo que evita tener que acceder físicamente al hardware, garantizando así su durabilidad y facilitando su mantenimiento. Por otro lado, la conexión con la fuente de alimentación se realiza utilizando un conector plug & play, lo que facilita su instalación y evita exponer el hardware en el entorno.

<b>Red</b>	Tipo malla auto gestionada
<b>Temperatura de operación</b>	-20 a 60 °C
<b>Humedad</b>	0 a 95 % sin condensación
<b>Frecuencia de operación</b>	Banda ISM de 2,4 GHz
<b>Tasa de datos</b>	250 kbps (IEE 802.15.4)
<b>Sensibilidad de recepción</b>	-101 dBm
<b>Balance de entrada</b>	Hasta 104 dB
<b>Potencia de salida</b>	3 dBm máxima
<b>Rango</b>	Hasta 50 m
<b>Antena</b>	Ganancia de 0 dBi
<b>Consumo recepción</b>	21,8 mA
<b>Consumo transmisión</b>	20,8 mA
<b>Alimentación</b>	3,3 Vdc +/- 10%

*Tabla 1. Características técnicas nodo fijo*

### **Actuador**

Este dispositivo es el encargado de controlar la iluminación o cualquier otro actuador que consideremos, como puesta en marcha de ventilación, está compuesto por un nodo fijo que controla un relé. Su finalidad es realizar las funciones de conmutación de carga resistiva hasta 10 A sobre 220 Vac. Este actuador está encapsulado en una caja IP 67 e incluye una fuente de alimentación de 3,3 Vdc. Para facilitar su montaje el conexionado se realiza mediante conectores plug & play con el tramo de iluminación que se quiere controlar. Solamente son necesarias una entrada y una salida de 220 Vac. Por último, sus dimensiones son 16,5 cm de largo, 11,5 cm de ancho y 8cm de alto.

### **Localizador**

Su finalidad es la identificación tanto de las personas como de los activos de una instalación. Está compuesto por una etiqueta activa y alimentada mediante baterías (AAA). Envía paquetes de localización a los nodos fijos. Con el fin de maximizar la duración de las baterías, dispone de un acelerómetro cuya función es encender el dispositivo cuando detecta movimiento y apagarlo cuando permanece en reposo. Además, este acelerómetro, controla las caídas y garantiza la seguridad de los usuarios.

El localizador monitoriza internamente su carga de batería, cuando esta baja de un umbral predefinido se notifica al administrador de la instalación para que proceda a sustituir las baterías. La duración de las baterías AAA puede llegar a durar varios meses en función del uso que se haga del mismo.

Existen varias versiones del localizador dependiendo el uso que se le vaya a dar al mismo. Se dispone de una versión integrada en el frontal de la marca Petzl (modelo PIXA1), que se alimenta de las baterías del mismo frontal. Otra versión se integra con un casco estándar e incluye la alimentación. Finalmente existe otra versión con la que se puede llevar colgado o en el brazo.

Las dimensiones del Localizador varían en función del tipo elegido. A modo de ejemplo, el modelo que está integrado con el frontal Petzl mide 5,5 cm de largo, 1 cm de ancho y 6,5 cm de alto. En la Figura 3 se puede ver una configuración sobre un frontal de la marca Petzl.



Figura 3. Localizador instalado en frontal marca Petzl

### Agente

Este dispositivo es el encargado de realizar las funciones de pasarela entre la red de sensores, formada por los nodos fijos, y el servidor central. Está compuesto por un dispositivo denominado coordinador, el cual recibe toda la información de la red de sensores, y por un ordenador industrial, que procesa esta información y la envía al servidor central para su posterior almacenamiento. Otra de las funciones clave de este dispositivo en la monitorización de la red de sensores, comprobando periódicamente la disponibilidad de los mismos. Además, incluye un software de calibración que permite ajustar inicialmente los valores de localización. De la misma manera que en el resto de los dispositivos el encapsulado que lo protege es IP 67. Las características técnicas del ordenador industrial se enumeran en la Tabla 2.

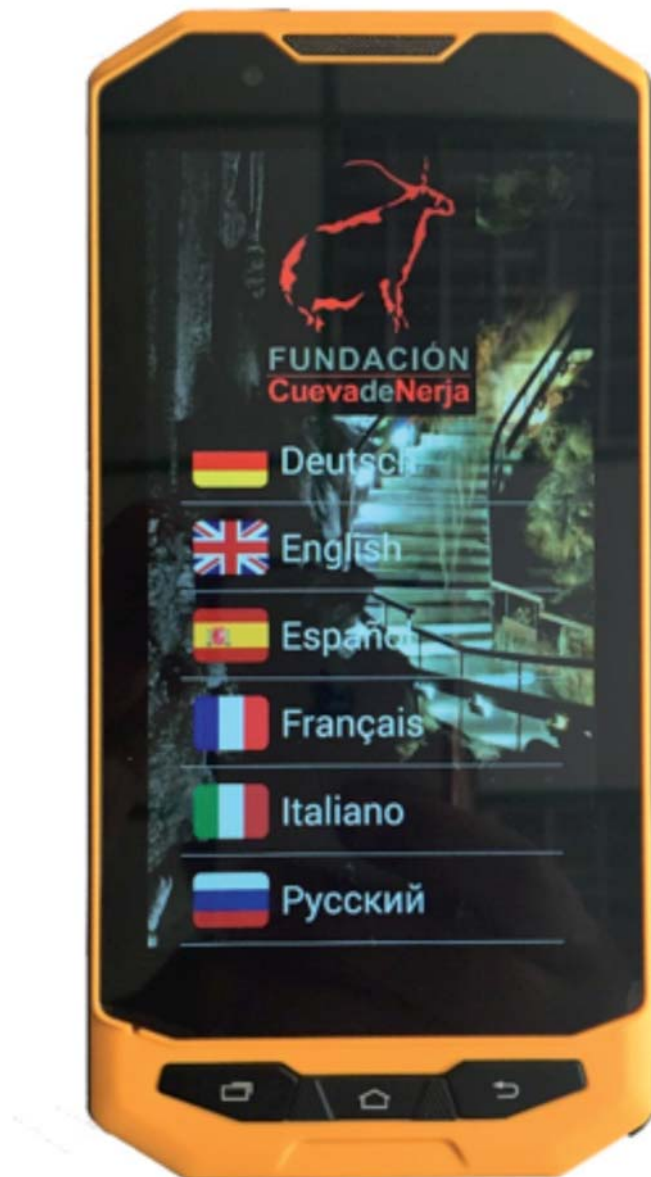
<b>Dimensiones</b>	16,5cm X 11,5cm X y 8cm (Largo, Ancho y Alto)
<b>Procesador</b>	TI Sitara AM3358AZCZ100, 1 GHz, 2000 MIPS
<b>Memoria</b>	SDRAM: 512 MB DDR3L 800 MHz
<b>Almacenamiento</b>	4 GB, 8bit Embedded MMC (eMMC)
<b>Conectividad</b>	10/100M Ethernet (RJ45)
<b>Consumo</b>	430 mA
<b>Alimentación</b>	5 Vdc +/-1 10%
<b>Sistema operativo</b>	Linux kernel 3.16

Tabla 2. Características técnicas agente

Una de las ventajas que ofrecen las redes de sensores en su reducido consumo eléctrico, el cual ronda los 22 mA a 3,3 Vdc; por lo que con una única fuente de alimentación se puede dar servicio a varios nodos fijos, ya que ésta cuenta con 3 A de intensidad. Igual que en el resto de dispositivos, esta fuente de alimentación está protegida dentro de una caja IP 67. Con el fin de facilitar las conexiones se ha diseñado un sistema plug & play que evita abrir la caja a la hora de realizar la conexión, protegiendo así al operario de posibles descargas eléctricas.

### **Dispositivo de guiado**

Debido a las condiciones particulares de las cavidades turísticas, como alta humedad, terrenos sinuosos, etc., es necesario que los dispositivos de guiado cumplan una serie de características específicas, como por ejemplo: estanqueidad, resistencia, durabilidad de la batería, etc. que



*Figura 4. Dispositivo de guiado de modo usuario*



permitan utilizarlos en condiciones más adversas de las habituales. Estos dispositivos también deben poder soportar diferentes Apps y permitir su modificación, así como la incorporación de nuevo material multimedia.

El dispositivo de guiado viene con una aplicación que dispone de un modo guía y un modo visitante. El modo guía le permite al personal de la cavidad elegir el punto de interés, una vez seleccionado, se lanza la explicación en el resto de dispositivos de forma automática. Los contenidos multimedia pueden ser actualizados a través de cualquier navegador. Estos cambios son enviados a todos los dispositivos de forma inalámbrica, sin necesidad de conectarlos a ningún ordenador. En la Figura 4 se muestra un dispositivo de guiado configurado en modo cliente.

## **Innovación**

In Location es un sistema en constante evolución. La innovación tanto en las herramientas de administración y gestión como en los dispositivos está garantizada gracias al equipo de I+D que hay detrás del proyecto. Este equipo trabaja día a día introduciendo las últimas novedades que aparecen en el mercado, además de innovaciones propias, garantizando así la vigencia de la tecnología utilizada en toda la plataforma. La unión de la empresa privada con un centro de investigación público, como es la Universidad de Castilla-La Mancha, garantiza la vigencia de la tecnología.

## **Casos de éxito**

Desde el año 2013 el sistema de gestión para cavidades turísticas está instalado en la Mina situada en la localidad de Cueva del Hierro (Cuenca). En esta instalación se mantiene un seguimiento de los visitantes, teniendo un histórico de visitas, uso de la cavidad, tiempos de las visitas e incidencias con las mismas.

También se mantiene un control de la humedad y temperatura en diferentes puntos de la Mina, permitiendo a los gestores de la misma tener varias mediciones diarias sin necesidad de bajar a tomarlas y pudiendo ver tanto las modificaciones diarias, como las variaciones entre los diferentes años.

En la actualidad se está realizando la instalación en la Cueva de Nerja, esta instalación constará de diferentes fases, donde los objetivos son de muy diversa índole, por una parte, se busca poder homogeneizar las visitas, tanto en contenidos como en tiempos, así como poder mostrar al visitante en el dispositivo multimedia zonas de la cueva que en estos momentos no pueden ser visitadas, bien por su delicadeza bien por su difícil acceso.

Por otra parte, cara a la gestión y conservación de la cavidad se permite mantener un control de la ubicación de los grupos en cada momento, se facilita la comunicación con los guías y se permitirá la integración en la red de los medidores instalados actualmente en la cueva,

consiguiendo que no sea necesario el acceder a ella para obtener las lecturas de los diferentes equipos de medición.

## **Conclusiones**

El sistema propuesto viene a cubrir las necesidades específicas de las cavidades turísticas, que hasta el momento no encontraban solución en el mercado actual, entre ellas están: garantizar la seguridad a los visitantes, controlar los valores ambientales, cumplir con la legislación vigente, proporcionar herramientas de gestión, ofrecer una experiencia única al visitante, etc.

Como ya se ha indicado anteriormente, en el mercado existen soluciones que parcialmente cubren estas necesidades, pero no están adaptadas a las peculiaridades de las cavidades turísticas, estas condiciones llevan a necesitar equipos capaces de resistir en un entorno adverso (humedad, temperatura, resistencia a golpes, etc.). Sin embargo, In Location está ideado para su uso en cavidades turísticas, desde un principio su objetivo son los entornos con este tipo de condiciones, buscando dar soluciones donde no las hay y las que se encuentran solo cubren alguna de ellas.

Como resultado de todo el trabajo llevado a cabo en los últimos seis años se ha obtenido una plataforma integral para cavidades turísticas, que permite a los gestores de este tipo de instalaciones mejorar la calidad de sus visitas, aportar un valor diferenciador y garantizar la perfecta conservación de sus instalaciones. Por consiguiente, In Location es un producto preparado para dar respuesta a las necesidades de las distintas instalaciones que aprovechan el entorno subterráneo dentro del sector turístico.

## **Referencias**

RFID *Healthcare Security Solution Technology* (Stanley Healthcare), 20/07/2016, <http://www.stanleyhealthcare.com/solutions/health-systems/security-protection>  
Purple Wifi (Purple WiFi Limited), 14/07/2016, <http://purple.ai/>



## Contenido de Radón en aire en la Cueva de las Ventanas (Píñar, Granada)

I. Fuente-Merino <sup>(1)</sup>, W. Martín-Rosales <sup>(2)</sup>, L. Quindós-López <sup>(1)</sup>, G. Alcaín-Martínez <sup>(3)</sup>, M. D. Conejo-García <sup>(4)</sup>, M. J. González-Ríos <sup>(3)</sup>, L. Santiago Quindós-Poncela <sup>(1)</sup> y E. García-Cuenca <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo Radón, Universidad de Cantabria, 39011 Santander,  
fuentei@unican.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071 Granada,  
wmartin@ugr.es

<sup>(3)</sup> Diputación Provincial de Granada, 18014 Granada

<sup>(4)</sup> Exmo. Ayuntamiento de Píñar, 18568 Píñar (Granada)

---

### RESUMEN

Durante el año 2015 se ha llevado a cabo un seguimiento del contenido de radón en aire en la Cueva de las Ventanas de Píñar (Granada), cavidad turística gestionada desde su habilitación por el Ayuntamiento de la localidad. El objetivo del estudio ha sido dar cumplimiento a la normativa española vigente en materia de radiaciones ionizantes (IS-33). El estudio contempla el seguimiento mensual del contenido de radón en aire en seis sectores representativos de la cavidad. Se utilizaron para ello detectores pasivos suministrados y analizados en el laboratorio del Grupo de Investigación de Radón de la Universidad de Cantabria. Los resultados obtenidos sugieren valores muy bajos de concentraciones de radón durante todas las épocas del año, con un valor medio de concentración (y por tanto como valor de referencia) de gas radón de  $79 \pm 5,5$  Bq/m<sup>3</sup>, muy inferior al establecido por la Instrucción (600 Bq/m<sup>3</sup>), con una variabilidad temporal muy reducida. Asimismo, teniendo en cuenta valores conservadores de permanencia de los trabajadores, y aplicando los criterios de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP65), la dosis anual recibida por los mismos es 0,189 mSv, y 0,299 mSv considerando los valores máximos, en ningún caso superior a los 6 mSv recogidos en la Instrucción IS-33. La elevada tasa de ventilación de la cavidad se presenta como justificación más razonable de estos valores tan bajos.

**Palabras clave:** Cueva de las Ventanas, dosis efectiva, gas radón, radiaciones ionizantes

## *Radon air levels in Ventanas Cave (Píñar, Granada)*

### ABSTRACT

*During 2015 was carried out the air radon content monitoring in several sectors of Ventanas Cave in Píñar (Granada), a touristic cave managed for the town council from its touristic enablement. The aim of this study was comply with current regulation concerning to Spanish ionizing radiation law (IS-33). The study contemplates the monthly monitoring of air radon content in six different cavity sectors. For this purpose we used passive detectors supplied and analyzed by the Investigation Radon Group from University of Cantabria. The obtained results suggest very low radon concentration values for all times of year, with an average concentration rate (and therefore as reference value) of radon gas about  $79 \pm 5,5$  Bq/m<sup>3</sup>, which is much lower than that stablished by the Instruction (600 Bq/m<sup>3</sup>), with very low temporal variability. Likewise, considering conservative values of workers permanence, and applying the International Commission on Radiological Protection criteria (ICRP65), the annual dose received themselves is 0,189 mSv, and*

*0,299 mSv regarding to the maxima values, in any case upper than 6 mSv collected in the Spanish law. The high rate of cavity vent is presented as the most reasonable justification of these low values.*

**Key words:** *effective dose, ionizing radiation, Radon gas, Ventanas Cave.*

## Introducción

El radón es un elemento gaseoso procedente de la desintegración de la cadena del uranio considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA). Al tratarse de un producto de la desintegración del uranio, su existencia está estrechamente relacionada con la cantidad de dicho elemento presente en la corteza, y por tanto con las litologías o rocas que afloran en un área concreta.

En un macizo kárstico, el radón migra con cierta facilidad hacia los huecos, proceso conocido como *emanación*. La dinámica del radón y su desplazamiento entre los distintos sectores de la zona vadosa del karst dependen de la interrelación entre una serie de factores externos (gradiente térmico entre el interior y el exterior, velocidad del aire, humedad, diferencias de presión atmosférica, entre otros), e internos, tales como la geomorfología de la cavidad, porosidad eficaz, permeabilidad (grado de fracturación y karstificación) y el contenido en radio de los sedimentos y la roca (Kies *et al.*, 1997).

La ventilación es un factor clave a tener en cuenta en el estudio del contenido en gas radón en la atmósfera subterránea. Cuevas poco ventiladas (del mismo modo que ocurre con las viviendas) pueden llegar a alcanzar valores muy elevados de este gas. Ello implica un riesgo para las personas que permanezcan largos periodos de tiempo en este tipo de ambientes, muy especialmente en el caso de cuevas habilitadas para las visitas turísticas (guías, técnicos/as de mantenimiento, especialistas en fotografía, y en mucha menor medida, visitantes). Es precisamente ésta la razón por la cual las cuevas turísticas se han incluido como actividades a tener en cuenta en las normativas relacionadas con la protección frente a radiaciones ionizantes. En España, que integra ya la obligatoriedad de medir las concentraciones de radón en numerosas actividades desde hace ya años (Real Decreto 178/2001) es ya un referente la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural (BOE, 2012). En ella se obliga a cuantificar las concentraciones de radón de determinadas actividades (entre las que se incluyen las cuevas turísticas), así como los valores de dosis efectiva recibida por sus trabajadores, cuya superación requeriría la adopción de medidas correctoras o dispositivos de vigilancia. En la citada norma el valor de concentración de radón en aire por encima del cual hay que establecer algún tipo de control es 600 Bq/m<sup>3</sup>, mientras que la dosis anual límite para los trabajadores se establece en 6 mSv.

Son muy numerosos los trabajos publicados en relación con el contenido en radón en cavidades, especialmente los encaminados a determinar su potencial riesgo para los trabajadores, en el caso de cuevas turísticas (Quindós *et al.*, 2004; Field, 2007; del Rosal *et al.*, 2010; Quindós *et al.*, 2014), o bien dirigidos al estudio del radón como indicador cuantitativo de la ventilación de la cavidad y su uso como trazador ambiental (Fernández *et al.*, 1986; Quindós *et al.*, 2013 y Liñán-Baena *et al.*, 2014).





Figura 1. Localización geográfica e imagen de la entrada de la Cueva de las Ventanas de Piñar (Granada)

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos a partir del seguimiento del contenido de Radón en aire en sectores representativos de la Cueva de las Ventanas de Piñar, en la provincia de Granada (Fig. 1), durante el año 2015, con el objeto de cumplir con la mencionada normativa española, habiéndose calculado por tanto las concentraciones mensuales de radón en el aire en sectores representativos del recorrido turístico, así como la dosis recibida por los trabajadores.

## Características de la cavidad

### Material y métodos

La primera de las labores realizadas fue la recopilación de datos de carácter geológico del entorno, fundamentalmente las cartografías geológicas del IGME y la correspondiente al Mapa Predictivo de exposición al radón en España elaborada por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN, 2013). Una aproximación al régimen termométrico de la cueva pudo llevarse a cabo gracias a los datos de temperatura de la cavidad que se vienen registrando desde casi una década por la Diputación de Granada (González-Ríos, 2004), si bien hay que indicar que el régimen de temperaturas de la misma ha sido ya reconocido y estudiado en detalle (Sánchez-Martos *et al.*, 2003). Los datos de temperatura exterior de la cavidad se obtuvieron a partir de la estación de Iznalloz, perteneciente a la Red de Estaciones Agroclimáticas de la Junta de Andalucía.

La medida de la concentración de radón en aire se realizó mediante la utilización de detectores pasivos (Fig. 2), dispositivos que permiten obtener información sobre concentraciones promedio durante un tiempo que puede llegar a días, semanas o meses. El dispositivo consiste en un recipiente plástico que contiene en su interior, y adherido a la tapa, un detector de trazas denominado CR-39. EL contenedor actúa como una cámara simple de difusión de radón que excluye los descendientes del radón y evita el deterioro del detector protegiéndolo del polvo, de manera que evita la entrada de humedad pero permite la entrada de radón. Los límites de detección de los detectores han oscilado, según la campaña, entre 23 y 54 Bq/m<sup>3</sup>.

En la Cueva de las Ventanas de Piñar (Granada) no existen medidas históricas de ningún tipo sobre la concentración de gas radón, si bien, dadas sus condiciones de ventilación natural muy

eficientes, no se preveían valores elevados a priori. No se han muestreado los sectores más internos de la cavidad, a los que se accede sólo mediante técnica espeleológica, ya que no tienen a ellos acceso los trabajadores adscritos a la Cueva de las Ventanas. Se muestrearon 6 puntos situados en el recorrido turístico y situados sobre directamente sobre el terreno y nunca a una altura superior a la de cualquier visitante (Fig. 3), con un periodo de registro de un mes, aunque en algún caso fue de dos meses, lo que ha supuesto 65 medidas de radón durante el año 2015.

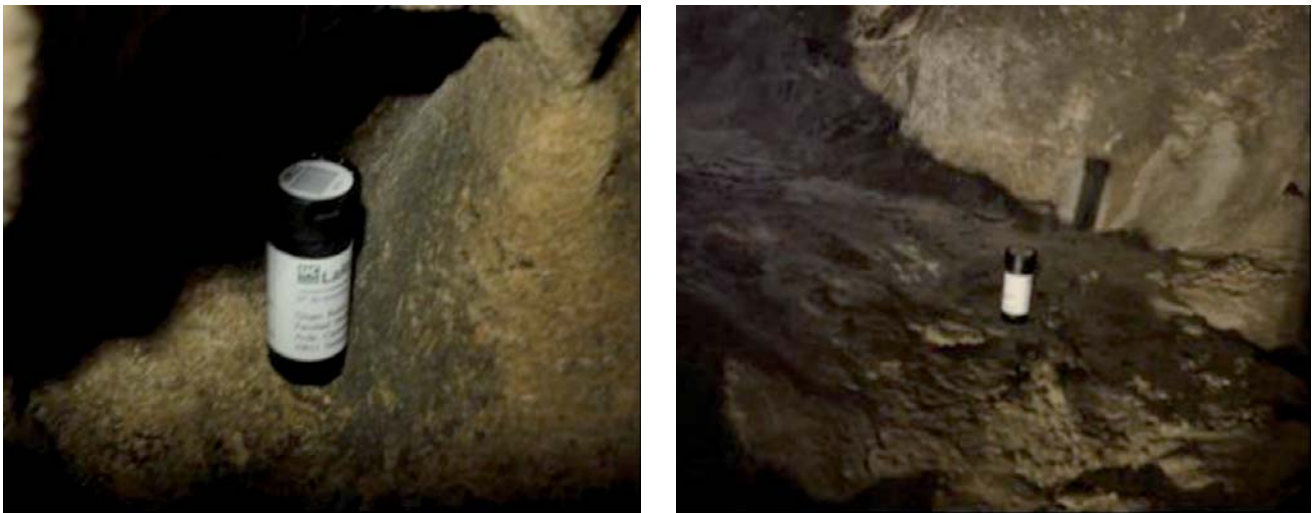


Figura 2. Fotografías de algunos detectores pasivos de Radón instalados en Cueva de las Ventanas.  
Fotos: W. Martín

Se estableció un protocolo de medida y toma de datos, que establecía de forma clara la fecha de instalación de los detectores, su retirada, sustitución y envío al laboratorio de la Universidad de Cantabria. Asimismo, se instaló un equipo de registro continuo *Radon Scout*, fabricado por la compañía SARAD (Fig. 3), que mide la concentración de radón por difusión, y que dispone de una cámara de medida con un detector de silicio. Puede medir concentraciones de radón en intervalos de tiempo de una o de tres horas. El equipo no estuvo operativo hasta finales del año, si bien se ha instalado para operar de forma permanente en la cavidad. La estimación de la dosis efectiva proveniente de la inhalación de radón se llevó a cabo a partir de la metodología recomendada por la comisión Internacional de protección radiológica (ICRP, 1993). La expresión analítica que permite determinar la dosis recibida por los trabajadores en unidades homogéneas es:

$$E = \frac{C_{Rn} \cdot F \cdot t \cdot DCF}{170 \cdot 3700}$$

donde

E es la dosis efectiva

$C_{Rn}$  es la concentración promedio (o de referencia) de radón, en  $Bq/m^3$

F es el Factor de equilibrio, con un valor de 0,5 para cuevas (Quindós et al., 2004)

T es tiempo de permanencia del trabajador en esas condiciones

DCF es el Factor de Conversión de Dosis, con un valor adoptado de 5 mSv/WLM

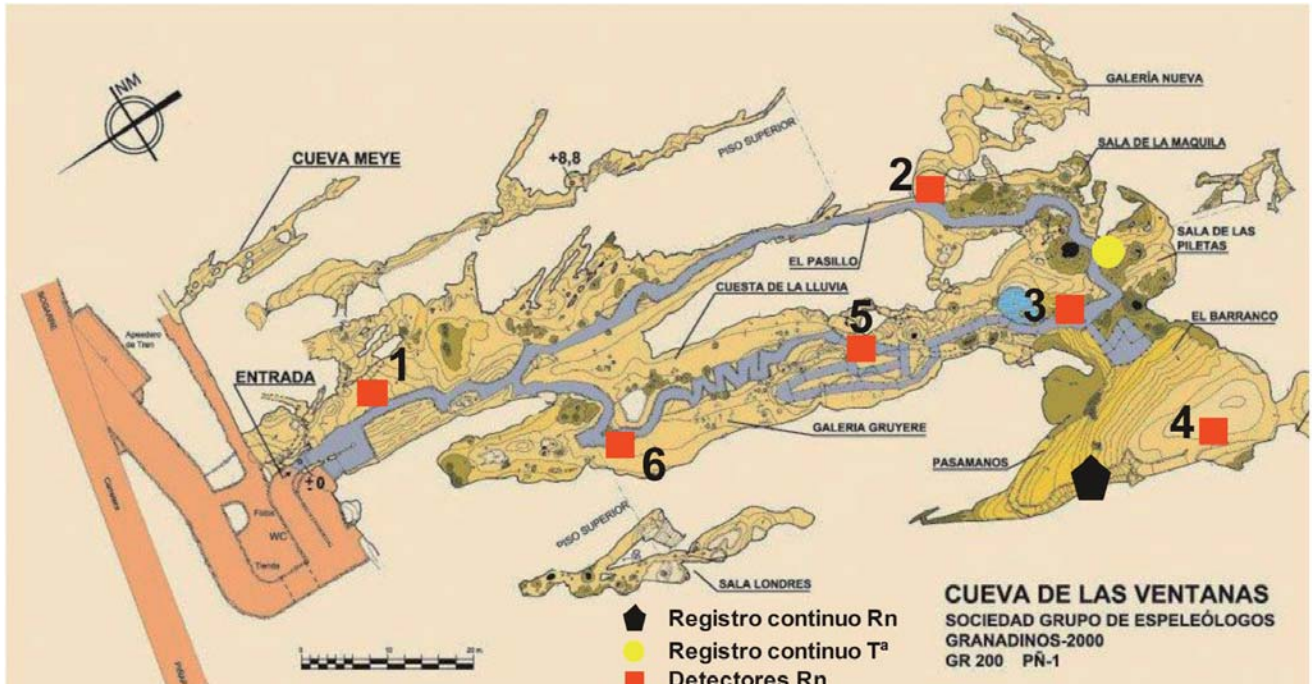


Figura 3. Parte superior: topografía en planta del recorrido turístico de la Cueva de las Ventanas, con indicación de la red de control operativa durante el año 2015. Base topográfica: Sociedad Grupo de Espeleólogos Granadinos (González-Ríos, 2004). Inferior izquierda: equipo de registro continuo Scout de la marca SARAD para medida de la concentración de gas radón en el aire (Fotografía: SARAD). Inferior derecha: equipo Scout de registro continuo de radón instalado en la Cueva de las Ventanas. (Fotografía: W. Martín)

## Resultados y discusión

### Aspectos geológicos de la cavidad y su entorno

La Cueva de las Ventanas, cuyos trabajos para su habilitación turística datan de 1996 (Ramírez-Trillo y González-Ríos, 2007) tiene un recorrido de 1.200 m, aunque el tramo turístico tiene una longitud de 550 m, y un desnivel de 37,5 m (González-Ríos, 2004). La visita a la cavidad



(Fig. 3) comienza por una amplia entrada en donde la influencia térmica del exterior es muy notable, debido a la gran amplitud de los tres accesos (de ahí el nombre de Cueva de las Ventanas). El siguiente sector donde las condiciones climáticas cambian sensiblemente y los visitantes efectúan nuevas paradas es al final de una galería de unos 30 m de longitud llamada *El Pasillo*, caracterizada por secciones de galerías relativamente estrechas. Una vez finalizado este tramo, y justo antes de iniciar el descenso al *Barranco* (no incluido en las visitas normales), se llega a un amplio sector, denominado *Las Piletas*. Desde ahí se continúa por galerías elevadas para descender y ascender nuevamente por los sectores de *Los Puentes* y *Cuesta de la Lluvia*, para llegar nuevamente a la salida, con lo que el tiempo invertido en la visita es de unos 50 minutos.

Las galerías inferiores interceptan el nivel freático, si bien desde hace tiempo sólo se pueden observar después de importantes episodios de lluvia. Fernández-Cortés (2004) sugiere una estrecha relación entre el descenso generalizado del nivel freático y la evolución geomorfológica de la cavidad.

Desde una perspectiva geológica, el sector se incluye en lo que ha venido denominándose como *Grupo Píñar* (Comas y García-Dueñas, 1986), un conjunto litológico de carácter olistotrómico constituido por una matriz margosa y brechoide con olistolitos carbonatados de gran volumen, en el límite entre las Unidades del Subbético Interno (Sierra Arana) y las del Subbético Medio Meridional. Uno de dichos olistolitos es precisamente el afloramiento carbonatado que alberga la cueva, situado inmediatamente al sur de la localidad de Píñar (Figura 4). Posee en planta una morfología alargada con 1.7 km de longitud y unos 300 metros de anchura, lo que supone una extensión aproximada de 0.5 km<sup>2</sup>. Los materiales que afloran al norte de la cavidad son fundamentalmente margas y margocalizas de edad cretácica.

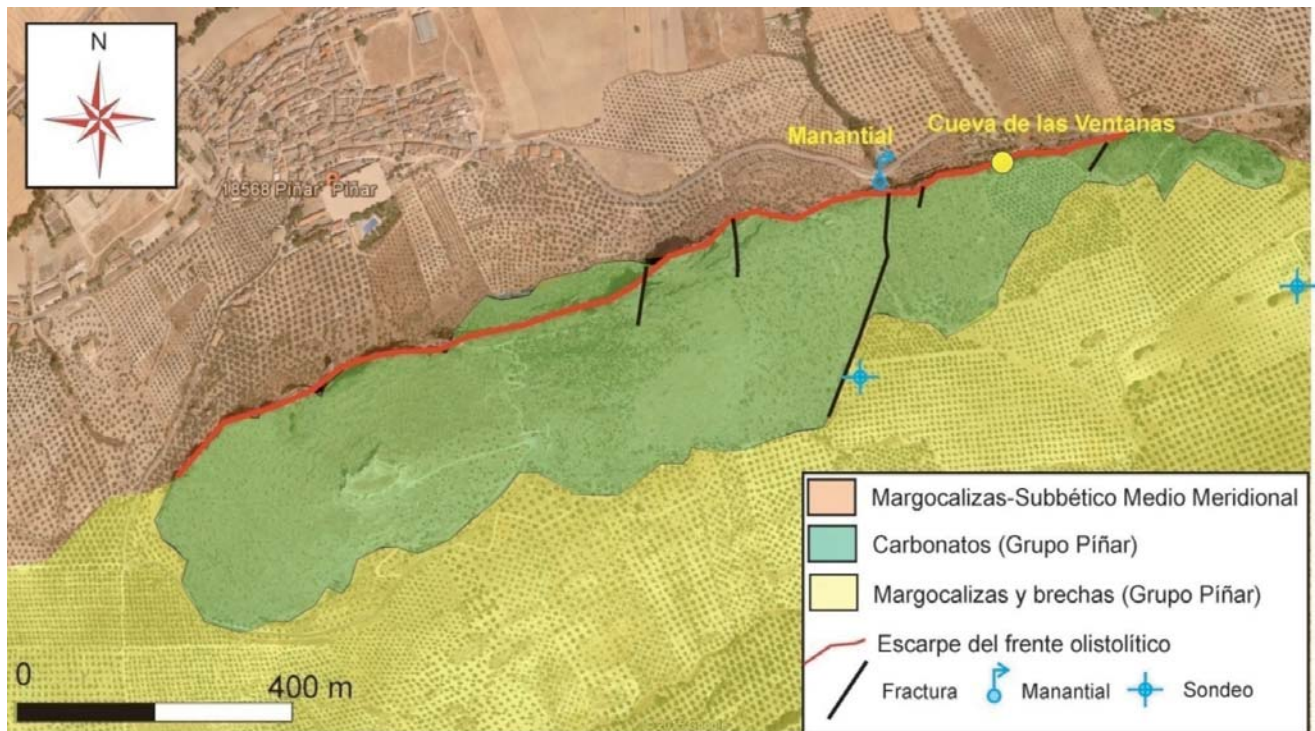


Figura 4. Esquema geológico del entorno de la Cueva de las Ventanas. Base fotográfica: Google Earth

Por su situación geológica y las rocas aflorantes, Píñar no debe a priori presentar valores excesivamente elevados de radón, según el mapa predictivo de exposición al radón elaborado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN, 2013). De hecho en la provincia de Granada sólo se recogen dos de las tres categorías que representan la probabilidad de que los niveles de radón en las viviendas superen un determinado valor, tal y como se muestra en la Figura 5, en la que se recogen los mapas predictivo y geológico. El municipio de Píñar, situado al norte de la provincia, se incluye íntegramente en el sector de categoría 0 (nivel bajo de exposición, con concentraciones inferiores a  $150 \text{ Bq m}^{-3}$ ).

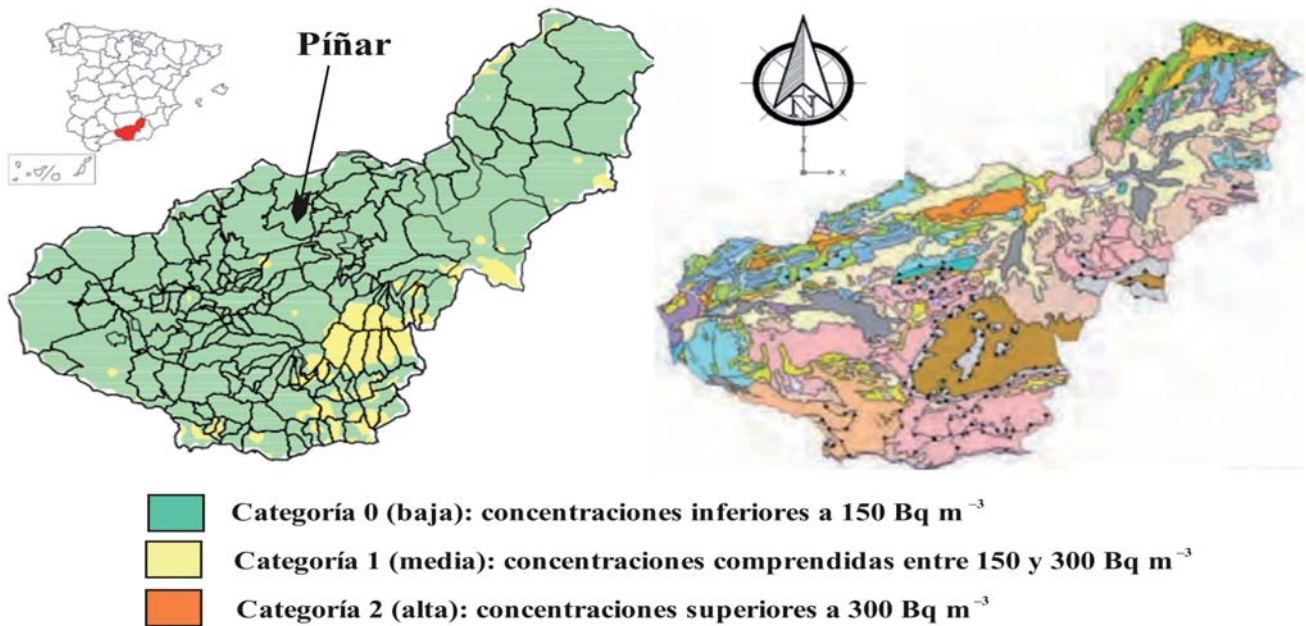


Figura 5. Extracto del Mapa predictivo de exposición al radón en España, correspondiente a la provincia de Granada, y mapa geológico provincial (CSN, 2013)

### **Concentración de Radón en aire**

Los resultados obtenidos durante el año 2015 se recogen en la Tabla 1, y, como cabía esperar, presentan valores de concentración de radón en aire muy bajos. En algunos casos (meses de enero y febrero) los valores registrados son casi inferiores a los límites de detectabilidad de los muestreadores utilizados ( $23 \text{ Bq m}^{-3}$ ). La variabilidad espacial no es elevada, con valores máximos de concentraciones de radón en las áreas más alejadas de la entrada, como es el sector de *El Barranco*, donde se instaló el detector nº 4 y cuyo valor promedio durante todo el periodo de registro fue  $94,8 \text{ Bq/m}^3$ . Los valores más bajos se registran en la sala de entrada, debido a su conexión con el exterior y condiciones favorables de ventilación. La concentración promedio registrada fue  $41,5 \text{ Bq/m}^3$ , aproximadamente la mitad que en el sector más interno registrado. Este aumento de la concentración de radón con la distancia desde la entrada es relativamente frecuente en cavidades con una sola entrada, como es el caso de la Cueva de las Ventanas. Esta circunstancia queda claramente de manifiesto En la Fig. 6, donde se recogen los valores promedio de cada sector muestreado en relación con su distancia en línea recta a la entrada. En la Figura se muestra además un ajuste a funciones lineal y logarítmica. Aunque la última de ellas arroja un mayor valor de coeficiente de correlación, parece más lógico el lineal, ya que



explica la concentración de radón en el exterior, que ha llegado a estimarse de forma puntual en valores comprendidos entre 30 y 45 Bq/m<sup>3</sup>.

Distancia entrada (m)	Sector muestreado y nº de detector en Fig. 3						Estadísticos	
	Sala Entrada 1	El Pasillo 2	Las Piletas 3	El Barranco 4	Galería Inferior 5	Cuesta de la Lluvia 6	Media	CV
		22,9	87,4	97,1	111,4	68,6	45,7	
<b>Enero</b>	26 <sup>(1)</sup> (5)	38 (5)	43 (5)	76 (5)	17 <sup>(1)</sup> (5)	30 (5)	<b>38,4</b>	<b>0,54</b>
<b>Febrero</b>	23 <sup>(1)</sup> (7)	17 <sup>(1)</sup> (7)	35 <sup>(1)</sup> (9)	29 <sup>(1)</sup> (8)	14 <sup>(1)</sup> (7)	32 (9)	<b>25,1</b>	<b>0,33</b>
<b>Marzo</b>	39 (6)	77 (9)	56 (12)	79 (9)	72 (9)	76 (9)	<b>66,5</b>	<b>0,24</b>
<b>Abril</b>	30 (4)	57 (6)	49 (5)	91 (9) 130	114(11)	91 (8)	<b>72,0</b>	<b>0,44</b>
<b>Mayo</b>	63 (27)	<b>(2)</b>	150 (13)	(12)	94 (10)	126 (12)	<b>112,6</b>	<b>0,30</b>
<b>Junio</b>	39 (5)	69 (7)	179 (15)	113 (10)	99 (9) 104	147 (12)	<b>107,7</b>	<b>0,47</b>
<b>Julio</b>	65 (9)	60 (10)	136 (12)	172 (15)	(11)	72 (10)	<b>101,5</b>	<b>0,44</b>
<b>Ago-sep</b>	32 (5)	54 (6)	99 (9)	145 (12)	108 (10)	61 (17)	<b>83,2</b>	<b>0,50</b>
<b>Octubre</b>	< LD	97 (9)	116 (10)	29 (5)	98 (9)	52 (6)	<b>78,4</b>	<b>0,46</b>
<b>Noviembre</b>	< LD	214(17)	87 (9)	104 (11)	111(12)	98 (10)	<b>122,8</b>	<b>0,42</b>
<b>Diciembre</b>	56 (7)	80 (9)	37 (6)	74 (9)	58 (8)	56 (8)	<b>60,2</b>	<b>0,25</b>
<b>Media</b>	<b>41,5</b>	<b>76,3</b>	<b>89,7</b>	<b>94,8</b>	<b>80,8</b>	<b>76,5</b>		
<b>Coef. Var.</b>	<b>0,39</b>	<b>0,70</b>	<b>0,56</b>	<b>0,47</b>	<b>0,45</b>	<b>0,48</b>		
<b>Máxima</b>	<b>65</b>	<b>214</b>	<b>179</b>	<b>172</b>	<b>114</b>	<b>147</b>		

Tabla 1. Resultados del muestreo de concentración de radón en aire (Bq/m<sup>3</sup>) en cada sector considerado en la Cueva de las Ventanas durante el año 2015 y expresión de la incertidumbre asociada (entre paréntesis, a la derecha de cada valor). El nº de cada detector es el recogido en la Fig. 3. (1): valores muy próximos al límite de detectabilidad del detector. (2): desaparecido. <LD: valor por debajo del límite de detectabilidad

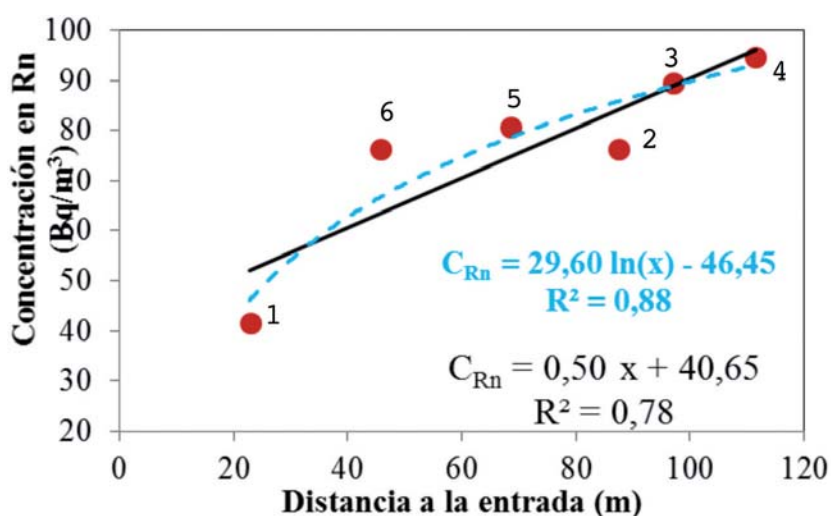


Figura 6. Representación gráfica de la concentración promedio de radón en aire registrada durante 2015 en cada uno de los 6 detectores instalados en la Cueva de las Ventanas, en función de su distancia a la entrada. Se incluyen sendos ajustes lineales (línea de color negro) y logarítmico (línea azul)

Los resultados recogidos en la Tabla 1 se muestran de forma gráfica en la Figura 7, verificándose la variabilidad temporal de la concentración de radón es más marcada que la espacial antes descrita. Así, la concentración es mínima durante el periodo invernal (diciembre a marzo), con valores incluso por debajo de los límites de detectabilidad. Además, durante este periodo, tal y como sugiere el diagrama de cajas o *box plot* de la Fig.7, los valores registrados durante este periodo son muy parecidos en toda la cavidad.

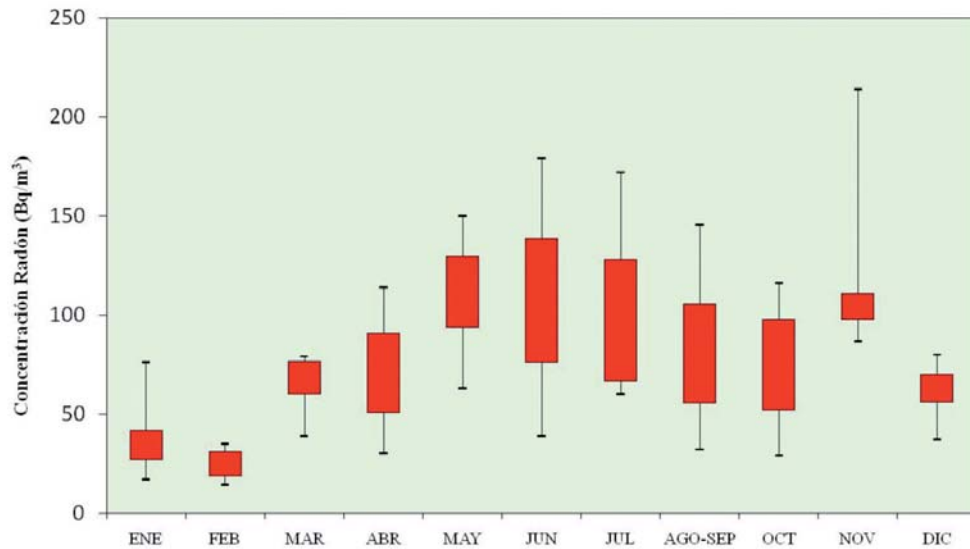


Figura 7. Diagrama box plot (máximo, mínimo y cuartiles 1º y 3º), relativo a la evolución mensual de la concentración de radón en aire medida en la Cueva de las Ventanas durante el año 2015

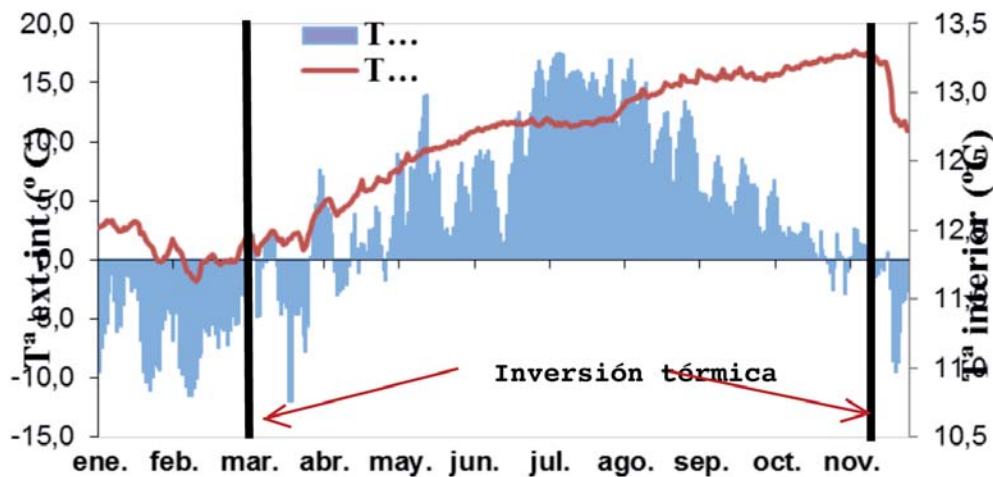


Figura 8. Evolución de la temperatura del aire de la Cueva de las Ventanas y de las diferencias de entre la temperatura exterior e interior, durante el año 2015

Al final del invierno los valores de concentración de radón tienden a aumentar hasta alcanzar los máximos en junio y julio, para descender paulatinamente durante el otoño e invierno. La explicación a este comportamiento podría residir en la temperatura del exterior. En los meses de invierno, el aire frío y denso penetra en el interior de la cavidad, disminuyendo rápidamente la temperatura de los sectores próximos a la entrada. Durante la primavera, y concretamente a

partir de marzo, se produce un fenómeno de inversión térmica, de modo que la temperatura exterior llega a superar a la del interior (Fig. 8), aumentando la concentración de radón hasta alcanzar máximos en junio y julio, coincidiendo con las temperaturas más elevadas en el exterior. La concentración de radón desciende paulatinamente a partir de este periodo junto con la temperatura exterior si bien la del interior sigue aumentando hasta que de nuevo se produce una inversión térmica a finales de noviembre, disminuyendo así la temperatura de la cueva y junto a ella la concentración de radón.

No obstante, noviembre presenta una anomalía a este patrón descrito, con valores sensiblemente superiores al resto, y con una variabilidad espacial elevada. De hecho, en este mes los detectores registraron los valores máximos de todo el periodo de registro, con concentraciones de radón en aire superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup> en *El Pasillo* (detector nº 2). También superaron 100 Bq/m<sup>3</sup> en este mes los detectores 4 y 5, situados en *El Barranco* y la *Galería Inferior*, respectivamente. La razón estriba en fluctuaciones climatológicas anómalas durante el mes de noviembre en el exterior, uno de los más cálidos desde 1961, según indica la Agencia Estatal de Meteorología. Además, durante el día 21 se produjo una caída brusca de la temperatura de 12 °C, coincidiendo con variaciones bruscas de la presión, lo que pudo haber provocado cambios puntuales en las condiciones de ventilación de la cavidad, tal y como se muestra en la Figura 9, en donde se muestran datos diarios de concentración de radón medidos en el equipo de registro continuo Scout-SARAD.

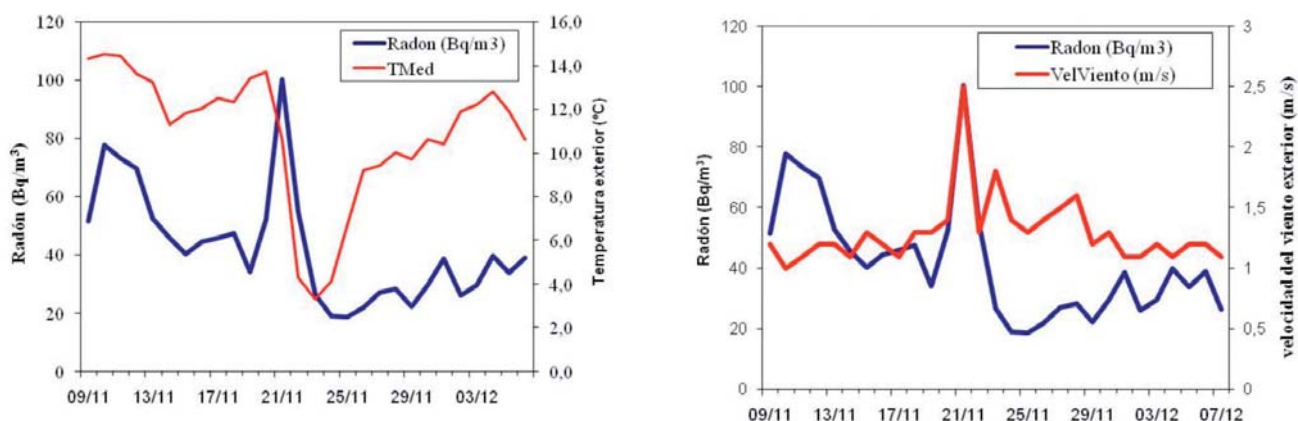


Figura 9. Datos diarios de concentración de radón recogidos en el equipo SARAD de registro continuo, así como los datos de temperatura media del exterior (izquierda) y velocidad del viento (derecha) registrados en la estación de Iznalloz

### Estimación de las dosis efectivas

Como se indicó con anterioridad, los visitantes realizan un recorrido de 45 o 50 minutos de duración, y de forma muy puntual en el tiempo, por lo que el riesgo de exposición, con los valores de concentración en radón estimados, es prácticamente despreciable. Por ello, la estimación de dosis efectivas se ha limitado exclusivamente al personal que trabaja en calidad de guía (o labores de mantenimiento) y que por lo tanto, entra de forma más o menos regular en la cavidad. Aunque el tiempo de recorrido es de unos 50 minutos, en los cálculos se ha consi-

derado un tiempo de permanencia de 60 minutos, con el objeto de aportar un cierto margen de seguridad en los resultados. Según los datos facilitados por el Excmo. Ayto. de Píñar, no hay guías fijos/as en la cueva. Existe una bolsa de trabajo de unas 30 personas, de entre las que se seleccionan 6 según el orden de inscripción, y van rotándose cada 6 meses. Por tanto son 12 los/as guías contratados/as anualmente, y por tanto ninguno/a realiza la función de guía más de 6 meses al año. Según los listados de tiempo de permanencia del personal en la cueva durante el año 2015, ninguno/a de los empleados/as ha entrado más de 49 horas al mes (casi nunca 4 veces al día), por lo que los tiempos de permanencia en la cavidad son muy reducidos. Aún así, se ha considerado un tiempo de permanencia de 50 horas por mes durante los 12 meses del año, lo que supone un total de 600 horas, aumentando así notablemente el margen de seguridad antes mencionado.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	A-S <sup>(1)</sup>	Oct	Nov	Dic	Total
<b>(1)</b>	0,015	0,007	0,016	0,023	0,030	0,036	0,034	0,058	0,023	0,043	0,016	<b>0,299</b>
<b>(2)</b>	0,008	0,005	0,013	0,014	0,022	0,021	0,020	0,033	0,016	0,024	0,012	<b>0,189</b>

*Tabla 2. Dosis recibidas por los trabajadores de la Cueva de las Ventanas (mSv), considerando valores máximos de concentración de radón en aire (fila 1) y concentraciones promedio de radón en aire (fila 2). (1): en el periodo agosto-septiembre se consideran 100 horas de exposición*

En la tabla 3 se muestra el resultado de la estimación de las dosis recibidas cada mes, así como del total recibida por año. Las estimaciones dosimétricas están referidas a los valores máximos de concentración de radón registrada en la cavidad durante cada mes (fila superior de la tabla), así como valores promedio de concentración (fila inferior). Las dosis anuales totales calculadas en ambos casos han sido 0,299 mSv y 0,189 mSv, respectivamente, muy por debajo de los 6 mSv recogidos en la Instrucción IS-33.

## Conclusiones

El primer registro de concentración de radón en aire realizado en la Cueva de las Ventanas muestra valores muy bajos, con un promedio anual de  $78,9 \pm 5,5$  Bq/m<sup>3</sup>, y valores mínimos por debajo del límite de detectabilidad de los muestreadores, mientras que los valores máximos se sitúan por encima de 200 Bq/m<sup>3</sup>. Estos resultados son coherentes con los previstos en el mapa predictivo de exposición al radón elaborado por el Consejo de Seguridad Nuclear, que sugiere para este sector valores inferiores a 150 Bq/m<sup>3</sup>.

La variabilidad espacial de las concentraciones registradas no es muy elevada, si bien se aprecia claramente un incremento positivo hacia los sectores más alejados de la entrada. La variabilidad temporal parece estar estrechamente ligada a las condiciones climáticas externas, y muy especialmente con la temperatura y que se constatan variaciones de la concentración de radón coincidentes en el tiempo con las fluctuaciones térmicas del exterior.

Los bajos valores de concentración registrados parecen sugerir asimismo una elevada tasa de ventilación de la cueva, que unido al reducido periodo de tiempo de permanencia de los trabajadores en la cavidad explica las reducidas dosis recibidas, muy inferiores a los límites establecidos por la normativa española vigente.

## Referencias

- BOE nº 22, 2012. Boletín Oficial del Estado, Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, *del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural*.
- Comas, M.C. y García-Dueñas, V. 1986. *Memoria del Mapa Geológico de España E. 1:50.000, Moreda (Hoja nº 992)*. Segunda Serie, ITGE, 51 p.
- CSN (2013). *El mapa predictivo de exposición al radón en España. Colección Informes Técnicos*, 38-2013. Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid, 99 p.
- Del Rosal, Y., Garrido, A., Montesino, A. y Liñán, C. 2010. Estudios del radón en la Cueva de Nerja (Málaga). In: J.J. Durán y F. Carrasco (eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 183-192.
- Fernández, P.L., Gutiérrez, I., Quindós, L.S., Soto, J. y Villar, E. 1986. Natural ventilation of the Paintings Room in the Altamira Cave. *Nature*, 321, 586-588.
- Fernández-Cortés, A. 2004. *Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico*. Tesis Doctoral Universidad de Almería, 425 pp.
- Field, M.S. 2007. Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing alpha radiation from Rn-222 decay in caves. *Journal of Cave and Karst Studies* 69 (1), 207-228.
- González-Ríos, M.J. 2004. *La cueva de las Ventanas y otras cavidades del término municipal de Píñar (Granada)*. Sociedad Grupo de Espeleólogos Granadinos, Granada, 94 p.
- ICRP 1993. *Protection against Radon-222 at home and at work*. International Commission on Radiological Protection Publication 65 (ICRP), Annals of the ICRP 23 (2) Pergamon Press, Oxford.
- Liñán-Baena, C., del Rosal- Padial, Y. y Carrasco-Cantos, F. 2014. Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España). In: Calaforra, J.M. y Durán, J.J. (eds.), *Iberoamérica subterránea*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 229-238.
- Quindós, L., Fernández, P., Sainz, C., Gómez-Arozamena, J., Bordonaba, M. 2004. Radon exposure in uranium mining industry vs. exposure in tourist caves. *Radiation Protection Dosimetry*, 111, 41-44.
- Quindós, L.S., Sainz, C., Fuente, I., Gutierrez-Villanueva, J.L., González-Diez, A. 2013. The use of radon as tracer in environmental sciences. *Acta Geophysica*, 61 (4), 848-858.
- Quindós, L., Quindós, L.S., Fuente, I., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M. y Benavente-Herrera, J. 2014. Contenido de radón en aire en la Gruta de las Maravillas (Aracena). Primeros resultados. In: Calaforra, J.M. y Durán, J.J. (eds.), *Iberoamérica subterránea*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 283-293.
- Ramírez-Trillo, F. y González-Ríos, M.J. 2007. Cueva de las Ventanas (Píñar, Granada). Criterios para su habilitación y resultados tras cinco años de gestión. In: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (eds.), *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, IGME, Madrid, 81-92.



Sánchez-Martos, F., Calaforra, J.M., Fernández-Cortés, A. y González-Ríos, M.J. 2003. La temperatura del aire en la Cueva de las Ventanas (Píñar, Granada) y su relación con el uso turístico de la cavidad. In: I. Rábano, I. Manteca y C. García (eds.), *Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional*, IGME, Madrid, 585-592.



Dumitru, O. A. *et al.* Evaluación de las concentraciones de radón y su variabilidad estacional en cuevas turísticas de Mallorca. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 157-168.

## Evaluación de las concentraciones de radón y su variabilidad estacional en cuevas turísticas de Mallorca

O. A. Dumitru<sup>(1, 3)</sup>, B. P. Onac<sup>(1)</sup>, J. J. Fornós<sup>(2)</sup>, C. Cosma<sup>(3)†</sup>, A. Ginés<sup>(2)</sup> y J. Ginés<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> School of Geosciences, University of South Florida, 4202 E. Fowler Ave., NES 107, Tampa, USA, odumitru@mail.usf.edu, bonac@usf.edu.

<sup>(2)</sup> Grup de Ciències de la Terra (Geologia i Paleontologia "Guillem Colom"), Department de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Ctra. Valldemossa km 7.5, 07122 Palma de Mallorca, joan.fornos@uib.es, agines.gracia@yahoo.es, jginesgracia@yahoo.es.

<sup>(3)</sup> Environmental Radioactivity and Nuclear Dating Center, Babeş-Bolyai University, Fântânele 30, 400294 Cluj-Napoca, Rumania.  
† fallecido

---

### RESUMEN

En este trabajo, cuyo contenido resume dos aportaciones previamente publicadas por los mismos autores, se presenta una primera evaluación de las concentraciones de radón en tres cuevas turísticas de Mallorca (Coves de Campanet, Coves d'Artà y Coves del Drac) con vistas a identificar posibles localidades que representen riesgo para la salud. Las mediciones de radón se han realizado a lo largo de tres campañas diferentes, entre marzo de 2013 y marzo de 2014, utilizando detectores sólidos de trazas nucleares. Las concentraciones de radón difieren marcadamente de una cueva a otra, así como dentro de una misma cavidad, abarcando desde concentraciones inferiores al límite de detección hasta valores de 1972 Bq·m<sup>-3</sup>. En la mayoría de localidades investigadas se evidencia una clara variabilidad estacional, con valores elevados durante la estación cálida y concentraciones más bajas durante el invierno. Independientemente de la estación, se han registrado valores más elevados que los límites de referencia en las Coves de Campanet, los cuales varían entre 515 y 1972 Bq·m<sup>-3</sup>. Estos resultados han sido confirmados por la monitorización del radón en continuo efectuada en dos localizaciones seleccionadas dentro de esta cueva, donde fueron medidas concentraciones medias de 1745 Bq·m<sup>-3</sup> y 1096 Bq·m<sup>-3</sup>, respectivamente. La dosis efectiva a la cual están expuestos los guías de la cueva se sitúa entre 0.72 y 1.89 mSv·y<sup>-1</sup> con una dosis anual de 1.23 mSv·y<sup>-1</sup>; como consecuencia de estos datos, un conjunto de recomendaciones les fueron aportadas a los gestores de las Coves de Campanet, con la intención de minimizar los riesgos radiológicos. Los resultados obtenidos en las Coves d'Artà muestran valores muy por debajo de los niveles de referencia (entre 13 y 118 Bq·m<sup>-3</sup>) durante todo el año, de tal forma que no es necesario implementar ninguna medida de protección radiológica. Con respecto a las Coves del Drac, se realizaron mediciones de radón a lo largo del recorrido turístico histórico, que actualmente no forma parte de la zona turística de la cueva. En base a los resultados obtenidos en las Coves del Drac (concentraciones de hasta 715 Bq·m<sup>-3</sup>), nuestra recomendación es que cualquier trabajo científico a desarrollar en los sectores conocidos como Cova Blanca y Cova Negra debe ser de duración limitada (menos de 20 horas/mes), ya que puede suponer un riesgo para la salud.

**Palabras clave:** cuevas turísticas, exposición radiológica, Mallorca, radón, riesgo salud.

## Assessment of radon concentration level and its seasonal variation in show caves from Mallorca

### ABSTRACT

Here we present a first survey of radon-level distribution in three show caves from Mallorca (Coves de Campanet, Coves d'Artà and Coves del Drac) in order to identify possible areas presenting health risks. This manuscript summarizes

two previous published papers by the same authors. The radon measurements were performed during three different campaigns between March 2013 and March 2014, using solid state nuclear track detectors. Radon concentrations differ markedly from one cave to another, as well as within each cave, ranging from below detection limit up to  $1972 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . At most measurement sites a clear seasonal variability, with higher values during the warm season and lower during winter is evident. Regardless the season, higher than reference limit values were recorded in Coves de Campanet, varying between 515 and  $1972 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . These results were confirmed by continuous radon monitoring in two selected locations within the cave, where we measured average concentrations of  $1745 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $1096 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. The effective dose tour guides are exposed to, ranges from 0.72 to  $1.89 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$  with an annual dose of  $1.23 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ . Thus, a set of recommendations was provided to the Campanet cave manager. Since all the results in Coves d'Artà show values well below the recommended reference level (between 13 and  $118 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) throughout the year, no protection against radiological hazards is required to be implemented. With respect to Coves del Drac, radon measurements were carried out along the historical tour route that presently is in the non-touristic part of the cave. Based on the results obtained in Coves del Drac (up to  $715 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ), our recommendation is that any scientific work carried out in the sectors known as Cova Blanca and Cova Negra should be time-limited during summer (less than 20 hours/month), as it could pose a health risk.

**Keywords:** health hazard, Mallorca, radiological exposure, radon, show caves.

## Introducción

El radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) representa la mayor fuente natural de radiación ionizante. Sobre la base de estudios epidemiológicos, la exposición prolongada al radón y su progenie (polonio, bismuto e isótopos del plomo) es considerada la segunda causa de cáncer de pulmón tras el tabaco (Darby *et al.*, 2006; Synnott y Fenton, 2005; Alberigi *et al.*, 2011). La investigación relacionada con la exposición al radón está principalmente dedicada a estudiar su acumulación en los lugares donde la gente pasa la mayor parte de su tiempo: las viviendas y los lugares de trabajo. Resulta de particular importancia el patrón de las circulaciones de aire, las cuales contribuyen significativamente a la disipación o acumulación de este gas radioactivo. En los espacios bien ventilados el radón es liberado hacia la atmósfera, de tal forma que su concentración cae hasta niveles insignificantes. Sin embargo, cuando queda atrapado en espacios cerrados, con aire estancado, tales como las minas y las cuevas, puede alcanzar concentraciones nocivas (Cigna, 2005; Thinová *et al.*, 2005; Lario *et al.*, 2005; Field, 2007; Dumitru *et al.*, 2015a). La concentración de radón en lugares de trabajo subterráneos, como son las cuevas, ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial durante las últimas dos décadas, con el propósito de evaluar los riesgos radiológicos a los que están expuestos los trabajadores así como los visitantes ocasionales (Pinza-Molina *et al.*, 1999; Cigna, 2005; Aytakin *et al.*, 2006; Lario *et al.*, 2005; Field, 2007; Sainz *et al.*, 2007; Alberigi *et al.*, 2011; Somlai *et al.*, 2011). Los resultados de una investigación llevada a cabo en 36 países por la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan a todas las naciones rebajar sus niveles de referencia a  $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  (Zeeb y Shannoun, 2009).

Las personas más expuestas a los riesgos relacionados con la radiación son los guías que conducen grupos de turistas, así como otros trabajadores del subsuelo (conductores de metro, electricistas, trabajadores de mantenimiento, vendedores de souvenirs, etc.) que pasan la mayor parte de sus jornadas de trabajo bajo tierra (Field, 2007; Alberigi *et al.*, 2011). Desafortunadamente, no existen remedios eficaces que puedan ser usados para prevenir tales situaciones. Por lo tanto, el único modo de reducir la exposición al radón consiste en aplicar

restricciones en términos de tiempo de permanencia en las cuevas o ambientes subterráneos (Sainz *et al.*, 2007).

Aunque en la isla de Mallorca se conocen actualmente más de 2000 cuevas, cinco de ellas abiertas al turismo (Ginés y Ginés, 2011), con la excepción de Dumitru *et al.* (2015a, b) no hay disponible ninguna otra información sobre sus niveles de radiación. El objetivo de nuestra investigación ha sido realizar una primera evaluación de las concentraciones de radón en las cuevas turísticas de Mallorca (Coves de Campanet, Coves d'Artà y Coves del Drac; Figura 1a), efectuando mediciones integradas del radón. Nuestro estudio identifica posibles áreas con altas concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$ , y señala aquéllas que representan riesgos para la salud. En consecuencia, esperamos que estos resultados sean de gran interés para los gestores de las cuevas investigadas. Este trabajo supone una versión resumida de dos estudios previamente publicados por Dumitru *et al.* (2015a, b).

## **Descripción de las cuevas**

### ***Coves de Campanet***

Se trata de una cueva no demasiado extensa (~400 m) y ricamente decorada que se encuentra desarrollada en rocas dolomíticas del Triásico superior (Ginés, 2016). La cueva está compuesta por dos grandes salas cercanas a la entrada (Sala Romàntica y Sala de la Palmera) y un sistema de galerías estrechas y de techo bajo, que con una orientación NW conducen a una tercera sala espaciosa (Sala del Llac). Esta estancia es un cul-de-sac que se halla situado a una altura ligeramente elevada en comparación con el resto de la cavidad, y en ella la temperatura permanece constante a lo largo del año. La cueva tiene una salida de emergencia en la parte más elevada del extremo sur de la Sala Romàntica. Ocho detectores fueron colocados a lo largo del recorrido turístico (Figura 1b).

### ***Coves d'Artà***

Anteriormente era conocida como Cova de s'Ermita, siendo la cueva natural cuya explotación turística a lo largo del siglo XIX es la más antigua de la isla (Ginés y Ginés, 2011). Con una impresionante entrada que se abre sobre el mar Mediterráneo, la cavidad está situada en el extremo nordeste de Mallorca y se desarrolla en calizas del Jurásico superior. La longitud total de sus galerías y grandes salas es de ~800 m, todas ellas exuberantemente decoradas con espeleotemas de grandes dimensiones. Se situaron diez detectores distribuidos por toda la ruta turística que se utiliza para la visita de la cueva, cuyo recorrido presenta fuertes variaciones de cota entre las distintas salas (Figura 1c).

### ***Coves del Drac***

El sector turístico de las Coves del Drac (incluyendo el gran Lago Martel) es la cueva más visitada en Europa y ha sido explotada para el turismo desde 1898, con una intensidad creciente



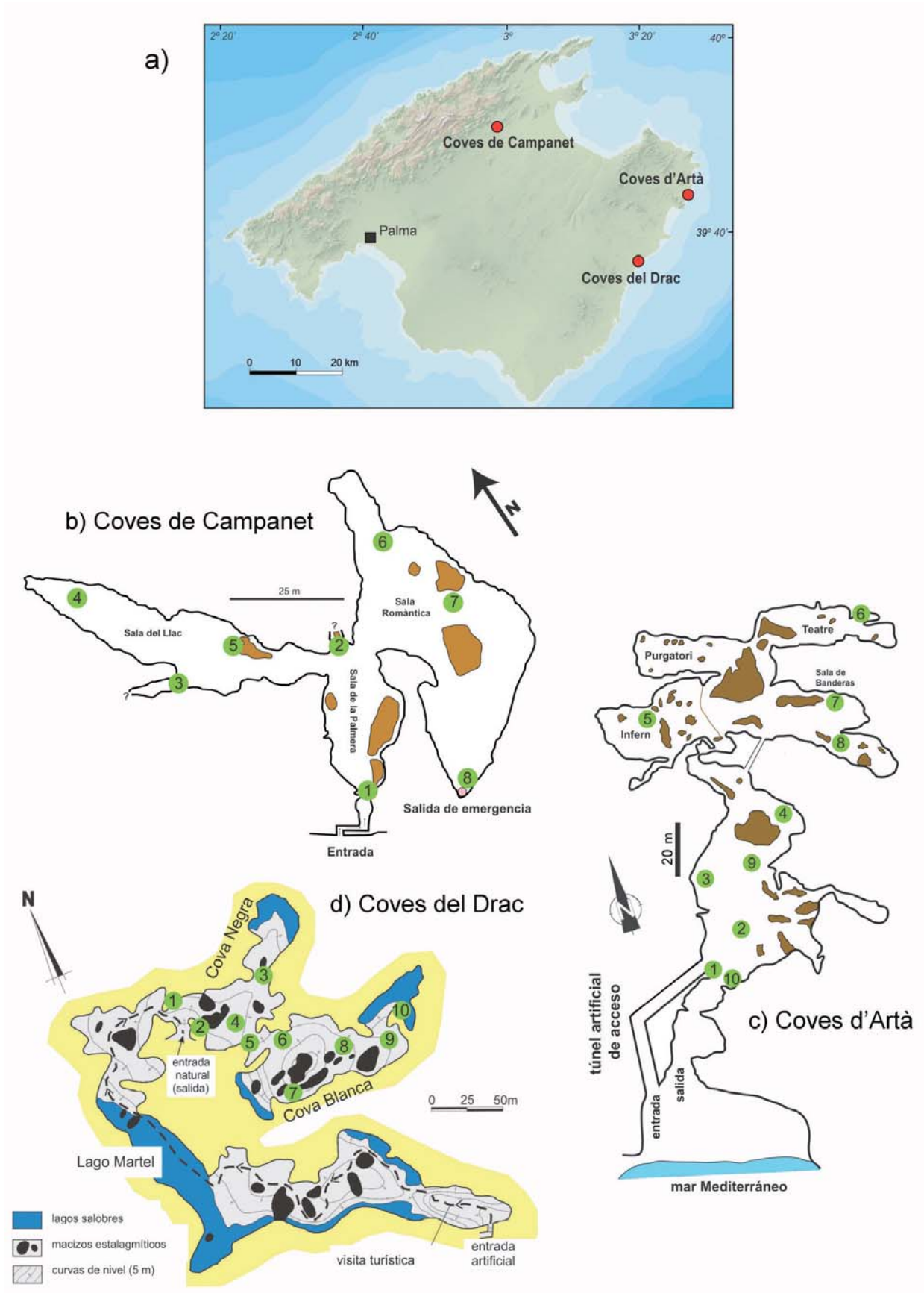


Figura 1. a) Mapa de la isla de Mallorca con la situación de las cuevas investigadas; b-d) topografías de las cuevas y localización de los detectores

a partir de las primeras décadas del siglo XX (Ginés y Ginés, 2011). Esta famosa caverna está localizada en la costa oriental de la isla y se desarrolla en materiales carbonatados del Mioceno superior. Diez detectores de radón fueron situados a lo largo de la ruta histórica que comprende los sectores conocidos como Cova Negra y Cova Blanca. Estos sectores están en la actualidad desligados de la visita turística actual (Figura 1d), y no resultan afectados por la ventilación artificial que suplementa el flujo natural de aire existente en la parte visitada de las Coves del Drac. En la actualidad, la ruta histórica es objeto de interés para un limitado número de científicos que están llevando a cabo varios tipos de investigaciones en esta cavidad.

## **Mediciones de radón**

Las concentraciones de radón fueron medidas utilizando detectores sólidos de trazas nucleares CR-39, tipo RSKS, manufacturados por RadoSys Ltd. (Hungría). El detector de trazas nucleares consiste en un recipiente cilíndrico de plástico provisto de una tapa adecuada, en el interior del cual está adherido el chip CR-39. Las partículas alfa que se originan desde el radón y su progenie dejan trazas negras en el chip. Con la intención de registrar el nivel de fondo, se emplazaron detectores en el exterior de cada cueva durante el mismo período de tiempo. Después de la exposición, los detectores fueron recogidos en sus respectivas bolsas protectoras del radón, y enviadas al laboratorio de Radioactividad Ambiental y Centro de Datación Nuclear, Universidad Babeş-Bolyai, Cluj (Rumania), para su grabación y evaluación de los datos. La técnica experimental usando el material de RadoSys siguió el mismo protocolo descrito en otros trabajos (Sainz *et al.*, 2007; Cosma *et al.*, 2009). La concentración de  $^{222}\text{Rn}$  fue obtenida directamente a partir de la densidad de trazas empleando la misma fórmula publicada en Dumitru *et al.* (2015a).

La situación y distancia entre los detectores fueron escogidas cuidadosamente con la idea de registrar lo mejor posible el patrón de los niveles de radón. Tres períodos de exposición fueron seleccionados a lo largo de todo un año natural (marzo 2013-marzo 2014), teniendo en consideración el particular clima mediterráneo de Mallorca. Convencionalmente, las estaciones consideradas han sido las siguientes: primavera (marzo-junio 2013), verano (julio-octubre 2013), e invierno (noviembre 2013-marzo 2014).

## **Estimación de las dosis efectivas anuales**

En vistas a los posibles riesgos para la salud causados por la inhalación de radón y su progenie, las dosis efectivas anuales han sido estimadas usando la ecuación de Papachristodoulou *et al.* (2004). Las dosis no fueron calculadas para las Coves d'Artà puesto que los valores medidos de radón fueron muy bajos. Ha sido empleado un valor de 0,57 como factor de equilibrio entre el radón y su progenie, tal como fue calculado por Cigna (2005) en base a más de 880 datos registrados en cuevas del mundo entero. Nuestra evaluación tiene en consideración de forma precisa los tiempos de exposición estimados del personal laboral de las cuevas, integrando cuidadosamente el número máximo de horas por mes de permanencia dentro de cada cueva tanto de trabajadores como de personas que realizan actividades de investigación o exploración.

## Resultados y discusión

En las cuevas la concentración de radón depende principalmente del contenido en uranio de la roca de caja, de la morfología de la cueva y su ventilación, así como de las condiciones atmosféricas en el exterior. De entre todos estos factores, el régimen de ventilación es un control crucial. Debido a estos condicionantes, las concentraciones de radón son susceptibles de diferir significativamente entre diferentes cavidades e incluso dentro de la misma cueva. Los niveles de radón en ambientes subterráneos están usualmente caracterizados por amplias variaciones temporales, tal como se detalla a continuación.

### Coves de Campanet

Los datos obtenidos en las Coves de Campanet durante las tres estaciones consideradas aparecen representados en la Figura 2 y, como era de esperar, se observa una marcada variabilidad estacional, registrándose los valores más elevados de  $^{222}\text{Rn}$  durante los meses de primavera y verano. En general, valores bastante superiores al límite operativo de  $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  fueron registrados en todas las ubicaciones evaluadas dentro de la cavidad. Asimismo, se observa claramente que la concentración de radón sigue un patrón similar de distribución a todo lo largo de la cueva, con independencia de la estación dentro del ciclo anual. Los valores más bajos son siempre característicos de las localizaciones más ventiladas (1, 2, 6-8), mientras los valores más elevados se registraron en pasajes con aire relativamente estancado, todos ellos dentro de la Sala del Llac (detectores 3-5, Figura 2). La acumulación de radón en este sector de la cueva puede estar relacionada con su particular morfología; la Sala del Llac está situada ligeramente más elevada en comparación con el resto de la cavidad, de tal manera que la circulación del aire está bastante restringida en este sector.

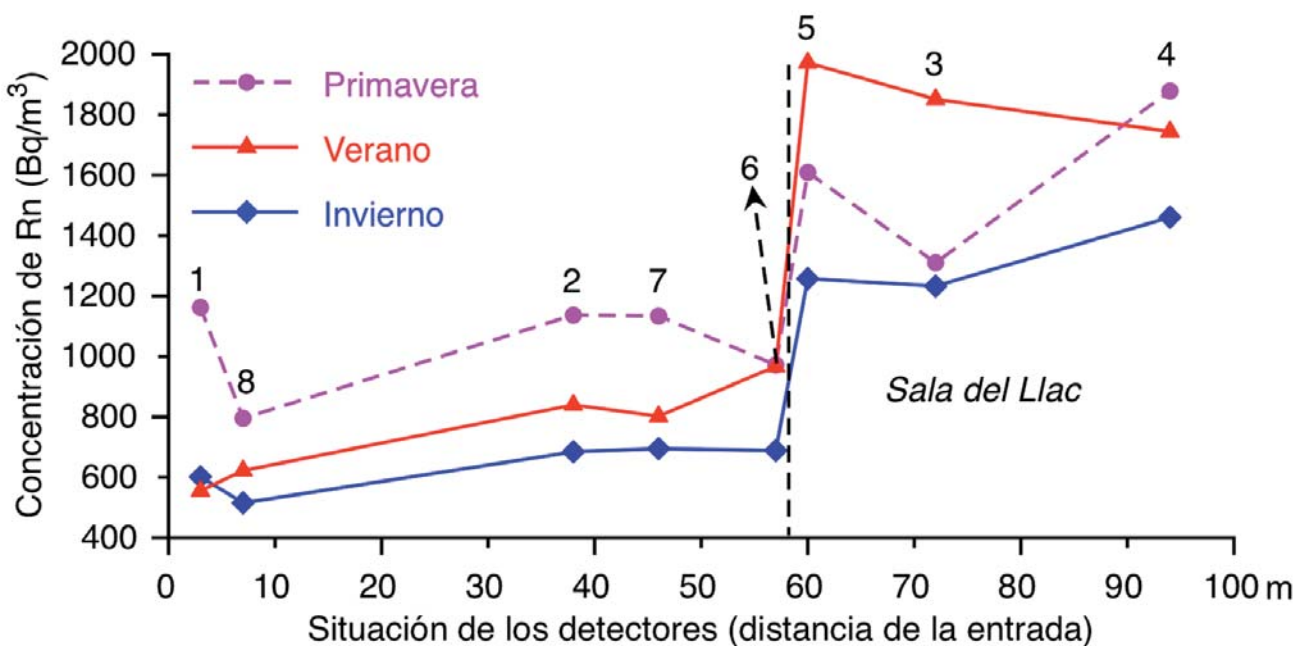


Figura 2. Variación estacional de la concentración de radón en las Coves de Campanet

Considerando el patrón de las galerías y su morfología, así como el comportamiento térmico de las salas más cercanas a la entrada, y usando la clasificación de ventilación propuesta por Racoviță (1975), una circulación permanente bidireccional es la que más se ajusta al caso de esta cueva. De acuerdo con este modelo, durante el invierno, el aire exterior frío y pesado penetra en la cueva cerca de su pavimento, empujando el aire menos denso y más cálido, rico en radón, a lo largo del techo de la cavidad formando una especie de célula de convección. Este tipo de ventilación da lugar a niveles más bajos de radón en toda la cueva durante el invierno, en comparación con los niveles más elevados en primavera y verano. De hecho, en verano la circulación del aire se invierte provocando una ventilación muy pobre. En suma, la circulación eficiente del aire se limita a las salas más cercanas a la entrada de la cueva, causando bajas concentraciones de radón en ellas, y promoviendo en cambio una acumulación significativa en las zonas más interiores de la cavidad.

Los valores resultantes de las mediciones integradas fueron confirmados por una monitorización continua en dos localizaciones seleccionadas, y la dosis efectiva recibida por los guías fue calculada y publicada en su momento (Dumitru *et al.*, 2015b). Dependiendo de la localización dentro de la cueva, los valores obtenidos varían entre 0,72 y 1,89 mSv·y<sup>-1</sup> (media anual: 1,23 mSv·y<sup>-1</sup>), con los valores más elevados correspondientes a tres de las localizaciones monitorizadas dentro de la Sala del Llac. Es importante señalar que los trabajadores que soportan una dosis anual superior a 1 mSv·y<sup>-1</sup> han de ser considerados como laboralmente expuestos a la radiación (Gruber *et al.*, 2014).

### Coves d'Artà

Los datos recolectados usando detectores de trazas en diferentes localizaciones dentro de las Coves d'Artà aparecen representados en la Figura 3. Las concentraciones medias anuales en

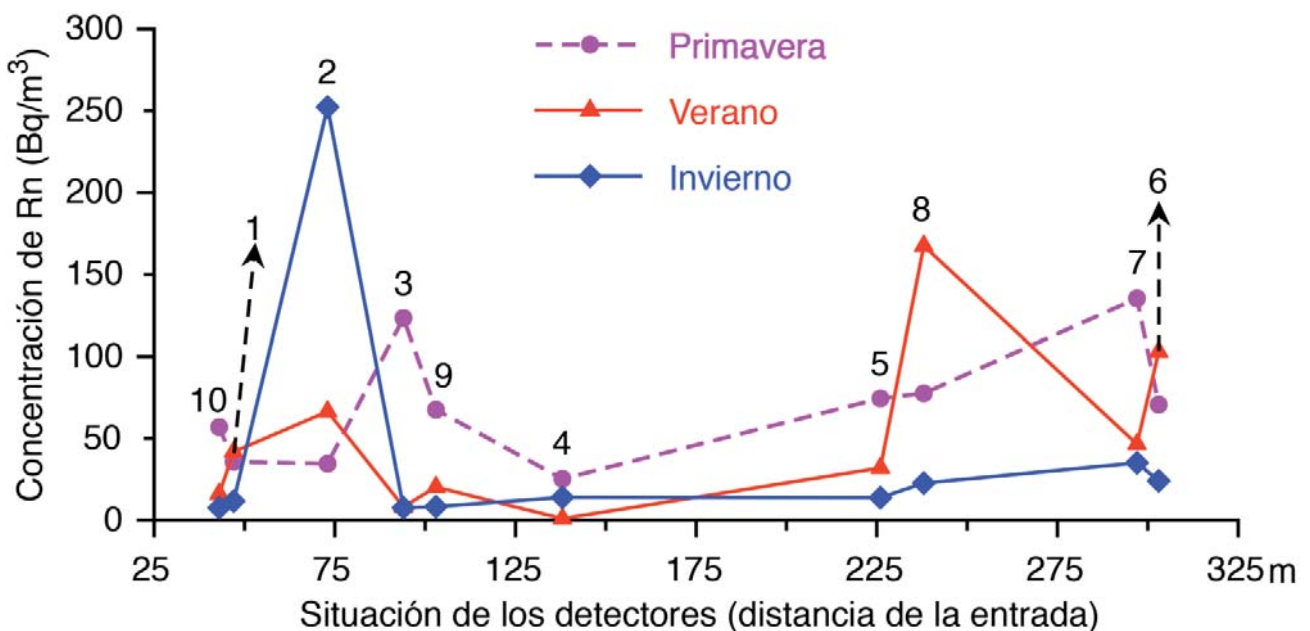


Figura 3. Concentraciones integradas de radón (Bq·m<sup>-3</sup>) en 10 diferentes localizaciones a lo largo del recorrido turístico de las Coves d'Artà

los 10 puntos investigados están por debajo del nivel de radón de referencia recomendado, variando entre 13 y 118 Bq·m<sup>-3</sup>. Este rango sugiere que el gas radón proveniente de fuentes naturales es extremadamente bajo, o que la cueva es eficientemente ventilada durante todo el año. En este supuesto, el intercambio de radón entre la cueva y la atmósfera exterior es muy efectivo, dando como resultado concentraciones de radón insignificantes dentro de la cavidad. Una circulación permanente bidireccional en las cercanías de la gran entrada natural caracteriza el comportamiento climático de la cueva. Esta ventilación natural puede verse localmente alterada de forma intermitente cuando las puertas del túnel artificial se abren para dar acceso a los grupos que visitan la cueva.

Desde el momento en que todos los resultados muestran consistentemente valores muy bajos, no se observan variaciones estacionales. Aunque las Coves d'Artà es una de las cuevas más visitadas en la isla, y cada guía puede pasar varias horas al día en su interior, no existe riesgo para la salud; por lo tanto, no se requiere la aplicación de medidas para monitorizar la exposición individual en esta cueva.

### ***Coves del Drac***

Se han realizado mediciones de radón a lo largo de los senderos de la ruta histórica, la cual en la actualidad no forma parte del recorrido turístico de esta famosa atracción de la isla de Mallorca. Aparte de sus implicaciones desde el punto de vista ambiental, el conocimiento de la concentración de radón puede ser relevante para espeleólogos y científicos (geólogos, geomorfólogos, biólogos, etc). Las exploraciones espeleológicas, así como la recolección y documentación de muestras, pueden conllevar hasta cientos de horas de exposición en un período anual. Los pasajes y salas en esta parte de la cueva, en la cual hay diversas investigaciones en curso, tienen una tendencia general descendente. Por lo tanto, el régimen de ventilación es similar al que se da en las Coves de Campanet, aunque la circulación del aire en invierno y primavera muestra algunas particularidades. Concretamente, la presencia de un notable estrechamiento morfológico, entre los puntos 4 y 5, restringe notablemente la ventilación en el sector más interno de la cavidad, conocido como la Cova Blanca.

Los datos registrados para las tres estaciones del año se muestran en la Figura 4. Teniendo en consideración el tipo de ventilación que opera en esta parte de la cueva, durante la estación fría se podrían esperar valores bajos de radón en todas las localizaciones situadas cerca del pavimento así como en las partes inferiores de la cueva. Por el contrario, en las cercanías de la entrada natural y en los puntos en los que los detectores estaban ubicados cerca del techo, lugares en los cuales el radón es ventilado hacia el exterior, los valores deberían haber sido más elevados. En general, durante el verano la ventilación natural resulta muy restringida debido a la mayor densidad del aire relativamente fresco del interior de la cueva. Estas hipótesis se verifican para todas las localizaciones excepto la estación 7, en la cual la máxima concentración de radón (715 Bq·m<sup>-3</sup>) se registró durante el período invernal. Como sea que este punto se encuentra alejado del centro de la galería y corresponde a la máxima elevación dentro de este sector de la cueva, suponemos que el radón exhalado desde las zonas profundas se acumula en este pasaje lateral, que actúa a modo de trampa. La curva de la concentración de radón en verano (Figura 4, rojo) muestra los valores esperados para cada localización particular, ex-



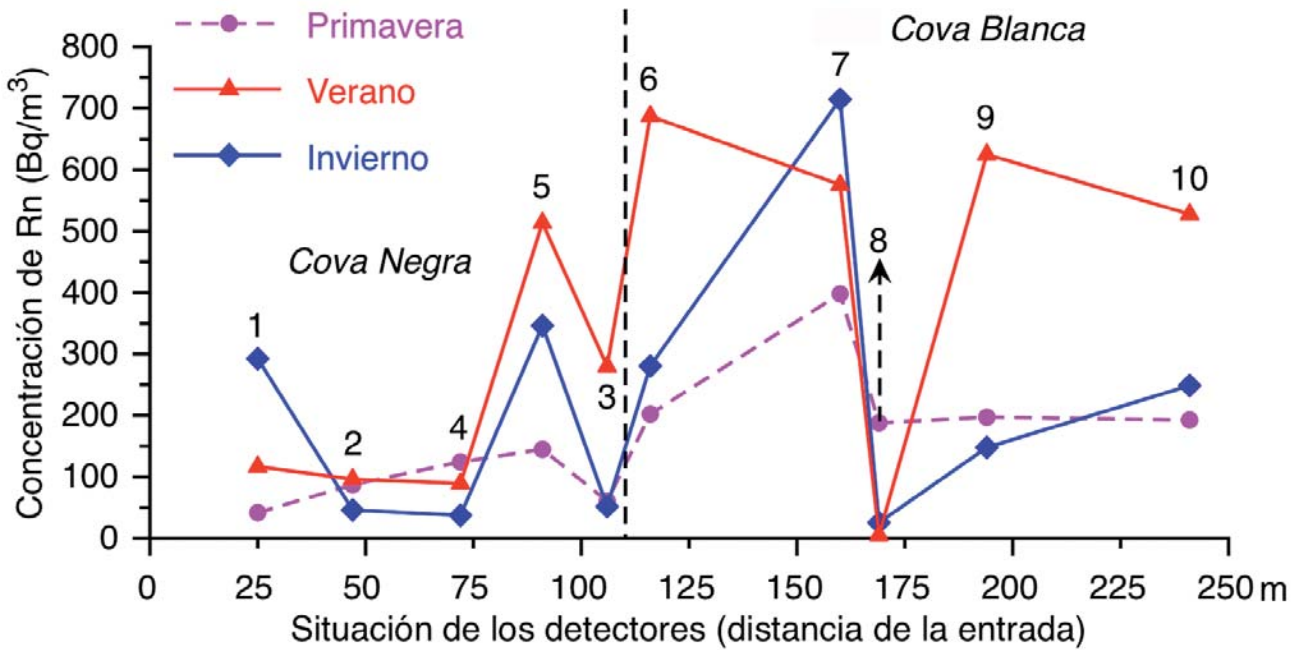


Figura 4. Variación estacional de la concentración de radón en las Coves del Drac

cepto para el punto 8 que presenta valores singularmente bajos. El incremento significativo de la concentración de radón entre las estaciones 4 y 5 (tanto en verano como en invierno) se explica por la situación del detector 5 en una estancia pobremente ventilada, justo tras una constricción morfológica, mientras que el detector 4 estaba situado en una sala amplia y bien ventilada, cercana a la entrada. El valor ligeramente elevado registrado en la estación 3 durante el verano se debe a su localización a una altura inferior (en comparación con la estación 4) dentro del sector de la Cova Negra (Figura 4).

Teniendo en consideración un período acumulado de tiempo que no exceda 20 horas/mes, durante el cual un número relativamente pequeño de investigadores acceden a esta parte de la cueva, una dosis media anual de  $0,3 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$  ha sido calculada. A la luz de estos resultados, nuestra recomendación es que los investigadores (o espeleólogos), que trabajen en esta parte de la cueva, eviten largos tiempos de exposición especialmente durante el verano, ya que ello puede suponer un riesgo para la salud.

## Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en las Coves de Campanet, particularmente en la Sala del Llac (detectores 3 a 5), se ha recomendado que los guías eviten ofrecer largas explicaciones en estas localizaciones específicas. Los gestores de la cavidad deben valorar asimismo la posibilidad de favorecer la circulación del aire durante los meses de verano, mediante la apertura periódica de la puerta de emergencia; sin embargo, por motivos de conservación, es necesario que antes de implementar esta posible medida se realice un programa de monitorización adecuado, a fin de evitar impactos indeseables sobre los espeleotemas y/o la fauna cavernícola. En lo que respecta a las Coves d'Artà no se requiere medida alguna, ya que los valores obtenidos

están muy por debajo de los límites de referencia. Por otra parte, cualquier trabajo científico a desarrollar en la parte no turística de las Coves del Drac (sectores conocidos como Cova Negra y Cova Blanca) debe tener una duración limitada durante el verano (menos de 20 horas/mes). En cuanto a la parte turística, no evaluada en el presente estudio, una campaña de monitorización del radón puede considerarse prudente, especialmente en las localizaciones donde los guías permanecen largos períodos de tiempo, como es el caso de la Cúpula Moragues donde tienen lugar los conciertos que se ofrecen durante la visita turística.

Puesto que se han constatado variaciones estacionales significativas en prácticamente la totalidad de cuevas investigadas, un conocimiento preciso del tiempo real pasado bajo tierra y de la concentración de radón debe ser tenido en consideración. Para evitar el cálculo de dosis efectivas sobre- o sub-estimadas, Quindós-Poncela et al. (2014) recomiendan el desarrollo y chequeo de un nuevo dosímetro personal que puede ser llevado fácilmente por cada trabajador durante el tiempo de exposición.

## Agradecimientos

Es necesario expresar nuestra gratitud a los propietarios, gerentes y personal en general de las cuevas investigadas (Coves de Campanet, Coves d'Artà y Coves del Drac) por las facilidades que nos han brindado para llevar a cabo este estudio. El presente trabajo ha sido posible gracias al soporte económico obtenido de los siguientes proyectos de investigación: PN-II-PT-PC-CA-2011-3.2-1064, N° 73/2012 (C. Cosma), MINECO CGL2010-18616 y CGL2013-48441-P (J.J. Fornós).

## Referencias

- Alberigi, S., Pecequilo, B.R.S., Lobo, H.A.S. y Campos, M.P. 2011. Assessment of effective doses from radon levels for tour guides at several galleries of Santana Cave, Southern Brazil, with CR-39 detectors: preliminary results. *Radiation Protection Dosimetry*, 145 (2-3), 252-255.
- Aytekin, H., Baldik, R., Çelebi, N., Ataksor, B., Tasdelen, M. y Kopuz, G. 2006. Radon measurements in the caves of Zonguldak (Turkey). *Radiation Protection Dosimetry*, 118 (1), 117-121.
- Cigna, A.A. 2005. Radon in caves. *International Journal of Speleology*, 34 (1-2), 1-18.
- Cosma, C., Szacsvai, K., Dinu, A., Ciorba, D., Dicu, T. y Suci, L. 2009. Preliminary integrated indoor radon measurements in Transylvania (Romania). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 45 (3), 259-268.
- Darby, S., Hill, D., Deo, H., Auvinen, A., Barros-Dios, M.J., Baysson, H., Bochicchio, F., Falk, R., Farchi, S., Figueiras, A., Hakama, M., Heid, I., Hunter, N., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F.C., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruosteenoja, E., Rosario, A.S., Tirmarche, M., Tomásek, L., Whitley, E., Wichmann, H.E. y Doll, R. 2006. Residential radon and lung cancer - detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14208 persons without lung cancer from 13

- epidemiologic studies in Europe. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 32, 1-84.
- Dumitru, O.A., Onac, B.P., Fornós, J.J., Cosma, C., Ginés, A., Ginés, J. y Merino, A. 2015a. Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain. *Science of the Total Environment*, 526, 196-203.
- Dumitru, O.A., Onac, B.P., Fornós, J.J. y Cosma, C. 2015b. Radon concentration and effective dose assessment in Coves de Campanet (Mallorca Island, Spain). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303, 885-890.
- Field, M.S. 2007. Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing  $\alpha$  radiation from  $^{222}\text{Rn}$  decay in caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1), 207-228.
- Ginés, J. 2016. *Coves de Campanet. Mallorca*. Pixel Trade S.L., Coves de Campanet. 24 pp. Campanet, Mallorca. [versiones en: inglés y alemán]
- Ginés, J. y Ginés, A. 2011. Les coves turístiques de les Illes Balears: antecedents i estat de la qüestió, *Endins 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17, 333-344.
- Gruber, V., Ringer, W., Wurm, G. y Haider, W. 2014. The Austrian radon activities on the way to the national radon action plan. *Radiation Protection Dosimetry*, 160 (1-3), 22-26.
- Lario, J., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Cuezva, S. y Soler, V. 2005. Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose. *Journal of Environmental Radioactivity*, 80 (2), 161-174.
- Papachristodoulou, C.A., Ionides, K.G., Stamoulis, K.C., Patiris, D.L. y Pavlides, S.B. 2004. Radon activity levels and effective doses in the Perama Cave, Greece. *Health Physics*, 86 (6), 619-624.
- Pinza-Molina, C., Alcaide, J.M., Rodríguez-Bethencourt, R. y Hernández-Armas, J. 1999. Radon exposures in the caves of Tenerife (Canary Islands). *Radiation Protection Dosimetry*, 82 (3), 219-224.
- Quindós-Poncela, L.S., Sainz-Fernández, C., Fuente-Merino, I., Gutiérrez-Villanueva, J.L., Fernández-Villar, A., Quindós-López, L. y Fernández-López, E. 2014. A prototype for a more accurate evaluation of radon exposure in workplaces. *12th International Workshop on the geological aspects of Radon risk mapping*. Praga.
- Racoviță, G. 1975. La classification topoclimatique des cavités souterraines. *Travaux de l'Institut de Spéologie Emile Racovitza*, 14, 197-216.
- Sainz, C., Quindós, L.S., Fuente, I., Nicolás, J. y Quindós, L. 2007. Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: the case of tourist caves. *Journal of Hazardous Materials*, 145, 368-371.
- Somlai, J., Hakl, J., Kávási, N., Szeiler, G., Szabó, P. y Kovács T. 2011. Annual average radon concentration in the show caves of Hungary. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 287 (2), 427-433. DOI: 10.1007/s10967-010-0841-9
- Synnott, H. & Fenton, D. 2005. *An evaluation of radon reference levels and radon measurement techniques and protocols in European Countries*. ERRICCA 2 European Radon Research and Industry Collaboration Concerted Action European Commission Contract No: FIRI-CT-2001-20142. Radiological Protection Institute of Ireland, Wexford, 32 pp.
- Thinová, L., Fronka, A. y Milka, D. 2005. Personal dosimetry enhancement for underground workplaces. *Acta Polytechnica*, 45 (5), 44-47.
- Zeeb, H. y Shannoun, F. 2009. World Health Organization handbook on indoor radon: a public health perspective. WHO Press, Génova, 94 pp.



## Extremadura Subterránea: el potencial turístico de su espeleodiversidad

M. P. Dorado <sup>(1)</sup>, F. J. Fernández <sup>(2)</sup> y R. Pagés <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Minas de Logrosán, Ayuntamiento de Logrosán, Logrosán, Cáceres (España).

<sup>(2)</sup> TECMINSA, S.L. Santa Marta de los Barros, Badajoz (España).

<sup>(3)</sup> Dirección General de Turismo, Junta de Extremadura, Mérida, Badajoz (España).

---

### RESUMEN

Los caracteres geológicos de Extremadura han dotado a esta región de una gran riqueza mineral. Además de las cuevas naturales, algunas la calidad de los yacimientos minerales ha condicionado el pasado histórico de muchos de sus pueblos dedicados ancestralmente a la minería. Esta actividad minera ha generado numerosas cavidades antrópicas que nos permiten hoy en día adentrarnos en un subsuelo variado no sólo en su génesis geológica sino también en su morfología. Distintos paisajes subterráneos en los que las pequeñas poblaciones económicamente deprimidas y demográficamente condenadas a la emigración y el abandono ven un potencial motor de desarrollo: la actividad turística. Al no tratarse de destinos turísticos convencionales, la atracción de los visitantes debe basarse en nuevos parámetros de promoción. Extremadura Subterránea puede llegar a convertirse en una oferta de turismo cultural novedosa y atractiva aprovechando todos los recursos disponibles –naturales y culturales–, que son muchos, focalizados en el atractivo espeleológico de su variado subsuelo. Si bien es cierto que las cuevas naturales disponibles hoy para el turismo en Extremadura –a excepción del Monumento Natural Cueva de Castañar– y los enclaves mineros no tienen por regla general un valor paisajístico excepcional, sí tienen en cambio el aliciente de la diversidad y unos enormes valores culturales que hacen confluír la geología con el ser humano tanto en épocas prehistóricas como históricas. Estos valores no son observables, sin embargo, a simple vista por lo que requieren de una interpretación que puede ser la clave del éxito. Una buena musealización que desvele los valores intrínsecos de este patrimonio puede llegar a convertirlo en un producto turístico de gran calidad como ya está ocurriendo en algunas localidades extremeñas. El establecimiento de sinergias entre las distintas cavidades es lo que lo puede hacer crecer como destino.

**Palabras clave:** cuevas, Extremadura, minas, turismo.

## *Extremadura underground: the tourist potential of its speleological diversity*

### ABSTRACT

*Geological characteristics of Extremadura have endowed this region of great mineral wealth. Besides natural caves, the quality of the mineral deposits has conditioned the historical past of many of their people ancestrally dedicated to mining. This mining activity has generated numerous anthropic cavities that allow us today get into a varied ground not only in its geological origins but also in their morphology. Underground landscapes in which small economically depressed and demographically doomed to emigration and abandonment populations find a potential engine of development: tourism. Not being conventional tourist destinations, attracting visitors should be based on new parameters promotion. Underground Extremadura can become a new and attractive offer of cultural tourism using natural and cultural resources, which are many, focusing on the spelean attractiveness of its varied subsoil. While it is true that the natural caves available today for tourism in Extremadura –except the Natural Monument Cave Castañar– and mining enclaves haven't generally an exceptional landscape value, instead do have the incentive of diversity and a hu-*



*ge cultural values that bring together the geology with humans both in prehistoric times and historical. These values are not observable, however, by everybody and therefore require an interpretation that may be the key to success. A good musealization that reveals the intrinsic values of this heritage can make it a high quality tourism product as is already happening in some locations in Extremadura. The establishment of synergies between the different cavities is what can make them grow as a destination.*

**Key words:** caves, Extremadura, mines, tourism.

## **Introducción: la diversidad del subsuelo en Extremadura**

Situada en el Suroeste peninsular, Extremadura comprende dos zonas del Macizo Hespérico: la Zona Centro Ibérica y la Zona de Ossa-Morena. La situación geológica y su compleja actividad tectónica la han dotado de una gran riqueza mineralógica que ha dado lugar a explotaciones mineras desde la prehistoria así como a la formación de cuevas naturales. Las rocas que la conforman son mayoritariamente de edades antiguas, desde el Precámbrico hasta el Carbonífero y en su interior nos quedan hoy en día formaciones naturales y cavidades antrópicas generadas durante siglos por la actividad minera. Ambas nos permiten recorrer el subsuelo a través de paisajes variados y distintos.

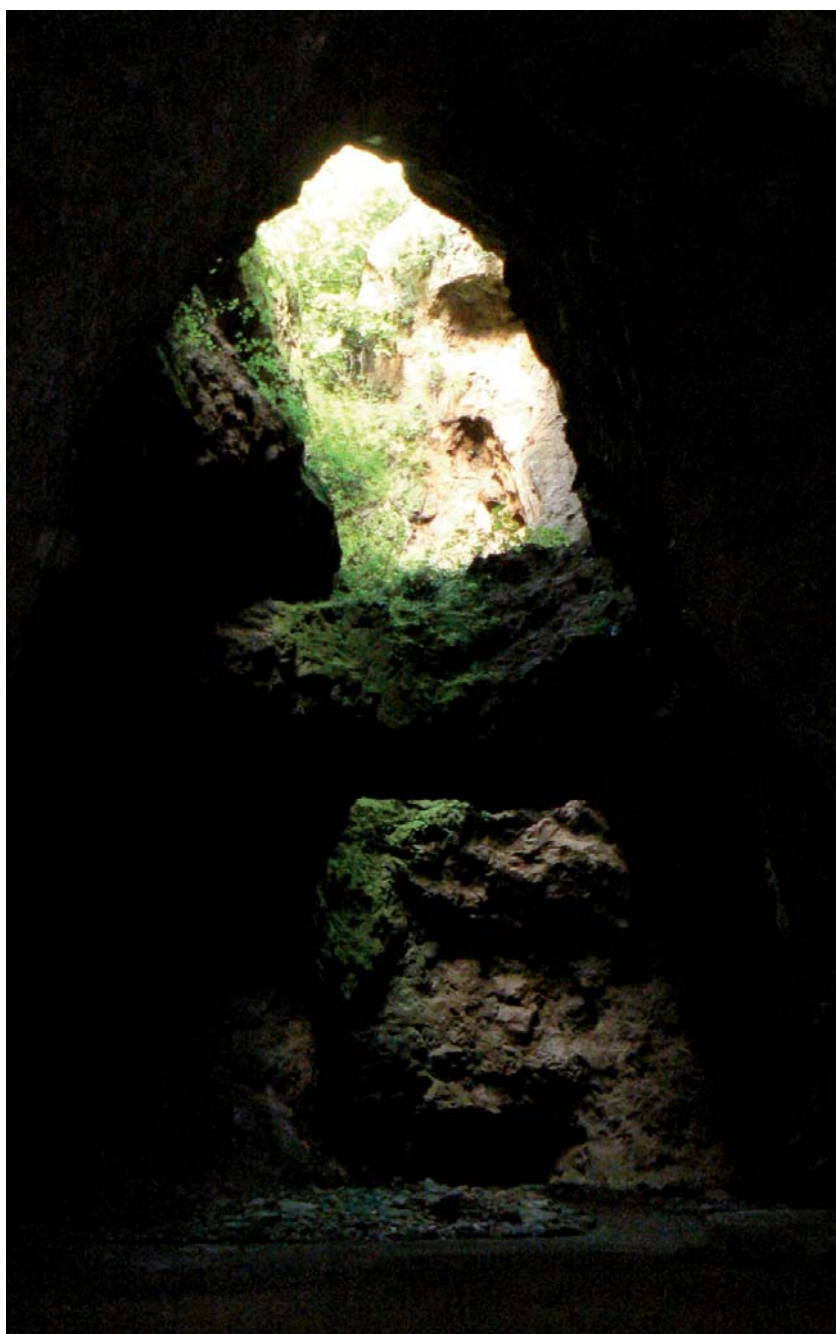
En la provincia de Cáceres, al norte de la región y situada en la Zona Centro Ibérica, encontramos una cavidad, cercana a la capital, en la localidad de Aliseda (Rebollada *et al.*, 2010). Se



*Figura 1. Formaciones excéntricas de aragonito en la Cueva de Castañar (Castañar de Ibor, Cáceres). (Fotografía de Atanasio Fernández)*

trata de una antigua mina de hierro y azufre en la que podemos observar labores de extracción de época romana y del siglo XIX.

Ya en la zona oriental del límite provincial con Badajoz, dentro del Geoparque Villuercas Ibores Jara, se localizan dos espacios subterráneos de elevado interés: la Cueva de Castañar, en las dolomías precámbricas del Grupo Ibor con variadísimos espeleotemas entre los que destacan las excéntricas de aragonito (fig. 1) y los tintes rojos de los óxidos de hierro (Zarza *et al.*, 2005); y la Mina Costanaza, un yacimiento de fosfatos generados por la actividad intrusiva durante la Orogenia Varisca en los niveles más antiguos del Alogrupo Domo Extremeño peninsular y con explotación minera, hasta los 210 metros de profundidad, entre el siglo XIX y la primera mitad



*Figura 2. Mina La Jayona (Fuente del Arco, Badajoz)*





Figura 3. Galería con raíles originales en la Mina Monchi (Burguillos del Cerro, Badajoz)

del XX (Fernández et al. 2008). En la misma localidad se encuentran labores mineras de estaño (casiterita) de época prerromana, entre los siglos IX y VI a.C. (Rodríguez et al., 2015), además de explotaciones de época industrial en la segunda mitad del siglo XX (Sos, 1967).

En la provincia de Badajoz, en la zona de Ossa-Morena, encontramos también cavidades naturales en el complejo kárstico de Fuentes de León, al sur de la región. La red de cuevas y simas de Fuentes de León, es un espacio con numerosas singularidades geológicas, naturales y antropológicas. Este complejo comprende habitación humana desde la prehistoria hasta la época romana, colonias de murciélagos, aguas subterráneas y gran variedad de formaciones de calcita y aragonito en las que podemos ver luminiscencia en algunas zonas iluminadas con luz ultravioleta (Fernández et al., 2005). Pero antes de llegar a esta zona, la más meridional, encontramos un yacimiento de hierro, la Mina La Jayona (Fernández et al., 2010), en Fuente del Arco, con labores mineras de explotación a cielo abierto que han vaciado las fallas en una trinchera de 50 metros de profundidad desde época romana hasta el siglo XIX. Dentro de la trinchera abandonada, la naturaleza ha creado un ecosistema que genera un extraño paisaje (fig. 2) en el que higueras, helechos y orquídeas contrastan con las rocas rojizas donde la luz se refleja en la especularita.

Todos estos sitios ya están acondicionados para las visitas turísticas y hoy en día reciben a miles de visitantes. Pero hay otros dos lugares que están en proceso de rehabilitación. Situados en la provincia de Badajoz, en Tierra de Barros, se trata de dos antiguas explotaciones mineras:

la Mina Monchi, en Burguillos del Cerro (fig. 3) y las Minas de Santa Marta en Santa Marta de los Barros. El caso de la Mina Monchi es un yacimiento tipo skarn con vonsenita y magnetita, entre otros minerales, que conserva un castillete interior y otras infraestructuras mineras en buenas condiciones (Fernández *et al.*, 2005). En el caso de las Minas de Santa Marta, singularidades geológicas como un patrimonio mineralógico único en Europa, fallas con mineralizaciones de plomo y vanadio se pueden contemplar en una densa red de galerías, a lo que hay que añadir la presencia de un poblado minero de finales del siglo XIX (Fernández, 2010). En ambos casos se están realizando actuaciones para su puesta en valor.

## **Problemática y mercados para el turismo subterráneo en Extremadura**

Extremadura es en la actualidad una de las regiones con más superficie de España (41.635 km<sup>2</sup>) y una densidad de población muy baja (unos 25 hab/km<sup>2</sup>) (<http://estadistica.gobex.es>, 2016). Gran parte de su superficie son, además, espacios protegidos de gran valor medioambiental. La industria apenas está desarrollada y el sector servicios se centra en la administración pública. La ocupación de la mayor parte de la población está en el sector agrario, actualmente en decadencia por la retirada de las ayudas económicas de la Unión Europea. Cuenta, sin embargo, con un patrimonio natural y cultural que representa la actual apuesta para el desarrollo, sobre todo en las poblaciones más pequeñas.

Las cavidades poseen un atractivo turístico notable y existe una potencialidad importante en España en general y en Extremadura en particular. En 2012 la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas aportaba datos de cinco millones de visitantes y cien millones de euros de ingresos generados, a nivel nacional, por el turismo subterráneo a pesar de la crisis económica que afectaba gravemente al sector turístico en general. Sin embargo, en Extremadura estos lugares no están enclavados en destinos turísticos convencionales urbanos o de sol y playa, sino en espacios naturales más enfocados al turismo de naturaleza y no encuentran desarrollo complementando la oferta turística, sino que tienen que atraer a los visitantes para ser efectivos.

En las últimas décadas, el gobierno regional ha basado su estrategia de desarrollo en la promoción de los espacios naturales como destino turístico con inversión en infraestructura y proyectos de cooperación internacional como Tajo Internacional, presentación de candidaturas al patrimonio mundial de la UNESCO como la Reserva de la Biosfera de Monfragüe o el Geoparque Villuercas-Ibores-Jara; o la elaboración de productos turísticos específicos como la observación de aves o los paquetes gastronómicos. Estos espacios, empero, aunque visitados, tienen el grado de ocupación promedio más reducido, en torno al 18% del total de ocupación hotelera en 2014 para Monfragüe, Geoparque Villuercas-Ibores-Jara, Tajo Internacional-Sierra de San Pedro y Valle del Jerte-La Vera, frente al 45% de ciudades turísticas como Mérida y Plasencia, lo que supone un indicador de que son lugares percibidos como visitas pero no como destinos, por lo que la población no obtiene, en general, un beneficio económico real, de manera que el ámbito del turismo de naturaleza no está resultando todo lo eficaz que sería deseable para el desarrollo de la región.

Sin embargo, el Ministerio de Cultura facilita unas cifras de 12,1 millones de viajes con motivación cultural de residentes en España y 7,1 millones de residentes en el extranjero para

Extremadura en 2014 (<http://www.mecd.gob.es/servicios-al-ciudadano-mecd/estadisticas/cultura/mc/naec/portada.html>, 2016). Esto supone un mercado potencial de 19,2 millones de personas para el turismo cultural en la región, que además va en aumento (17,3 millones en 2013), en el que el turismo subterráneo puede encontrar un espacio adecuando sus productos, dando a la promoción un enfoque cultural, más que paisajístico o deportivo, que aproveche el atractivo de la experiencia espeleológica para atraer a los visitantes pero que además posea una entidad propia que lo convierta en destino turístico y genere estancias.

### **Expectativas del turismo subterráneo extremeño**

Es posible la creación de un producto de turismo subterráneo en Extremadura aunando esfuerzos y estableciendo unas líneas de colaboración entre las distintas cavidades para evitar el aislamiento que impide su desarrollo como destinos.

Respecto a las cuevas y minas que ya están operativas para la visita turística en Extremadura, más las que tienen proyectos de rehabilitación, se propone una ruta circular (fig. 4), de unos 700 km (unas diez horas en coche), para realizarla en varias jornadas y que puede tener como punto de inicio el aeropuerto de Badajoz que enlaza con Madrid y Barcelona, aunque en la actualidad este aeropuerto es muy poco operativo, por él pasa un porcentaje ínfimo de esos diecinueve millones de personas que representan el turismo cultural potencial en Extremadura.

De Norte a Sur se llega, atravesando la Zona de Especial Protección para las Aves de la Sierra de San Pedro, a la Mina Pastora, en Aliseda. Desde allí, pasando por la ciudad de Cáceres (Patrimonio de la Humanidad) y Trujillo, enlazamos con la Cueva de Castañar y la Mina Costanaza de Logrosán, ámbas dentro del Geoparque Villuercas Ibores Jara (Unesco) y separadas por Guadalupe (Patrimonio de la Humanidad). Entre Logrosán y la Mina La Jayona, en Fuente del Arco, hay un complejo minero abandonado, el de San Nicolás, en Valle de la Serena, para el que ya hay una asociación interesada en su recuperación y que podría ser en el futuro un hito en la ruta subterránea (Minaya et al. 2014). Desde Valle de la Serena a Fuente del Arco se pasa por Zalamea de la Serena, donde se puede visitar el palacio tartesio de Cancho Roano, entre otras cosas, que enlazaría con la minería protohistórica de Logrosán. La siguiente parada serían las cuevas de Fuentes de León, en las que se combinan valores naturales, formaciones kársticas y arqueología.

De allí a las extensas galerías mineras de Burguillos del Cerro y al poblado minero de Los Llanos en Santa Marta, Tierra de Barros famosa por sus vinos y sus cerámicas de Salvatierra por donde también se pasa. Finalmente, la ruta termina de nuevo en el aeropuerto, a 45 km de Mérida, con la posibilidad de prolongar un día más la estancia en Extremadura.

Esta ruta, en sí misma, puede constituir un paquete turístico para agencias de viajes; puede ser también recorrida por tramos como el Camino de Santiago o la Vía de la Plata alrededor de la cual discurre; o se puede hacer completa en varias jornadas. Esta versatilidad, junto a la existencia de un aeropuerto, aumenta el alcance del producto turístico al facilitar el acceso desde el extranjero y amoldarse a la disponibilidad de días para el ocio. Generar un producto turístico convierte a la zona en destino, no en lugar de visita, lo cual conlleva pernoctaciones que al ser



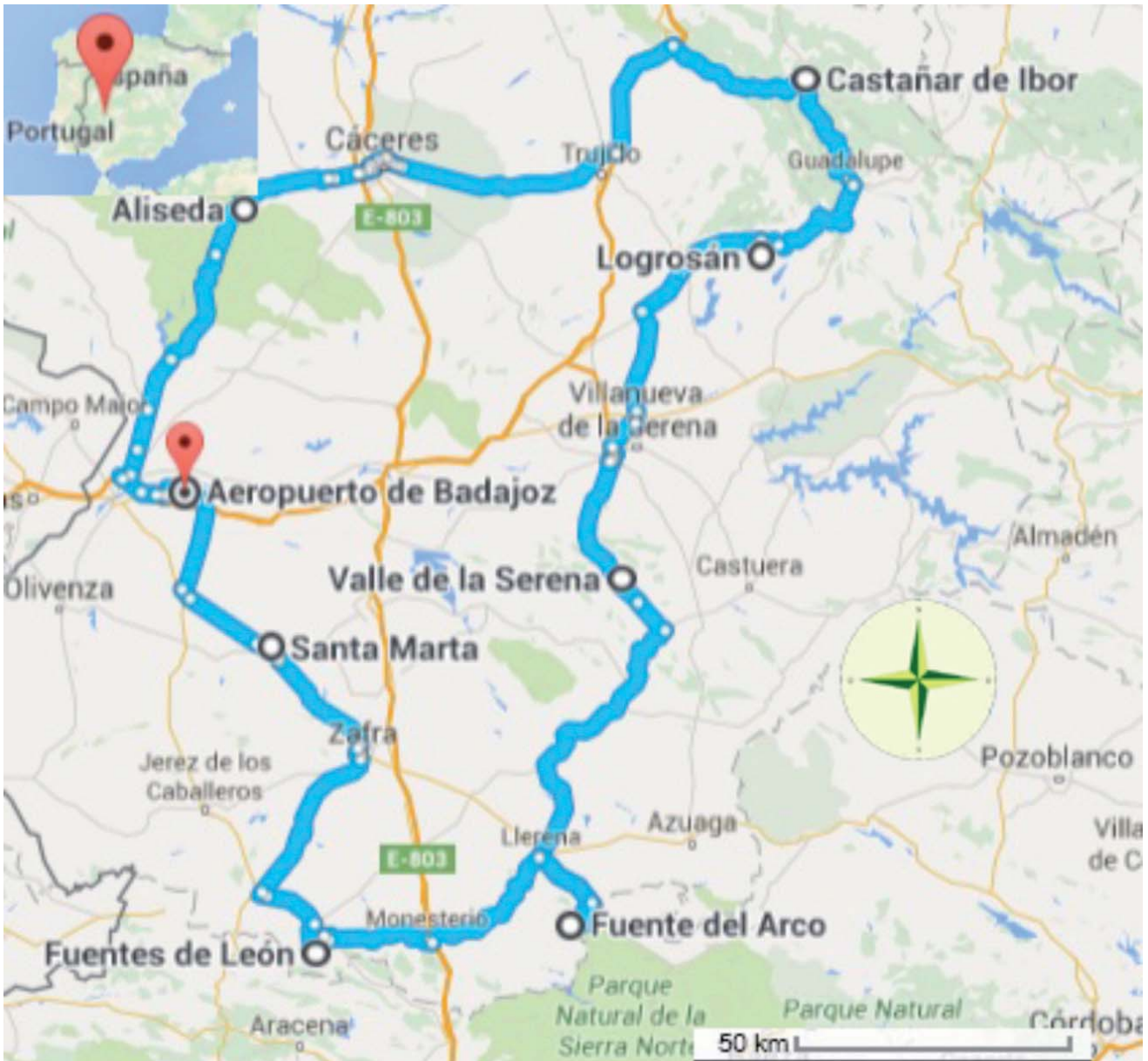


Figura 4. Mapa: Ruta Extremadura subterránea

una ruta circular se reparten por todas las poblaciones del recorrido dando lugar preferente a aquellas en las que se encuentran las cavidades y no sólo a los destinos tradicionales (Cáceres, Trujillo, Mérida), aunque tenerlos en la ruta amplía también la oferta hostelera, de momento muy poco desarrollada en estas zonas rurales.

La creación de esta ruta debe considerarse como un paso previo a la creación del producto "Turismo subterráneo de Extremadura", con las características de este tipo de productos, es decir la creación de un club de producto en el que deben participar todos los agentes implicados, desde las asociaciones relacionadas con el sector, los guías especializados, los restaurantes y alojamientos que estén especializados y destaquen por ofrecer información y servicios relacionados, etc., de tal forma que se genere un entorno especialmente propicio para los visitantes que quieran vivir una experiencia realmente especial, con una marca de calidad y un distintivo específico y diferenciador.

Cabe señalar que la situación de Extremadura es realmente privilegiada en lo que se refiere al turismo subterráneo y al turismo geológico, ya que, además de contar con los importantes recursos que hemos descrito, su situación en el suroeste peninsular, la ubica cerca de sitios tan importantes como el Parque Minero de Almadén en Ciudad Real, la Gruta de las Maravillas y las Minas de Río Tinto en Huelva, además de las diferentes grutas de Portugal, Moedas, Mira de Aire, etc., lo que aumenta de manera considerable las posibilidades de desarrollo del producto "Turismo subterráneo de Extremadura".

### La interpretación del patrimonio

Si bien es cierto que las cuevas naturales disponibles hoy para el turismo en Extremadura –a excepción del Monumento Natural Cueva de Castañar– y los enclaves mineros no tienen por regla general un valor paisajístico excepcional en su interior, sí tienen en cambio el aliciente de la diversidad y unos enormes valores culturales.

Estos valores no son observables, sin embargo, a simple vista por lo que requieren de una interpretación que puede ser la clave del éxito. Los museos y centros de interpretación anexos a estos lugares son por lo tanto una herramienta indispensable que dota a los visitantes de las claves básicas para la comprensión de los entornos que van a visitar.

Una buena musealización que desvele los valores intrínsecos de este patrimonio convierte a estos centros no sólo en una recepción, sino en auténticas máquinas del tiempo que transportan

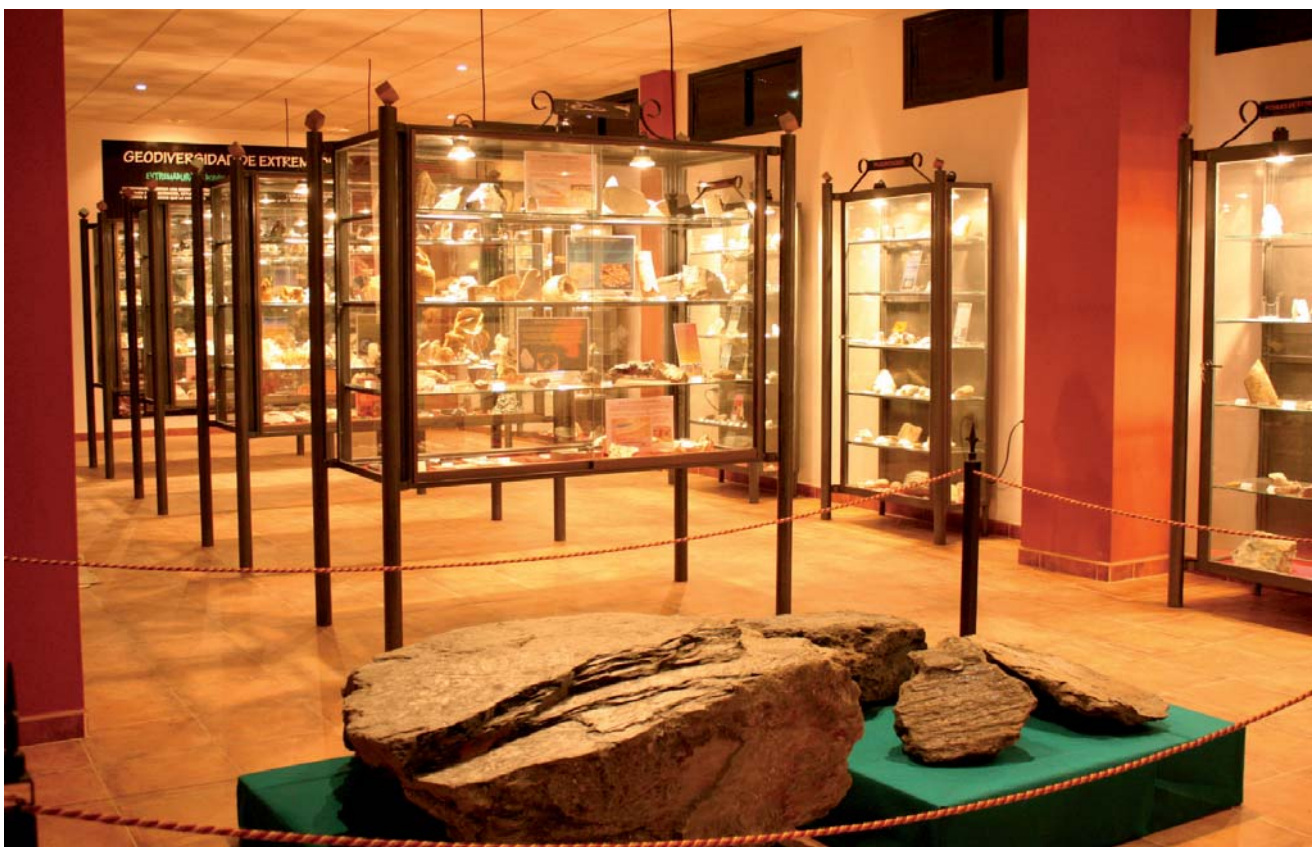


Figura 5. Museo Geológico y Minero de Santa Marta (Santa Marta de los Barros, Badajoz)



al visitante a eras y épocas pasadas de la historia de la Tierra y de la humanidad. A través de sus contenidos asisten a la formación de los yacimientos minerales y de las cuevas: desplazamientos y choques de placas, orogenias, intrusiones magmáticas, fenómenos erosivos, fracturaciones, filtraciones, mineralizaciones... y millones de años después a la necesidad de materias primas o a los hallazgos de las formaciones naturales y su utilización por el ser humano.

En los museos (fig. 5), los visitantes encuentran también los datos básicos para la comprensión de los fenómenos geológicos (rocas, minerales y fósiles) y para la reconstrucción de la utilización antrópica de las cavidades (herramientas mineras, documentos, planos, restos arqueológicos). Gráficos y paneles didácticos que facilitan la comprensión de los caracteres geológicos y piezas originales que dan fe de la veracidad de las exposiciones así como, a veces, objetos o réplicas que puedan ser manipuladas o actividades relacionadas con el entorno, sobre todo para los más pequeños.

Todas estas herramientas, no obstante, son un complemento a la labor imprescindible de los guías que acompañan a los visitantes y sirven para ilustrar el discurso que los transporta por este recorrido espacio-temporal. Por esta razón la formación, educación y entusiasmo de estos trabajadores es un factor esencial que puede suponer el éxito o el fracaso del producto turístico.



*Figura 6. Profesores de la Universidad Complutense de Madrid junto a otros congresistas en la Mina Costanaza de Logrosán durante el XIX Congreso sobre Patrimonio Geológico y Minero de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero*

## Ventajas de la cooperación entre las distintas cavidades y con el entorno

El establecimiento de sinergias convierte el destino en un foro de intercambio de ideas muy útil para el aprendizaje a través de congresos, jornadas, intercambio de información y formación conjunta (fig. 6). Facilita también la promoción ya que abarata los costes económicos en desplazamientos, publicaciones, personal, etc. y amplía el radio de alcance tanto por la accesibilidad como por la diversidad de la oferta. Hay que destacar que el hecho de que todas las cavidades pertenezcan a una asociación como ACTE es muy ventajoso para la cooperación ya que proporciona el contacto y la comunicación necesarios.

Por último, aprovechar otros valores culturales o naturales que rodean a los entornos subterráneos revaloriza el producto. Ya hemos visto como a lo largo de la ruta por la Extremadura Subterránea se recorren lugares naturales y culturales englobados dentro del Patrimonio Mundial de la UNESCO y Zonas de Especial Protección para las Aves, hay también artesanía, como la cerámica de Salvatierra de los Barros, y una gran riqueza gastronómica de Denominación de Origen: vinos en Tierra de Barros y Ribera del Guadiana, miel en Las Villuercas y queso en Los Ibores y La Serena.

## Referencias

- Alonso Zarza, A, Sánchez Moral, S., Gil Peña, I., Lario, J., Muñoz Barco, P. y Martínez Flores, E. 2005. Punto de Interés Geológico "Cueva de Castañar". En: *Patrimonio Geológico de Extremadura*. Muñoz, P. y Martínez, E. (Eds.), pp. 99-112. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, Badajoz.
- Anuario de Estadísticas Culturales*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Gobierno de España. 1/6/16 <http://www.mecd.gob.es/servicios-al-ciudadano-mecd/estadisticas/cultural/mc/naec/portada.html>
- Fernández Amo, F. J. y Rebollada Casado, E. 2005. Mina La Jayona. En: *Patrimonio Geológico de Extremadura*. Muñoz, P. y Martínez, E. (Eds.), pp. 113-121. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, Badajoz.
- Fernández Amo, F.J. 2010. *Proyecto de Puesta en Valor de las Minas de Santa Marta (Badajoz)*. Dirección General de Ordenación Industrial Energética y Minera, Junta de Extremadura.
- Fernández Amo, F.J. y Rebollada Casado, E. 2005. Punto de Interés Geológico Cuevas de Fuentes de León. En: *Patrimonio Geológico de Extremadura*. Muñoz, P. y Martínez, E. (Eds.), Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, Badajoz. pp. 131-134.
- Fernández Amo, F.J. y Rebollada Casado, E. 2005. Punto de Interés Geológico Mina Monchi. En: *Patrimonio Geológico de Extremadura*. Muñoz, P. y Martínez, E. (Eds.), pp. 245-254. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, Badajoz.
- Fernández Amo, F.J.; Solanilla Rodríguez, J.A. 2008. *Inventario del Patrimonio Geológico y Minero de las Minas de Logrosán*. Informe inédito. Museo Geológico y Minero Vicente Sos Baynat, Logrosán.
- Junta de Extremadura, Buscador estadístico. IEEX. 1/6/16 <http://estadistica.gobex.es/>
- Minaya Caballero, J.J. et al. 2014. *Historia y Patrimonio Minero en el Valle de la Serena. La Singularidad de las Minas de San Nicolás*. Juan José Minaya Caballero Ed.

- Rebollada Casado, E., Arias Llorente, M. y Gumiel Martínez, P. 2010. Mina Pastora, Aliseda (Cáceres): Contribución al Desarrollo del Patrimonio Geológico-Minero de Extremadura. En: *Patrimonio Geológico y Minero. Una apuesta por el desarrollo local sostenible.* SEDPGYM. Huelva, pp 49-54.
- Rodríguez Díaz, A, Pavón Soldevilla, I, Duque Espino D. M. y Hunt Ortiz, M. A. 2015. La explotación protohistórica del estaño en el cerro de San Cristóbal de Logrosán (Cáceres). En: *Patrimonio Geológico y Minero: de la investigación a la difusión. Actas del XV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. XIX sesión científica de la SEDPGYM. Congreso en memoria de Vicente Sos Baynat y Craig Merideth.* Josep M. Mata-Perelló, Mark A. Hunt Ortiz y Enrique Orche García Ed. 63-85.
- Sos Baynat, V. 1967. Geología, Mineralogía y Mineralogía de la Sierra de San Cristóbal, Logrosán (Cáceres). *Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*, Serie de Ciencias Naturales, tomo XXII, Memoria núm. 1, Madrid. 141 pp.





Ros Vivancos, A. *et al.* Hypogenic morphology APP: Una aplicación libre para la identificación de cuevas hipogénicas. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 181-190.

## Hypogenic morphology APP: Una aplicación libre para la identificación de cuevas hipogénicas

A. Ros Vivancos <sup>(1)</sup>, J. L. Llamusí Latorre <sup>(1)</sup>, J. Sánchez Ortega <sup>(1)</sup>, F. Gázquez Sánchez <sup>(2)</sup> y J. M. Calaforra Chordi <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Estudios Ambientales y del Mar. CENM-naturaleza, Alcántara, 5, Cartagena, Murcia, 30394, España, cenm@cenm.es

<sup>(2)</sup> Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Downing Street, Cambridge, CB2 3EQ, United Kingdom, f.gazquez@ual.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería, Carretera de Sacramento, s.n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04720, España jmcalaforra@ual.es

---

### RESUMEN

Los estudios sobre cavidades generadas por procesos de origen profundo, en muchas ocasiones hidrotermal, también conocidas como cuevas hipogénicas, han proliferado notablemente durante los últimos años, hasta el punto de que hoy en día se considera que el 10% de las cavidades a escala mundial fueron generadas por este tipo de mecanismos. La espeleogénesis hipogénica suelen dar lugar a morfologías características, aunque en muchas ocasiones estos elementos pueden quedar enmascarados por otros de origen epigénico más recientes, relacionados con la infiltración de agua superficial. El estudio en detalle de algunas cavidades, hasta la fecha consideradas epigénicas, ha puesto de manifiesto los procesos de origen profundo que las generaron. Este tipo de patrones, ya sean morfológicos (presencia de cúpulas, domos de corrosión, *scallops* verticales, *pendants*, etc...) o espeleotémicos (folias, conos de calcita flotante, nubes, etc...) se repiten en cuevas hipogénicas de todo el mundo. En términos generales, la difusión de los conocimientos adquiridos hasta la fecha sobre estas cavidades ha quedado restringida al ámbito de la espeleología científica y apenas han trascendido a espeleólogos y aficionados al medio subterráneo. En este trabajo presentamos una nueva aplicación libre para *smartphone* con sistema operativo Android, ideada como una guía básica y accesible, con vocación didáctica, que recoge los elementos más comunes y característicos que se pueden observar en cavidades hipogénicas. Esta aplicación utiliza la base de datos de morfológicas hipogénicas recopilada durante los últimos veinte años en cavidades la Región de Murcia. Cada "elemento hipogénico" viene acompañado de imágenes y una breve descripción que facilita su identificación de forma sencilla.

**Palabras clave:** app para Android, aplicación para Smartphone, espeleogénesis, morfologías hipogénicas.

### ***Hypogenic morphology APP: A free app to identify hypogenic caves***

#### **ABSTRACT**

*Studies dealing with caves formed by deep-sealed, sometimes hydrothermal waters have proliferated over the past ten years, to such point that today hypogenic caves are considered to represent around 10% of total caves worldwide. The hypogenic speleogenesis results in characteristic morphologies, although frequently these elements may be masked by other more recent of meteoric/epigenic origin, related to the infiltration of surface water. The detailed study*

*of some cavities, to date considered epigenic, has revealed the action of processes originated in depth. This type of morphological patterns (cupolas, domes corrosion, vertical scallops, pendants, etc.) and the presence of specific speleothems (folia, raft calcite cones, clouds, etc.) have been described in hypogenic caves around the world. In general, the knowledge acquired about these cavities to date has been restricted to researches and cave experts, whereas this information frequently has not transcended to speleologist and tourists. Here, we present a new free application for Android smartphone operating system, designed as a basic and accessible guide with didactic profile that gathers the most common elements found in hypogenic cavities. This application uses the database of hypogenic morphologies collected over the past twenty years from caves of the Region of Murcia. Each "hypogenic feature" is accompanied by an image and a brief description.*

**Keywords:** app for Android, hypogenic morphologies smartphone application, speleogenesis.

## Morfologías hipogénicas

Las cavidades hipogénicas, generadas por procesos de origen profundo (en muchas ocasiones hidrotermal) han despertado poco interés hasta tiempos relativamente recientes. De hecho, el escaso conocimiento generado sobre este tipo de cavidades ha estado muy limitado al ámbito científico y a sectores muy concretos de investigadores dedicados a la espeleología. En los últimos diez años, los estudios sobre este tipo de cavidades han adquirido protagonismo y se han dado en parte a conocer al público no especializado. De este modo, se ha empezado a poner en valor la génesis peculiar de algunas cavidades como reclamo turístico y distintivo con respecto a otras cuevas formadas por mecanismos epigénicos convencionales (Gázquez y Calaforra, 2015). La falta de guías o directrices específicas que orienten a los espeleólogos para las características de estas cavidades y de sus elementos peculiares contribuye a su desconocimiento.

En el ámbito de las cavidades hipogénicas de la Región de Murcia, la aparición de nuevos estudios y publicaciones de alcance internacional (Gázquez *et al.*, 2012; Gázquez y Calaforra, 2013; Gázquez *et al.*, 2016), están ayudando a redescubrir cavidades que habían despertado poco interés hasta la fecha o de las que se tenía dudas sobre su origen. Este es el caso de la Cueva del Puerto (Calasparra) donde recientes estudios sobre sus morfologías hipogénicas la apuntan como un modelo de referencia para las cavidades hipogénicas españolas (Ros *et al.*, 2016). Del mismo modo, los estudios sobre Sima de la Higuera (Gázquez *et al.*, 2012, Gázquez y Calaforra, 2013), la Cueva de Luchena (González *et al.* 2014) y otras cavidades en la región de Murcia han cambiado significativamente las ideas previas sobre los mecanismos que las generaron. En el ámbito nacional, estos estudios sobre cuevas hipogénicas se unen a otros desarrollados en áreas kársticas de las Islas Baleares como es el caso de Cova des Pas de Vallgornera (Ginés *et al.*, 2014; Merino y Fornos, 2010; Merino *et al.*, 2011), o de la Comunidad Valenciana (Garay, 2013). Sin embargo, existen todavía ciertas barreras de información que impiden que estos conocimientos alcancen al público general. Este hecho evita que en muchas ocasiones se les confiera a las cavidades hipogénicas la atención que merecen como elementos geológicos relativamente poco comunes con respecto a las cuevas epigénicas. Por otro lado, en cierta medida se impide que se produzcan nuevos hallazgos de cuevas y elementos hipogénicos por parte de aficionados y espeleólogos.

Numerosos autores coinciden con el modelo de génesis de cuevas hipogénicas descrito por Klimchouk (2007) (Figura 1) denominado "modelo morfológico de flujos ascendentes". Este modelo constituye el patrón general para cuevas generadas en acuíferos confinados (Audra,

2009): el ascenso de las aguas profundas a través de grietas o conductos verticales, (*feeders*) se extienden lateral y verticalmente a través de galerías principales (*master passage*) o zona de transición, y sale del sistema a través de conductos verticales de escape o fuga (*outlet*). Estos procesos se repiten a distintas escalas pudiendo dar lugar a redes kársticas de gran complejidad, creando múltiples ramificaciones laterales y desarrollos laberínticos (*maze cave*).

El conjunto de procesos que tiene lugar en este tipo de cavidades dan lugar a morfologías comunes y características, como pueden ser conductos y chimeneas verticales, cúpulas, domos de corrosión, etc. Del mismo modo, aparecen formación de espeleotemas relacionadas la presencia de aguas termales en estas cavidades, como es el caso de conos de calcita flotante, folias, nubes (*clouds*), spar de calcita, etc. La presencia de espeleotemas suele ser menos abundante que la de las morfologías hipogénicas en paredes y techos, ya que estos espeleotemas se suelen formar en condiciones extremadamente específicas, que en el ámbito de la Región de Murcia solo se dieron en algunas cavidades. Debido al carácter poco convencional de estos espeleotemas no es raro que en ocasiones sean confundidos con otros más comunes, como estalactitas o estalagmitas.

En este trabajo se presenta una aplicación para *smartphone* que pretende ser una herramienta de consulta básica con elementos comunes y característicos (morfologías y espeleotemas) que aparecen en cuevas de origen hipogénico. El objetivo de la misma es ayudar al público no especializado a identificar y caracterizar estos elementos.

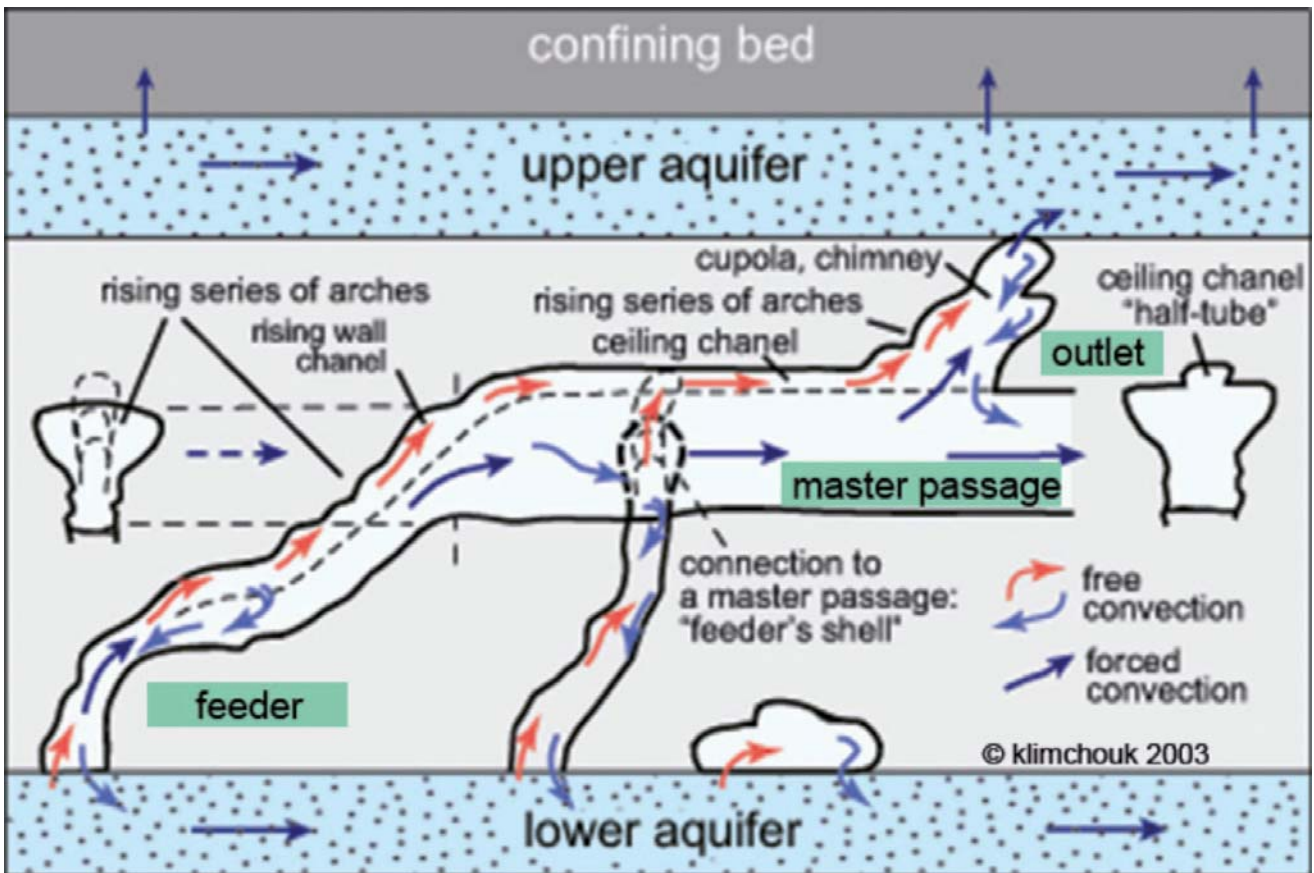


Figura 1. Modelo de flujo ascendentes en cuevas hipogénicas (Morphologic suite of rising flow), cortesía de Alexander Klimchouk



Para la selección de las morfologías y espeleotemas de origen hipogénico nos hemos basado en los trabajos de Klimchouk (2007), Audra et al., (2009) y otras aportaciones relevantes de Merino y Fornos (2010) y Merino et al., (2011) entre otros. Estos trabajos sobre cuevas hipogénicas en diversas partes del mundo se aplican aquí a cuevas de la Región de Murcia, donde se han identificado hasta 14 cavidades que presentan evidencias claras de este tipo de mecanismos (Ros et al., 2014; Gázquez et al., 2016) tal y como se resume en la Tabla 1.

**CUEVAS HIPOGÉNICAS EN LA REGIÓN DE MURCIA**  
**TABLA DE REDES - MORFOLOGÍAS - ESPELEOTEMAS**

Selección de Cavidades		Sima de la Higuera	Sima Destapada	Cueva del Puerto	Cueva del Agua	Sima del Pulpo	Cueva del Pozo	Sima de la Plata	Cueva del Agua-Lorca	Cueva de Luchena	Cueva del Gigante	Sima del Almez
<b>Cavidades tipo</b>												
<b>espeleometría-desarrollo</b>	Recorrido desarrollo metros	5500	3400	4389	3620	4780	1254	373	546	561	610	220
<b>Maze caves</b>	Redes laberínticas	X	X	X				X	X	X	X	
<b>Network maze caves</b>	Redes reticuladas	X	X	X					X			
<b>Spongework maza caves</b>	Redes irregulares	X	X	X	X			X	X	X	X	
	Redes morfología planar	X	X	X	X	X	X	X	X			
	Grandes Salas	X	X	X				X				X
	Salas con ramificaciones ascendentes	X		X				X		X		
	Drenes ascendentes y surgenles		X		X	X?	X?		X			
<b>Anomalia geotérmica</b>	Temperatura aire (T. agua en C. Agua)	21º	29º	20º	30º				21º			
<b>Morfología interior</b>												
<b>Feeders</b>	canales verticales de alimentación	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Rising wall chanel</b>	canales de pared ascendentes	X	X	X	X	X	X	X?	X	X	X	X
<b>Ceiling chanel</b>	canales de techo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Composed pockets</b>	cúpulas coalescentes	X	X	X	X		X	X	X		X	X
<b>Subdued pockets</b>	pequeñas cúpulas	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
<b>Wall pockets</b>	cúpulas en paredes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Ceiling pockets</b>	cúpulas en techo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Oufles</b>	estructuras de fuga ascendente, descargas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Underdeveloped oufles</b>	morfologías sin desarrollar, cerradas sin continuidad	X	X	X	X		X				X	X
<b>Successful oufles</b>	estructuras que comunican dos niveles	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
<b>Dead Ends</b>	galerías ciegas	X	X	X	X		X		X	X	X	X
<b>Partitions</b>	tabiques de roca	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
<b>Bubble trails</b>	canales de disolución sobre paredes	X	X	X								
<b>Collapses</b>	colapsos	X	X	X	X	X		X	X			
<b>Cúpulas ramificadas</b>	pseudogalerías/pseudopozos	X	X	X		X	X					
<b>Bowwork</b>	formas nido de abeja, cajas	X	X	X	X				X		X	
<b>Scallops</b>	formas sección elíptica en paredes y techos, costras	X	X	X	X				X		X	X
<b>Yesos</b>	Presencia de yesos, paredes, ...			X								
<b>Espeleotemas</b>												
<b>Folias</b>	Placas de calcita a modo de gours invertidos	X				X						
<b>Tower coral</b>	pináculos coraloides	X	X									
<b>Coralloids</b>	Corales	X							X?			
<b>Porcon</b>	Palomitas	X	X?									
<b>Raft cones</b>	Conos	X							X			
<b>Double tower cones</b>	Conos dobles	X										
<b>Micro cones</b>	Micro conos 1-10 cm.	X										
<b>Cave raft</b>	Calcita flotante	X	X?	X	X?	X			X			
<b>Moonmilk</b>		X	X?						X			
					X							
<b>Clouds</b>	Nubes	X				X?		X				
<b>Pool fingers</b>	Estalactitas submarinas origen organico	X?			X?							
<b>Conulites</b>	Vasos de chapoteo	X										
<b>Micritized rind</b>	Calcita micritizada	X							X			
<b>Spar</b>	Cristales	X	X						X			
<b>Dogtooth calcite</b>	Dientes de perro	X							X			
<b>Aragonite</b>	Agujas de aragonito		X									
<b>Gypsum flowers</b>	Flores de yeso			X		X						
<b>Gypsum</b>	Presencia de Yeso		X	X		X						

**Tabla 1.** Elementos hipogénicas de algunas cuevas de la Región de Murcia



## App hypogenic morphology

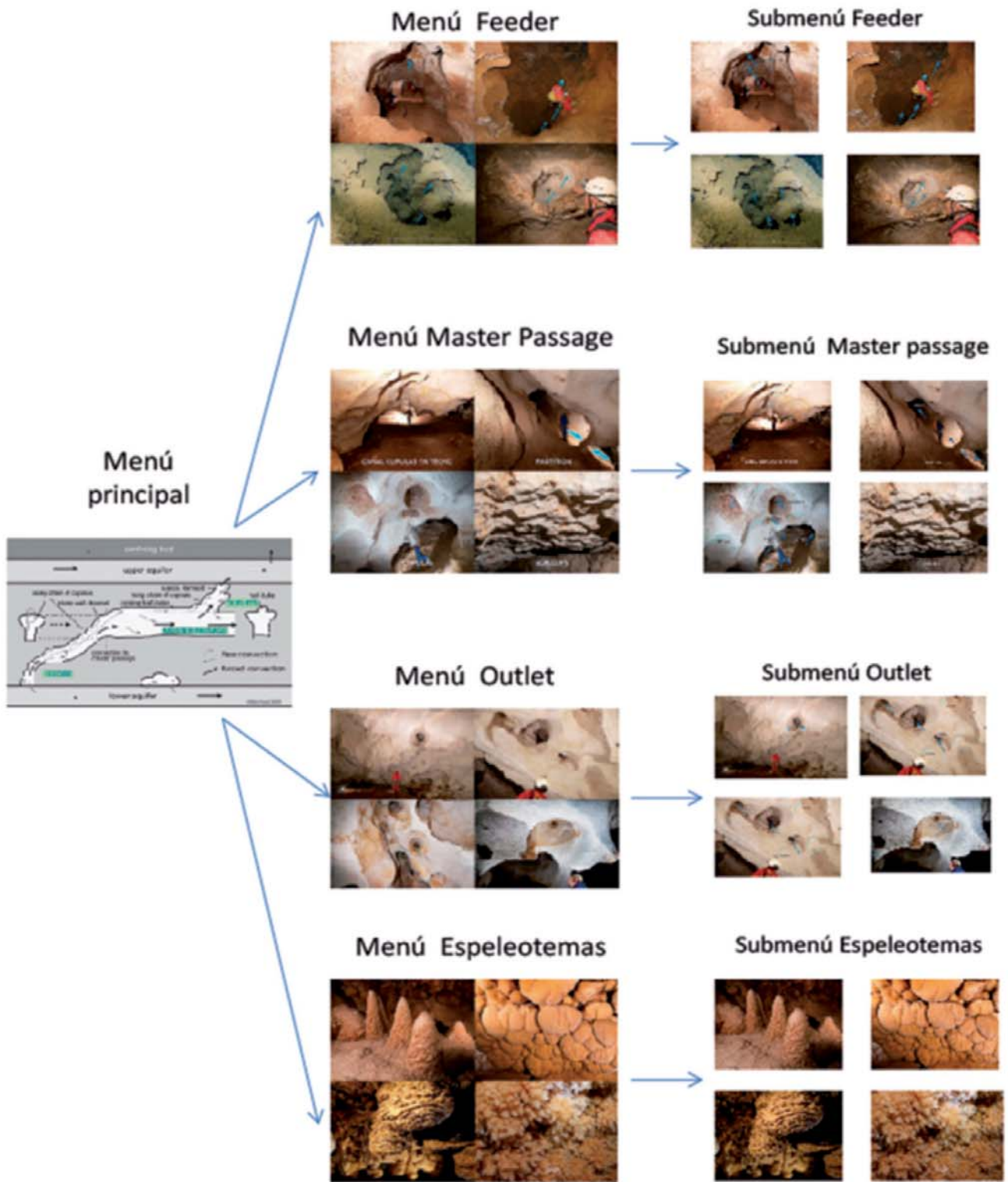
La app que presentamos recopila elementos morfológicos comunes para la mayoría de las cavidades hipogénicas, junto a espeleotemas que se desarrollan en ambientes hipogénicos o hidrotermales. Los elementos descritos en esta app son algunos de los más habituales y comunes que se pueden encontrar en cuevas hipogénicas. Para ilustrar gráficamente estos elementos hemos utilizado ejemplos de cavidades en la Región de Murcia. El número de indicadores morfológicos hipogénicos es amplio y diverso, y presentas múltiples variantes. No todos los elementos aparecen en todas las cavidades, aunque existen algunos que son extremadamente frecuentes como se puede observar en la Tabla 1.

La app consta de una estructura de menú y submenú gráfico. En el menú general se puede acceder a tres submenús que coinciden con las tres zonas de las que consta el "modelo morfológico de flujos ascendentes" (Klimchouk, 2007). Además, existe un cuarto menú dedicado a la caracterización de espeleotemas. La primera pantalla describe "modelo morfológico de flujos ascendentes", destacando los tres elementos más significativos de esta: los feeder, la zona de transición of *master passage* y los conductos de salida u *outlets*. Cada uno de los menús se describe a continuación.

**Menú Feeder:** Esta pantalla recoge cuatro imágenes de distintos *feeders*, que vienen acompañadas de un texto descriptivo; *"Los canales de alimentación o "feeder" permiten la entrada al sistema de flujos ascendentes de agua, generalmente de carácter termal. El agua caliente, menos densa, fluye verticalmente disolviendo la roca caliza. Una vez el agua abandona la cavidad, estos elementos quedan expuestos e modo de pozos verticales"*. Las imágenes ilustran dos *feeders* de gran tamaño o "*macro feeder*" y otros dos de pequeñas dimensiones o "*micro feeder*", también denominados "toberas" en algunos casos (Gracia et al., 2007; Merino y Fornos, 2010; Merino et al., 2011).

**Menú Master Pasassage o zona de transición:** *"Engloban el conjunto de conductos principales de la cavidad (máster passages) y sirven a modo de zona de transición entre los niveles profundos del acuífero y los más superficiales. Son típicos de estos ambientes las cúpulas, canales de corrosión, los pilares aislados y muros de roca (partition) y los scallops"*. Cuatro imágenes de morfologías típicas de la zona de transición acompañan a este texto, incluyendo "canal de cúpulas en techo", "partition", "cúpulas", y "scallops". *Estos últimos, suelen estar dispuestos de forma vertical en galerías de cuevas hipogénicas debido al ascenso de flujos termales, a diferencia de cuevas epigénicas, donde suelen aparecer en posición horizontal"*. Cuatro imágenes de morfologías típicas de la zona de transición acompañan a este texto, incluyendo "canal de cúpulas en techo", "partition", "cúpulas", y "scallops" con una breve descripción de todos estos elementos.

**Menú Outlets:** Estas morfologías se describen en el texto de la app como: *"Estructuras de fuga ascendente o puntos de descarga, están formados por cúpulas y conductos verticales que partiendo desde el techo de una galería en un nivel determinado, conecta con el siguiente situado sobre ella. En ocasiones, estructuras en techos como cúpulas o tubos ascendentes pueden dar lugar a outlets"*. Cuatro imágenes con morfologías típicas de *outlets* ("Outlet", un conjunto formado por "Ceiling pockets-outlets", un grupo de canal en el techo of "Ceiling chanel pockets", y una cúpula con canal ascendente ciego o "Dead ends") vienen acompañadas de sus correspondientes textos.



Esquema general de funcionamiento y pantallas de la aplicación

hypogenic Morphology App

Figura 2. Estructura de la app Hypogenic morphology

**Menú Espeleotemas:** Se describen cuatro tipos espeleotemas hipogénicos característicos. Este menú viene acompañado del texto: *“Suelen originarse cerca de la superficie de las aguas termales. El CO<sub>2</sub> escapa de la disolución permitiendo la formación de espeleotemas. En ocasiones, el hundimiento de finas láminas de calcita formadas sobre la superficie de lagos subterráneos da lugar a acumulaciones a modo de conos. La calcita también se deposita sobre paredes y techos generando formas redondeadas a modo de “nubes” (clouds). Los cristales de calcita (spar) de varios centímetros de longitud, formados bajo el agua, son también frecuentes en cuevas hipogénicas”*. En este menú se pueden seleccionar los submenús “Conos”, “Nubes, clouds”, “Folias” y “Spar de calcita”.

## Conclusiones

La app Hypogenic morphology se ha diseñado como una herramienta básica y accesible para espeleólogos y visitantes de cuevas. Con esta premisas y partiendo de los patrones comunes y que normalmente se repiten en cavidades hipogénicas de todo el mundo, se pretende dar acceso a información didáctica sobre cavidades hipogénicas mediante una herramienta informática gratuita y de fácil manejo al alcance de la mano. La app está diseñada para equipo y terminales con sistema operativo Android y disponible para su descarga en las páginas [www.cenm.es](http://www.cenm.es), [www.cuevashipogenicasdemurcia.es](http://www.cuevashipogenicasdemurcia.es) y en portal de descargas de Google Play.

Conocer estos elementos típicos de las morfologías hipogénicas, que en la mayoría de las veces pueden pasar inadvertidas o poco conocidas por los aficionados, es la condición necesaria para identificar este tipo de cavidades. Además de textos didácticos, la aplicación acerca al público material gráfico de ejemplos de estos elementos singulares en cavidades hipogénicas de la Región de Murcia y es válida para otros lugares o regiones. El conocimiento del medio natural fomenta el respeto por el patrimonio geológico que nos rodea y por consiguiente, es fundamental para su conservación. De este modo, generaciones futuras también podrán disfrutar de estas cavidades.

## Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a todo el equipo de CENM-naturaleza, Carlos Munuera, Juan Francisco Plazas, Alba Sánchez, Andrés Hurtado, Roberto Trives, Juan Antonio García, Ana Belén Cáceres, Antonio David Granados, Belén López, José L. Carcelén, Antonio Latorre, José Soto, Andrés Marín, José David Lisón, José Florencio, Jesús López, David Bayón,

Gracias a los comentarios y sugerencias en las pruebas de Alexander Klimchouk por la utilización de sus dibujos MRF y su especial colaboración. A nuestros amigos y colaboradores siempre dispuestos, Manuel Marín y José Liza.

Este proyecto se realiza con la colaboración de la Federación de Espeleología de la Región de Murcia, y la Dirección General de la Actividad Física y el Deporte de la Región de Murcia, proyecto Cuevas Hipogénicas de Murcia. [www.cuevashipogenicasdemurcia.es](http://www.cuevashipogenicasdemurcia.es) [www.espeleomurcia.es](http://www.espeleomurcia.es)

## Referencias

- Audra, P., Mocochain, L., Bigot, J. y Nobécourt, J.C. 2009. Morphological indicators of speleogenesis: Hypogenic speleogens. *Hypogene speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins*. Proceedings of the conference held May 13 through 17, 2009 in Chernivtsi, Ukraine, 23-32.
- Garay, P. 2013. Consideraciones sobre el karst y cuevas hipogénicas, con referencias al ámbito valenciano. *Boletín de la SEDECK*, 9: 16-29.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Rull, F. y Martínez-Frías, J. 2012. Espeleotemas y evidencias de cavernamiento hipogénico de la Sima de la Higuera (Pliego, Murcia). *IV Congreso Español cuevas Turísticas*, Palencia, 21-34.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M. y Rull, F. 2012. Boxwork and ferromanganese coatings in hypogenic caves: an example from Sima de la Higuera Cave (Murcia, SE Spain). *Geomorphology*, 117-118: 158-166.
- Gázquez, F. y Calaforra, J.M. 2013. Hypogenic speleogenesis and speleothems of Sima de la Higuera (Murcia, southeast Spain). *16<sup>th</sup> International Congress of Speleology*, Brno. Vol III: 78-83.
- Gázquez, F. y Calaforra, J.M. 2013. Origin of double-tower raft cones in hypogenic caves. *Earth Surface and Land Processes*, 38: 1655-1661.
- Gázquez, F. y Calaforra, J.M. 2015. La proyección turística de la Sima de la Higuera (Pliego). *Libro de Ponencias de las I Jornadas Regionales de Turismo Científico-Geológico*. Ed: Ayuntamiento de Pliego. 61-66.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Ros, A., Llamusi, J.L. y Sánchez, J. 2016. Hypogenic morphologies and speleothems in caves of the Murcia Region, south-eastern Spain. *Proceeding of the 3rd International Deepkarst conference*, Carlsbad. En prensa.
- Ginés, J., Fornos, J., Ginés, A., Merino, A. y Gràcia, F. 2014. Geologic constraints and speleogenesis of Cova des Pas de Vallgornera, a complex coastal cave from Mallorca Island (Western Mediterranean). *International Journal of Speleology*, 43: 105-124.
- González-Ramón, A., Segura-Herrera, A., Sánchez-Díaz, T.J., Ignatenko, A., Gea-López, R.D., Pérez-Martínez, P., Belmonte-Jiménez, G. y Carra-Vélez, R. 2014. La cueva de Luchena, un ejemplo de cavidad hipogénica relacionada con descargas de aguas subterráneas en el acuífero Pericay-Luchena (Lorca, Murcia). En: *Iberoamérica Subterránea*. (Ed. J.M. Calaforra and J.J. Durán). Asociación Española de Cuevas Turísticas, 321-331.
- Gracia, F., Fornos, J., Clamor, B., Febrer, M. y Gamundi, P. 2007. La cova de Sa Gleda I. sector classic de Ponent I, sector Cinc-Cents (Manacor, Mallorca): geomorfología, espeleogénesis, sedimentología i hidrología. *Endins*, 31: 43-96.
- Klimchouk, A. 2007. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and morphogenetic perspective. *Special Paper no. 1, National Cave and Karst Research Institute*, Carlsbad.
- Merino, A. y Fornós J. 2010. Los conjuntos morfológicos de flujo ascendente (Morphologic Suite of Rising Flow) en la cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca), *Endins*, 34: 87-102.
- Merino, A, Ginés, J. y Fornós J., 2011 Evidéncies morfològiques de processos hipogénics a cavitats de Mallorca, *Endins* 35: 165-182.
- Ros, A., Llamusi, J.L y Sánchez J. 2014. Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España). I *Congreso Iberoamericano y V Congreso Español sobre Cuevas Turísticas*. Aracena- Huelva. 403-418.

- Ros, A., Llamusí, J.L. y Sánchez, J. 2014. *Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia*, vol. I. edita CENM-naturaleza, Murcia, <http://cenm.es/Hipogenic/CUEVAS-HIPOGENICAS-MURCIA-I-dscg.pdf>.
- Ros, A., Llamusí, J.L. y Sánchez, J. 2016. Morfologías hipogénicas en la cueva del Puerto (Murcia, España). *Gota a Gota*, núm. 10, Eds: Grupo de Espeleología de Villacarrillo (G.E.V.) Villacarrillo, Jaén. 8-15. <http://www.cuevashipogenicasdemurcia.es/BIBLI/040-puerto-gota-a-gota-10.pdf>





Álvarez González, I. *et al.* Topografía 3D y análisis geológico de la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista (Bizkaia, España). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 191-204.

## **Topografía 3D y análisis geológico de la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista (Bizkaia, España)**

I. Álvarez González <sup>(1)</sup>, J. Moreno García <sup>(2)</sup>, A. Aranburu Artano <sup>(3,5)</sup>, M. Arriolabengoa Zubizarreta <sup>(3,5)</sup>, M. del Val Blanco <sup>(3,5)</sup>, P. Bilbao Lasa, I. Yusta Arnal <sup>(3)</sup>, y E. Iriarte Avilés <sup>(4,5)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbao (España),  
irantzu.alvarez@ehu.eus

<sup>(2)</sup> ADES Espeleología Elkartea, Gernika (España)

<sup>(3)</sup> Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbao (España)

<sup>(4)</sup> Laboratorio de Evolución Humana, Dpto. de Ciencias Históricas y Geografía, Universidad de Burgos, Burgos (España)

<sup>(5)</sup> Geo-Q ARANZADI S.C., Zorroagagaina, 20014 Donostia - San Sebastián (GIPUZKOA)

---

### **RESUMEN**

La Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista son, junto con las dolomías y el Karst del macizo de Ranero (Bizkaia), dos puntos destacados del patrimonio natural y geológico del País Vasco. La Cueva de Pozalagua destaca por la presencia de espeleotemas de numerosos tipos y la Torca del Carlista, por su parte, destaca por tener una sala que se sitúa entre las más grandes del mundo.

Para su estudio, y en el contexto de un proyecto de investigación multidisciplinar, se ha elaborado, por primera vez, una topografía tridimensional de gran precisión de la Cueva de Pozalagua. Asimismo, la nube de puntos obtenida, se ha unido a la nube de puntos de la Torca del Carlista obtenida por el equipo de Richard Walters por medio de un láser-escáner terrestre, así como a otra nube de puntos de la Torca obtenida mediante instrumentos más sencillos, pudiendo así realizar una comparación entre ambos métodos. Finalmente, se ha unido todo el conjunto con los datos LiDAR de superficie proporcionados por el Gobierno Vasco. La unión, en un único sistema de referencia, de los diferentes registros efectuados sobre las cavidades de la zona, ha permitido interrelacionar todas ellas y estudiar las relaciones entre diferentes cavidades y en relación al conjunto del paisaje. Por último, se han volcado los datos geomorfológicos de la Cueva de Pozalagua, con la intención futura de realizar una cartografía geomorfológica 3D.

**Palabras clave:** geomorfología, karst, LiDAR, topografía 3D.

## ***3D topography and geological analysis of the Pozalagua Cave and the Torca del Carlista (Bizkaia, Spain)***

### **ABSTRACT**

*The Pozalagua Cave and the Torca del Carlista are, together with the dolomites and the karst of Ranero (Bizkaia), part of the natural and geological heritage of the Basque Country. The Pozalagua Cave stands out for its speleothems of many types and the Torca del Carlista is well known because it has one of the world's biggest underground rooms.*

*Therefore, in this interdisciplinary research work it has been made, for the first time, a high resolution three dimensional surveying of the Pozalagua Cave. Additionally, the points cloud has been joined to the one obtained by the Richard Walters' team as well as to another topographic data cloud obtained by classical methods, which has allows us to compare both methods. Finally, the entire ensemble has been joined to the LiDAR data of the surface provided by the Basque Government. The ensemble of all the data in a spatial referent system has enabled to interrelate all of them and to study the relationship between the caves and with the landscape. The geomorphologic data of the cave has been put over the model with the purpose of creating a 3D geomorphologic map of the cave.*

**Key words:** geomorphology, karst, LiDAR, 3D surveying.

## Introducción

La Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista forman parte, junto con las dolomías y el karst del macizo de Ranero (Bizkaia), de un conjunto geológico de gran interés, y todas ellas son puntos destacados del patrimonio natural y geológico (LIGs) del País Vasco (<http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/informacion/lugares-de-interes-geologico/r49-u95/es/>). La Cueva de Pozalagua destaca por la presencia de grandes coladas, columnas estalagmíticas y por una de las mayores concentraciones de estalactitas excéntricas del mundo. Por su parte, la Torca del Carlista, destaca por tener una sala que se sitúa entre las más grandes del mundo. Ambas cavidades están separadas por una veintena de metros y, por lo tanto, su estudio conjunto puede arrojar luz sobre su estructura geológica y su formación, aportando interesantes datos sobre la historia geológica más reciente.

La topografía tridimensional es un instrumento clave para la documentación, el análisis y el conocimiento del paisaje kárstico, siendo su realización una fase de estudio previa fundamental para la catalogación y la conservación, y poder así promover su puesta en valor. El desarrollo de técnicas de captura masiva de puntos ha hecho que la tecnología láser-escáner sea una de las técnicas topográficas más utilizadas para la documentación del patrimonio natural y una tarea fundamental en todo trabajo de investigación de cavidades subterráneas.

Por ello, se ha planteado la realización de topografías tridimensionales de la Cueva de Pozalagua y La Torca del Carlista mediante laser-escáner, la comparación de estos datos con datos topográficos que los espeleólogos adquieren con métodos clásicos (tanto en la Torca del Carlista como en Pozalagua) y, finalmente, integrar todo el conjunto con los datos LiDAR de superficie proporcionados por el Gobierno Vasco. La unión, en un único sistema de referencia, de los diferentes registros efectuados sobre las cavidades de la zona, ha permitido vincular todas ellas y estudiar las relaciones entre diferentes cavidades y en relación al conjunto del paisaje. Un conjunto de datos de estas características permite estudiar la geología y el sistema kárstico de la zona de manera muy rigurosa.

## Localización y caracterización de la zona

La Cueva de Pozalagua es una cavidad situada dentro del espacio protegido del Parque Natural de Armañón, bajo el macizo calcáreo de las Peñas de Ranero. Está situado en el municipio vizcaíno de Carranza, en el Oeste de la provincia de Bizkaia, en la Comunidad Autónoma del País Vasco, en el límite con Cantabria (Figura 1). El paisaje es fundamentalmente calcáreo donde

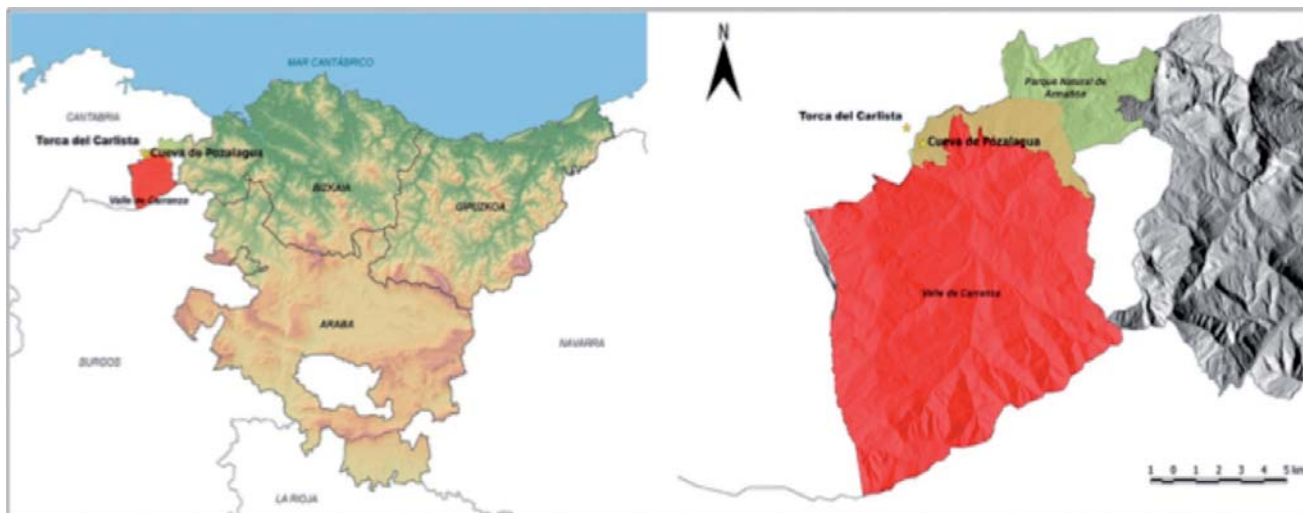


Figura 1. Mapa de situación del valle de Carranza, la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista

predominan las formas kársticas como dolinas y lapiaces desarrolladas sobre las calizas y dolomías del Cretácico Inferior. Una densa red de más de 200 cuevas y simas aporta a la zona un notable interés geológico (como es el caso de la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista) y también arqueológico (como en el caso de las cuevas de Santa Isabel, Ventalaperra o la Cueva del Polvorín) a la zona.

El Valle de Carranza, con una geología diversa en cuanto a la litología, una densidad elevada de cuevas que registran los distintos procesos geológicos de los últimos millones de años, un cauce fluvial bien desarrollado con distintos niveles de terrazas, y la proximidad con la costa, hacen de este entorno un lugar excepcional para el estudio de la historia geológica. Pero, además, la existencia de cavidades kársticas de la magnitud de La Torca del Carlista, así como el amplio muestrario de espeleotemas espectaculares de la Cueva de Pozalagua, sitúan al Valle de Carranza en la primera línea de interés, tanto desde el punto de vista geológico, de la Geo-diversidad, de la Biodiversidad y del Turismo.

## Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es relacionar tanto espacial como genéticamente ambas cavidades con el propósito de avanzar en el conocimiento de la formación de estas cuevas y la estructura del sistema kárstico.

Para ello se plantearon dos objetivos geológicos básicos. Por un lado, realizar una cartografía precisa en ambas cavidades y unir las para así poder estudiarlas en conjunto. El hecho de realizar una topografía con tecnología láser-escáner y contar con levantamientos de las cavidades realizados por métodos clásicos ha permitido también realizar una comparación de ambos métodos, que aunque diferentes en los resultados, pueden ser complementarios en este tipo de estudios. Por otro lado, realizar un estudio geológico del endokarst y cruzar con los datos cartográficos y litoestratigráficos ya existentes de la zona, para la correcta interpretación de su formación.

El registro topográfico tridimensional de la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista tiene, además de un gran valor en la investigación de la cavidad y de sus formas, un gran valor divulgativo, ya que permite dar a conocer a la sociedad en general el patrimonio natural que esconden estas cuevas. Así, la nube de puntos tridimensional obtenida, servirá para crear mapas precisos de la cueva, realizar animaciones virtuales que acerquen la cueva y la den a conocer, así como para realizar maquetas y reproducciones. Consideramos que esta labor de divulgación es inherente a la labor investigadora y un aspecto fundamental en la tarea de proteger estos lugares y promover el respeto hacia ellos.

## **Metodología**

### ***Topografía con láser-escáner terrestre***

La presencia e importancia del registro de las formas y microformas que configuran las cuevas, hace que los métodos clásicos no sean suficientes para la correcta documentación de cavidades subterráneas. La elaboración de la topografía tridimensional por medio de la tecnología láser-escáner permite la captura, sin contacto, de la geometría tridimensional de los objetos, con precisión, rapidez y un impacto mínimo sobre el entorno. Estas características la hacen especialmente apropiada para la documentación geométrica de entornos naturales complejos y delicados como es la Cueva de Pozalagua.

Por ello, en la Cueva de Pozalagua se ha utilizado el láser-escáner *Leica ScanStation P30*. El trabajo de escaneo consiste en ir posicionando el láser-escáner en sucesivas estaciones de forma que se solapen unos escaneos con otros y, de este modo, obtener una nube de puntos de diferentes partes de la cueva. El producto generado es una nube de puntos de alta densidad y en verdadera magnitud, a partir de la cual es posible realizar cálculos, obtener planos, modelizar elementos concretos o realizar modelos virtuales tridimensionales. El tratamiento de la nube de puntos se ha realizado mediante el software *Cyclone*, de la empresa Leica. Para que la nube de puntos esté georreferenciada en un sistema de referencia, es necesario dar coordenadas a una serie de puntos del exterior de la cueva. En este caso se dio coordenadas UTM a cinco estaciones ubicadas en el exterior mediante una estación total y un GPS.

### ***Topografía con métodos espeleológicos clásicos***

Los métodos clásicos de levantamiento de cavidades subterráneas, a pesar de su menor precisión, cumplen una función muy notable en el conocimiento de las cuevas ya que en muchos casos se trata del único método posible debido a la dificultad de acceso a las mismas. Por ello, se han desarrollado métodos de fácil ejecución y con una instrumentación fácil de introducir en las cuevas, que como veremos, obtiene muy buenos resultados.

El instrumento utilizado para el levantamiento, desarrollado por Beat Heeb (Cfr. <http://paperless.bheeb.ch/>), consiste en un distanciómetro láser *Leica Disto X310* en el que se han integrado una brújula y clinómetro digitales. El conjunto ofrece un alto grado de fiabilidad que,



según su fabricante, es de 2mm en distancia (0,05 – 10m) y 0,5° RMS en los ángulos (Cfr. [http://paperless.bheeb.ch/download/DistoX2\\_ManualDeUsuario.pdf](http://paperless.bheeb.ch/download/DistoX2_ManualDeUsuario.pdf)). Con él, se avanza por la cavidad desde la boca hasta el punto más bajo identificando estaciones base, como habitualmente se realiza en la exploración espeleológica, pero con el añadido de que desde cada una de las estaciones se lanzan de forma sistemática numerosos puntos en todas direcciones que se guardan en la memoria del instrumento. Estos puntos deben ser cuidadosamente seleccionados para que sean representativos del volumen de la cueva.

Los datos obtenidos se exportan a una base de datos en la que se identifican las estaciones y se atribuye un código a cada uno de los puntos lanzados desde ellas. Estos puntos se importan al programa shareware *Visual Topo v.5.4*, desarrollado específicamente por Eric David para topografía espeleológica (<http://vtopo.free.fr>), con el que se obtienen las coordenadas relativas. De nuevo, el resultado calculado se traslada a una hoja de cálculo, en la que se eliminan las estaciones base y se recalculan las coordenadas relativas de cada punto respecto de la entrada para obtener su coordenada UTM. De esta manera, se obtiene un listado de puntos que representan el volumen exterior de la cavidad con coordenadas UTM.

## **Resultados**

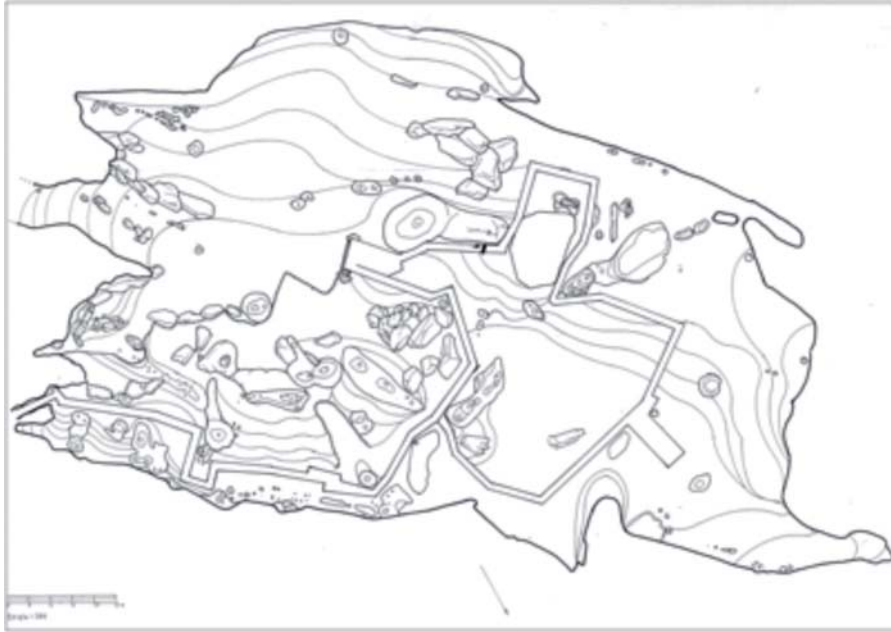
La documentación geométrica de las cavidades kársticas de Pozalagua y Torca del Carlista ha sido realizada utilizando y contrastando dos métodos diferentes y complementarios entre sí: el clásico, utilizado en el ámbito de la espeleología, y mediante tecnología láser-escáner terrestre.

### ***Topografía con láser-escáner: la Cueva de Pozalagua***

La Cueva de Pozalagua tiene una longitud de 125 metros, 70 metros de anchura y 12 metros de altura. Es una cueva acondicionada para las visitas turísticas, con un recorrido que discurre por una pasarela metálica. Durante todo el recorrido es posible observar formas y microformas de todo tipo: grandes coladas, espeleotemas en suelo y paredes, y una de las mayores concentraciones del mundo estalactitas excéntricas.

Esta caprichosa geometría de la cavidad, hacía necesaria una topografía precisa de la misma. Hasta la realización de este proyecto la cueva contaba con varios levantamientos topográficos de la planta de la cueva realizados por espeleólogos (Figura 2). Pero teniendo en cuenta que los elementos geomorfológicos más singulares de la Cueva de Pozalagua, los diferentes espeleotemas, están o bien en las paredes o en los techos de la cavidad, la elaboración de una topografía tridimensional de gran precisión de la Cueva de Pozalagua era fundamental tanto para el conocimiento de su formación, la conservación y correcta gestión de la cavidad, así como para su divulgación y/o socialización.

Para la elaboración de la topografía tridimensional se ha optado, efectivamente, por la tecnología láser-escáner, una de las técnicas más eficaces que existen actualmente para la documentación del patrimonio natural. Para ello se utilizó el láser-escáner *Leica ScanStation P30*, una estación total y un GPS para dar coordenadas absolutas al proyecto (Figura 3). Para la



*Figura 2. Topografía básica de la planta de la Cueva de Pozalagua, elaborada por la Sociedad de Ciencias Espeleológicas Alfonso Antxia en 2006*

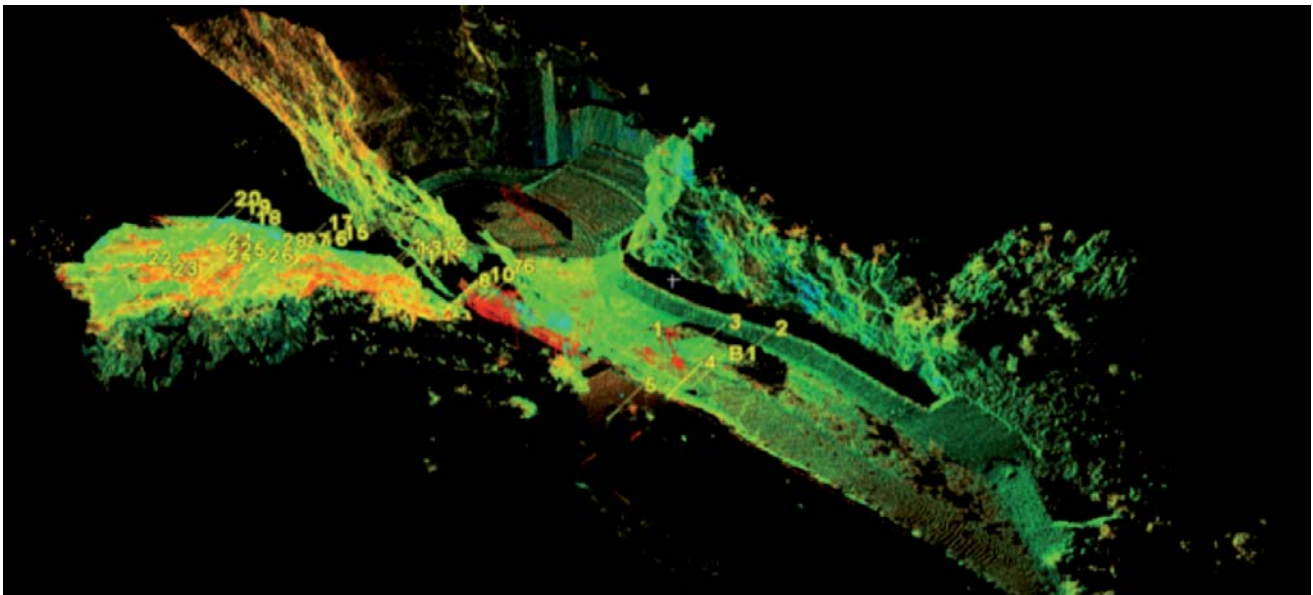
correcta documentación de la cueva es necesario planificar el recorrido de la poligonal donde se estacionará el instrumento, para que desde cada una de las estaciones se abarque el mayor volumen posible y de esta manera sea posible capturar toda la geometría de la misma. Cabe destacar que en algunos puntos de la cueva resultaba imposible estacionar el instrumento fuera de la pasarela, por lo que existen zonas de 'sombra' que es imposible capturar y que se deberán dibujar de forma manual en una fase posterior de modelado.



*Figura 3: Instrumento utilizado en el interior de la cueva*

Para poder georreferenciar el proyecto en el sistema de referencia ETRS89 se ha utilizado una estación total y un GPS para dar coordenadas absolutas a una serie de puntos de referencia que nos servirán para poder situar todo en proyecto en el mismo sistema de coordenadas y poder unir toda la información obtenida por diferentes métodos.

Una vez obtenidas las coordenadas absolutas de los puntos de referencia situados en el entorno de la cueva, en la Cueva de Pozalagua se realizaron 39 estaciones, realizadas durante dos días de trabajo (20 y 21 de abril de 2015). Se realizaron, a su vez, varios escaneos en la parte exterior de la cueva, para poder enlazarlo posteriormente, con los datos LiDAR proporcionados por el Gobierno Vasco.



*Figura 4. Nube de puntos completa de la cueva de Pozalagua y su entorno exterior, con el anfiteatro*

En este trabajo de escaneo de la Cueva de Pozalagua, se obtuvieron unos 530 millones de puntos, que permiten documentar la cueva y todas las formaciones de su interior con una elevada precisión (4). La distancia entre puntos varía entre los 6 mm entre puntos en la zona de mayor acumulación de excéntricas, aproximadamente 1,5 cm en las zonas próximas a la estación (hasta 10 m de la estación), y 10 cm en las zonas más alejadas (por ejemplo en el techo de cueva). Toda la información recogida constituye un extraordinario conjunto de datos que permiten tener un registro excepcional de las formaciones que se contemplan en la cueva.

Cabe destacar, también, que el laser-escáner tiene una serie limitaciones a la hora de acceder a las zonas más difíciles e inclinadas de la cueva. Por ello, se ha realizado un levantamiento topográfico por métodos clásicos de la zona sur de la cueva y poder, así, completar la cartografía de la misma (Figura 5).

### ***Topografía por medio de métodos clásicos: la Torca del Carlista***

Junto con la topografía de Pozalagua, se ha abordado también la topografía 3D de la Torca del Carlista, uno de los mayores volúmenes subterráneos del mundo. A diferencia de Pozalagua,



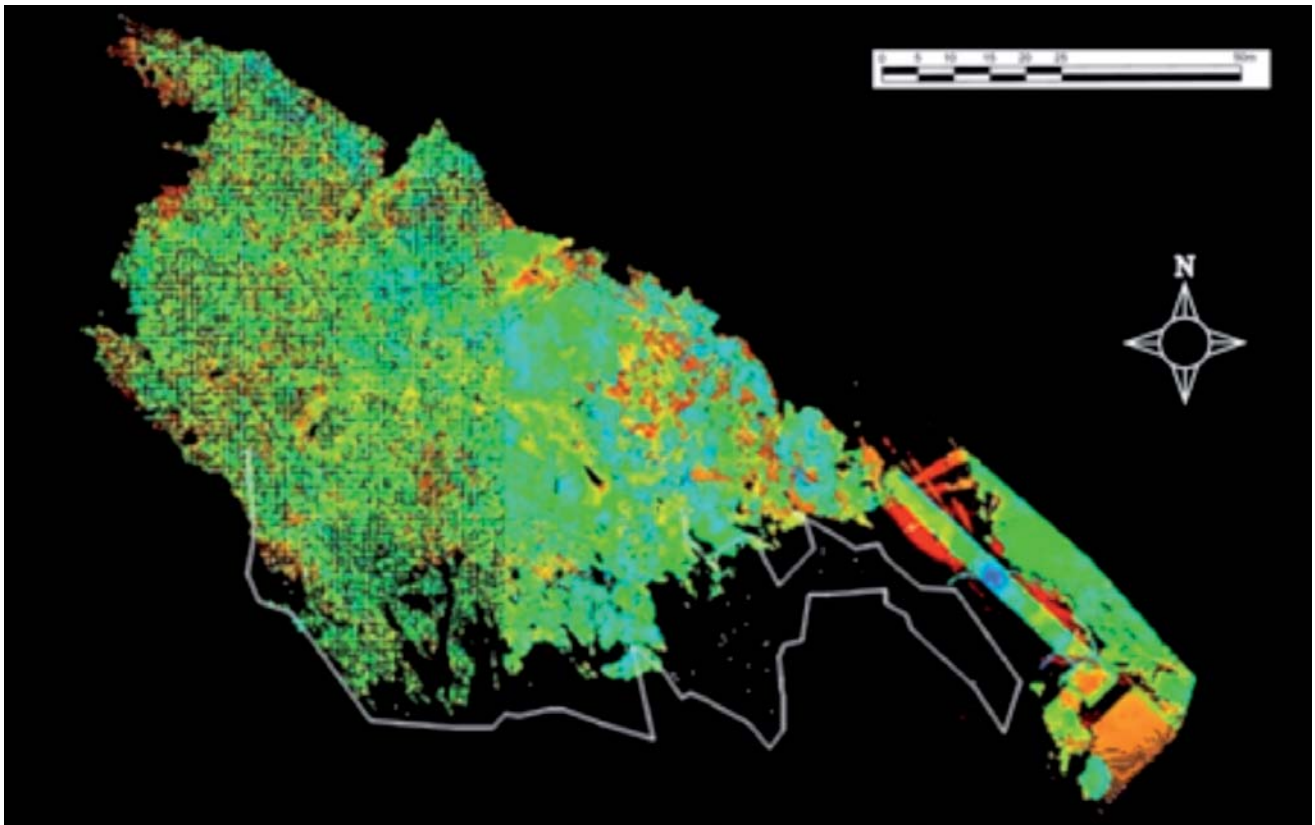


Figura 5: Imagen en planta de la nube de puntos y el levantamiento topográfico de la pared Sur

donde el acceso a la cavidad es sencillo, entrar en la Torca del Carlista exige descender un pozo vertical de 150 metros mediante técnicas de progresión por cuerda. Para salvar la dificultad que suponía para el acceso de personal experto con material de alta precisión, se implementó una metodología que permitiera a los espeleólogos obtener una nube de puntos con el material de topografía que disponen habitualmente en sus exploraciones, concretamente, el medidor *Disto X2*.

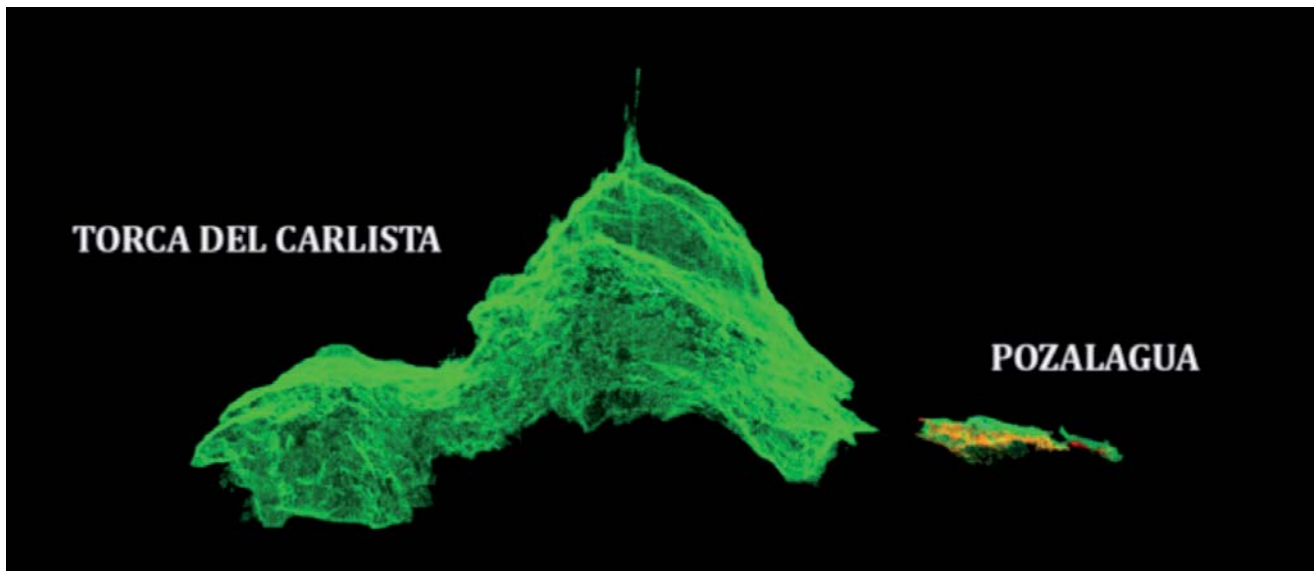
En total se realizaron cinco salidas de campo en las que se recogieron 3.550 puntos topográficos. La suma de todos ellos permitió obtener la nube de puntos que se muestra en la Figura 6.



Figura 6: Imagen de la nube de puntos obtenida con el *DistoX2* usada en la topografía espeleológica

### **Topografía con láser-escáner: la Torca del Carlista**

Quiso la casualidad que nada más finalizar este trabajo, la Torca de Carlista recibiera la visita del equipo de espeleólogos británicos liderados por Roo Walters. Este grupo está llevando a cabo una expedición espeleológica internacional para escanear los mayores volúmenes del Planeta y entre las que se habían puesto como objetivo la Gran Sala de la Torca del Carlista. Como resultado de su trabajo realizaron un escaneo 3D de alta precisión con un Riegl VZ-400, obteniendo una nube de puntos de la Gran Sala GEV de seis millones de puntos (el resultado ha sido publicado: *The world's voids in 3D*, en Revista Descent, 2015, núm.245, págs. 34-43 (<http://www.wildplaces.co.uk/>, 05/06/2016)) que ha permitido calcular las dimensiones de esta sala en 89.090 m<sup>2</sup> de superficie y 2,14 millones de m<sup>3</sup> de volumen. Gracias a su excelente predisposición, compartimos nuestros trabajos (Figura 7) y pudimos contrastar su escaneo de alta precisión con la nube de puntos obtenido por la metodología aquí desarrollada.



*Figura 7. Unión de las nubes de puntos de la Torca del Carlista y la Cueva de Pozalagua.*

El resultado es prácticamente idéntico a la gran escala. Salvada la obvia precisión de detalle de la topografía realizada por Roo Walters y su equipo, ambas topografías dan prácticamente los mismos datos de superficie y volumen de la Gran Sala GEV, lo que valida la metodología empleada.

### **Unión de los datos LiDAR de Superficie del Gobierno Vasco**

Finalmente, para completar el conjunto de datos georreferenciados del sistema de cavidades de la zona de estudio, se han incorporado al proyecto los datos del vuelo LiDAR de la Comunidad Autónoma del País Vasco del año 2012, accesibles en la Infraestructura de Datos Espacial del Gobierno Vasco (Geoeuskadi - <http://www.geo.euskadi.eus/s69-15375/es/>).

A estos datos, se les ha añadido las topografías obtenidas de la Cueva de Pozalagua y la Torca del Carlista. La unión, en un único sistema de referencia, de los diferentes registros efectuados



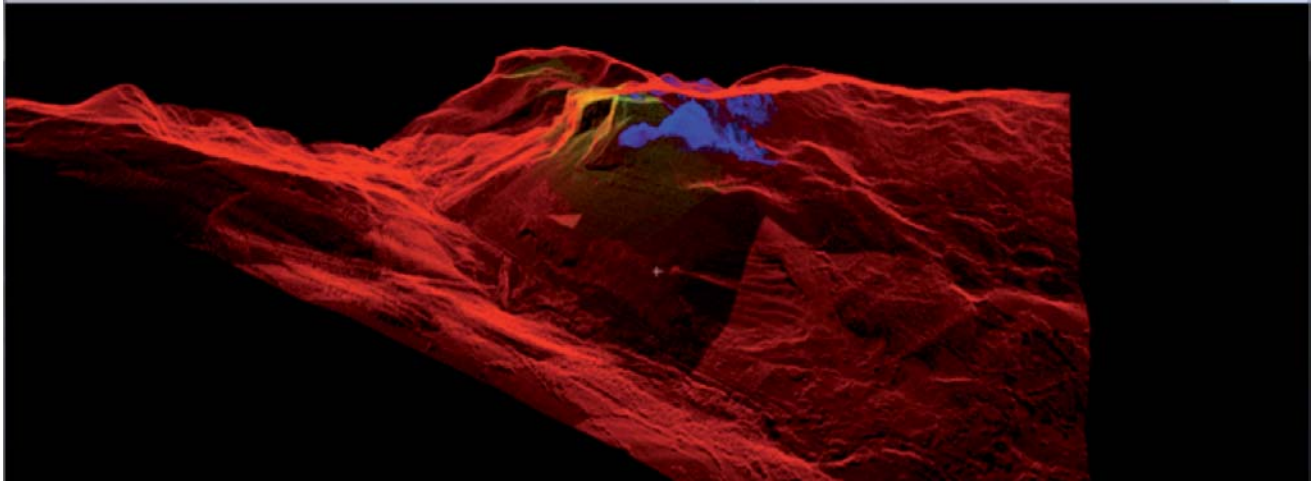


Figura 8. Unión de todas las nubes de puntos

sobre las cavidades de la zona, permite, a su vez, interrelacionar todas ellas y estudiar las relaciones entre diferentes cavidades y analizar, así, su estructura y composición como un único sistema kárstico y estudiar su relación con el paisaje.

### **Caracterización geológica del endokarst**

Las cavidades de Pozalagua y la Torca del Carlista son parte de la red kárstica desarrollada en las calizas arrecifales del Cretácico medio (Aptiense-Albiense, 125-100 millones de años Ma. en adelante) que forman el macizo kárstico (López-Horgue *et al.*, 2010a,b y 2012). El macizo presenta, una doble litología carbonatada: las calizas y dolomías. Esta doble litología queda claramente manifiesta en el modelado kárstico. Las calizas son rocas muy poco porosas y que precisan de zonas de fracturación para crearse cierta porosidad. Presenta un paisaje kárstico bastante evolucionado con desarrollo de lapiaz y grietas longitudinales profundas, sumideros y poljes. Las dolomías, sin embargo, son rocas de textura cristalina con elevada microporosidad que presentan menor disolución por la acción de agua de lluvia ligeramente ácida. Sus afloramientos naturales son menos abruptos, sin relieves importantes, predominando el proceso de meteorización mecánica por arenización (disgregación de la textura cristalina, produciéndose un sedimento de fracción arena gruesa).

La Cueva de Pozalagua es una cavidad desarrollada casi exclusivamente en el cuerpo de dolomía que se extiende desde la falla de Pozalagua en sentido suroeste. Dentro de la cueva, hoy en día son escasos los rasgos de disolución en paredes de roca. Sin embargo, predominan las formas gravitacionales (bloques de colapso antiguos) y los planos de fractura, tanto en el techo como suelo, y destaca la profusión de distintos tipos de espeleotemas. Estos rasgos sugieren que la formación de la cueva tuvo un desarrollo mixto de disolución en el borde calizo y de disgregación (arenización) de la dolomía y colapso de bloques a favor de los dos sistemas de fracturas principales NW-SE y SW-NE. Las distintas generaciones y tipos de espeleotemas sugieren también zonas de goteo, a través de planos de fractura, así como desarrollo de espeleotemas por capilaridad, a través de la microporosidad de la roca y/o espeleotemas de fases anteriores. Basándonos en el principio de superposición, en la cueva de Pozalagua se distinguen, por lo menos, 7 eventos geológicos diferentes (López-Horgue *et al.*, 2010), desde la formación de la

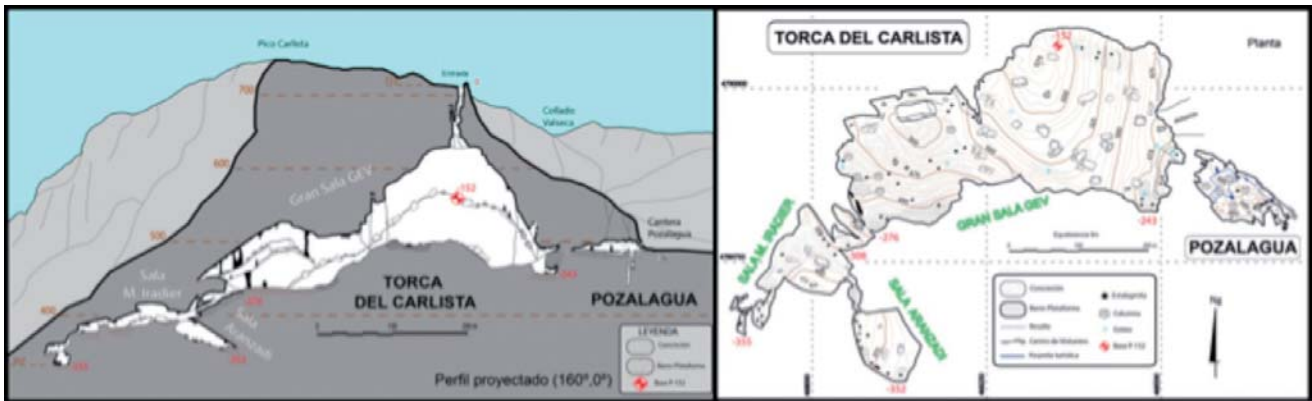


Figura 9: Alzado y planta de las cavidades

cavidad, relleno parcial, colapso, formación de espeleotemas (a), basculación de bloques y dos episodios más de formación de espeleotemas (b y c). La espectacular formación de espeleotemas excéntricos pertenece a la última fase de relleno de la cueva.

La geometría del endokarst de la Torca del Carlista se podría resumir en una gran sima vertical de 152 m, desarrollada a favor de una fractura, que se abre en forma de campana a una gran sala, la Gran Sala GEV y que deriva en otras menores hacia el W (salas Iradier y Aranzadi) y de forma descendente en cota (Figura 10). La Gran Sala GEV está formada principalmente por colapso o caída de bloques, mostrando planos de fallas y fracturas en el techo y un caótico depósito de bloques en la base. La mayoría de los bloques caídos que aparecen en superficie son calizos. Sin embargo, existe algún bloque dolomítico y de brecha hidrotermal, que indica la naturaleza última del contacto entre la cavidad y el litosoma dolomítico. A su vez, la mayor parte del techo es también calizo, y en el sector Pozalagua se observan algunas fracturas que contienen rasgos de dolomitización. A lo largo de esta Gran Sala no se observan formaciones de espeleotemas, salvo una gran colada en el extremo este de la cueva (sector Pozalagua) y pequeñas estalactitas a favor de las fracturas.

Las dos salas más bajas en cota, la Sala Iradier y la Sala Aranzadi, son de un tamaño inferior. Ambas salas, a pesar de contener también bloques de colapso, muestran marcas de disolución freática en algunas zonas, indicando la preservación del techo original en esta parte de la cavidad. Contienen además numerosos espeleotemas de tipo cortina y corralinas, desarrollados en las superficies de los bloques y suelo.

## Conclusiones

En el proceso de documentación de cavidades, la utilización de la tecnología láser-escáner 3D se postula como la tecnología fundamental en todo trabajo topográfico exhaustivo. La relativa facilidad de la toma de datos y su versatilidad, lo convierten en técnica topográfica necesaria en este tipo de trabajos que facilita la obtención de un registro geométrico preciso de las cavidades. Esta fuente de datos puede ser utilizada en el futuro para realizar visitas virtuales, análisis de las modificaciones en la morfología de la cavidad (si se realizasen capturas de este tipo a lo largo del tiempo), mapas de vulnerabilidad del interior de las cavidades y mediciones precisas e incluso reproducciones de las mismas. Sin embargo, también se ha podido constatar

la utilidad de los métodos espeleológicos clásicos, sobre todo en zonas de difícil acceso, que si bien no permiten capturar la geometría de las formas en detalle, sí pueden hacerlo con la geometría más general de las cavidades. Es, por lo tanto, fundamental gestionar los recursos disponibles de acuerdo con los objetivos del proyecto y elegir el método más apropiado en cada caso.

La unión de la topografía completa de ambas cavidades, proyectada en el relieve 3D y los datos litoestratigráficos del Macizo de Ranero, permite interrelacionarlas y analizar los diferentes parámetros que han podido controlar la formación y evolución de estas cavidades.

Ello ha permitido saber que la zona más próxima entre ambas cavidades está a la misma cota y a una distancia poco mayor de veinte metros (Figura 8). En el lado de la Gran Sala GEV, un enorme muro estalagmítico las separa; en la Cueva de Pozalagua, el techo baja hasta unirse al concrecionado suelo. De ello puede concluirse que bien pudiera ser el mismo volumen obstruido por una masa de rocas y concreción.

La preservación de morfologías freáticas en las salas Iradier y Aranzadi de la Torca del Carlista (cota aprox. 400 - 425 m), y en la Cueva de Pozalagua (cota aprox. 500 m), indica que la formación de estas galerías tuvo su origen en condiciones de saturación de agua. En la Gran Sala GEV, sin embargo, no se observan estas morfologías debido a la remodelación de las paredes por la caída del techo, al igual que en la Cueva de Pozalagua, que tuvo lugar después de formarse la cavidad inicial. Esto hace que los indicadores morfológicos de la formación inicial de la Sala GEV sean insuficientes, y por tanto no se puede concluir si hubo una única (y grande) fase de formación o si hubo varias fases de formación, ligados al descenso del nivel freático, con desarrollo de diferentes niveles de cavidades que coalescieron posteriormente, ya en condiciones vadosas. La disminución de la presión del agua sobre las paredes de la cavidad (cuando la cavidad pasa a condiciones vadosas), unido a la alta fracturación de la roca, y la relativa abundancia de la dolomía en algunos planos de estratificación, debilitan la cohesión de la roca, y en consecuencia, pudo provocar la desestabilización de los techos y el colapso de las cavidades en esta zona.

Durante las primeras fases de desarrollo, desde la formación de cavidades hasta el colapso de paredes y techos, tanto la Torca del Carlista como Pozalagua comparten la misma historia geológica (fases 1 a 4 de Pozalagua). El desplome de las paredes y techos pudieron ser polifásicos y sucederse más de una vez, hasta alcanzar un perfil de equilibrio. Tras la remodelación mecánica de las salas en la Torca del Carlista, una primera fase de formación de espeleotemas estrechamente ligada a puntos de goteo concretos o fisuras, sella y fosiliza el momento de inestabilidad previo. En Pozalagua sin embargo, un segundo movimiento, bien de reajuste de bloques o por hundimiento del piso kárstico, queda registrado en la basculación de algunos bloques previos junto con los espeleotemas crecidos sobre ellos. A partir de este momento, la Cueva de Pozalagua es tapizada por distintas fases de formación de espeleotemas, mientras el sistema kárstico sigue su evolución. Como resultado de este profuso desarrollo de espeleotemas, la Cueva de Pozalagua quedó aislada de la de la Torca del Carlista.

El trabajo presentado muestra la primera parte de un proyecto más amplio que pretende estudiar y dar a conocer el sistema kárstico del Valle de Carranza en su conjunto. El siguiente objetivo será sumar tanto los datos endokársticos como los geológicos regionales a la nube de

puntos, con la visión futura de realizar una cartografía completa 3D y su tratamiento y análisis mediante un Sistema de Información Geográfico (SIG).

## **Agradecimientos**

Los autores quieren agradecer a las siguientes entidades y personas su apoyo en este proyecto: a ADES Espeleología Elkartea y al Grupo Espeleológico Esparta, por su ayuda en la tareas de campo. Al Ayuntamiento de Carranza y en especial a su alcalde, Raúl Palacio Portillo, por su interés en este proyecto y por toda la colaboración. A las guías del Centro de Visitantes de la Cueva de Pozalagua. A la empresa Leica-Geosystems, en especial a Juan Unanue, por su ayuda en el trabajo de campo. Al Gobierno Vasco por la ayuda concedida para la realización del proyecto y a la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea por el soporte en la labor de investigación.

## **Referencias**

- Adel Haddad, N. 2011. From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites, *Journal of King Saud University- Engineering Sciences*, 23, 109-118.
- Amparo Núñez, M. y Felipe Buill, M. 2013. 3D model of the Can Sadurní cave, *Journal of Archaeological Science*, Volum,e 40, Issue 12, 4420-4428
- Benito-Calvo, A., Ortega Martínez, A.I., Ruiz García, F., Karampaglidis, T., Campaña, I. y Martín Merino, M.A. 2013. Aplicación de escáneres láser 3D y técnicas GIS para la reconstrucción y análisis de yacimientos arqueológicos: Las galerías de las Huellas (Complejo Kárstico de Ojo Guareña, Burgos) *VII Reunión de Cuaternario Ibérico*, La Rinconada - Sevilla.
- Iriarte, E., Aranburu, A. y Arriolabengoa, M. 2013. Geoarqueología de la cueva de Arlanpe (Lemoa, Bizkaia). En J. Rios-Garaizar, D. Garate, & A. Gómez-Olivencia (Eds.), *La cueva de Arlanpe (Lemoa): Ocupaciones humanas desde el Paleolítico Medio Antiguo hasta la Prehistoria Reciente*, pp. 37-48.
- Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M. y Villaverde, N., 2010. Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37, 499-507.
- López-Horgue, M., Aranburu, A., Castellano, A., Razkin, A., Iridoy, P. y Arriolabengoa, M. 2010a. La cueva de Pozalagua (Karrantza, Bizkaia). Durán, J.J., Carrasco, F., (Eds), *Cuevas: patrimonio, naturaleza, cultura y turismo*, Actas, 435-449.
- López-Horgue, M.A., Iriarte, E., Schröder, S., Fernández-Mendiola, P.A., Caline, B., Corneyllie, H., Frémont, J., Sudrie, M. y Zerti, S. 2010b. Structurally controlled hydrothermal dolomites in Albian carbonates of the Asón valley, Basque Cantabrian Basin, Northern Spain. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 1069-1092.
- López-Horgue M. A., Herrero, J. M., Aranburu, A., Yusta, I., Franco, A. y Velasco, F. 2012. El Valle de Carranza (Bizkaia) y su Patrimonio Mineralógico. *Macla* 16, 268-280.
- Moreno, J. 2012. La protección del sistema Malloku y el karst de Peña Forua. En: *La cueva de Goikoetxe y el karst de Peña Forua*, Ed. Euskal Espeleologoen Elkartea/Unión de Espeleólogos Vascos). Karaitza bilduma, 164 pp.





## Aspectos geológicos y morfológicos de la cueva de las Güixas (Villanúa, Huesca)

R. Giménez Portero <sup>(1)</sup> y L. Ezquerro Ruiz <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Cueva de las Güixas, Turismo Villanúa S.L.U., Villanúa, Huesca (España),  
reiesgimenez@gmail.com

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (España)  
lope@unizar.es

---

### RESUMEN

La cueva de las Güixas es una cavidad kárstica localizada en el macizo de Collarada en el sector surpirenaico centro-occidental. La cavidad está desarrollada en calizas con nódulos de sílex del tránsito Paleoceno-Eoceno fosilizadas por brechas calcáreas eocenas. Su desarrollo puede establecerse aproximadamente en la fase final de las últimas glaciaciones cuaternarias, probablemente tras el periodo Würm III (< 25000 años), que es la edad media del sistema kárstico de Collarada, con el que está comunicada. La mayor parte de la cueva se encuentra ocupada por un cauce subterráneo que en la actualidad permanece activo, inundando las partes bajas esporádicamente. Las avenidas presentan un comportamiento torrencial con incrementos súbitos del caudal en épocas de recarga del acuífero, que coinciden con eventos de alta pluviometría en cortos intervalos de tiempo o estacionalmente tras el deshielo. En estas zonas bajas aparecen formaciones erosivas y estructuras de desprendimiento. En las zonas situadas a mayor altura y protegidas de la erosión predominan los procesos de precipitación de carbonato, debido al agua de infiltración que llega a la cueva a través de conductos de disolución y fracturas. Como consecuencia, se forman distintos tipos de espeleotemas, siendo las formas más frecuentes: coladas, estalactitas, banderas, cortinas, estalagmitas, columnas y gours. La dirección de estratificación, fracturación y circulación de aire condiciona la disposición de los espeleotemas y su morfología.

**Palabras clave:** cavidad kárstica, cauce subterráneo, espeleotemas, Pirineos.

## *Geological and morphological aspects of the cave of Güixas (Villanúa, Huesca)*

### ABSTRACT

*The Güixas Cave is a karstic cavity located at the Collarada Massif, in the Central-Western South-Pyrenean zone. The cave has been developed in mudstones with silex nodules from Paleogene-Eocene which are overlaid by Eocene carbonate breccia. The cave development can be established during the last Quaternary glaciation phases, probably after the Würm III period (<25000 years), that is average age of the karstic massif Collarada. An extensive area of the cave is occupied by an active channel, which floods the lower zones in episodic events. The high energy discharges, flashflood-like, coincide with short periods of high rainfall rate or seasonally after snowmelt. In the lower zones, erosive forms and collapse structures have been developed. Higher areas are protected of the erosion and, carbonate precipitation processes occur, closely to dissolution holes and fractures. Consequently, a great rock formation types as stalactites, stalagmites, flags, curtains, columns or gours have been formed. The direction of stratification, fractures and wind flow controls the speleothems orientation and morphology.*

**Key words:** karstic cave, speleothems, Pyrenees, underground river.

## Introducción

La cueva de las Güixas es una cavidad kárstica situada en el valle del Aragón, que supone uno de los recursos turísticos más significativos de esta zona del Pirineo aragonés. Desde su acondicionamiento turístico en el año 1929 (reequipada en 1995), es una de las cuevas más visitadas de la comunidad de Aragón. El cambio en el modelo de gestión y la apertura de un nuevo centro de interpretación, *C.I.N. Subterránea*, en el año 2009, ha conllevado que el número de visitas se haya ido incrementando en los últimos años, con una media de 20000 visitantes por año. Actualmente presenta 420 m de recorrido habilitado para el turismo, ya que su designación como Lugar de Interés Comunitario (LIC) por la Red Natura 2000 en el año 2010 limitó el uso de sus salas superiores obligando a tomar medidas preventivas para la conservación y protección del hábitat de los quirópteros. Las galerías superiores constituyen un hábitat excepcional para distintas especies de murciélagos (e.g. *Barbastella barbastellus*, *Miniopterus scheirbersii*, *Myotis emarginatus*, *Rhynolophus hipposideros*), debido a la temperatura más elevada y con menores variaciones que se dan en éstas respecto al resto de la cueva, por ello se restringió el acceso de las visitas a las zonas más elevadas.

El conocimiento sobre las dimensiones y morfología de la cavidad es considerable, existiendo varias cartografías, debido a las numerosas exploraciones espeleológicas llevadas a cabo por grupos españoles y franceses en las últimas décadas (e.g. GSC d'Alsace, 1959; USAN Nancy, 1959-1963; FERES, 1964-1967; GEB, 1968; CLRS Lunéville, 1968-1972; GERS, 1994). En estas cartografías se recogen las primeras aproximaciones sobre las características geológicas y morfológicas, que hacen de la cueva de las Güixas un entorno de especial interés, pero hasta la fecha no se ha realizado un estudio exhaustivo sobre su geología.

Desafortunadamente, pese al buen conocimiento de la topografía de la cueva de las Güixas, nunca se le ha prestado un especial interés desde el punto de vista científico, quizá debido al gran número de visitas y modificaciones realizadas para habilitar su uso turístico o simplemente debido a la falta de inversión. Las principales actuaciones de investigación realizadas, aunque temporalmente muy discontinuas, se han limitado a excavaciones arqueológicas. Las primeras de ellas permitieron recuperar restos arqueológicos neolíticos, de la Edad del Bronce y de época romana (e.g. Lorenzo, 1992). Posteriormente, el equipo de la cueva llevó a cabo varias campañas de excavación (2000-2004), en la que se recuperaron nuevos restos arqueológicos como fragmentos de vasijas y una moneda de época romana, junto con restos paleontológicos pertenecientes a huesos largos y dientes de macromamíferos.

En la actualidad se está intentado fomentar el interés por la cueva como posible laboratorio natural, ya que debido a su posición topográfica y características geológicas, tiene una dinámica interna particular. Su situación al pie del macizo kárstico de Collarada, implica que sus condiciones ambientales sean relativamente más suaves que otras cuevas pirenaicas situadas a mayor altitud. Esta situación también hace que se encuentre conectada con el nivel de base de las aguas de infiltración de todo el sistema kárstico, lo que implica eventos periódicos de inundación. En sus salas más protegidas, los procesos permanentes de infiltración-precipitación forman numerosos tipos de espeleotemas, con un crecimiento muy controlado por la estructura y dinámica de la cueva.

Por todo esto, este trabajo pretende dar a conocer las posibilidades que presenta esta cavidad para el desarrollo de futuros trabajos de investigación (e.g. registros de temperatura y humedad, relación pluviometría-descarga interior, datación de espeleotemas, etc.) que permitan ampliar el conocimiento de la cueva de la Güixas y mejorar su oferta turística.

## **Marco geológico**

La cueva de las Güixas se sitúa al pie del macizo kárstico de Collarada, el cual se encuentra localizado en el sector surpirenaico centro-occidental, formando parte del dominio de las Sierras Interiores (Fig. 1a). Se accede a la cavidad desde la localidad de Villanúa, ubicada al suroeste del pico Collarada, en la confluencia del Valle del Aragón y el barranco de Villanúa, con orientación N-S y W-E, respectivamente.

El dominio de las Sierras Interiores, de orientación WNW-ESE, está compuesto por el apilamiento de rocas del Cretácico Superior y del Paleoceno-Eoceno durante la orogenia Alpina, formando un espectacular conjunto de pliegues y cabalgamientos imbricados. Este sistema de cabalgamientos es el resultado de la superposición de dos fases tectónicas que dieron lugar a dos generaciones de estructuras (Teixell *et al.*, 1994; Teixell, 1996). Durante la primera fase compresiva se formó un sistema de cabalgamientos imbricados con pliegues asociados, de orientación WNW-ESE y vergencia sur, denominado *sistema de cabalgamientos de Larra*. Este sistema se encuentra constituido por la superposición de varios cabalgamientos que implican materiales de la serie cretácica-paleocena (Fig. 1b y c). La deformación interna en estos materiales fue acomodada mediante mecanismos de presión-disolución evidenciados por juntas estilolíticas, planos de esquistosidad y venas de calcita. La segunda fase compresiva se caracterizó por la formación de grandes pliegues vergentes hacia el sur que deforman el sistema de cabalgamientos previo (Teixell y García-Sansegundo, 1995). La vergencia sur de estas estructuras se relaciona con la acomodación del cabalgamiento basal de Gabarnie (Choukroune *et al.*, 1968).

En la zona de Collarada se reconocen tres láminas cabalgantes con un espesor medio de 350 m, dividiéndose cada una de las láminas en dos grandes unidades estratigráficas, Areniscas de Marboré (Cretácico Superior) y Calizas paleocenas (Paleoceno-Eoceno). Desde la zona central del macizo hacia el SW, la serie gana buzamiento desde ~ 10° S hasta llegar prácticamente a verticalizarse en el contacto con el flysch eoceno de la Cuenca turbidítica de Jaca, que marca el límite sur de las Sierras Interiores. La unidad de Areniscas de Marboré, presenta un espesor medio de 150 m y está compuesta por areniscas cuarcíticas y bioclásticas. Esta unidad conforma siempre la unidad basal dentro de cada lámina y supone el nivel de despegue de los cabalgamientos. Los depósitos del Paleoceno-Eoceno se corresponden con un paquete carbonatado de 150-200 m de espesor, dentro del cual cabe distinguir: (i) la formación Salarons (Daniense) compuesta por 40 m de dolomías; (ii) la formación de calizas con algas (Thanetiense) que alcanza los 100 m de espesor y también presenta fragmentos de corales y foraminíferos; y (iii) la formación de calizas con nódulos de sílex (Ilerdiense) de hasta 50 m de espesor se localiza siempre a techo de las láminas de cabalgamiento. Sobre esta última unidad se disponen discordantes o en contacto tectónico la sucesión turbidítica del flysch eoceno.

En el entorno Villanúa, entre los materiales del flysch y las calizas con nódulos de sílex, aparece intercalado un depósito de brechas calcáreas, de gran continuidad lateral y hasta 200 m de espesor, denominado *megacapa de Villanúa* (Teixell et al., 1994). La megacapa de Villanúa (Megabrechas 3 en Fig. 1b) fue atribuida al Cuisiense superior (Eoceno) en función del estudio del nannoplancton calcáreo en las turbiditas que la circundan (Labaume et al., 1985). Localmente, en el fondo del valle, la megacapa se dispone de forma erosiva sobre las calizas con nódulos de sílex (Labaume et al., 1985). En la parte inferior del contacto, las calizas con nódulos de sílex están formadas por calizas grises de textura *wackestone* que presentan bioclastos

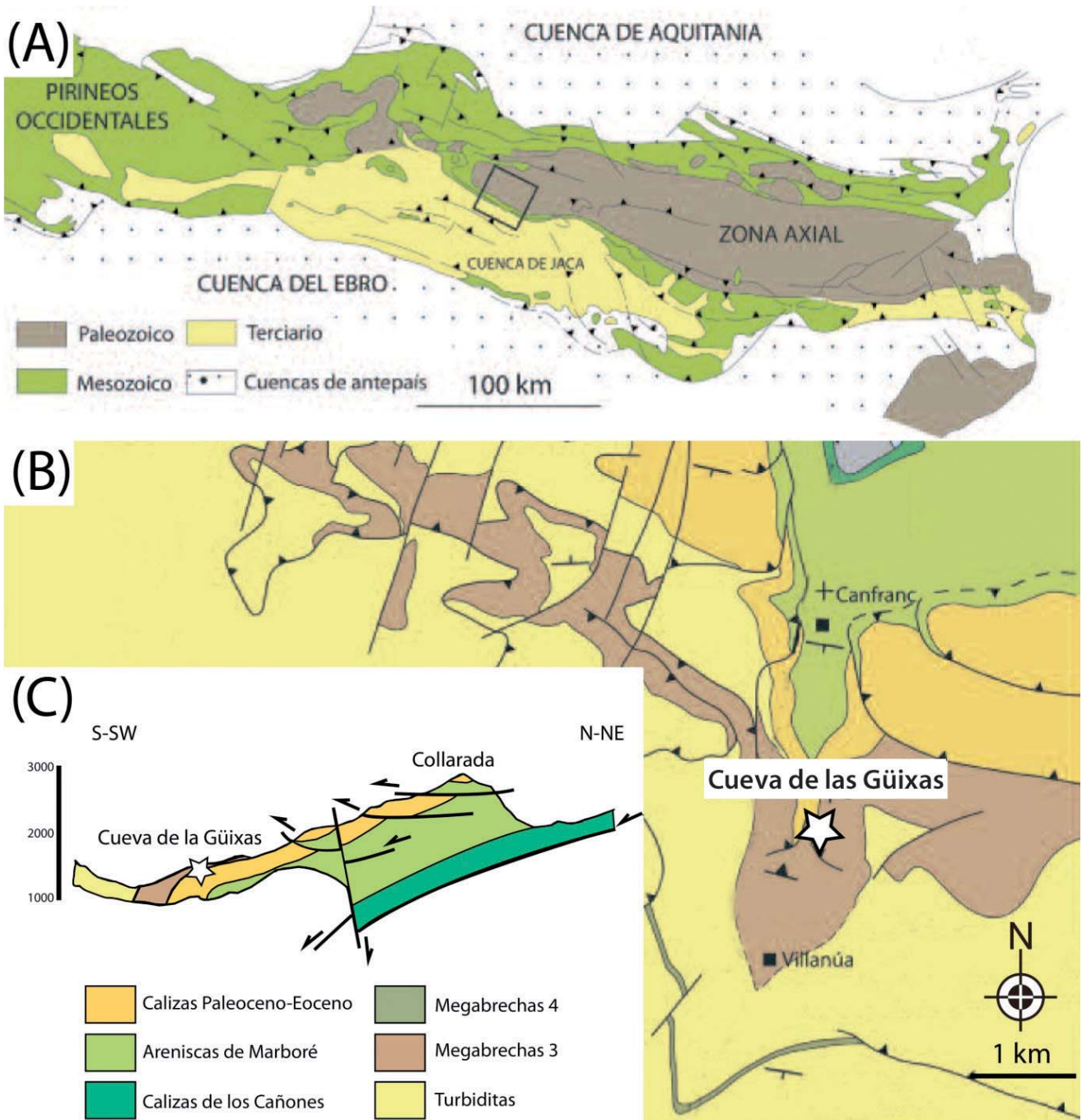


Figura 1. a. Mapa geológico del Pirineo. b. Mapa geológico del macizo de Collarada. c. Corte geológico del macizo de Collarada. Modificado de Ríos et al. (1987) y Teixell (1996)



de bivalvos, equínidos y foraminíferos (e.g. operculinas, discocyclinas, nummulites), destacando los nódulos de sílex de tonos oscuros y tamaños de hasta 80 cm de diámetro. En la parte superior del contacto, la megacapa está formada por brechas con clastos o bloques de caliza, areniscas, calizas con sílex y margas, con dimensiones muy variables, desde pocos centímetros hasta casi 1 km (Teixell *et al.*, 1994). Hacia techo, la megacapa de Villanúa culmina con tramos de calcarenitas y margas. La discontinuidad entre estas dos unidades ha favorecido una mayor circulación de agua y una disolución más intensa de las calizas con nódulos de sílex, y como consecuencia la formación de la cueva de las Güixas.

Durante la fase final de las últimas glaciaciones cuaternarias, tras el periodo Würm III (< 25000 años), el conjunto predominantemente calcáreo de las Sierras Interiores fue intensamente karstificado. De esta manera, el dominio actual de las Sierras Interiores alberga uno de los mayores sistemas endokársticos del mundo, tanto en recorrido como en profundidad, destacando los sistemas de Lecherines, Cotiella, Tedeñera o Collarada. El agua de infiltración, procedente de precipitaciones y deshielo, ha generado decenas de kilómetros de galerías subterráneas, a través de la disolución preferente de las calizas paleocenas, desarrollando acuíferos de entidad regional. Las direcciones de flujo dentro de estos materiales están determinadas por la vergencia sur de las estructuras tectónicas y por la red de fracturas NE-SW, transversales a la dirección general del conjunto Cretácico-Paleoceno. El drenaje de estos materiales da lugar a importantes surgencias localizadas en el fondo de los principales valles (Teixell *et al.*, 1994).

En el caso concreto del macizo de Collarada (2884 m s.n.m.) existen más de 50 cavidades inventariadas, entre las que destaca la cueva Buchaquera, con más de 700 m de profundidad y casi 2500 m de recorrido. El agua infiltrada en las partes altas del sistema, fluye a través de las grandes diaclasas y fallas verticales para posteriormente confluir en un colector subterráneo (río Bellanuga), de aproximadamente 1000 m de desnivel y 7 km de recorrido (Bengoetxea *et al.*, 1994). Este curso subterráneo circula con dirección E-W desde la Buchaquera hacia las surgencias situadas en las proximidades de la confluencia del barranco de Villanúa y el río Aragón. En esta zona se localiza el contacto de las calizas paleocenas con el flysch eoceno, que actúa de barrera impermeable, produciendo abundantes fuentes. La cueva de las Güixas es la cavidad conocida más basal de este sistema, situada a 981 m s.n.m. al pie del macizo rocoso, en el punto más bajo donde afloran los materiales karstificables de Collarada. La cueva actúa como un importante punto de surgencia kárstica constituyendo junto con la vecina sima del Rebeco las principales fuentes del río Bellanuga, y por lo tanto, del sistema de Collarada. Cuando el sistema entra en carga las dos cavidades actúan como *trop-plein*, llegando a rebosar por la boca de la sima del Rebeco e inundar el nivel medio de la cueva de las Güixas (Bengoetxea *et al.*, 1994).

### **Geomorfología y dinámica de la cueva de las Güixas**

La cueva de las Güixas es una cavidad de notables dimensiones con 1100 m de recorrido y 67 m de desnivel (Fig. 2). La morfología de la cueva se encuentra fuertemente controlada por la estratificación de las calizas con nódulos de sílex (091, 35S), bien reconocida en la geometría plana del techo de la cueva que coincide con el muro de varios estratos (Fig. 3). La cueva presenta una forma alargada de orientación E-W, con valores muy próximos a la estratificación de



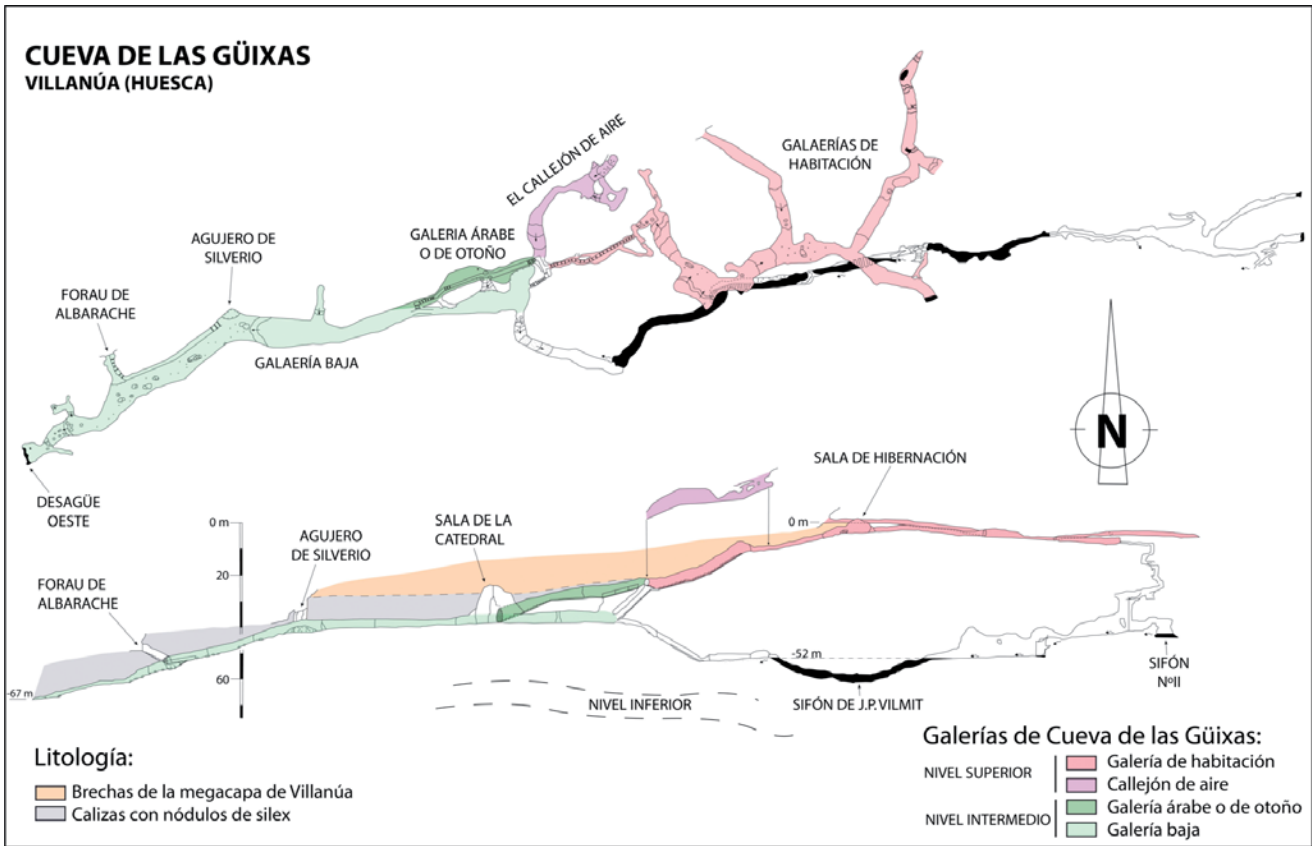


Figura 2. Cartografía interior de las galerías de la cueva de las Güixas (modificada de Bengoetxea et al., 1994)

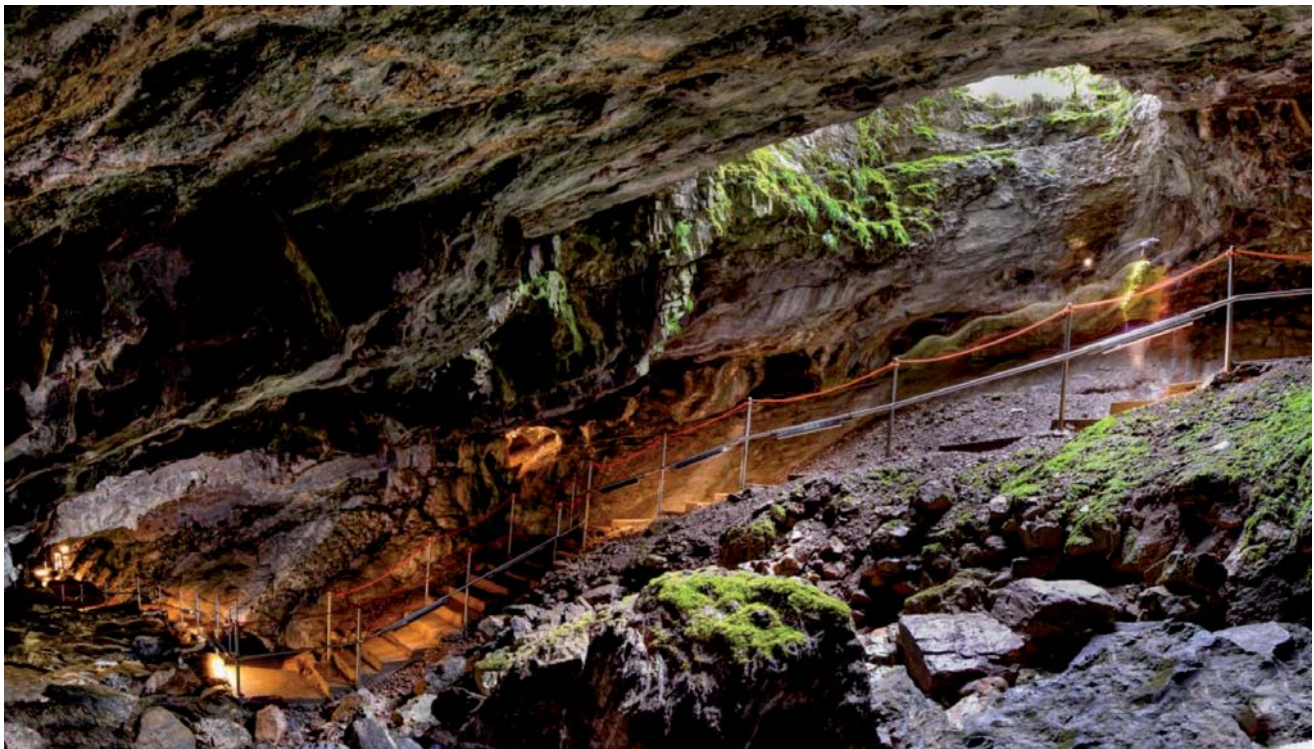
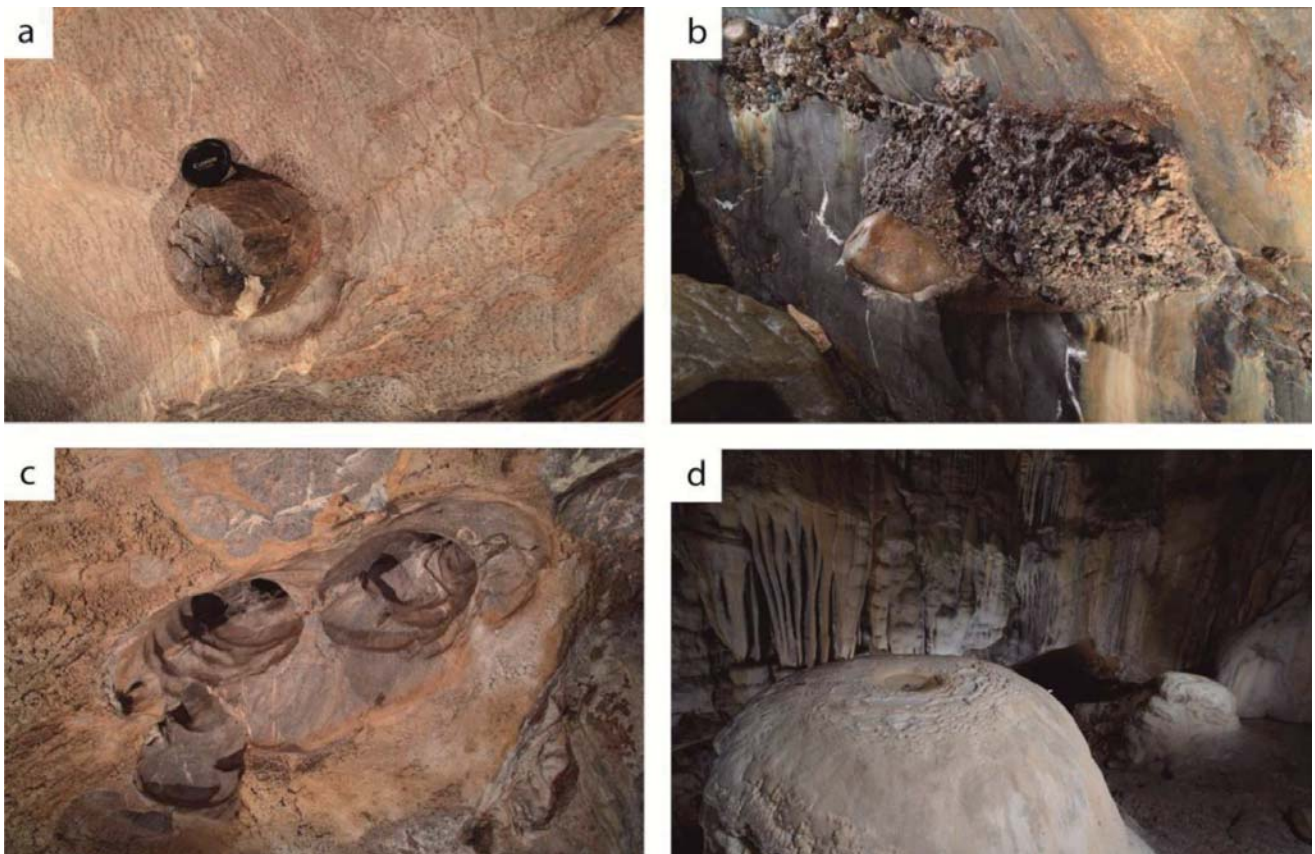


Figura 3. Galería baja de la cueva de las Güixas. Se aprecia el techo plano que sigue la dirección de la estratificación. Se observa el cauce del río y la dolina (foto: Sergio Laburu)

las calizas, y una pendiente media de 6,7% con caída constante hacia el sur sólo interrumpida por pequeños escalones relacionados con la fracturación. Las fracturas se corresponden con diaclasas y fallas que conforman una red con direcciones predominantemente NE-SW y NW-SE, ligeramente oblicuas a la orientación de la cueva. Estas fracturas controlan las rupturas de pendiente producida por los escalones y la dirección de las ramificaciones de las galerías superiores.

La cueva está formada por tres niveles de galerías: (i) el inferior (no cartografiado) es activo y se caracteriza por la presencia de un río subterráneo que hacia el oeste drena al río Aragón (Cuchi y Sancho, 1990); (ii) el nivel intermedio corresponde a la galería por donde se accede normalmente a la cavidad y por la que circula un curso torrencial esporádicamente en época de lluvias intensas o tras el deshielo (Galería Baja en Fig. 2); y (iii) el nivel superior, situado 15 m sobre el anterior es completamente fósil (Galerías de habitación y Callejón del aire en Fig. 2).

El río subterráneo que ocupa el nivel inferior actúa de colector del agua de infiltración de todo el sistema kárstico. Este nivel se comunica con el nivel intermedio a través de un complejo sistema compuesto al menos por cuatro sifones (Bengoetxea *et al.*, 1994), entre los que destacan el sifón de Jean Pierre Vilmit y el sifón nº II (Fig. 2). La comunicación del nivel inferior con el nivel superior es a través de un estrecho paso desarrollado en diaclasas y planos de estratificación que se abren paso verticalmente al SW del sifón nº II.



*Figura 4. a. Detalle de las calizas con nódulos de sílex en el interior de la cueva (foto: Luis Moya). b. Relleno detrítico (foto: Luis Moya). c. Formaciones coralinas y galerías ciegas en el techo de la galería baja (foto: Luis Moya). d. Panorámica de La Catedral en la que se observan las estalagmitas en primer término y las coladas al fondo (foto: Sergio Laburu)*



El nivel intermedio de la cueva corresponde a la zona habilitada actualmente para la visita turística, realizándose el acceso por el "Forau de Albarache" situado al oeste de la cavidad (Fig. 2). Este nivel se encuentra desarrollado en las calizas con nódulos de sílex (Fig. 4a) y se compone principalmente de una galería, denominada "Galería Baja" de 240 m, que hacia el este gana altura hasta la sala de mayor amplitud y desarrollo vertical de la cueva llamada "La Catedral" (Fig. 2).

La Galería Baja se encuentra ocupada por un cauce subterráneo que fluye a favor de la pendiente desde el sifón de Jean Pierre Vilmit hasta el desagüe oeste. La geometría canaliforme de la sección del cauce es indicativa de un comportamiento erosivo. El relleno del canal está integrado por cantos de carácter poligénico pertenecientes a materiales de las distintas unidades estratigráficas del macizo y por bloques calcáreos de hasta 2 m de diámetro, provenientes en su mayoría de desprendimientos de las paredes de la cueva. Su geometría subangulosa-redondeada indica que en los escasos 240 m de recorrido los procesos de desgaste son muy efectivos, en contraste con los breves y escasos eventos de inundación en los que discurre agua por el cauce (Fig. 5). Los cantos subangulosos corresponden a los de mayores dimensiones (diámetros decimétricos a métricos) y suelen localizarse en la zona media-alta del cauce, entre el Forau de Albarache y La Catedral. Las morfologías redondeadas son más fácilmente reconocibles en los cantos de menor tamaño (escala centimétrica a decimétrica) y presentan una mayor acumulación en la parte occidental del cauce, hacia el desagüe oeste. El grado de redondeamiento y acumulación está directamente ligado con una mayor movilidad y transporte de los cantos de menor tamaño, aunque ocasionalmente también se reconocen en los de



Figura 5. Cauce del río en la zona más deprimida de la Galería Baja y los bloques movilizados (foto: Sergio Laburu)

mayores dimensiones. Otro factor que favorece un rápido redondeamiento, es la abrasión y golpeo contra las paredes y techo de la cavidad, como evidencian los golpes de gubia (Fig. 5).

El agua que alimenta este curso entra en la cueva a través del sifón de Jean Pierre Vilmit (Fig. 2), que conecta con el río subterráneo que circula por el nivel inferior. Los episodios de descarga en el interior de la cueva coinciden con eventos de alta pluviometría en cortos intervalos de tiempo o estacionalmente tras el deshielo. Las avenidas en el interior de la cueva son muy energéticas y presentan un comportamiento torrencial, con incrementos súbitos del caudal en épocas de nivel alto de agua (Fig. 6). Esto obliga a tener un buen control sobre el comportamiento del sifón ya que la mayor parte de la zona visitable de la cueva corresponde a la zona inundable.

Debido a la acción de las distintas avenidas, en las partes inferiores de la galería baja el crecimiento de espeleotemas es inhibido, a excepción de algunas formaciones coralinas (Fig. 4c) y otros pequeños espeleotemas en el techo. Sin embargo supone un lugar ideal para la génesis de diferentes formaciones erosivas (golpes de gubia y cúpulas) provocados por cantos arrastrados por la corriente. Del mismo modo, el descalce provocado por estas corrientes y la proximidad de la cueva a la superficie exterior ha permitido la formación de una preciosa dolina de colapso que ha abierto una ventana hacia la mitad del recorrido de la galería baja (Agujero de Silverio en Figs. 2 y 3). Esta abertura tiene un papel fundamental en la dinámica de la cueva, influyendo notablemente en la circulación del aire y en la regulación de la temperatura. A través de esta dolina también se produce la entrada de bloques de grandes dimensiones provenientes del exterior, destacando bajo la dolina en el cauce del río entre los bloques autóctonos, un bloque alóctono de arenisca roja de 2 m de diámetro, proveniente de los materiales permotriásicos situados al norte de las Sierras Interiores, aguas arriba del río Aragón.



*Figura 6. Cauce activo en época de deshielo en el interior de cueva de Gúixas*

En las zonas más elevadas de la galería baja, donde la pendiente es mucho menor dominan los suelos estalagmíticos, niveles de sobreexcavación y rellenos polifásicos (Fig. 4b). El mayor desarrollo de espeleotemas se encuentra en sala de La Catedral y en la Galería Árabe o de Otoño (Fig. 2). Estas zonas están protegidas de la erosión producida por las subidas del nivel del agua y en ellas predominan los procesos de precipitación de carbonato del agua de infiltración que llega a la cueva a través de conductos de disolución y fracturas. Como consecuencia se forman distintos tipos de morfologías, siendo las formas más frecuentes coladas, estalactitas, bande-



ras, cortinas, estalagmitas, columnas y *gours* (Fig. 4d y 7). También se reconocen estructuras coralinas y en menor medida de tipo pisoidal.

Destaca el control existente de la estructuración previa y la dinámica de la cueva observado en las morfologías desarrolladas. Así, la formación de coladas con orientaciones preferentes ENE-WSW coincide con la dirección (069-075) de las fracturas en las rocas encajantes. Por otro lado, la circulación de aire en el interior de la cavidad es especialmente notable en sus zonas altas debido a la existencia de cuatro aberturas, dos en cada extremo, que facilitan una circulación unidireccional. El viento ejerce influencia definitiva en la forma de algunos espeleotemas, especialmente a la salida del Callejón del Aire y de la Galería Árabe. Esto permite el desarrollo de anemólitas, como consecuencia de los giros desarrollados en estalactitas y banderas, y otras formas como cortinas.



Figura 7. Columnas y coladas en la Galería Árabe (Fotografía: Sergio Laburu)

Desde la sala de La Catedral el nivel intermedio comunica con el nivel superior mediante una galería más elevada, Galería Árabe o de Otoño. El nivel superior de la cueva está formado por dos galerías fósiles situadas a mayor altura, el Callejón del aire de 62 m y la Galería de Habitación de 308 m (Fig. 2), ambas tienen abertura al exterior. El techo de las galerías fósiles lo conforman las brechas de la megacapa de Villanúa compuestas de grandes bloques cementados, en ocasiones redondeados, que pertenecen a las formaciones de Areniscas de Marboré, calizas con algas y calizas con nódulos de sílex (Teixell *et al.*, 1994). Esta unidad se muestra intensamente fracturada, lo que ha favorecido los procesos de disolución-precipitación, produciéndose un mayor crecimiento de espeleotemas ligados a estas zonas.



Las Galerías de Habitación, denominadas así por ser el lugar que ha albergado asentamientos humanos de época histórica y prehistórica, tiene dimensiones menores con una altura que varía entre 3 m y menos de 1 m. Se amplía a mitad de recorrido en una sala llamada "Sala de Hibernación", por ser utilizada por los murciélagos durante este periodo, y más adelante se ramifica en tres galerías, una de las cuales tiene salida al exterior, y otra termina en un laminador. Esta galería conecta a través de fracturas y conductos de disolución con el sistema de sifones del nivel inferior. Destaca en esta galería el desarrollo de *gours* en los suelos, y la formación de columnas en las zonas de menor altura, donde éstas parecen sellar el contacto de las brechas con la caliza con sílex (Fig. 8).



*Figura 8. Columnas entre las brechas y las calizas con sílex (foto: Sergio Laburu)*

## **Conclusiones**

Esta aproximación a la geología y morfología de la cueva de las Güixas persigue presentar el potencial de la misma para el futuro desarrollo de estudios de carácter científico. Se trata de una cavidad de fácil acceso situada en la parte basal del sistema kárstico de Collarada, muy próxima al colector que recoge toda el agua de infiltración, por lo que es un buen reflejo de la dinámica del mismo. En sus salas más protegidas, los procesos permanentes de infiltración-precipitación forman numerosos tipos de espeleotemas, con un crecimiento muy controlado por la estructura y dinámica de la cueva. La presencia de distintos niveles de sobrecavación y las peculiaridades propias de esta cueva suponen un amplio abanico de oportunidades para

emprender trabajos en distintos campos de investigación como registros de temperatura y humedad, relación pluviometría-descarga interior y datación de espeleotemas.

## Referencias

- Bengoetxea, A., García, D., García, J.M<sup>a</sup>. e Yzaguirre, I. 1994. Exploraciones del G.E.R.S. en el Macizo de la Collarada (Huesca). *Subterránea*, 2, 66, 8-14.
- Choukroune, P., Martínez, C., Seguret, M. y Mattauer, M. 1968. Sur l'extension, le style et l'âge de mise en place de la nappe de Gavarnie (Pyrenees centrales). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*. Paris, 260, 1360-1363.
- Cuchi, J.A. y Sancho C. 1990. *El karst de la provincia de Huesca*. Instituto de estudios altoaragoneses, 189.
- Labaume, P., Seguret, M. y Seyve, C. 1985. Evolution of a turbiditic foreland basin and analogy with an accretionary prism: example of the Eocene South-Pyrenean basin. *Tectonics*, 4, 661-685.
- Lorenzo, J.I. 1992. Excavación en la cueva sepulcral de las Güixas de Villanúa. (Huesca). *AAr* 1990, 359-362.
- Ríos, J.M., Galera, J. M. Baretino, D. y Lanaja, J.M. 1987. Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, hoja nº 145 (Sallent) y memoria. IGME.
- Teixell, A. 1996. The Ansó transect of the southern Pyrenees: basement and cover thrust geometries. *Journal of the Geological Society (London)*, 153, 301-310.
- Teixell, A. y García-Sansegundo, J. 1995. Estructura del sector central de la Cuenca de Jaca (Pirineos meridionales). *Rev. Soc. Geol. España*, 8 (3), 215-228.
- Teixell, A., García-Sansegundo, J., Zamorano, M. y Barnolas, A. 1994. *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, hoja nº 144 (Ansó) y memoria*. IGME.

## **Descubrimiento de una cavidad durante los trabajos de delimitación del Perímetro de Protección de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva)**

F. J. Martínez-Moreno<sup>(1)</sup>, W. Martín-Rosales<sup>(2)</sup>, M. López-Chicano<sup>(2)</sup>, J. Galindo-Zaldívar<sup>(2)</sup>, R. Rodríguez-Durán<sup>(3)</sup>, R. Hidalgo-Fernández<sup>(4)</sup> y M. Guerra-González<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Dom Luiz, Universidad de Lisboa. Campo Grande (Lisboa, Portugal)  
fjmoreno@fc.ul.pt

<sup>(2)</sup> Dpto. Geodinámica, Universidad de Granada 18071, (Granada, España).

<sup>(3)</sup> Geólogo, Aracena, 21200 (Huelva, España)  
rafaelrodriguezduan@hotmail.com

<sup>(4)</sup> Geotrex, S.L. Aracena, 21200 (Huelva, España)  
r\_hidalgo@geotrex.es

<sup>(5)</sup> Excmo. Ayuntamiento de Aracena, 21200 (Aracena, Huelva)  
manuelguerra@ayto-aracena.es

---

### **RESUMEN**

Durante el periodo 2012-2014 se realizaron los estudios concernientes a la delimitación de un Perímetro de Protección de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). Un estudio combinado de técnicas geofísicas, que junto con el análisis hidrogeológico constituía la base del mencionado Perímetro de Protección, sugería la presencia de nuevas cavidades en el entorno de la Gruta. Así, la prospección geofísica indicaba la posibilidad de una gran cavidad, que se extendería desde el final de la cueva conocida hasta el sector oriental del Cerro del Castillo. Además de esta gran cavidad, se identificaron otras anomalías que corresponderían a otras cavidades situadas en las inmediaciones del Castillo. La posible existencia de cavidades en las proximidades del casco urbano justificaba en gran medida la necesidad de corroborar estas hipótesis. Por ello, y además del interés puramente científico en el conocimiento geológico del entorno de la Gruta, se propuso la realización de dos perforaciones de investigación, ubicadas según varios criterios (intensidad de las anomalías, litología y mineralogía, accesos y ubicación del recinto fortificado), una de las cuales detectó una cavidad con 5 metros de altura mínima. En la presente comunicación se describen de forma pormenorizada los aspectos relacionados con el desarrollo de los trabajos de perforación y el descubrimiento de dicha cavidad, así como la metodología empleada para la adquisición de imágenes de la misma, situada a unos 50 m de profundidad.

**Palabras clave:** Gruta de las Maravillas, nuevas cavidades, prospección geofísica, técnicas de perforación.

### ***Discovery of a cavity during the delimitation work of Perimeter Protection for the Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva)***

#### **ABSTRACT**

*During the period 2012-2014 the studies concerning the Perimeter Protection delimitation for the Gruta de las Maravillas cave (Aracena, Huelva) were performed. A combined study of geophysical techniques suggested the presence of new several caves in the vicinity of the cave. Thus, the study indicated the possibility of a large cavity, stretching from*

*the end of the known cave to the eastern area of Cerro del Castillo. In addition to this large cavity, other anomalies belonging to other cavities and located near the Castle were identified. The possible existence of cavities in the vicinity of the town largely justified the need to confirm these hypotheses. All this, in conjunction to the scientific interest in the geological settings knowledge of the environment of the Cave, were performed two boreholes located according to various criteria (residual gravity anomalies intensity, lithology and mineralogy, access and location of the historic castle). One of them detected a cavity with a minimum height of 5 meters. In the present communication we describe in detail the aspects related to the development of the drills and discovery of this cavity, in addition to the methodology used for the images acquisition.*

**Key words:** *Cave of Marvels, drilling techniques, geophysical prospecting, new caves.*

## Introducción

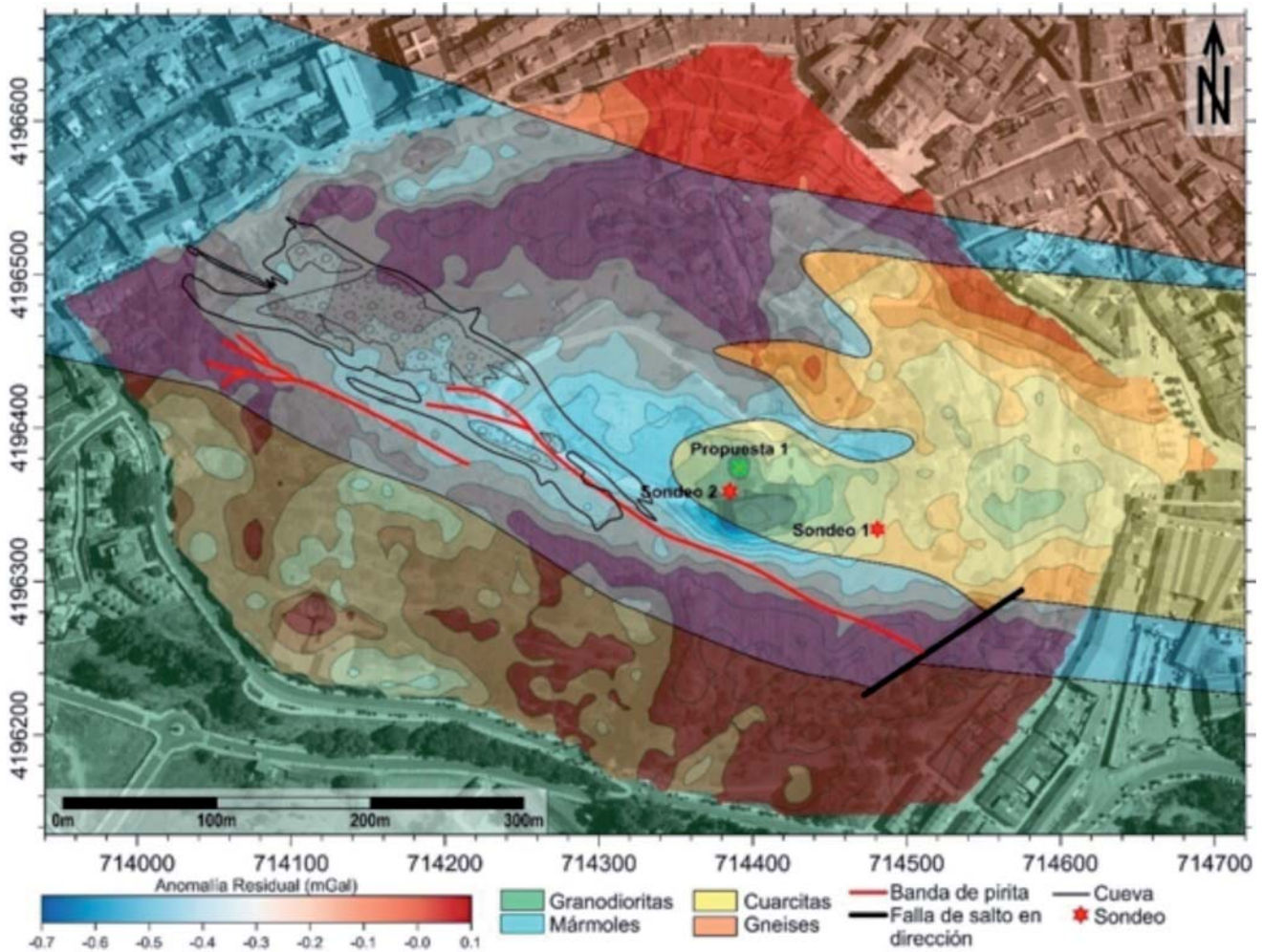
Durante el periodo 2012-2014 se llevaron a cabo los estudios pertinentes para establecer un Perímetro de Protección de la Gruta de las Maravillas, situada en Aracena (Huelva). Esta cueva fue habilitada para el turismo en 1914, por lo tanto uno de los aprovechamientos turísticos subterráneos más antiguos de España. La cavidad, una de las más visitadas de la Península Ibérica, ha sido objeto no obstante de ciertas afecciones, todas ellas producidas de forma involuntaria, localizadas tanto en el interior como en el exterior de la misma (Pulido-Bosch *et al.*, 1996, Martín-Rosales *et al.*, 2007) y fundamentalmente debidas a su situación en pleno casco urbano. El estudio para el establecimiento del mencionado perímetro de Protección incluía un análisis geológico detallado, el correspondiente estudio hidrogeológico y una combinación de técnicas geofísicas destinadas a identificar sectores con posible desarrollo de cavidades (Martín-Rosales *et al.*, 2012; Martínez-Moreno *et al.*, 2014). El estudio geofísico estuvo basado principalmente en la microgravimetría para detectar déficit de densidad asociadas a la presencia de huecos bajo la superficie del cerro. En primer lugar, se realizó un análisis de los resultados de todo el cerro y se compararon las anomalías producidas sobre la cavidad conocida con el resto del cerro. Estos resultados gravimétricos identificaban zonas con mínimos asociados a la presencia de cavidades. En segundo lugar, los mínimos gravimétricos detectados en el lado opuesto a la localización de la cueva eran de mayor entidad. Para verificar que dichos mínimos se debían a la presencia de cavidades, se combinaron otras técnicas geofísicas: tomografía eléctrica de resistividad y polarización inducida, sísmica de refracción y reflexión, perfiles magnéticos y georradar. Todos estos métodos confirmaron que las anomalías gravimétricas detectadas se debían a la presencia de cavidades.

La siguiente fase de estudio de nuevas cavidades consistió en la realización de dos sondeos mecánicos en zonas seleccionadas según criterios geofísicos y geológicos. El objetivo del presente trabajo es describir en detalle los criterios que condicionaron la localización de los sondeos, así como el desarrollo de los trabajos y los resultados obtenidos de los mismos.

## Selección de los puntos de perforación

La posibilidad de cavidades en las inmediaciones del casco urbano justificaba en gran medida la necesidad de corroborar esta hipótesis. Por ello, y además del interés puramente científico en el conocimiento geológico del entorno de la Gruta, se propuso la realización de dos perforaciones de investigación, ubicadas según criterios geofísicos (intensidad de las anomalías),





geológicos (litología, estructura y posición de la mineralización de piratas que sirvió de catalizador de la disolución de los mármoles), topográficos (accesos) y urbanísticos, éstos últimos relacionados con la ubicación del recinto fortificado situado en la coronación del Cerro del Castillo, sujeto a numerosas restricciones según su plan de protección. Evidentemente, uno de los aspectos esenciales era minimizar los impactos de las perforaciones, lo que obligó a una selección minuciosa tanto del tipo de maquinaria como del método de perforación a emplear.

Los resultados de la prospección microgravimétrica sugerían realizar las perforaciones sobre los mínimos gravimétricos con mayor intensidad (Fig. 1). Las anomalías más importantes se encuentran en la Iglesia del Castillo (por motivos evidentes quedaba descartado un sondeo en su interior), así como a escasos metros de la misma en dirección noreste (punto denominado *Propuesta 1* en la Figura 1). Este último punto presentaba la mayor anomalía de todo el sector del cerro estudiado. Los resultados de los métodos geofísicos combinados indicaban la presencia de una cavidad a unos 5 m de profundidad. Sin embargo, la dificultad que presentaba la topografía en este sector, junto con las limitaciones técnicas de las pequeñas máquinas de



perforación, las únicas factibles de utilizar, y muy especialmente la proximidad del recinto amurallado, hicieron descartar también este punto para realizar cualquier perforación.

Hay que indicar que las limitaciones eran muy importantes, habida cuenta las restricciones impuestas por el Plan de Protección del Recinto del Castillo, que impide cualquier movimiento de tierras u obras de envergadura sin la preceptiva autorización. En este sentido, la utilización de máquinas de perforación de gran tamaño obligaba a realizar plataformas, sólo posibles mediante excavaciones, con el consiguiente impacto paisajístico, especialmente en un área tan visible. Así pues, se seleccionaron como puntos donde perforar los recogidos en la figura 1.

El primer sondeo se realizó al Este del Castillo, entre la calle Zilla y la calle de Nuestra Señora del Mayor Dolor, en una zona donde se detectaron mínimos gravimétricos marcados (Martínez-Moreno *et al.*, 2015). Además, la intensidad de la anomalía está lo suficientemente marcada en esta zona como para hacer pensar en la presencia de cavidades. Otro criterio geofísico a tener en cuenta ha sido el hecho de localizarse muy cerca de la intersección de dos perfiles donde se combinaron otras técnicas geofísicas cuyos resultados también avalaban la posible existencia de cavidades. Aunque el punto seleccionado está localizado en superficie sobre cuarcitas, el estudio geológico sugiere que en profundidad podrían existir mármoles intercalados entre dichas cuarcitas. En la medida en que la topografía lo permitió, el punto a perforar se aproximó lo máximo posible a la banda de piritas detectada en el estudio previo y que pudo haber ejercido un papel esencial en el proceso inicial de disolución de la masa de mármoles que alberga la Gruta de las Maravillas (Martínez-Moreno *et al.*, 2016). Asimismo, el punto se encuentra alineado según la dirección de la foliación principal con la Gruta. Finalmente, y no menos importante, el acceso de la máquina de perforación era perfectamente viable, sin necesidad de acondicionar una plataforma.

El segundo punto de perforación seleccionado (Fig. 1) se encuentra a escasos metros de la esquina noreste de la Iglesia del Castillo, en un sector topográficamente plano y de fácil acceso para la maquinaria de perforación. Los criterios principales que justificaron su selección están basados, al igual que el caso anterior, en los resultados obtenidos en el mapa de anomalía residual. En esa zona se concentran los mínimos gravimétricos más intensos de todo el cerro. Además, este punto se encuentra alineado con la dirección principal de la cavidad, por lo que todo parecía indicar que se pudiese interceptar una posible continuación de la misma, no detectada durante las exploraciones espeleológicas realizadas en diversas ocasiones.

## **Método de perforación y maquinaria empleada**

Uno de los aspectos esenciales era minimizar los impactos de las perforaciones en el entorno, lo que obligó a una selección minuciosa tanto del tipo de maquinaria como del método de perforación a emplear. De los diferentes métodos se optó por el menos agresivo de todos (en lo referente a vibraciones, fluido de perforación y tamaño de maquinaria a emplear), que es el sistema de perforación a rotación con recuperación de testigo. Este método se basa en el trabajo realizado por una herramienta de corte de forma anular (corona), con diamantes industriales incrustados y colocada en el extremo de una sarta de perforación, que corta la roca obteniendo un cilindro de la misma alojado en el interior de la sarta, a medida que el elemento de corte avanza. Además, la extracción del testigo se llevó a cabo mediante el sistema *Wire-*



Figura 2. Tubo porta testigos (izquierda) y testigos de roca obtenidos en la primera de las perforaciones (sondeo1) realizadas en el cerro del Castillo (Fotografías: W. Martín)

*Line*, muy usado en exploraciones mineras y que presenta la ventaja añadida de la rapidez de ejecución de las maniobras, dado que para recuperar el testigo sólo es necesario extraer el tubo interior (Fig. 2). Este tubo interior es ascendido mediante un cabrestante rápido (*wire-line*) hasta la superficie por el interior del varillaje, quedando así la corona y el tubo exterior en el sondeo. Tan sólo cuando se ha terminado el trabajo, o en caso de cambio de corona, es necesaria la recuperación de toda la sarta de perforación.

La perforación mediante rotación con recuperación de testigo es sin duda uno de los métodos más eficaces para la obtención de muestras de roca (Fig. 2) y su posterior análisis (visual, ensayos, elaboración de láminas delgadas, etc.). El inconveniente se produce en zonas fracturadas o disgregadas ya que su recuperación es muy escasa.

Otro aspecto a tener en cuenta es el fluido de perforación, imprescindible en este tipo de trabajos. El agua suele ser el más usual en este sistema de perforación, aunque el aire se ha usado en algunas ocasiones con éxito. También se suele usar una mezcla de lodo y agua con el propósito de minimizar cualquier impacto en el agua subterránea. Para estas perforaciones se empleó agua bombeada por el interior de la sarta de perforación, saliendo por el espacio anular entre la sarta de perforación y la roca.

Las perforaciones fueron ejecutadas por las empresas *CEMOSA* y *Sondeos Peñarroya (SCA)*, mediante un equipo de perforación *Rolatec RL 48-M*, (Fig. 3). Se trata de una máquina con-



Figura 3. Imágenes del equipo de perforación Rolatec RL 48-M utilizado en las dos perforaciones realizadas en el Cerro del Castillo (izquierda, sondeo 1 y derecha, sondeo2) (Fotografías: W. Martín)

convencional de sondeo sobre orugas de caucho, con tamaño reducido y fácil transporte (en camión), muy versátil y por tanto ideal para las condiciones de trabajo descritas. Su capacidad de perforación varía según el diámetro de testigo a obtener y el sistema de perforación. Así, en condiciones favorables de perforación con sistema *wire-line* y diámetro NQ (75,7 mm) podría alcanzar profundidades de hasta 250 m, mientras que en condiciones también favorables pero con sistema convencional y 86 mm de diámetro, la profundidad máxima efectiva del equipo es 100 m.

### Desarrollo de los trabajos de perforación

Los trabajos de perforación se iniciaron el 9 de diciembre de 2014 y alcanzaron la profundidad de 52 m (sondeo 1) y 75,4 m en el sondeo 2. En el caso del sondeo 1, cuya ejecución tuvo una duración de 6 días (los trabajos concluyeron el 16 de diciembre), el emboquillado abarca desde la superficie del terreno hasta 1,5 m de profundidad, con un diámetro de perforación de 101 mm, y un diámetro interior de 98 mm. Desde el metro 1,5 hasta el 27 el sondeo tiene un diámetro total de 86 mm, y el interior de 74 mm.

Debido al elevado grado de fracturación, con frecuentes pérdidas de testigo, se produjeron numerosos derrumbes de las paredes de la perforación, dificultando y retrasando considerablemente los trabajos. Por este motivo, el diámetro de perforación hubo de cambiarse a partir



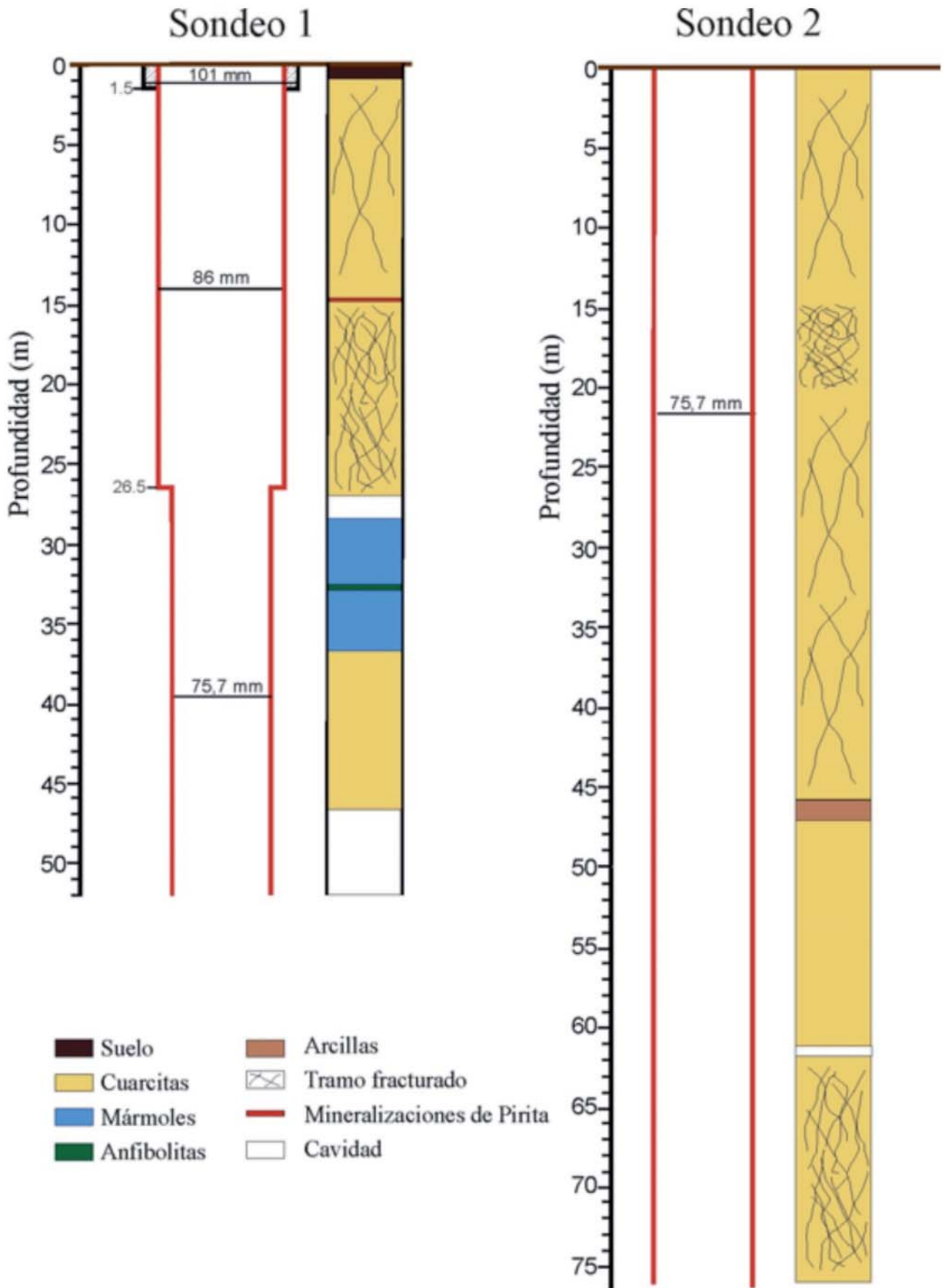


Figura 4. Columnas litológicas y características de los sondeos realizados



Figura 5. Perforación del sondeo 1. Muestra de mano de cuarcita con venas disueltas y arcillas de descalcificación rellenando los huecos (izquierda). Detalle de los mármoles interceptados a profundidades comprendidas entre los 32 y 36 m (derecha)

del metro 27, pasando a un nuevo diámetro, esta vez de 75,7 mm (NQ). Hay que tener en cuenta que el diámetro de testigo se reducía en estas condiciones a 47,6 mm.

La litología predominante eran cuarcitas, a veces intensamente fracturadas, y presentando tonalidades variadas, al menos hasta el metro 27. Además existen pequeñas intercalaciones de venas de calcita y cuarzo de una potencia de 1 a 3 cm.

El grado de fracturación de la capa de cuarcitas aumenta en profundidad. A 14,75 m de profundidad aparece una fina capa con alto contenido en cristales de pirita, bajo la cual se incrementa notablemente la cantidad de fracturas. En algunas zonas aparece cuarcita con pequeñas venas de calcita disuelta y con arcillas de descalcificación, producto de dicha disolución (Fig. 4).



Figura 6. Cajas de testigos correspondientes a las profundidades 44,9-49,60 (izquierda) y 57,75-61,95 (derecha)



Bajo esta capa de cuarcitas, a 27 m de profundidad, se detectó la primera cavidad. Este hueco tiene altura de 1,5 m localizado entre las cotas 684,5 y 686 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.). Bajo este hueco se continuó la perforación sobre mármoles con bajo grado de fracturación (Fig. 5), detectándose pequeñas intercalaciones de anfibolita de casi medio metro de espesor a una profundidad de 32,8 m. Finalmente se detectó una nueva cavidad de 5,20 m de potencia desde el metro 46,80 hasta el metro 52 de profundidad del sondeo. La cavidad se sitúa entre las cotas 666,2 y 661 m s.n.m. Este gran hueco, de potencia superior a los 5 m, impidió la continuidad del sondeo hacia profundidades mayores.

En el caso del sondeo 2, el diámetro de perforación fue NQ (75,7 mm), constante en toda su longitud, tal y como se recoge en la Figura 4, donde se muestran de forma sintética las columnas litológicas de los sondeos. La litología en este caso no fue la esperada, ya que no se llegaron a interceptar niveles de carbonatos. Desde el inicio de la perforación la litología fue muy constante, casi siempre cuarcitas de grano medio a fino, ligeramente meteorizadas al principio y con un grado de fracturación variable. En algunos tramos el grado de fracturación era tan elevado que apenas sí tenía lugar recuperación de testigo.

Es destacable la presencia de un material arcilloso con fragmentos de cuarcita y de casi 2 m de espesor detectado a una profundidad de 47 m (Fig. 6). Se trata de un nivel de cuarcita muy meteorizado a cuyo muro vuelve a aparecer nuevamente el nivel de cuarcitas masivas. También apareció un hueco de unos 45 cm de espesor a una profundidad de 60,9 m, situado íntegramente en el seno del nivel de cuarcitas.

## **La cavidad descubierta**

Una vez finalizados los trabajos se presentaba el reto de estudiar la cavidad hallada en el primer sondeo. Esta labor no fue nada fácil, ya que era necesario introducir hasta una profundidad de unos 50 m una cámara dotada de un sistema de iluminación suficientemente potente y todo ello (cámara y focos) debía ser introducido por una entubación de menos de 5 cm de diámetro. Los equipos disponibles en el mercado (normalmente cámaras de inspección de conducciones) no disponían de intensidad de iluminación suficiente o a veces poseían un diámetro muy superior al del sondeo, al margen de los elevados precios que se ofrecían sin garantía alguna de resultados satisfactorios.

Finalmente optamos por diseñar un sistema de filmación doméstico, pero sin duda efectivo, pues se pudieron realizar tres videos, el primero con poca luz (una linterna dotada de un sistema led de iluminación) y los otros con dos lámparas de 70 vatios cada una, alimentadas con un generador, gracias a la colaboración del técnico electricista municipal Sebastián Muñoz y sus dos colaboradores: Javier Pizarro y Pedro Franco. Los videos se filmaron mediante una simple cámara digital de pequeño tamaño.

Hasta el momento no ha podido ser introducido en el sondeo que da acceso a la cavidad ningún sistema que permita orientarla en el espacio, por lo que consideramos como referencia la posición de la cámara respecto al N geográfico con la que se introdujo desde el principio por la boca del sondeo.

Básicamente, la nueva cavidad consiste en una galería alargada en sentido norte-sur (es muy probable que la dirección real sea noroeste-sureste, si tenemos en cuenta la orientación principal de la Gruta de las Maravillas y otros pequeños detalles visibles en los vídeos), con una longitud visible sin duda superior a 25 m en relación con los 5 m de altura que tiene su techo en la zona donde penetró la perforación, la cual se hizo cerca del extremo meridional; quiere esto decir que la mayor parte de la galería se extiende hacia el norte.

La cavidad está excavada fundamentalmente en cuarcitas, que son las rocas predominantes en la perforación y las que se observan en el techo de la cueva y en las paredes de la cavidad no concrecionadas. Sin embargo, en los últimos metros de la perforación, no entubados, parecen apreciarse intercalaciones de mármoles bastante karstificados. También se observan tonos grises claros, característicos de los mármoles del Cerro del Castillo, en la pared occidental de la nueva cueva. Estas vetas de mármoles aparecen intercaladas entre rocas de colores grises mucho más oscuras correspondientes a las cuarcitas predominantes en este sector del Cerro del Castillo.



*Figura 7. Imágenes tomadas de los vídeos realizados en la cavidad descubierta. Izquierda: Imagen correspondiente a la parte más superior de la pared oriental de la galería en la que se observan estalagmitas y colgaduras (una de ellas bautizada como "La Medusa") y una gran colada estalagmítica. Centro: Parte inferior de la pared oriental de la galería, muy próxima al punto de perforación, donde se observa la colada estalagmítica que la tapiza, en pleno crecimiento activo, y algunos bloques caídos por derrumbe del techo y superpuestos a los espeleotemas. Derecha: Vista hacia el "norte" de la cavidad descubierta, cuya continuación se intuye preferentemente hacia la izquierda. Se aprecian una o dos grandes estalagmitas en el fondo de la galería y la continuación de la colada estalagmítica que tapiza toda la pared oriental. En primer plano se observa bien el montón de bloques caídos del techo en época muy reciente (Fotografías: M. López-Chicano)*

La galería se alarga siguiendo la orientación de la estratificación subvertical de las rocas (o foliación  $S_0$ ) e incluso, en la pared occidental (extraplomada, afectada por derrumbes y carente de concreciones), hemos podido notar la existencia de fracturas y diaclasas de dirección perpendicular a la galería, muy similares a las que se observan por toda la Gruta de las Maravillas, por lo que probablemente correspondan a la familia de dirección NE-SO, dominante en el Cerro del Castillo.

El suelo de la galería parece mostrar una inclinación general hacia el norte. Hacia el sur esta se va estrechando y muestra un ancho mínimo de unos dos metros y una sección superior de forma semicircular, de 1,5 a 2 m de altura, antes de perderse en la oscuridad. En este sector, la base de la galería está ocupada por una colada estalagmítica aterrazada sobre la que han caído bloques de cuarcitas del techo y algún que otro trozo de espeleotema.

Toda la pared oriental de la cavidad está tapizada por una magnífica colada estalagmítica subvertical o con una inclinación muy acusada hacia el oeste, de tonos ocres y anaranjados predominantemente, aunque también se aprecian depósitos esporádicos de calcita muy blanca. En la zona donde penetró el sondeo, esta colada parece arrancar de un contacto litológico entre cuarcitas y mármoles del que penden también algunas estalactitas y coladuras (una de ellas ya ha sido bautizada como "*La Medusa*") que podrían tener más de un metro de longitud (Fig. 7). Por encima de estas concreciones, a lo largo del techo, parecen apreciarse pequeños depósitos de calcita y aragonito muy blancos que probablemente correspondan a helictitas y otras formaciones excéntricas, tal y como ocurre en muchos puntos de la Gruta de las Maravillas.

En el sector donde penetró el sondeo se puede observar que gran parte del suelo de la galería está cubierta por un cono de bloques derrubidos de tamaños que van desde unos pocos centímetros a varios metros. Este depósito gravitacional se superpone a los depósitos químicos de las paredes y de la base de la galería, lo que indica que son posteriores a ellos, y, dado que los bloques apenas se encuentran concrecionados, se puede afirmar que se trata de un derrumbe muy reciente, aunque en ningún caso provocado por la perforación.

Hacia el norte, donde acaba el montón de derrubios antes comentado, la galería ensancha sus paredes y los techos se vuelven considerablemente más altos, sin que llegue a apreciarse toda su extensión en los vídeos. En la pared septentrional de esa especie de sala se distingue una abertura de varios metros de altura, con un dintel lleno de entrantes y salientes que tal vez sean debidos a disolución o a precipitación de espeleotemas (no se aprecia claramente), la cual da paso a un nuevo tramo de galería que sufre un ligero cambio de orientación hacia la izquierda, lo cual impide hacer más observaciones. Al principio de este lejano tramo de galería, ya en penumbra, se distingue cómo la pared oriental sigue estando cubierta por una colada estalagmítica y se observan también al menos dos grandes estalagmitas que se levantan desde el suelo.

Todos los espeleotemas que se observan en las imágenes son vadosos, no se aprecian zonas encharcadas ni morfologías de tipo *gour*. En el momento de la grabación, el goteo en toda la cavidad era de gran intensidad.

## Discusión final

Los resultados de los trabajos llevados a cabo confirman la gran utilidad de las técnicas geofísicas en la detección de cavidades. El sondeo 1 ha confirmado asimismo que los valores mínimos de anomalías residuales están estrechamente relacionados con la presencia de cavidades. Como cualquier técnica indirecta de investigación, los estudios geofísicos están afectados por una determinada incertidumbre y no indican el punto exacto de la ubicación en la vertical de una cueva, sino de zonas con posibilidad de huecos deducidas de las anomalías detectadas y convenientemente interpretadas. Por lo tanto interceptar una cavidad concreta con un solo sondeo puntual no es nada fácil. De hecho, si la máquina de perforación se hubiera situado un par de metros al este o al oeste, probablemente no se habría atravesado la galería en el sondeo 1.

Es muy probable que este hecho explique por qué no se detectó hueco alguno en el sondeo número dos (posiblemente una cuestión de unos pocos metros). Teniendo en cuenta la morfología general de la Gruta de las Maravillas y la cota absoluta de las cavidades detectadas por los sondeos, es muy probable que se hayan interceptado los dos niveles de karstificación superiores de la Gruta, si bien no existe certeza de que haya una conexión clara con la Gruta.

Con este descubrimiento se abren nuevos retos y posibilidades de trabajo en el futuro. Desde el estudio del clima de la cavidad descubierta (temperatura del aire, contenidos en gas radón y anhídrido carbónico), que podría dar información de su posible conexión con la Gruta, hasta la realización de nuevas prospecciones con el objeto de detectar nuevas cavidades, especialmente en el sector oriental del Cerro del Castillo.

## Referencias

- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez, C.M. y Cerón, J.C. 2007. Efectos de las medidas de protección ambiental en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). En: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (eds.), *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 169-180.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Romero-Bomba, E., Durán-Hidalgo, M. y Vadillo-Pérez, I. 2012. Implantación de un perímetro de protección para la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: J.J. Durán y P.A. Robledo (eds.), *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 129-139.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J.A., González-Castillo, L., Ruiz-Constán, A., López-Chicano, M. y Martín-Rosales, W., 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 107, 149-162.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Peña, J.A. y González-Castillo, L., 2015. Regional and residual anomaly separation in microgravity maps for cave detection: The case study of Gruta de las Maravillas (SW Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 114, 1-11.
- Martínez-Moreno, F.J., Pedrera, A., Galindo-Zaldívar, J., López-Chicano, M., Azor, A., Martín-Rosales, W., Ruano, P., Calaforra, J.M. y Hódar-Pérez, A. 2016. The Gruta de las Maravillas



(Aracena, South-West Iberia): Setting and origin of a cave in marbles from dissolution of pyrite. *Geomorphology*, 253, 239-250.

Pulido Bosch, A., Martín Rosales, W., López Chicano, M., Rodríguez Navarro, C.M. y Vallejos, A. 1997. Human impacts in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 311:142-149.



## Caracterización geomorfológica preliminar de la cueva La Covaciella (Asturias)

M. Meléndez Asensio <sup>(1, 2)</sup>, D. Ballesteros Posada <sup>(2)</sup>, M. Jiménez-Sánchez <sup>(2)</sup>, M. García-Diez <sup>(3)</sup> y R. Obeso Amado <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. C/ Matemático Pedrayes 25, 33005 Oviedo, España, m.melendez@igme.es

<sup>(2)</sup> Grupo de investigación GeoQuo, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. C/ Arias de Velasco s/n 33005 Oviedo, España, ballesteros@geol.uniovi.es, mjimenez@geol.uniovi.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco. C/ Tomás y Valiente s/n, 01006 Vitoria-Gazteiz, Álava, España, marcos.garcia@ehu.es

<sup>(4)</sup> Espéleo Club L'Esperteyu Cavernícola. C/ Japón 8-2ºA. Gijón, España.

---

### RESUMEN

La cueva de La Covaciella constituye una de las cavidades de la Cornisa Cantábrica declaradas Patrimonio de la Humanidad desde 2008. La cavidad, de 184 m de desarrollo, presenta pinturas rupestres y otros restos magdalenenses. El objetivo de este trabajo es la caracterización preliminar de la geomorfología de esta cavidad y su entorno, con el fin de establecer una hipótesis sobre su evolución conjunta. Para ello, se combina información previa con el estudio de la zona mediante fotointerpretación, análisis del relieve y trabajo de campo. La cueva de La Covaciella se localiza en la cuenca del río Casaño; su entorno se corresponde con un área kárstica situada a cotas entre 400 y 600 m s.n.m. sobre la cual se encajó la red fluvial unos 200 m. Desde el punto de vista geomorfológico, destacan los pasajes modificados por gravedad y conductos freáticos y epifreáticos, sobre cuyas paredes se localizan las pinturas. El origen de la cavidad responde al desarrollo de conductos freáticos y epifreáticos en condiciones saturadas durante, al menos, el Pleistoceno Superior, corroborado por dataciones realizadas en terrazas fluviales por autores previos. Posteriormente, la red fluvial se encajó dando lugar al desarrollo de la cuenca del río Casaño y, por tanto, al descenso del nivel freático por debajo de la cavidad, lo que desencadenó la actuación de procesos de gravedad y la subsiguiente precipitación de espeleotemas. Posteriormente, la cueva se abriría al exterior, permitiendo su ocupación por parte del hombre.

**Palabras clave:** espeleogénesis, geoarqueología, geomorfología, karst, patrimonio geológico

## ***Geomorphological preliminary characterization of the cave The Covaciella (Asturias)***

### ABSTRACT

*La Covaciella cave is one of the Cantabrian caves declared as World Heritage Site since 2008. The cavity (184 m length) shows rock paintings and other Magdalenian remains. The aim of this work is the preliminary characterization of the cave geomorphology and its surroundings, and the proposal of a preliminary model of evolution. For this purpose, previous information is combined with the study of the cave area elaborated by photo-interpretation, landscape quantitative analyses and fieldwork. La Covaciella cave is located in the Casaño river basin, in a karst located at 400-600 m a.s.l., where the fluvial network is 200 m incised. From a geomorphological point of view, the cave is formed by pas-*

*sages modified by gravity processes and phreatic and epiphreatic conduits, in which walls the paintings are located. The cave origin is linked to the development of the phreatic and epiphreatic conduits at saturated conditions during at least the Late Pleistocene, which is consistent with geochronological data obtained in fluvial terraces by previous authors. Later, the fluvial network descended producing the development of the Casaño river basin, and coevally, the drop of the water table below the cave, giving place to gravity processes action and the subsequent speleothem precipitation. Afterwards, the cave should be opened, allowing its occupation by the humans.*

**Key words:** *geoarchaeology, geological Heritage, geomorphology, karst, speleogenesis*

## Introducción

Las cavidades kársticas con arte rupestre constituyen algunos de los elementos patrimoniales más destacados por su valor cultural, tanto a nivel nacional como internacional. En lo que respecta al Norte de España, en el año 1985 tuvo lugar la inscripción de la Cueva de Altamira en la lista de Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO. Posteriormente, en 2008, se aprobó la extensión del bien para agregar a la lista otras diecisiete cavidades con arte rupestre, pasando a denominarse "Cueva de Altamira y Arte Paleolítico Cantábrico", que abarca las comunidades autónomas del Principado de Asturias, Cantabria y País Vasco (<http://whc.unesco.org/>). Cinco de estas cavidades se encuentran en el Principado de Asturias, y entre ellas se encuentra La Covaciella (García- Díez et al., 2015).

La cavidad fue descubierta accidentalmente en octubre de 1994 como consecuencia de las voladuras efectuadas durante el transcurso de las obras de remodelación de la carretera AS-114. La ulterior exploración de la cueva permitió el descubrimiento de sus motivos pictóricos, entre los que destacan los conocidos bisontes conservados en el Gran Panel, hecho que dio lugar al cierre de la misma al público (García- Díez et al., 2015). Actualmente el acceso se realiza a través de una pequeña edificación construida por el Principado de Asturias, que da paso a una entrada artificial, generada cuando se produjo la rotura de la bóveda de la cueva.

La cueva de La Covaciella se enclava en la cuenca de los ríos Cares y Deva, caracterizados por numerosas ocupaciones principalmente magdalenenses, que incluyen arte parietal (Álvarez-Alonso et al., 2015). Desde su descubrimiento (Fortea Pérez et al., 1995), se han realizado investigaciones multidisciplinares centradas principalmente en el estudio de las pinturas y del proceso creativo, siendo la más reciente la abordada por García- Díez et al. (2015). Estos autores han identificado 35 grafías de especies de ambientes templados (bisonte, caballo y ciervo) y fríos (reno), cuyas edades  $^{14}\text{C}$  AMS se sitúan alrededor de 14,3-13,3 cal ka (Fortea Pérez et al., 1995; Valladas et al., 2004). También se ha identificado industria lítica derivada probablemente de cantos fluviales de las cuarzoarenitas ordovícicas de los alrededores (Perales y Prieto, 2015), evidencias de frecuentación animal (gasterópodos cementados y oseras), así como restos vegetales carbonizados de pinos, avellanos, abedules y coníferas, proporcionando una edad  $^{14}\text{C}$  AMS de 2,3 cal ka para un fragmento de *Corylus avellana* (Medina-Alcaide y Zapata, 2015). Una primera aproximación a la geología de la cavidad ha sido realizada por Meléndez (2015), quien describe la litología y estructura geológica del sustrato rocoso donde se formó la cueva.

El estudio geomorfológico de las cuevas declaradas Patrimonio de la Humanidad es un aspecto relevante a la hora de contextualizar el arte parietal y la ocupación paleolítica, tal como ya



fue realizado en otras cuevas asturianas como Tito Bustillo y El Pindal (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2006a, 2006b, 2011). Siguiendo esta línea de investigación, el objetivo de este trabajo es la caracterización preliminar de la geomorfología de la cueva de La Covaciella y su entorno, proporcionando así el marco del medio físico en el que se ubican los motivos pictóricos.

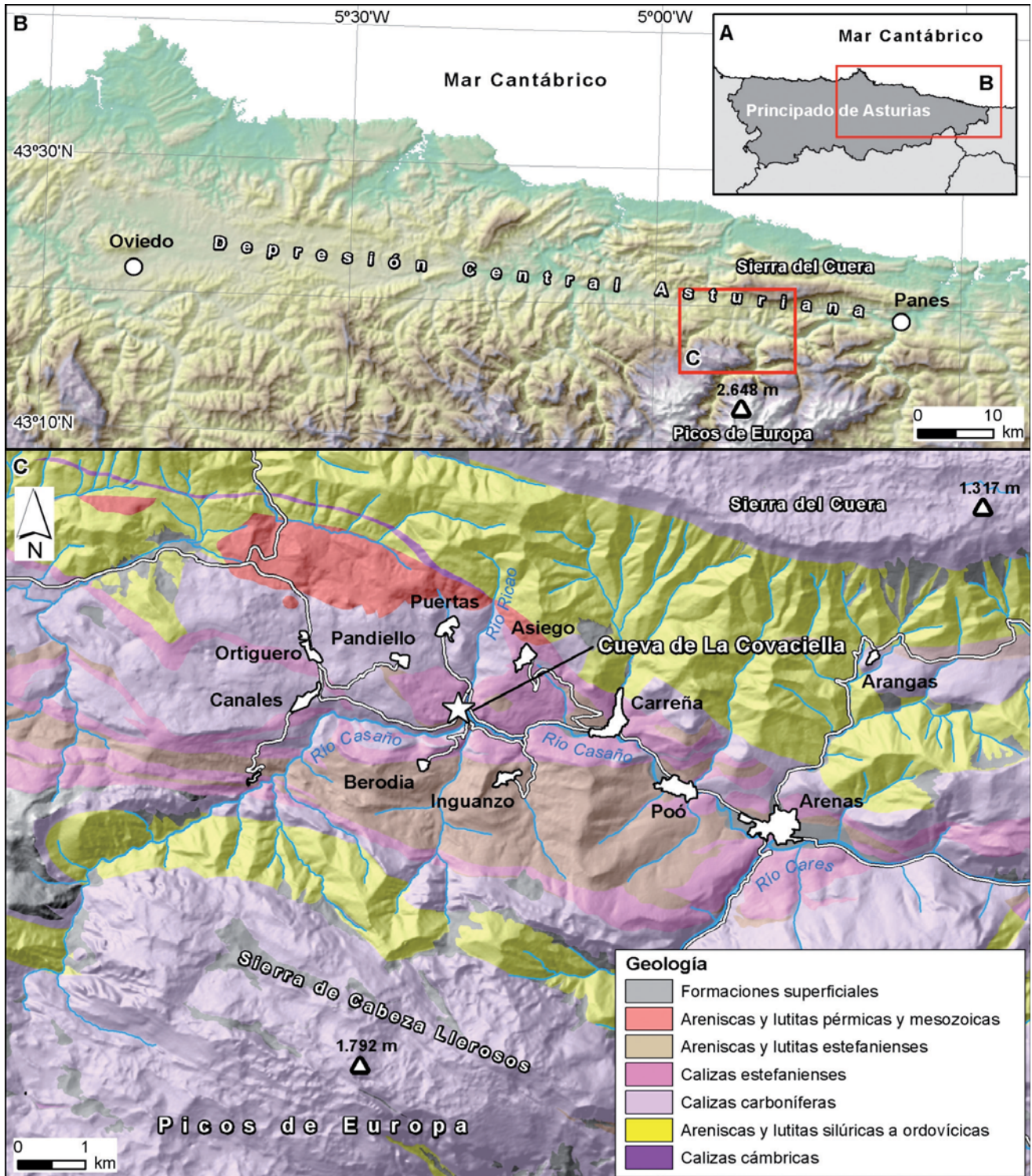


Figura 1. A Encuadre general. B Localización de la cueva La Covaciella en la Depresión Central Asturiana, en el Oriente del Principado de Asturias. C Geología de la cuenca del río Casaño, donde se localiza la cueva de estudio (modificado de Merino-Tomé *et al.*, 2013)

## Zona de estudio

La cueva de La Covaciella ( $43^{\circ}19.08'N$ ,  $4^{\circ}52.50'O$ ) se sitúa en el concejo de Cabrales (oriente del Principado de Asturias), en el Norte de los Picos de Europa, Cordillera Cantábrica (Figura 1). La entrada de la cueva se ubica a 290 ms.n.m. en la ladera derecha del valle del río Ricao (u Oscuro), a 50 m de su confluencia con el río Casaño.

La cuenca del río Casaño, donde se localiza la cueva, tiene una extensión del orden de 80 km<sup>2</sup>, trazado principalmente E-O, y vierte sus aguas al río Cares. Esta cuenca se incluye en la denominada "Depresión Central Asturiana"; su límite septentrional está marcado por la Sierra del Cuera (1.317 m) y su límite meridional por la Sierra de Cabeza Llerosos (1.792 m), perteneciente a los Picos de Europa (2.648 m) (Figura 1B y C). Al igual que en otros puntos de la Cordillera Cantábrica, la red fluvial del río Casaño se encuentra encajada más de 500 m en el relieve debido al levantamiento alpino. Este encajamiento produjo la formación de terrazas fluviales en Arenas, donde el río Casaño confluye con el río Cares (Figura 1C). Estas terrazas se disponen desde +5 a +90 m de desnivel sobre los cauces fluviales, presentando la terraza de +20-22 m una edad superior a los 48 ka (Ruiz-Fernández y Poblete Piedrabuena, 2011). Además, de acuerdo con estos autores, la red fluvial se encajó, al menos, durante el Pleistoceno Superior y Holoceno, con una tasa de incisión de 0,24 mm/año desde hace 37 ka. Este proceso de encajamiento se habría desarrollado ya con anterioridad, generando el espectacular desarrollo de simas en los vecinos Picos de Europa desde el Pleistoceno Medio o desde momentos previos (Smart, 1984, 1986; Ballesteros et al., 2015b).

La cavidad presenta un desarrollo total de 184 m de pasajes topografiados, con un desnivel máximo de 20 m (Obeso et al., 2015). La cueva, de desarrollo horizontal en su mayor parte, presenta una dirección predominante E-O y está formada principalmente por la Galería de las Pinturas, la Sala del Descubrimiento y la Sala del Enlace (Figura 2). La Galería de las Pinturas se localiza en la parte más occidental de la cavidad y presenta 30 m de longitud y 1 a 2 m de

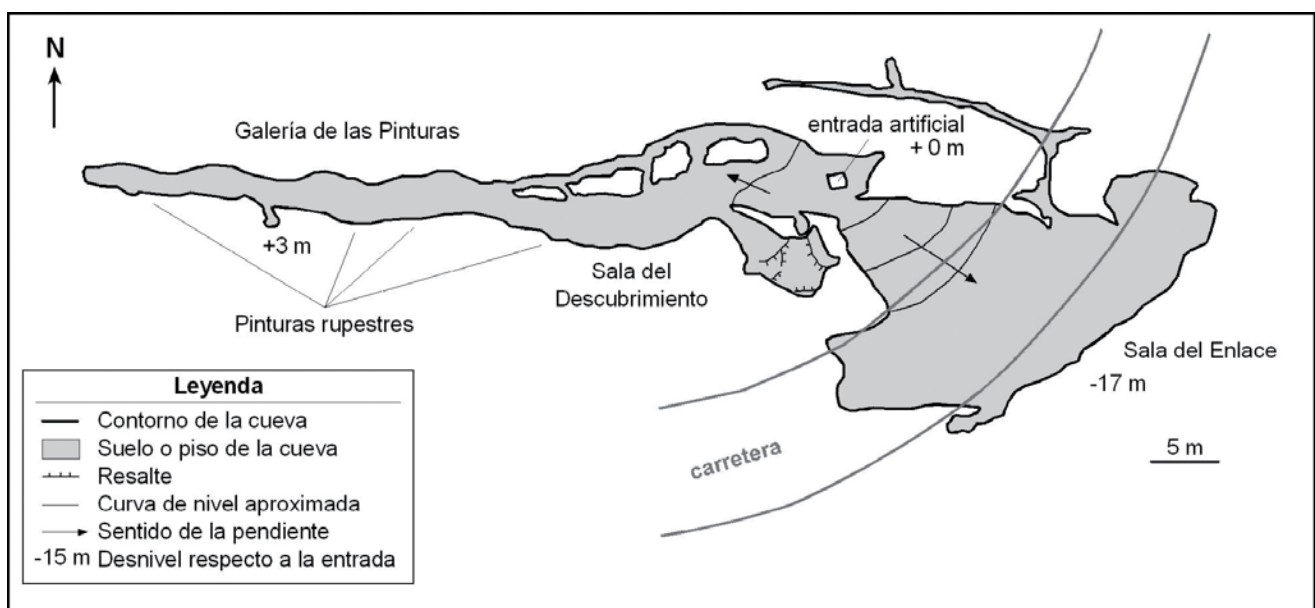


Figura 2. Topografía (vista en planta) de la cueva de La Covaciella (modificado de Obeso et al., 2015)



anchura, con una marcada dirección E-O; la Sala del Descubrimiento se ubica en la parte central de la cueva, con 10 a 15 m de anchura, mientras que la Sala del Enlace se halla en la parte oriental y más baja de la cavidad, de 5 a 15 m de diámetro (Obeso *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra situada en la Zona Cantábrica, en la Unidad de Ponga-Bodón, dominada por calizas, areniscas y lutitas del Ordovícico al Carbonífero (Alonso *et al.*, 2009) (Figura 1C). La cueva de La Covaciella está desarrollada en la Formación Puentellés, constituida por calizas, conglomerados y brechas calcáreas carboníferas (Merino-Tomé *et al.*, 2009). Desde el punto de vista estructural, la cavidad se ha desarrollado en un área dominada por cabalgamientos de dirección O-E, inclinados hacia el Norte (Merino-Tomé *et al.*, 2009), originados durante la Orogenia Varisca. Esta estructura varisca fue modificada posteriormente por la extensión pérmica y mesozoica y por la Orogenia Alpina, con el desarrollo de fallas inversas. A escala local, la cueva de la Covaciella se encuentra ubicada en el flanco meridional del pliegue de Pandiello, cuyo eje se dispone según la orientación E-O, buzando las calizas entre 10° y 25° al Norte (Meléndez, 2015).

## **Metodología de trabajo**

El presente trabajo constituye una fase previa al estudio geomorfológico de la cueva de La Covaciella y de su entorno, combinando información previa (Fortea Pérez *et al.*, 1995; Díez-García *et al.*, 2015; Obeso *et al.*, 2015), con el estudio de la zona mediante fotointerpretación, análisis del relieve a partir del Modelo Digital de Elevaciones y trabajo de campo. La información ha sido además transferida y analizada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), que ha permitido establecer una hipótesis sobre la evolución de la cueva y de su entorno.

## **Resultados**

### ***Caracterización geomorfológica preliminar del entorno***

La cueva de La Covaciella se enclava en la parte media de la cuenca del río Casaño, dominada por un relieve kárstico situado entre 400 y 600 m de altitud, sobre el cual la red fluvial se ha encajado más de 100 m de altura (Figura 3). Dicho karst constituye una plataforma inclinada unos 20° hacia el Este, con orientaciones variables, donde el Río Casaño confluye con el Río Cares. El karst está dominado por dolinas y depósitos kársticos de limos y arcillas, si bien también se reconocen algunas terrazas fluviales colgadas sobre el fondo de los valles. Bajo la superficie, existen numerosas cavidades kársticas documentadas, entre los que destaca el sistema de cueva de La Vieya-Los Quesos, de más de 7,5 km de longitud y 63 m de desnivel (Menéndez Rato *et al.*, 1981).

A escala de mayor detalle, la cueva de La Covaciella se localiza en la ladera escarpada del valle fluvial encajado del río Ricao, inclinada de 30 a 40° hacia el Este (Figura 3C). La red fluvial en su entorno discurre entre 200 y 215 m de altitud, careciendo de caudal durante los meses estivales.

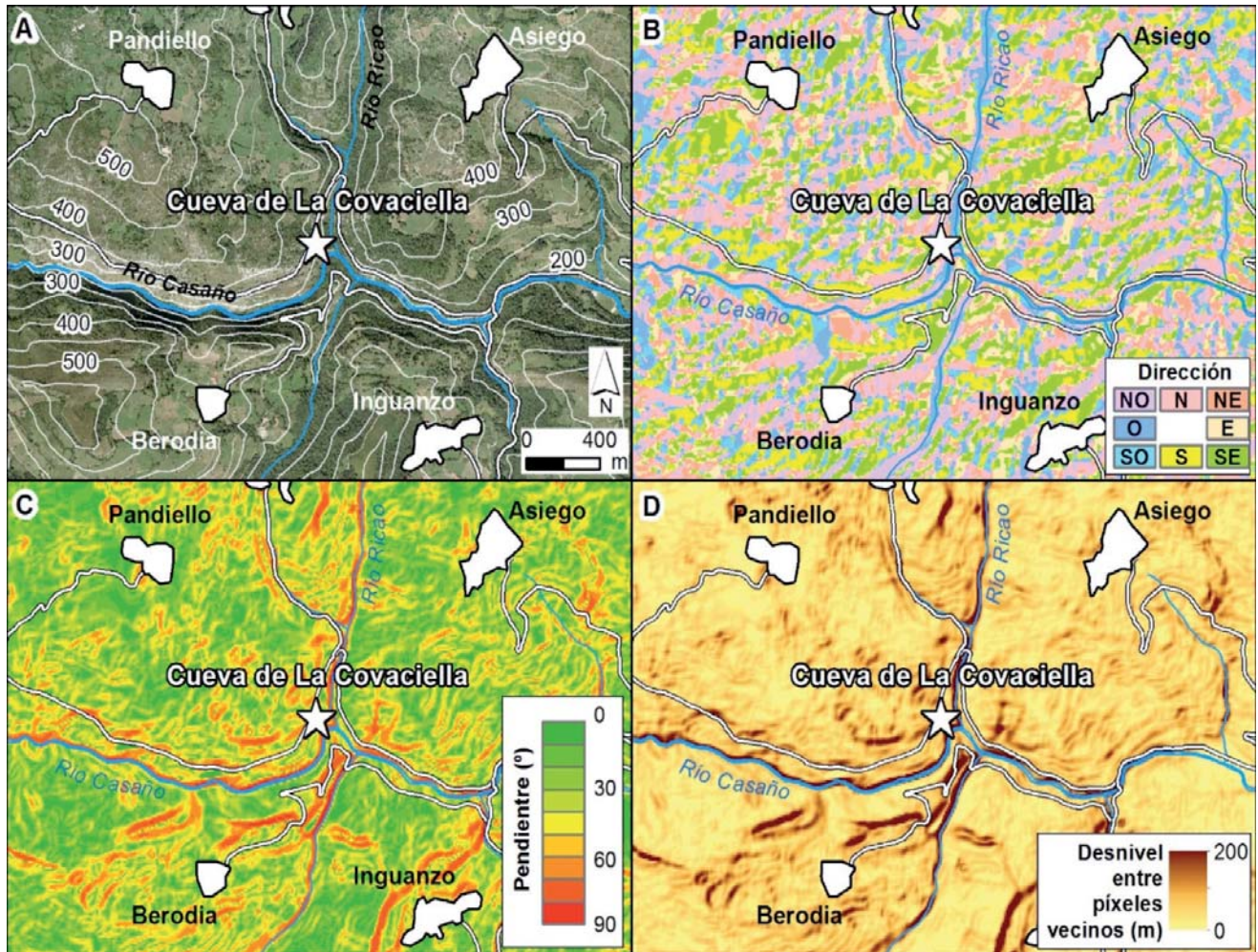


Figura 3. Entorno de la cueva de La Covaciella. A Ortofotografía aérea PNOA y topografía. B Modelo digital de orientaciones. C Modelo digital de pendiente. D Modelo digital que muestra la diferencia de cota entre áreas vecinas

### Caracterización geomorfológica preliminar de la cueva

La Covaciella es una cavidad kárstica, formada principalmente por pasajes modificados por gravedad y conductos freáticos y epifreáticos. Los pasajes modificados por gravedad están representados por las salas del Descubrimiento y del Enlace, que derivan de antiguos conductos kársticos que han visto modificada su geometría por procesos de desprendimientos, hasta el punto de que su morfología original no se reconoce (Figura 4, A, B y C). El desarrollo de estos pasajes está fuertemente condicionado por las discontinuidades del macizo rocoso, en el cual destacan dos familias de diaclasas de dirección NO-SE y NE-SO, y la estratificación.

Los conductos freáticos y epifreáticos se corresponden básicamente con la Galería de las Pinturas, que se localiza en torno a 280 m de altitud (Figura 4 D, E y F). Estos conductos se correlacionan por cota con el nivel de cuevas de 240-295 m definido para la cuenca del río Cares en los Picos de Europa (Ballesteros *et al.*, 2015a). Los conductos freáticos y epifreáticos presentan una orientación que sigue la dirección de las capas, establecida en N100°E y que buzan entre 45 y 48° al Norte en el interior de la cueva (Meléndez, 2015).





Figura 4. Cueva de La Covaciella: Pasajes modificados por gravedad: A Sala del Enlace, B y C Sala del Descubrimiento, con desprendimientos ocasionados por las voladuras que permitieron descubrir la cueva. Conductos freáticos y epifreáticos: D Cúpulas de disolución situadas en el techo, E y F Galería de las Pinturas. Imágenes cortesía de Javier Santa Eugenia.

Los pasajes subterráneos de La Covaciella presentan formas de gravedad, de precipitación química, fluviokarsticas y antropogénicas, agrupadas de acuerdo con un criterio genético (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2006, 2011) (Figura 4).

Las formas de gravedad incluyen bloques y cantos de rocas de entre 0,1 y 1,5 m de diámetro desprendidos de paredes y techos de la cueva (Figura 4B y C); entre estos bloques y cantos caídos destacan los de la Sala del Enlace, la zona de la cavidad más próxima al talud de la carre-



tera, donde se ha identificado un depósito de origen no definido constituido por arcillas, limos, arenas y restos vegetales. Las formas de precipitación química, o espeleotemas, comprenden coladas, estalactitas, estalagmitas, banderas y columnas, así como alguna forma subacuática, siendo más abundantes hacia la Sala del Enlace. Los espeleotemas se disponen sobre las paredes y suelos de la cavidad, precipitando muchas veces sobre los depósitos de gravedad y fluviales (Figura 4A). Los sedimentos fluviokársticos identificados incluyen depósitos de aguas tranquilas, formadas por arcillas y limos decantados como el resultado de la sedimentación fluvial de material en suspensión, tras episodios de inundación de la cavidad. Respecto a las formas antropogénicas, además de las propias obras vinculadas a la ejecución del cierre de la cavidad, en la cueva se pueden distinguir bloques de tamaño métrico derivados del desplome de la bóveda de la cavidad, y que se distribuyen en el piso de las salas del Descubrimiento y del Enlace (Figura 4B y C). Estos bloques se disponen sobre depósitos de la cavidad, probablemente espeleotemas y fluviales.

### **Discusión: una hipótesis sobre la formación de la cavidad**

La morfología de la cavidad está condicionada por las direcciones de la estratificación y del diaclasado, de modo que el desarrollo general de la cueva se corresponde con la dirección principal de la estratificación, aproximadamente N100°E, con buzamientos de entre 40 y 48°.

La evolución geomorfológica de la cueva está condicionada por el encajamiento general de la red fluvial en los Picos de Europa, que habría tenido lugar como mínimo, desde el Pleistoceno Medio (Smart, 1986; Ballesteros *et al.*, 2015b). El origen de la cueva tuvo lugar en condiciones saturadas dando lugar al desarrollo del nivel de cuevas con conductos freáticos y epifreáticos, como la Galería de las Pinturas. Dicho desarrollo pudo coincidir con el desarrollo de la plataforma kárstica del entorno. Se desconoce la edad de formación de estos conductos freáticos y epifreáticos, pero como el nivel de cuevas (290 m s.n.m.) está más alto que las terrazas fluviales superiores de Arenas (situadas a 225 m s.n.m. y datadas en más de 48 ka por Ruiz-Fernández y Poblete Piedrabuena, 2011), su edad debe de ser, como mínimo, Pleistoceno Superior.

Además, el encajamiento de la red fluvial provocó que la cavidad evolucionase a condiciones vadosas, modificándose la geometría original de los conductos freáticos y epifreáticos, dando lugar también a los pasajes agrandados por gravedad. Por otra parte, durante esta etapa, tendría lugar la precipitación de espeleotemas y los depósitos de bloques desprendidos de las paredes y techos de la cueva adquiriendo su geometría actual. Esta etapa es contemporánea al encajamiento de las cuevas de los Picos de Europa durante el Pleistoceno, que está condicionado en parte por el río Casaño (Smart, 1984; Ballesteros *et al.*, 2012, 2015b).

Durante esta etapa vadosa, se abriría la entrada de la cueva en la margen derecha del cañón del río Ricao, posiblemente a través de la Sala del Enlace. Esta hipotética entrada habría permitido el acceso a la cueva de los antiguos pobladores de la misma, cuyas evidencias de ocupación vienen dadas por los motivos pictóricos e industria lítica que en ella se conservan, así como por las oseras encontradas (García Díez *et al.*, 2015). Las edades <sup>14</sup>C de las pinturas y restos leñosos evidencian que la entrada de la cueva era suficientemente grande para permitir el paso al hombre entre hace 14,3-13,3 y 2,3 cal ka (Forteza Pérez *et al.*, 1995; Valladas *et al.*,

2004), cerrándose la entrada posteriormente, ya en épocas históricas. De acuerdo con los depósitos de gravedad que dominan la Sala del Enlace, lo más probable es que la entrada a la cueva debió de obstruirse por la presencia de un colapso de bloques y cantos de su bóveda o paredes.

Actualmente, el régimen de funcionamiento dinámico de la cavidad se corresponde con el típico de la zona vadosa del acuífero kárstico; durante gran parte del año no hay presencia de agua, si bien, en épocas de lluvia y deshielo es observable un flujo de agua de escaso caudal, que desaparece en un sumidero ubicado en el punto más bajo de la cavidad, en la Sala del Enlace.

## **Conclusiones**

La caracterización preliminar de la geomorfología de la cueva de La Covaciella y su entorno ha permitido establecer que la cavidad se localiza en un área kárstica situada (400- 600 m s.n.m.) sobre la que se encajó la red fluvial de la cuenca del río Casaño. El origen de la cavidad responde al desarrollo de conductos freáticos y epifreáticos en condiciones saturadas durante, al menos, el Pleistoceno Superior. Este encajamiento se pone de manifiesto tanto en superficie, con la presencia de terrazas fluviales colgadas decenas de metros sobre los cauces fluviales, como en el interior del macizo kárstico con la desarrollo de grandes simas, agrandamiento de pasajes por gravedad y profundización de la karstificación, entre otros. Posteriormente, la cueva se abriría al exterior, permitiendo su ocupación por parte del hombre.

Este estudio constituye la base para conocer y caracterizar el medio físico que sustenta los motivos pictóricos objeto de protección, así como para el desarrollo de los futuros trabajos de investigación que se puedan realizar en la cavidad.

## **Agradecimientos**

La topografía espeleológica de la cueva, así como parte de las fotografías presentadas en este trabajo ha sido proporcionada por L'Esperteyu Cavernícola Espéleo Club. La información cartográfica empleada procede del Instituto Geográfico Nacional de España. Este trabajo se enmarca dentro de las actividades del proyecto GEOCANTÁBRICA, referencia FC-15-GRUPIN14-044, financiado por el Gobierno del Principado de Asturias con participación de Fondos Europeos de Desarrollo Regional FEDER.

## **Referencias**

- Alonso, J., Marcos, A. y Suárez, A. 2009. Paleogeographic inversion resulting from large out of sequence breaching thrusts: The León Fault (Cantabrian Zone, NW Iberia). A new picture of the external Variscan Thrust Belt in the Ibero-Armorican Arc. *Geologica Acta*, 4, 451–473.
- Álvarez-Alonso, D., Yravedra, J., Jordá Pardo, J.F. y Arrizabalaga, A., 2015. The Magdalenian sequence at Coímbre cave (Asturias, Northern Iberian Peninsula): Adaptive strategies of

- hunter-gatherer groups in montane environments. *Quaternary International*, 389, 167–190.
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M.J., García-Sansegundo, J. y Meléndez-Asensio, M. 2015a. Geoheritage and Geodiversity Evaluation of Endokarst Landscapes: The Picos de Europa National Park, North Spain. En: Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P. y LaMoreaux, J.W. (eds.), *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems SE - 69, Environmental Earth Sciences*. Springer-Berlin Heidelberg, Berlín, 619–627.
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Giralt, S., García-Sansegundo, J. y Meléndez-Asensio, M. 2015b. A multi-method approach for speleogenetic research on alpine karst caves. Torca La Texa shaft, Picos de Europa (Spain). *Geomorphology*, 247, 35–54.
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Giralt, S. y García-Sansegundo, J. 2012. Cartografía geomorfológica de cuevas y dataciones por el método U-Th. Contribución a la espeleogénesis en los Picos de Europa (Norte de España). *Geo-Temas*, 13, 1–4.
- Fortea Pérez, J., Rodríguez Otero, V., Hoyos Gómez, M., Federación Asturiana de Espeleología, Valladas, H. y de Torres, T. 1995. Covaciella. *Excavaciones Arqueológicas en Asturias*, 3, 259–270.
- García-Díez, M., Ochoa, B. y Rodríguez Asensio, J.A. 2015. *Arte rupestre paleolítico en la Cueva de La Covaciella (Inguanzo, Asturias)*. Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, 151 pp.
- Jiménez-Sánchez, M., Aranburu, A., Martos de la Torre, E. y Domínguez-Cuesta, M.J. 2006a. Cuevas prehistóricas como patrimonio geológico en Asturias: Métodos de trabajo en la Cueva de Tito Bustillo (Ribadesella). *Trabajos de Geología*, 26, 163-174.
- Jiménez-Sánchez, M., Bishoff, J., Stoll, H. y Aranburu, A. 2006b. A geochronological approach for cave evolution in the Cantabrian Coast (Pindal Cave, NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie supplementary volume*, 147, 129–141.
- Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M. J., Aranburu, A. y Martos, E. 2011. Quantitative indexes based on geomorphologic features: A tool for evaluating human impact on natural and cultural heritage in caves. *Journal of Cultural Heritage*, 12 (3), 270-278.
- Medina-Alcaide, M.A. y Zapata, L. 2015. Restos Vegetales. En: García-Díez, M., Ochoa, B. y Rodríguez Asensio, J.A. (eds.), *Arte rupestre paleolítico en la Cueva de La Covaciella (Inguanzo, Asturias)*. Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, 50-55.
- Meléndez, M. 2015. Marco geológico y geomorfológico. En: García-Díez, M., Ochoa, B. y Rodríguez Asensio, J.A. (eds.), *Arte rupestre paleolítico en la Cueva de La Covaciella (Inguanzo, Asturias)*. Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, 21-24.
- Menéndez Rato J.R., Martínez Marcos, O. y Ulecia González, C. 1981. Complejo kárstico La Vieya-Los Quesos (Cabrales). *Espeleología Asturiana*, 5, 1-36.
- Merino-Tomé, O., Bahamonde, J.R., Colmenero, J.R., Heredia, N., Villa, E. y Farias, P. 2009. Emplacement of the Cuera and Picos de Europa imbricate system at the core of the Iberian-Armorican arc (Cantabrian zone, north Spain): New precisions concerning the timing of arc closure. *Geological Society American Bulletin*, 121, 729–751.
- Merino-Tomé, O., Suárez Rodríguez, A., Alonso, J.L., González Menéndez, L., Heredia, N. y Marcos, A. 2013. Mapa Geológico Digital continuo E. 1:50.000, Principado de Asturias (Zonas: 1100-1000-1600). En: Navas, J. (ed), *GEODE. Mapa Geológico Digital Continuo de España*. SIGECO-IGME [online]: <http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htm>

- Obeso, R. 2015. La cavidad: elementos espeleológicos. En: García-Díez, M., Ochoa, B. y Rodríguez Asensio, J.A. (eds.), *Arte rupestre paleolítico en la Cueva de La Covaciella (Inguanzo, Asturias)*. Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, 25-34.
- Perales, U. y Prieto, A. 2015. Industria lítica. En: García-Díez, M., Ochoa, B. y Rodríguez Asensio, J.A. (eds.), *Arte rupestre paleolítico en la Cueva de La Covaciella (Inguanzo, Asturias)*. Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, 45-49.
- Ruiz-Fernández, J. y Poblete Piedrabuena, M.Á. 2011. Las terrazas fluviales del río Cares: aportaciones sedimentológicas y cronológicas (Picos de Europa, Asturias). *Estudios Geográficos*, 72, 173–202.
- Smart, P.L. 1984. The geology, geomorphology and speleogenesis in the eastern massifs, Picos de Europa, Spain. *Cave Science*, 11, 238–245.
- Smart, P.L., 1986. Origin and development of glacio-karst closed depressions in the Picos de Europa, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie* 30, 423–443.
- Valladas, H., Tisnérat-Laborde, N., Cachier, H., Arnold, M., Bernaldo de Quirós, F., Cabrera-Valdés, V., Clottes, J., Courtin, J., Fortea-Pérez, J.J., González-Sainz, C. y Moure-Romanillo, A. 2004. Radiocarbon AMS dates for paleolithic cave paintings. *Radiocarbon*, 43, 977–986.





Jordá-Bordehore, L. Aportación a la evaluación de la estabilidad de cuevas naturales mediante métodos empíricos y clasificaciones geomecánicas, primeros resultados. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 243-254.

# **Aportación a la evaluación de la estabilidad de cuevas naturales mediante métodos empíricos y clasificaciones geomecánicas, primeros resultados**

L. Jordá-Bordehore <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador,  
ljorda@espol.edu.ec

---

## **RESUMEN**

La estabilidad de los huecos subterráneos como son las cuevas puede evaluarse en una primera aproximación mediante las clasificaciones geomecánicas y en particular el índice Q de Barton. Se analiza en este trabajo desde el punto de vista geomecánico la estabilidad de 72 cuevas naturales de grandes dimensiones las cuales se han representado en un gráfico basado en los existentes para túneles y obras subterráneas según el ancho y el índice de calidad de roca Q. Muchas de las cuevas naturales analizadas con un criterio ingenieril para túneles pueden resultar aparentemente inestables al ser representadas en los gráficos empíricos existentes y requerirían refuerzos incompatibles con espeleotemas y grandes alturas de cámaras. Se propone un nuevo gráfico y ecuación para el ancho o vano máximo basados exclusivamente en casos de cuevas que representarían más fielmente la realidad observada en las grandes cavernas naturales estables. La principal aportación es que este nuevo gráfico de estabilidad es específico para cuevas naturales y consta de dos zonas: una zona donde quedan representadas las cuevas estables y otra zona donde se ubican las inestables y hundimientos.

**Palabras clave:** cavernas, índice Q, karst, mecánica de rocas, túneles de lava.

## ***Contribution to the evaluation of the stability of natural caves by empirical methods and geomechanical classification, preliminary results***

### **ABSTRACT**

*The stability of underground voids such as caves can be assessed in a first approximation by the geomechanical classifications and particularly the Barton Q index. The research analysed geomechanical stability of 72 natural caves of large spans. They are depicted in graphic based on existing tunnel and underground works according to the width and rock quality index Q. Many of the natural caves analysed with an engineering approach to tunnels are apparently unstable and could require reinforcements incompatible with speleothems and large chambers heights: that is why a new graph and formula is proposed for the critical span exclusively based on cases of caves. This new graph faithfully represents the reality observed in large stable natural caves. The main contribution is that this new stability chart is specific to natural caves and it consists of two zones: a zone where caves are stable and represented another area where unstable and collapses are located*

**Key words:** caverns, karst, lava tunnels, Q index, rock mechanics.

## Introducción y objetivos

Existen en la naturaleza gigantescos espacios subterráneos (estables) que superan con creces las dimensiones de los huecos máximos excavados por el hombre (túneles, minas y cavernas hidroeléctricas). Las mayores salas y cuevas del mundo se desarrollan en terrenos kársticos calcáreos (Fig.1) combinando procesos de disolución con el ensanchamiento por caída progresiva de bloques y estratos supra yacientes que no siempre tienen que ser de naturaleza calcárea. Las dimensiones de estas cavidades pueden variar entre unos pocos metros hasta más de un centenar. Analizadas desde el punto de vista ingenieril muchas cuevas de grandes vanos pueden considerarse como inestables – sin serlo. El objetivo del presente trabajo es el de analizar la estabilidad de cuevas naturales en base al índice Q de Barton (Fig.2), que conjuntamente con el RMR, son los más utilizados en la evaluación de estabilidad de espacios subterráneos por métodos empíricos.

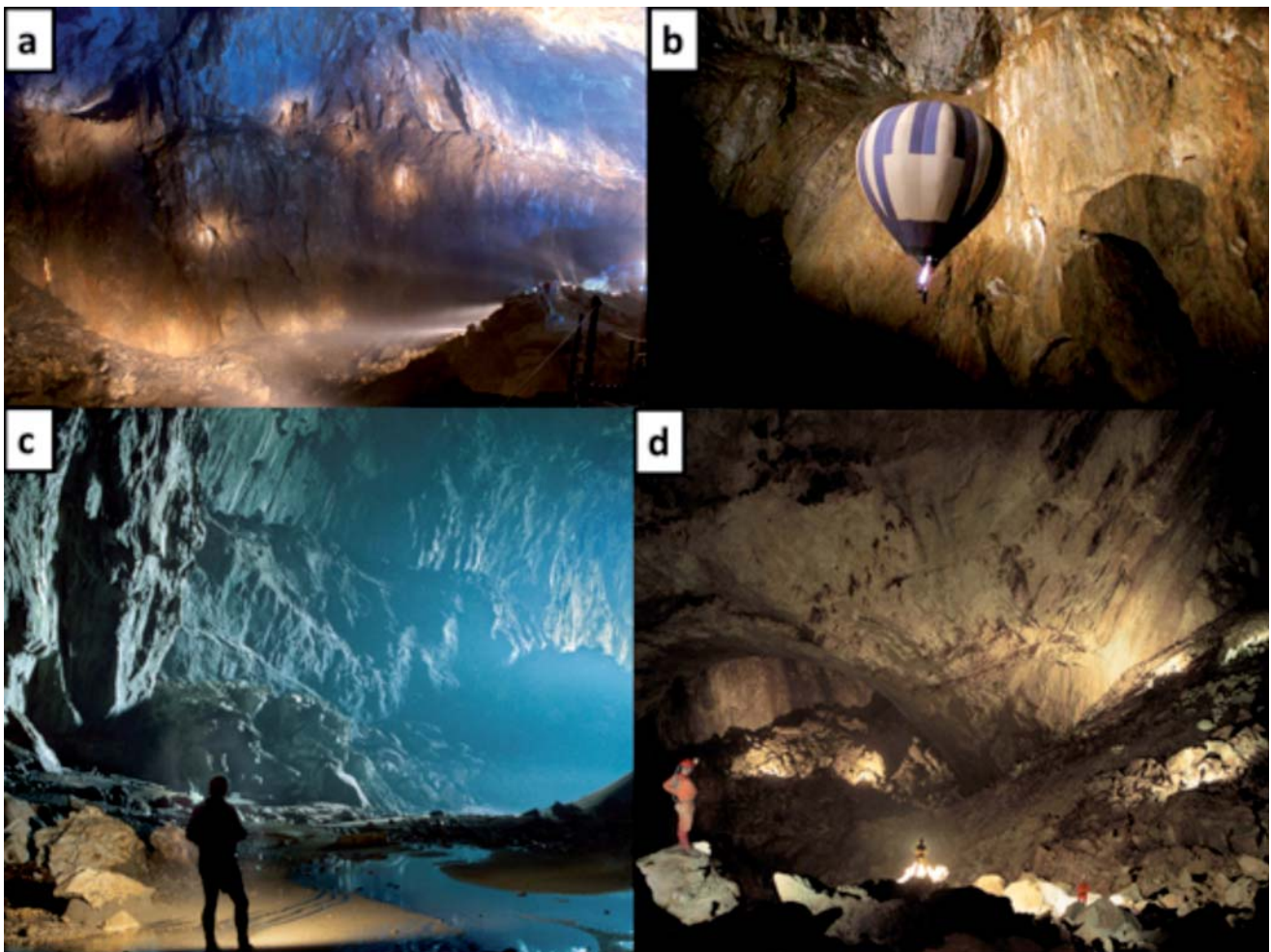


Figura 1. Imágenes de algunas de las salas o cavernas más grandes del mundo. (a y b) Sala de La Verna en el sistema de la Piedra de San Martín Pirineos- panorama de la cueva de 245 m de diámetro- globo aerostático volando en la cavidad (fotografía cortesía SAS-La Verna PSM). (c) Mulu-Deer-Cave en Borneo es el pasaje o corredor más ancho del mundo, con 130 metros de vano (fotografía cortesía de Tony Waltham), (d) La caverna más grande del mundo es la sala Sarawak en Borneo: ocho espeleólogos portando antorchas solo alumbran parte de los múltiples arcos que forman el techo. La parte opuesta situada a 300 metros de la cámara (fotografía cortesía de Jerry Wooldridge)

Los tubos volcánicos por su parte son cavidades naturales formadas por el enfriamiento diferencial de una colada de lava. Estas cavidades tienen una morfología serpenteante, principalmente horizontal, en la que casi todas las entradas a la cavidad son a favor de dolinas de colapso muy someras. Estas cuevas se desarrollan típicamente en volcanes de escudo y coladas basálticas como las de Hawaii, Pascua y Galápagos, entre otros.

Esta investigación tiene varios objetivos específicos: uno de ellos es el de elaborar una base de datos de cavidades que se retroalimiente tomando en consideración la estabilidad in situ y calidad del macizo rocoso; otra es la de comprobar si los métodos empíricos empleados para las obras subterráneas hechas por el hombre son aplicables a las cuevas naturales. En caso de no ser así se pretende analizar qué modificaciones deben de hacerse para que sean válidas. Para ello se han escogido cuevas volcánicas que son representativas de rangos medios de calidad de roca y vanos relativamente pequeños y cuevas kársticas calizas con un amplio rango de calidad y anchos grandes. Únicamente en las cuevas kársticas calcáreas se abren las salas o cavernas gigantes, de vanos de más de 100 m (Fig. 1).

## **Metodología**

### ***Aspectos generales***

El estudio ha comprendido la valoración de la calidad del macizo rocoso y dimensiones de un total de 72 cuevas: 53 de ellas kársticas (con 36 de España, Fig. 3) y 19 volcánicas (de las islas Galápagos). En ellas se han realizado estaciones geomecánicas para determinar la calidad del macizo rocoso y se han tomado las principales medidas de la caverna: ancho, alto y largo (cuando es posible). Las clasificaciones geomecánicas consisten en otorgar un índice (valor numérico) que representa la calidad de una masa o macizo rocoso. Tienen por objeto caracterizar ingenierilmente un determinado macizo rocoso y evaluar unas necesidades de sostenimiento en función de una serie de parámetros a los que se les asigna un cierto valor. Esta forma de análisis se lleva aplicando de forma efectiva al diseño de túneles desde su creación en la década de 1970 (Barton y Grimstad 2004, Barton y Bieniawski 2008, Bieniawski 2011).

Los dos sistemas de clasificación geomecánica más empleados son el Rock Mass Rating RMR (Bieniawski 1973, 1974, 1979, 1989, 1997, 2011) y el índice Q (Barton *et al.*, 1974, Barton 1976, 2002). En este estudio se empleará el sistema Q al ser más apropiado para análisis de vanos variables. El Sistema-Q, índice Q o también llamado "Q de Barton", fue desarrollado en Noruega en 1974 por Barton, Lien y Lunde, del Instituto Geotécnico Noruego (Barton *et al.*, 1974; Barton, 2002). El sistema Q asigna a cada terreno un índice de calidad, tanto mayor cuanto mejor es la calidad de la roca. Su variación no es lineal como la del RMR (Bieniawski, 1973, 1989), sino exponencial, y oscila entre Q=0.001 para terrenos muy malos y Q=1000 para terrenos muy buenos (Cornejo y Salvador, 1996). El valor de Q se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{Ecuación 1})$$



Donde:

- *RQD* es el índice *Rock Quality Designation*, que basta tomar el RQD en incrementos de 5 y que como mínimo tomar  $RQD=10$ , dado que con un  $RQD = 0$  obtendríamos un  $Q = 0$  que no está contemplado en el método.
- *J<sub>n</sub>* es el coeficiente de familias de juntas, varía entre 0.5 y 20, y depende del número de familias de juntas que hay en el macizo.
- *J<sub>r</sub>* es el coeficiente de la rugosidad de las juntas varía entre 1 y 4.
- *J<sub>a</sub>* es el coeficiente de alteración de juntas, varía entre 0.75 y 20, y depende del grado de alteración de las paredes de las juntas de la roca.
- *J<sub>w</sub>* es el coeficiente de reducción por agua en juntas y varía entre 0.05 y 1, dependiendo de la presencia de agua en las juntas del túnel.
- *SRF* son las iniciales de *Stress Reduction Factor*, y depende del estado tensional de la roca que atraviesa el túnel. Varía entre 0,5 y 400.

Para la descripción pormenorizada y obtención del RQD y cada uno de los otros parámetros se remite al lector a la extensa bibliografía sobre el modo de obtener y valorar cada uno de ellos (Barton *et. al.*, 1974, Barton, 1976; Barton y Grimstad, 2004; NGI 2013).

### ***Clasificaciones geomecánicas en cuevas naturales y máximos vanos posibles en excavaciones sin sostenimiento***

Hay pocas referencias de aplicación de clasificaciones geomecánicas a la estabilidad de cuevas, y principalmente son del índice Q (Barton 1976, Bieniawski 1989, Waltham y Fookes, 2005). Curiosamente en los primeros gráficos de este índice Q se incluían algunas cuevas, como ejemplos de terrenos autoestables de excelente calidad y grandes vanos (Barton 1976). Sin embargo, a lo largo de los años estos casos de cavidades han perdido “peso” dentro de esta clasificación frente a los casos de túneles, cavernas antrópicas galerías y minas. El análisis de estabilidad de cuevas tiene evidentemente una idiosincrasia diferente a minas, túneles y cavernas: en las obras civiles la “autoestabilidad” del hueco no es trascendente a largo plazo, sino que va relacionado con el tiempo que se tarda en colocar el sostenimiento desde la excavación. En el caso de las cuevas se tiende a visitar aquellas que son estables y han prevalecido en el tiempo, presentan espeleotemas y/o grabados rupestres; por tanto, en la casi mayoría de los casos se descartan intervenciones “agresivas” de sostenimientos de techos. Solamente se tiene cuenta los posibles refuerzos en zonas localizadas fuera de las partes más delicadas, como las entradas o túneles de acceso. Por tanto, lo que más va a interesar en el caso de las cuevas es el límite entre la zona autoestable –que no precisa sostenimientos– de las zonas inestables que precisan refuerzo.

Barton (1976) analizó específicamente casos reales de huecos totalmente estables en los que no había sostenimiento y se colocaron esos puntos en un gráfico marcando una línea límite o crítica separando zona estable y zona inestable (Fig. 2). Barton (1976) resume los requerimientos generales para huecos subterráneos permanentes sin sostenimiento en la tabla 1.

Requisitos generales	Índice de diaclasado $J_n \leq 9$	Índice de rugosidad $J_r \geq 1$	Índice de alteración $J_a \leq 1$	Índice de agua en las juntas $J_w = 1$	Factor reductor por efectos tensionales SRF $\leq 2.5$
Requisitos condicionales	Si el RQD $\leq 40$ entonces $J_n \leq 2$	Si $J_n = 9$ , entonces debe de haber un $J_r \geq 1.5$ y RQD $\geq 90$	Si $J_r = 1$ , debería de haber $J_n < 4$	Si SRF $> 1$ , entonces se requiere que $J_r \geq 1.5$	Si el vano (ancho del hueco) es mayor de $> 10$ m, debe de haber un $J_n < 9$ Si el vano es $> 20$ m, se requiere $J_n \leq 4$ y SRF $\leq 1$

Tabla 1. Requisitos generales y condicionales para huecos subterráneos permanentes sin sostenimiento (traducido de Barton, 1976)

Como evolución de la Fig. 2a, Houghton y Stacey (1980) muestran un análisis cuantitativo del factor de seguridad de excavaciones sin sostenimiento en la Fig. 2b. Estos autores sugieren que, dado que existen diferentes finalidades en las excavaciones mineras y civiles, para aplicaciones civiles se debe de exigir un factor de seguridad mayor de 1.2 en caso de omitir sostenimiento.

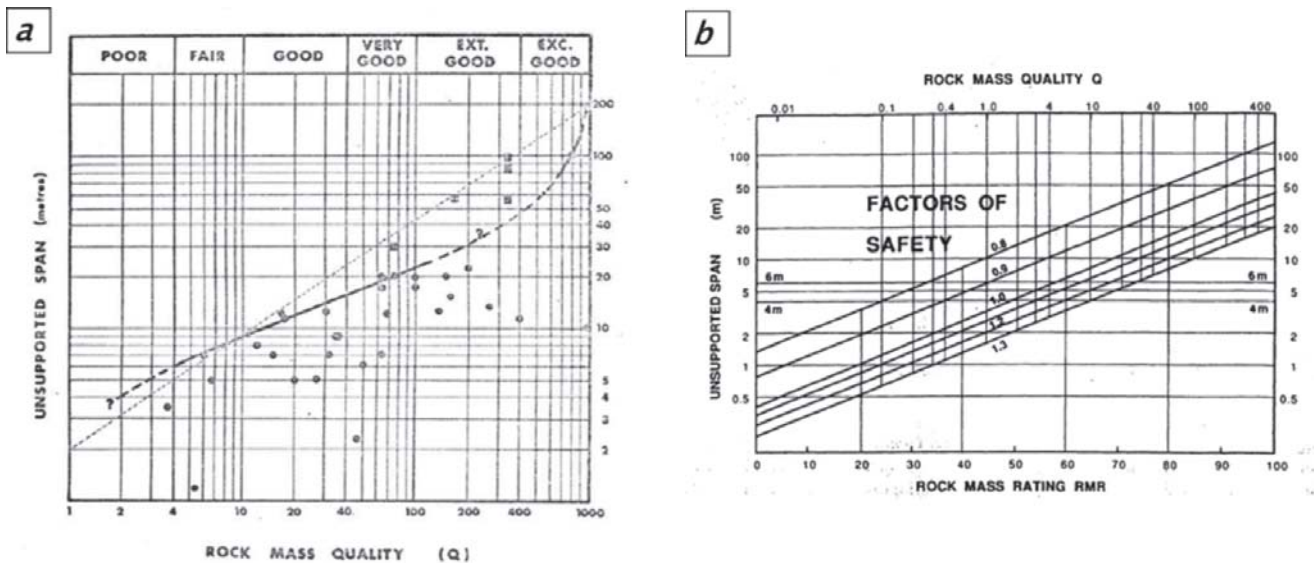


Figura.2. Vano o ancho de excavaciones sin sostenimiento frente a calidad del macizo rocoso (índice Q). Los círculos representan excavaciones hechas por el hombre y que no tienen sostenimiento alguno. (d) Factor de seguridad estimado para excavaciones subterráneas sin sostenimiento, en función del ancho del hueco y la calidad del macizo rocoso, según Q y RMR (Bieniawski 1989, adaptado de Houghton y Stacey, 1980)

La existencia de huecos subterráneos tanto naturales como hechos por el hombre indican que pueden existir grandes vanos sin sostenimiento siempre y cuando la roca sea de suficiente calidad (Barton, 1976). La Fig.2a recoge casos prácticos de excavaciones hechas por el hombre



Figura 3. Imágenes de cuevas españolas representativas. A) Sala Jon Arana, sima del Carlista, Vizcaya, con unas dimensiones de  $500 \times 230 \times 125$  m y una superficie de  $115000$  m<sup>2</sup> es la tercera sala más grande del mundo (fotografía cortesía de Sergio Laburu). B) Sala del Campamento, Vallgornera, Mallorca: sistema kárstico con tres niveles, el más superior es muy somero y se han producido algunas interacciones con la superficie (fotografía cortesía de Guiem Mulet). C) Entrada a la Cova Tancada de Cap de Menorca en Mallorca. Terreno de muy buena calidad con un índice Q de 400. D) Pared del Eco - entrada a la cueva de Cuevamur en Cantabria, con una anchura máxima de 35 m y un índice Q de 200. e) Ejemplo de cueva desarrollada en terrenos de mala calidad: Ayerdi, Navarra, sala redonda de 50 m de diámetro y calidad  $Q=4$ . F) Sala de la Gran Rotonda de la cueva de Valporquero en Burgos (fotografía cortesía de Sergio Laburu) una cavidad turística muy frecuentada con  $Q=25$  y 57 m de vano

si sostenimiento con vanos que van desde 1,2 a 100 m., la curva envolvente sería el vano o ancho máximo para excavaciones hechas por el hombre, en base a los casos estudiados. Los cinco puntos representados con cuadrados se han obtenido a partir de las enormes salas de las cuevas de Carlsbad en Nuevo Méjico (Barton 1976). Si se combinan los datos naturales con los antrópicos la envolvente límite parece ser una recta, a falta de más datos disponibles (Barton, 1976) ésta puede suponerse como el vano límite para huecos permanentes sin sostenimiento, y puede representarse por la siguiente ecuación sencilla (Ecuación 2). Para propósitos de diseño de obras subterráneas Barton (1976) ignora esta ecuación de vano y considera únicamente las aperturas antrópicas. Este criterio es más conservador para el diseño, ya que los puntos situados por encima de la línea discontinua (Fig. 2a) ya se consideran como inestables. Es más conservador por tanto el criterio de considerar como línea límite la discontinua de la Fig.2 a.

$$\text{Vano (Span)} = 2 \times Q^{0.66} \quad (\text{Ecuación 2})$$

## Resultados

La Fig. 2 (a y b) de vanos y calidades ha sido elaborada a partir de datos de obras subterráneas hechas por el hombre: túneles, cavernas y minas y resulta poco aplicable a cuevas, pues, son muy conservadoras (Barton 1976; Houghton y Stacey 1980). Por ello se sugiere rehacer estos gráficos, manteniendo el mismo criterio de abscisas y ordenadas logarítmicas pero con casos específicos de cuevas naturales, considerando todo tipo de calidades a partir de  $Q = 4$  y vanos desde 1,5 a 300 m. Los parámetros medios del índice  $Q$  característicos se muestran en la Fig.4. Se han diferenciado los puntos que corresponden a cuevas kársticas y volcánicas, así como aquellas estables y meta estables o inestables (Fig. 5).

Para poder construir un gráfico con datos en todas las zonas del mismo (rangos variables de  $Q$  y de ancho) se han buscado cuevas naturales representativas (Fig. 5). Las de peor calidad son de  $Q = 4$ , por debajo de ese valor es difícil que sean estables las cuevas salvo con anchos muy pequeños. La mayor parte de las calidades medias y "bajas" estudiadas en este trabajo corresponden a cuevas volcánicas de las islas Galápagos con  $Q < 10$  y vanos no demasiado grandes, en todo caso inferiores a 10 m. Las cavernas kársticas en calizas tienen calidades de roca típicas entre  $10 < Q < 100$  y vanos de 10 a 100 m. Para el análisis se han escogido varias cuevas turísticas españolas, como la de Pozalagua, Campanet y Valporquero (Fig.3). Para los vanos más gigantescos, por encima de 100 m, las calidades de la roca están siempre por encima de  $Q = 100$  alcanzando en el caso de la sala de "Miao Room" en China el valor  $Q = 1000$  máximo del criterio (Fig.1). Dado que la mayoría de los gráficos empíricos (véase Barton, 1976) no tienen datos en la parte de vanos gigantes y calidades máximas (apareciendo por tanto el límite estable/inestable con líneas de puntos y duda), se han escogido para análisis algunas de las cavernas más grandes del mundo como son: la Sala de La Verna en el sistema de la Piedra de San Martín, la sala Jon Arana de la sima del Carlista, y las cuevas gigantes de China y Vietnam (Fig.1).



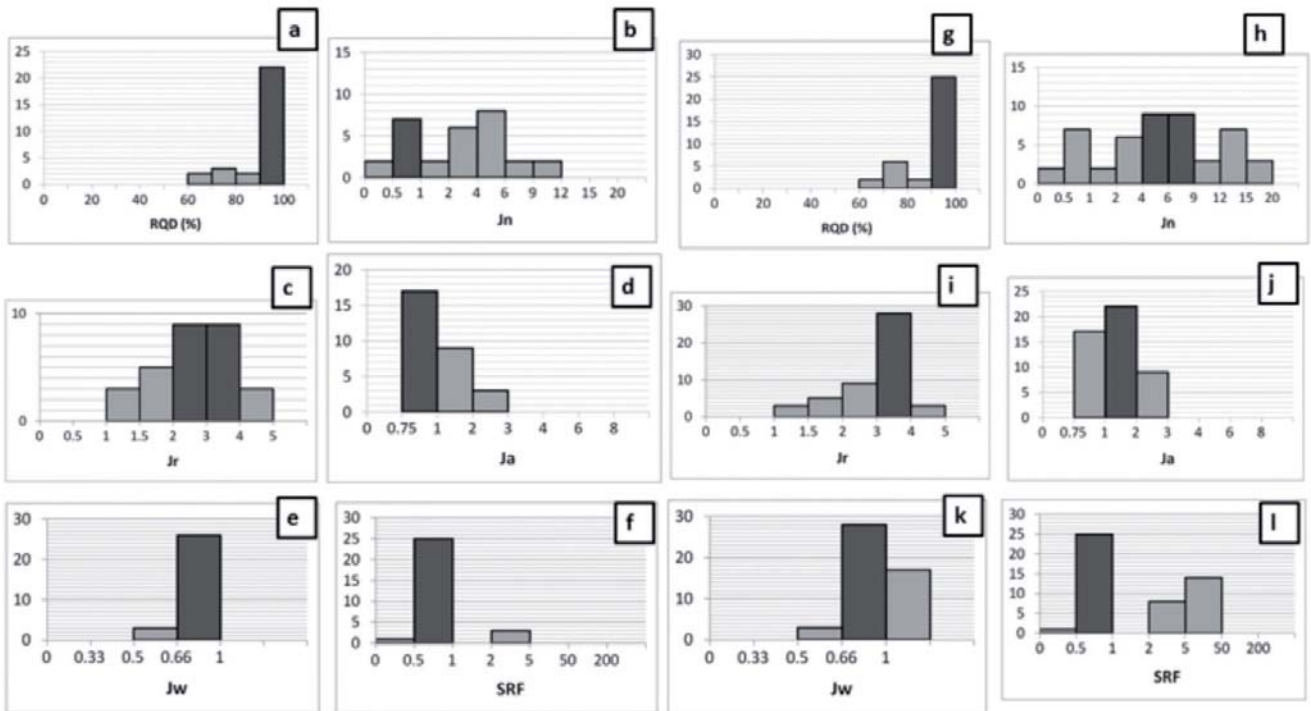


Figura 4. Histogramas de los parámetros del índice Q en las cuevas estudiadas: de a) – f) son únicamente cuevas kársticas, de g) a l) se han considerado conjuntamente las 72 cuevas, kársticas + volcánicas

Los valores de RQD son muy elevados, la gran mayoría por encima de 90%, y en el caso de grandes vanos, de más de 100 metros, todos los valores de RQD son del 100%. Incluso las cuevas volcánicas presentan valores muy altos de RQD pues en la mayoría de los casos el tamaño de bloque es grande. En el caso del índice de diaclasado  $J_n$  sí hay algo de disparidad entre los sistemas kársticos y los volcánicos. En las cavidades kársticas predominan una familia (estratificación) o dos familias de discontinuidades (estratificación + fracturas). Para rocas masivas sin diaclasar o con pocas juntas, que caracterizan las más grandes cavernas, tendríamos valores de  $J_n=0,5$  y 1, que encontramos en algunas de las salas gigantescas como Sarawak, Piedra de San Martín o el Carlista (siempre teniendo en cuenta el efecto escala). En el caso de las cavidades volcánicas la generalidad es la de tres familias de diaclasado o dos más una aleatoria, que serían las grietas de enfriamiento axiales y una o dos transversales. En algunas cuevas volcánicas con notable efecto "portal" se multiplica el  $J_n$  por 2 (NGI, 2013). Es importante señalar que la definición de las familias de juntas depende del espaciado entre planos de juntas más o menos paralelos, pero también en el vano o altura del hueco subterráneo. Si el espaciado de la junta en particular es mayor que la altura o vano, los bloques formados por esta familia de juntas normalmente serían demasiado grandes para caer hacia el hueco y por tanto deberían considerarse como aleatorias u ocasionales.

Los valores de rugosidad de juntas ( $J_r$ ) son elevados, dado que hay que tener presente el efecto escala y el tamaño del hueco y vano que se analiza. Ante desplazamientos cortantes de 10 cm todas las juntas de las cuevas consideradas a gran escala estarían en las categorías D a A, por tanto superiores a 1,5. Además en las grandes cavernas el espaciado entre las juntas es de varios metros y por tanto se añadirá como corrección una unidad al valor de  $J_r$ . Las juntas

podrían estar localmente alteradas e incluso lavadas en la parte más externa pero dado el tamaño de los huecos se debe de considerar cómo están estas juntas hacia el interior del macizo: Ja está en general en el rango 0,75 a 2 con predominio de 0,75-1. En referencia al agua en el macizo- el parámetro  $J_w = 1$ , incluso existiendo presencia de agua (a lo sumo  $J_w=0,66$  en el peor de los casos). En general, el SRF describe la relación entre la tensión y la resistencia alrededor de un hueco subterráneo. Por la profundidad de la mayoría de estas cuevas en relación al vano y a la resistencia de las rocas calcáreas se trata de tensiones favorables con  $SRF = 1$  únicamente en el caso de algunas cuevas kársticas y varias de las volcánicas la profundidad del techo es igual o menor que el vano de la cueva, en estos casos  $SRF = 2,5$  o  $5$  según el caso.

En la Fig. 5 en un gráfico logarítmico específico se muestran las 72 cavidades estudiadas. Nótese que las cuevas 60 y 54 representadas como inestables y que claramente están en la zona "estable" son en realidad cuevas estables en las que se ha producido un colapso superficial en forma de lucernario, dada la muy escasa cobertera de la zona central de vano, pero que no compromete la estabilidad global de la caverna. También cabe señalar que algunas salas de cuevas como Ayerdi, Castañar o Vallgornera aparecen en la zona inestable, ya que por la calidad geotécnica de las cuevas éstas son susceptibles de producir alguna caída de lajas o bien siguen evolucionando, pero globalmente no tendrían por qué considerarse como cuevas que pudieran colapsar. El gráfico de Q- vano es meramente indicativo y en casos complicados siempre es preceptivo realizar análisis más complejos como cinemática de bloques.

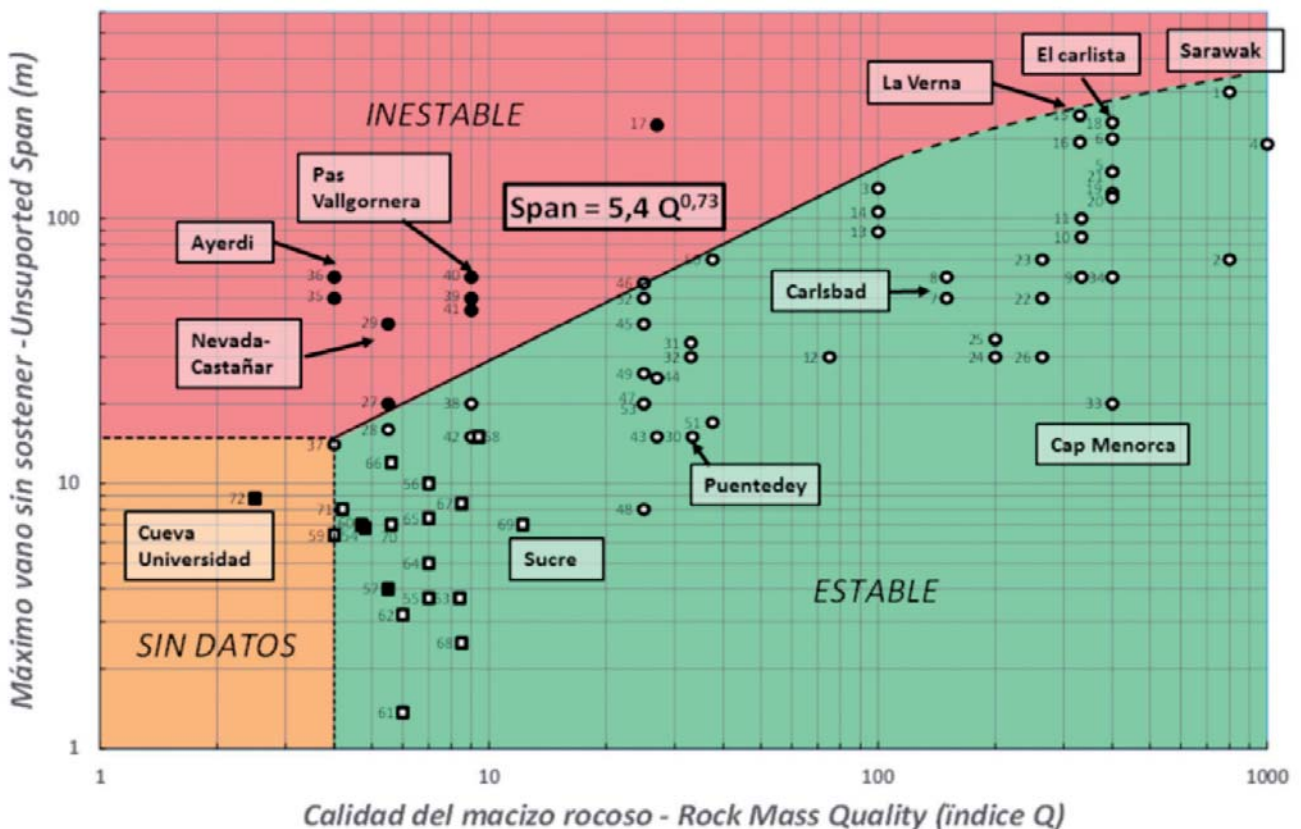


Figura 5. Ancho de cuevas y calidad de roca según el índice Q. Los círculos representan cavidades kársticas, los cuadrados tubos de lava. En negro se señalan aquellas que son inestables o se aprecian inestabilidades. La línea envolvente es una estimación del máximo vano para cuevas naturales – y marca el límite entre aquellas que son estables y las que presentan inestabilidades

En general las cuevas kársticas están en terrenos de mucha mejor calidad geomecánica que los tubos de lava. En la Fig. 5 se sintetizan las consideraciones sobre estabilidad de las cuevas estudiadas en verde el dominio estable y en rojo el inestable, representándolas en un sistema de ejes cartesianos donde Y= vano y X= calidad Q. En el límite entre zona estable (la cual engloba a la mayoría de las cuevas- aquellas sin problemáticas) e inestable o hundido es una recta en un gráfico logarítmico, la ecuación de este límite sería la siguiente:

$$\text{Vano (Span)} = 5,4 \times Q^{0.73} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Esta ecuación sería válida para el rango de  $4 < Q < 100$  y a partir del valor  $Q = 100$  puede ser ligeramente más horizontal, si bien no se tienen suficientes datos y podría ser igualmente válida. Es importante considerar que es una aproximación al problema y dentro de las zonas inestables pueden ubicarse cuevas estables y viceversa; en cualquier caso, esta metodología no resuelve el análisis cinemático de bloques metaestables.

## Conclusiones

Los gráficos existentes de estabilidad según el índice Q de Barton (Fig.2) son difícilmente aplicables a las cuevas naturales. Había además una gran descompensación de datos; por ejemplo para elaborar el gráfico de la Fig. 2 a para cavernas sin sostenimiento (Barton 1976) de los 190 datos únicamente 5 eran de cuevas naturales. Los gráficos de Q (Barton y Grimstad, 2004) pueden considerarse específicos y aplicables a obras subterráneas no naturales o hechas por el hombre. En referencia a la Fig. 2b existen en la naturaleza varias cuevas con vanos de 200 o más metros con calidades situadas en el rango de 100 a 800, a excepción de la sala "Miao Room" con un vano de 191 m y  $Q = 1000$ . Hay que tener en cuenta que el trabajo de Barton (1976) está fechado en una época en la que algunas de las cavernas de mayor tamaño del mundo como las de China, Borneo o Vietnam no estaban descubiertas todavía y otras como la Verna o el Carlista –mucho mayores que las de Carlsbad que este menciona– son típicamente cuevas visitadas por espeleólogos, no ingenieros.

El presente trabajo aporta numerosos casos reales de análisis de la estabilidad de cuevas en base a clasificaciones geomecánicas, evaluando la anchura de las cavernas y la calidad del terreno según el índice Q de Barton. Se aporta un nuevo gráfico empírico (Fig. 5) para análisis de cuevas naturales. Las clasificaciones geomecánicas son la mejor opción para analizar de forma preliminar la estabilidad de las cuevas, dado que resulta muy complicado obtener todos los parámetros requeridos en una adecuada modelización numérica por elementos finitos. El índice Q es más apropiado que el RMR ya que permite más fácilmente analizar la estabilidad de vanos variables. Las estaciones geomecánicas son la forma más factible de analizar desde el punto de vista geotécnico una cavidad donde tenemos acceso al hueco y en muchos casos es inviable o se desaconseja efectuar sondeos y ensayos de laboratorio, ambos destructivos. Se ha iniciado con 72 casos la generación de una base de datos sobre las características geotécnicas – geomecánicas de un número representativo de cuevas turísticas españolas y de las cuevas en general con mayores vanos, lo cual supone una aportación a los gráficos convencionales que tienen escasos casos prácticos en grandes vanos con terrenos muy buenos. Del análisis de cada uno de los parámetros que integran el índice Q cabe concluir que el conjunto de cuevas

analizadas cumple los requisitos de Barton (1976) para huecos abiertos permanentes sin sostenimientos expresados en la tabla 6:

$$J_n \leq 9, J_r \geq 1.0, J_a \leq 1.0, J_w = 1.0 \text{ y } SRF \leq 2,5$$

Las condiciones de grandes cavernas (vanos  $\geq 100$  m), que se dan únicamente en terrenos kársticos –no hay volcánicas con esos vanos– son más estrictos:

$$RQD = 100, J_n \leq 4, J_r \geq 4, J_a \leq 1, J_w = 0,66-1 \text{ y } SRF \leq 1$$

Esta metodología permite de un vistazo rápido y con solo algunos datos de campo ver en qué zona del gráfico (Fig. 5) se encuentra la cueva: con ello si previsiblemente es estable o podría presentar algunas inestabilidades. Esto no es suficiente para asegurar la estabilidad de la cueva pero si permite saber cuán lejos y con ello si es alto o bajo el factor de seguridad –según lo alejado que este el punto (que representa a la cueva mediante ancho y calidad) de la zona límite. Es preciso un análisis más detallado de cuñas, lascas que puedan desprenderse, etc., por lo que en grandes salas se recomienda un sistema de monitoreo en caso de que se pretendan hacer visitables. Por otro lado y como perspectivas de investigación a futuro se puede analizar mediante métodos numéricos algunas de las salas representativas de diferentes anchos y calidades para establecer un factor de seguridad de la misma y de esta forma establecer unas zonas en el gráfico, en la parte estable donde se indiquen por ejemplo factores de seguridad de  $FoS = 1$  (línea límite), 1.1, 1.2, 1.3 y así hasta 1.5, en la línea de lo que Houghton y Stacey en 1980 propusieron (Fig.2b) sobre la Fig. 2a de Barton (1976).

## Agradecimientos

Agradecemos de manera especial al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador por su patrocinio en este trabajo. A Theofilos Toulkeridis, por su ayuda sobre los tubos de lava de Galápagos. Andy Eavis y Tony Waltham por sus fotografías y datos de las cavernas más grandes del mundo. A todos los que han aportado datos o fotos sobre las cuevas españolas: Rebeca Martín, Guiem Mulet, Ovidio Altable, Sergio Laburu, Rupo, Iraide de turismo de Karrantza, Ana López por su apoyo logístico y en la toma de datos de campo en Galápagos.

## Referencias

- Barton, N., 1976. Unsupported underground openings. *Rock Mechanics Discussion Meeting*, Bofu, Swedish Rock Mechanics Research Foundation, Stockholm, pp. 61-94.
- Barton, N., 1984. Effects of rock mass deformation on tunnel performance in seismic regions. *Proc. Caracas Symp., Adv. Tunnel. Technol. and Subsurf. Use*. Vol. 4: 3: 89-99.
- Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 2002, 185-216.
- Barton, N., 2007. Rock mass characterization for excavations in mining and civil engineering. In: C. Mark, R. Pakalnis, and R.J. Tuchman (Eds) *Proc. of Int. Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining*, Pittsburgh, NIOSH, p. 3-13



- Barton, N., y Bieniawski, Z.T., 2008. RMR and Q - Setting records straight. *Tunneling and tunnelling international*, Feb 2008, pp. 26-29.
- Barton, N. y Grimstad, E., 2004. The Q system following thirty years of development and application in tunnelling projects. *Eurock 2004 & 53<sup>rd</sup> geomechanics Colloquium*. Schubert (ed.)
- Barton, N., Lien, R. y Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 6: 4: 189-236.
- Bieniawski, Z. T., 1973. Engineering Classification of jointed rock masses. *Trans S Afr Int Civ Engrs*, 15, 335-344.
- Bieniawski, Z. T., 1974. Geomechanics Classification of rock masses and its application in tunnelling. In: *Advances in rock mechanics*, 2 (A) 27-32 Washington DC, Nat Acad Sci.
- Bieniawski, Z.T., 1979. The geomechanics classification in rock engineering applications. *Reprinted from Proc. 4th Cong. Of the Int. Society for rock Mech.* ISRM, Montreux. Balkema, Boston. 5, 55-95.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley, Chichester, 251 pp.
- Bieniawski, Z.T., 1997. Quo vadis Rock Mass Classifications. *Viena Eurock 97. Workshop Felsbau*, nº 3/97, 177-178.
- Bieniawski, Z.T., 2011. *Errores en la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y su corrección*. Conferencia magistral Adif - Geocontrol, 35 pp.
- Cornejo, L. y Salvador, E., 1996. *Manual de túneles interurbanos de carretera*. Gobierno Vasco, 211 pp.
- Grimstad E. y Barton, N., 1993. Updating of the Q-System fr NTM. *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Fagernes. (Eds Kompen, Opsahl and Berg.) Norwegian Concrete Association, Oslo.
- Hoek, E., 2007. *Practical Rock Engineering. Set of course notes. Shear strength of discontinuities*. [www.rocscience.com/education/hoek\\_corner](http://www.rocscience.com/education/hoek_corner) (4-dec-2014)
- Houghton, D.A. y Stacey T.R., 1980. Application of Probability Techniques to Underground Excavation, *Proc. 7th Regional Conf. for Africa on Soil Mech. And Found. Eng.*, A.A. Balkema, Accra, vol. 2 pp. 879-883
- N.G.I., 2013. *Using the Q system. Handbook. Rock mass classification and support design*. Ed. NGI, Oslo, Norway. 57 pp.
- Waltham T., 2002. The engineering classification of karst with respect of the role and influence of caves. *Int. J. Speleol*, 31 (1/4) pp. 19-35
- Waltham A.C. y Fookes, P.G., 2005. Engineering classification of karst ground conditions. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers. *The Virtual Scientific Journal*. ISSN 1814-294X. [www.speleogenesis.info](http://www.speleogenesis.info). 20 pp.
- Waltham T., Bell F. y Culshaw M., 2005. *Sinkholes and Subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer: Berlin, 382pp.
- Waltham, A.C. y Fookes, P.G., 2005. Engineering Classification of Karst Ground Conditions. Speleogenesis and Evaluation of Karst Aquifers. *The Virtual Scientific Journal*, 3 (1), p.2.
- Waltham, A.C. y Park H.D., 2002. Roads over lava tubes in Cheju Island, South Korea. *Engineering Geology*, 66, pp. 53-64.

## **Análisis estructural y geomecánico en zonas inaccesibles de cavernas naturales mediante técnicas fotogramétricas: aplicación en la entrada de la cueva de Artá (Mallorca)**

L. Jordá-Bordehore <sup>(1)</sup>, A. Riquelme <sup>(2)</sup>, R. Tomás <sup>(2)</sup> y M. Cano <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador,  
ljorda@espol.edu.ec

<sup>(2)</sup> Dpto. de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica Superior de Alicante. Universidad de Alicante. P.O. Box 99, 03080 Alicante, España.

---

### **RESUMEN**

La estabilidad de la mayoría de las cuevas kársticas carbonatadas someras se encuentra controlada por las discontinuidades del macizo rocoso, tales como la estratificación, fallas y diaclasas. Para caracterizar geomecánicamente una cavidad, y con ello determinar su estabilidad, resulta clave un adecuado análisis y censo de las discontinuidades presentes, determinando sus orientaciones medias y su dispersión. La medida de estas orientaciones se realiza de forma habitual mediante brújula con clinómetro. Sin embargo, este procedimiento manual plantea una serie de inconvenientes (e.j. solamente son accesibles las fracturas situadas en la parte baja o hastiales de las salas de las cuevas y bocas de entrada). Durante la última década, se ha extendido el uso de técnicas remotas como el 3D láser escáner o la fotogrametría digital en la caracterización de macizos rocosos. Estas técnicas permiten obtener nubes de puntos 3D de las paredes y techos de la cavidad con una gran resolución y precisión. A partir de estas nubes de puntos 3D es factible obtener las orientaciones y algunos otros parámetros de las discontinuidades, tales como el espaciado, la continuidad o la rugosidad. En este trabajo se lleva a cabo una comparativa entre los datos geomecánicos obtenidos mediante procedimientos manuales convencionales (i.e. mediante brújula en afloramientos accesibles) y mediante la técnica fotogramétrica *Structure from Motion* (SfM) de la zona de la entrada de la cueva de Artá (Mallorca). Los resultados muestran una excelente correlación entre los parámetros geomecánicos obtenidos por ambos procedimientos en las zonas comunes de adquisición de datos. Asimismo, ponen de manifiesto la ventaja de combinar ambas técnicas para elaborar un censo de discontinuidades más completo y realista.

**Palabras clave:** Análisis estructural, cuevas, geomecánica, *Structure from Motion*, técnicas remotas.

## ***Structural and geomechanical analysis in inaccessible areas of natural caves by photogrammetric techniques: application on the entrance of Artá Cave (Mallorca)***

### **ABSTRACT**

*The stability of most shallow caves in carbonate karstic environments is controlled by rock discontinuities, such as stratification, faults and joints. A proper analysis and census of discontinuities, determining their orientations and dispersion is key to assess the stability of a cave. The orientation of discontinuities is often performed using compass with clinometer. However, this manual process raises a number of drawbacks (e.g. only fractures located at the lower part of the cave walls and entrances are visible). Over the past decade, the use of remote sensing techniques, such as*

*LiDAR and photogrammetry, has spread in the characterization of rocky massifs. These techniques allow us to obtain 3D point cloud of the walls and ceilings of the cavity with high resolution and accuracy. From these 3D point cloud, it is feasible the three dimensional reconstruction of the cavity and the obtaining of the orientation and some other parameters of discontinuities, such as spacing, persistence or roughness. This article carries out a comparison between the geomechanical data obtained by conventional manual procedures (i.e by compass in accessible outcrops) and by a photogrammetric technique called Structure from Motion (SfM) at the entrance of the cave named Cueva de Artá (Mallorca). Results show an excellent correlation between the geomechanical parameters obtained by both procedures in common areas of data acquisition. Furthermore, they show the advantage of combining both techniques to develop a more complete and realistic discontinuities census.*

**Keywords:** caves, Structure from Motion, remote techniques, geomechanicsstructural analysis.

## Introducción

Las cuevas de grandes dimensiones presentan importantes problemas de acceso a los techos y paredes para la toma de datos estructurales, durante el proceso de caracterización geomecánica. Esta caracterización se lleva a cabo mediante el uso de brújula y el levantamiento de estaciones geomecánicas que permiten tomar datos de la orientación y propiedades de las discontinuidades y de la matriz rocosa, únicamente en zonas bajas de la entrada o las cámaras de las cuevas. La mayoría de cavidades kársticas tienen una génesis mixta entre disolución de una parte del macizo, principalmente a favor de zonas de debilidad estructural, y el desprendimiento de bloques o estratos hasta alcanzar la estabilidad o el colapso completo del hueco. Por tanto, las cavidades kársticas tienen un marcado control estructural, tanto para la etapa de disolución como en la de desprendimientos de bloques. En consecuencia, la toma de datos de orientación y propiedades de las discontinuidades es clave para el análisis de la estabilidad de la cueva.

Las técnicas de adquisición remota se han aplicado a un gran número de investigaciones científicas. Las dos técnicas más relevantes son el *3D laser scanning* terrestre y la técnica de fotogrametría digital SfM (*Structure from Motion*) (Abellán et al., 2016). La primera técnica mencionada consiste en un sensor LiDAR (*Ligh Detection and Ranging*), que fue mencionada por primera vez en los años 60 (Ring 1963). Esta instrumentación puede venir posicionada en varias plataformas, siendo la de mayor interés para esta investigación el posicionamiento sobre un trípode, recibiendo el nombre de TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) o láser escáner terrestre. Esta técnica permite adquirir las coordenadas de millones de puntos de una superficie con elevada rapidez y precisión. Una de las principales diferencias que distinguen esta técnica de la segunda es que el 3D láser escáner adquiere los puntos de la superficie en tiempo real, cuando la segunda requiere un procesado de las imágenes (Slob et al, 2005). Estas imágenes son fotografías en formato digital adquiridas desde distintos puntos de vista, a las que se les aplica un algoritmo con computadoras. La calidad del modelo generado con esta técnica depende en gran medida de la calidad de las imágenes adquiridas, su técnica de adquisición y de la aplicación del algoritmo a los datos. Las técnicas de escaneo de cavidades mediante TLS han sido ampliamente empleadas en la última década (Gallay et al., 2015, VVAA 2015, Idrees y Pradhan, 2016). Las principales aplicaciones de esta técnica en cuevas han tenido lugar en los campos de la arqueología, la geomorfología, los cambios morfológicos en la superficie de hielo, la ecología, la paleoclimatología, la paleontología, la divulgación, la visualización 3D,

en los riesgos geológicos (Idrees y Pradhan, 2016). La mayoría de las problemáticas geotécnicas en cavidades se producen en la entrada de la misma, normalmente por la conjunción de un macizo rocoso menos tensionado y la presencia de mayores superficies libres, como son la del hueco de la cavidad y la del exterior, hacia las que pueden progresar las inestabilidades cinemáticas. El uso de las técnicas de adquisición remota permite la digitalización de la superficie del interior de una cueva, por lo que TLS puede resultar de gran utilidad en el estudio de este problema geotécnico. Sin embargo, el desplazamiento de la instrumentación en condiciones de seguridad puede ser inviable cuando se trata de cavidades situadas en parajes remotos. Por otro lado, las técnicas fotogramétricas tienen la ventaja de emplear sensores (i.e. cámaras fotográficas) mucho más ligeros y manejables que el TLS. Desde el punto de vista de adquisición de datos, la fotogrametría presenta el inconveniente de ser difícilmente aplicable en el interior de las cuevas, debido a la diferencia de iluminación y la presencia de sombras, así como por la conveniencia de no utilizar flash. Sin embargo, es una técnica muy efectiva en las zonas iluminadas de forma natural como son las entradas de las cuevas.

En este trabajo se hace uso de la técnica fotogramétrica SfM para llevar a cabo la restitución en tres dimensiones de la entrada de la Cueva de Artá (una de las cuevas más turísticas de Mallorca) a partir de una serie de fotografías digitales. El posterior análisis de la nube de puntos 3D obtenida ha permitido determinar la orientación de los planos que aparecen en la reconstrucción del modelo mediante el programa de código abierto Cloud Compare (2016), llevando a cabo una selección manual de las superficies de discontinuidad. La combinación de los datos obtenidos a partir de esta técnica remota y de los datos tomados por procedimientos convencionales permitiría llevar a cabo un análisis estructural o geomecánico de la cavidad para obtener unos conjuntos de polos de discontinuidades más completos y realistas.

Los motivos principales por los que el trabajo se ha desarrollado en la entrada de la cueva de Artá son: a) los techos son completamente inaccesibles al "mapeo" manual, por estar a más de 22 metros de altura en su punto central; b) en los laterales de la entrada es factible comparar la toma de datos manual con la obtenida a partir de las nubes de puntos 3D; c) toda la entrada está iluminada por luz natural, lo que facilita la adquisición de imágenes fotográficas de gran calidad. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es comparar la toma de datos estructurales mediante SfM y los obtenidos de forma convencional con brújula, en zonas accesibles de la cavidad. De esta manera se puede estimar el grado de precisión de la técnica fotogramétrica en zonas inaccesibles.

## **Geología y geomorfología de la cueva de Artá**

La cueva de Artá es una de las cinco cuevas adaptadas al turismo de la isla de Mallorca, la isla del Archipiélago balear con mayor número de cuevas acondicionadas (Ginés, 2007, Robledo y Durán, 2010). La cueva se ubica en la costa noreste de Mallorca, en la zona acantilada de Cap Vermell (municipio de Capdepera), próximo a la cala-playa de Canyamel (Fig.1). La cueva se abrió al público alrededor de 1880, siendo las primeras exploraciones documentadas de 1806 (Ginés, 2007). Tiene un recorrido de unos 500 m de desarrollo horizontal. La habilitación al turismo se inicia con la construcción de la escalinata (Fig.2), con objeto de la fallida visita de



la reina Isabel II, (Robledo y Durán, 2010). Aunque no existen cifras oficiales, se estima que la cueva recibió más de 100.000 visitantes anuales en la década del 2000 (Robledo y Durán, 2010).

La cueva de Artá está localizada en calizas Jurásicas de las Sierras de Levante y es un buen ejemplo de cueva litoral desarrollada en los complejos ambientes tectónicos de las montañas mallorquinas (Fornós et al., 2012).. La entrada o boca de la cueva que da paso a una sala visitable se abre a una altura de 45 m sobre el nivel del mar en un acantilado y tiene unas dimensiones considerables: 50 m de ancho y 22 m de altura (Figs. 1 y 2).

En la boca de entrada se aprecia el buzamiento de estratos calizos muy marcado hacia el E y una falla de buzamiento hacia el O que dan una morfología muy característica en forma de diedro (Figs. 1c y 2). La cueva tiene un marcado control estructural. La formación de la cueva podría haberse producido por la disolución de un núcleo central y el progresivo desprendimiento de estratos y bloques hacia el interior del hueco, para dejar espacio a más desprendimientos hasta alcanzar el equilibrio cinemático de los bloques, o un arco estable de descarga.

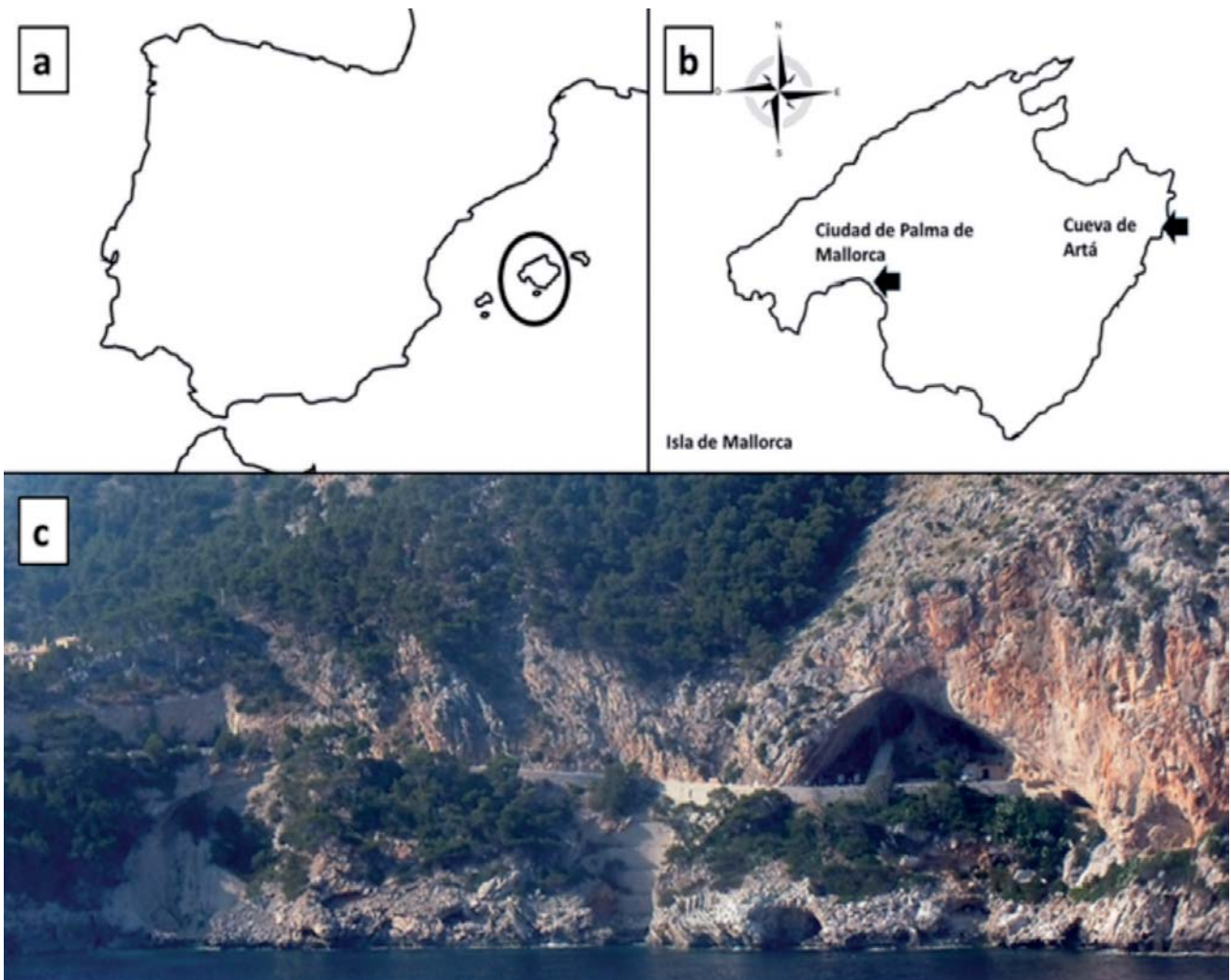


Figura 1. a y b) Localización de la cueva de Artá c) fotografía de la entrada de la cueva (adaptado de una imagen cortesía de A. Manrique Cerrato)

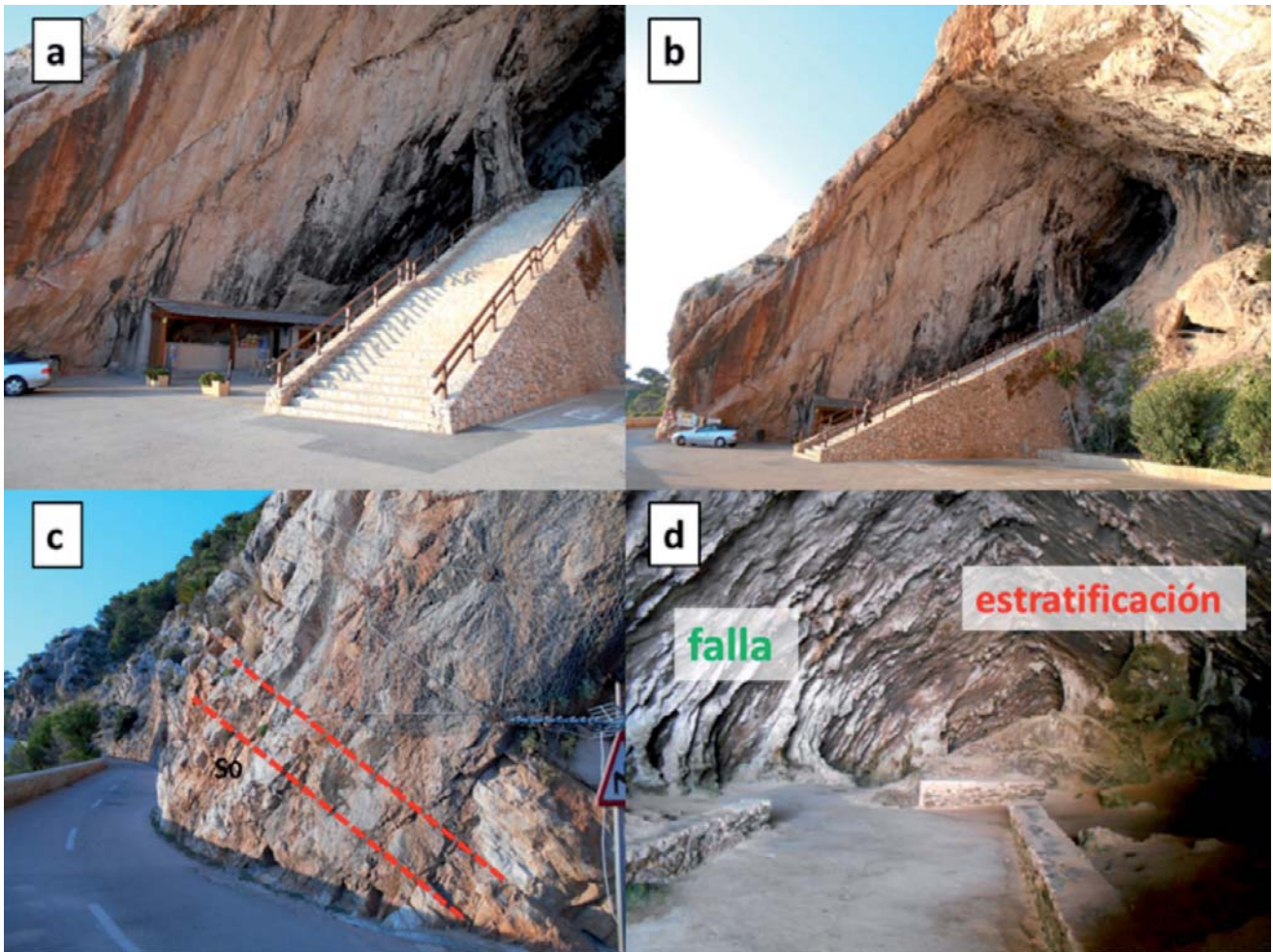


Figura 2. a) Entrada de la cueva, con la escalinata de acceso construida para la visita de la Reina Isabel II. b) Panorámica de la entrada de la cueva, donde se puede apreciar la altura de la boca (22 m) c) detalle de la estratificación en el lado izquierdo de la entrada de la cueva. d) Estrechamiento situado tras subir la escalinata formado por bloques caídos que da paso a la zona con mayor profusión de espeleotemas. En la imagen se aprecia a la izquierda la falla y a la derecha la estratificación

## Metodología

### Toma de datos mediante Structure from Motion

La fotogrametría es un tipo de técnica remota que permite extraer, a partir de un par o de un conjunto de imágenes, las propiedades geométricas tridimensionales contenidas en una escena. Las distintas estrategias para obtener esta información tridimensional se basan en los principios de la visión estereoscópica (empleando únicamente dos fotografías) o en modernas técnicas de reconstrucción tridimensional que emplean algoritmos de correlación automática de imágenes (e.g. *Structure-from Motion*, SfM; Jordá *et al.*, 2016). En este trabajo se ha hecho uso de ésta segunda técnica (SfM) para reconstituir la totalidad del talud de entrada a la Cueva de Artá (Fig. 2). Para ello, a partir de 72 fotografías tomadas con cierta oblicuidad –para corregir el efecto domo ( James y Robson 2014) con una cámara digital compacta de 20 Me-



gapixels en la entrada de la cueva, se ha realizado una restitución fotogramétrica empleando el programa Agisoft Photoscan (2016) que ha proporcionado una densa nube de puntos 3D. Posteriormente, mediante el programa libre Cloud Compare (2016), se ha analizado la nube de puntos 3D obtenida, seleccionando manualmente cada uno de los planos o discontinuidades identificados visualmente para obtener su dirección y buzamiento mediante el ajuste de un plano.

### **Puntos de control en el talud**

Para poder orientar y escalar la nube de puntos 3D, obtenida mediante SfM, es necesario tener las coordenadas precisas de algunos puntos de control (en lo sucesivo GCP), al menos tres, de la superficie del terreno de la zona fotografiada. Las coordenadas de estos puntos (Fig. 3) pueden obtenerse mediante topografía u otras técnicas, en función de la precisión requerida. El uso de GPC permite corregir parámetros internos de las imágenes digitales, corregir distorsiones (e.g. efecto domo) y optimizar la posición y orientación de las cámaras. Por este motivo, el uso de 3 GPC puede parecer impreciso. Sin embargo, no parece coherente utilizar un elevado número de GPC, cuyas coordenadas han sido determinadas con elevada precisión, cuando buena parte de la orientación de los planos del talud serán tomados con brújula. Cuando se requiera mayor precisión, será necesario el uso de un mayor número de GPC. Para los objetivos perseguidos en esta investigación, en la que se emplean pocos recursos, se han determinado tres GPC (utilizando plastilina de colores) con el fin de determinar una matriz de transformación rígida que permita escalar y orientar la nube de puntos adquirida, tal que las lecturas de orientación de planos estén alineadas respecto a la vertical y al norte magnético (no al geográfico). En este caso, las coordenadas de los GCPs se han definido en un sistema relativo, mediante la orientación de dos de ellos respecto a un origen arbitrario de coordenadas (0x,0y,0z) haciendo uso de la brújula y de un distanciómetro.

### **Calidad del censado de polos. Distribución de Fisher**

Una vez tomadas las orientaciones de las discontinuidades, tanto de forma manual (con brújula), como mediante análisis de nube de puntos 3D a partir de SfM, es preciso agrupar esas medidas en familias o clústeres. Para este fin se han representado los polos de las discontinuidades medidas en proyección estereográfica polar equiareal y se han analizado haciendo uso del software DipsV7 (Rocscience, 2016).

La distribución de Fisher se emplea a menudo para modelizar la distribución de la orientación de vectores en tres dimensiones (Fisher, 1953), tal y como sucede con la distribución de orientaciones de juntas (vectores polo) en una esfera o semiesfera. Una distribución de Fisher permite describir la distribución angular de orientaciones respecto de un vector orientación medio y su simetría respecto de la media. La función de densidad de probabilidad ( $f$ ) se puede expresar como (Rocscience, 2016):

$$f(\theta) = \frac{K \sin(\theta) e^{K \cos(\theta)}}{e^K - e^{-K}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde  $\theta$  es la desviación angular del vector medio (en grados) y K es la "constante de Fisher" o factor de dispersión.

El valor de la K Fisher puede estimarse a partir de la siguiente ecuación para grupos de datos mayores de aproximadamente 30 vectores (Fisher, 1953):

$$K \approx \frac{N-1}{N-R} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde N es el número de polos y R es la magnitud del vector resultante (magnitud del vector suma de todos los polos del conjunto de la familia).

De forma análoga a la distribución normal, es posible definir una desviación típica o estándar, estimada a partir de la siguiente ecuación (Butler, 1992):

$$\theta = \frac{81^\circ}{\sqrt{K}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde  $\theta$  es la desviación angular estándar o también llamada "dispersión angular" de la Distribución de Fisher y K es la constante de Fisher. El valor de la K de Fisher describe la "estrechez" o dispersión en un grupo o clúster. Un valor alto de K (e.g. 50) implica un grupo más concentrado que un valor menor de K (e.g. 20) que representa un grupo más disperso.

## Resultados y discusión

En este trabajo se han desarrollado dos campañas de toma de datos de campo en la boca de la cueva. Durante la primera campaña (noviembre 2015), se tomaron fotografías para la posterior restitución fotogramétrica. En la segunda campaña (marzo 2016), se levantó una estación geomecánica para la toma de datos estructurales y geotécnicos de las discontinuidades accesibles. La boca de la cueva presenta dos importantes sistemas de fracturas que gobiernan la estabilidad de la misma (Fig. 2): (a) la estratificación, representada por un gran plano localizado en el lado derecho de la entrada a la cueva; y (b) una gran falla que define la pared occidental.

Para poder llevar a cabo la orientación y escalado del modelo 3D obtenido a partir de la restitución fotogramétrica se colocaron tres puntos de control marcados con plastilina de color en la barandilla de la escalinata de subida. Dos puntos se situaron en la occidental (izquierda si se mira al acantilado desde el mar) y uno en la oriental (Fig. 3). La orientación respecto al norte magnético de las alineaciones entre los puntos 1-2 (que además definían una línea horizontal) y 1-3 permitió asignar coordenadas relativas a todos los puntos. Las coordenadas de estos puntos de control se muestran en la Tabla 1.

Como puede apreciarse en la Figura 4, los estereogramas de los planos obtenidos con las dos técnicas muestran dos familias principales de discontinuidades ( $S_0$  y F), así como algunas juntas aleatorias. En la Tabla 2 se muestran los valores de dirección de buzamiento, buzamiento y K de Fisher de cada una de las familias de juntas (*discontinuity sets*) identificadas (Fig. 4). La toma de datos manual es la que presenta los polos más juntos entre sí (K variable entre 137 y 194) debido a que se han podido tomar pocos datos en zonas muy localizadas, de ahí la escasa



dispersión de resultados. Por el contrario, en el caso de las orientaciones determinadas con SfM, los clústeres están más abiertos (K entre 60 y 119) siendo además más representativos de los grandes planos visibles debido a que las medidas se han tomado sobre planos extraídos de mayor tamaño que los medidos con la brújula. Como cabría esperar, combinando ambos procedimientos manual y SfM la dispersión de los polos es mayor aún (K variable entre 55 y 89). Por tanto, independientemente de que los datos se adquieran por procedimientos clásicos (i.e. de forma manual), remotos (i.e. mediante SfM) o por combinación de ambos sets de datos, se obtienen dos familias de discontinuidades correspondientes a la estratificación ( $S_0$ ) y a la falla (F) (Tabla 2). Asimismo, se aprecian algunas juntas de escasa entidad que aparecen dispersas en el estereograma y que se corresponden con familias menores o aleatorias (Fig. 4).

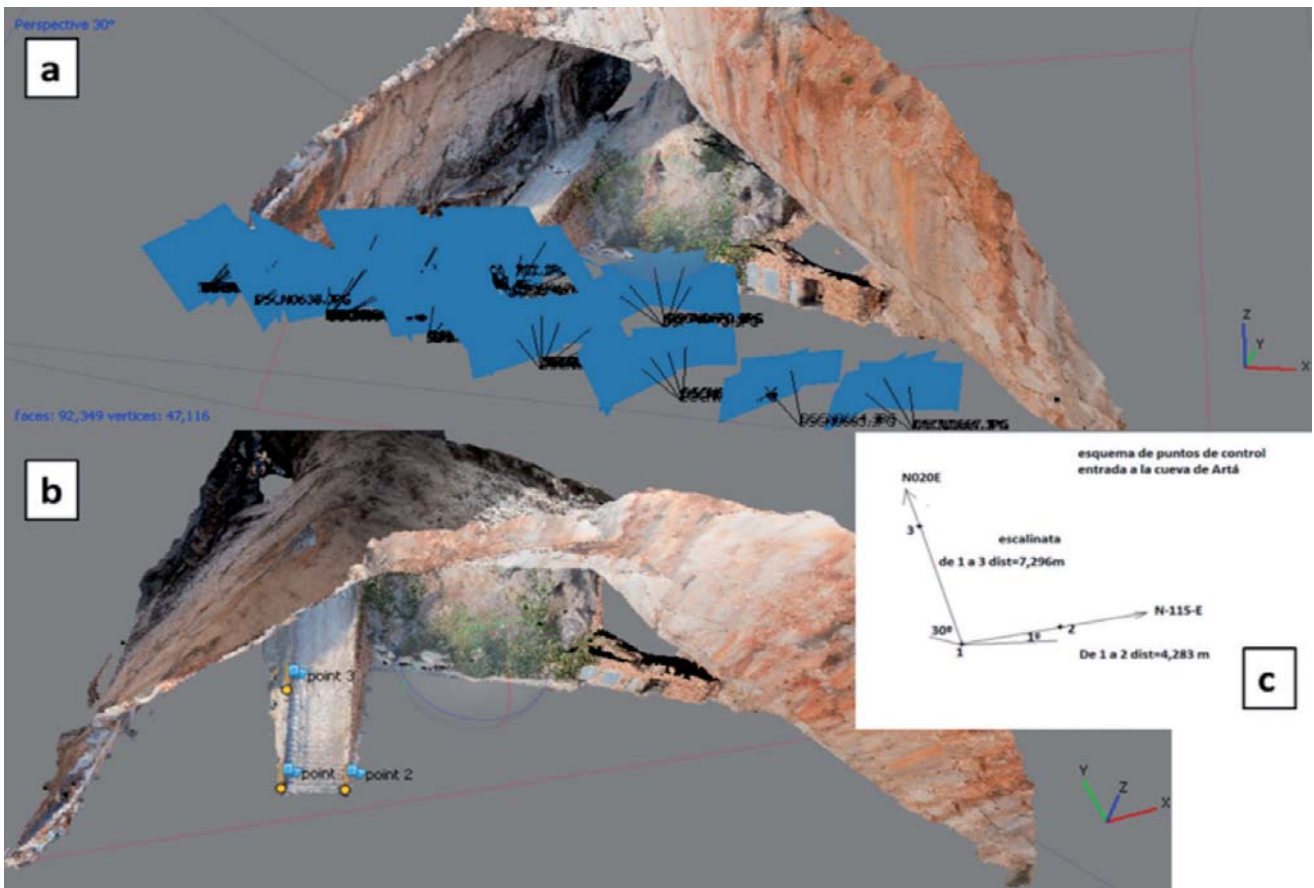


Figura 3. Nube de puntos 3D de la entrada a la cueva de Artá mediante Agisoft Photoscan. En a) se muestran las orientaciones de las fotografías empleadas para el modelo (en azul), y en b) se proporciona una vista cenital de la boca de la cavidad donde se aprecian los puntos de control localizados en la escalinata. c) Esquema de cálculo de las coordenadas relativas de los puntos de control utilizados para la restitución fotogramétrica

Puntos	X	Y	Z
1	0,000 m	0,000 m	0,000 m
2	3,880 m	-1,812 m	0,000 m
3	2,160 m	5,940 m	3,648 m

Tabla 1. Puntos de control (GCP) establecidos en la escalinata. Obsérvese que el sistema de referencia es relativo. Las coordenadas planimétricas (X a Y) vienen referida al norte magnético. El eje Z corresponde a la dirección vertical

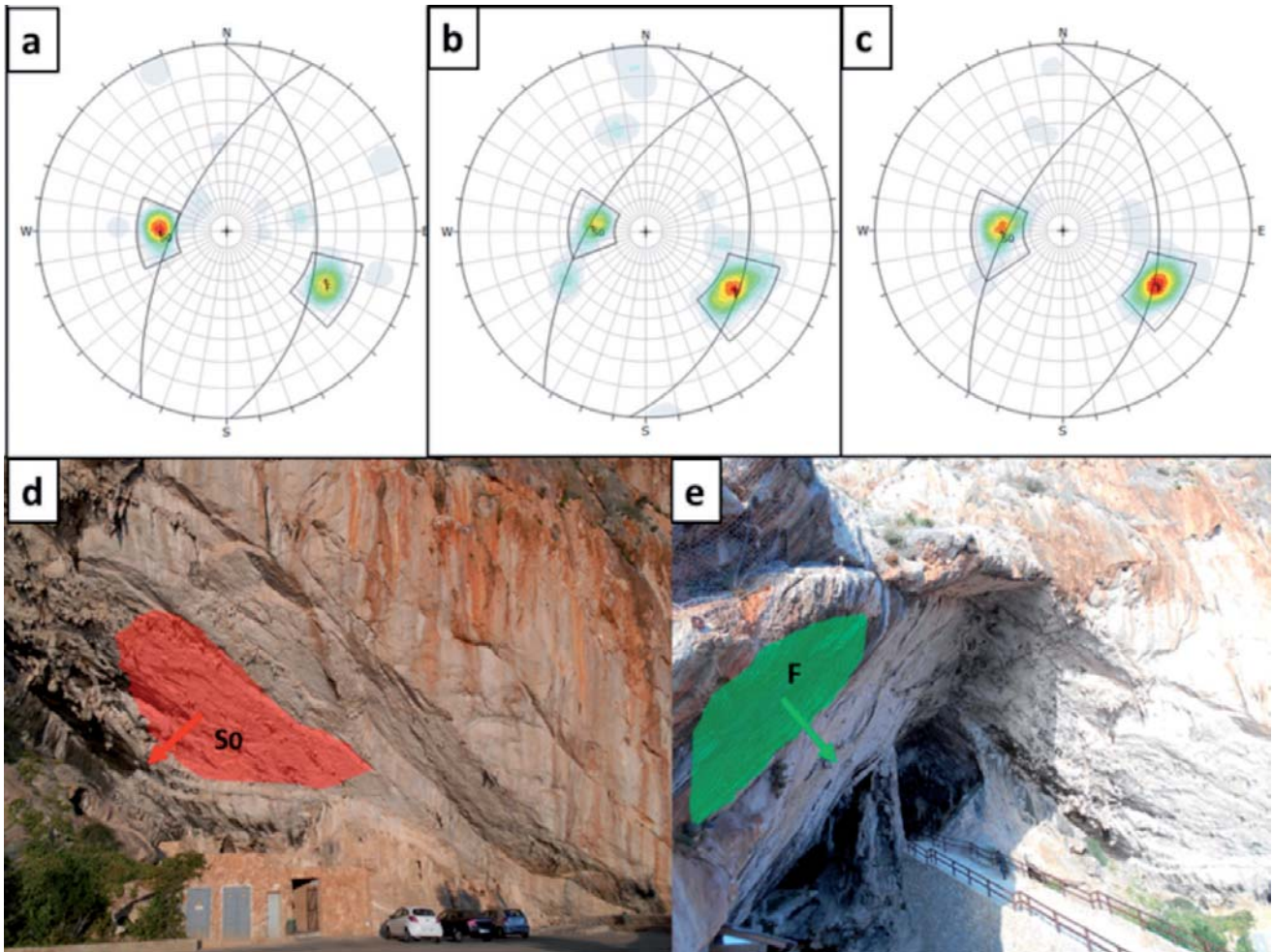


Figura 4. Estereogramas de las nubes de polos de las discontinuidades (representación en proyección equiareal, hemisferio inferior) obtenidas: a) mediante brújula; b) mediante SfM; y c) por combinación de polos obtenidos de forma manual y mediante SfM. d) Detalle del plano de estratificación (S<sub>0</sub>) existente en la pared derecha u oriental de la cueva. e) Detalle del plano de falla (F) existente en pared izquierda u occidental de la cueva

Método de toma de datos	Familia de discontinuidades	Dirección de buzamiento (°)	Buzamiento (°)	K de Fisher
Manual (mediante brújula)	Estratificación (S <sub>0</sub> )	089	39	137
	Falla (F)	297	61	194
Remota (mediante SfM)	Estratificación (S <sub>0</sub> )	095	32	119
	Falla (F)	303	59	60
Combinando campo y SfM	Estratificación (S <sub>0</sub> )	088	36	55
	Falla (F)	300	60	89

Tabla 2. Orientaciones de las discontinuidades determinadas

## Conclusiones

La técnica de fotogrametría SfM resulta de gran efectividad para la toma de datos estructurales en zonas inaccesibles de cuevas. Su uso combinado con la toma de datos convencionales con brújula y estación geomecánica tiene una gran ventaja al permitir cotejar los datos tomados en un punto accesible mediante ambas técnicas. En el caso estudiado de la entrada de la cueva de Artá, las zonas inaccesibles alcanzan una altura de más de 20 metros. A simple vista se aprecian dos familias importantes: una falla y la estratificación que pueden ser medidas en la parte baja de la cueva pero que presentan un gran desarrollo y por tanto para su adecuada caracterización se requiere disponer de datos de orientación (y eventualmente otros parámetros tales como rugosidades, persistencias) en la parte alta.

Se ha aplicado la técnica SfM para tomar medidas en la parte inaccesible y se ha comparado con la toma de datos manuales con brújula en la parte accesible. La comparación entre las medidas de orientación se ha realizado mediante análisis estereográfico y distribución estadística K de Fisher, el resultado muestra una buena correlación entre la toma de datos remota y manual.

La técnica fotogramétrica y en particular el SfM es de gran aplicación en el análisis estructural y geomecánico de taludes. En el caso de las cuevas la técnica fotogramétrica a priori parece solo aplicable a la boca de las mismas, donde las superficies están iluminadas con la luz natural.

En futuras investigaciones se propondrá la aplicación en el interior de cuevas, para lo cual es preciso prestar especial atención al modo y sistema de iluminación artificial, ya que esta técnica no permite el uso de flashes por las diferencias de iluminación de píxeles en diferentes fotografías a solapar.

## Agradecimientos

A aquellos que nos han ayudado en la toma de datos de campo en Artá y los que nos han suministrado información de la cueva: Armando Manrique, Mercedes Bordehore, Ana López, Miquel Ginard y Joan J. Fornos. El software Photoscan ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y Fondos Feder en el marco del proyecto TIN2014-55413-C2-2-P.

## Referencias

- Abellán, A., Derron, M.H., y Jaboyedoff, M. (2016) Use of 3D Point Clouds in Geohazards. *Special Issue: Current Challenges and Future Trends, Remote Sens*, 8(2):130; doi: 10.3390/rs8020130.
- AgiSoft PhotoScan Professional (Version 1.2.4) (Software). 2016. Retrieved from <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>
- Butler, R.F. 1992. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*, Blackwell Science.



- Cloud compare. 2016. CloudCompare 2.7: 3D point cloud and mesh processing software. Open Source Project <http://www.danielgm.net/cc/> (01/05/2016)
- Fisher, R., 1953. Dispersion on a sphere. *Proc. Royal Society London*, A217, 295-305.
- Fornós, J.J., Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, Ll., Gràcia, F., Merino, A., Onac, B.P., Tuccimei, P., y Vicens, D. 2012. Upper Pleistocene deposits and karst features in the littoral landscape of Mallorca Island (Western Mediterranean): a field trip En: Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac, B.P. & Fornós, J.J. (eds). 2012. Mallorca: A Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 18, pp. 163-219.
- Gallay M., Kanuk L., Hochmuth Z., Meneely J.D., Hofierka J. y Sedlak V. 2015. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 44 (3):277-291
- Ginés J. 2007. Las cuevas turísticas de las islas Baleares: antecedentes y estado de la cuestión. En: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (Eds.), *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, nº 24, 17-30.
- Idrees M.O., y Pradhan B. 2016. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. *International Journal of Speleology* 45 (1): 71-88.
- ITGE, 1991. *Hoja geológica nº 700*, Manacor.
- James, M. R., & Robson, S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39 (10), 1413-1420.
- Jordá Bordehore, L., Tomás Jover, R., Arlandi Rodríguez, M. y Abellán Fernández, A. 2016. *Manual de estaciones geomecánicas y descripción de macizos rocosos en afloramientos*. Ed: C.Lopez Jimeno Ud Proyectos ETSI Minas UPM. Madrid.
- Manrique, A., 2016. *Volando sobre Mallorca*. <http://blogliterarioyfotografico.blogspot.com.es/2013/08/volando-sobre-mallorca.html> (01/05/2016)
- Ring, J. 1963. The Laser in Astronomy, *New Scientist*, Jun 20: 672-673
- Robledo P.A., y Durán, J.J. 2010. Evolución del turismo subterráneo en las islas Baleares y su papel en el modelo turístico. En: J.J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, 305-322. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Rocscience Inc. 2016, Dips version 7.0 Graphical and statistical analysis of orientation data. [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com) Toronto, Ontario, Canadá.
- Rocscience. 2016. *Fisher Distribution*. [https://rocscience.com/help/swedge/webhelp/swedge/Fisher\\_Distribution.htm](https://rocscience.com/help/swedge/webhelp/swedge/Fisher_Distribution.htm) (Extracted 20/02/2016).
- Slob, S., Van Knapen, B., Hack, R., Turner, K. y Kemeny, J. 2005. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. Transportation Research Record. *Journal of the Transportation Research Board*; Geology and Properties of Earth Materials. 1913:187-194.
- VVAA. 2015. The worlds voids in 3D, *Descent* (245): 34-43





## **Espeleogénesis por ácido sulfúrico en el SE de España. Caracterización preliminar de la sima de Peñas Blancas (Lorca-Murcia)**

A. González-Ramón <sup>(1)(2)</sup>, C. Fernández-Leiva <sup>(1)</sup>, A. Segura-Herrero <sup>(2)</sup>, T. Sánchez-Díaz <sup>(2)</sup>, A. Ignatenko <sup>(2)</sup>; V. García-Benzal <sup>(2)</sup>; P. Pérez-Martínez <sup>(2)</sup>; R.D. Gea-López <sup>(2)</sup>; J. Llamas-Sánchez <sup>(2)</sup> e I. Quesada <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Urb. Alcázar del Genil, 4. Edif. Zulema bajo. Unidad del IGME en Granada,  
antonio.gonzalez@igme.es, c.fernandez@igme.es

<sup>(2)</sup> Asociación Espeleológica Velezana,  
espeleovelez@gmail.com

---

### **RESUMEN**

La génesis de cavidades ligadas a la generación de ácido sulfúrico, por oxidación de H<sub>2</sub>S, ha dado lugar a algunas de las cuevas más grandes del mundo. El ejemplo por excelencia es la cueva de Lechuguilla, en Nuevo Méjico (EE.UU.), y en general las cavernas del Parque Nacional de Carlsbad. Una de las principales características de estas cavidades es la existencia de depósitos de yesos microcristalinos que, a veces, suelen quedar preservados durante mucho tiempo en las paredes y el suelo de la cueva. En España apenas se han descrito cavidades en carbonatos generadas por este mecanismo con depósitos de yesos asociados, sin embargo existen algunos ejemplos notables. Se presenta un trabajo preliminar realizado en la Sima de Peñas Blancas o Sima de Almendricos en la que, durante 2015, se ha levantado un mapa topográfico detallado que ha puesto de manifiesto la presencia de numerosos depósitos de yeso microcristalino en su interior y también algunos depósitos de yeso selenítico. Se describen sus características morfológicas y los posibles mecanismos espeleogenéticos asociados a la producción de ácido sulfúrico, ya sea en relación con la oxidación de gas sulfhídrico originado a partir de la disolución y reducción de yesos permo-triásicos, o a partir de la oxidación de sulfuros metálicos. La cavidad tiene la singularidad de estar asociada a mineralizaciones metálicas, formadas fundamentalmente por oxi-hidróxidos de hierro, que han sido explotadas en numerosas minas.

**Palabras Clave:** Almendricos, cueva hipogéica, gas sulfhídrico, oxi-hidróxidos de hierro, yeso microcristalino.

## ***Speleogenesis by sulfuric acid in the SE of Spain. Preliminary characterization of the gulf of Penas Blancas (Lorca-Murcia)***

### **ABSTRACT**

*Sulfuric acid speleogenesis, related to H<sub>2</sub>S oxidation, has formed some of the biggest caves in the world. The best example is Lechuguilla cave in New Mexico (U.S.) and, in general, the caves of the National Park of Carlsbad. One of the main characteristics of this kind of caves is the presence of microcrystalline gypsum deposits, sometimes preserved for a long time in the walls and on floor of the cave. In Spain, the carbonate caves formed by this mechanism and showing associated gypsum deposits, are scarce although, among them, there are some important examples. This paper is a preliminary study we have performed during 2015, in Peñas Blancas Pothole or Almendricos Pothole. We made a detailed topographic map which has shown that there are important microcrystalline gypsum deposits and, also, other selenite ones. Morphologic characteristics and possible speleogenetic mechanisms are described in relation to H<sub>2</sub>S degassing and oxidation into sulfuric acid, as a consequence of Permo-Triassic gypsum dissolution and reduc-*

tion, or linked to metallic sulfides oxidation. The cave is associated to metallic mineralizations, iron oxi-hydroxides basically, which have been extracted in many mines.

**Key Words:** Almendricos, hydrogen sulfide, hypogene cave, iron oxi-hydroxides, microcrystalline gypsum.

## Introducción

Los mecanismos que dan lugar a cuevas con recarga de tipo hipogénico pueden ser diversos. Las principales características son la existencia de flujos ascendentes de aguas profundas, que suelen ocurrir en zonas de descarga de acuíferos. La geoquímica de los flujos que generan estas cavidades es compleja, como lo es la naturaleza de las aguas ascendentes y de los gases liberados (Forti *et al.*, 2002). Para este autor los gases más comunes que aparecen en ambientes kársticos son, por orden de importancia, el CO<sub>2</sub>, el H<sub>2</sub>S, el Rn y el CH<sub>4</sub>. Cuando en el medio hay formaciones evaporíticas, el H<sub>2</sub>S puede aparecer en aguas con condiciones anóxicas. La mezcla con aguas oxidantes puede generar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, este ácido ataca a los carbonatos produciendo CO<sub>2</sub> con un nuevo incremento en la agresividad de las aguas que circulan (De Waele *et al.*, 2013).

La teoría de la génesis de cuevas por disolución de carbonatos con ácido sulfúrico fue planteada por primera vez por Egemeier en 1973 (en Jagnow *et al.*, 2000) con motivo de su tesis doctoral sobre las cuevas de Kane, en Wyoming (EEUU) y posteriormente publicada en 1981. Una de las consecuencias de la disolución de carbonatos por este mecanismo es la generación de yeso como subproducto de los procesos espeleogénicos.

Los depósitos de yeso en cuevas pueden aparecer como consecuencia de distintos mecanismos espeleogénicos, de los que los más importantes son la oxidación de gas sulfídrico y la oxidación de sulfuros metálicos. Depósitos de yeso asociados a cavidades generadas en carbonatos han sido descritos en la cueva de Lechuguilla (Hill, 1987), en Castleguard Cave (Columbia, Canada) (Yonge y Krouse, 1987), en las cuevas italianas de Frasassi (Galdenzi y Mauoka, 2003) y en la cueva Francesa de Baume Galiniere (Audra *et al.*, 2013) entre otras. En España se han descrito espectaculares cristalizaciones de yeso en la geoda de Pulpí (García-Guinea *et al.*, 2002) y más recientemente en la gruta de las Maravillas, en Aracena (Martínez-Moreno *et al.*, 2015), aunque en este último caso la presencia de yeso es residual. También se conocen depósitos de yeso en otras cavidades como Sima Destapada en Cartagena (Murcia) (Gázquez y Calaforra, 2015), Cueva de los Órganos y Sima del Soldado (Mollina, Málaga) y en la cueva cántabra de Cueto-Coventosa. En Sudamérica se han estudiado en la Cueva de las Brujas, en los Andes argentinos (Sancho *et al.*, 2001 y 2004), si bien aquí los yesos han sido interpretados por procesos de evaporación a partir de soluciones saturadas en sulfato.

Los depósitos de yeso en estas cuevas pueden ser de varios tipos, sin embargo, los más comunes constituyen cortezas de yeso microcristalino recubriendo las paredes de las cuevas o depósitos de yesos microcristalinos laminados acumulados en el suelo de salas y galerías. Forti *et al.* (2002) consideran que los depósitos freáticos de yeso en cuevas generadas por infiltración de aguas meteóricas están siempre ausentes porque la sobresaturación con respecto al yeso es imposible en esas condiciones, a menos que exista el factor de la oxidación del H<sub>2</sub>S. Los depósitos de yeso con espesores de orden métrico son poco comunes en cuevas generadas en carbonatos (Galdenzi y Maruoka, 2003) y se consideran generalmente como el resultado de la circulación de agua rica en H<sub>2</sub>S por el interior de la cavidad y la posterior oxidación del H<sub>2</sub>S.

En la cavidad estudiada se localizan numerosos depósitos de yeso de orden métrico y diferentes tipologías, similares a los descritos en otras cavidades formadas por ácido sulfúrico. El objetivo de este trabajo es definir estos depósitos y la morfología general de la cueva y proponer los posibles mecanismos espeleogenéticos que la han formado.

### Contexto geológico

La sima se localiza en la Sierra de Enmedio, en el término municipal de Lorca (Murcia) entre Puerto Lumbreras y Pulpí (Fig. 1). La alineación montañosa se extiende desde el SO hacia el

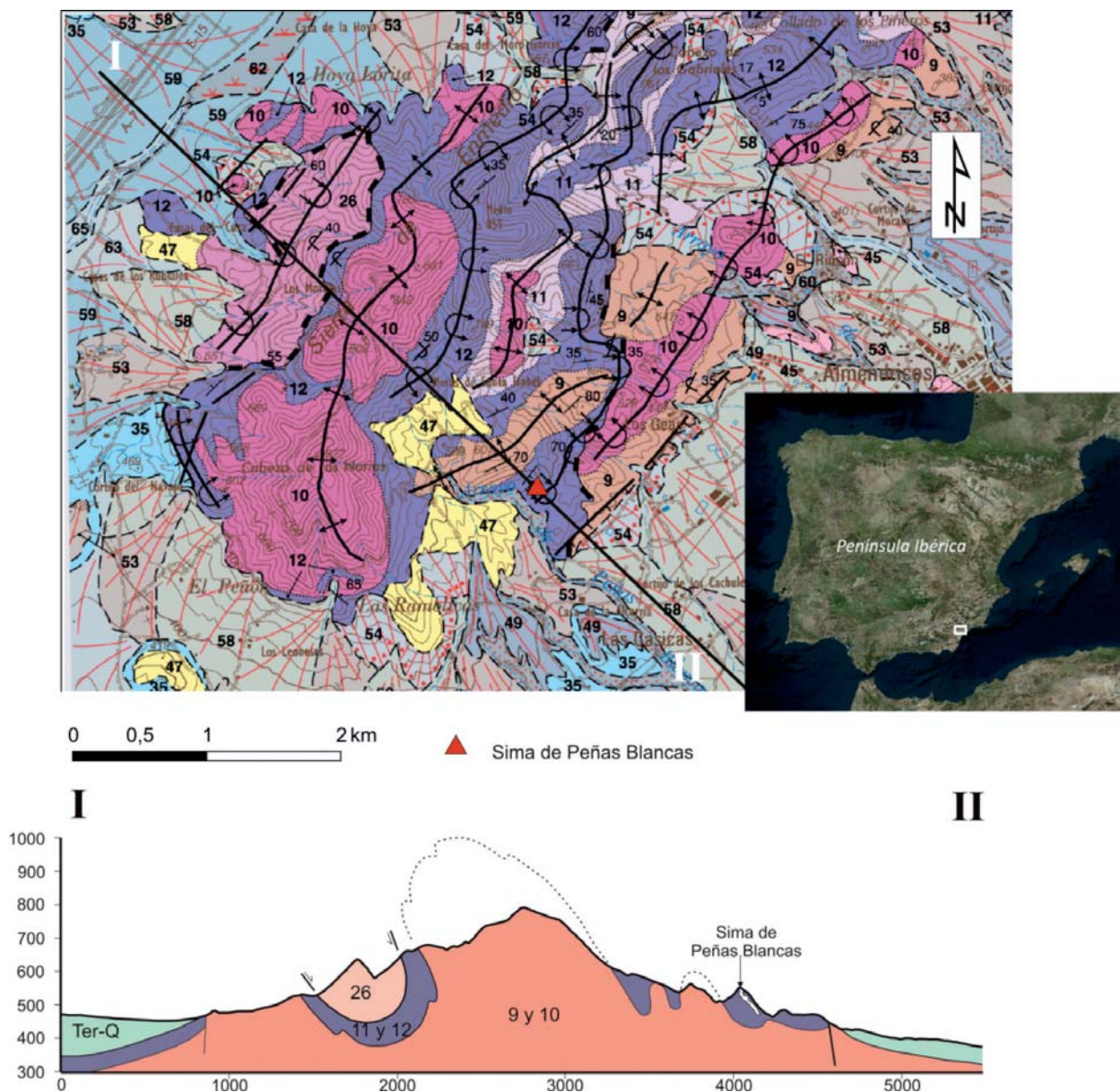


Figura 1. Mapa geológico de la Sierra de Enmedio en la zona donde se encuentra la Sima de Peñas Blancas y corte geológico con situación de la cavidad. Mapa modificado de Booth-Rea y Bardají (2013). 9 y 10 filitas, cuarcitas, metabasitas, yesos y pizarras, Permo-Triás; 11 y 12 dolomías, calizas, pizarras y mármoles, Triásico; 26 cuarcitas, filitas y metaconglomerados, Permo-Triás Maláguide. Imagen de satélite tomada de Bing Maps



NE justo en medio de la denominada Depresión o Cubeta de Pulpí, rodeada de los materiales terciarios y cuaternarios que rellenan esta depresión y separa los corredores de Pulpí, al E, y Puerto Lumbreras, al O.

Desde el punto de vista geológico la cavidad se ha generado en mármoles dolomíticos del dominio Nevado-Filábride incluidos en la Unidad de Enmedio-Almagro (Booth-Rea y Bardají, 2013), si bien algunos autores incluyen esta unidad en el Complejo Alpujárride (Sanz de Galdeano y García Tortosa, 2002, entre otros). Esta formación alcanza una potencia máxima de 150 m y está constituida por un miembro basal, con alternancias de dolomicritas, calizas tableadas, pizarras oscuras y calcofilitas, y un miembro superior formado por meta-carbonatos masivos dolomíticos de edad Triásico. El substrato está formado por filitas, cuarzofilitas y cuarcitas permo-triásicas y metabasitas. De forma discontinua también pueden aparecer yesos, mármoles y pizarras formando una secuencia transicional entre las metabasitas y los mármoles (Booth-Rea y Silva-Barroso, 2013).

La estructura consiste en una antiforma sobrepuesta a una sucesión de pliegues asimétricos previos, vergentes al NO (Booth-Rea y Bardají, 2013); los ejes tienen una orientación ENE-OSO y el flanco SE está generalmente invertido. Los sinclinales se desarrollan sobre los materiales más competentes, de forma que el relieve aparece invertido en algunas zonas. La sima se localiza al S de la sierra, relacionada con el flanco normal del sinclinal más meridional (Fig. 1).

### **Origen y tipología de las mineralizaciones de la Sierra de Enmedio**

Las mineralizaciones de hierro son muy comunes en la Sierra de Enmedio (Booth-Rea y Bardají, 2013). Estos autores consideran que son del tipo estratoligadas, lo que significa que a escala regional están habitualmente asociadas a un determinado grupo de estratos, independientemente de que sean singenéticas, sindiagenéticas o epigenéticas. Tradicionalmente se las ha considerado, desde el punto de vista genético, como masas de sustitución metasomática. Torres-Ruiz (1980, 1983) y Martín y Torres-Ruiz (1982), en depósitos similares en el sector central de la Cordillera (Alquife, Piletas, etc), pusieron en evidencia que allí el primero y principal proceso metalogénico fue sinsedimentario o sindiagenético temprano, al que se le sumaría el volcanismo permo-triásico o triásico (metabasitas) como portador de elementos al medio sedimentario. Por tanto, diagénesis tardía, metamorfismo alpino y procesos epigenéticos y epitermales habrían conducido a producir removilizaciones de la mineralización primaria, sustituciones en niveles reactivos y rellenos de fracturas. En la zona donde se localiza la cavidad las mineralizaciones suelen aparecer relleno de fracturas de dirección N-S por procesos epigenéticos y epitermales.

Según Booth-Rea y Bardají (2013) y Booth-Rea y Silva-Barroso (2013) los minerales más frecuentes en la Sierra de Enmedio son limonita, siderita y hematites y, ocasionalmente, galena y blenda, también se ha descrito baritina, pirita, magnetita, óxidos de manganeso, azurita y malaquita y cerusita.

Para caracterizar las mineralizaciones relacionadas con la cavidad se tomó una muestra de mineral en su interior, procedente de un bloque caído perteneciente a unos rellenos de fractura

que de forma más o menos discontinua encajan en los mármoles dolomíticos y calizos (Fig. 5A). El estudio de la lámina delgada muestra un ejemplar con estructura celular, compuesto mayoritariamente por carbonatos (posible siderita) y limonita, dispuestos en laminaciones irregulares y alternantes (Fig. 2A), con localizados abudamientos (Fig. 2B) como resultado de la deformación a la que está sometida la muestra. Los procesos tardíos de disolución se detectan por la presencia de cavidades irregulares que salpican de forma generalizada la muestra (Fig. 2C), albergando en algunos casos cristales de yeso que precipitan aprovechando los espacios abiertos generados (Fig. 2D).

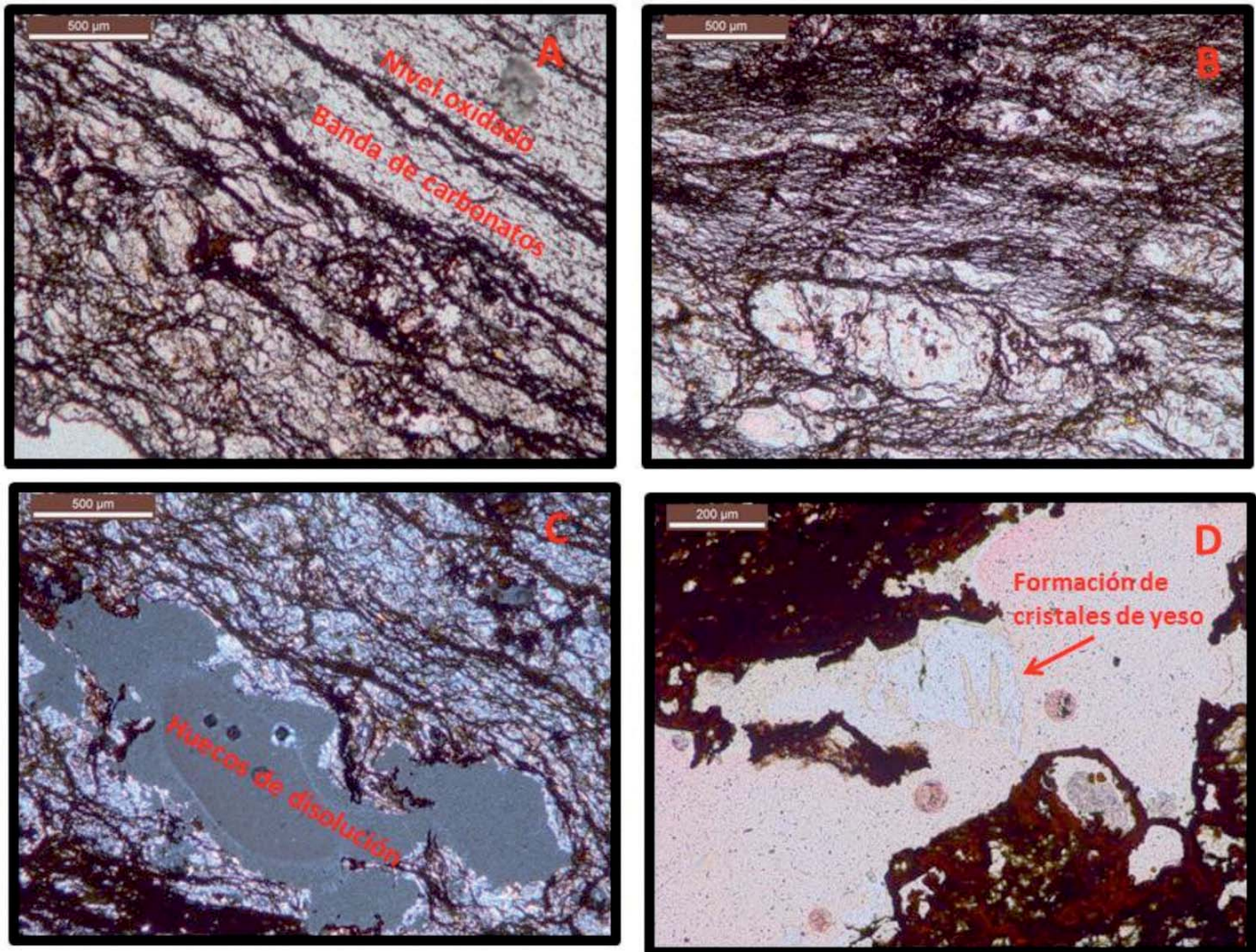


Figura 2. Microfotografías de la muestra en la preparación de lámina delgada. A, B y D con nícoles paralelos y C con nícoles cruzados

Lo observado tanto en lámina delgada como en probeta pulida (997-B) es el resultado final de un proceso avanzado de oxidación de la mineralización original, probablemente formada por sulfuros de Fe, que como resultado final de esta oxidación, da lugar a una paragénesis compuesta casi exclusivamente por carbonatos y óxidos e hidróxidos de Fe, limonita mayoritariamente, con hematites muy accesorio. Las figuras 3A, B, C y D pertenecen a cavidades de una posible pirita anterior con limonita concéntrica (no hay resto alguno de las menas originales, sólo la morfología de la cavidad dejada por la disolución del cristal nos hace sospechar que efectivamente se trata de pirita).



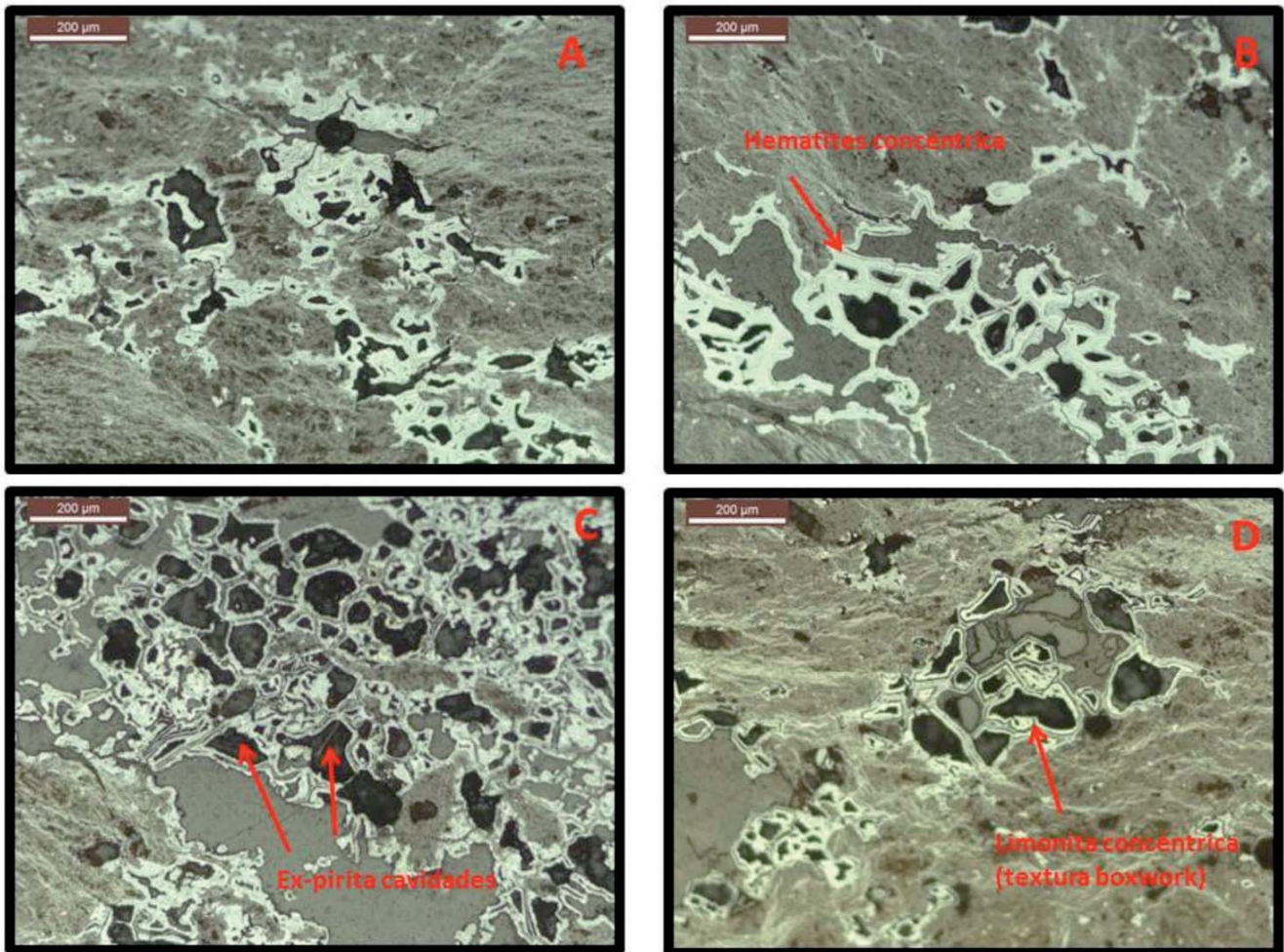


Figura 3. Microfotografías de la muestra en la preparación de lámina delgada. A, B y D con nicoles paralelos y C con nicoles cruzados

Las texturas *boxwork* que exhibe la limonita y la hematites son las típicas que dan los sulfuros originales al alterarse en los procesos de oxidación. Los fluidos penetran a lo largo de la roca o aprovechando pequeñas discontinuidades en los minerales y precipita un mineral (de relleno o alteración) dando esas formas concéntricas y/o en forma de "costillas" los cuales sobreviven al proceso de alteración.

### Aspectos morfológicos de la cavidad

La entrada a la cavidad es una sima situada junto a una trinchera de mina de 10 m de longitud excavada en dirección N12E (Fig. 4). La cavidad se extiende hacia el S a partir de un pozo de 18 m de profundidad desde donde parte una rampa descendente sobre una amplia galería que sigue una veta de mineral (Fig. 5A). En el techo de la rampa se desarrollan morfologías hipogénicas tipo canales y cúpulas de techo (*ceiling pockets* y *ceiling channels* según la terminología de Kimchouk, 2007 y 2009) y megaescalops. Uno de estos canales sigue el filón de mineral formado por oxi-hidróxidos de hierro. La sima de entrada a la cavidad (Fig. 5D) conforma el principal canal de salida (*outlet*) en el que confluyen estos canales (figura 5E).

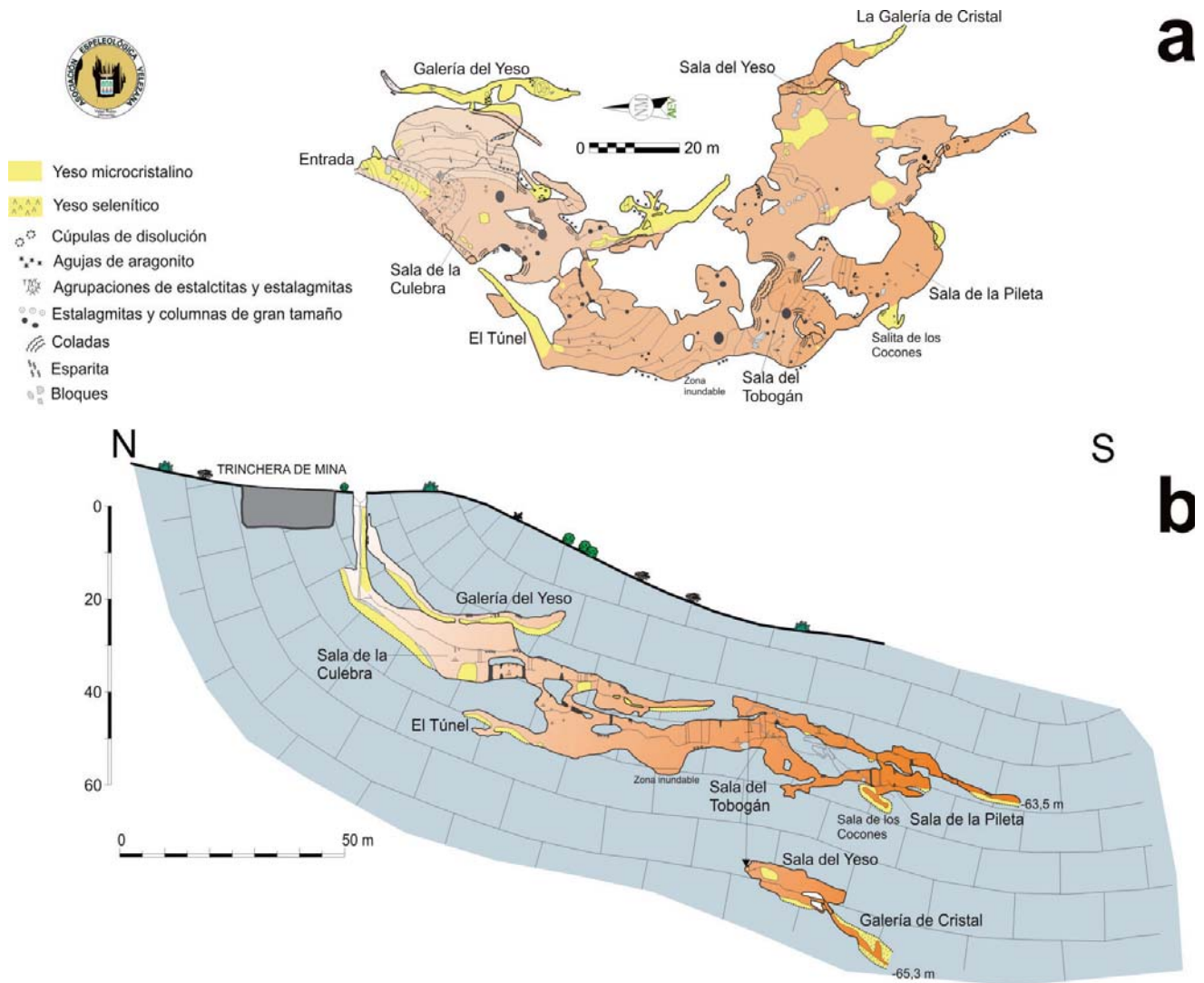


Figura 4. Mapa topográfico de la Sima de Peñas Blanca. (a) Planta y (b) perfil en dirección N-S

Aunque la roca de caja son mármoles dolomíticos, la pared N de la sima está formada por yesos microcristalinos blancos que enlazan con una masa de yeso similar que recubre todo el suelo de la rampa, a su vez parcialmente recubierta por un abanico de derrubios procedente de la entrada de la sima. La rampa desemboca en la sala más amplia de la cavidad (Sala de la Culebra) con el techo a unos 7 m de altura, una morfología groseramente circular y un diámetro en torno a 20 m. En el techo se observan cúpulas de disolución y en el suelo se observan algunos grandes bloques de yeso.

De la zona oriental de la sala y de la galería de entrada parte una extensa rampa ascendente muy inclinada que da acceso a una galería de techo bajo con los suelos recubiertos de yeso microcristalino (Galería del Yeso). Algunos de los techos de esta galería están recubiertos por flores de aragonito. En un pozo situado a su entrada se observan espesores de yeso de hasta 4 m (Fig. 6A). La galería se extiende hacia el N hasta finalizar en una chimenea ciega en la que se observan varias cúpulas de disolución en el techo, nuevamente con una tipología de *outlets*. En una zona cercana a la pared N de la rampa se encuentra un bloque caído de yeso selenítico (Fig. 7A) que rellenaba un hueco del techo de la cavidad.



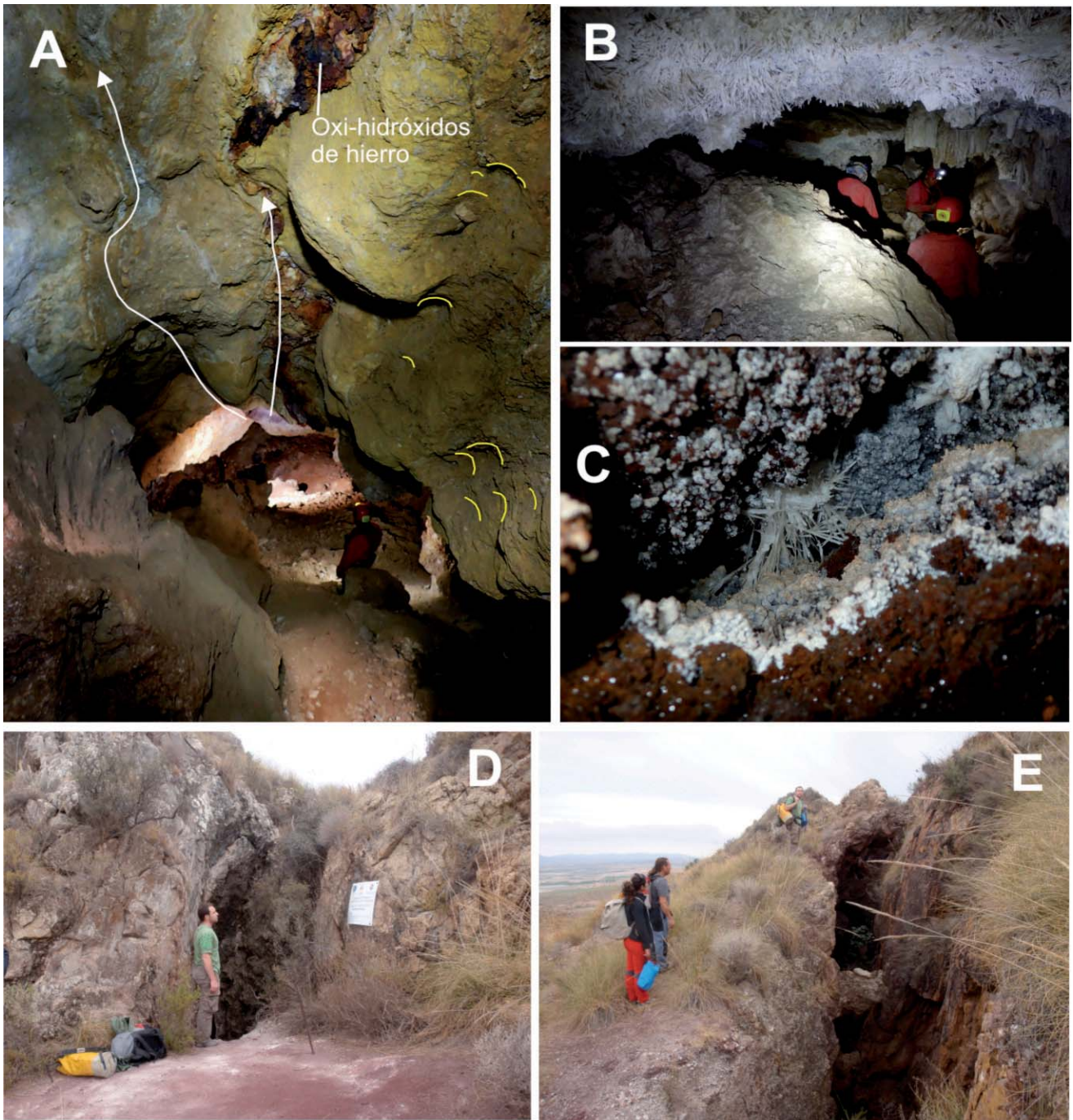


Figura 5. (A) Rampa de acceso a la Sala de la Culebra, en el techo se observa la veta de mineral y dos canales de techo, en la pared derecha megaescalops. (B) Techo cubierto de flores de aragonito. (C) Agujas de aragonito y minerales asociados. (D) Canal de salida (outlet) que conforma la sima de entrada a la cavidad. (E) Trincheras de mina cercana a la entrada de la sima

La continuación desde la Sala de la Culebra hacia el S es subhorizontal un tanto laberíntica, con las paredes orientales y los techos recubiertos de flores de aragonito (Fig. 5B), finalizando en otra galería, de nuevo con el suelo relleno de yeso microcristalino. En general, la morfología de las paredes de la cavidad está enmascarada por una gran profusión de espeleotemas vadosos. En las paredes occidentales aparecen varias bocas descendentes con tipologías de *feeders*. Dos de ellas conectan con la continuación de la cavidad.

Estas bocas dan paso a unas salas en rampa, de techo bajo, que siguen superficies de estratificación, muy decoradas por espeleotemas vadosos. De la zona inferior de las salas parte, en dirección NE, la galería del Túnel, de paredes redondeadas y suelo relleno de yeso microcristalino.

En dirección S y SE se atraviesan diversas salas muy decoradas por espeleotemas vadosos, hasta alcanzar la Sala del Yeso, en una de las zonas más alejadas y profundas. Esta sala aparece parcialmente rellena de yeso, con espesores de hasta 3 m, y varios grandes bloques de yesos microcristalinos laminados que envuelven cantos (Fig 6B y 6C). Al fondo de la sala, tras bajar un resalte, se localiza una galería que lleva a una estrecha rampa descendente, muy inclinada, que finaliza en la Galería de Cristal, desarrollada sobre yesos seleníticos de grandes cristales (Fig. 7B y 7D).

En líneas generales, la cavidad está formada por salas de considerable tamaño, compartimentadas por la presencia de un gran desarrollo de espeleotemas vadosos, y varias galerías horizontales redondeadas con tipologías freáticas parcialmente rellenas de yeso microcristalino. También las salas presentan el aspecto típico redondeado de las cavidades freáticas. La mayor parte de los depósitos de yeso aparecen recubriendo suelos de salas y galerías, pero también existe yeso en cortezas de reemplazamiento en algunas paredes, como la sima de entrada a la cavidad.

### **Consideraciones sobre la espeleogénesis de la cavidad**

La abundante presencia de yesos microcristalinos pone de manifiesto la existencia de procesos espeleogénéticos relacionados con la sustitución del carbonato de la roca de caja, en techos y paredes, por yeso, como consecuencia de la formación de ácido sulfúrico. La formación de ácido sulfúrico, en el caso de la Sima de Peñas Blancas, pudo ocurrir por dos vías diferentes: (1) oxidación de gas sulfhídrico procedente de la disolución yesos triásicos y posterior reducción del sulfato disuelto; (2) oxidación de sulfuros metálicos. Ambos procesos podrían haber ocurrido puesto que no son excluyentes. La presencia de yeso sedimentario primario en la base de la formación carbonatada hace que el primer proceso no pueda ser descartado. Por otra parte, el estudio en lámina delgada de las mineralizaciones, ha puesto de manifiesto la presencia de oxi-hidróxidos de hierro con huecos en los que hay yeso (Fig. 2D), por lo que puede afirmarse que el segundo proceso es uno de los mecanismos espeleogénéticos formadores de la cavidad.

### ***Oxidación de gas sulfhídrico por disolución de yesos permo-triásicos***

El proceso químico que da lugar a la generación de ácido sulfúrico por oxidación del gas sulfhídrico ha sido descrito en numerosas publicaciones (p.e. Hill, 1987; Forti *et al.*, 2002). El proceso se inicia a partir de aguas subterráneas cargadas en sulfatos por su contacto con formaciones geológicas que contienen yeso. En la Sierra de Enmedio serían yesos de edad Permo-Triásico que se localizan en la base de los mármoles dolomíticos que albergan la cavidad (Booth-Rea y Bardají, 2013). La reducción del sulfato se produce en condiciones anóxicas, generalmente debido al consumo del oxígeno por la presencia de materia orgánica (hidrocarburos o forma-



ciones con carbón orgánico) (Palmer y Palmer, 2000). En la serie de la Sierra de Enmedio se han descrito pizarras oscuras con abundante contenido en materia orgánica. Aguas termales con gas sulfhídrico en disolución ascienden por los carbonatos permeables hacia sus puntos de surgencia. El gas sulfhídrico puede ser liberado por descompresión cerca de la superficie. La oxidación del ácido sulfhídrico puede ocurrir tanto en la zona freática como en la zona vadosa, a partir de mezclas con aguas meteóricas (Galdenzi y Maruoka, 2003) y su consecuencia es la disolución de los carbonatos y el desarrollo de la cavidad. En la zona vadosa el proceso ocurre en las paredes de las cavidades por condensación-corrosión a partir del gas liberado. En ambos casos se produce sustitución de  $\text{CaCO}_3$  por  $\text{CaSO}_4$  lo que da lugar al crecimiento de cortezas de yeso en techos y paredes.

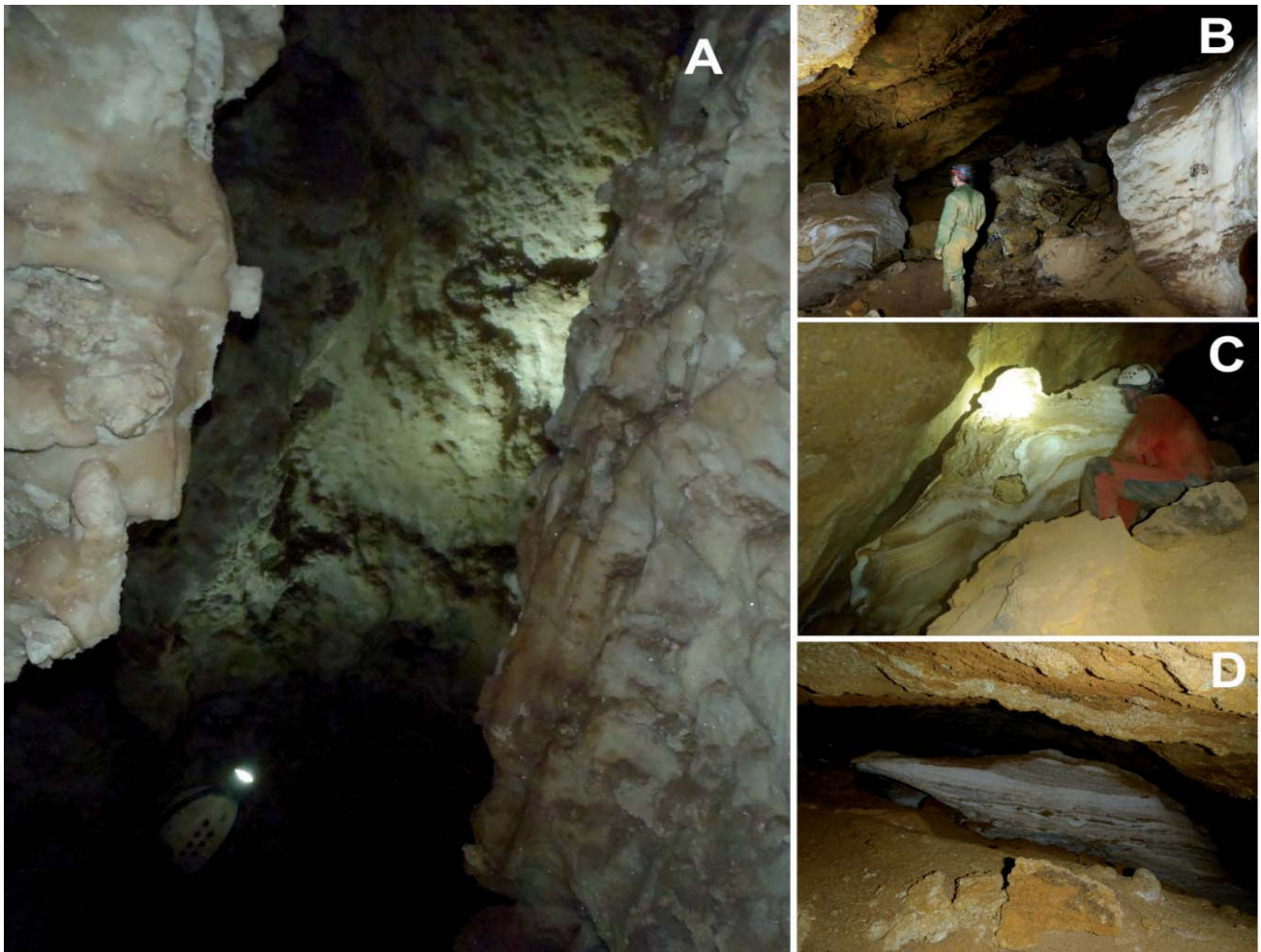
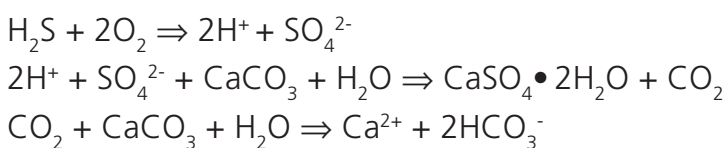


Figura 6. (A) Paredes de yeso microcristalino masivo en la Galería del Yeso. (B) Bloques de yeso microcristalino laminados en la Sala del Yeso. (C y D) Bloques de yesos laminados que envuelven cantos

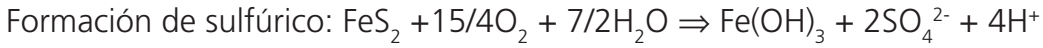
El proceso es el siguiente:



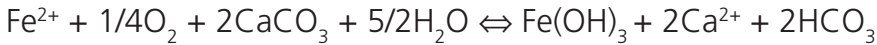
Con la dolomita la reacción es similar.

### **Oxidación de sulfuros metálicos**

La espeleogénesis por ácido sulfúrico puede producirse también cuando hay sulfuros metálicos (Descostes *et al.*, 2002; Audra *et al.*, 2013; Martínez-Moreno *et al.*, 2015) tales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) o galena ( $\text{PbS}$ ). La reacción para la oxidación de la pirita es la siguiente (Nicholson *et al.*, 1988):



Precipitación de oxi-hidróxidos:



La sustitución del carbonato por yeso en una reacción similar a la explicada anteriormente.

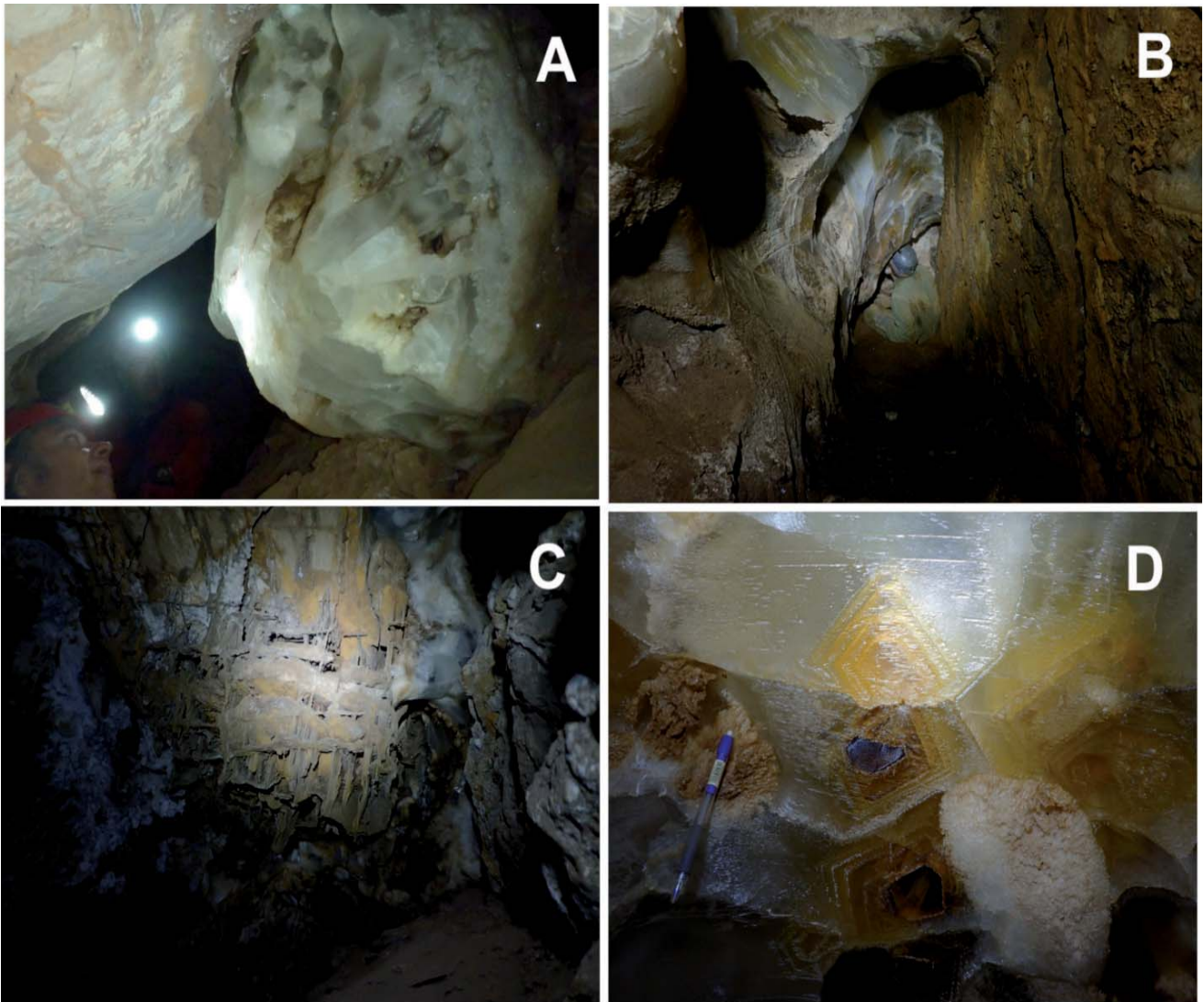


Figura 7. (A) Bloque de yeso selenítico desprendido del techo donde rellenaba un hueco en la roca de caja. (B) Galería de Cristal, parcialmente desarrollada sobre grandes cristales de yeso. (C) Boxwork en la pared de hueco que rellenaba el bloque de yeso selenítico en (A). (D) Detalle de los cristales de yeso en las paredes de la Galería de Cristal



## **Génesis de la cavidad**

En el corredor de Pulpí, donde se localiza la Sierra de Enmedio, la sedimentación marina persistió hasta el Plioceno medio superior (Aellen de la Chapelle, 1990, en Booth-Rea y Bardají, 2013). A finales del Plioceno se establecen definitivamente condiciones continentales en la cuenca. Sin embargo, en las laderas de la sierra de Enmedio cerca de la ubicación de la cavidad afloran conglomerados de transición marino-continental de edad Messiniense terminal-Plioceno inferior; sobre éstos se deposita una secuencia constituida por conglomerados, arenas y limos rojos del Plioceno superior-Pleistoceno inferior. Esto indica que la erosión en los bordes de la Sierra de Enmedio, en el entorno donde se ubica la sima, debió comenzar a inicios de Plioceno. Así pues, ya en esta época pudo establecerse un flujo subterráneo que permitiera la presencia de aguas de circulación profunda, no necesariamente termal, desde la base de la cavidad hasta su boca, pues ya existían afloramientos de carbonatos emergidos. El crecimiento de la cavidad debió comenzar bajo nivel freático, con el punto de surgencia de agua subterránea en el entorno de la actual entrada, que debía situarse cerca de la línea costera. El levantamiento progresivo de la sierra, la retirada de la línea de costa y los procesos erosivos provocaron descensos en el nivel freático y una mayor recarga de aguas recién infiltradas en la superficie de la cueva. En medios subaéreos, con aguas oxidantes y liberación de gas sulfhídrico se produciría la oxidación de los sulfuros metálicos y la formación de nuevos minerales (siderita, limonita, hematites...) con la generación de cortezas de yeso.

El reemplazamiento del carbonato por el yeso ocupa un mayor volumen, como consecuencia, las cortezas formadas caen al suelo, y pueden englobar cantos de otra naturaleza. Sin embargo las cortezas subacuosas tiene una textura distinta más homogénea, en la que a veces puede preservarse la textura original de los carbonatos; esto es más difícil que ocurra en dolomitas, pues el volumen del yeso es aún mayor que en calizas (Palmer y Palmer, 2000).

Los depósitos de yeso generados en la interfaz de mezcla de aguas reducidas con  $H_2S$  y aguas meteóricas oxigenadas son usualmente blancos y tienen una estructura microcristalina (Forti et al., 2002). En general se trata de acumulación de depósitos de color blanco con laminaciones planares a escala milimétrica, formados por finos cristales de yeso y de varios metros de espesor.

Buck et al. (1994) describieron el origen y petrología de cinco tipos de yeso en las cuevas Guadalupe: (1) cortezas de yeso subaéreo que ha reemplazado el lecho de roca por la reacción de ácido sulfúrico; (2) cortezas de yeso subacuático del mismo origen; (3) sedimentos de yeso subacuático; (4) brechas de bloques de yeso caídos; y (5) yesos evaporíticos. Posiblemente los cinco tipos pueden localizarse en la sima de Peñas Blancas (Figs. 6 y 7).

Galdenzi y Maruoka (2003) interpretan los depósitos de yeso de varios metros de espesor como consecuencia del desprendimiento y el flujo fangoso de yesos (glaciares de yesos) microcristalinos generados en paredes y techos de la cavidad como cortezas de reemplazamiento, en zonas expuesta a intensos vapores de  $H_2S$ .

Las agujas de aragonito, muy abundantes también en la cavidad, se atribuyen a zonas con rezumes en las que hay una fuerte evaporación. Se producen en zonas enriquecidas en mag-

nesio (dolomías) y en estroncio; la alta temperatura también lo favorece pero no es esencial (Davis, 2012).

En una fase más tardía, las aguas estancadas sobresaturadas en yeso habrían generado los depósitos de yesos seleníticos. En la fase final, ya plenamente cuaternaria, tras el definitivo descenso del nivel freático, el agua de infiltración reciente provocó la disolución parcial de los yesos y el crecimiento de espeleotemas vadosos en techos, paredes y suelos.

## Conclusiones

Los aspectos morfológicos de las paredes y techos de la Sima de Peñas Blancas muestran unas características típicas de cavidades de génesis hipogénica. La presencia de abundantes depósitos de yeso con espesores de orden métrico y diferentes tipologías pone de manifiesto una génesis relacionada con la disolución del carbonato por ácido sulfúrico. A raíz del estudio del entorno geológico en el que se localiza la cavidad se deducen dos posibles mecanismos que podrían haber dado lugar a la generación del ácido sulfúrico, sin que ninguno de ellos excluya al otro: i) oxidación de gas sulfhídrico originado por disolución y reducción de yesos permotriásicos que se localizan en la base de los carbonatos, ii) oxidación de sulfuros metálicos, ya que los carbonatos aparecen surcados por numerosas fracturas rellenas de oxihidróxidos de hierro que han sido explotadas en minería tradicional.

El estudio en lámina delgada de estas mineralizaciones apoya la existencia de este último mecanismo, si bien, el primero no puede descartarse con la información existente hasta ahora.

## Referencias

- Aellen De La Chapelle, M. 1990. Le Couloir de Pulpí. Les Basins Néogènes du Domaine Bétique Orientale (Espagne). *Doc. et Trav. IGAL* 12-13, 195-206.
- Audra, P., Gázquez, F., Rull, F., Bigot, J.Y. y Camus, H. 2013. Hypogene sulfuric acid speleogenesis and rare sulfate minerals (fibroferrite, jarosite subgroup) Baume Galiniere cave (Alpes-de-Haute-Provence, France). *16th International Congress of Speleology. Proceedings Vol 3:* 425-431.
- Booth-Rea G. y Bardají T. 2013. *Memoria y mapa geológico de España. Hoja 997 (Águilas)*. IGME. Edición digital.
- Booth-Rea G. y Silva Barroso, P.G. 2013. *Memoria y mapa geológico de España. Hoja 975 (Puerto Lumbreras)*. IGME. Edición digital.
- Buck, M.J., Ford, D.C. y Schwarcz, H.P. 1994. Classification of gypsum deposits derived from oxidation of H<sub>2</sub>S. In: Sasowsky, I.D., Palmer, M.V. (Eds.), *Breakthroughs in Karst Microbiology and Redox Geochemistry, Karst Water*. Institute Special Publication n. 1, 5–9.
- Davis, G.D. 2012. Helictites and related speleothems. In: White and Culver (Eds.), *Encyclopedia of caves*. Second Edition, 379-383.
- De Waele, J., Forti P. y Naseddu A. 2013. Speleogenesis of an exhumed hydrothermal sulphuric acid karst in Cambrian carbonates (Mount San Giovanni, Sardinia). *Earth Surface Processes. Landforms* 38, 1369-1379.

- Descostes, M., Beaucaire, C., Mercier, F., Savoye, S., Sow, J. y Zuddas, P.P., 2002. Effect of carbonate ions on pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) dissolution. *Bulletin de la Société Géologique de France* 3, 265–270.
- Egemeier, S.J. 1973. *Cavern development by thermal waters with a possible bearing on ore deposition*. Unpublished PhD dissertation, Stanford University, 88 pp.
- Egemeier, S.J., 1981. Cavern development by thermal waters. *NSS Bull.* 43, 31–51.
- Forti, P., Galdenzi, S. y Sarbu, S.M. 2002. The hypogenic caves: a powerful tool for the study of seeps and their environmental effects. *Continental Shelf Research*, 22, 2373-2386.
- Galdenzi S. y Maruoka T. 2003. Gypsum deposits in the Frasassi Caves, central Italy. *Journal of Cave and Karst Studies* 65(2), 111–125.
- García-Guinea, J., Morales, S., Delgado, A., Recio, C. y Calaforra, J.M. 2002. Formation of gigantic gypsum crystals. *Journal of the Geological Society*, 159, 347-350.
- Hill, C.A., 1987. Geology of Carlsbad cavern and other caves in the Guadalupe Mountains, New Mexico and Texas. New Mex. *Bureau of Mineral Resources*. Mem. 117, 1–150.
- Gazquez, F. y Calaforra, J.M., 2015. Yeso y cavidades: Espeleogénesis y espeleotemas. *1ª Convenció Internacional d'Espeleologia*. 83-94. Barcelona
- Jagnow D.H., Hill C.A., Davis D.G., DuChene H. R. Cunningham K. I., Northup D. E. y Queen J M. 2000. History of sulfuric acid theory of speleogenesis in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 62(2): 54-59.
- Klimchouk, A.B. 2007. *Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective*. Special Paper nº 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM, 106 pp. Second edition 2011.
- Klimchouk, A. 2009. Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106 (1), 100-117.
- Martín, J.M. y Torres Ruiz, J. 1982. Algunas consideraciones sobre la convergencia de medios de depósito de las mineralizaciones de hierro y plomo-zin-fluorita de origen sedimentario encajadas en rocas triásicas de los Complejos Nevado-Filábride y Alpujarride del sector central de la Cordillera Bética. *Boletín Geológico y Minero*, 93, (IV), 315-329.
- Martínez-Moreno F.J., Pedrera A., Galindo-Zaldívar J., López-Chicano M., Azor A., Martín-Rosales W., Ruano P., Calaforra J.M. y Hódar-Pérez A. 2015. The Gruta de las Maravillas (Aracena, South-West Iberia): Setting and origin of a cave in marbles from dissolution of pyrite. *Geomorphology*, 253 (2016), 239–250.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W. y Reardon, E.J. 1988. Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: 1. Experimental kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 1077–1085.
- Palmer A., Palmer, M. 2000. Hydrochemical interpretation of cave patterns in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 62(2), 91-108.
- Sancho, C., Osácar, M.C., Peña, J.L., Mandado, J., Mikkan, R. y Quinif, Y. 2001. Los espeleotemas yesíferos de la Caverna de Las Brujas (Cordillera de los Andes, Provincia de Mendoza): origen y significado paleoambiental. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (4), 339-349.
- Sancho, C., Peña, J.L., Mikkan, R., Osácar, C. y Quinif, Y. 2004. Morphological and speleothemic development in Brujas Cave (Southern Andean Range, Argentina): palaeoenvironmental significance. *Geomorphology*, 57 (2004) 367–384.
- Sanz de Galdeano C. y Garcia-Tortosa F.J. 2002. Appartenance Alpujarride du prétendu 'Complexe Almagride' (Zones Internes Bétiques, prov. d'Almeria, Espagne). *Comptes rendus - Géoscience*. París. 334 (5), 355-362.

- Torres-Ruiz, J. 1980. *Los yacimientos de hierro de la comarca del Marquesado del Zenete: Alquife y las Piletas (Granada, Cordilleras Béticas).* Tesis doctoral. Univ. Granada.
- Torres-Ruiz, J. 1983. Genesis and evolution of the Marquesado and adjacent iron ore deposits, Granada, Spain. *Economic Geology*, 78(8), 1657-1673.
- Yonge, C.J. y Krouse, H.R. 1987. The origin of sulphates in Castleguard Cave, Columbia Ice-fields, Canada. *Chemical Geology*, 65 (3-4), 427-433.





Gázquez, F. *et al.* Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 283-294.

## Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia)

F. Gázquez<sup>(1)</sup>, J. M. Calaforra<sup>(2)</sup>, T. Rodríguez-Estrella<sup>(3)</sup>, A. Ros<sup>(4)</sup>, J. L. Llamusi<sup>(4)</sup> y J. Sánchez<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Downing Street, Cambridge, CB2 3EQ, United Kingdom  
f.gazquez@ual.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Biología y Geología. CAES Cambio Global, Universidad de Almería, Carretera de Sacramento s.n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04720, España,  
jmcalaforra@ual.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, Cartagena, 30203, España,  
tomasrestrella@hotmail.com

<sup>(4)</sup> Centro de Estudios Ambientales y del Mar. CENM-naturaleza, Alcántara, 5, Cartagena, Murcia, 30394, España  
cenm@cenm.es

---

### RESUMEN

La Región de Murcia alberga un importante número de cavidades cuyo origen ha sido recientemente atribuido a procesos hipogénicos. Los mecanismos que las generaron no estuvieron directamente relacionados con la infiltración de agua de lluvia, sino con la acción de flujos de aguas de procedencia relativamente profunda. Hasta la fecha, los criterios utilizados para clasificar estas cavidades como hipogénicas han sido de carácter morfológico, tanto mediante la identificación de formas de disolución y corrosión típicas de este tipo de mecanismos (cúpulas, domos de corrosión, *outlets* y *feeders*, etc...) como por la presencia de espeleotemas generalmente formados a partir de aguas termales (conos y nubes, *folias*, *spar* de calcita, etc...). El estudio de las características isotópicas del carbonato ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ) en estos espeleotemas puede proporcionar información sobre la temperatura a la cual precipitaron. En este trabajo se ha estudiado de forma preliminar la composición isotópica de una selección de espeleotemas procedentes de dos cavidades hipogénicas de la Región de Murcia: Sima de la Higuera (Pliego) y Sima Destapada (Cartagena). En Sima de la Higuera, la primera fase de precipitación de calcita hidrotermal quedó reflejada en forma de rellenos de calcita con textura sacaroidea que precipitó en fisuras de la roca encajante probablemente a temperaturas en torno a 50°C, constituyendo posteriormente el boxwork característico de muchas zonas de la cavidad. Más tarde la temperatura del agua pudo haber disminuido, dando lugar a *spar* de calcita (~28°C) y láminas de calcita flotante sobre la superficie del agua (~26-28°C), cuya acumulación generó los espectaculares conos de calcita flotante de la Sala Paraíso. La temperatura de la cueva siguió disminuyendo hasta los 21°C actuales. En Sima Destapada, cristales euhedrales de calcita precipitaron en el interior de fracturas de la roca encajante, inicialmente a partir de agua con temperaturas que pudieron oscilar en torno a 50°C, y posteriormente disminuyó hasta ~38°C. La temperatura actual del agua en esta cavidad es de 31°C. El estudio isotópico y geocronológico de espeleotemas en estas y otras cavidades de la Región de Murcia, podrían permitir establecer un patrón de enfriamiento de las aguas termales a escala regional.

**Palabras clave:** cuevas hipogénicas, espeleotemas hidrotermales, isótopos estables.

### ***Preliminary geochemical evidence for the hydrothermal origin of Sima de la Higuera and Sima Destapada (Murcia Region)***

## ABSTRACT

The Murcia Region accommodates a number of caves, which origin has been recently attributed to hypogenic mechanisms. The processes that generated these cavities were not directly connected to seepage of rainwater but to the action of deep water flows. To date, criteria for classification of these cavities have been based on the identification of morphological features, either dissolution forms typically originated by hypogene speleogenesis (cupolas, corrosion domes, outlets and feeders, etc.) or the presence of speleothems typically formed from hydrothermal waters (cave cones and clouds, folia, calcite spar, etc.). The analysis of stable isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) in this type of speleothems can provide further information of their temperature of formation. Here, we study the isotopic composition of a selection of speleothems from two hypogenic caves in the Murcia Region: Sima de la Higuera (Pliego) y Sima Destapada (Cartagena). In Sima de la Higuera, the first stages of calcite formation produced sugary-texture calcite precipitation in cracks of the hostrock at temperature that may be around  $50^\circ\text{C}$ , which in later stages formed the boxwork structures studied in previous works on this cave. Subsequently, water temperature might have dropped and calcite spars crystallized at  $\sim 28^\circ\text{C}$ , in addition to calcite rafts on the water surface when the cave was partially flooded by the thermal aquifer ( $\sim 26\text{-}28^\circ\text{C}$ ). Accumulation of calcite rafts gave rise to the spectacular calcite raft cones of the Paradise Chamber. The cave temperature continued decreasing to current conditions ( $21^\circ\text{C}$ ). In Sima Destapada, calcite infillings in cracks of the host rock formed in two stages, first at temperature around  $\sim 50^\circ\text{C}$  and later at around  $\sim 38^\circ\text{C}$ . Today, water temperature is  $31^\circ\text{C}$ . The isotopic and geochronological characterization of speleothems in these and other cave of the Murcia Region will enable to establish a regional pattern of thermal water cooling.

**Keywords:** hydrothermal speleothems, hypogenic caves, stable isotopes.

## Introducción

Las investigaciones relacionadas con morfologías subterráneas generadas por el ascenso de flujos de agua de origen relativamente profundo (en ocasiones termal) han proliferado considerablemente durante los últimos años (Klimchouk, 2009; Palmer, 2011, entre otros muchos). De hecho, hoy en día se estima que entre el 5 y el 10% de las cavidades a escala mundial podrían haber sido generadas por este tipo de mecanismos (Audra y Palmer, 2015). Hasta tiempos recientes las cuevas de origen hipogénico habían sido consideradas como una anomalía y su estudio generaba escaso interés. En este contexto, varias cuevas de la Región de Murcia han sido objeto de investigaciones recientes, centradas principalmente en el estudio de sus morfologías de origen hipogénico (Ros et al., 2011, 2014a, b; Asencio y Aboal, 2011; González-Ramón et al., 2014; Gázquez et al., 2012, 2013; 2016). La presencia de acuíferos hidrotermales, que en ocasiones alcanzan los  $50^\circ\text{C}$ , y la temperatura "anómala" del aire, superior a la media del ambiente exterior, indica que los procesos de origen profundo siguen aún activos en muchas zonas de la Región de Murcia. Este hecho, junto con la caracterización de morfologías y espeleotemas típicamente generados por procesos hipogénicos y/o hidrotermales, también descritos en otras cuevas a escala mundial, han sido los indicadores utilizados para caracterizar como hipogénicas hasta 14 cuevas de la Región de Murcia (Gázquez et al., 2016).

El estudio de las características geoquímicas de espeleotemas, y más concretamente su composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$ ) puede ayudar a determinar la temperatura del agua en la cueva en el momento de su precipitación. Esto se debe a que el fraccionamiento isotópico del oxígeno entre el  $\text{HCO}_3^{2-}$  disuelto y el carbonato precipitado depende de la temperatura del agua (Tremaine et al., 2011). Esta relación viene dada por la expresión:

$$1000 \ln \alpha = 16.1 (10^3 T^{-1}) - 24.6 \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde  $\alpha$  es el fraccionamiento isotópico entre el oxígeno del  $\text{HCO}_3^-$  disuelto (cuya composición isotópica en el equilibrio es igual a la del oxígeno del agua) y el carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ) del espeleotema, y T es la temperatura del agua en grados Kelvin. Por otro lado, los isótopos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de la calcita pueden aportar información sobre la fuente de carbono a la disolución (ej. disolución de la roca de caja,  $\text{CO}_2$  procedente del suelo, etc.) (Lambert y Aharon, 2011). En el presente trabajo, se ha analizado la composición isotópica del oxígeno y el carbono en espeleotemas y rellenos de carbonatos hidrotermales en Sima de la Higuera (Pliego) y Sima Destapada (Cartagena), con el fin de hacer una primera aproximación geoquímica a los procesos que los generaron, así como a la temperatura del agua en el momento de la precipitación del carbonato.

### **Entorno geológico y descripción de las cuevas**

La Sima de la Higuera (485 m s.n.m) está ubicada en la Sierra de Espuña, en el término municipal de Pliego (Región de Murcia). Su desarrollo conocido es de 5500 metros, con una profundidad máxima explorada de 156 metros con respecto a la entrada de su pozo de acceso (Fig. 1). La cavidad se desarrolla en calcarenitas y calizas del Oligoceno relativamente fracturadas debido a empujes dirigidos en dirección NW-SE que dieron lugar a un conjunto de diaclasas y fallas que controlaron su morfología, sobre todo en sus niveles más profundos. En el entorno de la cueva existen sondeos que explotan aguas con temperaturas de entorno a 32°C. Estos pozos extraen agua del acuífero de El Bosque, en el cual se encuentra esta cavidad (Rodríguez-Estrella, 2015).

La cueva presenta claras evidencias de su origen hipogénico, como por ejemplo, la presencia de formas de disolución específicas de cavidades hipogénicas, así como espeleotemas relacionados típicamente con este tipo de sistemas hidrotermales (Gázquez y Calaforra, 2013). También su elevada temperatura ambiental (hasta 21,7°C) con respecto a la media exterior (~17°C), aumentando ligeramente hacia las zonas más profundas, indica una importante anomalía térmica positiva que podría apuntar a un origen relativamente reciente.

Sima Destapada está ubicada en el Golfo de Mazarrón, en la costa sudeste de la Región de Murcia, cerca de la localidad de Isla Plana. La entrada de la cavidad se encuentra en el Cabezo de Horno, a 285 m s.n.m y fue descubierta en 1975 aunque las exploraciones se desarrollaron en la década de los 80s. Su recorrido actual topografiado es de 3.300 m, con una profundidad máxima conocida de 221 m de galerías vadosas (Ros *et al.*, 1988, Ros *et al.*, 2015). La cavidad se desarrolla en mármoles, dolomías y calizas triásicas. En ocasiones aparecen filitas, cuarcitas, esquistos y calcarenitas rojizas del Permo-Trias, pertenecientes al complejo Alpujárride.

Desde el punto de vista hidrogeológico, Sima Destapada se encuentra dentro del acuífero de Vértice Hornos cuyo principal manantial daba lugar a los baños termales de la Marrana (hoy inutilizados). Los niveles inferiores de la cueva, por debajo del nivel -221 m desde la entrada, se encuentran sumergidos en agua termal (31°C). Trabajos de espeleobuceo recientes han topografiado una nueva red de galerías laberínticas sumergidas de 400 m de recorrido. En todos los niveles de la cavidad aparecen signos evidentes de espeleogenesis hipogénica, incluyendo



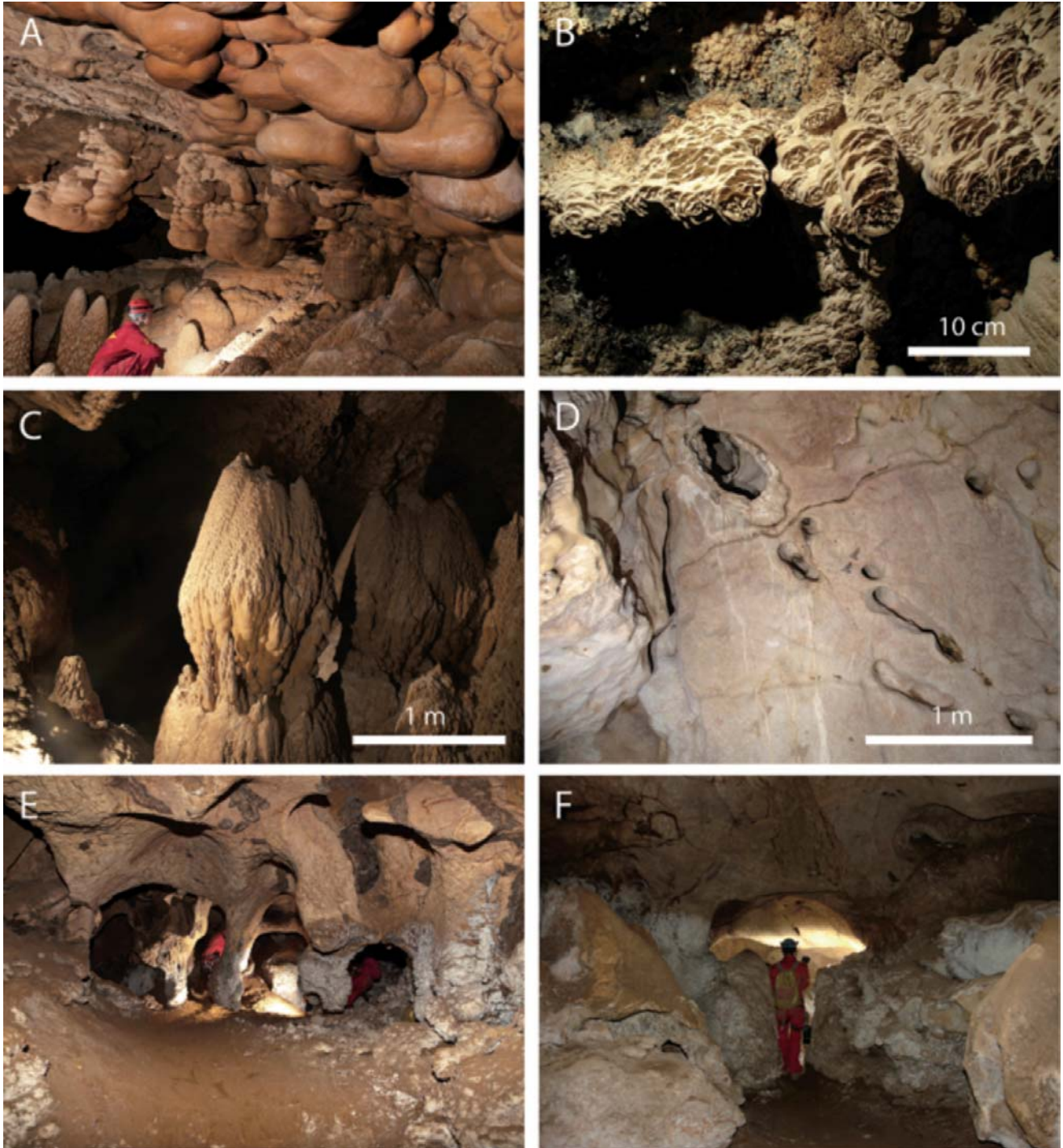


Figura 1. Morfologías y espeleotemas de origen hipogénico. I) Sima de la Higuera: A. Nubes y conos de cuevas, B. Folias y C. Conos dobles de calcita flotante; II) Sima Destapada: D. Conductos ascendentes de disolución (solutional pockets); E. Pendants y partitions; F. Morfologías típicas de galerías freáticas (Fotografías: Andrés Ros, Jose Luis Llamusi y Victor Ferrer)

domos de corrosión y cúpulas, *scallops* verticales, conductos ascendentes (*feeders* y *outlets*), canales de burbujas, *pendants*, etc. (Gázquez et al., 2016) (Fig. 1).

## Metodología

### **Descripción de las muestras**

En Sima de la Higuera se tomó una muestra de calcita de textura sacaroidea (HG-01) precipitada en el interior de fracturas de la roca de caja, en la Galería del Manganese (-110 m). En algunos casos, la calcita forma láminas que sobresalen varias decenas de centímetros de la pared de la cavidad, a modo de *boxwork* y aparecen cubiertas por óxidos de hierro y manganeso (Gázquez *et al.*, 2012) (Fig. 2A). A la profundidad de 80 m, se tomaron muestras de cristales de calcita euhedrales de 3-4 centímetros de tamaño (HG-02) que aparecen expuestos en las paredes de Galería de los Lagos (Fig. 2B). En la Sala Paraíso (-85 m), se tomaron láminas de calcita flotante (HG-03) depositadas sobre otros espeleotemas de origen subacuático que aparecen en este nivel (Gázquez y Calaforra, 2013) (Fig. 2C). Además, se tomó una muestra de polvo de calcita flotante (HG-04) de los depósitos de arenas de calcita de la Sala Cuatro Caminos (-117 m) (Fig. 2D). Finalmente, se muestreó la roca de caja carbonática, en la Sala de la Bañera (HG-05) y en el exterior de la cavidad (HG-06). Además de muestras sólidas, se tomaron 8 muestras de agua de lagos y goteos en el interior de la cavidad en campañas muestreo llevadas a cabo en septiembre de 2011 y mayo de 2012.

En Sima Destapada se tomaron dos muestras de rellenos de calcita (*solutional pocket*) que aparecen a modo de geodas en fracturas de la roca de caja; una muestra de calcita rojiza macrocristalina (DES-01) que forma parte de una lámina de aproximadamente 10 cm de espesor y otra de la parte central constituida por rellenos de calcita blanca microcristalina (DES-02) (Fig. 2E). También se tomaron dos muestras del agua dulce (7-8 mS/cm) en la que se encuentra sumergida la parte más profunda de la cavidad.

### **Análisis isotópicos**

Para el análisis isotópico de los carbonatos se utilizó un dispositivo Gas Bench II (Thermo Scientific) de preparación de muestras para análisis isotópico acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas MAT253 (Thermo Scientific) en el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge, Reino Unido. La composición isotópica del oxígeno y el carbono ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ) esta estandarizada con respecto al patrón internacional V-PDB. La reproducibilidad del método fue de  $\pm 0.1\text{‰}$  ( $1\sigma$ ) para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ , basada en el análisis de patrones internos. Los valores de las muestras se encuentran dentro de la recta de calibración obtenida con estos estándares. Los datos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$  fueron convertidos a V-SMOW mediante la fórmula de Coplen (1995) para su comparación con los valores de las aguas.

La composición isotópica de las muestras de agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ ) se analizó con un Picarro L-1102-i en el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge (Reino Unido). La composición isotópica del oxígeno y el hidrogeno ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ ) esta estandarizada con respecto al patrón internacional V-SMOW. Para la calibración de los datos isotópicos se utilizaron cuatro estándares internos calibrados previamente con respecto a los estándares internacionales V-SMOW,



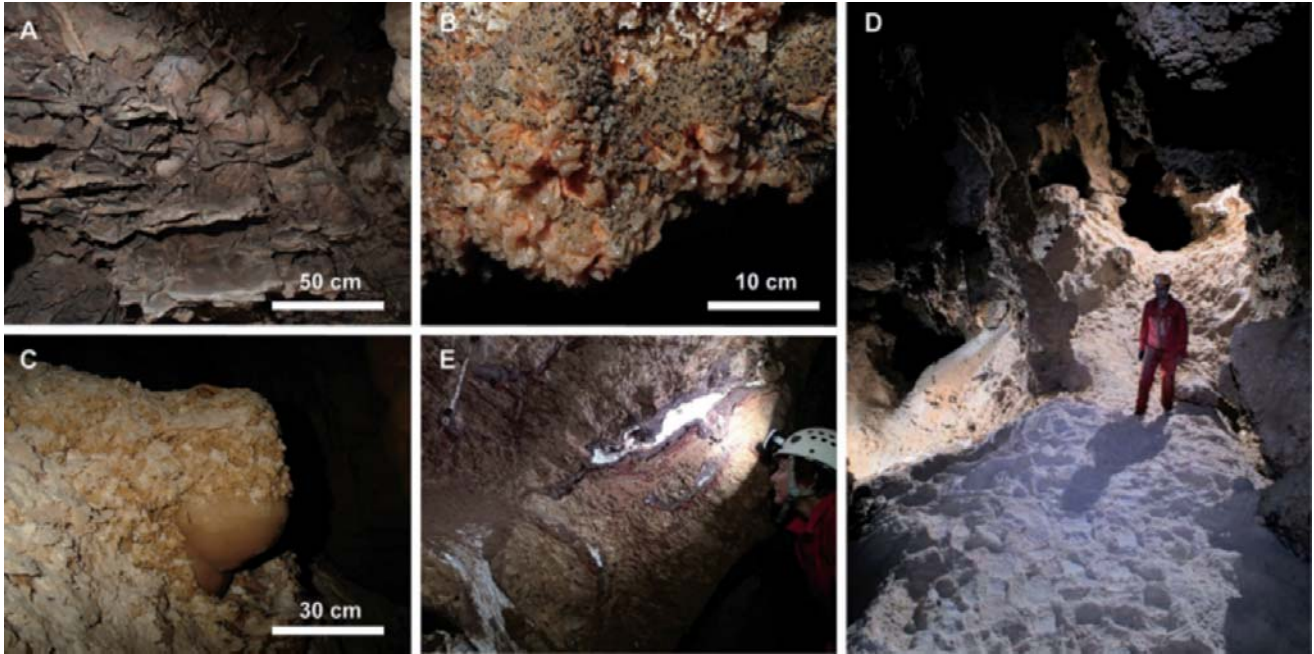


Figura 2. Espeleotemas analizados en este estudio. I) Sima de la Higuera: A. Boxwork de calcita sacaroidea cubiertos por patinas de Fe y Mn, B. Spar de calcita, C. Láminas de calcita flotante y D. "Arenas" de calcita flotante. II) Sima Destapada: E. Rellenos de calcita esparítica en oquedades de la roca de caja (Fotos: Andrés Ros, Víctor Ferrer y José María Calaforra)

GISP y SLAP. La reproducibilidad ( $1\sigma$ ) de los análisis fue de 0.05‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y de 0.4‰ para  $\delta\text{D}$ , basada en 6 análisis consecutivos de cada muestra.

### **Microfotografías de microscopía electrónica de barrido electrónico**

El hábito cristalino de los minerales fue estudiado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, *Secondary Electron Microscopy*). Las microfotografías se tomaron con un equipo HITACHI S-3500 en el Área de Servicios Técnicos de la Universidad de Almería.

### **Resultados**

La composición isotópica de los rellenos de calcita y espeleotemas de Sima de la Higuera osciló entre -2.7‰ y -7.8‰ para  $\delta^{13}\text{C}$  y entre -7.8‰ y -12.0‰ para  $\delta^{18}\text{O}$ . Estos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  son más negativos que los observados en la roca de caja (-1.0±1.2‰ y -4.0±2.5‰ para  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , respectivamente) (Tabla 1). La composición isotópica de las aguas de goteo y lagos presenta un valor muy homogéneo en torno a -6.5±0.2‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y de -38.3±1.3‰ para  $\delta\text{D}$  (V-SMOW). La muestra de rellenos de calcita microcristalina (HG-01) está constituida por cristales de calcita euhedrales de hasta 100  $\mu\text{m}$  de tamaño. En el caso de la muestra de láminas de calcita flotante (HG-03), al microscopio electrónico se observan cristales de calcita tipo "dientes de perro", típicamente relacionados con precipitación de calcita en condiciones hidrotermales (Gázquez y Calaforra, 2013). La muestra de polvo de calcita flotante (HG-04) muestra un aspecto microscópico similar, aunque la superficie de los cristales aparece claramente erosionada.

En Sima Destapada, la composición isotópica del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de los rellenos de calcita analizados muestra valores de  $-1.1\text{‰}$  y  $-5.3\text{‰}$  en las muestras rojiza y blanca, respectivamente. En cuanto a  $\delta^{18}\text{O}$ , su valor fue de  $-10.5\text{‰}$  en la muestra de calcita esparítica rojiza y de  $-8.2\text{‰}$  en la de calcita microcristalina blanca. El análisis las dos muestras de agua analizadas produjo un valor medio de  $-4.8\pm 0.1\text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $-30.1\pm 0.1\text{‰}$  para  $\delta\text{D}$ .

Muestra	Cavidad	Descripción	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	T <sup>a</sup> (°C)
HG-01	Higuera	Láminas de calcita microcristalina formando <i>boxwork</i> (-110 m)	-2,7	-11,9	51
HG-02	Higuera	<i>Spars</i> de calcita (-80 m)	-6,7	-8,2	28
HG-03	Higuera	Láminas de calcita flotante (-85 m)	-7,8	-7,8	26
HG-04	Higuera	Arenas de calcita flotante (-117 m)	-7,8	-8,3	28
HG-05	Higuera	Roca de caja (-85 m)	-0,1	-2,2	-
HG-06	Higuera	Roca de caja (exterior)	-1,8	-5,8	-
DES-01	Destapada	Calcita esparítica rojiza	-1,1	-10,5	51
DES-02	Destapada	Calcita microcristalina blanca	-5,3	-8,2	37

Tabla 1. Composición isotópica de las muestras analizadas y temperatura calculada a partir de la ecuación de Tremaine et al. (2011) y el valor de  $\delta^{18}\text{O}$  en el agua de goteo actual en Sima de la Higuera y Sima Destapada

## Discusión

### **Determinación de temperaturas de formación y posibles incertidumbres**

Las temperaturas de precipitación de los espeleotemas han sido calculadas asumiendo la condición de equilibrio isotópico entre  $\delta^{18}\text{O}$  en el agua y en el carbonato a partir de la Ecuación 1 (Tremaine et al., 2011), donde  $\alpha$  es el fraccionamiento isotópico, o lo que es lo mismo, la diferencia absoluta entre  $\delta^{18}\text{O}$  en el carbonato y en el agua a partir de la que precipitó el espeleotema, ambos calibrados respecto a V-SMOW. Dado que el valor de  $\delta^{18}\text{O}$  en la disolución en el momento de la precipitación de los espeleotemas es desconocido, para los cálculos se ha utilizado el valor medio de  $\delta^{18}\text{O}$  en el agua actual de las cuevas. La composición isotópica del agua de infiltración en cuevas suele representar la media del agua de precipitación en su entorno, al igual que ocurre con los acuíferos.

Aunque este valor en el agua del acuífero podría haber cambiado ligeramente desde el momento en el que estos espeleotemas precipitaron, existen indicadores que apuntan a que esta diferencia pudo ser casi despreciable con respecto al valor de  $\delta^{18}\text{O}$  en el agua meteórica actual en el entorno de la cueva, y por ello en el agua de goteo y en los acuíferos del entorno. Por ejemplo, estudios sobre las variaciones en  $\delta^{18}\text{O}$  en aguas subterráneas recientes y otras más antiguas, del último máximo glacial (~18.000 años antes del presente) han puesto de manifiesto que en el sur de España, el valor de  $\delta^{18}\text{O}$  en precipitación no ha experimentado cambios significativos entre estos dos periodos de condiciones climáticas tan distintas (Jasechko et al., 2015).



No obstante, cabe destacar que un cambio de 0.18‰ en  $\delta^{18}\text{O}$  en la composición isotópica del agua da lugar a una variación de un grado centígrado sobre la temperatura de formación estimada (Tremaine et al., 2001). Por ejemplo, en el hipotético caso de que el valor de  $\delta^{18}\text{O}$  en el agua original hubiera sido 1‰ más negativo, los valores de temperatura estimados habrían sido en torno a 5°C más bajos.

### **Evidencias del hidrotermalismo en Sima de la Higuera**

Sima de la Higuera alberga una gran diversidad de elementos morfológicos poco convencionales que apuntan a su origen es hipogénico (Gázquez y Calaforra, 2013) (Fig. 1). En los niveles superiores y en el pozo de acceso aparecen elementos típicos de espeleogénesis hipogénica como son las costras de corrosión, constituidas por calcita micritizada cuyo origen está relacionado con la interacción entre el agua hidrotermal de carácter ácido y la roca de caja carbonática (Palmer y Palmer, 2012). Por otro lado, también se observan formas típicas de erosión freática, como son los *scallops*, en este caso de gran tamaño e indicando flujos lentos y ascendentes, así como cúpulas y domos de corrosión.

En los niveles intermedios, en torno a la Sala de la Bañera (-85 m), se han observado canales de corrosión (*bubble's trails*) en el techo, cuyo origen está relacionado con la interacción en condiciones freáticas entre la roca de caja carbonática y la fase gaseosa ("burbujas") como consecuencia del alto contenido en  $\text{CO}_2$  y/o  $\text{H}_2\text{S}$  que normalmente presenta el agua termal (Gázquez y Calaforra, 2013). Por otro lado, sobre los espeleotemas tipo "nubes" (*clouds*) que aparecen en el techo de la Sala de los Fantasmas se han observado surcos, en ocasiones de varios centímetros de profundidad, también relacionadas con la corrosión provocada por el ascenso de burbujas de  $\text{CO}_2$ .

Durante las primeras etapas de formación de la cueva, probablemente incluso antes de que se desarrollaran sus grandes volúmenes, se produjo la precipitación de rellenos de calcita en fracturas de la roca de caja. La composición isotópica de estos rellenos ( $\delta^{13}\text{C} = -2.7\text{‰}$  y  $\delta^{18}\text{O} = -11.9\text{‰}$ ) de textura sacaroidea (Fig. 3A) difiere considerablemente de la del carbonato de la roca encajante ( $-1.0 \pm 1.2\text{‰}$  y  $-4.0 \pm 2.5\text{‰}$  para  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , respectivamente). Los cálculos de temperatura a partir de la ecuación propuesta por Treiman et al. (2011) indican que estos rellenos podrían haber precipitado a temperatura en torno a 51°C. En una etapa posterior, después de que se formaran las galerías principales de la cueva y en condiciones subaéreas, el ascenso de aire caliente cargado de vapor de agua procedente de niveles más profundos dio lugar a condensación sobre las paredes de las galerías. Durante este periodo se generaron elementos tipo "boxwork" constituidos por las mismas láminas de calcita que anteriormente rellenaban fracturas de la roca caja y que en la actualidad se proyectan desde las paredes y techos de la cavidad. Este tipo de estructuras se formaron debido a la menor resistencia a la disolución que presenta la roca encajante con respecto a los rellenos carbonáticos hidrotermales (Gázquez et al., 2012).

Cristales euhedrales de calcita ( $\delta^{13}\text{C} = -6.9\text{‰}$  y  $\delta^{18}\text{O} = -8.2\text{‰}$ ) precipitaron en la superficie de paredes y techos en los niveles intermedios (-80 a -90 m de profundidad). La temperatura del agua en el momento de su formación pudo ser de aproximadamente 28°C y probablemente

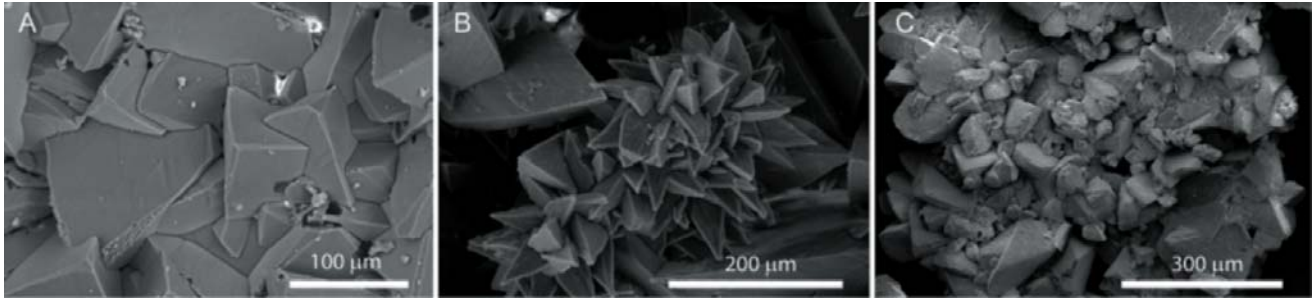


Figura 3. Microfotografías de microscopio electrónico de barrido (SEM) en espeleotemas de Sima de la Higuera: A. Cristales de calcita sacaroidea rellenando fracturas de la roca de caja; B. Cristales de calcita en forma de "dientes de perro" en láminas de calcita flotante; C. Arenas de calcita flotante, cuyos cristales aparecen parcialmente erosionados/disueltos debido a su transporte y exposición subaérea

ocurrió en condiciones epifreáticas, en una situación de alta estabilidad que favoreció la desgasificación lenta de  $\text{CO}_2$  que permite la precipitación de cristales de gran tamaño.

En fases posteriores el nivel freático del acuífero descendió progresivamente. En esta situación en la que existía un atmósfera gaseosa en la cueva, se favoreció la precipitación de calcita flotante ( $\delta^{13}\text{C} = -7.8\text{‰}$  y  $\delta^{18}\text{O} = -7.8$  a  $-8.3\text{‰}$ ) sobre la superficie del agua a temperaturas que pudieron estar en torno a  $26\text{-}28^\circ\text{C}$ . Este proceso comenzó inicialmente en las galerías más superficiales, aunque las acumulaciones de calcita flotante son más escasas en estos niveles, probablemente debido a los procesos de erosión y disolución durante las fases vadosas más recientes. Sin embargo, estos depósitos aparecen abundantemente en el resto de la cueva, siendo especialmente importantes en la Sala Paraíso ( $-98$  m) y la Sala Cuatro Caminos ( $-117$  m) (Fig. 4E). El hábito mineralógico de estas láminas depositadas sobre otros espeleotemas y vistas al microscopio electrónico es el de cristales en forma de "dientes de perro" (*dogtooth calcite*) (Fig. 3B), típicos de calcita precipitada a partir de aguas termales a baja-media temperatura. La movilización de calcita flotante desde los niveles superiores a los más profundos dio lugar a la erosión mecánica de las láminas, generando los depósitos de arenas blancas de la Sala Cuatro Caminos. La erosión produjo el desgaste de las aristas de los microcristales que forman la calcita flotante, como se puede observar en la Figura 3C.

Cabe destacar que los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  disminuyeron desde las primeras fases de precipitación de rellenos de calcita ( $-2.7\text{‰}$ ) hasta las últimas de formación de calcita flotante ( $-7.8\text{‰}$ ), lo que sugiere que la disolución de la roca de caja ( $-1.0 \pm 1.2\text{‰}$ ) fue inicialmente la fuente mayoritaria de carbonato al sistema. En las siguientes fases de formación de espeleotemas, hubo contribuciones importantes de  $\text{CO}_2$  edáfico al acuífero, que podría haberse debido a un aumento de la producción vegetal en el suelo, que presenta valor de  $\delta^{13}\text{C}$  más negativos (de entre  $-24\text{‰}$  y  $-12.5\text{‰}$ , dependiendo del tipo de vegetación; O'Leary, 1981).

### **Evidencias del hidrotermalismo en Sima Destapada**

En Sima Destapada, existen pozos de hasta 50 m de profundidad que conectan los niveles intermedios de la cavidad con el acuífero hidrotermal, cuya temperatura actual es de  $31^\circ\text{C}$ . Estos conductos verticales podrían haber actuado en el pasado como canales de alimentación

(*feeders*) de agua termal al sistema, muy comunes en cuevas hipogénicas. También se han observado conductos ciegos verticales en suelos y techos, así como grietas producida por el ascenso de agua termal (*ceiling dissolution pockets*) (Fig. 1D). En algunas ocasiones, la disolución de las paredes de la cavidad produjo la aparición de pilares aislados (*partitions y pendants*) que en algunos casos llegaron a desaparecer produciéndose así la conexión de salas o pasajes adyacentes (Fig. 1E). Otros elementos típicos de cuevas hipogénicas que también aparecen en Sima Destapada son los pasajes con sección en forma de "llave", cuyo techo está constituido por un canal semiesférico (Fig. 1F), así como canales verticales de burbujas.

En muchas localizaciones de la cueva aparecen rellenos de calcita en fracturas de la roca de caja, a modo de geodas, que contienen cristales de calcita formados en dos fases. Según el geotermómetro isotópico, los cristales euhedrales de calcita rojiza ( $\delta^{13}\text{C} = -1.14\text{‰}$  y  $\delta^{18}\text{O} = -10.47\text{‰}$ ) habrían precipitado a temperaturas en torno a  $51^{\circ}\text{C}$ , asumiendo que la composición isotópica del agua no ha sufrido cambios significativos y fue similar a la actual. Posteriormente, la temperatura del acuífero pudo disminuir hasta  $37^{\circ}\text{C}$ , tal y como quedó registrado en los isotopos de la calcita microcristalina ( $\delta^{13}\text{C} = -5.31\text{‰}$  y  $\delta^{18}\text{O} = -8.20\text{‰}$ ) que rellena la parte más interna de las fracturas. Posteriormente, la temperatura del agua habría seguido disminuyendo hasta los  $31^{\circ}\text{C}$  actuales. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  más elevados en la primera fase de precipitación indicarían que la fuente de carbono en esta etapa podría haber estado relacionada con la disolución de la roca carbonática triásica. Por el contrario los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  más negativos observados durante la segunda fase de precipitación de calcita microcristalina podrían estar relacionados con aportes más importantes de  $\text{CO}_2$  procedente de la vegetación y el suelo sobre la cavidad en periodos más recientes.

## Conclusiones y trabajos futuros

Los procesos de espeleogénesis hipogénica responsables de la formación de Sima de la Higuera y Sima Destapada han dejado evidencias geomorfológicas como resultado de los mecanismos de disolución hidrotermal de la roca de caja carbonática. Estos indicadores morfológicos son similares a los observados en otras cavidades hipogénicas a escala mundial. Los resultados isotópicos de espeleotemas formados en condiciones subacuáticas en ambas cuevas parecen confirmar esta hipótesis. Tanto en Sima de la Higuera como en Sima Destapada, las evidencias que apuntan a una primera fase de precipitación de hidrotermal vienen dadas por la presencia de rellenos de cristales de calcita esparítica en fracturas de la roca de caja que habrían precipitado a temperaturas en torno a  $50^{\circ}\text{C}$ , siempre asumiendo que la composición isotópica del agua en el momento de la precipitación fue similar a la del agua actual en la cueva. Posteriormente, la temperatura de ambos acuíferos habría disminuido para dar lugar a espeleotemas a temperaturas más bajas de entre  $38$  y  $26^{\circ}\text{C}$ .

En trabajos futuros, mediante el análisis de isotopos estables de las inclusiones fluidas de estos espeleotemas se podrá precisar su temperatura de formación de forma más exacta, eliminado así las incertidumbres debidas a posibles variaciones en la composición isotópica del agua del acuífero en el momento de la precipitación. El estudio detallado de la geocronología de estos espeleotemas y la geoquímica isotópica de otros carbonatos en cuevas de la Región de Murcia

podría revelar la evolución de la temperatura y la posición del nivel freático de los acuíferos a escala regional.

## Agradecimientos

Los autores agradecen su esfuerzo a todos los espeleólogos que han colaborado en la exploración de estas cavidades durante los últimos 20 años. Agradecemos a la Dra. Esmeralda Urea (Área de Servicios Técnicos, Universidad de Almería) su ayuda durante la realización de análisis de microscopía electrónica, a James Rolfe durante el análisis isotópico de los carbonatos y al Profesor David Hodell por prestar las facilidades necesarias. Los análisis realizados en este trabajo han sido financiados por los fondos del Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería y el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge. Parte de los materiales utilizados para la exploración de estas cavidades han estado patrocinados por RODCLE®.

## Referencias

- Asencio, A.D. y Aboal, M. 2011. In situ acetylene reduction activity of *Scytonema julianum* in Vapor cave (Spain). *International Journal of Speleology*, 40: 17-21.
- Audra, Ph. y Palmer, A. 2015. Research frontiers in speleogenesis. Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. *Acta Carsologica*, 44(3): 315-348.
- Coplen, T.B. 1995. Reporting of stable carbon, hydrogen, and oxygen isotopic abundances. In: Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements. *International Atomic Energy Agency, TECDOC*, pp. 31-34.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M. y Rull, F. 2012. Boxwork and ferromanganese coatings in hypogenic caves: an example from Sima de la Higuera Cave (Murcia, SE Spain). *Geomorphology*, 117-118: 158-166.
- Gázquez, F. y Calaforra, J.M. 2013. Hypogenic speleogenesis and speleothems of Sima de la Higuera (Murcia, southeast Spain). *16<sup>th</sup> International Congress of Speleology*, Brno. Vol III: 78-83.
- Gázquez, F. y Calaforra, J.M. 2013. Origin of double-tower raft cones in hypogenic caves. *Earth Surface and Land Processes*, 38: 1655–1661.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Ros, A., Llamusí, J.L. y Sánchez, J. 2016. Hypogenic morphologies and speleothems in caves of the Murcia Region, south-eastern Spain. *Proceeding of the 3rd International Deepkarst conference*, Carlsbad. En prensa.
- González-Ramón, A., Segura-Herrera, A., Sánchez-Díaz, T.J., Ignatenko, A., Gea-López, R.D., Pérez-Martínez, P., Belmonte-Jiménez, G. y Carra-Vélez, R. 2014. La cueva de Luchena, un ejemplo de cavidad hipogénica relacionada con descargas de aguas subterráneas en el acuífero Pericay-Luchena (Lorca, Murcia). En: *Iberoamérica Subterránea*. (Ed. J.M. Calaforra and J.J. Durán). Asociación Española de Cuevas Turística. 321-331.
- Jasechko, S., Lechler, A., Pausata, F.S.R., Fawcett, P.J., Gleeson, T., Cerdon, D.I., Galewsky, J., LeGrande, A.N., Risi, C., Sharp, Z.D., Welker, J.M., Werner, M. y Yoshimura, K. 2015. Late-glacial to late-Holocene shifts in global precipitation  $\delta^{18}\text{O}$ . *Climate of the Past*, 11: 1375-1393.



- Klimchouk, A.B. 2009. Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106: 100-117.
- Lambert, W.J. y Aharon, P. 2011. Controls on dissolved inorganic carbon and  $\delta^{13}\text{C}$  in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothems  $\delta^{13}\text{C}$  assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 753-768.
- O'Leary, M.H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry*, 20: 553-567.
- Palmer, A.N. 2011. Distinction between epigenic and hypogenic caves. *Geomorphology*, 134: 9-22.
- Palmer, M.V. y Palmer A.N. 2012. Petrographic and isotopic evidence for late-stage processes in sulfuric acid caves of the Guadalupe Mountains, New Mexico, USA. *International Journal of Speleology*, 41(2): 231-250.
- Rodríguez-Estrella, T. 2015. Hidrogeología. En: *Sima de la Higuera. Monumento Nacional*. Ed: Ayuntamiento de Pliego. pp. 35-49.
- Ros, A, Llamusí, J. y Inglés, S. 1988. Sima Destapada, Hornos, Isla Plana (Cartagena). *Revista Caliza*, 0: 4-12.
- Ros, A., Llamusí, J.L y Sánchez, J. 2011. Exploración en Sima Destapada y Cueva del Agua, dos cavidades de origen hidrotermal (Murcia), *VIII Simposio Europeo de Espeleología*, Marbella. 481-517.
- Ros, A., Llamusí, J.L. y Sánchez, J. 2014. Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España). En: *Iberoamérica Subterránea*. Ed: J.M. Calaforra y J.J. Durán). Asociación Española de Cuevas Turística. 405-416.
- Ros, A., Llamusí J.L. y Sánchez, J. 2014. *Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España)*, vol. I. Ed: CENM-naturaleza, Murcia. 25 pp.
- Tremaine, D.M., Froelich, P.N. y Wang, Y. 2011. Speleothem calcite farmed in situ: Modern calibration of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 4929-4950.

Gázquez, F. *et al.* La Cueva del Orón-Arco (Cartagena, Región de Murcia): una cavidad costera con génesis y espeleotemas singulares. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 295-306.

## La Cueva del Orón-Arco (Cartagena, Región de Murcia): una cavidad costera con génesis y espeleotemas singulares

F. Gázquez<sup>(1)</sup>, J.M. Calaforra<sup>(2)</sup>, F. Rull<sup>(3)</sup>, J. Medina<sup>(3)</sup>, A. Ros<sup>(4)</sup>, J. L. Llamusi<sup>(4)</sup> y J. Sánchez<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Downing Street, Cambridge, CB2 3EQ, United Kingdom  
f.gazquez@ual.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Biología y Geología y CAES Cambio Global, Universidad de Almería, Carretera de Sacramento s.n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04120, España  
jmcalaforra@ual.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Valladolid. Paseo de Belén, 7, 47011, Valladolid, España

<sup>(4)</sup> Centro de Estudios Ambientales y del Mar. CENM-naturaleza, Alcántara, 5, Cartagena, Murcia, 30394, España  
cenm@cenm.es

---

### RESUMEN

La Cueva del Orón, también conocida como Cueva del Arco (Cabo Tiñoso, Cartagena), fue descubierta en 1980 y explorada espeleológicamente durante la década de los noventa. Desde su hallazgo, se ha convertido en un reclamo espeleoturístico de la Región de Murcia debido a la espectacularidad de sus espeleotemas y su morfología singular, que difiere considerablemente de otras cavidades de su entorno. La cueva se desarrolla a lo largo de una fractura en las calizas y dolomías Alpujarrides de la Formación Cabo Tiñoso y su recorrido discurre en paralelo a la línea de costa. Esta fractura y la cavidad en sí están estrechamente relacionadas con la evolución geomorfológica del acantilado de Cabo Tiñoso. La cavidad no muestra evidencias claras de procesos de disolución freática o escorrentía subterránea, siendo las únicas masas de agua visibles dos lagos de agua salobre situados al nivel del mar. La roca encajante muestra evidencias de procesos de meteorización por precipitación de sales (yeso y halita) debido a la infiltración de agua de mar que posteriormente es evaporada en el interior de la cavidad. Este mecanismo da lugar al desprendimiento de lascas, disgregación y lajamiento mecánico de la roca, lo cual ha generado grandes salas en su interior y depósitos detríticos acumulados *in-situ* por este peculiar proceso de meteorización. En sus salas aparecen multitud de espeleotemas singulares que van desde grandes estalactitas-cristaloides de yeso (candelabros, *chandeliers*) con ápices de halita, a espectaculares *boxwork* dolomíticos, excéntricas y semiesferas huecas de yeso (*blisters*) asociadas a estalactitas de aragonito. La infiltración de agua de mar a través de la matriz carbonática y su evaporación en el interior de la cavidad han generado la mayoría de estos espeleotemas. Estos elementos singulares confieren a la Cueva del Orón-Arco un sello distintivo en el contexto de las cavidades españolas.

**Palabras clave:** cuevas costeras, dolomita, espeleogénesis, espeleotemas, halita, meteorización, yeso.

### ***El Orón-Arco Cave (Cartagena, SE Spain): a coastal cave of singular origin and peculiar speleothems***

#### **ABSTRACT**

*El Orón Cave, also known as Arco Cave (Cabo Tiñoso, Cartagena), was discovered in 1980 and has been explored by speleologists over the past decade. This cavity has turned into a tourist attraction of the Murcia Region (SE, Spain)*

*because of its striking speleothems and unique morphologies, which considerably differ from the ones found in other cavities in this region. The main cave passages run along a fracture parallel to the shoreline in limestones and dolostones of the Alpujarride complex of the Cabo Tiñoso Formation. This fault is closely related to the cave formation and the morphology of the Cabo Tiñoso cliff itself. No clear evidence for phreatic dissolution or signs of subterranean runoff are found in this cave, whereas two brackish water lakes placed at the sea-level are the only visible waterbodies at present. The carbonate bedrock shows clear evidence for chemical and mechanical weathering by soluble salts (halite and gypsum) precipitation due to seawater seepage and subsequent evaporation in the cave. This mechanism has produced detachment of rock fragments and mechanical spalling, giving rise to massive chambers and in-situ accumulations of detrital deposits. The cave also hosts a wide variety of peculiar speleothems, including monocrystalline gypsum stalactites (chandeliers) with halite apexes, relevant examples of dolomitic boxwork, helictites and hollow gypsum semi-spheres (blisters) associated to calcite stalactites. Seawater seepages through the carbonate bedrock and evaporation within the cave created most of these speleothems. Such unique features lend El Orón-Arco Cave a distinctive fingerprint amongst the cave in Spain.*

**Keywords:** coastal caves, dolomite, gypsum, halite, speleogenesis, speleothems, weathering.

## Introducción

Los mecanismos de formación de cavidades suelen estar ligados a la disolución de la roca encajante, normalmente de naturaleza carbonática, por parte de masas agua subsaturadas en carbonato cálcico (Audra y Palmer, 2015). Estos procesos disolutivos generan oquedades en la roca, y en fases avanzadas del proceso de karstificación pueden dar lugar al desprendimiento de bloques y colapso de techos que conllevan la formación de grandes salas y galerías. En el ámbito de las cuevas costeras, la corrosión de la roca caliza se debe en muchos casos a los procesos de mezcla de agua dulce y agua salada que derivan soluciones subsaturadas en calcita y por lo tanto, con gran capacidad para disolver la roca caliza (Myroie y Myroie, 2007). Recientemente, Ginés y Ginés (2007) propusieron el desprendimiento gravitacional de bloques y colapso como un agente a tener cuenta en la formación de evolución del karst en áreas costeras.

Además de las cavidades costeras formadas por estos mecanismos clásicos de karstificación, existen otras cuyo origen está asociado a la evolución geomorfológica de la línea de costa, en muchos casos como consecuencia de agentes de erosión costeros que producen deslizamientos y fracturación de los materiales geológicos (Moore, 1954). Las cuevas desarrolladas en fracturas suelen presentar elementos distintivos con respecto a las cavidades formadas por disolución. Por ejemplo, en muchas ocasiones carecen de morfologías creadas por flujos de agua subterráneos, especialmente en galerías subaéreas alejadas del nivel sumergido.

En el presente trabajo realizamos la primera descripción geológica y espeleológica de la Cueva del Orón-Arco de Cabo Tiñoso (Cartagena, Murcia). Esta cavidad costera presenta características peculiares en cuanto a su geomorfología y a la variedad de espeleotemas que contiene. Por ello en este trabajo estudiamos en detalle la mineralogía de sus formaciones subterráneas para entender los procesos que la generaron.

## Entorno geológico y descripción de la cueva

La Cueva del Orón-Arco está ubicada en la vertiente sur de Cabo Tiñoso (Cartagena, Región de Murcia). Su desarrollo actual conocido se debe a la conexión de la Cueva del Arco, explorada

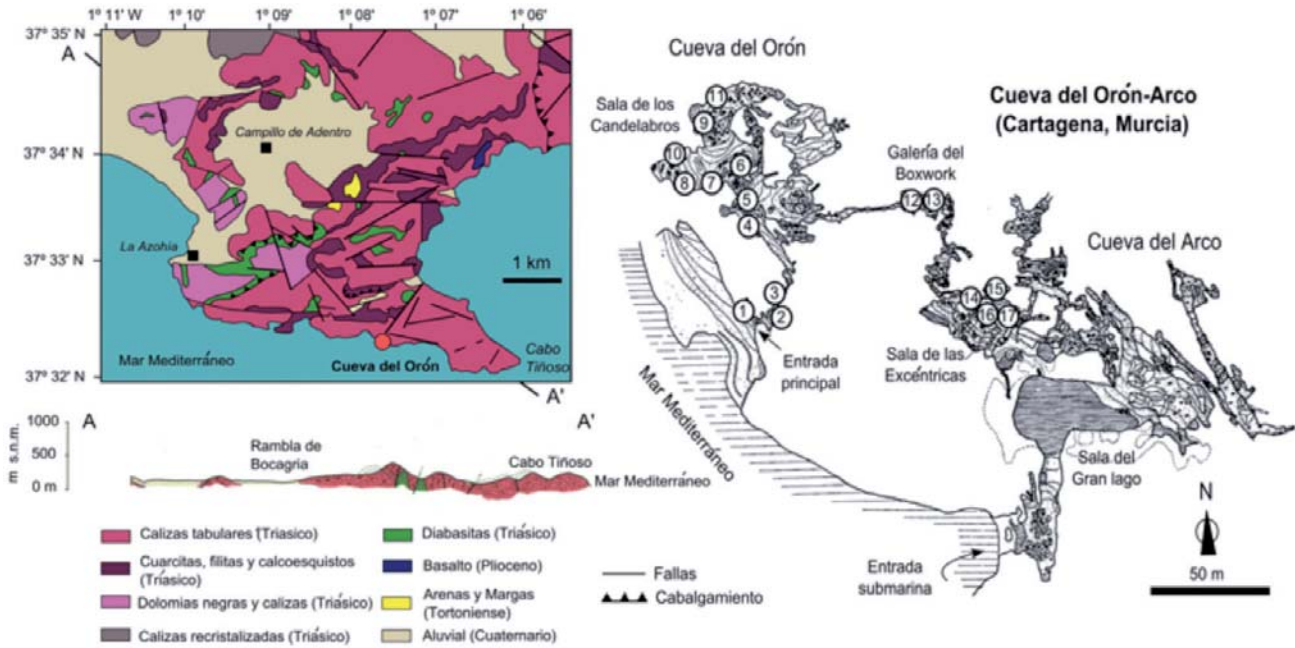


Figura 1. Entorno geológico del Cabo Tiñoso (modificado de Gordillo et al., 1972), plano topográfico de la Cueva del Orón-Arco (Autores: Llamusí, Inglés y Ros, 1984-1998), y puntos de muestreo de espeleotemas

desde 1980 (Llamusí et al., 1990) y la Cueva del Orón (Puch, 1998). Su recorrido total es de aproximadamente 1500 m y tiene dos entradas. Una de ellas es submarina y da acceso a la Cueva del Arco, también conocida como Cueva del Lago por albergar en su interior un lago de más de 1200 m<sup>2</sup> de superficie. La entrada subaérea se encuentra a 200 m de distancia de la subacuática en dirección noroeste, en la pared del acantilado a 10 m s.n.m (Fig. 1).

La cueva se desarrolla a lo largo de una fractura en las calizas y dolomías Alpujarrides de la Formación de Cabo Tiñoso y su recorrido discurre en paralelo a la línea de costa. Estos materiales carbonatados de edad Triásica presentan bajo grado de metamorfismo y yacen en la parte superior de la formación (García-Tortosa et al., 2000). Estratos de calizas grises con alto grado de foliación aparecen intercalados con dolomías rojizas, que se ven expuestas tanto en el acantilado (Fig. 2A) como en el interior de la cavidad (Fig. 2B).

La entrada ubicada en el acantilado da acceso a una serie de galerías de dimensiones reducidas que remontan un desnivel de aproximadamente 15 m en dirección noroeste. Algunas de estas "gateras", que están excavadas en materiales altamente fracturados e inestables, tienen menos de 1 m de altura y requieren frecuentemente de labores de desobstrucción. Sobre las paredes de estas galerías se observan concreciones blanquecinas a modo de costras (Fig. 3A), en algunos casos ligeramente cubiertas por materiales arenosos (Fig. 3B). A 150 m de la entrada, donde la cavidad adquiere mayor volumen se encuentra la Sala de los Candelabros, con aproximadamente 50 m de largo por 30 m de ancho y 5 m de alto. En las paredes de esta sala se observan concreciones de minerales en planos de la roca encajante (Fig. 2C, 3C). Junto a las paredes aparecen acumulaciones de fragmentos de roca, en ocasiones de varios metros de altura apoyados sobre la pared. El tamaño de los fragmentos varía entre unos pocos centímetros hasta varios decímetros (Fig. 2D). Desde el punto de vista de sus espeleotemas, los elementos



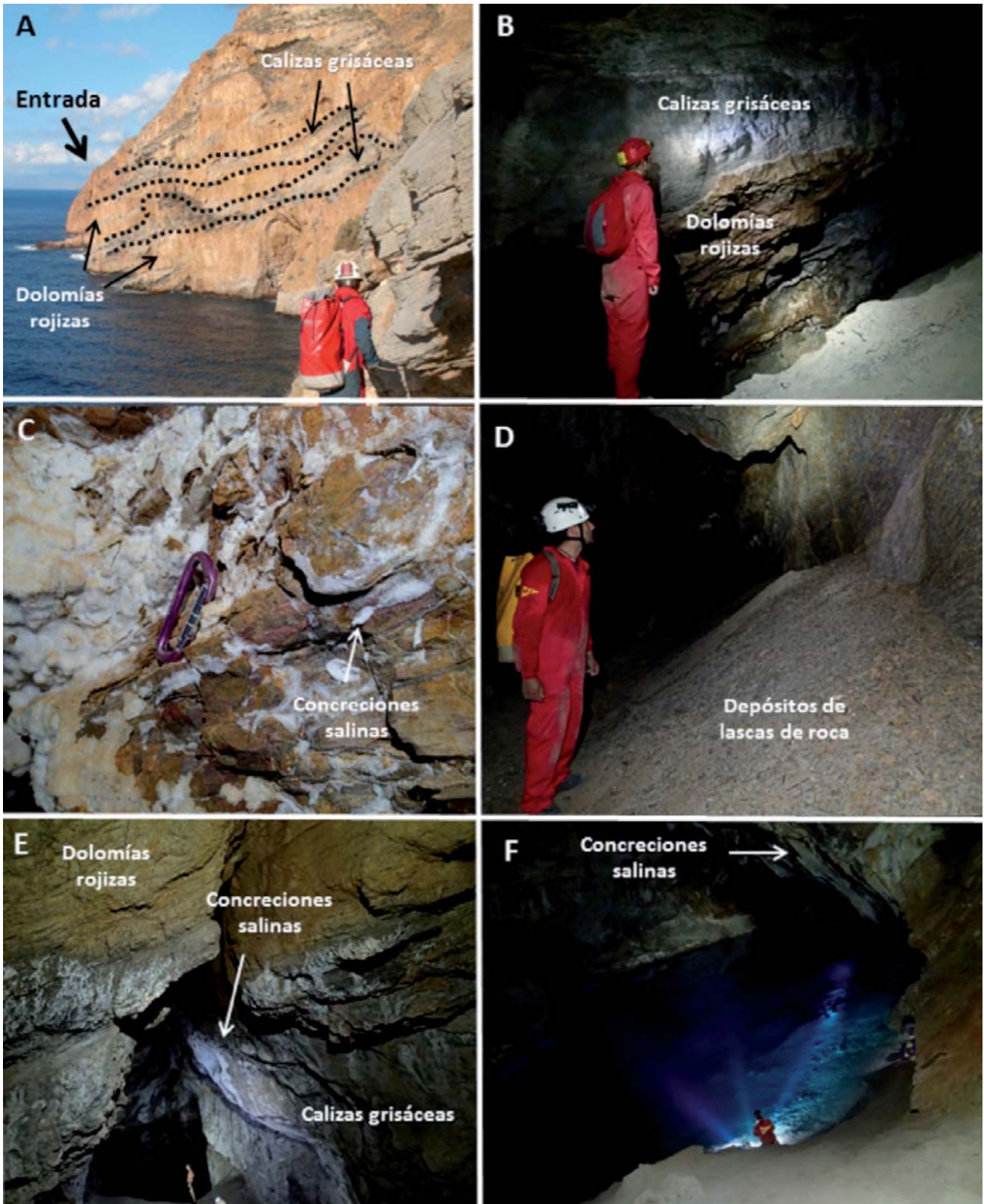


Figura 2. A. Alternancia de calizas grisáceas con alto grado de foliación y dolomías rojizas en las que se desarrolla la Cueva del Orón-Arco; B. Contacto entre las calizas y las dolomías en el interior de la cavidad; C. Concreciones salinas. D. Pilas de fragmentos de roca desprendidos de las paredes de la cueva; E. Calizas alteradas y concreciones salinas; F. Sala del Gran Lago donde se observa la roca de caja cubierta por concreciones salinas

más destacados de esta sala son los grandes cristaloides de yeso selenítico (candelabros o *chandeliers*) cuyo tamaño alcanza 1 metro en algunos casos (Fig. 3 F, G).

Esta sala da acceso a otra de menor tamaño cuyo elemento más relevante es la presencia de un enorme montículo de lascas de roca con una pendiente aproximada de 45° y 5 m de altura apoyado sobre una de sus paredes. Un pasaje angosto de 20 m de longitud desemboca en una pequeña sala con espectaculares ejemplos de *boxwork* cuyas láminas alcanzan profundidades de hasta 20-30 cm (Fig. 3H). Cuando la cueva fue visitada (4 de enero de 2014), la temperatura del aire en esta sala era de 19,7°C y la concentración de CO<sub>2</sub> de 507 ppp. Más adelante, un pozo angosto de 3 m de profundidad desemboca en una pequeña sala de 10 m de longitud, 3 de ancho y 4 de altura. A pocos metros de ésta, se accede a la Sala de las Excéntricas, que debe su nombre a la gran cantidad de helictitas y antoditas que cubren su techo. Esta sala de aproximadamente 800 m<sup>2</sup> alberga relevantes ejemplos de "blisters" o semiesferas de yeso microcristalino que aparecen perforadas en muchas ocasiones por estalactitas o excéntricas que crecen en su interior (Fig. 3I). También, aparecen algunas formaciones estalactitas cuyos ápices están constituidos por monocristales de yeso (Fig. 3J). Al final de esta sala aparece la primera masa de agua visible en la cavidad, un pequeño lago de 10 m<sup>2</sup> de superficie cuya temperatura ronda los 20,1°C y pH de 8,1. La temperatura del aire en esta sala durante la visita fue de 19,8°C y la concentración de CO<sub>2</sub> de 841 ppm.

El último sector de la cavidad corresponde a la Sala del Lago, con una superficie de 2000 m<sup>2</sup> y hasta 15 m de altura donde se ubica el lago de agua salobre que conecta la cavidad con el mar mediante un sifón submarino. Sobre las paredes de esta sala aparecen concreciones salinas a modo de costras y eflorescencias hasta la altura aproximada de 10 m sobre el nivel del lago.

## **Metodología**

### ***Descripción de los materiales***

Se tomaron 17 muestras para su análisis mineralógico y estudio microscópico. Cerca de la entrada de la cavidad, se tomó una muestra de concreciones salinas en planos de la roca encajante (Orón-01), otra de concreciones que aparecían expuestas sobre una pared (Orón-02; Fig. 3A) y una muestra de cristalizaciones a modo de "rosas del desierto" (Orón-03; Fig. 3B) que se encontraban ligeramente cubiertas por arena sobre una pared.

En el pasillo de entrada a la Sala de los Candelabros se tomó una muestra de microcristales de aspecto sacaroideo que aparecen a lo largo de planos de foliación (Orón-04; Fig. 3D), concreciones salinas precipitadas en planos de la roca (Orón-05; Fig. 3C) y otras a modo de costras de aspecto vítreo que recubren algunas zonas de las paredes (Orón-06; Fig. 3G). En esta zona también se tomaron muestras de la roca de caja, tanto de los materiales grises altamente foliados (Orón-07) como de los carbonatos rojizos (Orón-08). En planos de foliación de la roca se tomó una muestra de materiales arenizados de color amarillento (Orón-09). En la zona donde se encuentran los grandes cristaloides de yeso se tomaron muestras de la parte superior de los mismos donde aparecen concreciones blancas de aspecto microcristalino a modo de costras



(Orón-10; Fig. 3E), un fragmento de yeso de los candelabros (Orón-11; Fig. 3E) y una muestra del ápice de uno de ellos, constituida por un cilindro de material cristalino de aproximadamente 10 cm de longitud y 1 de diámetro (Orón-12; Fig. 3F).

En la Galería del Boxwork, se tomaron muestras de las láminas de *boxwork* (Orón-13; Fig. 3H) y de materiales blancos microcristalinos que lo recubren en algunas partes (Orón-14). En la Sala de las Excéntricas se muestrearon las semiesferas huecas del techo (Orón-15; Fig. 3I) y las estalactitas que aparecen en su interior (Orón-16; Fig. 3I), así como un monocristal desprendido de la punta de una estalactita, similar al de la Figura 3J (Orón-17).

### Metodología analítica

Los análisis mineralógicos mediante difracción de rayos X (DRX) se realizaron con un equipo Terra basado en la tecnología desarrollada por la NASA para el instrumento CheMin a bordo

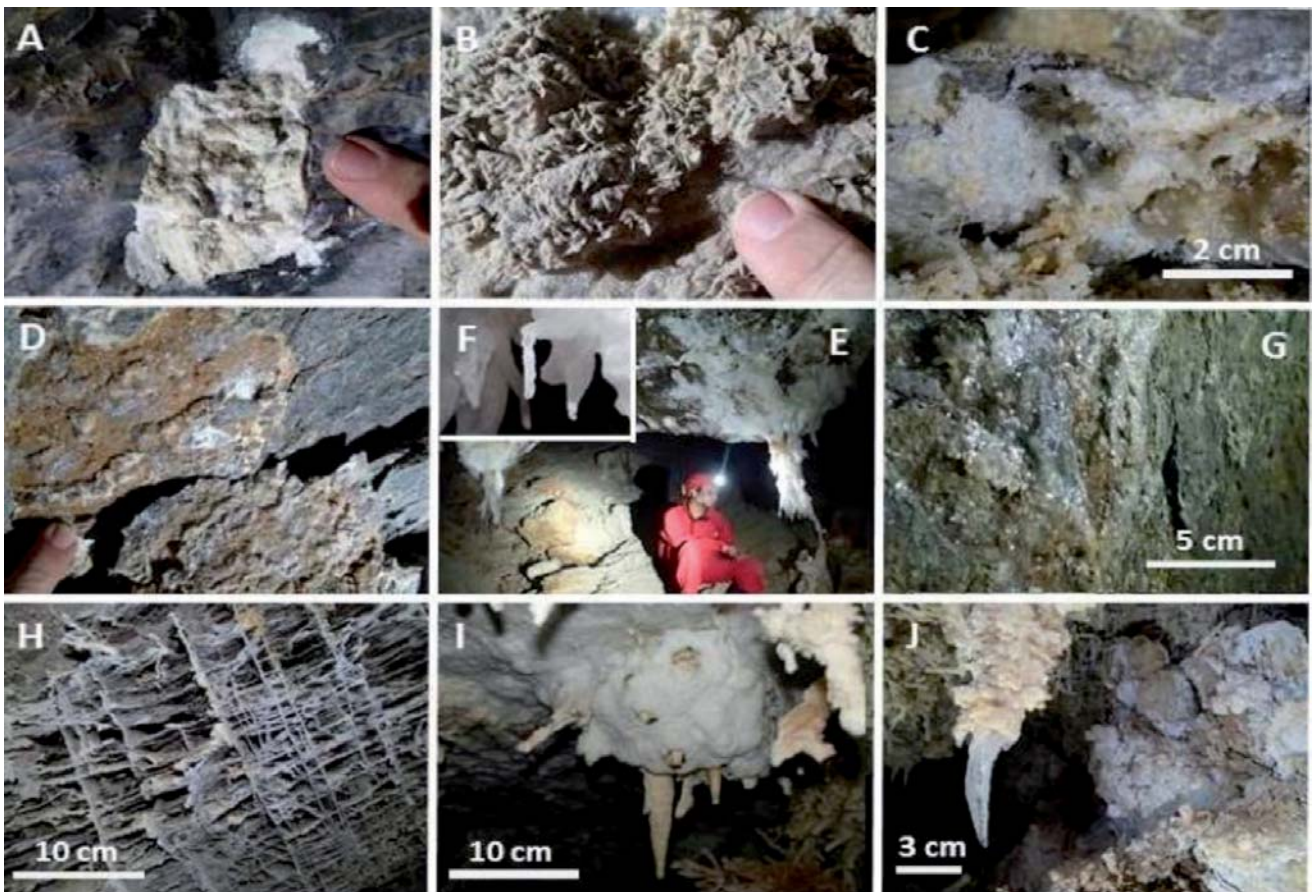


Figura 3. Espeleotemas de la Cueva del Orón: A. Concreción de yeso sobre la roca caja caliza; B. Rosas de yeso precipitadas en el interior de depósitos de arena; C. Concreciones salinas (yeso + halita) entre planos de la roca de caja; D. Concreciones de calcita sacaroidea a modo de rellenos precipitados en planos de la roca de caja; E. Espeleotemas de yeso con morfología de "candelabros" de yeso; F. Detalle de ápice de halita en un candelabro; G. Concreciones de sales a modo de costras sobre las paredes de la cueva; H. Boxwork constituido por láminas de dolomita; I. Semiesferas huecas de yeso perforadas por estalactitas y excéntricas de aragonito; J. Cristal de yeso en la parte apical de una estalactita de aragonito recubierta de concreciones carbonáticas

del rover Curiosity de la misión MSL, comercializado por inXitu, Inc. (California). Las muestras fueron molidas previamente al análisis e introducidas en una célula vibratoria. La radiación de rayos X procede de una fuente de Co (10 W). El equipo utiliza una CCD desarrollada por Andor y la muestra fue escaneada en el rango 5-55° del ángulo  $2\theta$ . La resolución de los difractogramas es de 0,3° del ángulo  $2\theta$ .

Para los análisis micro-Raman no se requirió de preparación de muestra. La fuente de excitación fue un láser Research Electro-Optics (REO) (632,8 nm) y el espectrómetro usado fue un Holospec f/1.8i de Kaiser Optical Systems (KOSI), que trabaja en el rango 0 a 3800  $\text{cm}^{-1}$ , con una resolución espectral de 5  $\text{cm}^{-1}$ . Se utilizó una CCD DV420A-OE-130 de Andor y un cabezal Raman KOSI MKII, HFPH-FC-S632.8 de Kaiser acoplado a una fibra óptica. El diámetro de los puntos analizados fue de 15  $\mu\text{m}$  y se realizaron mediante un microscopio Nikon Eclipse E600. La potencia del láser sobre la muestra fue de 15 mW a 50X. El tiempo de adquisición fue de 10 segundos y se hicieron 10 acumulaciones para cada espectro. Ambas técnicas mineralógicas se aplicaron en el Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Valladolid. Las microfotografías de microscopía electrónica de barrido (SEM, *Secondary Electron Microscopy*) se tomaron con un equipo HITACHI S-3500 en Área de Servicios Técnicos de la Universidad de Almería.

## Resultados

Los análisis mineralógicos por DRX y espectroscopia Raman indican que los materiales grisáceos muy fracturados en los que se desarrolla la cueva son calizas (Orón-07), mientras los materiales beige y rojizos que aparecen en algunas localizaciones (Orón-08), como por ejemplo en la Sala de los Candelabros, son dolomías con pequeñas cantidades de goethita (Tabla 1).

Muestra	Descripción	Mineralogía
Orón -01	Concreciones salinas en planos de la roca encajante	Halita, Yeso
Orón -02	Concreciones salinas microcristalinas a modo de costras	Yeso
Orón -03	Rosas del desierto de 2 cm de diámetro semienterradas en arena	Yeso
Orón -04	Concreciones a modo de rellenos con textura sacaroidea en plano de la calizas grisáceas	Calcita
Orón -05	Concreciones salinas en planos de las calizas grisáceas	Yeso, Halita
Orón -06	Concreciones salinas a modo de costras sobre la roca encajante	Yeso
Orón -07	Roca de caja grisácea	Calcita
Orón -08	Roca de caja rojiza	Dolomita, Goethita
Orón -09	Arenas amarillentas y blanquecinas en planos de la roca grisácea	Halita, Yeso, Cuarzo
Orón -10	Concreciones microcristalinas a modo de costras sobre los candelabros	Yeso



Orón -11	Monocristal candelabros	Yeso, Halita
Orón -12	Cilindro translucido procedente del ápices de candelabros	Halita
Orón -13	Láminas de <i>boxwork</i>	Dolomita, Cuarzo, Calcita
Orón -14	Concreciones microcristalinas blanquecinas sobre <i>boxwork</i>	Yeso
Orón -15	Semiesferas huecas de material microcristalino ( <i>blisters</i> )	Yeso
Orón -16	Estalactita interior en semiesfera huecas	Aragonito
Orón -17	Monocristal en punta de estalactita	Yeso

Tabla 1. Mineralogía de los espeleotemas y roca de caja de la Cueva del Orón-Arco.

El yeso aparece en forma de concreciones a modo de costras (Orón-02, Orón-06), en las rosas del desierto parcialmente enterradas en sedimentos arenosos (Orón-03) y rellenando planos de la roca encajante (Orón-01), que en algunos casos viene acompañado de halita (Orón-05 y Orón-09). Este mineral también aparecen en los grandes cristaloides de yeso de la Sala de los Candelabros (Orón-11) con ápices de halita (Orón-12), en las concreciones a modo de costra microcristalinas sobre los candelabros (Orón-10; Fig. 4A), en los monocristales que aparecen en la punta de algunas estalactitas de la Sala de las Excéntricas (Orón-17) y en las semiesferas huecas o *blisters* (Orón-15) perforadas por estalactitas y excéntricas de aragonito (Orón-16). Pequeñas cantidades de halita se encuentran incrustadas en la superficie de los grandes cristaloides de yeso, como se ha podido observar en las imágenes microscópicas (Fig. 4C).

En los planos de la roca encajante aparecen concreciones a modo de rellenos de cristales milimétricos de calcita de color acaramelado y textura sacaroidea (Orón-04) con hábito romboédrico trigonal (Fig. 4B). Las láminas del *boxwork* (Orón-13) están constituidas por dolomita y cantidades minoritarias de cuarzo y calcita. Sobre la superficie se observan cristales de dolomita formando cadenas (Fig. 4D). Estas láminas aparecen cubiertas de yeso en algunos casos (Orón-14). Cabe destacar que la presencia de calcita espeleotémica en esta cavidad es muy reducida si se compara con la presencia de aragonito y dolomita.

## Discusión

### *Evidencias de meteorización por precipitación de sales de origen marino*

La Cueva del Orón-Arco muestra evidencias morfológicas y mineralógicas que apuntan a un origen no relacionado con procesos convencionales de disolución de la roca carbonática debido a flujos de agua subsaturados en carbonato cálcico. En ninguna localización de la cueva se han observado superficies de disolución originadas por flujos de agua subterráneos como pudieran ser canales en suelos o techos, u otras morfologías freáticas como *scallops* o conductos meandriformes (Palmer, 2007). Por otro lado, tampoco aparecen depósitos de materiales detríticos clasificados ni sedimentos arcillosos en ningún nivel de la cavidad, los cuales podrían ser indicadores de eventos de avenidas ocurridos en el pasado (Gázquez et al., 2014). Estos

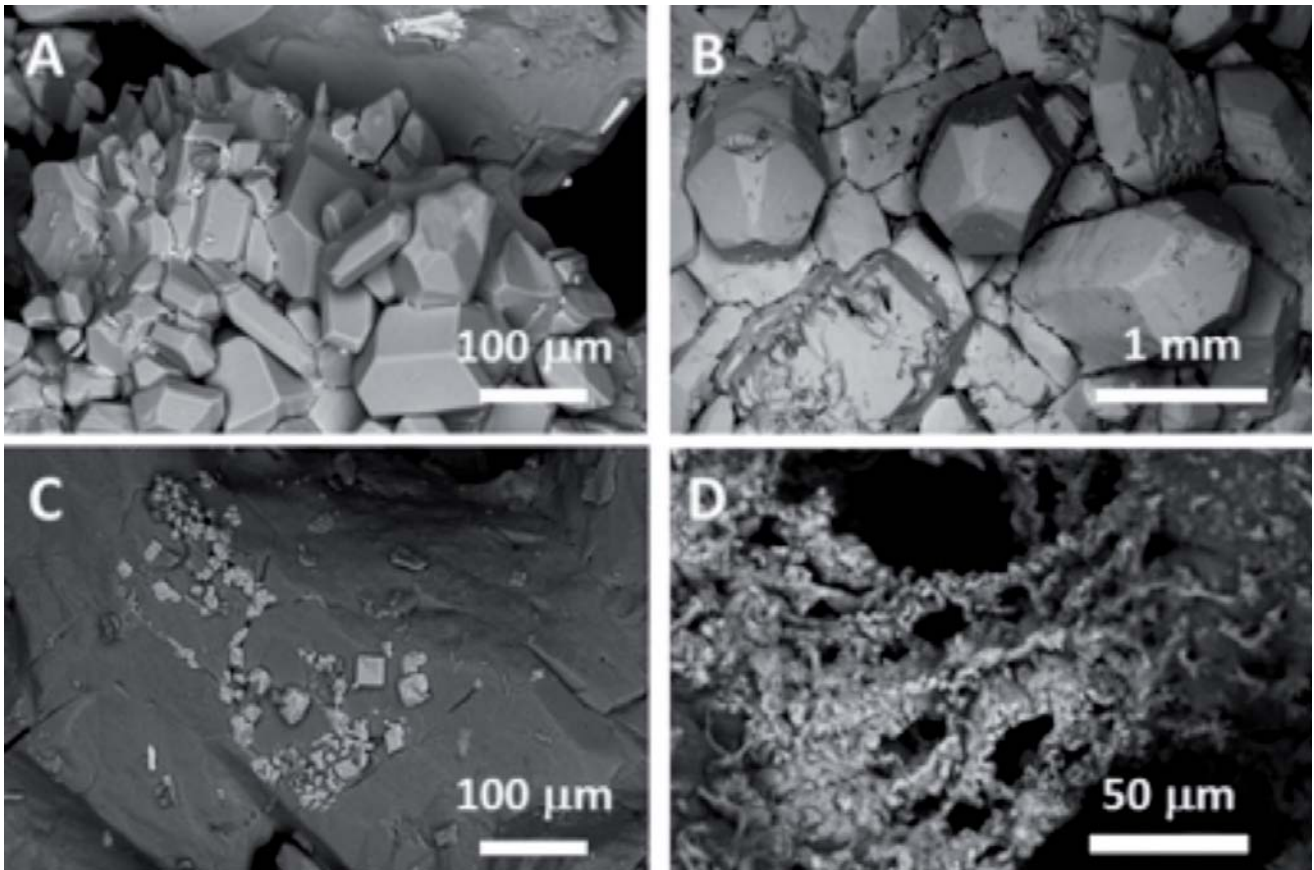


Figura 4. Imágenes de microscopio electrónico de barrido (SEM) de espeleotemas de la Cueva del Orón-Arco. A. Yeso microcristalino sobre los cristaloides de yeso de la Sala de los Candelabros (Orón-10); B. Cristales de calcita sacaroidea en planos de la roca caliza (Orón-04); C. Cristales de halita precipitados sobre monocristales de yeso (Orón-11); D. Microcristales de dolomita a modo de cadena cuya precipitación podría haber estado ligada a la actividad bacteriana (Orón-13)

hechos unidos a que las únicas masas de agua que se pueden observar son dos lagos de agua salobre a nivel del mar, sugieren que la cueva, al menos en sus etapas genéticas más recientes, ha tenido una evolución prácticamente desconectada de los procesos de infiltración de agua meteórica o a mecanismos de disolución freática relacionados con la interface agua dulce-agua salada. Además, la baja concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmosfera subterránea (500-850 ppm) sugiere que los aportes de agua de infiltración procedente del suelo, que suele aportar  $\text{CO}_2$  a la atmosfera de la cueva, son de escasa importancia en la actualidad.

La cueva se desarrolla en una fractura paralela a la línea de costa en dirección NO-SE. El movimiento relativo de los compartimentos dio lugar un área de cizalla que condicionó el desarrollo de los pasajes principales de la cavidad. Los esfuerzos mecánicos generaron una zona de debilidad de los materiales que en algunos casos pudo llevar a la aparición de oquedades. Este mecanismo estuvo acompañado de otro de meteorización química/mecánica derivada del ascenso capilar de agua de mar a través de los materiales carbonáticos de la roca encajante y que aún hoy en día parece seguir activo. Mediante este proceso, la disolución se evapora al alcanzar la cavidad debido probablemente a la baja humedad relativa de su atmósfera y da lugar a la precipitación de concreciones de yeso y halita. El aumento de volumen genera presiones

en poros y fracturas produciendo el lajamiento de la roca y desprendimiento de lascas que se acumulan en depósitos de hasta 5 m de altura apoyados sobre las paredes de la cavidad. Este mecanismo se da a distintas escalas, como revela el distinto tamaño de los fragmentos de roca desprendido, que va desde tamaño arena como se ha observado en paredes de la Sala de los Candelabros hasta fragmentos de varios decímetros (Fig. 2C y D). Este proceso se observa en todo los niveles de la cueva, por ejemplo en las salas y galerías más cercanas al nivel del mar donde aparecen concreciones salinas blanquecinas sobre las paredes (Fig. 2 E y F). En ocasiones, se han observado concreciones de calcita a modo de rellenos en planos de la roca de caja (Fig. 3D) que también podrían estar relacionadas con el proceso de ascenso de agua de mar o más probablemente con la precipitación de carbonatos a modo de rellenos en fases anteriores a la formación de la cueva.

Hasta donde llega nuestro conocimiento, este mecanismo espeleogenético debido casi principalmente a la meteorización de la roca de caja producida por la precipitación de sales no ha sido descrito previamente en otras cavidades. Sin embargo, procesos similares se pueden observar en otros entornos. Por ejemplo, el ascenso capilar de agua del subsuelo que puede desplazarse decenas de metros a través de los poros de la roca, genera importantes problemas de conservación en monumentos debido a la precipitación de sales (yeso, sulfatos de magnesio y nitratos) y desagregación del material original (Gázquez et al., 2015). Los mecanismos de disolución por agua de mar también podrían haber jugado un papel importante en las primeras etapas de formación de la cueva, sin embargo las morfologías que se observan en su interior en la actualidad son claramente indicativas del mecanismo de meteorización expuesto anteriormente.

### ***Espeleotemas singulares***

Cristaloides de yeso (candelabros o *chandeliers*)

La conocida como Sala de los Candelabros alberga un tipo de espeleotemas extremadamente raros, constituidos por cristaloides de yeso de gran pureza y transparencia que se agrupan en forma de penachos (Fig. 3E). A este tipo de espeleotemas se le conoce como "candelabros" (*chandeliers*) y los ejemplos más espectaculares conocidos hasta la fecha se han descrito en la cueva de Lechuguilla (Nuevo México, EEUU) (Davis, 2000). Los espeleotemas de la Cueva del Orón-Arco son la primera ocurrencia de este tipo de formación descrita en cavidades españolas, y probablemente la primera en Europa.

El origen de estos espeleotemas en la Cueva del Orón-Arco se debe a la infiltración de agua de mar, rica en  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , y su evaporación en el interior de la cavidad. La precipitación fraccionada de sales a partir de agua de mar produce primero las sales menos solubles (carbonatos) y posteriormente yeso, halita y finalmente sulfatos de magnesio y sodio. La fina lámina de agua que en el pasado circuló sobre los cristales de yeso, alcanzó en algunos momentos la saturación en halita, como se desprende de la presencia de cristales cúbicos de este mineral incrustados sobre la superficie y los "macarrones" de sal que aparecen en la punta de algunos cristales. La presencia de este mineral, altamente soluble, indica que durante su formación

la humedad relativa en la cueva fue muy baja y que esta sequedad se ha mantenido hasta el presente, lo que evita su disolución por proceso de condensación.

### *Boxwork* dolomíticos

Las formaciones tipo *boxwork* son estructuras generadas por la disolución diferencial de la roca de caja frente a venas de mineral más resistentes, precipitadas en fracturas de la roca caliza durante etapas anteriores. Por lo general, la disolución se produce en condiciones subaéreas, mediante procesos de condensación (Gázquez *et al.*, 2012). En la Cueva del Orón-Arco, las láminas resistentes del *boxwork* están constituidas por dolomita (Fig. 4D). En este caso, la disolución de la roca caliza por procesos de condensación es poco probable, debido a la baja humedad relativa del aire de la cueva, lo cual unido a la presencia de concreciones de yeso a modo de costras sobre las láminas de dolomita nos hace pensar que la desaparición de los "moldes" de caliza se debió a la disgregación producida por la cristalización de yeso en sus poros. De este modo, las láminas de dolomita quedaron expuestas perpendicularmente a las paredes de la cueva. Sobre las láminas aparecen microcristales (~1mm) a modo de cadenas, cuya morfología podría estar relacionada con la actividad de bacterias y sustancias segregadas por las mismas, aunque para confirmar esta hipótesis se requerirán de estudios adicionales.

### Semiesferas huecas de yeso *blisters*

En la Sala de las Excéntricas aparecen semiesferas huecas de yeso de entre 10 y 25 cm de diámetro, que en muchas ocasiones están perforadas por excéntricas o estalactitas de carbonato cálcico. Cabe destacar que la lámina de yeso (1-2 cm de grosos) raramente entra en contacto con la estalactita carbonática, sino que existe una cámara de aire que las separa. Hasta donde llega nuestro conocimiento, este tipo de espeleotemas, también conocidos como *blisters*, había sido identificado solamente en la Cueva Cupp-Coutunn en Turkmenistán, aunque en este caso la fuente de sulfatos es la oxidación de pirita ( $Fe_2S$ ). En la Cueva del Orón-Arco, al igual que en el caso de otros espeleotemas, la evaporación de agua de mar dio lugar a la sobresaturación en yeso para formar estas semiesferas. Aunque el origen de estos espeleotemas es todavía una incógnita, podría estar relacionado con los pequeños gradientes de humedad entre la superficie de la estalactita central y la semiesfera de yeso.

## Conclusiones

La génesis de la Cueva del Orón-Arco está ligada a la actividad de una falla paralela a la línea de costa, y a un proceso poco convencional de infiltración y ascenso capilar de agua de mar que da lugar a la cristalización de sales (yeso y halita) cuando ésta se evapora en el interior de la cavidad. La presión ejercida por los minerales secundarios en los planos de la roca da lugar a su meteorización, disgregación, y con el paso del tiempo ha conllevado la aparición de grandes salas. Este proceso de ascenso capilar de agua de mar también ha generado algunos de sus extraordinarios espeleotemas. La Cueva del Orón-Arco constituye un caso único y nuevo para la ciencia de este tipo de mecanismos espeleogenéticos y de formación de espeleotemas.



## Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los espeleólogos que han colaborado en las labores de exploración de esta cavidad durante los últimos 20 años. Agradecemos a la D<sup>a</sup> Esmeralda Urea (Área de Servicios Técnicos, Universidad de Almería) su ayuda durante los análisis de microscopía electrónica. Los análisis realizados en este trabajo han sido financiados por los fondos del Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería y los del Departamento de Física de la Materia Condensada, Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Valladolid. La exploración de la cavidad ha estado patrocinada por RODCLE®.

## Referencias

- Audra, Ph. y Palmer, A. 2015. Research frontiers in speleogenesis. Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. *Acta Carsologica*, 44(3), 315-348.
- Davis, D.G. 2000. Extraordinary features of Lechuguilla Cave, Guadalupe Mountains. *Journal of Cave and Karst Studies*, 62, 147-157.
- García-Tortosa, F.J., López-Garrido, A. y Sanz de Galdeano, C. 2000. Las unidades de Cabo Tiñoso y Peñas Blancas: Revisión y caracterización estratigráfica de las unidades alpujárrides del sector entre Mazarrón y Cartagena (Murcia, España). *Estudios Geológicos*, 56, 31-40.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M. y Rull, F. 2012. Boxwork and ferromanganese coatings in hypogenic caves: an example from Sima de la Higuera Cave (Murcia, SE Spain). *Geomorphology*, 177-178, 158-166.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Forti, P., Stoll, H., Ghaleb, B. y Delgado-Huertas, A. 2014. Paleoflood events recorded by speleothems in caves. *Earth Surface Process and Landforms*, 39, 1345-1353.
- Gázquez, F., Rull, F., Medina, J., Sanz-Arranz, A. Sanz, C. 2015. Linking groundwater pollution to the decay of 15th-century sculptures in Burgos Cathedral (northern Spain). *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 15677-15689.
- Ginés, A. y Ginés, J. 2007. Eogenetic karst, glacioeustatic cave pools and anchialine environments on Mallorca Island: a discussion of coastal speleogenesis. *International Journal of Speleology*, 36, 57-67.
- Gordillo, A., Espinosa, J., Martín, J.M. y Pérez, A. 1972. Mapa Geológico Cartagena. 1:50.000. IGME.
- Llamusi, J.L., Ingles, S., Ros, A., Rodríguez, A. y Pérez, C. 1990. Cavidades Submarinas del Cabo Tiñoso (Cartagena). *Revista Caliza*, 1, 24.
- Moore, D.G. 1954. Origin and development of sea caves. *National Speleological Society Bulletin*, 16, 71-76.
- Myroie J.R y Myroie, J.E. 2007. Development of the carbonate island karst model. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1), 59-75.
- Palmer A.N., 2007. *Cave geology*. Cave Books, Dayton, 453 p.
- Puch. C. 1998. *Grandes cuevas y simas de España*, Barcelona pp. 781-782.

Cuezva, S. *et al.* Investigación aplicada a la conservación preventiva del sistema kárstico de La Garma (Omoño, Ribamontán al Monte, Cantabria). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 307-318.

## Investigación aplicada a la conservación preventiva del sistema kárstico de La Garma (Omoño, Ribamontán al Monte, Cantabria)

S. Cuezva <sup>(1,6)</sup>, A. Fernández-Cortés <sup>(2)</sup>, V. Jurado <sup>(3)</sup>, C. Saiz-Jimenez <sup>(3)</sup>, R. Ontañón <sup>(4, 5)</sup>, P. Arias <sup>(5)</sup>, I. Hernandez-Vicente <sup>(6)</sup> y S. Sánchez-Moral <sup>(6)</sup>

(1) Geomnia Natural Resources SLNE, Madrid,  
scuezva@geomnia.es

(2) Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería

(3) Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. IRNAS-CSIC (Sevilla)

(4) Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria, Santander

(5) Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de Cantabria, UC, Santander

(6) Museo Nacional de Ciencias Naturales, MNCN-CSIC. Madrid

---

### RESUMEN

La zona arqueológica de la Garma (Cantabria) forma parte de un gran complejo kárstico activo con varios niveles de galerías de desarrollo horizontal interconectados por conductos verticales. La Garma alberga un conjunto arqueológico excepcional que incluye un magnífico conjunto de arte parietal y suelos paleolíticos en un asombroso estado de conservación, así como valiosísimas evidencias del comportamiento simbólico de los cazadores-recolectores del Pleistoceno. Sus valores patrimoniales le han hecho merecedora de ser incluida en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO en el año 2008. La conservación de este enclave es en todo momento prioritaria y recientemente se ha puesto en marcha un programa de conservación preventiva que tiene como objetivo fundamental el conocimiento del ecosistema subterráneo y del impacto de la presencia humana en el medio subterráneo, a los efectos tanto de la propia gestión e investigación de la cavidad como ante una eventual apertura al público en condiciones de máxima seguridad. El funcionamiento de un sistema kárstico subterráneo como el de La Garma, con varios niveles de desarrollo y conectado directamente con el nivel freático activo, implica un complejo movimiento de materia (agua, masas de aire y aerosoles) y energía. Para alcanzar un adecuado conocimiento de su dinámica ambiental, desde febrero de 2015 se está llevando a cabo un estudio multidisciplinar mediante el empleo de metodologías específicas para cada interfase involucrada: microclima (cavidad en tres niveles internos del karst y atmósfera externa), hidroquímica (agua de infiltración y condensación), geoquímica isotópica (aire, suelo) y contaminación microbiológica (aire, suelo, roca). Los primeros datos muestran cambios estacionales muy marcados en el patrón de ventilación general de la cavidad, con mayor tasa de renovación de aire en la época invernal, y una estabilidad ambiental muy diferenciada entre zonas, con algunos sectores aislados del régimen general de circulación natural del aire.

**Palabras clave:** conjunto arqueológico, conservación, La Garma, microbiología, microclima.

### ***Research applied to the conservation preventive of the system Karst of the Garma (Omoño, Ribamontán to the Monte, Cantabria)***

#### **ABSTRACT**

*The archaeological site of the Garma (Cantabria) is part of an active karst system with several levels of galleries inter-connected by vertical shafts. La Garma houses an exceptional archaeological heritage that includes magnificent exam-*

*ples of Palaeolithic cave art and settlement floors in an amazing state of preservation, as well as valuable evidence of symbolic behavior of Pleistocene hunter-gatherers. Its heritage values have made it worthy of their inclusion on the World Heritage List of UNESCO in 2008. The conservation of this site is a priority and it has been recently launched a program of preventive conservation. The main objective of this project is to achieve a better knowledge of the underground ecosystem and the impact of human presence in the underground microenvironment, both for purposes of sound management and research of the cavity as well as for a hypothetical opening to the public in the future. The underground karst system of La Garma, with various levels of galleries and directly connected with active water table, involves a complex movement of matter (water, air masses and aerosols) and energy. To achieve an adequate knowledge of environmental dynamics, our research group is conducting a multidisciplinary study since February 2015 by employing specific methodologies for each interface involved: microclimate (cavity in three internal levels of karst and external atmosphere), hydrochemical (water infiltration and condensation), isotope geochemistry (air, soil) and microbiological contamination (air, soil, rock). Early data show very marked seasonal changes in the general ventilation pattern of the cavity (air renewal in winter) and areas with different microenvironmental stability, including sectors with a greater degree of isolation from the regime of general circulation of air in the cavity.*

**Key words:** archaeological site, conservation, La Garma, microbiology, microclimate.

## Introducción

La cueva de La Garma, situada en la localidad de Omoño, municipio de Ribamontán al Monte (Cantabria), se abre en la ladera meridional del monte de La Garma, constituido por materiales calcáreos del techo del Cretácico inferior (Aptiense-Albiense) en una zona de contacto entre la Formación Ramales (calizas con rudistas y corales) y la Formación Bielva (Figura 1). Este monte actúa como límite septentrional de un valle de fondo plano (polje) de dirección NE-SW cuyo desarrollo muestra un claro control estructural con procesos geomorfológicos muy activos y es actualmente drenado por el Río Pontones.

El complejo kárstico del monte de La Garma (Arias *et al.*, 2000) presenta varios niveles de desarrollo horizontal con galerías en siete niveles conocidos de los cuales son fácilmente accesibles cuatro pisos (Figura 2):

- Nivel basal: a una cota de 30-35 m ligeramente por encima del fondo del polje. Por él circula el agua a lo largo de todo el año con caudal escaso a moderado, surgiendo al exterior por la zona de "Fuente en Cueva". Actualmente se encuentra en fase de exploración espeleológica y arqueológica.
- Galería Inferior: desarrollada 25 metros por encima del nivel basal, es la que presenta el tramo accesible más largo y la que ha experimentado etapas de intensa ocupación que han dejado un excepcional registro arqueológico encontrado en 1995, con la particularidad de haberse mantenido prácticamente intacto (Ontañón, 2003; Arias, 2009). Esta Galería tuvo un acceso directo al exterior, en la actualidad bloqueado por materiales detríticos probablemente procedentes del deslizamiento de una masa de roca, suelo y sedimentos a favor de la ladera. En la actualidad se estudia con detalle y mediante técnicas arqueológicas que intentan intervenir y modificar el yacimiento lo mínimo posible (Arias y Ontañón, 2014).
- Galería Intermedia: 10-12 metros por encima de la inferior. En ella se han encontrado numerosas oseras y al final de la Galería aparecen series de duscos rojos de edad paleolítica. Su conexión directa con el exterior debe estar relacionada con la Garma B, una pequeña

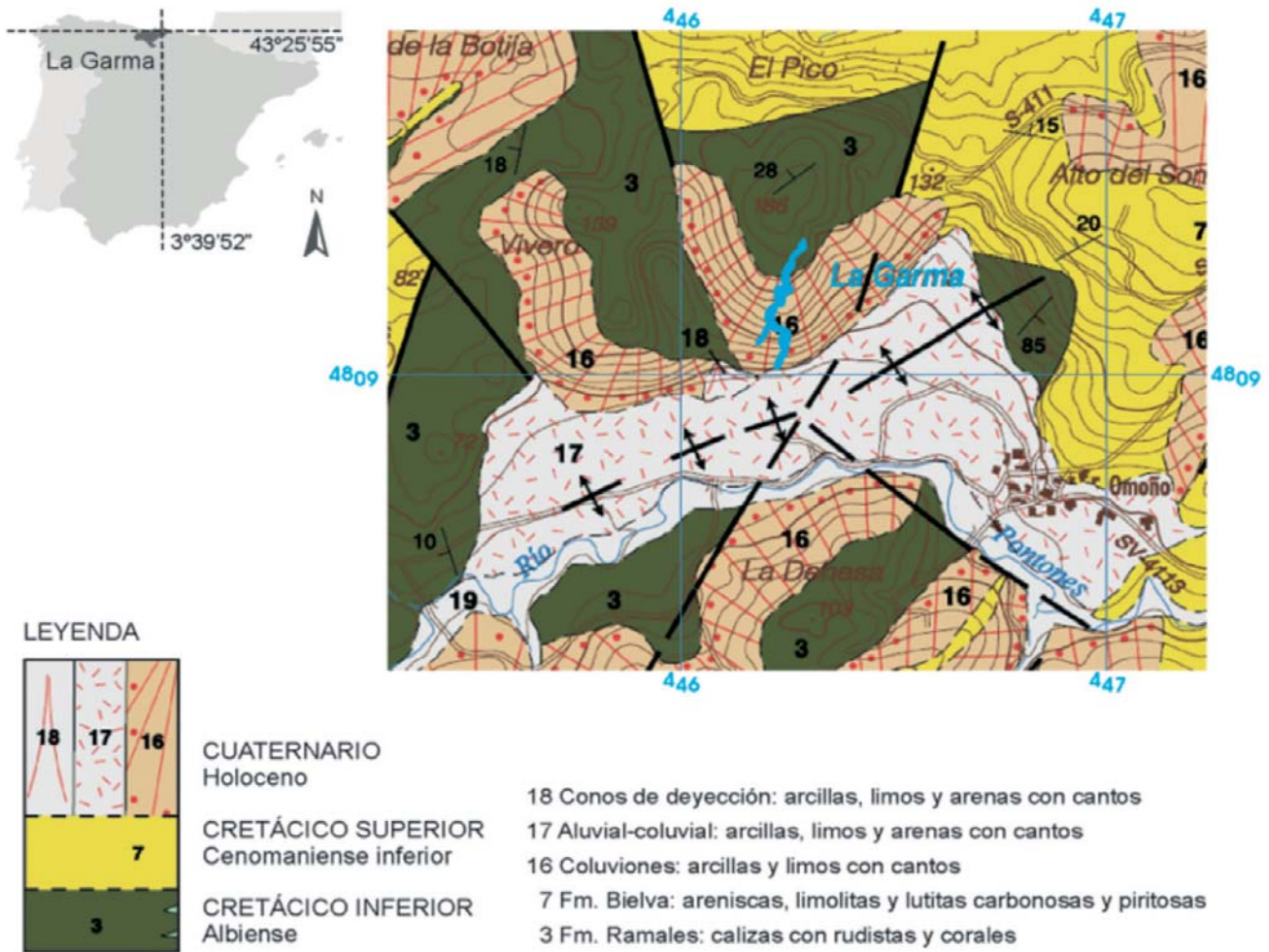


Figura 1. Localización geográfica y contexto geológico de La Garma (extraído y modificado del Mapa Geológico de España, Escala 1:25 000, Hoja 35-II, 2008, IGME)

cavidad separada de la Galería Intermedia principal por el desarrollo de grandes coladas estalagmíticas.

- Galería superior: 12-13 metros por encima de la Galería intermedia, La Garma A es el nivel de acceso transitable actual a la cavidad. En la zona externa más próxima de entrada se encuentra un yacimiento arqueológico con un amplio registro que se inicia en el Paleolítico Inferior.

La preservación de este Complejo Arqueológico de excepcionales características de conservación ha sido prioritaria desde su descubrimiento en 1995, con un control exhaustivo del acceso a la cavidad y un planteamiento del proyecto de investigación arqueológico con la premisa de mantener al conjunto en condiciones lo más similares posibles al estado original (Arias *et al.*, 2000). Desde ese momento del descubrimiento cada entrada al sistema kárstico es controlada y registrada.

Recientemente, en 2015, se ha puesto en marcha un programa de conservación preventiva que tiene como objetivo fundamental el conocimiento del ecosistema subterráneo y del im-



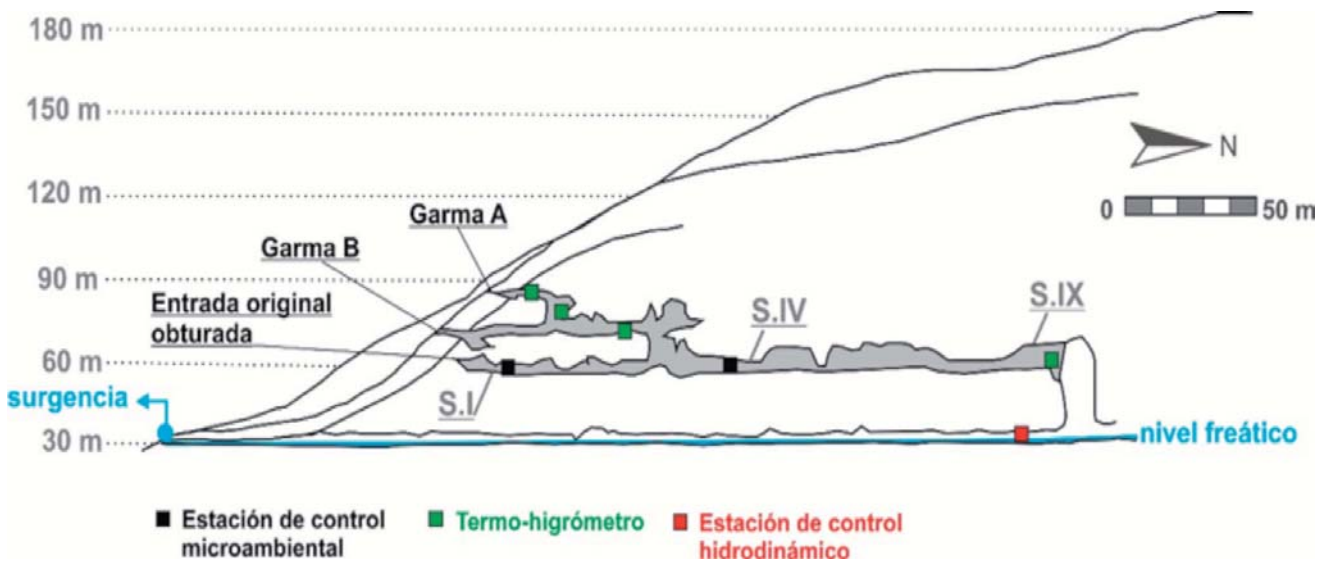


Figura 2. Sección del monte de la Garma (Cantabria), con la situación de los diferentes niveles del Sistema Kárstico y la localización de los equipos de monitorización ambiental (modificado de Arias et al., 2000)

pacto de la presencia humana en el medio subterráneo, a efecto tanto de la propia gestión e investigación de la cavidad como en relación a una eventual y potencial apertura al público en condiciones de máxima seguridad. Para alcanzar un adecuado conocimiento de su dinámica ambiental se está llevando a cabo un estudio multidisciplinar en el que los aspectos principales a estudiar son: el microclima (cavidad en tres niveles internos del karst y atmósfera externa), la hidroquímica (agua de infiltración y condensación) y la colonización microbiológica (aire, suelo, roca).

En este trabajo se presenta el plan de trabajo para la monitorización microambiental de la cavidad y un avance de los primeros resultados obtenidos.

### Instrumentación de control ambiental y metodología analítica

El funcionamiento de un sistema kárstico subterráneo como el de La Garma, de grandes dimensiones, varios niveles de desarrollo y conectado directamente con el nivel freático activo, implica un diseño especial de los equipos de control ambiental. El desarrollo del proceso de karstificación ha tenido un condicionante fundamental en el sistema de fracturación de los materiales cretácicos que ha dado lugar a un fuerte progreso de la disolución a favor de fracturas subverticales con dirección preferente NNE-SSW. Es en esta dirección en la que se desarrolla la Galería inferior, con unos 300 metros de recorrido transitable. Teniendo en cuenta que las manifestaciones más relevantes del conjunto arqueológico se encuentran en la Galería inferior, se ha priorizado este nivel en la distribución espacial de los equipos de control ambiental (Figura 2), de por si complejo ya que presenta una sección horizontal y vertical variable en la que los techos pueden alcanzar decenas de metros de altura.

Tras la fase de montaje y puesta a punto del instrumental de control microambiental en los laboratorios del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC), el 15 de abril de 2015 se

llevó a cabo la campaña de instalación de los equipos definitivos de monitorización ambiental en el interior y exterior de la cavidad. La distribución espacial de las estaciones de control microambiental en el interior del sistema kárstico y el diseño de cada estación se ha realizado en base a los elementos singulares presentes en cada sector del espacio subterráneo, presentando especial atención a la geomorfología de las galerías y a la distancia a las zonas de conexión entre galerías y con el exterior.

**Galería inferior:** en esta galería se lleva a cabo una caracterización del microclima subterráneo mediante el control en continuo de los parámetros ambientales críticos en dos puntos específicos de la Galería Inferior (Figura 2): 1) Sector I, la zona más próxima a la entrada original de la cueva (actualmente obturada); 2) Sector IV, el área central de la Galería inferior frente a uno de los paneles de pinturas más destacados. Ambas estaciones están constituidas por los siguientes elementos (Figura 3):

- 1 *Data Logger* en maletín estanco
- 1 Sensor de CO<sub>2</sub> aire
- 1 Sonda de T/HR aire
- 2 Sensores de T aire para perfil vertical
- 1 Barómetro
- 1 anemómetro ultrasónico
- 1 Sensor de <sup>222</sup>Rn aire
- 2 Registradores autónomos de temperatura de alta precisión (0,002 °C)

Además, en el Sector IV, se procedió a la instalación de un contador óptico de partículas en suspensión con registro de cinco intervalos de tamaño de partícula (en un rango de 0,3 a 10 µm) para diferenciar los mecanismos de ventilación del aire (advección vs difusión) y detectar y evaluar el impacto de la presencia y paso de visitantes por esa zona.

En los sectores I, IV y IX se lleva a cabo una medición estacional de la concentración de Radón con detectores pasivos de estado sólido de tipo abierto (SSNTDs) "LR-115". Los detectores son cambiados cada dos meses y el análisis de los dosímetros se lleva a cabo por el laboratorio de "DOSIRAD SARL" en Francia.

**Galería intermedia con la Galería inferior:** se han instalado dos micro-registradores de Temperatura y Humedad Relativa, uno en cada zona de conexión con la Galería Inferior y la Superior.

**Galería superior:** próximo a la entrada actual se instaló un micro-registrador autónomo para el control de Temperatura y Humedad Relativa del aire en la zona de vestíbulo usada normalmente para el cambio de calzado y ropas antes del acceso a los niveles inferiores.

La frecuencia de medición y registro de cada parámetro ambiental se ha seleccionado específicamente para optimizar los recursos de memoria y autonomía de las estaciones (15 minutos), aumentando la resolución temporal de los registros a 2 minutos en aquellas sondas de

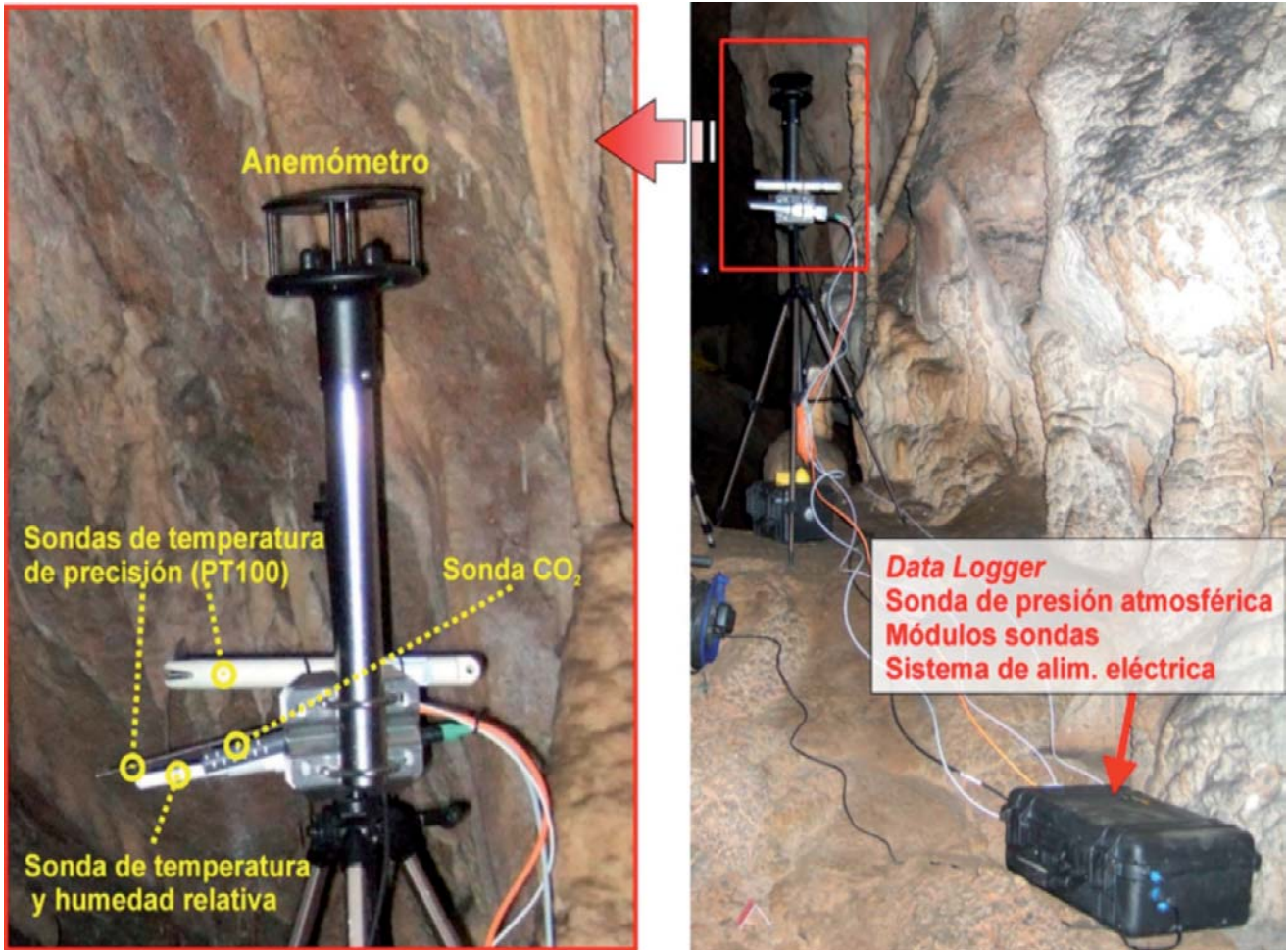


Figura 3. Vista de la estación de control ambiental situada en el Sector IV. Componentes: data logger, sistema de alimentación (batería y cargador) y sondas paramétricas con conexiones externas

control microclimático básicas (temperatura, humedad relativa y concentración de  $\text{CO}_2$ ) y en las épocas de mayor presencia de investigadores con objeto de detectar cambios microambientales provocados por la presencia de grupos de visitantes.

En cada campaña de campo bimestral para la descarga de datos y supervisión y calibración de los equipos de monitorización, se realiza una toma de muestras de aire de la atmósfera exterior, del suelo externo y de la atmósfera interna de la cavidad, completando en el interior una red de 11 puntos que incluye las localizaciones donde están instaladas las dos estaciones interiores de control ambiental en continuo y todos los puntos con microregistradores de T y HR. Para el muestreo discreto de aire se utiliza instrumental específico consistente en bombas, con un caudal a presión atmosférica de 1 a 3 l/min, que conducen el aire hasta un sistema de almacenaje hermético de aire (Tedlar), exclusivo para muestreo de gases trazadores. El análisis de la concentración de  $\text{CO}_2$  del aire y de la señal isotópica del carbono contenido en el  $\text{CO}_2$ , así como de otros gases trazadores como el metano ( $\text{CH}_4$ ), se lleva a cabo en los laboratorios del Departamento de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC) utilizando un espectrómetro de alta resolución para medida isotópica del  $\text{CO}_2$  ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ), modelo G2201-i de Picarro.

## **Primeros resultados provisionales**

Los primeros datos muestran cambios estacionales muy marcados en el patrón de ventilación general de la cavidad. Las características de esta cavidad con varios niveles conectados entre sí por simas verticales y con un acceso abierto actualmente por el nivel superior, favorece una mayor tasa de renovación de aire en la época invernal y una estabilidad ambiental variable entre diferentes sectores con algunas zonas más aisladas del régimen general de circulación natural del aire. Estas diferencias espaciotemporales quedan muy bien reflejadas en la figura 4 donde se muestra la distribución espacial de los valores de la concentración de metano (CH<sub>4</sub>) como indicador del grado de conexión del ambiente subterráneo con la atmósfera exterior (Fernández-Cortés *et al.*, 2015).

### ***Régimen invernal***

En el ciclo anual monitorizado (abril 2015 – mayo 2016) la cavidad muestra la mayor tasa de intercambio de aire con el exterior durante la época invernal. Desde noviembre hasta abril, el aire exterior más frío y denso que el aire subterráneo penetra en la cavidad por los niveles superiores. En la Galería Inferior esta entrada de aire frío afecta primero al Sector IV y luego avanza progresivamente hacia el resto de ese nivel kárstico. Ese fenómeno puede verse claramente en la distribución espacial de la temperatura del aire en febrero de 2016 (Figura 4), en la que se detectan las temperaturas más frías en la zona de conexión de la Galería inferior con la Intermedia, coincidiendo con el aumento de la concentración de CH<sub>4</sub> observado en esa zona en la misma estación (Figura 4).

Durante esta etapa invernal, en el Sector IV se establece un régimen microclimático con marcadas oscilaciones térmicas a escala semanal e incluso diaria, del orden de 0,3-0,6 °C que provocan un descenso térmico hasta los 10,8 °C en marzo. La humedad relativa también presenta fuertes oscilaciones durante este periodo, en rangos de 86 a 95 %. Estas oscilaciones van acompañadas de un movimiento del aire relativamente intenso y estable con pulsos que llegan a alcanzar velocidades de hasta 0,16 m/s, que se traducen en incrementos naturales de las partículas en suspensión en el aire. En cuanto a la concentración de gases, durante el invierno se registran los valores mínimos de concentración de CO<sub>2</sub> en torno a 450 ppm, muy próximos a los de la atmósfera externa, observándose sin embargo incrementos de CO<sub>2</sub> a escala semanal de entre 200-700 ppm. El patrón para el radón es muy similar, con valores mínimos en este sector del orden de 50-100 Bq/m<sup>3</sup>, e incrementos semanales que llegan a alcanzar los 3500 Bq/m<sup>3</sup>.

Por su parte, el Sector I es una zona relativamente aislada del régimen de circulación del aire que conecta los niveles superiores con la Galería Inferior. A pesar de estar más próximo al exterior su situación geomorfológica le confiere una mayor estabilidad térmica, con valores que oscilan de 13,0 °C de mínima registrados en mayo de 2015 a 13,2 °C de máxima en enero de 2016. Esta mayor estabilidad se traduce también en una mayor fragilidad ambiental. En este sector, de enero a abril de 2016 la tendencia térmica es descendente y relativamente irregular con episodios de descensos más marcados, del orden de 0,1 °C, de carácter semanal y con leves oscilaciones entre el 98-99 %. La concentración de CO<sub>2</sub> y <sup>222</sup>Rn en aire en el sector



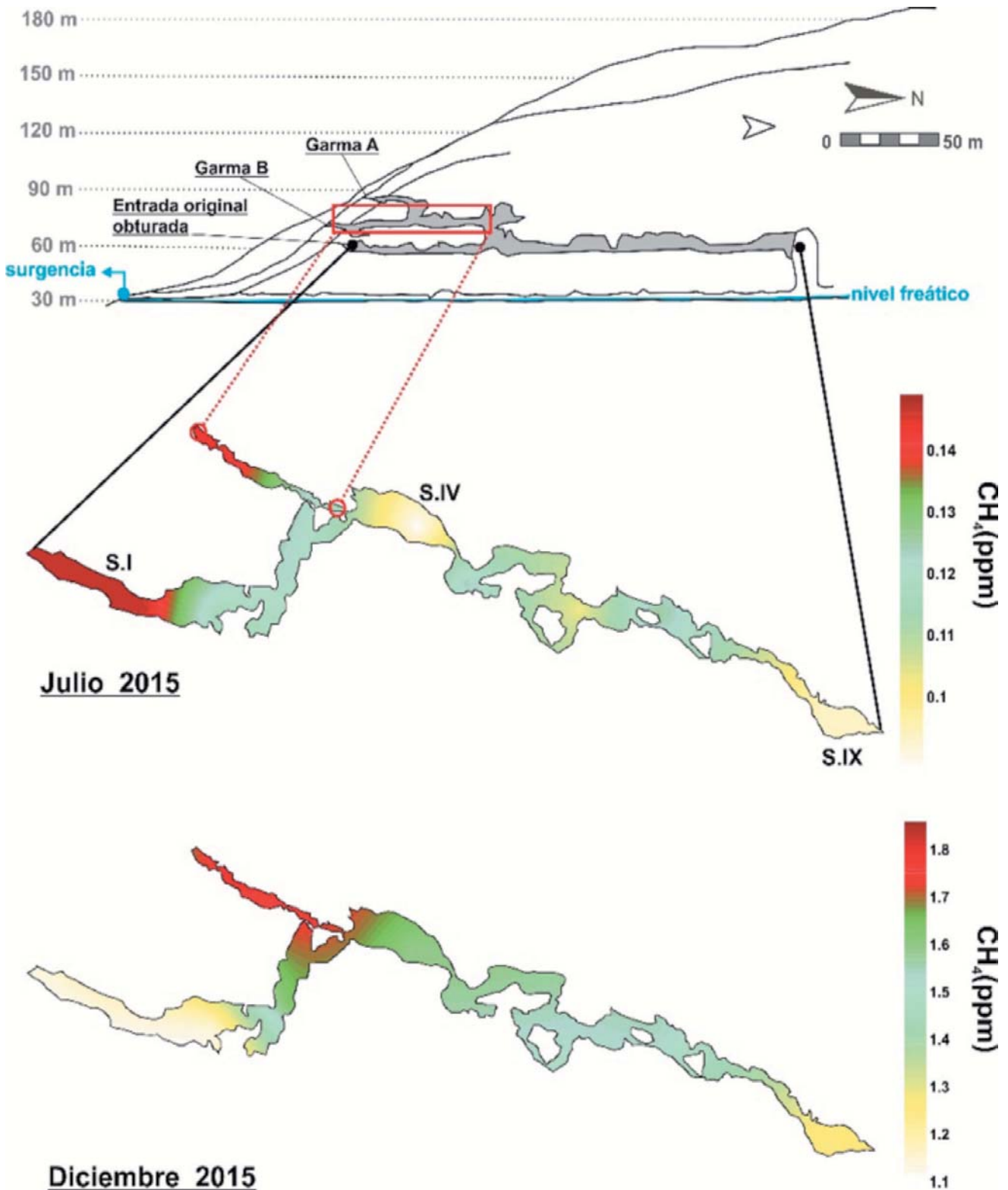


Figura 4. Distribución espacial de la concentración de gas metano ( $CH_4$ ) en la cavidad en dos estaciones contrastadas: verano (julio 2015) e invierno (diciembre 2015). Las escalas utilizan el mismo código de color pero representan diferentes rangos de concentración de metano. Los valores más altos indican mayor grado de conexión con el exterior (invierno) y los más bajos se deben a una menor tasa de renovación del aire (verano). En las etapas de mayor aislamiento (verano) la conexión se produce por las áreas más próximas a la superficie como el Sector I y la conexión con Garma B

l presenta sin embargo una pauta muy similar a la observada en el sector IV, observándose un leve desfase (retardo de pocas horas respecto al sector IV) y también leves diferencias en los rangos de variación y especialmente en los valores mínimos. En el caso del sector I, los valores mínimos durante el periodo de finales de noviembre de 2015 a abril de 2016, son levemente superiores a los del sector IV, en torno a 500 ppm. En el caso del radón, los valores mínimos también son superiores a los del sector IV, en torno a 200-400 Bq/m<sup>3</sup>.

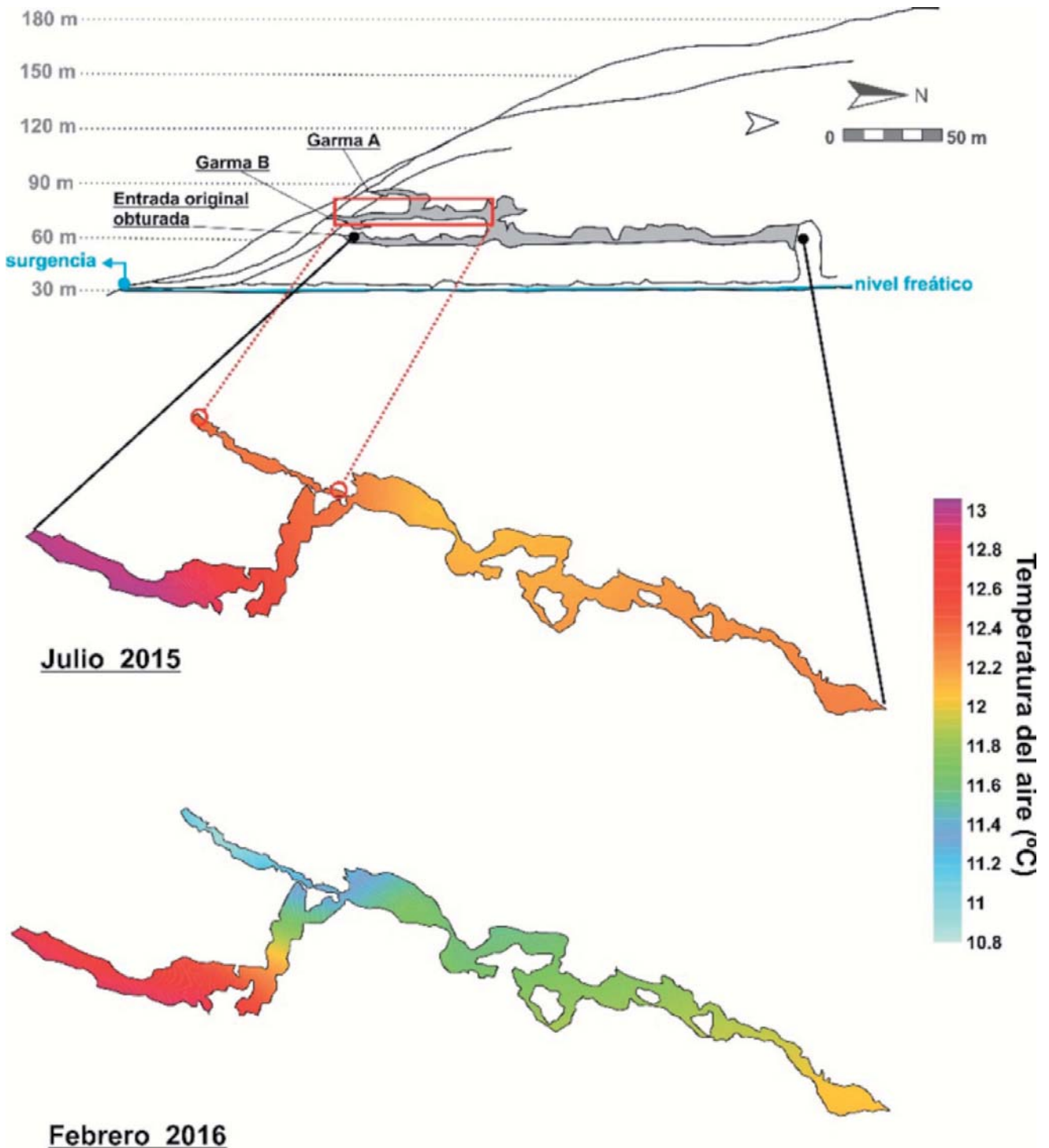


Figura 5. Distribución espacial de la Temperatura del aire en la cavidad en dos estaciones contrastadas: verano (julio2015) e invierno (febrero 2016)

## **Régimen estival**

Desde finales de mayo hasta finales de noviembre de 2015 la cueva entra en un periodo con grandes contrastes entre los niveles superiores y la Galería Inferior. Durante esta fase, se establece un régimen de circulación de aire en los niveles más superficiales, con una intensa entrada de aire caliente, posiblemente por la zona de la Garma B, y salida de aire más frío por la zona de la Garma A. Esta entrada de aire caliente provoca fuertes procesos de condensación en esas zonas que se hacen muy evidentes en las puertas y escaleras metálicas de acceso. En las zonas con mayores tasas de condensación, como la conexión entre la Galería Intermedia y la Galería Superior, se produce el desarrollo de colonizaciones microbianas que fueron observadas ya en el momento del descubrimiento (Schabereiter-Gurtner *et al.*, 2004) y que no parecen progresar hacia los niveles inferiores. Por el contrario, la Galería Inferior entra en una fase de mayor estabilidad termohigrométrica y apenas está afectada por ese fenómeno de ventilación de los niveles superiores. Durante esta fase la temperatura del aire en el Sector IV aumenta de forma progresiva y regular sin oscilaciones bruscas, desde los 11,7 °C en mayo de 2015 a 12,3 °C a finales de noviembre de 2015. En este periodo la humedad relativa del aire permanece también estable en torno a 95-96 %, el movimiento del aire es mínimo con valores de velocidad por debajo de 0,02 m/s y se registran las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub>, del orden de 1700 ppm que llegan a alcanzar máximos absolutos en torno a 2000 ppm. Este periodo está también caracterizado por elevadas concentraciones de <sup>222</sup>Rn, con un patrón muy similar al del CO<sub>2</sub>, y con valores medios entre 3500-4000 Bq/m<sup>3</sup>, pero que llega a alcanzar los 6000 Bq/m<sup>3</sup>.

En el Sector I, la temperatura del aire tiene una tendencia ascendente y muy regular desde mayo a diciembre de 2015. La humedad relativa del aire es muy estable, especialmente de abril a diciembre de 2015, periodo en el que permanece casi constantemente en valores próximos a la saturación 99-100 %. Durante este periodo de mayor estabilidad termohigrométrica, el movimiento del aire es mínimo con valores de velocidad entre 0,01-0,02 m/s y las concentraciones de CO<sub>2</sub> son también del orden de 1700 ppm pero llegan a alcanzar valores en torno a 2000 ppm. La mayor estabilidad ambiental se observa en los meses de verano, julio y agosto, con marcadas oscilaciones de septiembre a noviembre caracterizadas por descensos del orden en este caso de 600 ppm en 1 o 2 días y por una influencia muy marcada de las condiciones climáticas externas.

## **Conclusiones**

El estudio de monitorización microambiental en La Garma a lo largo de un ciclo anual (abril 2015 a mayo 2016) ha permitido obtener resultados preliminares acerca de la dinámica ambiental y el patrón de ventilación general en la cavidad. Las características geomorfológicas de la cueva y distribución de sus galerías y zonas de conexión con el exterior, unido a la relación de las condiciones microclimáticas en la cavidad con las condiciones climáticas externas (temperatura, viento, presión, etc.), determinan dicho patrón. Así, el análisis preliminar de estos primeros datos indica la existencia de un marcado patrón estacional, pudiendo diferenciarse dos etapas principales:

Régimen invernal (final noviembre-abril): Durante este periodo se establece una alta tasa de intercambio de aire con el exterior, la cueva permanece en conexión aerodinámica con la atmósfera exterior en una situación de elevada ventilación. El aire exterior, más frío y denso que el aire subterráneo, penetra en la cavidad por los niveles superiores. El Sector I es la zona que permanece relativamente aislada de este régimen de circulación del aire que conecta los niveles superiores con la Galería Inferior. Su situación geomorfológica le confiere una mayor estabilidad térmica que se traduce también en una mayor fragilidad ambiental.

Régimen estival (mayo-principio de noviembre): Durante este periodo se producen grandes contrastes entre el régimen de circulación del aire de los niveles superiores frente a la Galería Inferior. Así, en los niveles superiores se establece un régimen de circulación de aire en los niveles más superficiales, con una intensa entrada de aire caliente, posiblemente por la zona de la Garma B, y salida de aire más frío por la zona de la Garma A. El aire caliente procedente del exterior entra en la cavidad más fría y provoca importantes fenómenos de condensación en la Galería intermedia, especialmente en su zona de conexión con la Superior. Sin embargo, en la Galería Inferior es un periodo de máxima estabilidad termohigrométrica, el movimiento del aire es mínimo a lo largo de esta galería, y apenas se ve afectada por ese fenómeno de ventilación de los niveles superiores.

Desde el punto de vista de la conservación, el análisis preliminar de los datos de este estudio muestra zonas con diferente grado de vulnerabilidad ambiental. Hasta el momento, las zonas con colonización microbiana evidente se restringen a sectores con fenómenos de condensación natural. Un análisis más detallado permitirá evaluar el impacto de las entradas de visitantes y de las campañas de investigación arqueológica y diferenciar las variaciones naturales de las originadas por la presencia humana.

## **Agradecimientos**

Estos estudios están financiados por un contrato de apoyo tecnológico financiado por el Gobierno de Cantabria – Consejería de Educación, Cultura y Deporte a través de la Sociedad Regional de Educación, Cultura y Deporte, S.L. para la ejecución del proyecto Monitorización microambiental de la Cueva de La Garma. Asimismo se enmarcan en el proyecto CGL2013-43324-R y se han beneficiado de la ayuda para un contrato (SC) del programa Torres Quevedo (PTQ 13-06296), ambos financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad.

## **Referencias**

- Arias, P., González-Sainz, C., Moure, A., Ontañón, R. 2000. La zona arqueológica de La Garma (Cantabria): Investigación, conservación y uso social. *Trabajos de Prehistoria*, 57 (2), 41-56.
- Arias, P. 2009. Rites in the dark? An evaluation of the current evidence for ritual areas at Magdalenian cave sites, *World Archaeology*, 41:2, 262-294.
- Arias, P. y Ontañón, R. 2014. La Garma: un proyecto orientado al estudio del arte paleolítico, su contexto y su conservación. En M<sup>a</sup> Soledad Corchón y M. Menéndez (eds.) *Cien años de arte rupestre paleolítico: Centenario del descubrimiento de la cueva de la Peña de Candamo*.



*mo (1914-2014): 173-194. Salamanca: Ediciones Universidad de Salamanca (Acta Salmanticensia. Estudios históricos y geográficos, 160).*

Fernandez-Cortes A., Cuezva, S., Alvarez-Gallego, M., Garcia-Anton, E., Pla, C., Benavente, D., Jurado, V., Saiz-Jimenez, C. y Sanchez-Moral, S. 2015. Subterranean atmospheres may act as daily methane sinks. *Nature Communications*, 6: 7003.

Ontañón, R. 2003. Sols et structures d'habitat du Paléolithique supérieur, nouvelles données depuis le Cantabres: la Galerie Inférieure de La Garma (Cantabrie, Espagne). *L'Anthropologie*, 107: 333-63.

Schabereiter-Gurtner C., Saiz-Jimenez C., Pinar G., Lubitz W., y Rolleke S. 2004. Phylogenetic diversity of bacteria associated with paleolithic paintings and surrounding rock walls in two Spanish caves (Llonin and La Garma). *FEMS Microbiology Ecology*, 47: 235-247.

## Cuantificación preliminar de los flujos de CO<sub>2</sub> en la Cueva de Nerja (Málaga)

J. Benavente Herrera <sup>(1)</sup>, I. Vadillo Pérez <sup>(2)</sup>, L. Ojeda Rodríguez <sup>(2)</sup>, C. Liñán Baena <sup>(2,3)</sup>, Y. del Rosal Padial <sup>(3)</sup> y F. Carrasco Cantos <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Investigación del Agua, Universidad de Granada, C/ Ramón y Cajal, nº 4. 18071 Granada, jbenaven@ugr.es

<sup>(2)</sup> Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos s/n, 29071- Málaga, vadillo@uma.es, lucia\_lor2@hotmail.com, crilinbae@uma.es, fcarrasco@uma.es

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

---

### RESUMEN

En este trabajo se realiza un balance mensual aproximado de CO<sub>2</sub> en la Cueva de Nerja (Málaga) durante 2015. El balance se ha planteado con el objetivo de tener una estimación del flujo neto de CO<sub>2</sub> entre la Cueva de Nerja y la zona vadosa que la rodea. Los resultados muestran que los dos principales flujos son los relacionados con la ventilación natural: el que sale desde el interior hacia el exterior (del orden de 55 t/año) y el que entra a la cueva desde el exterior (unas 39 t/año). La respiración de los visitantes supone una entrada de unas 14,5 t/año, principalmente durante los meses de verano. Se identifica un flujo neto de gas desde la zona vadosa hacia la cueva de noviembre a abril, asociado a la intensa ventilación convectiva de la cavidad. De mayo a octubre, cuando la ventilación natural se anula prácticamente, el flujo procede desde la cueva hacia la zona vadosa. Ambos flujos resultan ser de magnitud aproximadamente similar (unas 10-11 t en cada periodo), por lo que, a nivel anual, el flujo neto de CO<sub>2</sub> entre la cueva y la zona vadosa circundante presenta un valor casi nulo.

**Palabras clave:** balance CO<sub>2</sub>, Cueva de Nerja, flujos de aire vadoso, ventilación natural.

### *Preliminary quantification of CO<sub>2</sub> flows in the Cueva de Nerja (Málaga)*

#### ABSTRACT

A CO<sub>2</sub> mass balance has been carried out for the Nerja Cave system during 2015. The balance has been set in order to get an estimation of the net flux between the cavity and the vadose zone which surrounds it. The results indicate that the two main fluxes are those linked to the natural cave ventilation: one leaving the cavity to the exterior (about 55 t/year), and other entering to the cave from outside (some 39 t/year). The breathing of the visitors accounts for about 14.5 t/year, mainly during summer months. Net flux of gas from the vadose zone to the cave seems to occur from November to April, linked to the strong convective ventilation of the cavity. From May to October, when the natural ventilation of the cave is practically inhibited, the net flux is thought to be from the cavity towards the vadose zone. The amount of both fluxes is fairly similar (some 10-11 t in each period), and then the net annual flux of CO<sub>2</sub> results to be nearly nil.

**Key words:** CO<sub>2</sub> balance, natural ventilation, Nerja Cave, vadose air fluxes.

## Introducción

La Cueva de Nerja se localiza a unos 800 m del mar Mediterráneo, en el borde meridional de la Masa de Agua Subterránea (MASb) de Las Alberquillas. Esta MASb está integrada por mármoles triásicos karstificados, dolomíticos en la base y calizos a techo, con espesores generalmente superiores a los 500 m. Debajo de esta formación calcárea existe otra potente formación de naturaleza metapelítica. Ambas formaciones están intensamente plegadas y fracturadas, aunque en el entorno de la cueva los mármoles presentan buzamientos suaves hacia el mar.

La Cueva de Nerja presenta una forma en planta sensiblemente alargada en dirección cercana a la N-S. Está abierta a las visitas en aproximadamente un tercio de su volumen (unos 300.000 m<sup>3</sup>) y se localiza en la zona vadosa de la MASb antes citada, entre las cotas 127 m y 195 m. La superficie topográfica sobre la cueva alcanza una altitud máxima cercana a los 350 m. El nivel freático del acuífero en el entorno de la cueva debe situarse a unos 10-20 m bajo el fondo de la cueva. Ello se desprende de la cota del cercano manantial de Maro, la principal surgencia de la MASb (unos 120 m) y de la cota del nivel de agua estático en la captación de 150 m de profundidad que se utiliza en las instalaciones de la cueva (105-110 m). Según todo ello, el espesor de la zona vadosa del acuífero en el sector donde se localiza la cueva está comprendido, a grandes rasgos, entre los 50 m y los 150 m.

El incremento en los controles de las variables ambientales en el interior de la Cueva de Nerja, unido a los nuevos datos relativos a la incidencia de la conexión entre la cavidad y el exterior por medio del conducto artificial que conecta con otra cavidad situada poco más al norte (Cueva Pintada), hace que el conocimiento de la ventilación en el sistema Cueva de Nerja se haya establecido con bastante precisión (IICN, 2016). A lo largo de 2015 también se ha avanzado en el estudio sistemático del CO<sub>2</sub> de la zona vadosa en el entorno de la cueva, a partir de una red de sondeos de investigación.

Como intento de explicación de las variaciones estacionales en los contenidos de CO<sub>2</sub> registrados en la red de sondeos antes mencionada (Benavente *et al.*, 2010) se planteó un balance de masas aproximado de ese gas en la Cueva de Nerja. Esta labor se ha llevado a cabo en un trabajo reciente (Benavente *et al.*, 2015). Para ello se han utilizado datos medios de concentración de CO<sub>2</sub> en las salas de la cueva y del número de visitantes del periodo 2008-2013. Un dato crucial en el balance es el flujo de aire asociado con la ventilación natural de la cavidad. La información al respecto que se ha tenido en cuenta es el dato de 3,21 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en el periodo invernal y de 0,04 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en el periodo estival (Dueñas *et al.*, 1999). El primero se considera de octubre a junio, con flujo del exterior al interior, y el segundo de julio a septiembre, con flujo en sentido opuesto (Liñán *et al.*, 2014; Liñán y del Rosal, 2014). El trabajo de Benavente *et al.* (2015) sugería la existencia un flujo neto de CO<sub>2</sub> desde la zona vadosa hacia la Cueva de Nerja de unas 24 t/año, concentrado en el periodo invernal en sentido amplio.

El objetivo del presente trabajo es intentar precisar los resultados anteriormente citados mediante la realización del balance de masas de CO<sub>2</sub> en la Cueva de Nerja. En este caso con datos obtenidos durante 2015 y a nivel mensual.

## Metodología

El balance de masas de CO<sub>2</sub> se ha efectuado en el conjunto de la Cueva de Nerja, sin distinguir entre zonas visitable (Galerías Turísticas) y restringida (Galerías Altas y Nuevas). Los datos de partida, procedentes de la red de control del organismo que gestiona la cavidad (IICN, 2016), son los siguientes: número de visitantes mensuales; concentración media mensual y de los días inicial y final de cada mes de las Galerías Turísticas (salas de Belén, Cascada y Cataclismo) y de las Galerías Altas y Nuevas (salas de Hércules, Inmensidad y Montaña); temperaturas medias mensuales del exterior (T<sub>ext</sub>) y del interior de la cavidad (T<sub>int</sub>), a partir de las cuales se calcula el índice  $\Delta T$  (T<sub>ext</sub> - T<sub>int</sub>).

Las medias para el conjunto de la cueva se han calculado teniendo en cuenta la diferente proporción de cada zona en el volumen total de la cavidad: aproximadamente un tercio para la zona visitable y dos tercios para la restringida. Para las visitas se ha considerado una duración media de una hora y una exhalación promedio de CO<sub>2</sub> de 17 L/h·persona (Quindos *et al.*, 1987). El contenido medio de CO<sub>2</sub> del aire exterior se considera 400 ppm(v).

Como no hay nuevos datos que permitan distribuir a nivel mensual los flujos medios estacionales de ventilación antes citados, se ha adoptado un reparto de los mismos en función del índice  $\Delta T$  arriba definido. Para el aire exterior que entra en la cavidad se obtiene así un flujo mensual promedio comprendido entre 4,75 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (enero 2015) y 1,88 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (noviembre 2015). Para el aire interior que sale de la cavidad, el flujo está comprendido entre menos de 0,01 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (octubre 2015) y 0,08 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (julio 2015). El promedio en el conjunto de meses con  $\Delta T < 0$  (noviembre a abril de 2015) y en los que  $\Delta T > 0$  (mayo a octubre de 2015) se mantiene en los valores de referencia citados arriba: 3,21 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y de 0,04 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, respectivamente.

Las entradas de CO<sub>2</sub> a la cueva que se consideran proceden del aire exterior (E<sub>aext</sub>) cuando  $\Delta T < 0$ , de la exhalación de las visitas (E<sub>visi</sub>) y de la zona vadosa circundante (E<sub>zvad</sub>). Las salidas son del aire interior al exterior (S<sub>aint</sub>) cuando  $\Delta T > 0$  y hacia la zona vadosa circundante (S<sub>zvad</sub>). El balance puede plantearse de modo que se obtenga una estimación del flujo neto de CO<sub>2</sub> respecto de la zona vadosa (F<sub>zvad</sub>):

$$F_{zvad} = E_{zvad} - S_{zvad} = S_{aint} - E_{aext} - E_{visi} \pm \text{Variac. Almacenam. (1)}$$

La última variable se estima a partir de las concentraciones medias iniciales y finales en las salas y del volumen de la cavidad.

Otros posibles flujos de CO<sub>2</sub>, como el que se produciría dentro de la cueva asociado a precipitación de CaCO<sub>3</sub> por el agua de goteo, no se han tenido en cuenta en el balance por ser de magnitud sensiblemente inferior a las partidas consideradas (Benavente *et al.*, 2015).

## Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los valores mensuales y anuales (totales o promedios) de las variables consideradas en el balance y de su adaptación para ser utilizadas en la ecuación (1) con objeto



AÑO 2015	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Suma/ Promedio
T <sub>med</sub>	-6,25	-5,76	-4,05	-2,62	1,30	3,52	7,11	6,62	2,77	0,31	-2,47	-4,09	-
Q para T < 0	4,75	4,38	3,08	1,99	-	-	-	-	-	-	1,88	3,11	-
Q para T > 0	-	-	-	-	0,01	0,04	0,08	0,07	0,03	0,00	-	-	-
Cc. CO <sub>2</sub> med	481	529	590	670	819	909	728	871	921	895	591	518	<b>710</b>
Cc. CO <sub>2</sub> ini	480	483	628	685	703	904	597	609	619	798	736	513	-
Cc. CO <sub>2</sub> fin	471	582	697	688	885	582	613	602	815	742	525	593	-
Visitantes	10.119	16.380	25.883	37.331	33.092	34.703	57.217	81.754	42.260	36.782	16.367	16.127	<b>408.015</b>
Ent CO <sub>2</sub> ext	9.671	8.916	6.273	4.050	29	80	160	149	63	7	3.826	6.338	<b>39.562</b>
Ent CO <sub>2</sub> vis	358	580	917	1.322	1.172	1.229	2.026	2.895	1.497	1.303	580	571	<b>14.451</b>
Sal CO <sub>2</sub> ext	11.749	11.945	9.353	6.997	60	192	333	385	154	15	6.083	8.450	<b>55.715</b>
Var. Imac.	-5	59	40	2	107	-190	10	-4	116	-33	-125	47	<b>24</b>
F <sub>ZVAD</sub>	1.715	2.507	2.204	1.627	-1.094	-1.498	-2.177	-3.049	-1.443	-1.343	1.553	1.587	<b>589</b>

Tabla 1. Valores de las variables consideradas en el balance mensual de CO<sub>2</sub> de la Cueva de Nerja en 2015 y estimación del flujo neto de gas respecto de la zona vadosa circundante (F<sub>ZVAD</sub>). Q: flujo de aire en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Cc.: concentraciones de CO<sub>2</sub> en la cueva en ppm(v). Flujos de entrada (Ent), de salida (Sal), variaciones de almacenamiento y F<sub>ZVAD</sub> expresados en kg CO<sub>2</sub>. Ver texto para más información

de estimar el flujo vadoso neto (F<sub>ZVAD</sub>). La estimación de esta variable debe considerarse sólo como un intento de aproximación a las circunstancias reales debido a las hipótesis mantenidas en los cálculos, particularmente la distribución mensual de flujos de aire y su vinculación con las circunstancias de ΔT < 0 ó ΔT > 0.

Recientemente se están efectuando medidas sistemáticas del sentido y la velocidad del aire en distintos puntos de la cueva. En IICN (2016) se mencionan valores en las Galerías Altas comprendidos entre 0,004 y 0,013 m/s, de los que puede obtenerse una media de 0,0085 m/s. Si consideramos para la cueva una sección transversal al flujo de 400 m<sup>2</sup> (aproximadamente 8 m de alto y 50 m de ancho), el flujo medio que resulta es de 3,4 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Este valor es muy similar al valor promedio del flujo de aire considerado en el balance para el periodo "invernal" (en sentido amplio): 3,2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, obtenidos a partir de datos del contenido en <sup>222</sup>Rn de la cavidad (Dueñas et al., 1999).

La principal entrada de CO<sub>2</sub> en la Cueva de Nerja en el año 2015 se estima en unas 39,5 t/año y corresponde al gas procedente del aire exterior. Esta entrada se produce entre noviembre y abril, periodo en que actúa la ventilación convectiva de la cavidad, inducida por valores negativos del índice ΔT. Entre mayo y octubre este proceso puede considerarse despreciable (entradas conjuntas de gas inferiores al 2 % de la cifra anterior). Las entradas de CO<sub>2</sub> por la respiración de los visitantes se han estimado en unas 14,4 t/año. De ellas, el 70 % se producen entre abril y octubre (periodo con ΔT positivo). El flujo neto procedente de la zona vadosa que resulta del cálculo es poco significativo (del orden de 0,6 t/año) pues el procedimiento de cálculo implica la suma algebraica de entradas (valores positivos) y salidas (valores negativos). Por el contrario, si se consideran los valores de este componente a nivel estacional, los resultados son más informativos. Así, se estima un flujo neto entrante de aproximadamente 11,2 t de CO<sub>2</sub> durante los meses con ΔT negativo.

La principal salida de CO<sub>2</sub> del sistema es por la ventilación natural hacia el exterior (unas 55,7 t/año) y se concentra en el periodo de meses con el índice  $\Delta T$  negativo. Le sigue la salida desde el interior de la cavidad hacia la zona vadosa en el periodo de mayo a octubre (10,6 t).

En la figura 1 se representan los resultados obtenidos para los flujos calculados, considerados estacionalmente (periodos con valores positivos y negativos del índice  $\Delta T$ ). A nivel anual, la variación de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, como resulta esperable en este tipo de cálculos, es prácticamente nula.

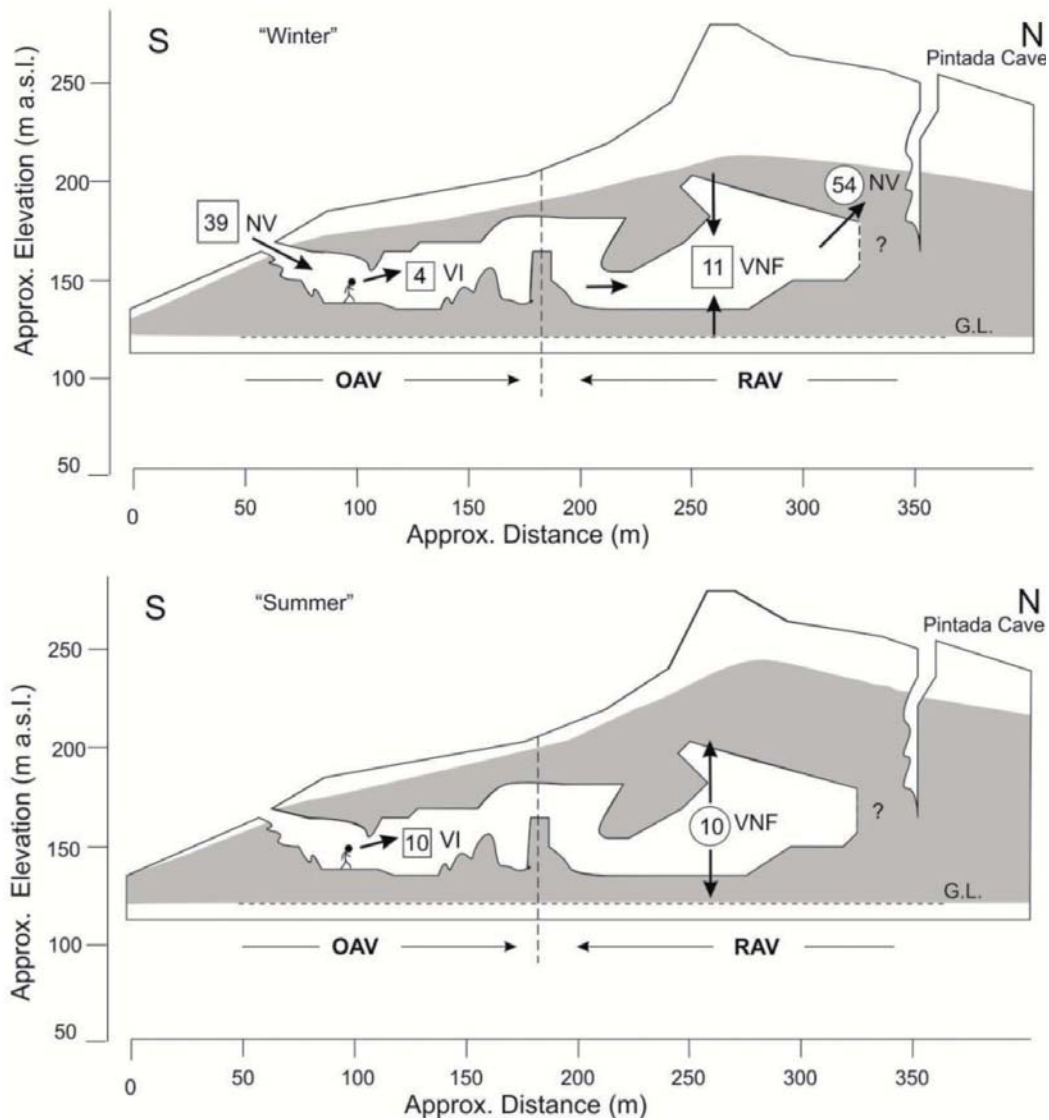


Figura 1. Croquis acotado de la Cueva de Nerja, que incluye una representación esquemática de los principales resultados del balance de masas de CO<sub>2</sub> realizado para el año 2015. Las cifras junto a las flechas indican valores aproximados de flujos de gas (en t) para los dos periodos considerados: "invierno" (meses con  $\Delta T < 0$ ), arriba, y "verano" (meses con  $\Delta T > 0$ ), abajo. Valores inferiores a 2 t/año periodo no han sido representados. Recuadros: entradas. Círculos: salidas. NV: ventilación natural. VI: visitantes. VNF: flujo neto vadoso. OAV: sector abierto a las visitas. RAV: sector de acceso restringido. La trama alrededor de la cueva pretende representar la atmósfera rica en CO<sub>2</sub> de la zona vadosa sobre el nivel freático del acuífero G.L. (línea de trazos) y sus variaciones espaciales medias

Los flujos netos desde y hacia la zona vadosa podrían traducirse en variaciones espaciales (horizontales y verticales) de los contenidos de CO<sub>2</sub> en ese ámbito, aspecto que se esquematiza en la figura 1 y que se intuye a partir de registros esporádicos preliminares (Benavente *et al.*, 2010 y 2015), pero que se espera caracterizar con más precisión a partir de registros sistemáticos (Benavente *et al.*, en prep.).

Cuantitativamente, y conscientes de su carácter preliminar, puede decirse que estos resultados son coherentes a grandes rasgos con los del balance para un teórico "año medio" realizado en Benavente *et al.* (2015). Los valores obtenidos en el presente trabajo deben considerarse como más fiables, al ser un año "real" el considerado y estar los cálculos referidos a un intervalo de tiempo menor. La entrada debida a los visitantes ofrece valores que apenas difieren. Los flujos debidos a la ventilación natural son inferiores (entre aproximadamente un 50 % y un 70 %) a los obtenidos en el año medio. La diferencia es particularmente destacable en el caso del flujo vadoso neto entrante (11 t/año aquí frente a 31 t/año en el trabajo previo). En todo caso se trata, como se ha dicho, de valores tentativos, que deberán ser confirmados o modificados mediante el uso de medidas más fiables de ciertas variables del balance o a partir de otras técnicas, como el uso de trazadores ambientales controlados en la cavidad y en la zona vadosa que la rodea (<sup>222</sup>Rn y δ<sup>13</sup>C del CO<sub>2</sub>).

Como ya se ha apuntado, se considera crucial en este tipo de cálculos disponer de estimaciones de los flujos de aire que entran o salen de la cavidad y que suponen la mayor o menor renovación de su atmósfera interior. La aproximación adoptada aquí, a partir exclusivamente del índice ΔT, es muy simplista, pues de hecho ya en 2015 se ha podido comprobar modificaciones en la dirección de los flujos entrantes y salientes durante periodos de corta duración correspondientes a variaciones de dicho índice que ocurren generalmente en los meses de otoño y primavera (IICN, 2016). El que tales situaciones se produzcan en periodos de duración inferior a un mes hacen difícil considerarlas en el esquema de cálculo que aquí se ha seguido. Si este tipo de cálculos se realizase alguna vez a nivel semanal o diario, es obvio que tales situaciones se deberían tener en cuenta y que los resultados serían considerablemente más fiables.

## Conclusiones

Los resultados preliminares obtenidos en un balance de CO<sub>2</sub> en la Cueva de Nerja durante 2015 indican que los principales flujos de CO<sub>2</sub> (entre aproximadamente 40 y 55 t/año) están vinculados a la ventilación natural de la cavidad durante el periodo invernal en sentido amplio (entre noviembre y abril, ambos inclusive). El CO<sub>2</sub> procedente de los visitantes es de 14,5 t/año y se concentra (70 %) en los meses de verano en sentido amplio (mayo a octubre, ambos inclusive).

Los resultados sugieren que, a nivel anual, la cueva tiene un funcionamiento de tipo "flow-through" respecto del CO<sub>2</sub> del aire de la zona vadosa circundante, pues el flujo neto que se obtiene para este componente del balance es poco significativo (< 1 t/año). Sin embargo, a nivel estacional, este flujo neto representa unas entradas de aproximadamente 11 t/año durante el periodo invernal y unas salidas muy similares durante el periodo de verano. Estas cir-

cunstancias deberán confirmarse en estudios posteriores con medidas más precisas de ciertas variables o a partir de otras técnicas complementarias.

## **Agradecimientos**

A la Fundación Cueva de Nerja por subvencionar el estudio, que también se encuadra en las líneas de trabajo de los Grupos de Investigación RNM-126 y RNM-308 de la Junta de Andalucía. Se agradecen también los comentarios de un revisor anónimo respecto a una primera versión del trabajo.

## **Referencias**

- Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, A., Liñán, C. y Moral, F. 2010. Air CO<sub>2</sub> contents in the vadose zone of a Mediterranean karst. *Vadose Zone Journal*, 29: 647-659.
- Benavente, J., Vadillo, I., Liñán, C., del Rosal, Y. y Carrasco, F. 2015. Influence of the ventilation of a karst show cave on the surrounding vadose CO<sub>2</sub> reservoir (Nerja, South Spain). *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-015-4709-8.
- Benavente, J., Vadillo, I., Ojeda, L., Liñán, C. y Carrasco, F. (en prep.). Field assesment of CO<sub>2</sub> fluxes in the vadose zone of a mediterranean karst.
- Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S., Carretero, J. y Liger, E. 1999. <sup>222</sup>Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave. *Atmospheric Environment*, 33, 501-510.
- IICN 2016. Memoria Científica del Instituto de Investigación Cueva de Nerja, año 2015, 571 pp (Inédita).
- Liñán C., del Rosal, Y. y Carrasco, F. 2014. Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: Durán, J.J. y Calaforra, J.M. (eds.). *Iberoamérica Subterránea*, 229- 238. ACTE, Madrid.
- Liñán, C. y del Rosal, Y. 2014. Natural ventilation of karstic caves: new data on the Nerja Cave (Malaga, S of Spain). En: Andreo, B. *et al.* (eds.). *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. *Environ Earth Sci* 1: 505-511.
- Quindos, L.S., Bonet, A., Diaz-Caneja, N., Fernandez, P.L., Gutierrez, I., Solana, J.R., Soto, J. y Villar E. 1987. Study of the environmental variables affecting the natural preservation of the Altamira Cave paintings located at Santillana del Mar, Spain. *Atmospheric Environment*, 21(3): 551-560.





## **Datación del CO<sub>2</sub> mediante <sup>14</sup>C del aire de la zona no saturada en la parcela experimental de la Cueva de Nerja (Andalucía, Málaga)**

I. Vadillo Pérez <sup>(1)</sup>, L. Ojeda Rodríguez <sup>(1)</sup>, J. Benavente Herrera <sup>(2)</sup>, C. Liñán Baena <sup>(3)</sup>, F. Carrasco Cantos <sup>(2)</sup> y Y. del Rosal Padial <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos, s/n. 29071 Málaga, vadillo@uma.es, lucia\_lor2@hotmail.com, crilnbae@uma.es, fcarrasco@uma.es

<sup>(2)</sup> Instituto de Investigación del Agua, Universidad de Granada, C/ Ramón y Cajal, nº 4. 18071 Granada, jbenaven@ugr.es

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

---

### **RESUMEN**

Las elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> (40.000 y 60.000 ppmv) medidas en los sondeos situados en la parcela experimental de la Cueva de Nerja dieron lugar al control sistemático y mensual de la concentración de CO<sub>2</sub> y de su composición isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ) en el aire de la zona no saturada durante el año 2015. Los valores isotópicos indican un origen del gas principalmente ligado a procesos microbiológicos. En este trabajo se presenta la primera medida que se ha realizado de <sup>14</sup>C del CO<sub>2</sub> del aire de la zona no saturada y su interpretación preliminar. El valor obtenido, 106.4 pMC, indicaría que se trata de una fuente de carbono moderno. Si bien este valor puede tener dos interpretaciones: (1) que se trate de una mezcla de fuentes de carbono moderno; o (2) bien se trate de una mezcla entre un carbono antiguo y un carbono actual.

**Palabras clave:** <sup>14</sup>C, concentración CO<sub>2</sub>, Cueva de Nerja, datación, zona no saturada,

### ***CO<sub>2</sub> dating by <sup>14</sup>C of the air of the unsaturated in the experimental research site of Nerja Cave (Andalucía, Málaga)***

#### **ABSTRACT**

*The CO<sub>2</sub> concentrations (40,000 to 60,000 ppmv) measured in different boreholes in the experimental site near Nerja Cave led on to a systematic and monthly control of the CO<sub>2</sub> concentration and its isotopic signature ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) in the vadose zone air during 2015. These values indicate a microbiological origin of the gas. In this study is presented the first measure of <sup>14</sup>C of vadose CO<sub>2</sub> and its preliminary interpretation. The obtained value is 106.4 pMC, indicating it is a modern carbon source. Although this value may be explained by two interpretations: (1) being a mixture of modern carbon sources; or (2) being a mixture between old carbon and actual carbon.*

**Key words:** <sup>14</sup>C, CO<sub>2</sub> concentration, dating, Nerja Cave, vadose zone,

## Introducción

El papel fundamental que juega el CO<sub>2</sub> en la disolución y precipitación del carbonato cálcico (Ek y Gewalt, 1985) recomienda un control de su concentración, tanto en el aire como en el agua de las cavidades kársticas. Además, el CO<sub>2</sub> es un gas que puede resultar tóxico para la salud humana en altas concentraciones (Liñán *et al.*, 2004), por lo que su medida es especialmente importante en cuevas turísticas, como la de Nerja. Por este motivo, son numerosas las cuevas en las que se mide la concentración de CO<sub>2</sub> a fin de realizar una conservación apropiada y/o para gestionar el régimen de visitas. Sin embargo, no son comunes las medidas directas de concentración de CO<sub>2</sub> en sondeos situados en la zona no saturada, sobre todo a profundidades del orden de la decena de metros.

Los métodos de datación radiocarbónica para medir la fracción de carbono biogénico en una muestra se basan en el hecho de que el carbono biogénico contiene <sup>14</sup>C, mientras que un carbono fósil no, ya que se produce la desintegración del átomo de carbono radiactivo. Un carbono fósil es aquel con una edad >50.000 años, coincidente con el límite de detección de los métodos de datación radiocarbónica. Por tanto, si existe una mezcla entre átomos de carbono fósil y átomos de carbono biogénico, la cantidad de <sup>14</sup>C en el carbono total será tanto menor cuanto menor sea la fracción de carbono biogénico. A su vez, el valor de <sup>14</sup>C de la fracción de carbono biogénico depende del valor de <sup>14</sup>C del CO<sub>2</sub> atmosférico que fue tomado por las plantas durante la fotosíntesis.

Debido a los ensayos nucleares de los años 60, el nivel atmosférico de <sup>14</sup>C se incrementó en un 180% con <sup>14</sup>C artificial o proveniente de las reacciones de fisión asociadas, llegando a su máximo en 1963 (Fig. 1). Posteriormente a esa fecha decreció a determinadas tasas anuales (principalmente debido al intercambio de carbono con los océanos y la biosfera). Debido a este decrecimiento anual del <sup>14</sup>C del CO<sub>2</sub> atmosférico, y también del de las plantas que absorben CO<sub>2</sub> atmosférico para realizar la fotosíntesis y permanece en ellas después de la degradación, existen diferencias en los valores de <sup>14</sup>C que no se relacionan con la desintegración radiactiva.

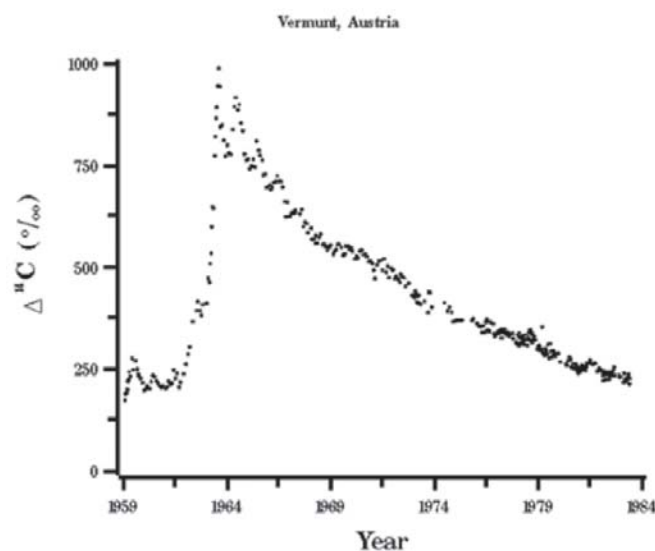


Figura 1. Tendencia de  $\Delta^{14}\text{C}$  en Vermunt, Austria, desde febrero de 1959 a junio de 1983. Extraído de <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/cent-verm.html>

La Cueva de Nerja está desarrollada sobre mármoles dolomíticos triásicos (Fig. 2) del Complejo Alpujárride de la Cordillera Bética (Andreo *et al.*, 1993). Estos mármoles, muy diaclasados y con una potencia de hasta 500 metros, son permeables por fracturación y karstificación y forman parte de la masa de aguas subterráneas de Las Alberquillas (Pérez y Andreo, 2007). El clima en la zona es mediterráneo, caracterizado por unos valores medios anuales de precipitación, temperatura y humedad relativa de 487 mm, 18,8 ° C y 66 %, respectivamente. A nivel mensual, el 61 % de las precipitaciones se concentran entre octubre y enero (aproximadamente 60-90 mm/mes) y las temperaturas medias están comprendidas entre 13,2 °C, en enero, y 25,9 °C, en agosto (Liñán *et al.*, 2007).

Al noroeste de la entrada de la Cueva de Nerja se ubica una parcela experimental, que cuenta con nueve sondeos situados en la zona no saturada del acuífero (Fig. 2), con profundidades entre 15 m (sondeos 1 y 4) y 30 m (sondeos 3, 5, 6, 8, 9 y 11). La mayoría de ellos cortan cavidades y otras aperturas del sistema kárstico, que representan hasta el 50% de la longitud del sondeo en los puntos 1 y 4. Antes de la perforación de los sondeos, las cavidades fueron identificadas por métodos geofísicos (ADARO, 1991; Vadillo *et al.*, 2012).

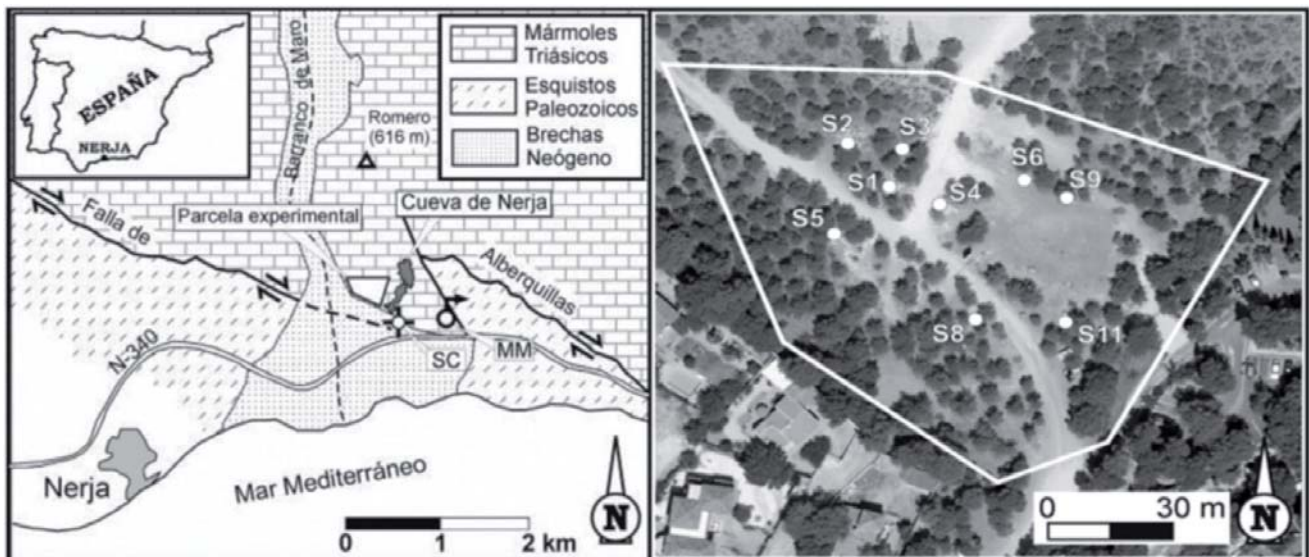


Figura 2. (Izq.) Esquema geológico del área de estudio en el que se indica la ubicación de la Cueva de Nerja y de la parcela experimental; (Dcha.) Situación de los nueve sondeos en la parcela experimental

Estudios anteriores (Benavente *et al.*, 2010) en los sondeos revelaron concentraciones muy altas de CO<sub>2</sub> con valores promedio entre 10.000 y 40.000 ppmv y un máximo cercano a 60.000 ppmv. Las medidas en la zona no saturada a través de perfiles verticales de concentración de gas muestran un aumento del contenido del CO<sub>2</sub> con la profundidad. A su vez, los valores mínimos son los típicos de la atmósfera y la zona de transición entre las elevadas concentraciones y los valores atmosféricos de CO<sub>2</sub> se alcanza en todos los puntos a diferentes profundidades.

Se observa un patrón general en la distribución de la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de los sondeos con variaciones estacionales en la distribución y los valores de las concentraciones. Este patrón correspondería a procesos de ventilación en los que también se vería involucrada la propia Cueva de Nerja (Benavente *et al.*, 2015).



La señal isotópica de <sup>13</sup>C del CO<sub>2</sub> indica la presencia de tres fuentes de CO<sub>2</sub> en la zona no saturada: la atmósfera, el suelo y la degradación microbiana de materia orgánica, cuya señal isotópica oscila entre -21 y -23 ‰ (Vadillo et al., 2010).

Las actividades de <sup>14</sup>C en la zona no saturada no suelen ser medidas y existe un desconocimiento general de cómo varían espacialmente en un acuífero. Bajo esta premisa, Wood et al., (2014) modelan la influencia de diferentes fuentes de producción de CO<sub>2</sub>, tanto moderna como antigua, en perfiles a diferentes profundidades.

En este estudio se presentan los primeros valores de <sup>14</sup>C que se han obtenido de muestras recogidas en el sondeo 9, para arrojar luz de manera preliminar sobre la edad de ese CO<sub>2</sub> y contribuir así al conocimiento de los flujos de aire en la zona vadosa en el entorno de la Cueva de Nerja.

### Metodología

Para muestrear el aire del sondeo se utilizó una bomba de diafragma KNF, conectada a un tubo flexible de plástico introducido en el sondeo hasta una profundidad de 29 m (Fig. 3). El aire succionado se recogió en dos bolsas Tedlar de 0,5 L de capacidad. Las muestras recogidas



Figura 3. Extracción de CO<sub>2(g)</sub> en el sondeo 9 mediante una bomba de diafragma KNF

fueron analizadas en el *Centre for Isotope Research* (CIO) de la Universidad de Groningen, Países Bajos, mediante espectrometría de masas (*AMS dating*).

La medida de la concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura del aire y humedad relativa se realizó con un medidor GM70 de la marca Vaisala con un rango de medida de 5%, acoplado a los sensores HMP45 para las medidas de humedad relativa y temperatura.

## Resultados y discusión

La concentración de CO<sub>2</sub> a la profundidad de 29 m fue de 47.500 ppmv, mientras que la humedad relativa y la temperatura fueron de 84,2 % y 22,7 °C. La concentración de CO<sub>2</sub> se incrementa desde la superficie hacia el fondo del sondeo (Fig. 4). La interfase entre el CO<sub>2</sub> atmosférico y el CO<sub>2</sub> del interior del sondeo se sitúa entre 7 y 14 m. Esta interfase suele ascender o descender estacionalmente en función de variables como la temperatura y la presión barométrica. El grado de fisuración y karstificación determinan también, junto con las variables ambientales, el movimiento de esta interfase. También, según se ha dicho antes, estos movimientos pueden estar relacionados con la ventilación convectiva de la Cueva de Nerja, aspecto que está siendo objeto de estudio en la actualidad. Además, el sondeo 9 presenta, de forma general en todas las campañas de muestreo, los valores medios de contenido de CO<sub>2</sub> más altos de todos los sondeos, junto con el sondeo 5, siendo ambos sondeos los que presentan menos evidencias de karstificación (Vadillo *et al.*, 2012). Los altos valores determinados en este sondeo, en comparación con el resto de sondeos, podrían deberse, por tanto, a una menor re-

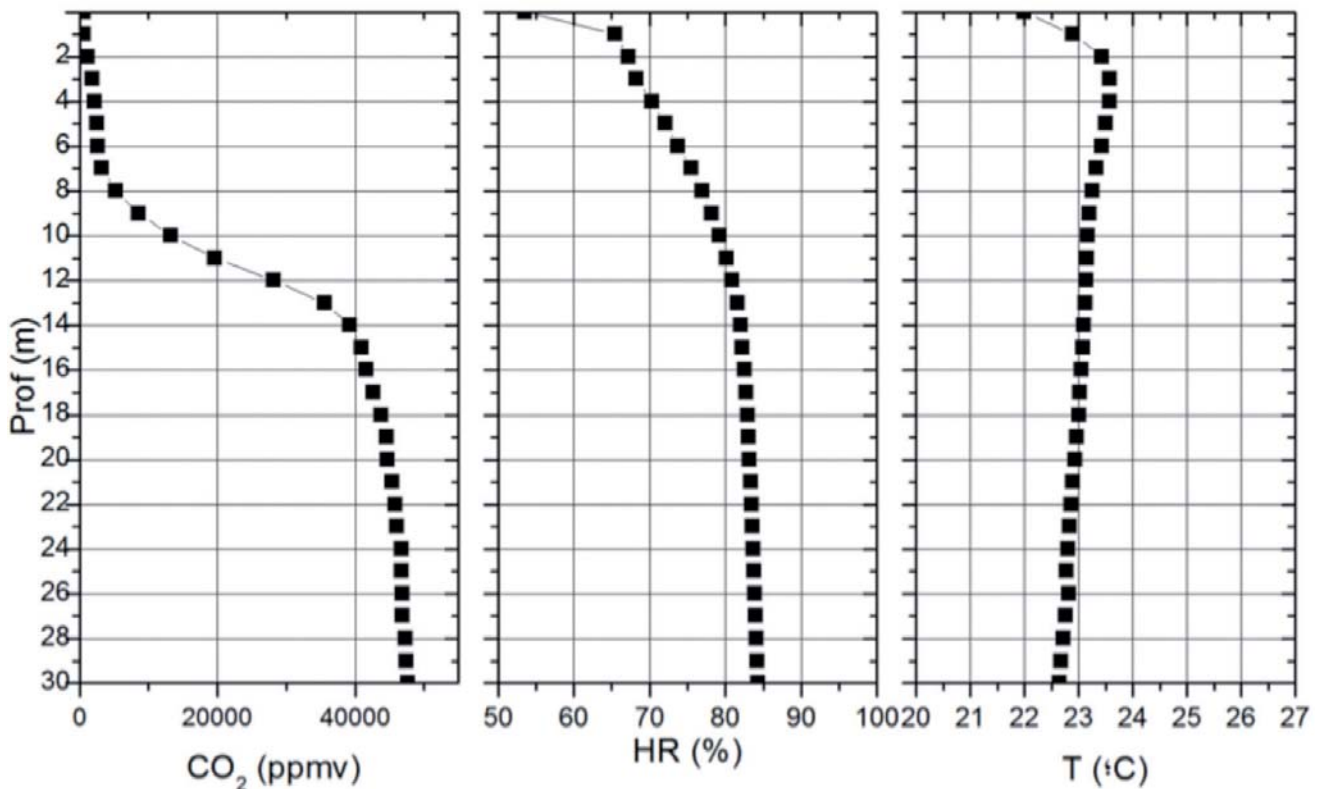


Figura 4. Perfiles verticales de concentración de CO<sub>2</sub> (ppmv), humedad relativa (%) y temperatura (°C) en el sondeo 9 (24 marzo 2015)

novación del aire vadoso. La humedad relativa tiende a aumentar con la profundidad y alcanza el 100 % en invierno, mientras que resulta progresivamente menor hacia los meses de verano.

El valor estandarizado y normalizado de <sup>14</sup>C de la muestra es de 106.1 ± 0.4 % (pMC). Este valor equivale al valor medio de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> atmosférico (Fig. 5) que se dio hace aproximadamente 10 años, medidas en diferentes estaciones europeas de monitorización (como la estación de Lutjewad, en Países Bajos; y la de Jungfrauoch, en Suiza). Los valores actuales de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> que se miden en la estación de Lutjewad son de 102%. La Fig. 5 representa los valores de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> en el período 2003-2014 en la estación de Lutjewad. En la determinación de carbono biogénico, se denomina pMC al porcentaje de carbono moderno y representa la señal de <sup>14</sup>C medida en la muestra (Palstra y Meijer, 2014). El CO<sub>2</sub> del aire de la muestra analizada parece provenir de fuentes de carbono moderno (< 200 años), ya que el valor es similar a los valores atmosféricos actuales de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>, poniendo de manifiesto que el CO<sub>2</sub> no proviene al 100% de un carbono fósil. Se entiende por carbono fósil aquel carbono con un tiempo superior a 50.000 años y sin contenido en <sup>14</sup>C.

El carbono 14 del CO<sub>2</sub> del suelo varía a lo largo del ciclo anual debido a la variación estacional de la contribución de la respiración de las raíces de las plantas y la descomposición microbiana de la materia orgánica que se produce en el suelo. La respiración de las raíces puede asumirse como un valor de <sup>14</sup>C cercano al nivel atmosférico ya que se trata de un carbono reciente. Sin embargo, el <sup>14</sup>C proveniente de descomposición puede estar enriquecido debido a la contribución del <sup>14</sup>C de los ensayos nucleares (Dörr y Münnich, 1986; Hartley et al., 2012). Por tanto, la señal isotópica de <sup>14</sup>C de CO<sub>2</sub> es un reflejo del tiempo de formación del CO<sub>2</sub> y la edad.

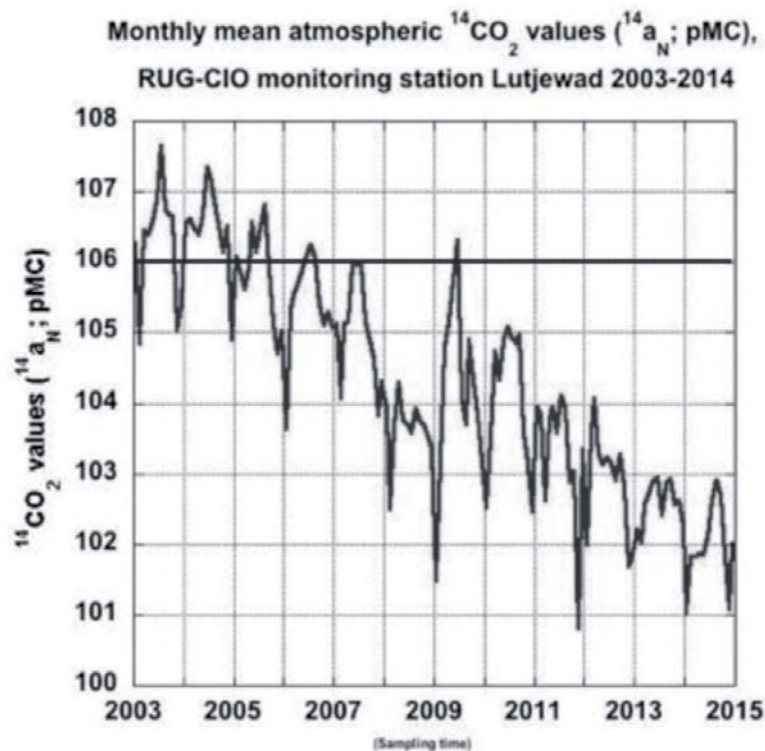


Figura. 5. Tendencia de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> en el período 2003-2014. Línea horizontal: valor de <sup>14</sup>C de la muestra analizada y posibles edades (Palstra y Meijer, 2014). <http://www.rug.nl/research/isotope-research/klanten/14cbio-values-standards>

Si el CO<sub>2</sub> del aire del acuífero está formado por carbono moderno que entró al sistema en diferentes periodos de tiempo, el valor medio de <sup>14</sup>C del carbono resultante sería un valor proporcional a los valores de <sup>14</sup>C de cada período de tiempo, y por tanto sería un <sup>14</sup>C mayor a los valores de <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> atmosférico actuales (>102 %).

El valor de <sup>14</sup>C medido en la muestra analizada es más elevado que el valor <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> atmosférico actual. Esto puede deberse, sin embargo, a dos razones: 1) una mezcla de carbono de diferentes periodos de tiempo modernos, por lo que el CO<sub>2</sub> medido puede llamarse moderno (comparado con uno antiguo (>200 años) o incluso fósil: >50.000 años); o 2) el CO<sub>2</sub> puede ser un carbono moderno con un determinado valor de <sup>14</sup>C más alto de 106%, que es el valor de las muestras, mezclado con carbono antiguo con valores de <sup>14</sup>C entre 0 y 102%, ya que valores menores de 102 % sólo pudieron darse en el pasado.

## **Conclusiones**

El aire de la zona no saturada del acuífero en el que se ubica la Cueva de Nerja muestra un valor de <sup>14</sup>C del CO<sub>2</sub> de 106,1 ± 0.4 % (pMC). Este valor correspondería al valor medio de <sup>14</sup>C hace 10 años. Sin embargo, este valor puede deberse tanto a una mezcla entre un CO<sub>2</sub> actual y un CO<sub>2</sub> moderno, como a una mezcla entre carbono antiguo y otro moderno que permita alcanzar ese valor de 106,1 %.

Por tanto, para poder discernir con mayor exactitud la edad del CO<sub>2</sub> de la zona no saturada en el entorno de la Cueva de Nerja sería necesario realizar más medidas de <sup>14</sup>C que permitan determinar las fracciones de carbono actual, y del carbono antiguo de las muestras.

## **Agradecimientos**

Trabajo financiado por la Fundación Cueva de Nerja a través del proyecto "Estudio del origen y comportamiento de los flujos de CO<sub>2</sub> de la zona no saturada en la parcela experimental de la Cueva de Nerja". Se agradecen los comentarios y sugerencias del revisor anónimo.

## **Referencias**

- ADARO, S.A. 1991. *Prospección gravimétrica en las Cuevas de Nerja (Málaga)*. Informe de resultados.
- Andreo, B., Carrasco, F. y Sanz de Galdeano, C. 1993. Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja. En: Carrasco, F. (ed), *Trabajos sobre la Cueva de Nerja, n°3*. Patronato sobre la Cueva de Nerja, 165-187.
- Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, A., Liñán, C. y Moral, F. 2010. Air carbon dioxide contents in the vadose zone of a mediterranean karst. *Vadose Zone Journal*, 9, 126-136.
- Benavente, J., Vadillo, I., Liñán, C., del Rosal, Y. y Carrasco, F. 2015. Influence of the ventilation of a karst show cave on the surrounding vadose CO<sub>2</sub> reservoir (Nerja, South Spain). *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-015-4709-8.



- Carbon Dioxide Information Analysis Center,  $\delta^{14}\text{CO}_2$  Record from Vermont: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/cent-verm.html>
- Centre for Isotope Research, University of Groningen: <http://www.rug.nl/research/isotope-research/klantent/14cbio-values-standards>
- Dörr, H. y Münnich, K.O. 1986. Annual variations of the <sup>14</sup>C content of soil CO<sub>2</sub>. *Radiocarbon*, 28 (2A), 338-345.
- Ek, C. y Gewalt, M. 1985. Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium in comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10 (2), 173-187.
- Hartley, I.P., Garnett, M.H., Sommerkorn, M., Hopkins, D.W., Fletcher, B.J., Sloan, V.L., Phoenix, G.K., y Wookey, P.A. 2012. A potential loss of carbon associated with greater plant growth in the European Arctic. *Nature Climate Change*, 2, 875-879.
- Liñán, C., Calaforra, J.M., Cañaveras, J.C., Carrasco, F., Fernández Cortés, A., Jiménez Sánchez, M., Martín Rosales, W., Sánchez Martos, F., Soler, V. y Vadillo, I. 2004. Experiencias de monitorización medioambiental en cavidades turísticas. Andreo, B. y Durán, J.J. (Eds.), *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*, Instituto Geológico y Minero de España, 385-429.
- Liñán, C., Simón, M.D., Del Rosal, Y. y Garrido, A. 2007. Estudio preliminar del clima en el entorno de la Cueva de Nerja (Andalucía, provincia de Málaga). *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 24, 159-168.
- Palstra, S.W.L., y Meijer, H.A.J. 2014. Biogenic carbón fraction of biogas and natural gas fuel mixtures determined with <sup>14</sup>C. *Radiocarbon*, 56 (1), 7-28.
- Pérez, I. y Andreo, B. 2007. Sierra Almirajara y Alberquillas. *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga*, 2, 144-148. Instituto Geológico y Minero de España – Diputación de Málaga, Madrid.
- Vadillo, I., Benavente, J., Neukum, C., Grützner, C., Carrasco, F., Azzam, R., Liñán, C. y Reicherter, K. 2012. Surface geophysics and borehole inspection as an aid to characterizing karst voids and vadose ventilation patterns (Nerja research site, S. Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 82, 153-162.
- Vadillo, I., Benavente, J., Soler, A., Carrasco, F. y Liñán, C. 2010. Isotopic (<sup>13</sup>C) Signature of CO<sub>2</sub> Sources in the Vadose Zone of a Mediterranean Karst (Nerja Cave Site, Southern Spain). Andreo, B. et al (Eds), *Advances in research in Karst Media*, 463-468.
- Wood, C., Cook, P.G., Harrington, G.A., Meredith, K. y Kipfer, R. 2014. Factors affecting carbon-14 activity of unsaturated zone CO<sub>2</sub> and implications for groundwater dating. *Journal of Hydrology*, 519, 465-475.

## Procesos de ventilación natural en el sistema Cueva de Nerja - Cueva Pintada (Nerja, Málaga)

C. Liñán Baena <sup>(1,2)</sup> y Y. del Rosal Padial <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Investigación, Fundación Cueva de Nerja. C/ Carretera de Maro, s/n. 29787-Nerja, Málaga, cbaena@cuevadenerja.es. yolanda@cuevadenerja.es

<sup>(2)</sup> Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. Campus de Teatinos s/n, 29071- Málaga, crilinbae@uma.es

---

### RESUMEN

El análisis de los datos climáticos registrados en 2015 en Cueva de Nerja y en una cavidad próxima a ésta (Cueva Pintada), ha permitido confirmar hipótesis previas sobre la relación existente entre ambas y precisar el modelo de ventilación natural de la Cueva de Nerja. Las variaciones observadas en la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de ambas cavidades permiten diferenciar, a lo largo del ciclo anual, cuatro periodos con distinto grado de ventilación natural –*invierno, primavera, verano* y *otoño*– en función de la relación existente entre las temperaturas del aire exterior ( $T_{ext}$ ) e interior ( $T_{int}$ ). Durante el *invierno*,  $T_{ext}$  es, por regla general, inferior a  $T_{int}$ . Existe una alta ventilación natural, con flujos de aire unidireccionales que se dirigen desde Cueva de Nerja hacia Cueva Pintada. Puntualmente se registran inversiones de corta duración en las que  $T_{ext} > T_{int}$ , momentos en los que se favorece la entrada de aire exterior a través de Cueva Pintada, que alcanza las salas de Montaña e Inmensidad. Durante la *primavera*  $T_{ext}$  es, por lo general, superior a  $T_{int}$ . El grado de ventilación natural es menor al de invierno, con una circulación general del aire desde el sector turístico hacia el no habilitado y finalmente hacia Cueva Pintada. Los incrementos en la diferencia  $T_{ext} - T_{int}$  favorecen la entrada puntual de aire exterior a través de Cueva Pintada, que llega a alcanzar la Sala de Columnas de Hércules. En *verano*,  $T_{ext} > T_{int}$  y el grado de ventilación natural es mínimo. Cuando la diferencia  $T_{ext} - T_{int}$  es mayor o igual a 5 °C cambia la dirección general de los flujos de aire, de forma que el aire exterior entra por Cueva Pintada y sale por Cueva de Nerja. Finalmente, durante el *otoño*, la diferencia  $T_{ext} - T_{int}$  sigue siendo positiva pero inferior, por lo general, a 5 °C. El grado de ventilación natural es mayor que durante el verano, con flujos que se dirigen desde Cueva Pintada hacia Cueva de Nerja. En los momentos puntuales en los que  $T_{ext} < T_{int}$  se favorece la entrada de aire exterior por las cotas bajas de la Cueva de Nerja, proceso que limita, a su vez, la entrada de aire por Cueva Pintada.

**Palabras clave:** CO<sub>2</sub> del aire, Cueva de Nerja, Cueva Pintada, temperatura, ventilación natural.

### *Natural ventilation processes in the Nerja cave - Pint de Cave System (Nerja, Málaga)*

#### ABSTRACT

The analysis of climate data recorded in 2015 in Nerja Cave and Pintada Cave has allowed to confirm previous hypotheses on the relationship between these caves and define the model of natural ventilation of the Nerja Cave. The observed variations in the concentration of CO<sub>2</sub> in the air in both cavities allowed to differentiate, throughout the annual cycle, four periods with different degrees of natural ventilation –*winter, spring, summer* and *autumn*– depending on the relationship between outside air temperature ( $T_{ext}$ ) and inner air temperatures ( $T_{int}$ ). During the winter,  $T_{ext}$  is generally lower than  $T_{int}$ . There is a high natural ventilation, with unidirectional air flows from Nerja Cave to the Pintada Cave. During the short-term inversions punctually recorded ( $T_{ext} > T_{int}$ ), the outside air go into the Pintada

Cave, which reaches the Immensity and Mountain halls. During spring,  $T_{ext}$  is usually greater than  $T_{int}$ . The degree of natural ventilation is lower than in winter time, with a general circulation of air from the tourist sector to the non-tourist area and finally reaching Pintada Cave. The increases in  $T_{ext}-T_{int}$  difference favoring the entrance of outside air through Pintada Cave, which reaches the Hall of Columns of Hercules. In summer,  $T_{ext} > T_{int}$  and the natural ventilation rate is minimal. When the difference  $T_{ext}-T_{int}$  is greater than or equal to 5 °C changes the general direction of air flow, so that the outside air enters to Nerja Cave and exits through the Pintada Cave. Finally, in autumn, the  $T_{ext}-T_{int}$  difference is positive but usually lower than 5 °C. The degree of natural ventilation is higher than during the summer, with airflow going from Pintada Cave to Nerja Cave. In some periods, when  $T_{ext} < T_{int}$ , the outside air coming by the lowest entrances of the Cueva de Nerja is favored. This process limits the air input from Cueva Pintada.

**Key words:** air CO<sub>2</sub>, air temperature, Nerja Cave, Pintada Cave, natural ventilation.

## Introducción

La Cueva de Nerja, Bien de Interés Cultural con categoría de Zona Arqueológica y Lugar de Interés Geológico de relevancia internacional, es una de las cuevas turísticas más importantes de España, con una media de 486.000 visitantes anuales para el período 1988-2013. La cueva, con un desarrollo prácticamente horizontal y un volumen del orden de 300.000 m<sup>3</sup>, tiene tres entradas, un abrigo natural habilitado para la entrada turística y dos torcas, ubicadas respectivamente a 158, 161 y 162 m s.n.m. (S.E.M. 1985). Tan sólo un tercio de la cueva, las denominadas Galerías Turísticas, es visitable. La cavidad dispone de una completa red de monitorización medioambiental, con estaciones de registro automáticas que registran, cada hora, la temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> y radón en el aire, entre otros parámetros (Carrasco et al., 2001; Liñán et al., 2014). Una estación meteorológica ubicada junto a la cavidad registra los principales parámetros climáticos del exterior (Liñán et al., 2007).

Cueva Pintada (250 m s.n.m.) es una pequeña cavidad muy próxima a la Cueva de Nerja, que fue explorada a finales de los años 70, por la posibilidad de que ambas cuevas estuviesen conectadas (G.E.M.A., 1976). Las exploraciones espeleológicas resultaron infructuosas en este sentido de modo que, en 1979, se decidió perforar un pozo de casi 100 m de profundidad, con objeto de comunicar artificialmente las dos cuevas. Los trabajos finalizaron en 1982, sin alcanzar el objetivo previsto. En abril de 2013 se inició la investigación ambiental de esta cavidad, con la instalación de un sensor VAISALA de temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> del aire, que registraba datos cada hora. Los resultados obtenidos confirmaron la existencia de una conexión física entre Cueva de Nerja y Cueva Pintada, no accesible para las personas, que permitieron establecer un primer modelo general de circulación del aire entre ambas cuevas (Liñán y del Rosal, 2014; Liñán et al., 2014).

La progresiva instalación de nuevos sensores de medida en las principales salas de la Cueva de Nerja, en el marco del Proyecto Interdisciplinar de Investigación aplicada a la Cueva de Nerja y la continuidad de la investigación en Cueva Pintada han proporcionado nuevos datos de interés. En la presente comunicación se analizan parte de los datos ambientales registrados durante el año 2015, con objeto de precisar el modelo de ventilación natural de la Cueva de Nerja.

## Resultados y discusión

### Temperatura del aire

En Cueva Pintada, la temperatura del aire ha estado comprendida entre 18,91 y 23,50 °C (Tab. 1), con un valor medio de 20,75 °C para el período de registro que, en este caso, ha estado comprendido entre junio y noviembre. La evolución de este parámetro a lo largo del ciclo anual es similar a la de la temperatura del aire exterior (Fig. 1).

En Cueva de Nerja, la temperatura media del aire aumenta, por lo general, desde las salas de las Galerías Turísticas, con un valor medio anual de 18,45 °C, hacia las Galerías Nuevas (Tab. 1), con 19,78 °C de valor medio anual. La temperatura del aire exterior ( $T_{ext}$ ), con un valor medio anual de 19,05 °C, se mantiene permanentemente por encima de la temperatura de la Cueva de Nerja ( $T_{int}$ ) desde mediados de junio hasta septiembre. El resto del año, la temperatura exterior es, por lo general, más baja que la del interior de la cueva, salvo en períodos puntuales de corta duración en los que esta relación se invierte (Fig. 1). En las Galerías Turísticas y en la Sala de Columnas de Hércules, la evolución temporal de la temperatura interior es similar a la del exterior, si bien desde agosto a octubre, la temperatura del aire de estas salas permanece en valores altos, disminuyendo a un ritmo más lento que la temperatura exterior (Fig. 1).

	Exterior	Cueva de Nerja						C. Pintada	
		Galerías Turísticas			Galerías Altas	Galerías Nuevas			
		Belén	Cascada	Cataclismo	Hércules	Inmensidad	Montaña		
n		350	365	304	275	344	308	131	
max		1552	1419	1305	1032	1066	1069	856	
min		435	476	360	466	451	472	370	
med		713	790	701	629	590	627	542	
s		264	240	198	149	134	133	125	
v (%)		37	30	28	24	23	21	23	
rango		1117	943	945	566	615	597	486	
n		365	346	365	307	343	276	308	150
max		31,31	19,80	19,97	19,68	19,79	20,21	19,92	23,50
min		8,48	13,18	17,57	18,13	19,10	19,92	19,77	18,91
med		19,05	17,35	18,99	19,01	19,47	20,05	19,86	20,75
s		5,15	1,84	0,72	0,52	0,20	0,07	0,04	1,21
v (%)		27,02	10,62	3,78	2,75	1,04	0,33	0,19	5,83
rango		22,83	6,62	2,40	1,56	0,69	0,29	0,15	4,60

Tabla 1. Parámetros estadísticos básicos relativos a la temperatura y concentración de  $CO_2$  del aire en el exterior, Cueva de Nerja y Cueva Pintada (valores medios diarios, año 2015). Leyenda: n-número de medidas, max-valor máximo, min-valor mínimo, med-valor medio, s- desviación estándar, v-coeficiente de variación

En las salas de la Inmensidad y Montaña, las más internas y con mayor espesor de roca por encima de ellas, la temperatura del aire muestra una elevada estabilidad, con rangos de variación inferiores al 0,4 % (Tab.1). Las mínimas variaciones que se producen en la temperatura del



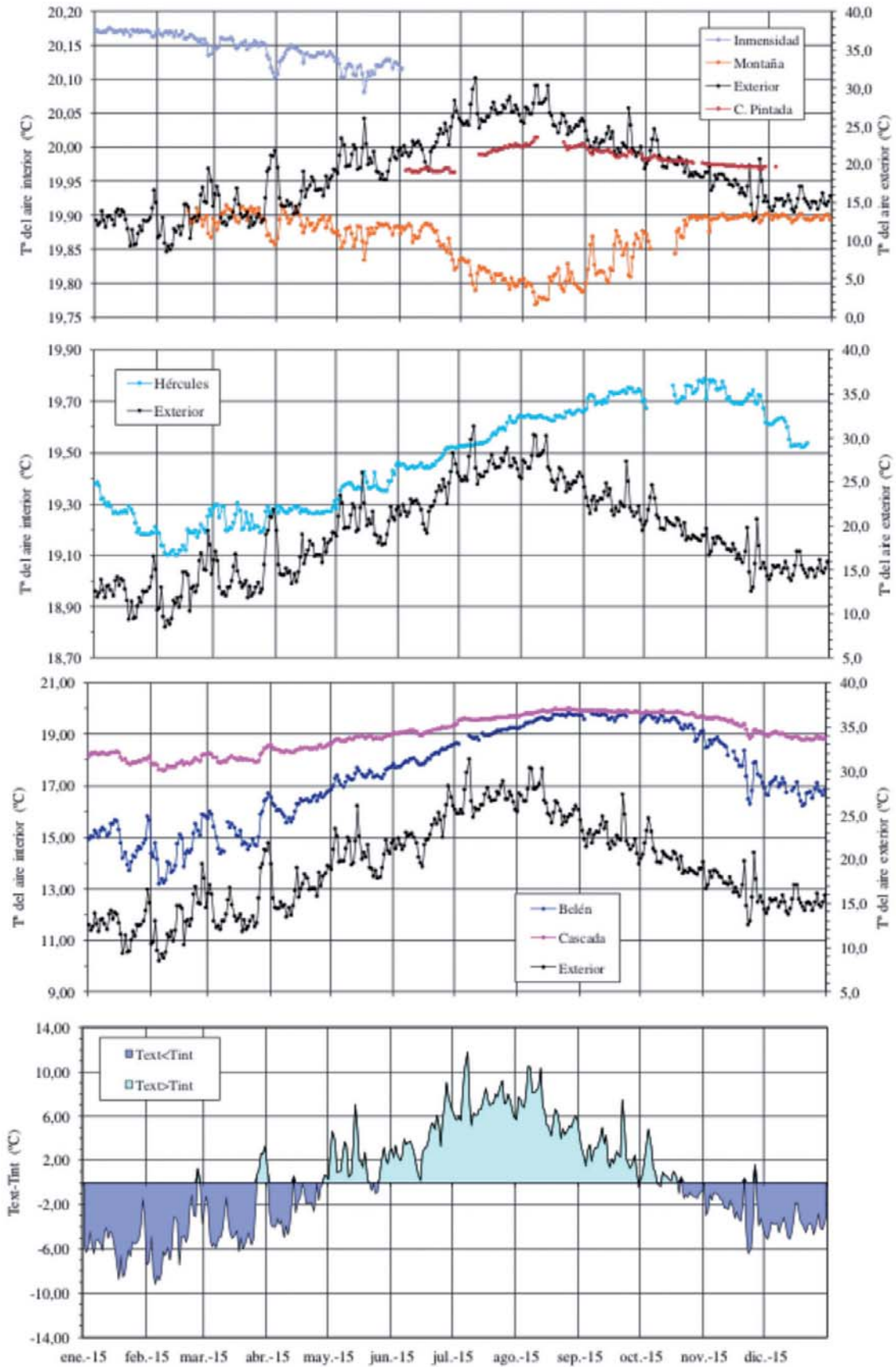


Figura 1. Evolución temporal de la temperatura del aire en el exterior, en distintas salas de la Cueva de Nerja y en Cueva Pintada (año 2015). Valores medios diarios calculados a partir de datos horarios

aire están claramente relacionadas con cambios en la temperatura exterior, pero en este caso, a diferencia de lo observado en el resto de la cueva y en Cueva Pintada, la correlación lineal entre estas dos variables es negativa ( $R=0.89$ ). Así, cuando aumenta la temperatura del aire en el exterior, disminuye la temperatura del aire en ambas salas y viceversa (Fig. 1). No se observa ningún desfase temporal entre las variaciones de temperatura exterior e interior.

## **CO<sub>2</sub> del aire**

En la Cueva de Nerja, la concentración de CO<sub>2</sub> del aire ha estado comprendida entre 360 y 1552 ppm, con un valor medio de 735 ppm en las Galerías Turísticas y de 615 ppm en el sector no habilitado. En Cueva Pintada sólo se ha medido este parámetro durante los meses de junio a septiembre, registrándose valores comprendidos entre 370 y 856 ppm, con un valor medio de 542 ppm (Tab.1). Como refleja la figura 2, la evolución temporal de este parámetro es, a escala anual, similar a la registrada en las salas del sector no habilitado de la Cueva de Nerja.

En la Cueva de Nerja, la variación temporal del CO<sub>2</sub> del aire en el sector no habilitado es, a escala anual, similar a la del sector turístico, salvo durante los meses de junio a septiembre. En estos meses, la concentración de CO<sub>2</sub> en las Galerías Altas y Nuevas es notablemente inferior a la del sector turístico y aproximadamente constante, en torno a 500 ppm (Fig. 2). Esta evolución del CO<sub>2</sub> está estrechamente relacionada con la evolución estacional de la diferencia de temperatura entre el aire exterior y el aire de la cavidad (que condiciona la relación de densidades entre el aire exterior-interior) y con el número de visitantes. Así, a lo largo del ciclo anual se diferencian cuatro períodos (Fig. 2):

- (1) *Invierno*. Desde finales de octubre a finales de abril. La temperatura exterior es, por regla general, inferior a la temperatura del aire de la cueva. Los picos de CO<sub>2</sub> del aire de la cueva coinciden con los picos de visitantes. La variación temporal del CO<sub>2</sub> en el sector no habilitado es, por lo general, idéntica a la del sector turístico, ligeramente desfasada (Fig. 2). Existe una alta ventilación natural (Cañete 1997; Dueñas *et al.*, 1999), con flujos de aire unidireccionales que se dirigen desde el sector turístico al no habilitado y salen finalmente por Cueva Pintada.

Excepcionalmente se producen inversiones de corta duración en las que  $T_{ext} > T_{int}$  (Figs. 2 y 3). En estos momentos se reduce la entrada de aire exterior a través de las bocas ubicadas a menor cota (torcas + entrada turística), de forma que el aire del sector turístico aumenta su contenido en CO<sub>2</sub> de forma significativa y, también, aunque en menor grado, el aire de las salas de Hércules e Inmensidad, dado que el grado de ventilación natural también disminuye en estos momentos. El contenido en CO<sub>2</sub> del aire de la Sala de la Montaña disminuye, llegando a ser menor que el del aire de Inmensidad (Fig. 3). Este hecho reflejaría la entrada de aire exterior a través de Cueva Pintada, pero de forma limitada, ya que sólo alcanzaría la Sala de la Montaña.

- (2) *Primavera*. Desde finales de abril hasta mediados de junio. La temperatura exterior es superior a la temperatura del aire de la cueva. Los picos de CO<sub>2</sub> del aire de la cueva no coinciden con los picos de visitantes (Fig. 2). La variación temporal del CO<sub>2</sub> en el sector no habilitado muestra una correlación negativa con la del sector turístico: incrementos

de CO<sub>2</sub> en el sector turístico se corresponden con disminuciones en el no habilitado, y viceversa. Los incrementos de CO<sub>2</sub> en el sector turístico coinciden con incrementos en la diferencia temperatura exterior-interior (Fig. 2), que hacen disminuir la entrada de aire exterior a través de las entradas ubicadas a menor cota (torcas+entrada turística) al tiempo que favorecen la entrada de aire a través de Cueva Pintada, observándose descensos puntuales en la concentración de CO<sub>2</sub> del aire de esta cueva, de la Sala de la Montaña y, poco después, en las salas de Inmensidad y Hércules. En Montaña, además, los descensos son ligeramente superiores, por su mayor proximidad al exterior.

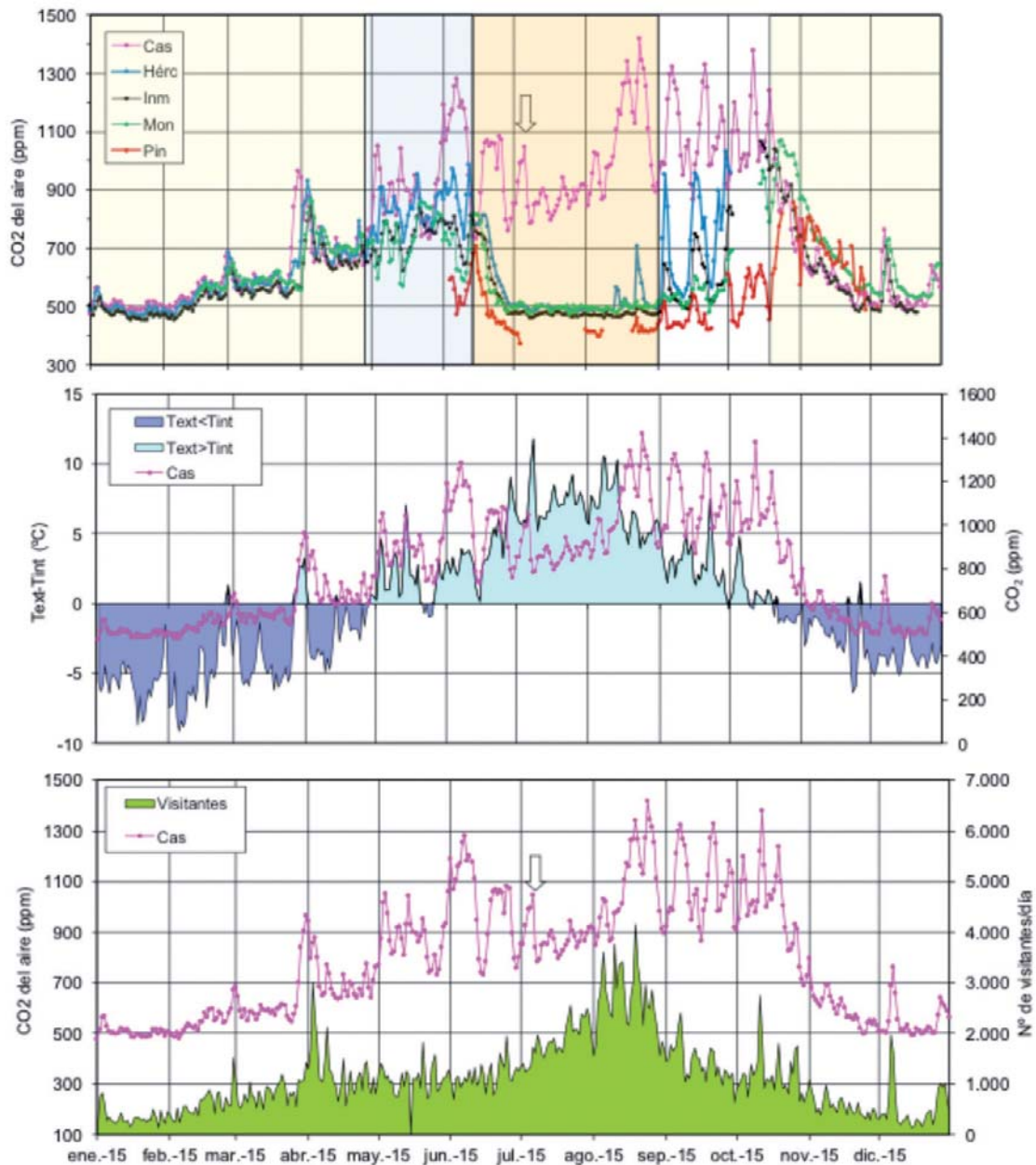


Figura 2. Evolución del CO<sub>2</sub> del aire en Cueva de Nerja y Cueva Pintada durante 2015 frente a la diferencia de temperatura del aire entre el exterior e interior y al número de visitantes. En el gráfico superior se señalan, con franjas de distinto color, los distintos períodos citados en el texto. Leyenda: Cas-Sala de la Cascada, Hérc-Sala de Hércules, Inm-Sala de la Inmensidad, Mon-Sala de la Montaña, Pin-Cueva Pintada. La flecha señala la celebración del Festival de Música y Danza en la Cueva de Nerja

Existe un menor grado de ventilación natural que durante el período de invierno. La circulación general del aire es desde el sector turístico hacia el no habilitado y finalmente hacia Cueva Pintada, pero, cuando la diferencia  $T_{ext} - T_{int}$  aumenta, se produce la entrada puntual de aire exterior a través de Cueva Pintada, que llega a alcanzar la Sala de Columnas de Hércules.

Solo se ha registrado una inversión puntual a finales de mayo, en la que  $T_{ext} < T_{int}$  (Fig. 4). En esta situación, se favorece la entrada de aire exterior a través de las torcas+entrada turística y no se produce entrada de aire por Cueva Pintada, de forma que disminuye el  $CO_2$  en toda la cavidad, según un flujo general de aire desde las Galerías Turísticas hacia el sector no habilitado.

- (3) *Verano*. Desde mediados de junio hasta agosto. El grado de ventilación natural es el mínimo de todo el ciclo anual. La temperatura exterior supera la temperatura del aire de la cueva (Fig. 2). Los picos de  $CO_2$  del aire de la cueva no siempre coinciden con los picos de visitantes, pero la correlación es, por lo general, elevada. En agosto, el elevado número de visitantes (81.754 personas/mes, con una media de 2.637 personas/diarias y un rango de variación del 24 %) genera unos altos contenidos en  $CO_2$  en el sector turístico. La variación temporal del  $CO_2$  en el sector no habilitado es distinta a

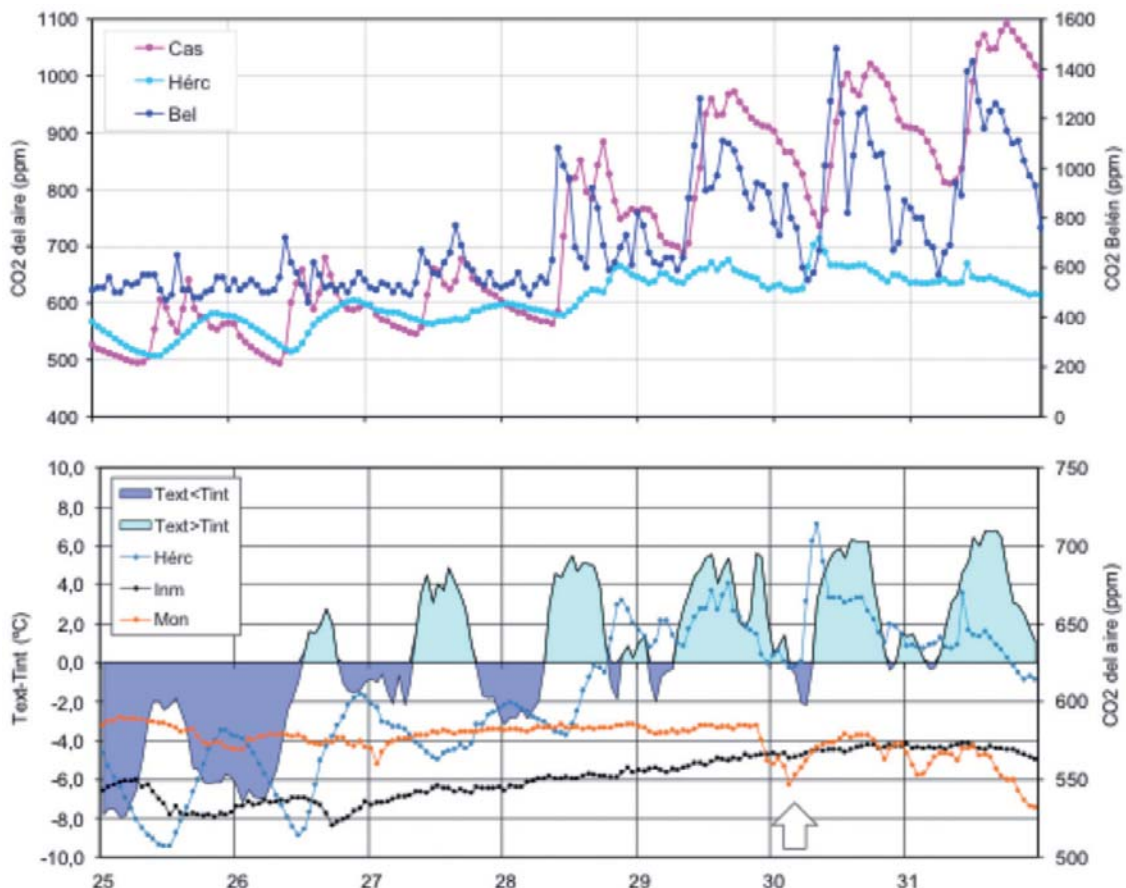


Figura 3. Evolución del  $CO_2$  del aire de la Cueva de Nerja del 25 al 31 de marzo 2015, en relación a la diferencia de temperatura del aire entre el exterior e interior de la cavidad. La flecha señala el momento en que la concentración de  $CO_2$  del aire de la Sala de la Montaña comienza a ser inferior al de la Sala de Inmensidad. A escala diaria,  $T_{ext} > T_{int}$  del 27 al 31 de marzo. Leyenda: Bel- Sala del Belén, Cas-Cascada, Hérc-Hércules, Inm-Inmensidad, Mon-Montaña



la del sector turístico. El contenido en  $\text{CO}_2$  del aire del sector no habilitado y de Cueva Pintada disminuye de forma progresiva desde el inicio de este período hasta que, en julio y agosto, alcanza valores aproximadamente constantes, en torno a 500 ppm, sin que se detecten concentraciones de  $\text{CO}_2$  de origen antrópico. Incluso en las salas del Cataclismo y Cascada llega a observarse, en el mes de julio, una cierta estabilidad en los contenidos en  $\text{CO}_2$  del aire, similares a los del sector no habilitado, a pesar de ser el segundo mes del año con mayor número de visitantes, 57.217 personas/mes. El pico de  $\text{CO}_2$  que se observa a principios de julio corresponde a los días de celebración del Festival de Música y Danza (flecha en figura 2).

A medida que se incrementa la diferencia  $T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}$  (junio), disminuye la entrada de aire exterior por las torcas y entrada turística, aumentando los contenidos en  $\text{CO}_2$  del sector turístico ( $\text{CO}_2\text{Belén} > \text{CO}_2\text{Cascada} > \text{CO}_2\text{Cataclismo}$ ). El aire de la cueva, más frío, tiende a salir por dichas zonas, siendo reemplazado por aire atmosférico exterior, que entra por Cueva Pintada. Cuando la diferencia  $T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}$  es de unos  $5\text{ }^\circ\text{C}$  o superior se produce la inversión estacional de los flujos de aire, de forma que el aire exterior entra ahora por Cueva Pintada y sale por torcas + entrada turística. Al final del período, a medida que la diferencia  $T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}$  disminuye (desde mediados de agosto, aproximadamente), la salida del aire de las salas turísticas hacia el exterior es menos eficaz, lo que conlleva que el reemplazamiento de aire a través de Cueva

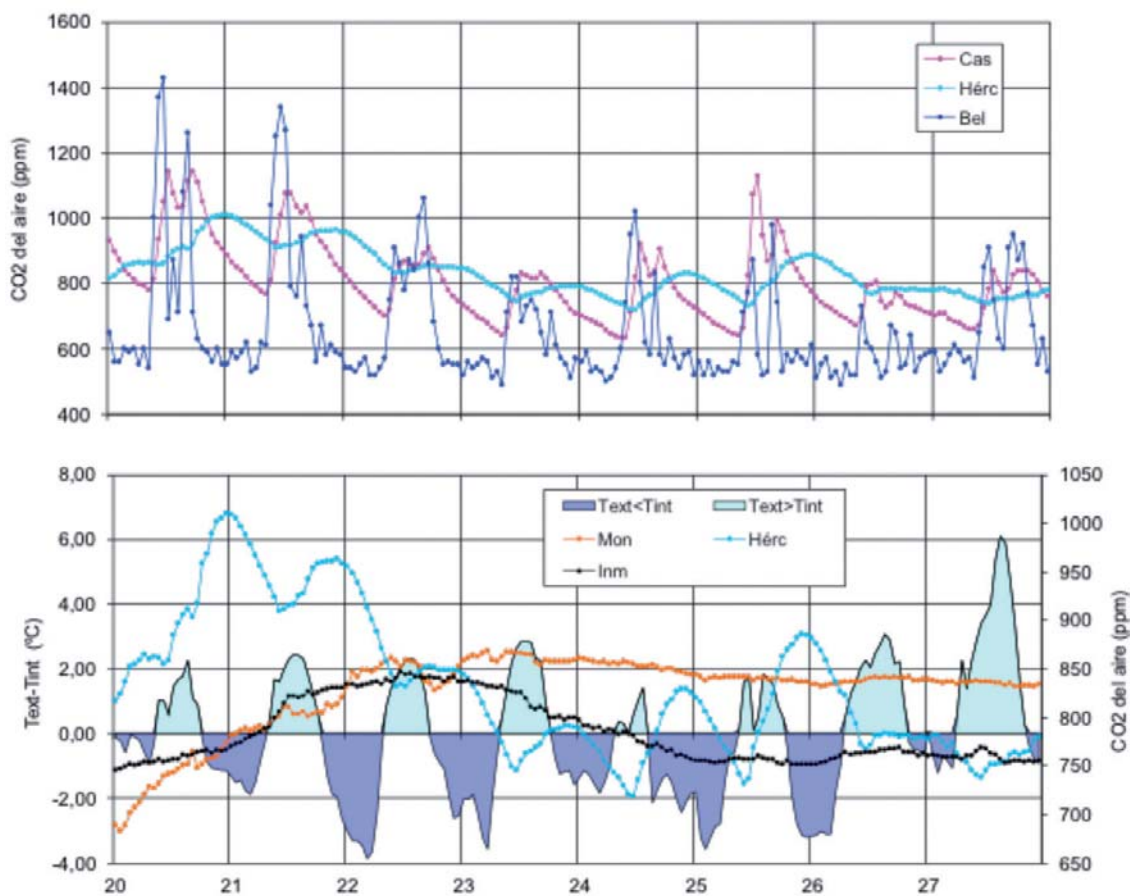


Figura 4. Evolución del  $\text{CO}_2$  del aire de la Cueva de Nerja del 20 al 27 de mayo de 2015, en relación a la diferencia de temperatura del aire entre el exterior e interior de la cavidad. A escala diaria,  $T_{\text{ext}} < T_{\text{int}}$  del 22 al 25 de mayo

Pintada también se reduzca. De este modo, aumentan la temperatura y los contenidos en CO<sub>2</sub> del sector turístico y también, aunque en menor medida, los del sector no habilitado (Fig. 2).

- (4) *Otoño*. Desde septiembre a mediados de octubre. La diferencia  $T_{ext} - T_{int}$  sigue siendo positiva pero inferior, por lo general, a 5 °C (Fig. 2). Existe una alta correlación entre picos de CO<sub>2</sub> del aire de la cueva y picos de visitantes. La variación temporal del CO<sub>2</sub> en el sector no habilitado es opuesta a la del sector turístico (incrementos de CO<sub>2</sub> en el aire del sector turístico se corresponden con disminuciones de CO<sub>2</sub> en el aire del sector no habilitado, y viceversa). Los aumentos/disminuciones de CO<sub>2</sub> en la cavidad se relacionan, una vez más, con aumentos/disminuciones de la diferencia  $T_{ext} - T_{int}$  (Fig. 5). Cuando aumenta esta diferencia (días 22 y 23 de septiembre, por ejemplo), el aire exterior entra por Cueva Pintada y sale por las torcas+entrada turística, disminuyendo el contenido en CO<sub>2</sub> del aire de todas las salas de la cueva. Cuando disminuye la diferencia  $T_{ext} - T_{int}$  (por ejemplo, del 14 al 18 de septiembre), se favorece la entrada de aire exterior por las cotas bajas de la cueva observándose la disminución del CO<sub>2</sub> del aire en las salas del sector turístico, especialmente en la sala más próxima a la entrada (Belén), proceso que limita a su vez, la entrada de aire por Cueva Pintada, aumentando el CO<sub>2</sub> del aire en el sector no habilitado (Fig. 5). Esto mismo se observa en los dos episodios puntuales en los que  $T_{ext}$  es ligeramente inferior a  $T_{int}$  (Fig. 5).

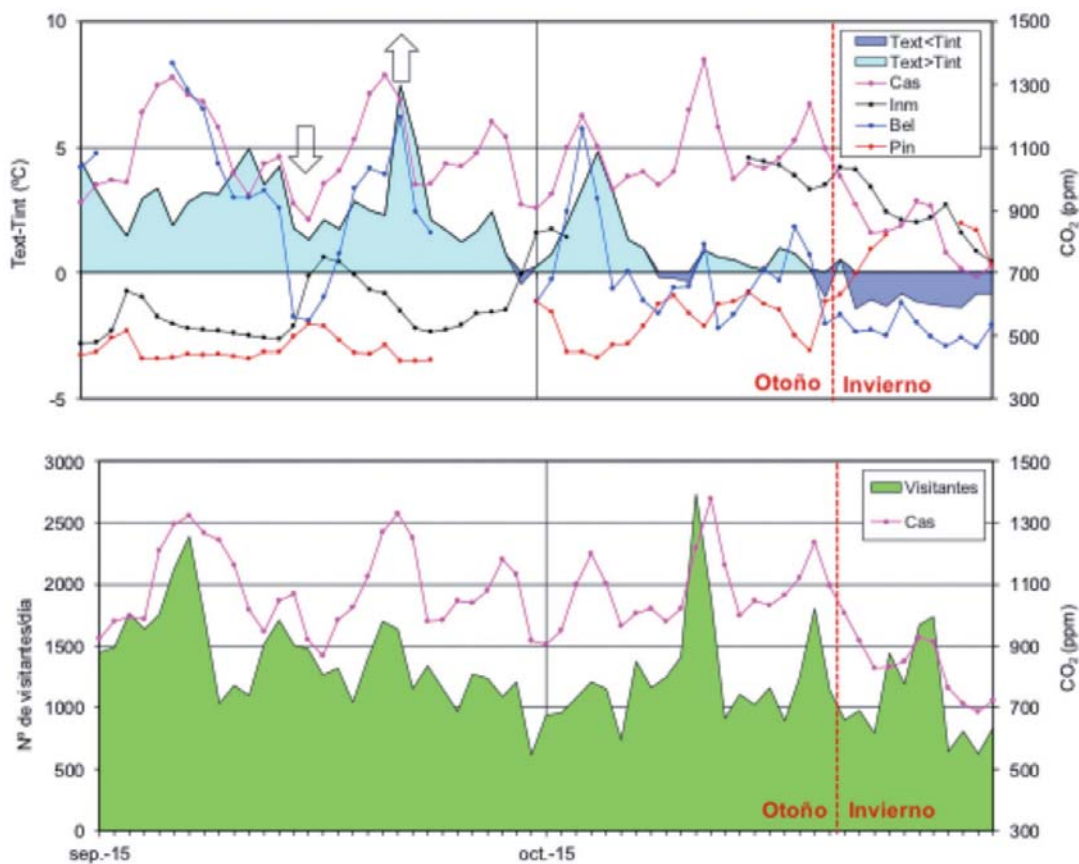


Figura 5. Evolución temporal del CO<sub>2</sub> del aire de Cueva de Nerja y de Cueva Pintada durante septiembre y octubre de 2015, en relación a la diferencia de temperatura del aire entre el exterior e interior de la cavidad y al número de visitantes. Las flechas señalan los dos períodos de otoño citados en el texto. La línea vertical separa los períodos de otoño e invierno

## Conclusiones

Los resultados obtenidos del análisis de los datos ambientales registrados durante el año 2015 en Cueva de Nerja y Cueva Pintada indican que la diferencia de temperatura entre el aire exterior y el aire interior es el factor principal que condiciona los procesos de intercambio de gases entre el exterior y el medio subterráneo. Además, corroboran las hipótesis previas sobre la relación existente entre ambas cavidades y precisan el modelo de ventilación natural establecido anteriormente para la Cueva de Nerja.

A lo largo del ciclo anual se diferencian cuatro períodos con distinto grado de ventilación natural (Fig. 6), diferenciados en función de la relación  $T_{ext} - T_{int}$ . Durante el *invierno*, el grado de ventilación natural de la Cueva de Nerja es máximo y los flujos de aire se dirigen desde las Galerías Turísticas hacia Cueva Pintada, salvo en momentos puntuales en los que la  $T_{ext}$  supera la  $T_{int}$ , en los que se produce entrada limitada de aire a través de Cueva Pintada. Durante el *verano*, el grado de ventilación natural es el mínimo del ciclo anual, y los flujos de aire se dirigen desde Cueva Pintada hacia Cueva de Nerja, favoreciendo así la eliminación del impacto antrópico en la época de mayor visitabilidad de la cavidad. Al final de este período, la salida del aire de las salas turísticas hacia el exterior es menos eficaz, lo que conlleva que el reemplazamiento de aire a través de Cueva Pintada también se reduzca, de forma que se incrementa el contenido en  $CO_2$  del aire de Cueva de Nerja y la temperatura del aire permanece en valores elevados a pesar de que está disminuyendo en el exterior. La *primavera* y el *otoño* corresponden a períodos de transición, en los que el grado de ventilación natural es intermedio. Durante la *primavera*, se constata una circulación general del aire desde el sector turístico hacia el no habilitado y finalmente hacia Cueva Pintada, pero también la entrada puntual de aire exterior a través de Cueva Pintada, que llega a alcanzar la Sala de Columnas de Hércules, pero no el sector turístico. Finalmente, en *otoño*, se registran flujos de aire que se dirigen desde Cueva Pintada hacia Cueva de Nerja en períodos en los que mayor es la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, y flujos de sentido opuesto, cuando la diferencia de temperaturas es menor o negativa.

Por último, destacamos la importancia de realizar estudios microclimáticos en cavidades abiertas al público, de cara a conocer los procesos y factores, naturales y antrópicos, que determinan sus condiciones ambientales y su dinámica y establecer, en consecuencia, el modelo de gestión más adecuado.

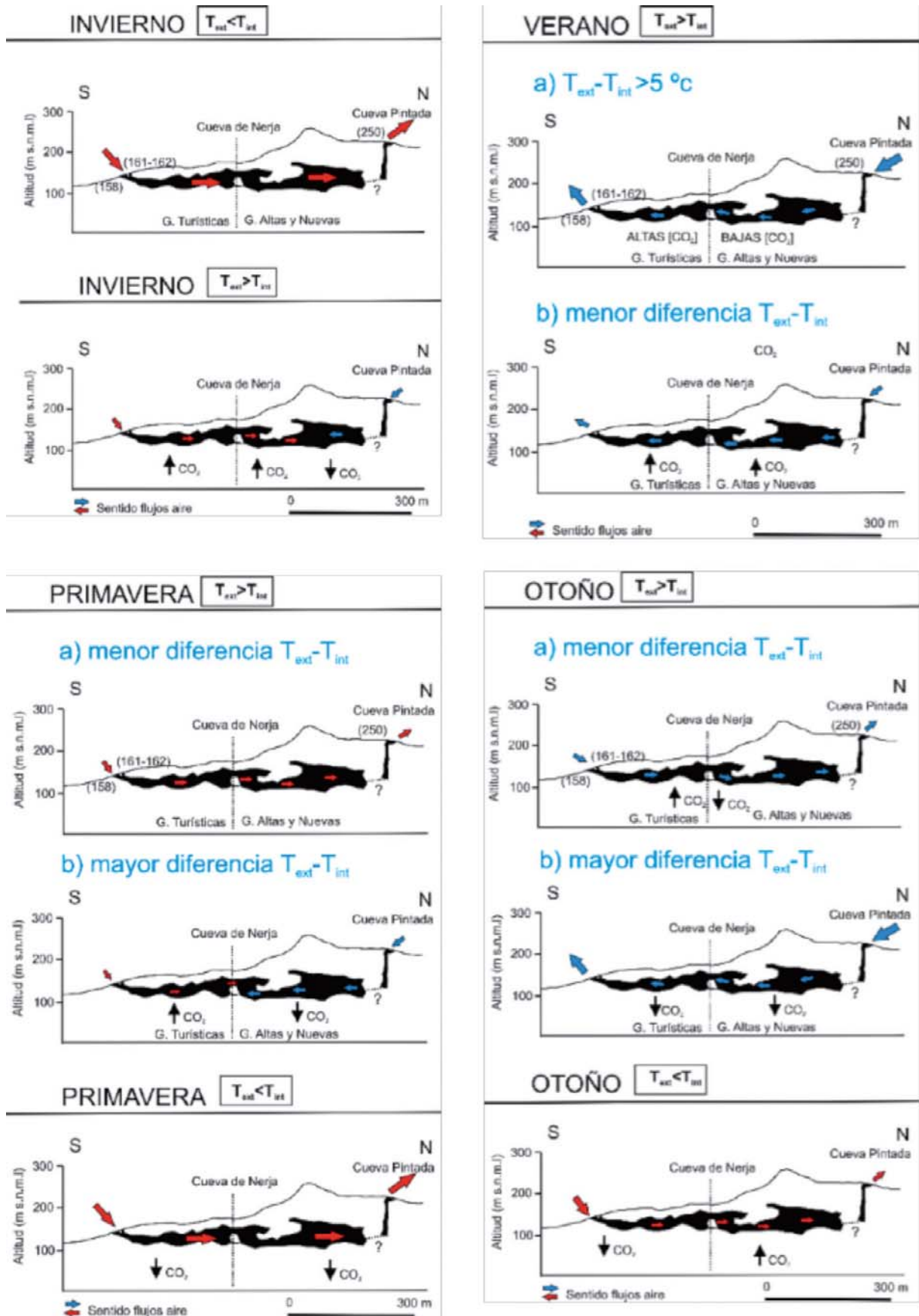


Figura 6. Esquema de la ventilación natural Cueva de Nerja-Cueva Pintada a lo largo de un ciclo anual



## Referencias

- Cañete, S. 1997. *Concentraciones de Radón e intercambio de aire en la Cueva de Nerja*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Málaga, 84 pp.
- Carrasco, F., Vadillo, I., Liñán, C., Andreo, B. y Durán, J.J. 2001. Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja Cave (Málaga, Spain). *Acta Carsologica*, 31 (1): 105-122.
- Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S., Carretero, J. y Liger, E. 1999.  $^{222}\text{Rn}$  concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave. *Atmospheric Environment*, 33: 501-510.
- G.E.M.A. 1976. Exploración en la Cueva de Nerja. *Jábega*, 13: 60- 68.
- Liñán, C., Simón, M.D., Rosal, Y. del. y Garrido, A. 2007. Estudio preliminar del clima en el entorno de la Cueva de Nerja (Andalucía, provincia de Málaga). En: Durán, J.J., Robledo, P.A. y Vázquez, J. (eds.), *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, Publicaciones del IGME, Serie Hidrogeología y aguas subterráneas, 24, 159-167.
- Liñán, C. y Rosal, Y. del. 2014. Ventilación natural de cuevas kársticas: nuevos datos sobre la Cueva de Nerja (Málaga, S de España). En: Andreo, B. et al. (eds.), *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*, 1: 505-511.
- Liñán, C., Carrasco, F., Rosal, Y. del. 2014. Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: Calaforra, J.M. y Durán, J.J. (eds.), *Iberoamérica subterránea*. Actas del I Congreso Iberoamericano y V Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, 229-238.
- S.E.M. 1985. *La Cueva de Nerja*. Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga, Málaga, 87 pp

## Estudio de las alteraciones del soporte rocoso y de los espeleotemas de la Cueva de Nerja (Málaga) mediante tecnología LIBS

G. Carrasco-Huertas <sup>(1)</sup>, F.J. Fortes-Román <sup>(1)</sup>, C. Liñán-Baena <sup>(2,3)</sup>, F. Carrasco-Cantos <sup>(3)</sup> y J. Laserna <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Química Analítica. UMALASERLAB. Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga, España, gasparca@uma.es, javierfortes@uma.es, laserna@uma.es.

<sup>(2)</sup> Fundación Cueva de Nerja, Instituto de Investigación, C/ Carretera de Maro, s/n, 29787, Nerja, Málaga, España, cbaena@cuevanerja.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Ecología y Geología, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga, España, crilinbae@uma.es, fcarrasco@uma.es

---

### RESUMEN

El control medioambiental juega un papel esencial en la conservación del Patrimonio, especialmente en cuevas turísticas que reciben un elevado número de visitantes. En estos escenarios pueden aparecer procesos de degradación que alteran la naturaleza del entorno y originan la aparición de costras y capas de alteración en el soporte rocoso. La actividad humana que se lleva a cabo en el interior de las cavidades puede acelerar estos fenómenos de degradación.

La espectroscopia de plasmas inducidos por láser (LIBS) es una técnica analítica que encaja perfectamente como herramienta para el control y monitorización del soporte rocoso en entornos kársticos, puesto que permite realizar análisis con una elevada frecuencia de muestreo y de manera no destructiva. Además, la posibilidad de diseñar y desarrollar equipos LIBS portátiles es una ventaja añadida que facilitará la monitorización in-situ del soporte rocoso, en este caso de la Cueva de Nerja.

Los objetivos del presente trabajo están enfocados al diseño y construcción de un analizador láser portátil, con buenas capacidades analíticas y apto en el análisis en entornos kársticos el cual integre una fuente de excitación láser de mejores prestaciones que la utilizada en trabajos anteriores con un espectrómetro que permita la identificación simultánea y en un único evento láser de los elementos constituyentes del espeleotema y su capa de alteración. Dicho equipo será utilizado durante un ensayo de campo en el interior de la cueva en el que se seleccionaran nuevas zonas de alto interés geológico para su análisis junto con otras zonas ya muestreadas en anteriores campañas de medidas y que serán utilizadas como medida de control de la alteración del espeleotema. De este modo, se obtuvo información composicional en profundidad que se relaciona con el espesor de la capa de alteración.

**Palabras claves:** capa de alteración, espeleotema, karst, LIBS, paleoclimatología.

### *Study of changes in the rocky mount and speleothems of the Cueva de Nerja (Málaga) by LIBS technology*

#### ABSTRACT

*Environmental control plays an essential role in cultural heritage conservation, especially in tourist caves which usually have a large number of visitors. In these scenarios degradation processes that alter the nature of the environment and cause the appearance of crusts and alteration layers in the bedrock may appear. In addition, human activity that takes place within these caves may accelerate the degradation process.*

*Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) is an analytical technique that fits perfectly as a tool for controlling and monitoring the rocky support in cultural heritage places, since it enables analysis with high sampling frequency and in a non-destructively manner. Moreover, the ability to design and develop portable LIBS equipment is an added bonus that will facilitate in-situ monitoring of rocky bulks, in this case the Cave of Nerja.*

*The objectives of this work are focused on design and construction of a portable laser scanner, with good analytical and suitable skills in karstic analysis which integrate a laser source excitation with better performance than used in previous work with a spectrometer which allows discrimination simultaneous and in a single laser event the constituent elements of speleothem and alteration layer. Such equipment will be used during a field campaign inside the cave in which new areas of high geological interest for analysis were selected along with other areas already sampled in previous measurement campaigns and will be used as a control measure for altered speleothem. Thus, in-depth compositional information relates to the thickness of the alteration layer was obtained.*

**Key words:** alteration layer, speleothem, karst, LIBS, paleoclimatology.

## Introducción

La Cueva de Nerja se encuentra localizada al este de la provincia de Málaga (36° 45' 41.90" N y 3° 50' 49.09" W). Formada por disolución de mármoles dolomíticos de edad triásica (Elorza et al., 1980; López Sánchez-Vizcaino et al., 1993 y Del Rosal et al., 2014), constituye uno de los ejemplos más importantes del paisaje kárstico en el sur de Europa. En su interior se encuentra una gran variedad de espeleotemas formados por precipitación química de carbonatos (estalactitas, estalagmitas, columnas...), así como pinturas rupestres. Las dataciones absolutas realizadas sobre espeleotemas de la Cueva de Nerja indican seis fases de crecimiento que abarcan desde el Pleistoceno Medio hasta la actualidad (Durán et al., 1999).

Dado que la Cueva de Nerja es uno de los recursos geológicos de mayor relevancia en España y con más afluencia turística, no está exenta de alteraciones antropogénicas. En este sentido, se ha podido constatar la presencia de una capa oscura de alteración que recubre parte de las superficies del paisaje kárstico (Caballero et al., 1995). Aunque se contempla la posibilidad de que esta costra sea de origen antropogénico, su naturaleza no queda demasiado clara debido, en gran medida, a la heterogeneidad de su apariencia y variada morfología.

El presente estudio plantea la transferencia de una tecnología bien definida en el campo del análisis químico como es la técnica LIBS para la caracterización de las alteraciones del soporte rocoso y de los espeleotemas en la Cueva de Nerja. Dicha técnica viene caracterizada como una técnica válida para proporcionar información en profundidad de todo tipo de materiales multicapa la cual permite el análisis químico multielemental a tiempo real en una amplia variedad de matrices (Fortes et al., 2013; Hahn et al., 2010; Hahn et al., 2012 y Russo et al., 2013), sin necesidad de preparación previa de muestras y con una huella microscópica, prácticamente imperceptible a simple vista, hecho por el cual los ensayos pueden calificarse como no destructivos. Estas características, unidas a la posibilidad de realizar un análisis in-situ y automatizado hacen del equipo LIBS portátil un instrumento idóneo para la realización de tareas analíticas

en ambientes hostiles o poco accesibles a las técnicas convencionales de análisis (Fortes *et al.*, 2010 y Fortes *et al.*, 2007). Tal es el caso de la Cueva de Nerja, donde las condiciones ambientales y el valor del entorno requieren técnicas analíticas que no precisen toma de muestras (análisis in-situ), que proporcionen ensayos no destructivos y a tiempo real, así como robustez en condiciones de análisis desfavorables (Baldini *et al.*, 2002; Fairchild *et al.*, 2000; Hill *et al.*, 1999; Maravelaki *et al.*, 1997 y Van Beynen *et al.*, 2001).

De forma anterior a este trabajo, se han realizado diversas campañas de medida mediante la técnica LIBS así como la construcción de diversos equipos portátiles los cuales permitían la caracterización in-situ de los diferentes espeleotemas en el interior de la Cueva de Nerja y en laboratorio (Vadillo *et al.*, 1998; Cuñat *et al.*, 2005 y Cuñat *et al.*, 2008). Estas campañas de medida se centraron en el análisis de diferentes puntos de interés junto con una caracterización de las capas de alteración y de la matriz original en dichas zonas.

Los objetivos del presente estudio están enfocados a: (1) diseño y construcción de un analizador láser portátil. En esta ocasión se utilizará una fuente de excitación láser de mejores prestaciones que la utilizada en trabajos anteriores (Cuñat *et al.*, 2005 y Cuñat *et al.*, 2008). Además, se seleccionará un espectrómetro que permita la identificación simultánea y en un único evento láser de los elementos constituyentes del espeleotema y su capa de alteración, (2) se comprobará la robustez, transportabilidad y las capacidades analíticas del analizador portátil durante un ensayo de campo en la Cueva de Nerja y (3) durante el ensayo de campo en el interior de la cueva se seleccionaran nuevas zonas de alto interés geológico para su análisis junto con otras zonas ya muestreadas en anteriores campañas de medidas (Cuñat *et al.*, 2005 y Cuñat *et al.*, 2008) y que serán utilizadas como medida de control de la alteración del espeleotema.

## **Materiales y métodos**

El estudio de las capas de alteración del soporte rocoso en la Cueva de Nerja se realizó mediante tecnología LIBS portátil (Fig. 1). El sistema consta de dos partes bien diferenciadas i) una unidad principal y ii) una sonda de muestreo, interconectadas por un umbilical de 4 metros de longitud. La unidad principal engloba el ordenador, el espectrómetro y la fuente de alimentación del láser (Big Sky Ultra CFR; 9 ns de duración; 120 mJ/pulso). Por el contrario, la sonda LIBS de muestreo contiene la fuente de excitación láser y todos los componentes ópticos tanto para el enfoque de la radiación láser como para la colección de la luz procedente del plasma. Un cable de fibra óptica (5 metros de longitud; 600  $\mu\text{m}$  diámetro; N.A.=0,22) guía la emisión del plasma desde la sonda de muestreo hasta el espectrómetro (Avantes, modelo AvaSpec-ULS2048-2-USB2) integrado en el módulo principal del equipo. El espectrómetro consiste tiene una configuración Czerny-Turner cruzada y una red de difracción holográfica de 1200 líneas/mm. Esta configuración proporciona una resolución espectral de 0.1-0.2 nm por pixel en el rango espectral 250-550 nm. En este caso, el software utilizado fue el suministrado por la casa comercial Avantes, Avasoft.

Durante los ensayos de campo, el láser del instrumento portátil fue pulsado a una energía de 100 mJ por pulso y a una frecuencia de 10 Hz. En cada una de las zonas de muestreo se



realizaron perfiles de profundidad para evaluar cambios de composición que puedan estar relacionados con la presencia o ausencia de posibles capas de alteración sobre la superficie del espeleotema. El número de pulsos realizado en cada zona de muestreo variaba entre 500 y 1500 pulsos dependiendo del grado de alteración observado en cada zona. Las condiciones temporales de adquisición se fijaron a delay: 1.28  $\mu$ s y un tiempo adquisición: 1 ms.

Para este estudio se eligió la ventana espectral comprendida entre 260 nm y 430 nm atendiendo a factores relacionados con la presencia de líneas de interés con suficiente calidad analítica y ausencia de interferencias espectrales. Las líneas seleccionadas para el estudio fueron Ca (I) 317,93 nm, el modo  $v_0-0$  de la banda CN a 388,3 nm, Fe (I) 404,71 nm, Si (I) 288,16 nm, Mg (I) 285,21 nm, Sr (II) 407,89 nm así como diferentes relaciones de intensidades entre elementos.

### **Muestras y zonas analizadas**

El estudio se ha llevado a cabo en el último trimestre de 2015, y se ha centrado en el estudio y caracterización química de nuevas capas de alteración del soporte rocoso de la Cueva de Nerja. En esta ocasión, el Instituto de Investigación de la Fundación Cueva de Nerja ha realizado una primera selección de posibles nuevas zonas para el análisis mediante LIBS, agrupadas en las siguientes clases:

- Depósitos de color marrón (localizados en el techo de las salas de la Oficina y Belén).
- Espeleotemas que muestran indicios de corrosión por condensación.
- Depósitos oscuros sobre estalagmitas y bloques (localizados en toda la cueva).
- Espeleotemas con alteración antrópica.
- Costras blanquecinas sobre espeleotemas y paredes.
- Espeleotemas con indicios de alteración natural.
- Capas negras superficiales o internas.
- Mineralizaciones negras en el techo de la Sala del Cataclismo.
- Zonas de biodeterioro.
- Alteraciones en espeleotemas de las Galerías Altas.

En Julio de 2015 se organizó una visita conjunta a la Cueva de Nerja entre los investigadores del UMA LASERLAB y los investigadores del Instituto de Investigación de la cueva, para el reconocimiento, in-situ, de las zonas preseleccionadas por estos últimos y establecer un plan de acción conjunto. Finalmente se analizaron 11 zonas, combinando las nuevas zonas preseleccionadas durante la visita conjunta a la cueva y algunas zonas ya estudiadas anteriormente y que se utilizarán como medida de control. Las posiciones analizadas mediante LIBS se indican en la Figura 2.

Hay que resaltar que la semana anterior a la realización de los ensayos hubo fuertes precipitaciones en la comarca de la Axarquía, registrándose hasta 100 l/m<sup>2</sup> en zonas cercanas a la Cueva de Nerja. Así, el elevado grado de humedad que existía en el interior de la misma podría

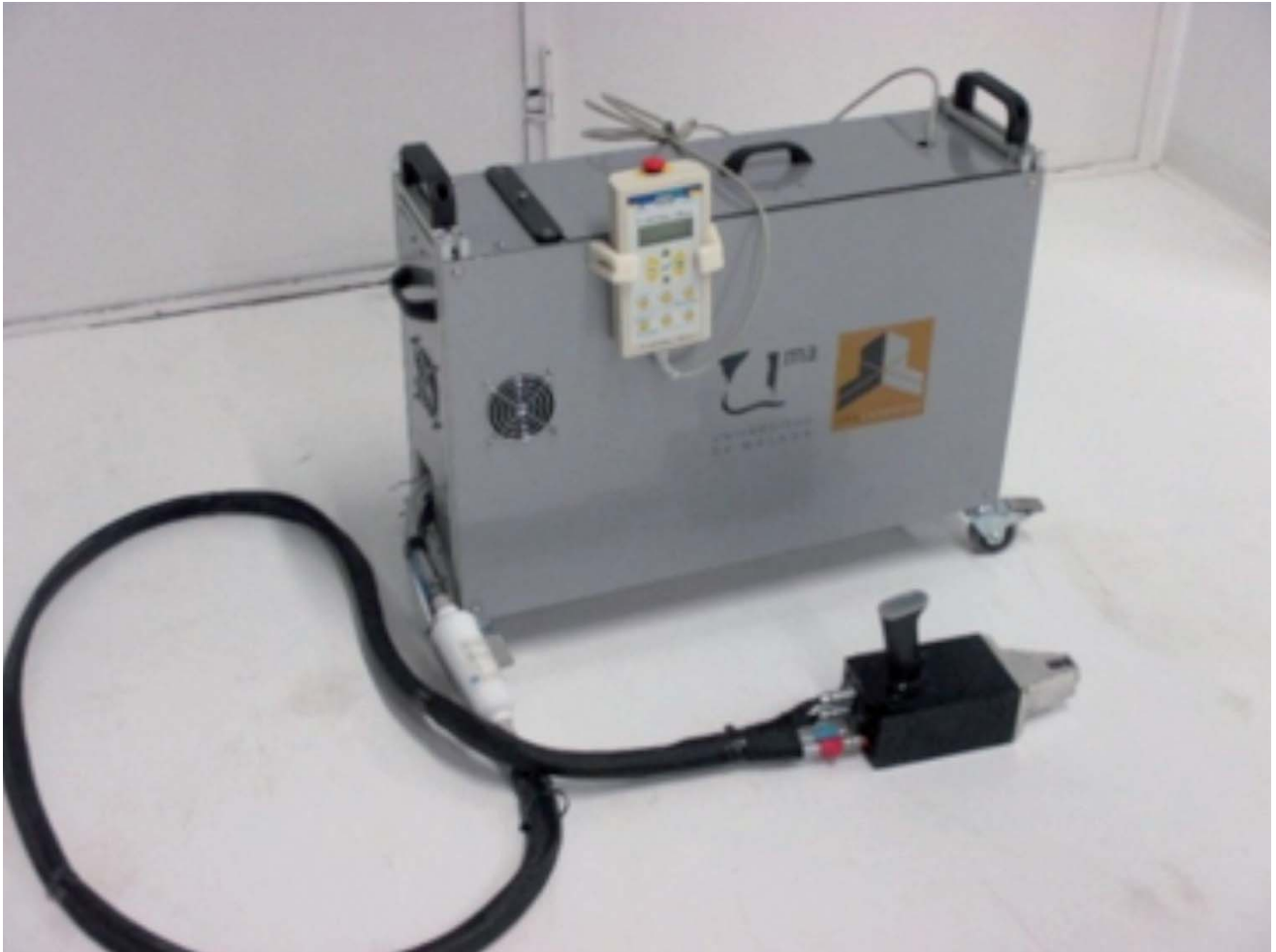


Figura 1. Instrumento LIBS portátil utilizado durante los ensayos de campo realizados en el interior de la Cueva de Nerja en noviembre de 2015

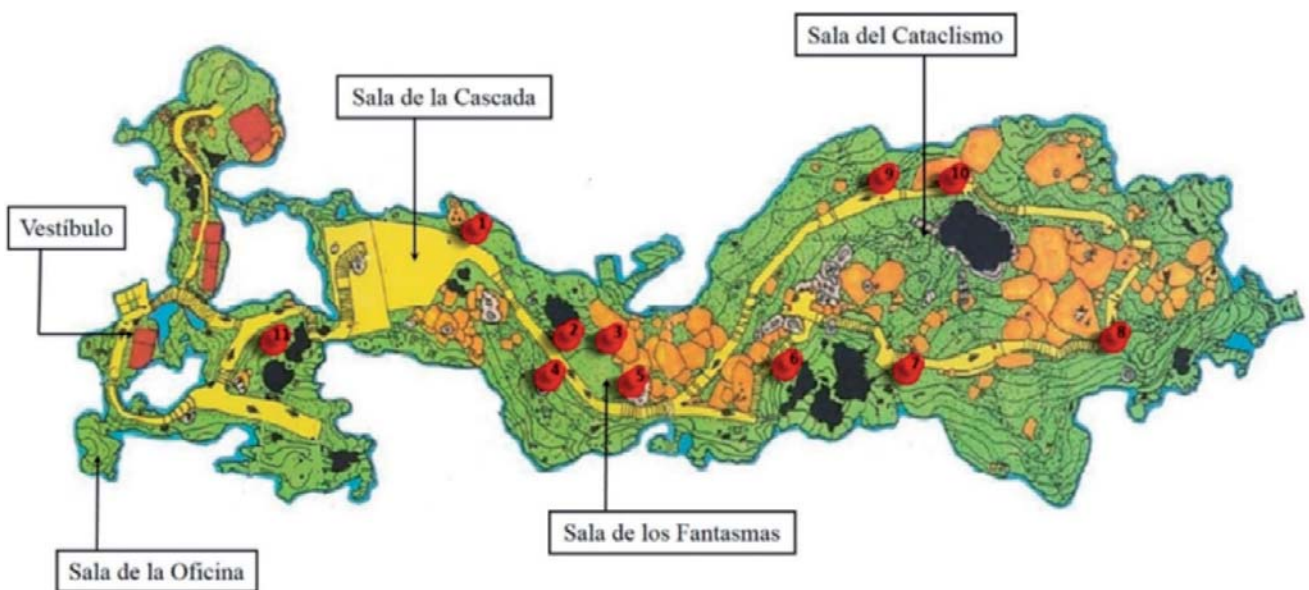


Figura 2. Zonas analizadas durante la campaña de medida de 2015

afectar en cierta medida a los análisis LIBS. Por otro lado, la morfología irregular y heterogénea de la cueva no fue un inconveniente para el analizador portátil utilizado.

Además, con propósitos de comparación se caracterizó, en todas las zonas muestreadas, tanto el espeleotema como su capa de alteración. En trabajos realizados anteriormente (Cuñat *et al.*, 2005 y Cuñat *et al.*, 2008) se comprobó que el espectro LIBS de la capa de alteración exhibe líneas de emisión correspondientes a Fe, Si, Al, elementos que no aparecen en el espeleotema, el cual se caracteriza por su alto contenido en Ca, Mg y Sr.

A continuación, se discutirán los resultados más relevantes observados en cada una de las zonas analizadas presentándose los resultados en cuatro grandes bloques a destacar: (1) zonas analizadas en anteriores campañas (2) zonas de biodeterioradas, (3) zonas que presentan diferente alternancia de capas (4) muestras procedentes de las Galerías Altas.

## Resultados y discusión

### Zonas analizadas en anteriores campañas

Dentro de las zonas analizadas en anteriores campañas: 1, 3, 4, 8, 10 y 11 (Fig. 2), las cuales fueron estudiadas en anteriores trabajos (Cuñat *et al.*, 2005 y Cuñat *et al.*, 2008), se obtuvieron unos resultados similares a los trabajos previos, no obstante cabe destacar el caso de la zona 10, en la que se ha detectado un aumento considerable de la capa de alteración situada sobre la matriz del espeleotema. También hemos de destacar la zona 1 debido a la presencia de varias capas con diferente composición elemental las cuales vienen directamente relacionadas con las condiciones paleoclimáticas durante la génesis de la cueva. En ella, se observa un aumento considerable de la intensidad de Sr y Mg respecto a la señal de Ca, aumento que guarda estrecha relación con las relaciones de intensidad Sr/Ca y Mg/Ca y que a su vez

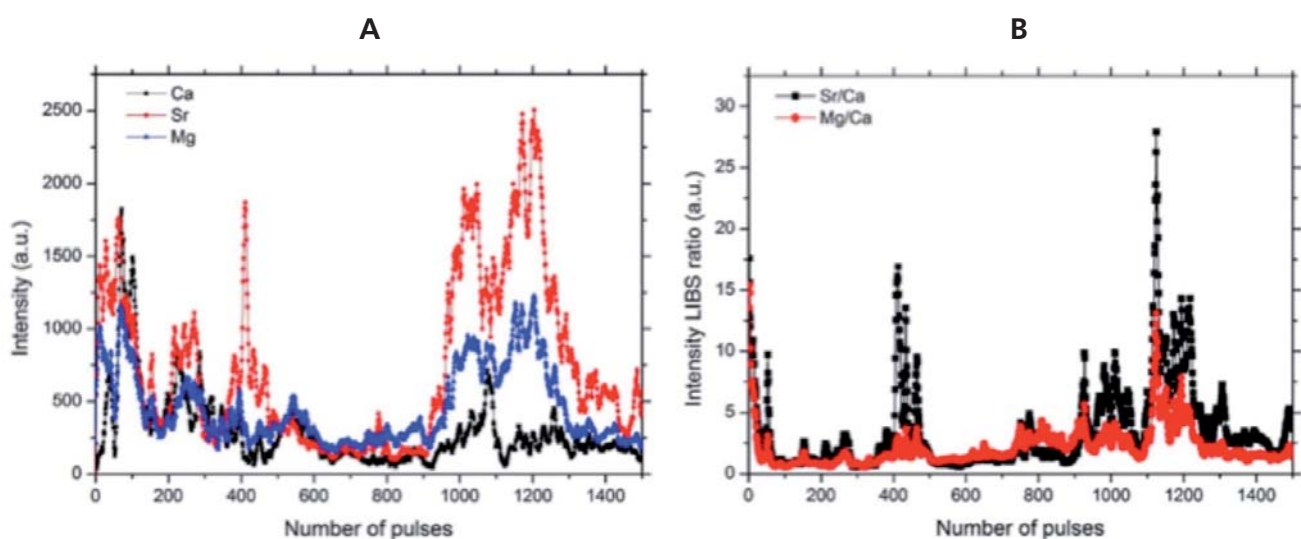


Figura 3. (A) Perfil de profundidad de Ca (I) 317,93 nm, Mg (I) 285,21 nm y Sr (II) 407,89 nm en la matriz del espeleotema en la zona de muestreo 1. (B) Perfil de profundidad de las ratios de intensidades de Sr/Ca y Mg/Ca a partir de los datos obtenidos en la Figura 3-A

estaría relacionado con un periodo climático seco puesto que bajo estas condiciones el agua permanece más tiempo en contacto con la roca y tarda más tiempo en evacuarse. En la Figura 3-B se presentan las ratio de intensidades Sr/Ca y Mg/Ca en función del número de pulsos. Atendiendo al perfil, se pueden localizar hasta 10 zonas en las que se produce una desviación de la intensidad de Sr/Ca y Mg/Ca (Véase Fig 3-A). Además, el perfil de composición revela la presencia de Ca y Mg en la roca madre, lo que podría indicar la naturaleza dolomítica del sustrato (Elorza *et al.*, 1980; López Sánchez – Vizcaíno *et al.*, 1993 y Del Rosal *et al.*, 2014).

### Zonas biodeterioradas

Dentro de los puntos que presentaban biodeterioro a su vez podemos clasificarlos en función de su origen como: (1) biodeterioro inherente a los propios organismos presentes en la cueva conocidos como el mal verde (Lefèvre *et al.*, 1974) y (2) biodeterioro asociado a la contaminación antropogénica por parte de los turistas de la cueva.

En el caso de las zonas de muestreo biodeteriorados por los organismos presentes en la propia cueva y asociados a la generación de biofilms conocidos como el alga Mal verde, destacan la zona 2 y 9. Dichas zonas nunca habían sido estudiadas mediante la tecnología LIBS y su interés radica en que se trata de dos macizos estalagmíticos situados en diferentes zonas de la cueva. El crecimiento de estos biofilms ocurre en zonas con exposición directa a luz artificial en diferentes áreas de la cueva. Además, para el análisis de estas zonas se analizaron dos puntos, uno cubierto por el Mal verde y otro con menor presencia del biofilms,

En la Figura 4 se presenta el perfil de profundidad de la línea Ca (I) 317,93 nm y el modo v0-0 de la banda CN a 388,3 nm en los dos puntos analizados. Como se observa, en la zona atacada por el mal verde, Fig. 4-A, se detectó la presencia de las líneas de emisión correspondientes al carbono, lo cual se podría relacionar o ser compatible con la presencia de cianobacterias,

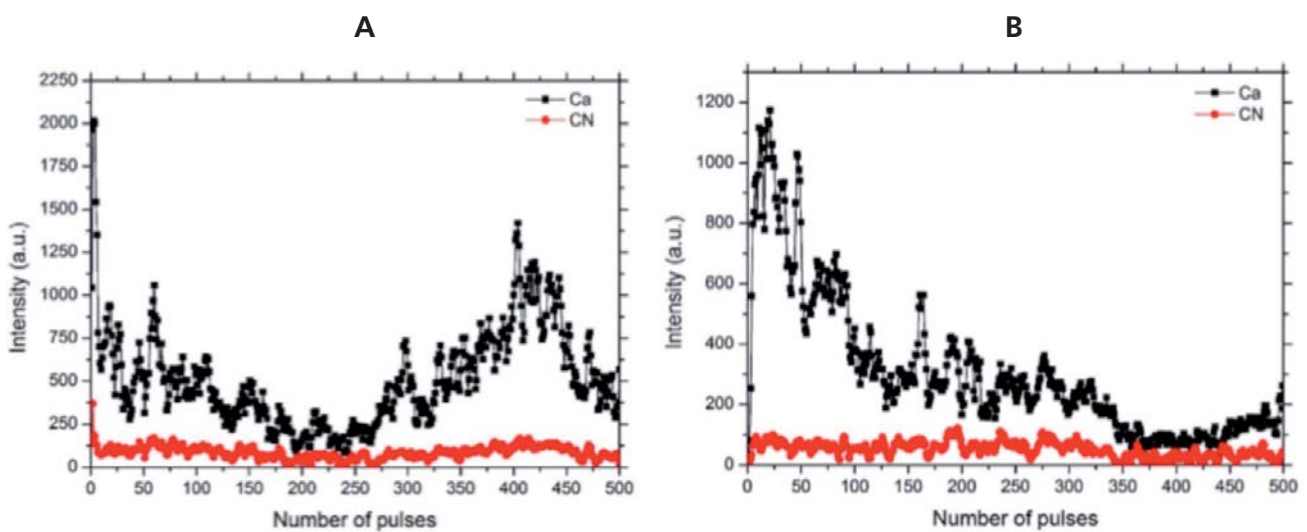


Figura 4. Perfil de profundidad de Ca (I) 317,93 nm y la banda molecular asociada al carbono a 388,31 nm en la zona de muestreo 2 correspondientes a dos puntos analizados: (A) zona de biodeterioro atacada por el mal verde y (B) en la matriz del espeleotema



descritas (Del Rosal Padial, 2016). Sin embargo, la intensidad de la señal prácticamente desaparece tras la acción de cinco pulsos láser. Así, el perfil de intensidad de la línea de Ca revela la estratigrafía de la zona analizada. A partir del pulso 400, comparando el perfil de profundidad de la señal de Ca con el obtenido en el punto "limpio" de mal verde, Fig. 4-B, se podría considerar que se ha alcanzado el sustrato dolomítico. Además también se pudo constatar que el espesor de dicha capa orgánica no es acusado y coincide con los estudios realizados previamente (Del Rosal Padial, 2016).

En el caso de las zonas de muestreo biodeterioradas antropogénicamente por parte de los turistas de la cueva, destaca la zona 6, la cual se corresponde a una estalagmita integrada en una barandilla que muchos visitantes utilizan como pasamanos. La estalagmita tiene una apariencia pulida y ha adquirido un color pardo. Para su análisis se realizó un perfil de profundidad de 500 pulsos para estudiar el origen de esta capa de alteración. Los resultados se muestran en la Fig. 5-A. El espectro LIBS corresponde al segundo pulso láser, en el que se detectó la presencia de Ca, Mg y la banda de recombinación del carbono que se puede asociar a la grasa depositada por alteración antrópica en la superficie de la muestra.

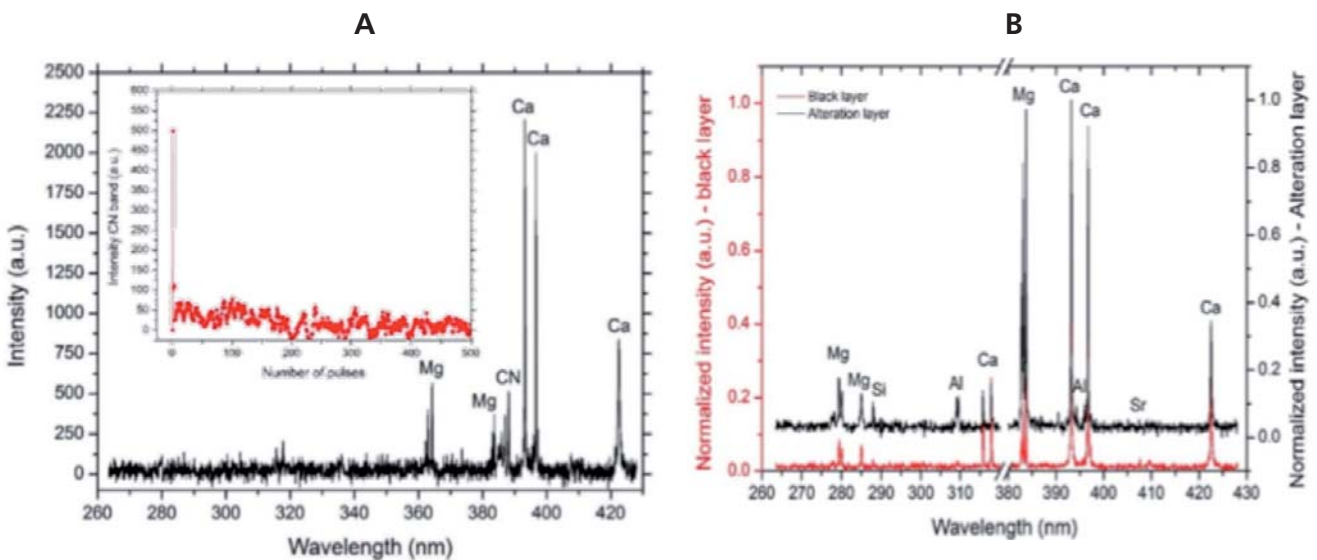


Figura 5. Espectro LIBS correspondiente a la capa de alteración de origen antropogénico situada sobre el espeleotema con biodeteriorado en la zona de muestreo 6. En el inset se muestra el perfil de profundidad de la banda molecular asociada al carbono. (B) Espectros LIBS de la capa de alteración y la matriz del espeleotema con alternancia de capas situado en la zona 7

En este caso no se observó señal de Fe y/o Si, elementos típicamente asociados a la composición de las capas de alteración (Cuñat et al., 2005 y Cuñat et al., 2008). Además, la señal de la banda de recombinación del carbono desaparece tras la acción de los primeros pulsos láser, a partir de los cuales nos encontramos con la composición típica de un espeleotema de base dolomítica - calcítica.

### Zonas que presentan diferente alternancia de capas

Dentro de las zonas de mayor interés que contenían una alternancia de capas destacan principalmente tres espeleotemas los cuales presentan diferentes capas de origen y génesis inciertas.

Los espeleotemas estudiados se corresponden a tres zonas diferentes en las cuales se podía apreciar, (1) una capa interna de color negro en contraste con el sustrato blanquecino presente en la mayor parte de la cueva (2) una alternancia de capas de diferentes tonalidades (blanco, gris y negro) y (3) unos depósitos de diferentes coloración a la matriz y localizados en el techo de la sala donde se encontraban presentes.

El primer caso, el interés de estudiar este espeleotema situado en la zona 7, radica en la presencia de una capa interna de color negro en el espeleotema. En esta zona, el análisis LIBS fue complicado porque el área de interés se encontraba en una zona de pendiente por la que circulaba agua de escorrentía. Así, parte de la radiación laser es empleada en evaporar el agua superficial, de manera que no se forma eficientemente el plasma sobre la superficie de la muestra, provocándose una disminución de la señal LIBS. En este caso, la capa de alteración estaba húmeda (por los motivos arriba mencionados) y presentaba una textura granular. Se realizó un estudio en profundidad para revelar la composición tanto de la capa de alteración como de la matriz de la roca. Al comparar los espectros LIBS correspondientes a las dos zonas estudiadas, Fig. 5-B, la capa de alteración presenta un alto contenido en Si, Al y Mg, lo que se podría corresponder con la composición de un aluminosilicato, confirmando que la capa de alteración puede ser debida a la deposición, en ese punto, de tierra y/o arcillas por arrastre del agua. Por el contrario, en la base del espeleotema se detectó la presencia de Ca, Mg y Sr, es decir la composición de un espeleotema de naturaleza dolomítica-calcítica

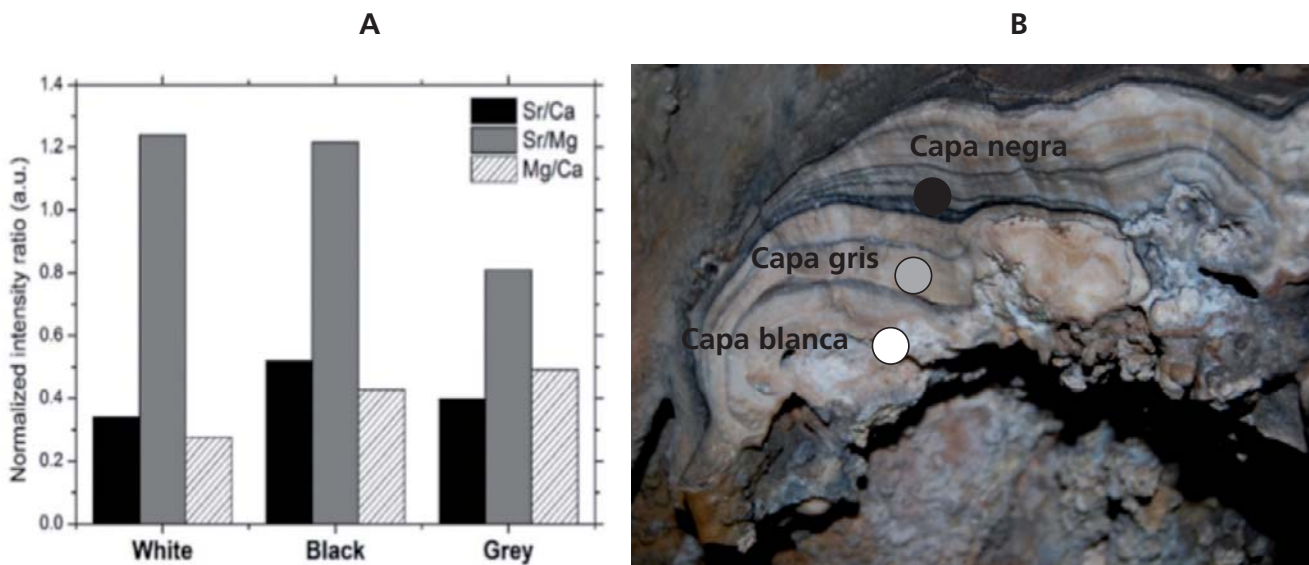


Figura 6. (A) Ratios de intensidad Sr/Ca, Sr/Mg y Mg/Ca para los tres mármoles estudiados en la zona de muestreo 5. (B) Detalle fotográfico del espeleotema estudiado donde se muestra la alternancia de capas

En el primer caso, el espeleotema estudiado en cuestión, se corresponde a la zona 5 el cual presentaba una alternancia de capas de diferentes tonalidades (blanco, gris, negro) (Véase Fig. 6-B), el análisis LIBS reveló que se trataba de capas de diferente composición química. En la Fig. 6-A se presentan las relaciones de intensidad Sr/Ca, Sr/Mg y Mg/Ca para las tres capas estudiadas. Los espectros fueron previamente normalizados a la unidad para facilitar la comparación entre ellos. A pesar de que los espectros LIBS identifican una base dolomítica en la composición elemental de cada capa, las ratio de intensidades difieren en cada caso concreto.

Así, la capa negra se caracteriza por su alto contenido en Sr, mientras que en la capa gris la intensidad de la señal de Mg es mayor.

El tercer caso, se corresponde con la presencia de unos depósitos de color oscuro que se localizan preferentemente en el techo de la sala situada en la zona de análisis 12. Al realizar el análisis de este punto pudimos constatar que el espeleotema presentaba una primera capa de alteración rica en Hierro. Una vez atravesada la capa de alteración, la matriz del espeleotema estaba constituido principalmente por Ca, Mg y Sr, es decir una composición de base dolomítica - calcítica similar al resto del soporte rocoso de la cueva.

### Muestras procedentes de las Galerías Altas

Una vez terminada la campaña de medida en la Cueva de Nerja, se analizaron en laboratorio las alteraciones de tres espeleotemas de las Galerías Altas. En primer lugar se analizaron dos

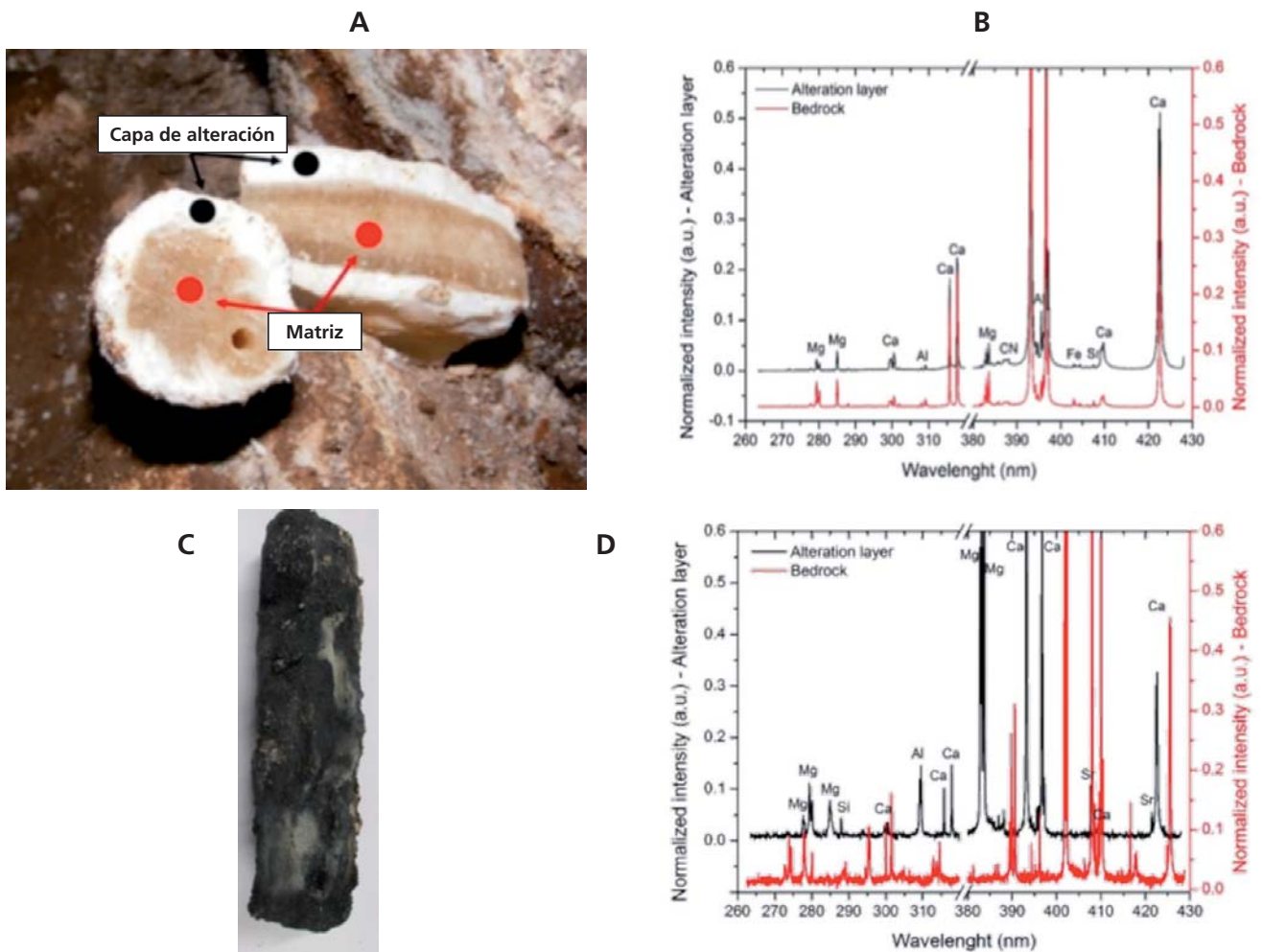


Figura 7. (A) Detalle fotográfico de las muestras procedentes de las Galerías Altas que presentan depósitos blancos. (B) Comparativa de los espectros LIBS correspondientes a la matriz y la capa de alteración presentes en las muestras presentadas en la Figura 7-A. (C) Detalle fotográfico de la muestra procedente de las Galerías Altas que presentan depósitos negros. (D) Comparativa de los espectros LIBS correspondientes a la matriz y la capa de alteración presentes en la muestra presentada en la Figura 7-C

muestras de similares características (Fig. 7-A). En ambos casos se distinguían claramente dos capas, una capa de alteración de gran espesor, color blanquecino y textura granular, y la matriz del espelotema, mucho más compacta y de color pardo. Los estudios LIBS se encaminaron a estudiar la composición química de la capa de alteración. Para ello, se compararon los espectros LIBS característicos de ambas zonas. Los resultados se muestran en la Fig. 7-B. Según se observa, la capa de alteración se caracteriza principalmente por la presencia de líneas de emisión de Ca y Mg, lo que podría indicar que la capa blanca sobre la matriz del espelotema sea una deposición de carbonatos de Ca y Mg. Por otro lado, en la matriz de la roca, también se detectaron Sr y trazas de Fe.

En la Fig. 7-C se presenta un detalle de la tercera muestra analizada, de color negro, morfología irregular y dimensiones 49.3 x 21.6 cm. Se analizaron diferentes puntos del espeleotema, donde se promediaron los primeros 25 pulsos láser con el fin de obtener un espectro representativo de cada zona. Se estudiaron las líneas de emisión correspondientes a Si, Ca, Mg, Fe y Sr. La comparativa entre los espectros LIBS correspondientes tanto a la capa de alteración como a la matriz del espeleotema se representan en la Fig. 7-D. Así, cabe destacar la presencia de Si y Al en la capa de alteración y el elevado contenido de Mg y Sr tanto en la capa de alteración como en la matriz del espeleotema. Para futuros estudios en esta muestra, se pretende utilizar un detector de mayor rango espectral.

## **Conclusiones**

A lo largo de este estudio, se han encontrado diversas capas de alteración caracterizadas por un mayor contenido en elementos tales como Fe, Mg, Si, Mn y Al junto a otros elementos como el C, que en muchos casos aparecen formando una capa de diferente coloración. En contraposición a esta capa de alteración se encuentra la matriz del espeleotema en la que aumenta la proporción de Ca con respecto al resto de las emisiones. Además, se ha observado como los diferentes elementos constituyentes presentan diferentes patrones de distribución.

Durante la anualidad 2015 se han analizado 11 zonas, en las Galerías Turísticas de la Cueva de Nerja, algunas de ellas analizadas en estudios previos y que se utilizan como medida de control. En estas zonas (1, 3,4, 8, 10 y 11), se obtuvieron resultados comparables a los obtenidos anteriormente. Únicamente en la zona 10 se ha detectado un aumento considerable en la capa de alteración del espeleotema estudiado, llegando a identificar hasta 3 capas de alteración a partir del perfil de profundidad de las líneas de Fe y Si, cuando anteriormente solo se detectaron dos capas de alteración. En este caso, el espeleotema se encuentra en una zona de paso y bastante expuesto a alteración antrópica, lo que justificaría este aumento en la alteración del espeleotema.

Por otro lado, se han estudiado áreas de biodeterioro, entre las que se pueden destacar los espeleotemas estudiados en las zonas 2 y 9, en las que se ha producido el crecimiento de biofilms (mal verde) sobre la superficie del espeleotema, y el espeleotema situado en la zona 6, el cual es utilizado como barandilla del recorrido turístico y está recubierto de una fina película de grasa. Los resultados alcanzados por LIBS en dichas zonas han permitido detectar diferentes bandas moleculares asociadas al carbono, íntimamente ligado a la presencia de material de



naturaleza orgánica en la superficie de la roca, constituida fundamentalmente por Ca y Mg. Este hecho puede constituir la base de futuros estudios acerca de la presencia y discriminación de materiales orgánicos en matrices inorgánicas aplicables tanto en entornos kársticos como en aplicaciones de carácter geoquímico.

Finalmente podemos destacar a partir de los resultados obtenidos, el gran potencial que presenta la técnica LIBS en el análisis y seguimiento sistemático de carácter no destructivo de las alteraciones del soporte rocoso en entornos kársticos y en especial, de la Cueva de Nerja.

## Agradecimientos

Especial agradecimiento la Fundación Cueva de Nerja. Este trabajo ha sido financiado por la Fundación Cueva de Nerja (Málaga, España).

## Referencias

- Baldini, J.U., McDermott, F. y Fairchild, I.J. 2002. Structure of the 8200-year cold event revealed by a speleothem trace element record. *Science*, 296, 2203-2206.
- Caballero, E., Jimenes, C. y Reyes, E. 1995. Geochemical study of the alteration processes affecting carbonate materials at the Nerja Cave site (Malaga, S. Spain). *Mineralogica et Petrographica Acta*, XXXVIII. 38: 145-158.
- Cuñat, J., Palanco, S., Carrasco, F., Simón, M.D. y Laserna, J.J. 2005. Portable instrument and analytical method using laser-induced breakdown spectrometry for in situ characterization of speleothems in karstic caves. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 20, 295-300.
- Cuñat, J., Fortes, F.J., Cabalín, L.M., Carrasco, F., Simón, M.D. y Laserna, J.J. 2008. Man-portable laser-induced breakdown spectroscopy system for in situ characterization of karstic formations. *Applied Spectroscopy*, 62 (11), 1250-1255.
- Del Rosal Padiál, Y. (2016). *Análisis, impacto y evolución de los biofilms fotosintéticos en espeleotemas. El caso de la Cueva de Nerja*. Tesis Doctoral, Universidad de Málaga, 336 p.
- Del Rosal, Y.; Liñán, C. y Hernández-Mariné, M. 2014. The conservation of the Nerja Cave: preserving anthropogenic impact in a tourist cave. *The Conservation of Subterranean Cultural Heritage*, CRC Press, 193.
- Durán, J.J., López Martínez, J. y Vallejo, M. 1999. Distribución, caracterización y síntesis evolutiva del karst en Andalucía. En Durán, J. J. y López Martínez, J. (eds.), *Karst en Andalucía*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 13-20.
- Elorza, J. y García Dueñas, V. 1980. *Mapa Geológico de España a escala 1: 50.000 de la hoja de Vélez Málaga (1.054) y memoria explicativa*, IGME.
- Fairchild, I.J., Borsato, A. Tooth, A.F., Frisia, S., Hawkesworth, C.J., Huang, Y., McDermott, F. y Spiro, B. 2000. Controls on trace element (Sr--Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chemical Geology*, 166, 255-269.
- Fortes, F.J., Moros, J., Lucena, P., Cabalín, L.M. y Laserna, J.J. 2013. Laser-induced breakdown spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 85 (2), 640-669.
- Fortes, F.J. y Laserna, J.J. 2010. The development of fieldable laser-induced breakdown spectrometer: No limits on the horizon. *Spectrochimica Acta, Part B*, 65 (12), 975-990.

- Fortes, F.J., Cuñat, J., Cabalín, L.M. y Laserna, J.J. 2007. In situ analytical assessment and chemical imaging of historical buildings using a man-portable laser system. *Applied Spectroscopy*, 61 (5), 558-564.
- Hahn, D.W. y Omenetto, N. 2010. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), Part I: Review of basic diagnostics and plasma-particle interactions: still-challenging issues within the analytical plasma community. *Applied Spectroscopy*, 64 (12), 335-366.
- Hahn, D.W. y Omenetto, N. 2012. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), Part II: Review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields. *Applied Spectroscopy*, 66 (4), 347-419.
- Hill, C.A. 1999. Mineralogy of Kartchner Caverns, Arizona. *Journal of Cave and Karst Studies*, 61, 73-78.
- Lefèvre, M. 1974. La 'Maladie Verte' de Lascaux. *Studies in Conservation*, 19 (3), 126-156.
- López Sánchez-Vizcaino, V. y Gómez-Pugnaire, M. 1993. Introducción a la petrología de los mármoles de la Cueva de Nerja y materiales asociados, *Geología de la Cueva de Nerja, Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, 3, 189-229
- Maravelaki, P., Zafiropoulos, V., Kilikoglou, V., Kalaitzaki, M. and Fotakis, C. 1997. Laser-induced breakdown spectroscopy as a diagnostic technique for the laser cleaning of marble. *Spectrochimica Acta, Part B*, 52, 41-53.
- Russo, R.E., Mao, X., Gonzalez, J.J., Zorba, V. y Yoo, J. 2013. Laser ablation in analytical chemistry. *Analytical Chemistry*, 85 (13), 6162-6177.
- Van Beynen, P. Bourbonniere, R. Ford, D. y Schwarcz, H. 2001. Causes of colour and fluorescence in speleothems. *Chemical Geology*, 175: 319-341.
- Vadillo, J. M., Vadillo, I., Carrasco, F. y Laserna, J. 1998. Spatial distribution profiles of magnesium and strontium in speleothems using laser-induced breakdown spectrometry. *Fresenius' journal of analytical chemistry*. Springer, 361, 119-123.
- Verheyden, S., Keppens, E., Fairchild, I.J., McDermott, F. y Weis, D. 2000. Mg, Sr and Sr isotope geochemistry of a Belgian Holocene speleothem: implications for paleoclimate reconstructions. *Chemical Geology*, 169, 131-144.



González Ramón, A. *et al.* Variabilidad paleoclimática a partir de un registro espeleotémico pleistoceno (Sierra de El Mencal, sur de España). Resultados preliminares. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 361-370.

## Variabilidad paleoclimática a partir de un registro espeleotémico pleistoceno (Sierra de El Mencal, sur de España). Resultados preliminares

A. González-Ramón <sup>(1)(5)</sup>; C. Jiménez de Cisneros <sup>(2)</sup>; A. Arribas-Herrera <sup>(3)</sup>; J. J. Durán-Valsero <sup>(3)</sup>; P. A. Robledo-Ardila <sup>(4)</sup>; A. Segura-Herrero <sup>(5)</sup>; T. Fernández-Díaz <sup>(5)</sup> y P. Pérez-Martínez <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edif. Zulema bajo. Granada. España, antonio.gonzalez@igme.es.

<sup>(2)</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR, Avda. de las Palmeras nº4, 18100 Armilla (Granada, España), concepcion.cisneros@iact.ugr-csic.es

<sup>(3)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. Madrid, a.arribas@igme.es; jj.duran@igme.es

<sup>(4)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Administración Periférica del Estado. Carrer de Felicià Fuster, 7. Palma de Mallorca, pa.robledo@igme.es

<sup>(5)</sup> Asociación Espeleológica Velezana. Vélez Rubio-Almería, espeleovelez@gmail.com

---

### RESUMEN

La Sierra del Mencal es un promontorio aislado constituido por rocas carbonáticas jurásicas, que se sitúa al N de la Depresión de Guadix (provincia de Granada, S de España), rodeado de sedimentos detríticos pliocenos y pleistocenos que solapan sus bordes. En su ladera S se localiza una interesante sima kárstica cuya boca se encuentra a 946 m s.n.m., a una cota menor que la del glacis con el que culminó el relleno sedimentario de la depresión. Dicho glacis es anterior al cambio de un régimen endorreico a exorreico de la cuenca sedimentaria, como consecuencia de la captura, durante el Pleistoceno, de su red de drenaje por la cuenca hidrográfica vertiente al Atlántico. Las paredes de la sima están recubiertas por una colada espeleotémica de tipo freático, si bien, actualmente se encuentra a unos 140 m sobre el nivel piezométrico del acuífero carbonático. El análisis isotópico del registro espeleotémico permite la reconstrucción paleoclimática parcial durante su periodo de formación, así como establecer determinadas deducciones de posibles cambios en el clima. Para el  $\delta^{18}\text{O}$  los valores son muy negativos, con variaciones entre -8.43 ‰ y -9.16 ‰, con un valor medio de -8.85 ‰, mientras que para el  $\delta^{13}\text{C}$  la variación es de entre -3.69 ‰ y -4.35 ‰ siendo el valor medio de -3.60 ‰. Para la roca encajante, los valores medios han sido de +0.05 ‰ para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de +1.21 ‰ para el  $\delta^{13}\text{C}$ . A partir de los datos de  $\delta^{18}\text{O}$  se obtiene un valor medio de temperatura de 24°C con mínimos de 22°C y máximos de 25°C, por encima de los valores medios actuales.

**Palabras clave:** cambio climático, espeleotemas freáticos, paleotemperaturas, Pleistoceno, registro isotópico.

### ***Palaeoclimatic variability from a pleistocene speleothemic record (The Mencal Range, southern Spain). Preliminary results***

#### ABSTRACT

*The Mencal Range is an isolated limestone promontory of Jurassic age, located in the north of Guadix Basin (South of Spain), surrounded by Pliocene and Pleistocene detrital sediments overlaying its margins. In its southern slope, there*



*is an interesting cave, located at 946 m a.s.l., with the entrance under the glacia surface that represents the ending of the sedimentation in the depression. The glacia is prior to the change from endorheic to exorheic conditions in the hydrographic basin, that took place as a result of the network drainage capture, in the Pleistocene, by the hydrographic Atlantic Basin. The wall of the cave is covered by a phreatic-type flowstone; that at present is close to 140 m over the water-table in the carbonate aquifer. The isotopic analysis in the speleothem record, allow the paleoclimate reconstruction during its formation period.  $\delta^{18}\text{O}$  values are very negatives, with variances between  $-8.43\text{‰}$  to  $-9.16\text{‰}$ , with mean to  $-8.85\text{‰}$ , while  $\delta^{13}\text{C}$  values vary into  $-3.69\text{‰}$  and  $-4.35\text{‰}$  with a mean of  $-3.60\text{‰}$ . The mean to the host rock is  $+0.05\text{‰}$  for the  $\delta^{18}\text{O}$  and  $+1.21\text{‰}$  for the  $\delta^{13}\text{C}$ . From the  $\delta^{18}\text{O}$  data, the mean for the temperature is  $24\text{°C}$  with a minimum of  $22\text{°C}$  and maximum of  $25\text{°C}$ , more elevated than the mean temperature in the present.*

**Key Words:** climatic change, isotopic record, paleo-temperature, phreatic speleothems, Pleistocene.

## Introducción

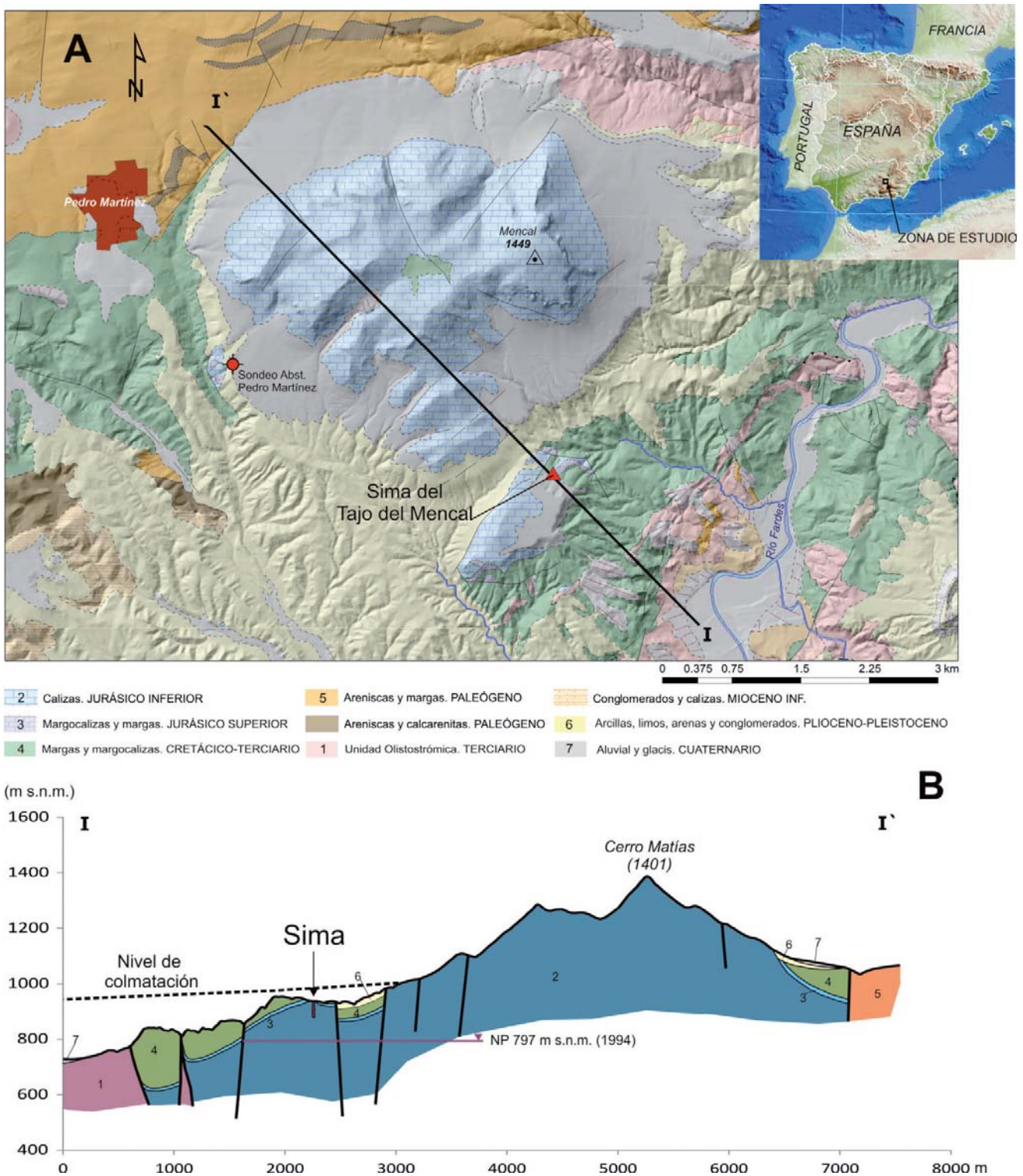
Las cavidades kársticas constituyen un medio continental muy interesante e imprescindible en los estudios climáticos. En los últimos años, su uso ha adquirido mayor relevancia en la obtención de series de alta resolución gracias a la aplicación de técnicas cada vez más precisas y a la mejora de la resolución y aplicabilidad de las dataciones absolutas mediante series de U/Th. En este trabajo se realiza un análisis isotópico de un registro espeleotémico pleistoceno con la finalidad de su utilización como proxy paleoclimático del área de estudio.

La cavidad seleccionada para llevar a cabo el estudio presenta una serie de características que la hacen especialmente interesantes. Por una parte, su entrada se abre a menor cota que el glacis con el que culminó el relleno sedimentario de la depresión, con anterioridad al cambio del régimen de la cuenca sedimentaria de endorreico a exorreico y cerca de la zona en la que se produjo la captura del río Fardes, que tuvo lugar como consecuencia este cambio (Calvache y Viseras, 1997; García Tortosa *et al.*, 2008). Por otra parte, sus paredes están cubiertas por una colada espeleotémica con características freáticas. Este hecho hace que su estudio cobre un especial interés, pues es de esperar que los procesos erosivos iniciados tras la captura de la cuenca endorreica provocasen, en un corto periodo de tiempo, el descenso del nivel freático en los acuíferos limitrofes, especialmente, en los más cercanos a la zona de captura. Un descenso rápido en el nivel freático habría provocado el cese del crecimiento en la colada y por lo tanto, su estudio isotópico podría ayudar a conocer las condiciones paleoclimáticas ambientales justo antes de que se produjese la captura, mientras que su datación permitiría acotar temporalmente el momento en que se produjo.

En este trabajo se presenta un estudio preliminar de una de las muestras obtenidas en la colada con el objetivo de determinar las condiciones ambientales en las que se produjo su crecimiento.

## Localización geográfica y geológica

La Sierra del Mencal está formada por un afloramiento de formaciones carbonatadas jurásicas de  $8,86\text{ km}^2$  de extensión según la cartografía geológica del IGME (Roldán *et al.*, 2012). Las formaciones carbonatadas están constituidas por calizas esparíticas y oolíticas grises, con nódulos de sílex a techo y una cronología correspondiente al Jurásico Inferior y Medio. Sobre



ellas aparecen margas y margocalizas del Jurásico Superior con un espesor de unos 100 m. La secuencia mesozoica finaliza con margas y margocalizas cretácicas (Fig. 1). Los bordes del macizo jurásico aparecen recubiertos por sedimentos pliocenos y pleistocenos formados



fundamentalmente por lutitas y arenas que son consecuencia del relleno de la Depresión de Guadix-Baza. Esta secuencia culmina en un glacis de acumulación que bordea todo el afloramiento carbonatado. En el borde N y NO afloran margas y areniscas paleógenas y en el resto margas cretácicas y una unidad de mezcla miocena formada fundamentalmente por materiales triásicos allí donde los sedimentos plio-pleistocenos han sido erosionados.

### Contexto hidrogeológico

La Sierra del Mencal constituye un acuífero fisurado y kárstico, aislado, que no presenta ninguna surgencia directamente relacionada con él. La posición del nivel piezométrico actual se conoce gracias a la existencia de un sondeo perforado en su ladera occidental para el abastecimiento al núcleo de Pedro Martínez. El último dato conocido se remonta a 1994, donde se situaba a la cota 797 m (base de datos de puntos de agua del IGME). En su entorno, y especialmente en dirección N y NE, aparecen otros pequeños afloramientos de carbonatos de edad jurásica, aunque de menor tamaño, en los que sí se localizan surgencias de aguas subterráneas de entidad (Fig. 2).

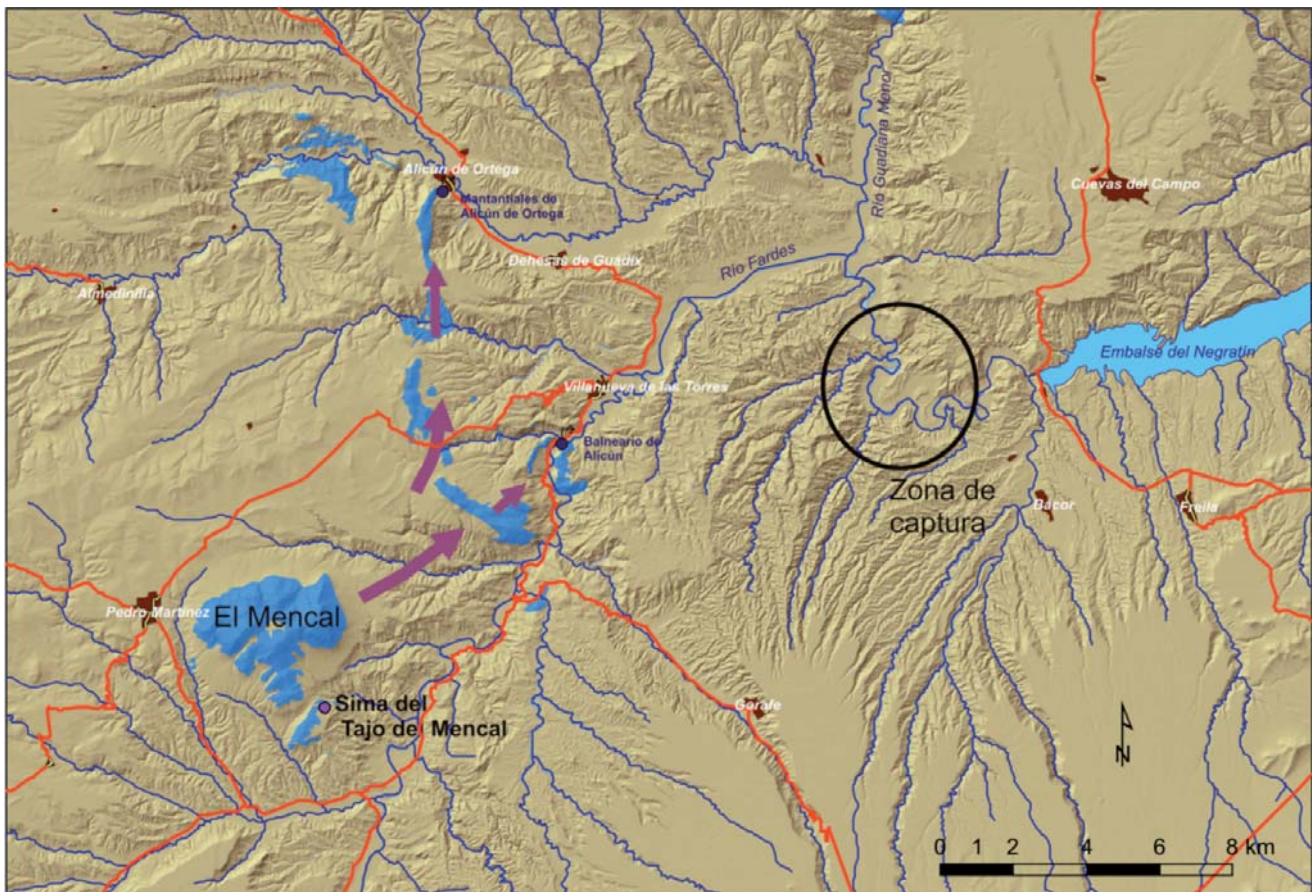


Figura 2. Relación hidrogeológica entre el afloramiento de El Mencal y otros afloramientos jurásicos del entorno. Las flechas moradas indican las posibles direcciones del flujo subterráneo del agua infiltrada en El Mencal. Se muestra también la zona en la que se produjo la captura del paleo-Fardes por el actual río Guadiana Menor (Calvache y Viseras, 1997), que produjo el cambio en la cuenca de endo a exorreica. En rojo aparecen las principales vías de comunicación. MDT5m del Instituto Geográfico Nacional

La surgencia de mayor importancia corresponde al Balneario de Alicún de las Torres, con un caudal medio del orden de 80 l/s. Otras surgencias menores aparecen en el entorno del núcleo de Alicún de Ortega. En ambos casos, el agua presenta termalismo, con temperaturas de 34°C en el Balneario de Alicún y 23°C en los manantiales de Alicún de Ortega (CHG-IGME, 2001).

La información hidroquímica e isotópica aportada por las aguas subterráneas apunta a que su principal zona de descarga se sitúa al N, relacionada con los afloramientos de carbonatos existentes en el entorno de Alicún de Ortega (Prado-Pérez, 2011). Este mismo autor considera que tan solo una pequeña parte del agua infiltrada en El Mencal saldría por el Balneario de Alicún, mientras que la mayoría del agua drenada por este último manantial procedería de los acuíferos de carbonatos triásicos que conforman la Sierra de Baza, situados al S. Según Fernández-Chacón (2009) la totalidad del agua drenada por el balneario procedería de la Sierra de Baza.

## El estudio espeleotémico

### Zona de muestreo: la Sima del Tajo del Mencal

La sima se localiza en un pequeño afloramiento carbonatado que aparece aislado de la Sierra de Mencal por sedimentos Plio-Pleistocenos. Su profundidad máxima es de 68 m y su desarrollo topografiado 231 m (Fig. 3). Todas las paredes aparecen recubiertas por una colada de calcita blanca y aspecto globuloso que delata su génesis bajo el nivel freático (Fig. 4A). Los espeleotemas vadosos son muy escasos y solo se localizan en una zona concreta de la cavidad. La boca se abre en una dolina de hundimiento (tipo caprock según la clasificación de Waltham

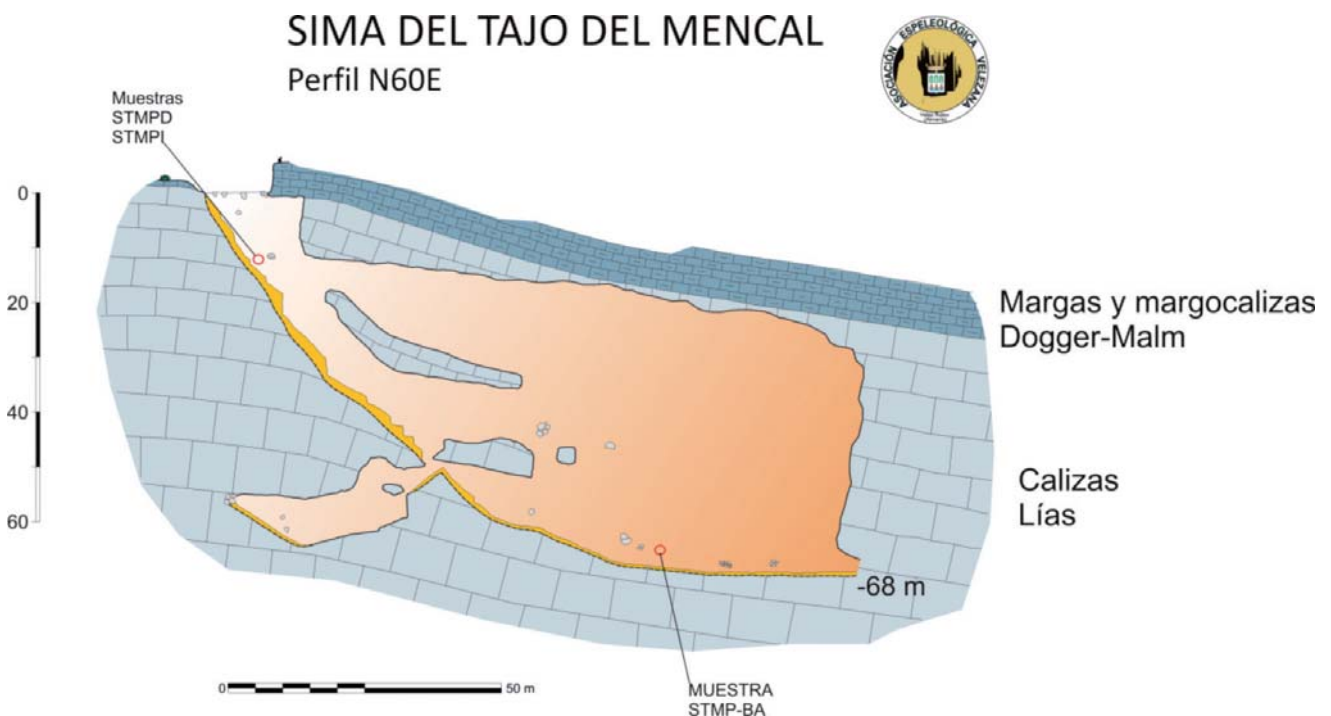


Figura 3. Perfil topográfico en dirección N 60°E de la Sima del Tajo del Mencal y ubicación de los puntos de muestreo de la colada





Figura 4. A: muestra extraída de la colada. B: dolina de hundimiento en la que se sitúa la sima. C: boca de entrada a la sima. D: labores de extracción de la muestra

y Fookes, 2003) en la zona de contacto con las margas y margocalizas del Jurásico superior (Fig. 4B). Se desarrolla a favor de una fractura de dirección N60°E y una anchura entre 0,5 m y 2 m (Fig. 4C y 4D).

El suelo está recubierto por brechas de derrubios que son más abundantes cerca de la entrada. No aparecen restos de rellenos sedimentarios plio-pleistocenos. Esto sugiere que la entrada a la sima debió estar sellada por el paquete de margas y margocalizas del Jurásico superior y, posiblemente, el brusco descenso en el nivel freático provocado por el cambio de régimen hídrico en la cuenca y la acción de los procesos erosivos ocasionaron el colapso del sedimento que cubría la fractura y la apertura de la boca de entrada. Actualmente el nivel piezométrico se localiza a unos 80 m por debajo de la base de la sima y a unos 140 m por debajo del punto de extracción de la muestra de la colada (Fig. 5).

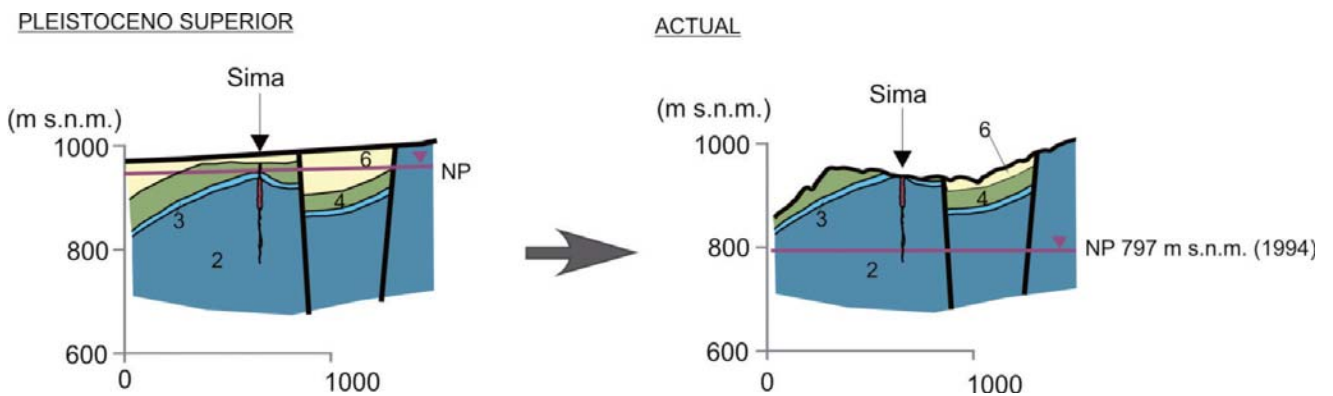


Figura 5. Evolución geomorfológica de la zona en que se sitúa la sima desde el Pleistoceno superior hasta la actualidad a consecuencia del cambio de régimen hídrico en la Depresión de Guadix-Baza. Leyenda litológica en Fig. 1

## Metodología

La composición mineralógica se determinó mediante difracción de rayos X, utilizando un difractómetro PANalytical Pro X `PERT. Para los estudios de tipo microestratigráfico petrográfico se ha utilizado un microscopio de polarización "LEITZ WETZLAR standard WL" y un "OLIMPUS DP-20" equipado este último con equipo microfotográfico "OLIMPUS BX60".

La extracción de las muestras para los análisis isotópicos se realizó mediante un taladro que permite obtener las micromuestras en las diferentes láminas de precipitación que conforman el testigo espeleotémico. Un total de 23 muestras fueron tomadas a lo largo del eje de crecimiento con intervalos de 5-8 mm (Fig. 6). Las determinaciones isotópicas se realizaron en el Laboratorio de Biogeoquímica del IACT-UGR (CSIC) utilizando un espectrómetro de masas Delta Plus XL. El análisis se realiza sobre el  $\text{CO}_2$  extraído de la calcita a  $70^\circ$  por reacción con  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (McCrea, 1950). Las concentraciones isotópicas se expresan en ‰ como desviaciones en relación a V-PDB y V-SMOW, siendo las precisiones analíticas de 0.1‰ para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de 0.05‰ para el  $\delta^{13}\text{C}$ .



Figura 6.- Muestreo isotópico del testigo espeleotémico, desde la roca encajante hasta las últimas etapas de crecimiento

## Resultados

En el análisis petrográfico no se han detectado indicios de posibles procesos diagenéticos (recristalización, disolución,...) y principalmente, se ha observado una textura macrocristalina caracterizada por grandes cristales transparentes y limpios.

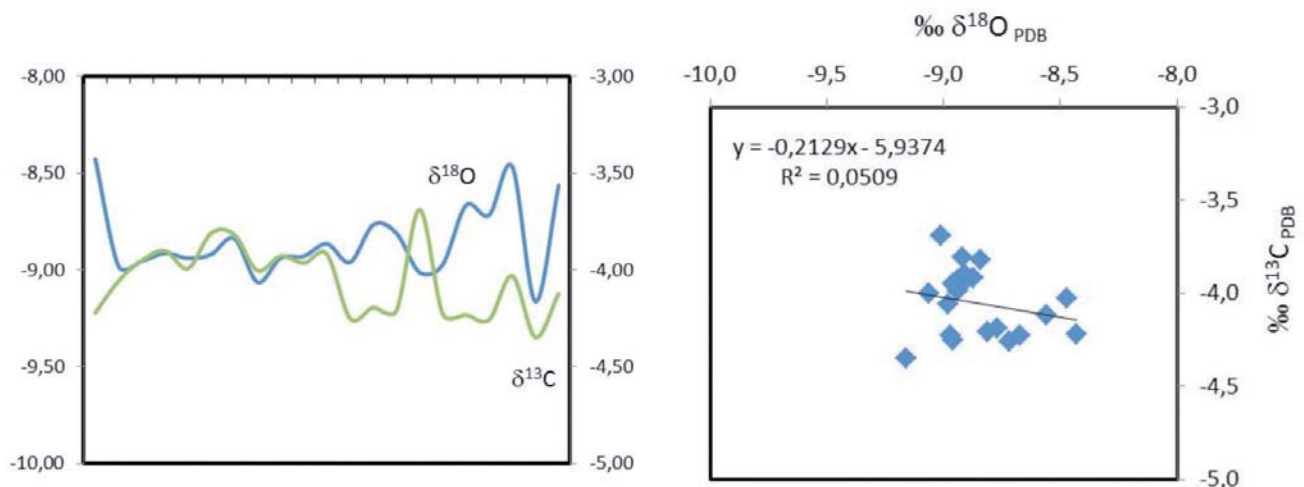


Figura 7.- Evolución de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  a lo largo del testigo espeleotémico y representación gráfica de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  frente a los de  $\delta^{13}\text{C}$

El análisis mineralógico de las muestras indica que están formadas exclusivamente por calcita. Los valores obtenidos en los análisis isotópicos realizados a lo largo del testigo son muy negativos, variando para el  $\delta^{18}\text{O}$  entre  $-8,43\text{‰}$  a  $-9,16\text{‰}$ , con un valor medio de  $-8,85\text{‰}$ , mientras que el  $\delta^{13}\text{C}$  varía entre  $-3,69\text{‰}$  y  $-4,35\text{‰}$ , siendo el valor medio de  $-3,60\text{‰}$ . Para la roca encajante, los valores medios son de  $0,05\text{‰}$  para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $+1,21\text{‰}$  para el  $\delta^{13}\text{C}$ . En la figura 7 se puede observar la representación gráfica de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ . Se incluye en el gráfico el coeficiente de correlación entre ambas relaciones, muy bajo.

A partir de los datos de  $\delta^{18}\text{O}$  y utilizando la ecuación de paleotemperaturas de Sharp (2007) e introduciendo en dicha ecuación como valor de  $\delta^{18}\text{O}$  del agua  $-7\text{‰}$  (SMOW) (Delgado et al., 1991), se obtiene un valor medio de temperatura de  $24^\circ\text{C}$ , con mínimos de  $22^\circ\text{C}$  y máximos de  $25^\circ\text{C}$  (Fig. 8).

## Discusión

La interpretación del registro isotópico del  $\delta^{18}\text{O}$  a lo largo de un testigo espeleotémico se traduce en términos relativos de temperatura que requieren la estimación de los procesos que afectan a la composición isotópica del agua durante el ciclo hidrológico y durante la precipitación de la calcita (Fairchild et al., 2006a y b; Fairchild, 2015). En climas mediterráneo los procesos que intervienen más directamente en la temperatura son la intensidad de las lluvias y las diferentes áreas fuentes de precipitación.

La preservación de los valores isotópicos puede verse afectada durante los procesos diagenéticos, ocasionando en su caso cambios isotópicos. El estudio de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  frente a los  $\delta^{13}\text{C}$  (Fig. 7) pone de manifiesto una correlación muy baja entre ambas razones isotópicas, argumento que junto con las observaciones petrográficas realizadas indicaría que el testigo estudiado ha conservado la señal isotópica original.

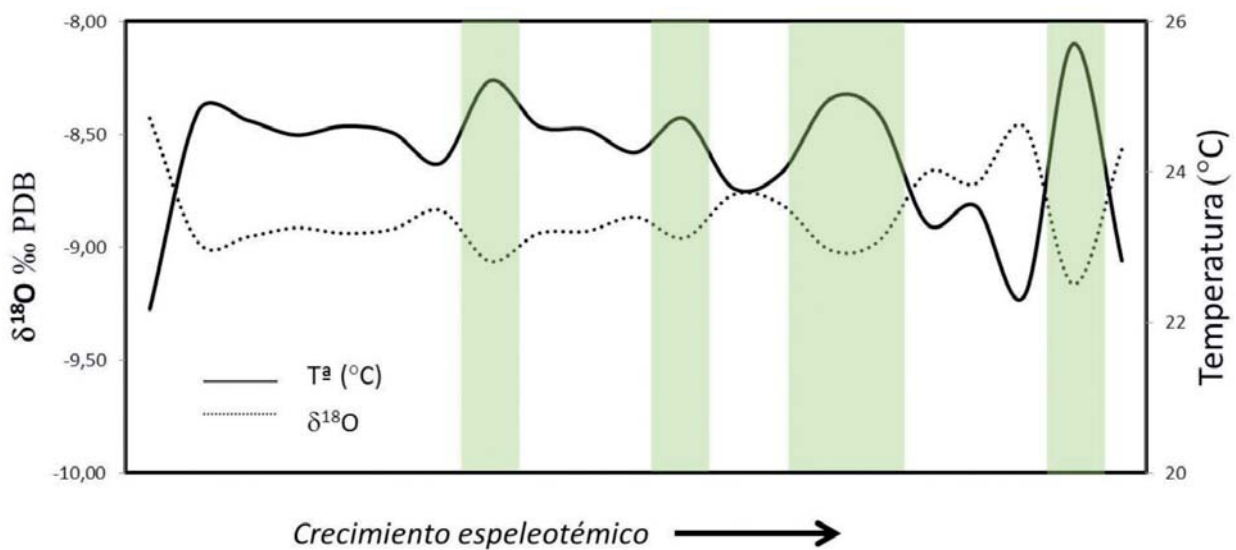


Figura 8.- Variación del  $\delta^{18}\text{O}$  a lo largo de todo el testigo espeleotémico. Se incluye la curva de variación de paleotemperaturas (Sharp, 2007) obtenida a partir de los datos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{18}\text{Ow} = -7\text{‰}$  (Delgado et al., 1991)

La evolución general de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (Fig.8) muestra una mayor amplitud de variación durante el final de la formación del depósito espeleotémico, alcanzando los valores máximos y mínimos durante estas etapas, de manera que las fases finales de precipitación se caracterizan por tener picos ligeramente más fríos con valores más negativos de  $\delta^{18}\text{O}$  ( $22^\circ\text{C}$ ) y episodios más cálidos con valores menos negativos de  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\sim 26^\circ\text{C}$ ). El inicio del depósito refleja valores menos negativos debidos posiblemente a la influencia de la roca encajante ( $0,05\text{‰}$  para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $+1,21\text{‰}$  para el  $\delta^{13}\text{C}$ ) para continuar una etapa donde se constata una marcada uniformidad del registro isotópico con pequeñas oscilaciones entre  $24^\circ\text{C}$  y  $25^\circ\text{C}$  de la temperatura.

En cuanto a los valores de  $\text{d}^{13}\text{C}$ , se constata una escasa influencia de una cobertura vegetal importante en el área y los valores obtenidos indican una procedencia posiblemente dominante del carbono a partir del  $\text{CO}_2$  atmosférico fijado como componente orgánico en plantas terrestres. En el proceso sin duda también intervienen las aguas de disolución de las rocas encajantes que ocasionarían los depósitos con valores de  $\text{d}^{13}\text{C}$  menos negativos. El registro del contenido isotópico obtenido permite establecer la variabilidad climática en la región estudiada.

## **Conclusiones**

La Sima del Tajo del Mencil se sitúa en un contexto geológico y geomorfológico que permite estudiar aspectos trascendentes acerca de la evolución de la Depresión de Guadix-Baza. La ubicación de su boca, cerca del límite de colmatación del relleno sedimentario de la cuenca, pero por debajo del mismo, y su situación geográfica, en el entorno en el que se produjo la captura del río paleo-Fardes que tuvo como consecuencia el cambio de régimen en la cuenca de sedimentario a erosivo, junto a la existencia de espeleotemas freáticos, ha permitido determinar las condiciones climáticas existentes en el momento de la captura y previas a la misma. La posterior datación del espeleotema permitirá, además, acotar en el tiempo el momento en que ésta se produjo, ya que el encajamiento de los cauces y la erosión en sus laderas debió dismantelar los sedimentos de baja permeabilidad que recubrían los afloramientos de carbonatos jurásicos y, como consecuencia, provocar un descenso en el nivel piezométrico en estos acuíferos. Esto es lo que se observa en la cavidad estudiada, donde se constata un descenso del nivel piezométrico de unos 150 m en el acuífero del Mencil, que habría tenido lugar desde el final del crecimiento de las coladas freáticas que recubren sus paredes hasta la actualidad.

El crecimiento del testigo espeleotémico refleja la evolución paleoclimática en el área de estudio. Teniendo en cuenta que la precipitación tuvo lugar en condiciones de equilibrio como refleja el estudio petrográfico y la baja correlación entre ambas razones isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$  frente a  $\text{d}^{13}\text{C}$ ), la señal isotópica suministrada por los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  permite realizar una reconstrucción paleoclimática parcial durante su periodo de formación obteniéndose valores medios de temperatura de  $24^\circ\text{C}$ .

## **Agradecimientos**

La Sima del Tajo del Mencil fue localizada en mayo de 2013 por uno de los coautores en compañía de D. Blas Julián Lozano (Alcalde de Pedro Martínez). Nuestro agradecimiento a Raúl,



Alex, Vane, Gonza, Alfonso y Mariano, miembros de la Asociación Espeleológica Velezana que nos ayudaron en las labores de exploración y topografía de la cavidad. Este trabajo forma parte del proyecto CGL2013-45230-R, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

## Referencias

- Calvache, M.L., y Viseras, C. 1997. Long-term control mechanisms of stream piracy processes in Southern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 93-105.
- CHG-IGME 2001. *Revisión y actualización de las Normas de Explotación de las UU.HH. de la Cuenca del Guadalquivir y Guadalete-Barbate. Propuesta de nueva normativa y definición de nuevas Unidades Hidrogeológicas*. Norma de explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.13 El Mencal.
- Delgado A., Núñez, R., Caballero, E., Jiménez de Cisneros, C. y Reyes E. 1991. Composición isotópica del agua de lluvia en Granada. *IV Congreso de Geoquímica de España*, Soria, 1, 350-358.
- Fairchild, I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D. y McDermott, 2006a. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75, 105–153.
- Fairchild, I.J., Tuckwell, G.W., Baker, A. y Tooth, A.F. 2006b. Modelling of dripwater hydrology and hydrogeochemistry in a weakly karstified aquifer (Bath, UK): Implications for climate change studies. *Journal of Hydrology*, 321 (1–4), 213–231.
- Fairchild, I.J. 2015. Mass balance approaches to understanding evolution of dripwater chemistry. *AGU Fall Meeting*.
- Fernández-Chacón, F. 2009. *Contribución al Conocimiento Hidrogeológico de una Depresión Interna en Clima Mediterráneo Semiárido (Cabecera del Guadiana Menor, Cordillera Bética)*. Tesis doctoral. Universidad de Granada-IGME. 387 pp.
- García-Tortosa, F.J., Alfaro, P., Sanz de Galdeano, C. y Galindo Zaldívar, J. 2011. Glacis geometry as a geomorphic marker of recent tectonics: The Guadix–Baza basin (South Spain). *Geomorphology*, 125, 517–529.
- McCrea, J.M., 1950. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *The Journal of Chemical Physics*, 18, 849-857.
- Prado-Pérez, A.J. 2011. *El sistema termal de Alicún de las Torres (Granada) como análogo natural del escape de CO<sub>2</sub> en forma de DIC: implicaciones paleoclimáticas y como sumidero de CO<sub>2</sub>*. Tesis Doctoral Univ. Complutense de Madrid-CIEMAT. 411 pp.
- Roldán, F.J., Rodríguez-Fernández, J., Villalobos, M., Lastra, J., Díaz-Pinto, G., Pérez Rodríguez, A.B. 2012. Zonas: Subbético, Cuenca del Guadalquivir y Campo de Gibraltar. In GEODE. *Mapa Geológico Digital Continuo de España. Sistema de Información Geológica Continua: SIGECO*. IGME. Disponible en: <http://cuarzo.igme.es/sigeco.default.htm>
- Sharp, Z. 2007. *Principles of Stable Isotope Geochemistry*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 334 pp.
- Waltham, A.C., Fookes, P.G. 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101-118.

Jiménez del Saliente, C. *et al.* La Sima del Saliente: reconstrucción paleoclimática mediante registro isotópico en coladas espeleotémicas (Sierra del Saliente, Almería, Sur de España). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 371-382.

## **La Sima del Saliente: reconstrucción paleoclimática mediante registro isotópico en coladas espeleotémicas (Sierra del Saliente, Almería, Sur de España).**

C. Jiménez de Cisneros <sup>(1)</sup>, A. González-Ramón <sup>(2, 4)</sup>, B. Andreo <sup>(3)</sup>, A. Segura <sup>(4)</sup> y T. Sánchez-Díaz <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-UGR, Avda. de las Palmeras nº4, 18100 Armilla (Granada, España)  
concepcion.cisneros@iact.ugr-csic.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. (Granada, España),  
antonio.gonzalez@igme.es

<sup>(3)</sup> Universidad de Málaga, Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos, (Málaga, España),  
andreo@uma.es

<sup>(4)</sup> Asociación Espeleológica Velezana. Vélez Rubio-Almería. España,  
espeleovelez@gmail.com

---

### **RESUMEN**

Un total de 139 análisis isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ) se han realizado de dos testigos extraídos de las paredes de coladas espeleotémicas existentes en la Sima del Saliente, con la finalidad de obtener información paleoclimática sobre su periodo de formación. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  varían entre -5,03 ‰ y -9,13 ‰, con un valor medio de -6,90 ‰, mientras que el  $\delta^{13}\text{C}$  varía entre -1,70 ‰ y -10,39 ‰ y su valor medio es de -7,82 ‰. Por otra parte, se ha constatado que la precipitación de los materiales se produjo en condiciones de equilibrio isotópico y que las fábricas observadas mediante su estudio petrográfico responden también a una precipitación sin alteraciones diagenéticas, por lo que estos materiales son adecuados para uso como indicadores paleoclimáticos. Las curvas de variación isotópica obtenidas han permitido identificar varios eventos relacionados con la alternancia de periodos más cálidos y otros más fríos acaecidos durante su formación en el área de estudio.

**Palabras clave:** análisis petrográfico, colada espeleotémica, equilibrio isotópico, isótopos estables, paleoclima

## ***The Sima of the Bulge: paleoclimatic reconstruction using isotopic record in flowstones (Sierra del Saliente, Almeria, Southern Spain)***

### **ABSTRACT**

*A total of 139 isotopic analysis ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ) have been made on two cores of flowstones in the Sima del Saliente cave, in order to obtain paleoclimatic information on the basis of these proxies.  $\delta^{18}\text{O}$  values obtained range from -5,03 ‰ to -9,13 ‰ with a mean value of -6,90 ‰, while  $\delta^{13}\text{C}$  ranges from -1,70 ‰ to -10,39 ‰ being the mean value of -7,82 ‰. The results show that the precipitation of materials was in isotopic equilibrium conditions and petrographic studies of thin sections show not significant post-depositional processes, hence they are suitable samples for paleoclimatic studies. The isotopic curves permit to see the alternation between warmer and colder periods occurred during speleothem growing in the study area.*

**Key words:** *flowstone, isotopic equilibrium, paleoclimate, petrographic analyses, stable isotopes*

## Introducción

La precipitación de las coladas espeleotémicas ocurre cuando una fina película de agua fluye intermitente o continuamente por las paredes inclinadas y/o el piso de una cueva, de manera que el depósito se realiza según láminas continuas de calcita. La velocidad de crecimiento es lenta y está directamente relacionada con la cantidad de agua disponible, y sus morfologías dependen principalmente de la topografía a la que cubren. Su mineralogía, composición química, tasa de crecimiento y otras propiedades petrológicas y geoquímicas dependen de variables de carácter medioambiental existentes en el interior de la cueva (humedad ambiental, temperatura, tasa de goteo y composición química del agua a partir de la cual precipita el carbonato). Estas variables están determinadas, en gran medida, por las condiciones climáticas y ambientales del exterior (temperatura media anual, estacionalidad, precipitaciones, cubierta de nieve, tipo de suelo y vegetación, etc.) por lo que constituyen registros para establecer secuencias evolutivas paleoambientales y paleoclimáticas durante el Cuaternario (McDermott, 2004).

En el presente trabajo se realiza una reconstrucción paleoclimática a partir del estudio isotópico y petrográfico de dos registros de coladas espeleotémicas obtenidos en la Sima del Saliente (provincia de Almería). Los perfiles isotópicos obtenidos muestran una alternancia de episodios relativamente más fríos con otros más cálidos. Durante estos últimos se produjo mayor crecimiento espeleotémico. La datación cronológica del depósito hará posible establecer correlaciones entre ambos registros y comparar las tendencias observadas durante el mismo periodo con las obtenidas en otras áreas geográficas.

## Contexto geográfico y geológico

La Sierra del Saliente se localiza al N de la provincia de Almería y, junto a la Sierra de las Estancias, delimita por el sur la denominada Comarca de los Vélez. Está formada por una alineación de carbonatos triásicos, básicamente dolomías pero también calizas, de dirección N40°E que hacia el O cambia a N60°E, donde pasa a denominarse Sierra de las Estancias (Fig. 1). Los carbonatos se superponen a una formación metapelítica (filitas en su mayor parte) del Pérmico-Triásico inferior. Ambas formaciones se incluyen en el dominio geológico Alpujarride de la Cordillera Bética. Estas sierras constituyen un relieve estructural condicionado por el buzamiento (entre 40° y 50°) de las dolomías y calizas triásicas hacia el NO. El contacto con las filitas infrayacentes queda expuesto en la ladera sur, con fuertes pendientes.

El límite occidental de la Sierra del Saliente está definido por el cauce de la Rambla del Saliente, que corta la estructura en dirección aproximada N-S. Este cauce ha generado un pequeño cañón fluvio-kárstico al atravesar los materiales carbonatados. Justo en el extremo meridional del citado cañón, la erosión de los materiales filíticos, más blandos, provocó la desestabilización de los carbonatos situados a techo, lo que desencadenó movimientos en masa en ambas márgenes. Los de mayor volumen se localizan en la margen izquierda y la geomorfología de la zona sugiere que son muy antiguos, aunque también se observan deslizamientos menores recientes

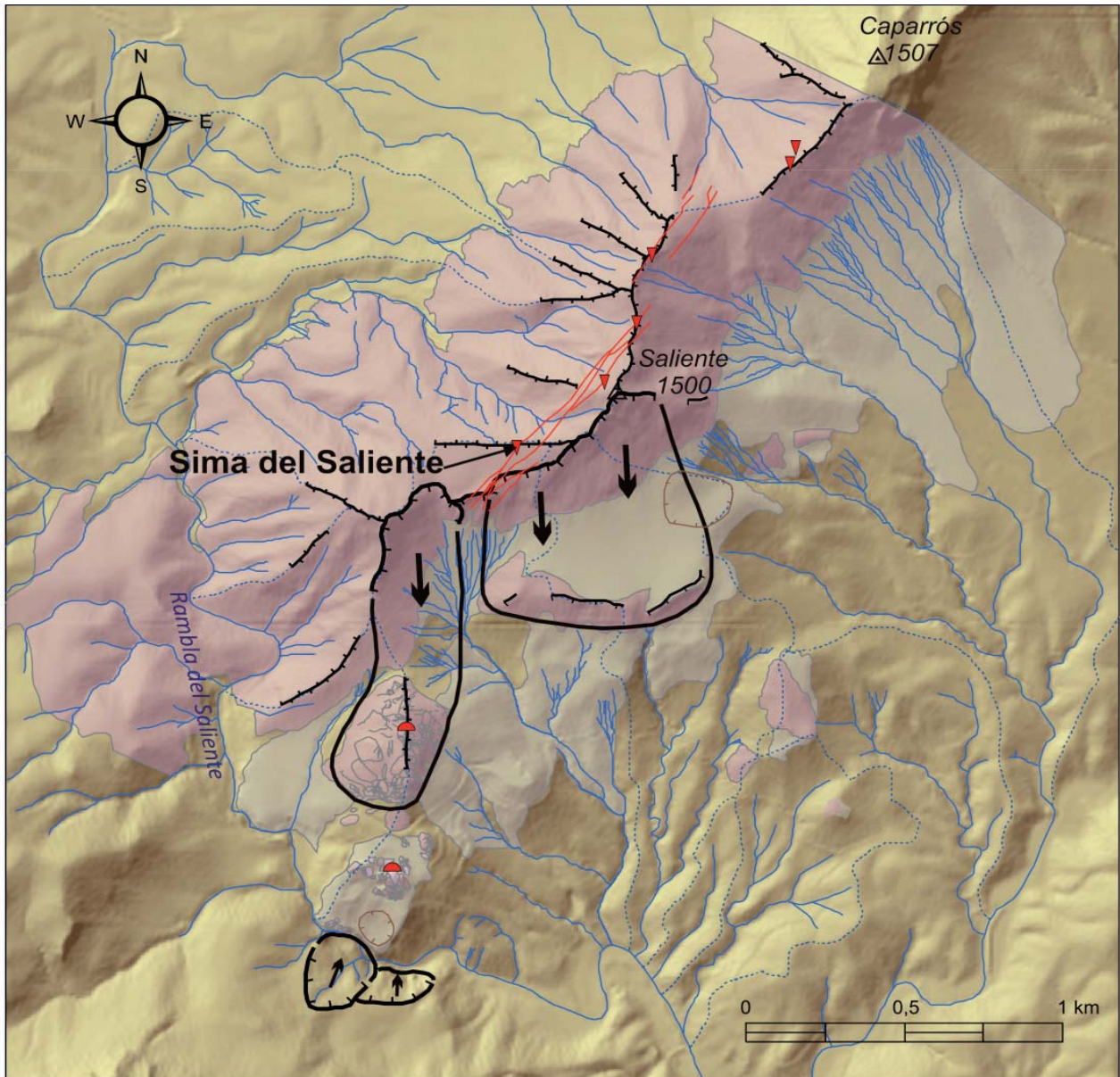


(Fig. 2). En las masas deslizadas más antiguas se conocen varias cavidades. En la alineación de cumbres de la Sierra del Saliente aparecen fracturas de gran longitud, paralelas a la dirección de esta alineación. Se trata de fracturas de tracción generadas por los movimientos en masa fósiles de la ladera suroriental de la sierra. Asociados a estas fracturas se conocen cinco simas; la de mayor desarrollo es la sima del Saliente, en la que se ha logrado descender hasta 160 m de profundidad (González-Ramón y Mateos, 2013 y González-Ramón et al., 2013).



Figura 1. Localización de la zona de estudio. Plano modificado de IBERPIX ([www.ign.es](http://www.ign.es))





- Cueva
- ▼ Sima
- Fractura
- Cresta
- Deslizamiento
- Depresion
- Brecha dolomítica
- Brecha y depósitos de talud
- Dolomías y calizas
- Filitas

Figura 2. Contexto geomorfológico en el que se sitúa la Sima del Saliente

### Metodología

Las paredes de la sima aparecen recubiertas por una gruesa colada que ha sido muestreada en la base del pozo más próximo a la entrada, a unos 12 m de profundidad desde la entrada a la sima (Fig. 3).

La extracción de las muestras se realizó mediante una perforadora de roca ROY, con broca diamantada de 2 pulgadas y máxima profundidad de muestreo de 50 cm. Se extrajo una muestra

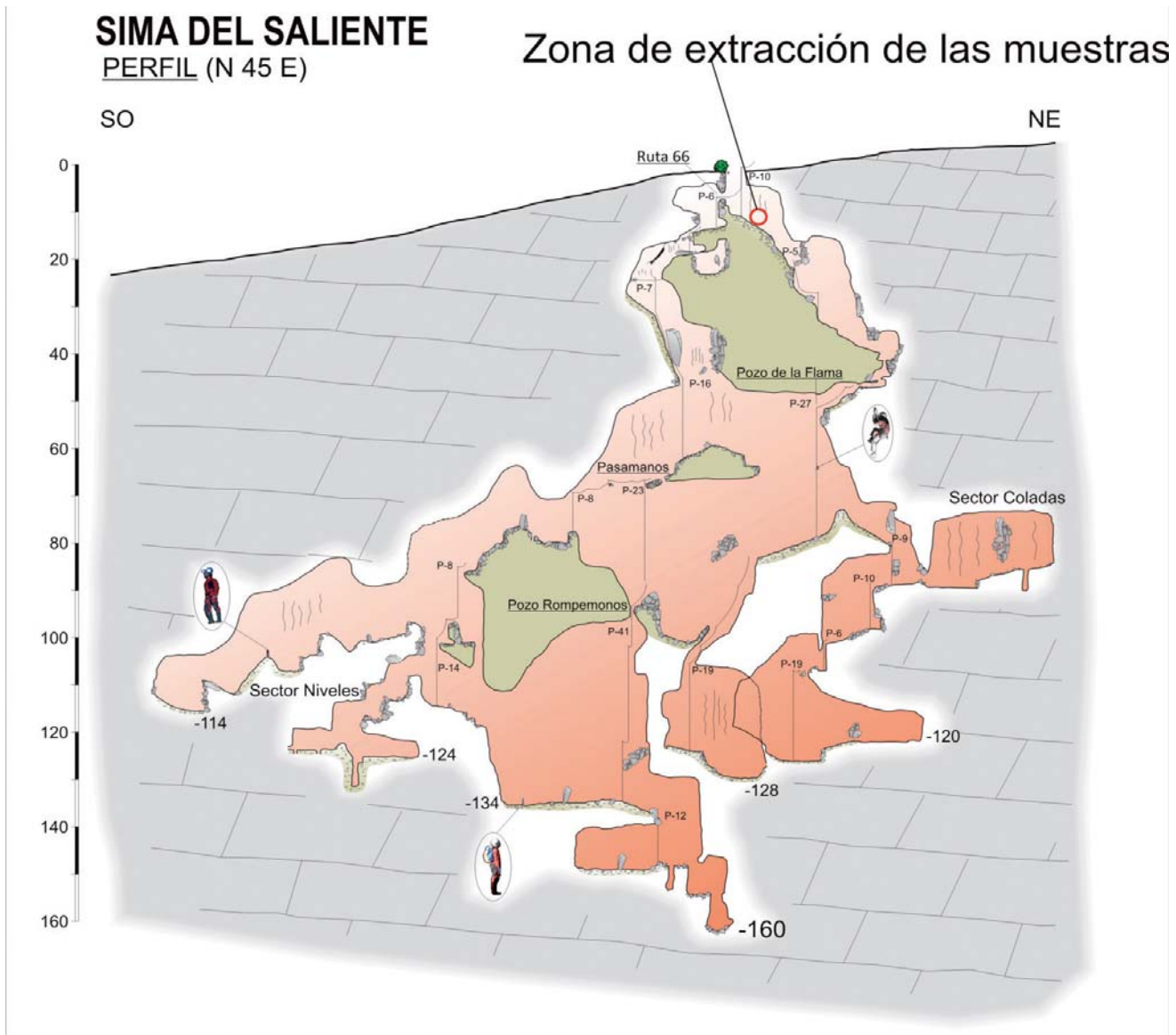


Figura 3. Perfil topográfico de la Sima del Saliente levantado en 2011 por la Asociación Espeleológica Velezana (AEV) (González-Ramón, 2015) y situación de la zona muestreada

de la pared izquierda en sentido descendente (SSPI), que alcanzó la roca de caja, y otra de la pared derecha (SSPD), que no llegó a alcanzarla, por lo que es de esperar que exista un solapamiento del registro entre ambas muestras.

La composición mineralógica de los espeleotemas se determinó mediante difracción de rayos X, utilizando un difractómetro PANalytical Pro X pert (Servicios Técnicos IACT). Para llevar a cabo los estudios de caracterización de las fábricas y hábitos de crecimiento de las coladas espeleotémicas se utilizaron técnicas de microscopía óptica convencional de baja resolución, con microscopios de polarización "LEITZ WETZLAR standard WL" y un "OLIMPUS DP-20" este último equipado con equipo microfotográfico "OLIMPUS BX60".

La obtención de las muestras para llevar a cabo los análisis isotópicos se realizó mediante un pequeño taladro automático (Dremel MultiPro 395PV). Se han obtenido las micromuestras (6-

10mg) en las diferentes láminas de precipitación que conforman las coladas espeleotémicas. En total, se cogieron 139 muestras de las que 94 fueron a lo largo del eje de crecimiento con intervalos de separación de 5-8mm (Fig. 4) y 45 corresponden a muestras de una misma lámina de crecimiento para estudiar las condiciones de precipitación en equilibrio/desequilibrio isotópico (Hendy, 1971). Las determinaciones isotópicas se realizaron en el Laboratorio de Biogeoquímica de Isótopos Estables del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT, CSIC-UGR) utilizando un espectrómetro de masas Delta Plus XL. Las concentraciones isotópicas se expresan en ‰ como desviaciones respecto a V-PDB. Las precisiones analíticas son de 0,1‰ para el  $\delta^{18}\text{O}$  y de 0,05‰ para el  $\delta^{13}\text{C}$ .

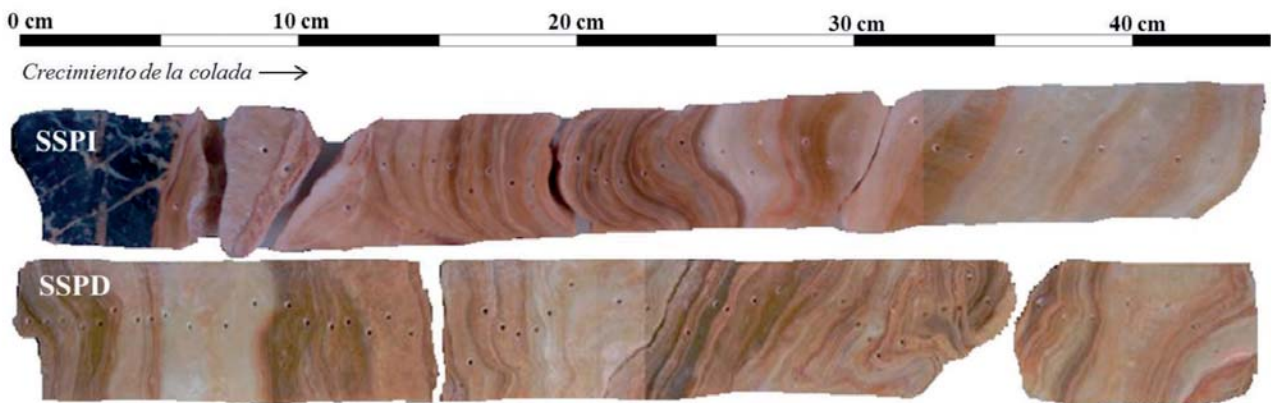


Figura 4. Corte longitudinal de los espeleotemas en los que se han llevado a cabo los muestreos para los estudios petrográficos y los análisis isotópicos

## Resultados

El análisis mineralógico de las muestras pone de manifiesto que están formadas exclusivamente por calcita. Sin embargo, la roca encajante corresponde a una dolomía.

El aspecto microscópico de las microfacies de calcita que conforman la colada espeleotémica es muy variable (Fig. 5). Las texturas o fábricas reconocidas son diversas: columnares, fibrosas, microcristalinas y macroesparíticas (Frisia, 2015). La textura columnar tiene una disposición paralela de los cristales de calcita, con límites rectos y una extinción uniforme, y líneas de crecimiento marcadas por alineación de impurezas en inclusiones. La textura fibrosa muestra cristales fibrosos-radiales y extinción ondulante. La textura microcristalina está formada por una laminación claro-oscuro alternante, de espesor variable; estas láminas separan zonas con hábitos cristalinos diferentes. La textura macrocristalina se caracteriza por cristales grandes y limpios.

En general, las texturas o fábricas mayoritarias reconocidas presentan una disposición paralela de los cristales de calcita de hábito columnar y fibroso. Asociadas a las superficies de crecimiento es posible constatar niveles con inclusiones fluidas. En algunos puntos, se distingue una laminación que responde a la incorporación de partículas arcillosas, constituyendo delgados niveles detríticos que suelen coincidir con superficies de crecimiento y que en algunos casos llegan a truncar las terminaciones cristalinas (Fig. 5).



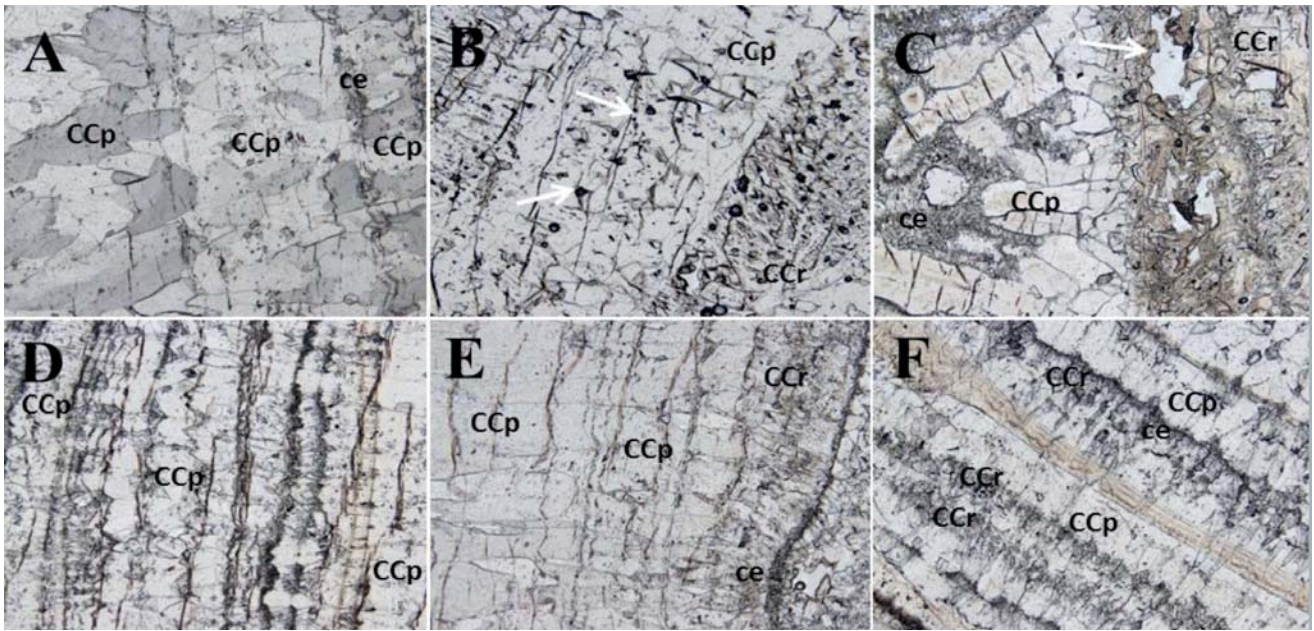


Figura 5.- Texturas observadas en las coladas espeleotémicas. A.-Extinción uniforme de los cristales de calcita columnar primaria (CCp) con nicoles cruzados. B.- Alternancia de calcita columnar primaria (CCp) y calcita columnar secundaria (CCr) e inclusiones de diferentes morfologías (flechas blancas). C.- Calcita columnar primaria (CCp), secundaria (CCr), cemento esparítico (ce), huecos de disolución (flechas blancas). D.- Superficies de crecimiento relacionadas con niveles de inclusiones más o menos continuas. E.- Calcita columnar primaria (CCp), con algunas superficies de crecimiento relacionadas con niveles de inclusiones, que muestran alguna disolución parcial de los cristales de calcita que se rellenan de cemento esparítico (ce). En algunos casos aparece calcita columnar secundaria (CCr). En las superficies de crecimiento relacionadas con niveles de inclusiones, hay sedimento arcilloso y/o óxidos de Fe arrastrados en algún evento de inundación. F.- Alternancia de calcita columnar primaria (CCp) y calcita columnar secundaria (CCr), unas veces constituyendo únicamente un cambio textural y otras veces separadas por superficies de crecimiento relacionadas con inclusiones de color oscuro; existe una disolución parcial de los cristales formando huecos que posteriormente son rellenos por cemento esparítico (ce)

Los valores obtenidos en los análisis isotópicos realizados en ambos registros espeleotémicos se muestran en la Figura 6.  $\delta^{18}\text{O}$  varía entre -5,03 ‰ y -9,13 ‰, con un valor medio de -6,90‰, mientras que  $\delta^{13}\text{C}$  está comprendido entre -1,70 ‰ y -10,39 ‰ promedio de -7,82‰. Los valores isotópicos para la roca encajante varían entre -11,74 ‰ y -9,47 ‰ de  $\delta^{18}\text{O}$ , promedio de -10,71‰ y entre 1,42 y 1,93 ‰ para el  $\delta^{13}\text{C}$ , con un valor medio de 1,74‰. En la Figura 6 no se observa una clara co-variación ( $R^2=0,25$ ) entre los valores isotópicos de oxígeno y carbono a lo largo del eje de crecimiento lo que permite descartar la existencia de procesos evaporativos que afectarían a ambos por igual.

Por otra parte, para establecer las condiciones de depósito en equilibrio/desequilibrio isotópico (Hendy, 1971) se han seleccionado 5 láminas de crecimiento en el testigo SSPD (láminas 5, 13, 21, 35, 41) y cuatro en el testigo SSPI (láminas 5, 13, 21 y 35), en ambos casos correspondientes a los niveles de base, intermedio y techo del crecimiento espeleotémico. En cada lámina se han tomado cinco puntos de muestreo, y los resultados isotópicos obtenidos muestran coeficientes de correlación en todos los casos bajos, con valores de  $R^2 = 0,15; 0,09; 0,20; 0,03$  y  $0,12$  para el testigo SSPD y de  $R^2 = 0,08; 0,19; 0,03; \text{ y } 0,02$  para el testigo SSPI.



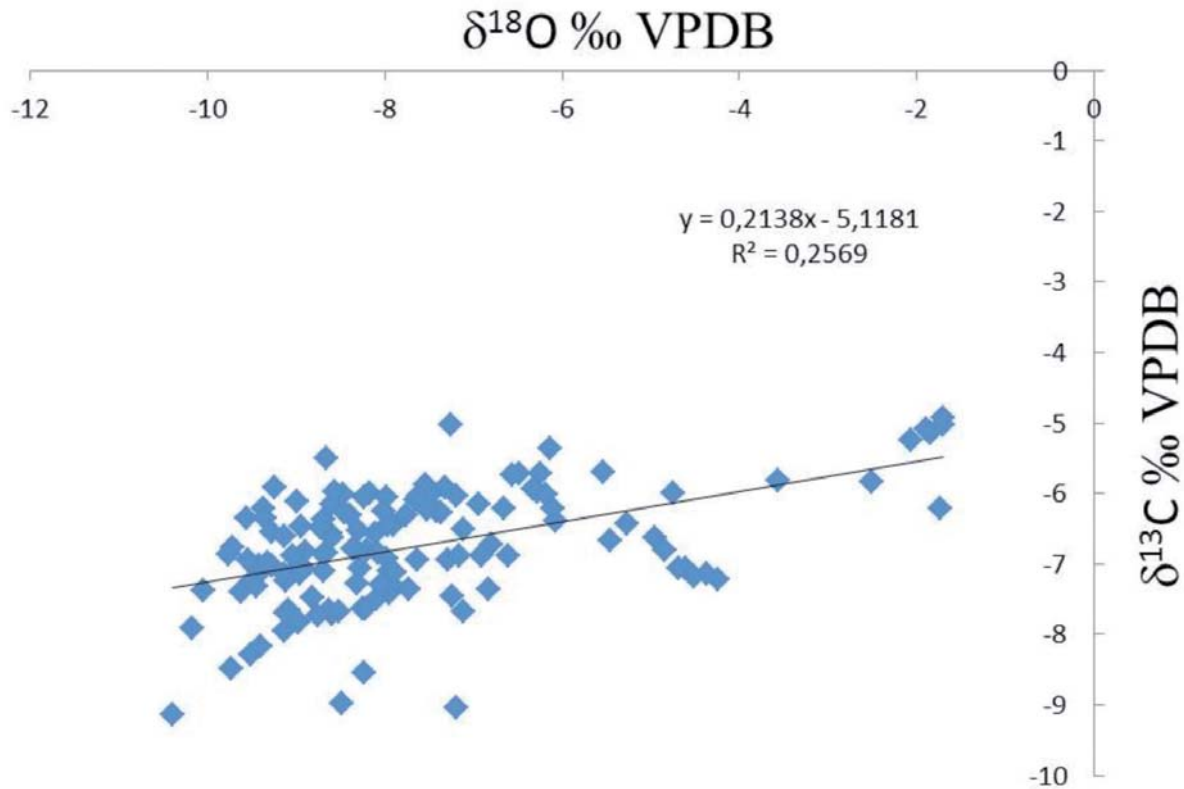


Figura 6.- Variaciones del  $\delta^{18}\text{O}$  frente al  $\delta^{13}\text{C}$

## Discusión

El análisis isotópico de estos materiales permite establecer las condiciones paleoambientales y paleoclimáticas existentes durante su formación (Frisia y Borsato, 2010). Por otra parte, el estudio petrográfico complementa esta información dado que el reconocimiento de las texturas constituye un indicador paleoclimático independiente y a la vez complementario de los datos geoquímicos (Frisia *et al.*, 2000; Fairchild y McMillan, 2007; Frisia, 2015).

El desarrollo de las diferentes texturas está relacionado con los mecanismos de crecimiento, disponibilidad y composición química de las aguas kársticas. En general, las fábricas o texturas más frecuentes observadas han sido columnares y fibrosas, las cuales han sido descritas en la bibliografía como de origen primario y aptas para realizar sobre ellas estudios isotópicos que permiten obtener datos paleoclimáticos (Kendall y Broughton, 1978; Frisia *et al.*, 1997 y 2000). Estas coladas responden a una formación a partir de aguas en movimiento continuo, aportando numerosos núcleos y un suministro continuo de reactantes (Cuevas-González *et al.*, 2007). En general, las láminas más claras indican una precipitación más rápida, mientras que las más oscuras indican un desarrollo mucho más lento, que en algunos casos puede llegar hasta la ausencia de precipitación, generándose interrupciones sedimentarias o hiatos en el registro secuencial (Fairchild y Baker, 2012).

El estudio de precipitación en equilibrio/desequilibrio isotópico realizado sobre las láminas seleccionadas en ambos testigos muestra coeficientes de correlación bajos que avalan la hipó-

tesis de una precipitación ligada a condiciones en equilibrio isotópico de las coladas espeleotémicas estudiadas. Por ello existe cierta potencialidad para obtener datos paleoclimáticos a partir del análisis isotópico de estos materiales. Los valores isotópicos de la roca encajante, se reflejan de manera muy directa en la composición de las coladas espeleotémicas que son las que constituyen el producto sólido final de los procesos kársticos.

La combinación de los datos petrográficos e isotópicos ponen de manifiesto la consistencia de la secuencias paleoclimáticas obtenidas a partir de los espeleotemas dónde se reflejan los cambios paleambientales ocurridos durante su depósito (Jiménez de Cisneros *et al.*, 2015a). En las secuencias paleoclimáticas obtenidas, hay que tener en cuenta un posible solapamiento del registro isotópico entre ambas. Los dos registros, revelan una temperatura media del área que varía entre 15°C-16°C durante el depósito y en ellos se constatan varios eventos relacionados con la alternancia de periodos más cálidos y otros más fríos acaecidos durante su formación (Jiménez de Cisneros *et al.*, 2015b). Las fases iniciales de precipitación en el registro SSPI presentan temperaturas por debajo de la media, coincidiendo con una etapa más fría, mientras que la fase final responde a una etapa algo más cálida por encima de la media. Para el espeleotema SSPD, la evolución es más fluctuante en las primeras etapas, alcanzando varios máximos de 25°C y mínimos de 11 °C pero, en general, reflejando una etapa cálida que podría correlacionarse con el periodo correspondiente a la segunda parte del registro SSPI. Las fases siguientes del registro responden a una variación relativamente más fría con temperaturas mayoritariamente por debajo de la media.

En general, estos resultados son coherentes con un depósito bajo unas condiciones cálidas, como ya han sido descritos por diferentes autores en áreas cercanas a la de estudio (Durán *et al.*, 2013; Jiménez de Cisneros y Caballero, 2013; Jiménez de Cisneros *et al.*, 2014). La datación cronológica del depósito hará posible establecer y corroborar las correlaciones entre ambos registros y comparar las tendencias durante el mismo periodo en otras áreas geográficas.

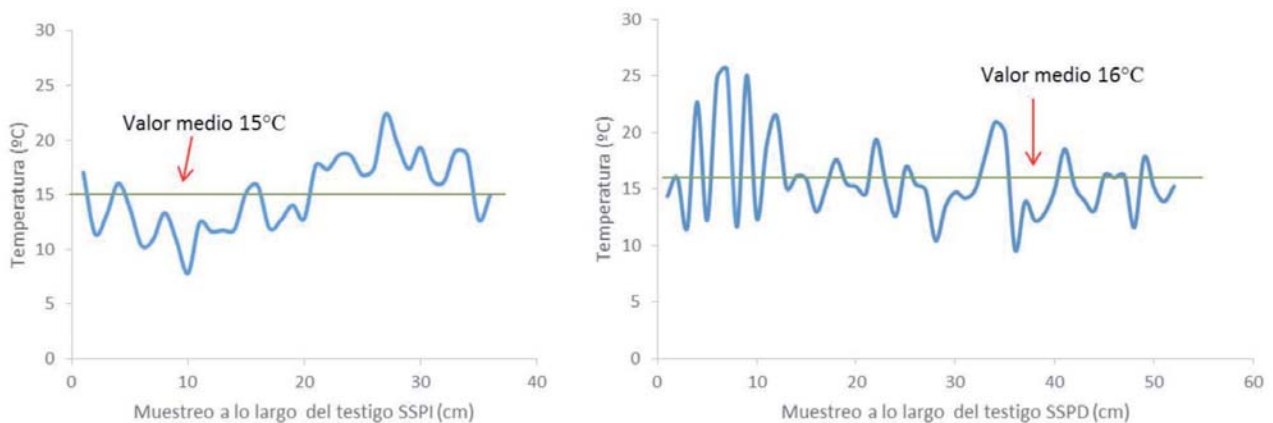


Figura 7. Registro de variación de temperaturas obtenido a partir de los datos isotópicos de  $\delta^{18}O$  en las coladas espeleotémicas

## Conclusiones

Los cambios ambientales acaecidos en el exterior de la Sima del Saliente (Almería) quedan reflejados en las variaciones texturales de las coladas espeleotémicas. En general, las fábricas

observadas, columnares y fibrosas, tienen un origen primario que responden a una precipitación sin alteraciones diagenéticas.

Se ha constatado que la precipitación de los materiales se produjo en condiciones de equilibrio isotópico y, por lo tanto, estos materiales son adecuados como potenciales indicadores paleoclimáticos.

Las curvas de variación isotópica obtenidas han permitido identificar varios eventos los cuales están relacionados con la alternancia de periodos relativamente más cálidos y/o fríos acaecidos durante la formación de la colada espeleotémica en el área de estudio. La futura datación con alta precisión mediante técnicas radiométricas ( $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ) permitirá ubicar la información paleoclimática en un marco temporal concreto.

## Agradecimientos

Esta comunicación forma parte del proyecto CGL2013-45230-R financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. Los autores agradecen a la Asociación Espeleológica Velezana, su ayuda en las extracciones de los testigos. Es una contribución al Grupo RNM-308 de la Junta de Andalucía y a la Unidad Asociada "Estudios Geoquímicos Avanzados" entre el CSIC y la UMA.

## Referencias

- Cuevas-González, J., Andreu, J.M., Cañaveras, J.C., Hernández Bravo, J.A., Sánchez-Moral, S. y García del Cura M.A. 2007. Química de las aguas de goteo en la Cueva de Canelobre (Alicante). *Geogaceta*, 41, 59-62.
- Durán, J.J., Pardo-Igúzquiza, E., Robledo, P.A. y López-Martínez, J. 2013. Ciclicidad en espeleotemas: ¿qué señales climáticas registran?. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (2): 307-321.
- Fairchild, I.J. y Baker, A. 2012. *Speleothem Science: From Processes to Past Environments*. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, 450 p.
- Fairchild, I. J. y McMillan, E. A. 2007. Speleothems as indicators of wet and dry periods. *International Journal of Speleology*, 36, 69-74.
- Fairchild, I. J., Bradby, L. y Spiro, B. 1994. Reactive carbonate in glacial systems: a preliminary synthesis of its creation, dissolution and reincarnation. *International Geological Correlation Project*, 260, 486-496.
- Frisia, S., Borsato, A., Spiro, B., Heaton, T., Huang, Y., McDermott, F. y Dalmeri, G. 1997. Holocene palaeoclimatic fluctuations recorded by stalagmites: Grotta di Ernesto (northeastern Italy). En *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, Switzerland - Vol. 1*, 77-80.
- Frisia, S., Borsato, A., Fairchild, I.J., y McDermott, F. 2000. Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and southwestern Ireland. *Journal of Sedimentary Research*, 70, 1183-1196.
- Frisia, S. 2015. Microstratigraphic logging of calcite fabrics in speleothems as tool for palaeoclimatic studies. *International Journal of Speleology*, 44, 1-16.

- Frisia, S. y Borsato, A. 2010. Chapter 6 Karst. *Developments in Sedimentology*, 61, 269-318.
- González-Ramón, A. y Mateos, R.M. 2013. Paleodeslizamientos como agente espeleogenético. Casos en las sierras de las Estancias y el Saliente (N. de Almería). En: Alonso, E., Corominas, J. y Hürlimann (Eds.) *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 183-194. Palma de Mallorca.
- González-Ramón, A., Carra-Vélez, R., Segura-Herrero, A., Sánchez-Díaz, T., Gea-López, R., Pérez-Martínez, P., Belmonte Jiménez, G. y Carra López, J.C. 2013. Las cuevas del Saliente, norte de Almería. Un ejemplo de cavidades generadas por procesos gravitacionales. *Boletín de la SEDECK*, 9, 42-51.
- González-Ramón, A. 2015. *Las cuevas de los Vélez y su entorno. Un karst diferente.* Centro de Estudios Velezanos. 144 pp.
- Hendy C.H. 1971. The isotopic geochemistry of speleothems-I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 801-824.
- Jiménez de Cisneros, C. y Caballero, E. 2013. Paleoclimate reconstruction during MIS-5a based on a speleothem from Nerja Cave, Málaga, South Spain. *Natural Science* DOI:10.4236/ns.2013.
- Jiménez de Cisneros, C., Caballero, E. Andreo, B. y Durán, J.J. 2014. Climate variability during the Middle-Late Pleistocene based on stalagmite from Órganos Cave (Sierra de Camorra, Southern Spain). In: Andreo, B. Carrasco, F. Durán, J.J., P. Jiménez and LaMoreaux, J.W. (Eds.) *Hydrogeological and Environmental Investigations*, 559-568. Springer\_Verlag Berlin Heidelberg 2015. DOI: 10.1007/978-3-642-17435-3\_63.
- Jiménez de Cisneros, C., Sequero, C., González-Ramón, A. y Caballero, E. 2015a. Análisis petrográfico de espeleotemas del sureste de la península Ibérica. Caracterización de las inclusiones fluidas. *XIV Reunión Nacional del Cuaternario*. Granada.
- Jiménez de Cisneros, C., Sequero, C., González-Ramón, A., García, A.J., Caballero, E. y Mateo R. 2015b. Reconstrucción paleoclimática preliminar a partir de un registro espeleotémico en el Sureste peninsular (Almería). *XVIII Semana de Geoquímica, X Congreso Ibérico de Geoquímica.*, 371-375. Lisboa (Portugal).
- Kendall, A. C. y Broughton, P. L. 1978. Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48, 519-538.
- McDermott, F. 2004. Paleo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23, 901-918.





## **Deducciones paleoclimáticas a partir del estudio de una estalagmita en el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep, La Vall d'Uixó, Castellón, España**

P.A. Robledo Ardila <sup>(1)</sup>, J. J. Durán Valsero <sup>(2)</sup> y Hai Cheng <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Calle Felicià Fuster 7, 07006, Palma de Mallorca, Illes Balears, pa.robledo@igme.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Calle Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, jjduran@igme.es

<sup>(3)</sup> Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, 108 Pillsbury Hall, 310 Pillsbury Dr. S.E., Minneapolis, MN 55455, USA.

---

### **RESUMEN**

El Río Subterráneo en las Grutas de Sant Josep está situado en el Parque Natural de la Sierra de Espadán, en La Vall d'Uixó, provincia de Castellón. Se trata de uno de los ríos subterráneos navegables más largos de Europa, con una longitud de 2750 m, de los cuales 800 m corresponden al recorrido turístico. Las Grutas de Sant Josep constituyen un ejemplo excepcional de cuevas turísticas activas en las estribaciones del Sistema Ibérico y del borde meridional de las Cordilleras Costero-Catalanas. La evolución de la cueva parece estar ligada en una parte importante a los cambios climáticos ocurridos durante el Cuaternario, a tenor de las características geomorfológicas observadas sobre terreno. Durante una campaña de campo se recolectó un ejemplar de una estalagmita ubicada sobre unos sedimentos detríticos compuestos por cantos rodados. Se ha realizado un estudio paleoclimático y geocronológico de la estalagmita mediante el análisis de un registro continuo en la vertical de su eje axial de los isótopos d <sup>18</sup>O y d <sup>13</sup>C, junto con dataciones absolutas con series de Uranio (Th/U). Las dataciones han dado como resultado una edad absoluta para la base de 4681 ka BP ( $\pm$  25 años) y en el ápice superior, 2042 ka BP ( $\pm$  20 ka) por lo que su desarrollo se ha producido durante el Holoceno. Los valores isotópicos obtenidos muestran variaciones entre -5,6 y -6,2, para el d <sup>18</sup>O y -9,1 y 10,1 para el d <sup>13</sup>C. En el intervalo de 5000 y 2500 ka BP las condiciones climáticas fueron muy variables a nivel global. Este hecho queda reflejado excepcionalmente en los resultados obtenidos, con algunas anomalías, eventos relativamente críticos del clima y pulsos climáticos que manifiestan periodos cálidos y fríos, secos y húmedos, pero con una tendencia general hacia un clima más cálido. La interpretación de las variaciones isotópicas observada en el registro de la estalagmita es muy útil para interpretaciones paleohidrogeológicas a nivel regional o su relación con la disponibilidad de agua en el Levante español durante más de 2000 años.

**Palabras clave:** agua subterránea, cueva, estalagmita, geocronología, paleoclima.

### ***Paleoclimatic inferences from the study of a stalagmite in the underground river of the Grutas de Sant Josep, La Vall d'Uixó, Castellón, Spain***

#### **ABSTRACT**

*The underground river of the Sant Josep cave is located in the Natural Park of the Range of Spain, in La Vall d'Uixó, Castellón province. It is one of the largest underground navigable rivers in Europe, with a length of 2750 m, with 800*

*m corresponding to show cave. The of Sant Josep cave constitute an exceptional example of show caves in the Iberian System and of the southern margin of the Costal Catalan Range. The evolution of the cave is a key to understand Quaternary climate changes. A stalagmite located on detrital sediments composed by rolled gravels and sands was collected for paleoclimate research. We performed a paleoclimatic and geochronological study of the stalagmite using absolute dating with uranium series (Th / U), together with the analysis of a continuous record in vertical axis of isotopes  $^{18}\text{O}$  y  $d^{13}\text{C}$ . Dating have resulted in an absolute age for the base of 4681 ka BP ( $\pm 25$  years) and the upper apex, 2042 ka BP ( $\pm 25$  ka) so its development has occurred during the Holocene within the Stadium Isotopic 1. The values obtained show isotopic variations between -5.6 and -6.2, for  $d^{18}\text{O}$  and -9.1 and 10.1 for  $d^{13}\text{C}$ . In the range between 5000 and 2500 ka BP the global climate conditions were highly variable. This fact is reflected in the obtained results with some critical climate anomalies and climate pulses showing warm and cold, wet and dry periods, with a general trend toward a warmer climate. The interpretation of all isotopic variations observed in this sequence is useful, for paleohydrological interpretations at the regional level and to understand the relationship between the availability of water in the east of Spain during r more than 2000 years.*

**Key words:** cave, geochronology, groundwater paleoclimate, stalagmite.

## Introducción

Las secuencias sedimentarias en el interior de las cavidades son excelentes registros para obtener información sobre el pasado climático en los últimos miles o cientos de miles de años debido al carácter conservativo de estos ambientes. Los espeleotemas, junto con los depósitos detríticos en de las cavidades, constituyen una de las respuestas sedimentarias endokársticas a las condiciones climáticas externas (Ford y Williams 1991; Durán, 1989). Durante el Cuaternario, el desarrollo de estos depósitos está determinado por los diferentes estadios climáticos de forma que, en términos generales, parece existir una relación directa entre el desarrollo de estos depósitos y la sucesión de periodos fríos y secos, cálidos y húmedos (Henning *et al.*, 1983; Durán, 1989; Muñoz, 2001; Barea *et al.*, 2000; Cuenca *et al.*, 2016). Por ello, algunos espeleotemas, han sido utilizados en los últimos años como efectivos proxies paleoclimáticos en ámbitos continentales, como el caso que ocupa este trabajo. Su importancia estriba en que, al igual que los testigos de los sondeos realizados en los hielos del Ártico y de la Antártida y en los fondos marinos profundos, los espeleotemas proporcionan registros muy continuos y de gran calidad para su estudio. En la actualidad, los estudios paleoclimáticos a partir de espeleotemas han alcanzado un notable estado de desarrollo, como lo corroboran los diferentes trabajos que se han publicado en los últimos años (McDermont, 2004; Fairchild *et al.*, 2006; Lachniet, 2009), así como la aparición de algunas monografías o artículos específicos sobre el tema (Fairchild y Baker, 2012; Robledo y Durán, 2016; Durán *et al.*, 2013).

El Río Subterráneo en las Grutas de Sant Josep está situado en el Parque Natural de la Sierra del Espadán, en La Vall d'Uixó (Vall d'Uixò, Castellón), es un ejemplo de sistema kárstico subterráneo atravesado en su interior por un río subterráneo, que en este caso es navegable en algunos de sus tramos por pequeñas embarcaciones, para realizar visitas turísticas. En esta cavidad se ha recogido un espeleotema para su estudio isotópico y geocronológico. Las dataciones absolutas realizadas han permitido deducir las principales fases de precipitación desde el Pleistoceno Medio al Holoceno, poniendo de relieve cambios notables en el comportamiento hidrogeológico local del acuífero deducidos a partir de su respuesta en la secuencia sedimentaria. Con los análisis isotópicos se han podido determinar distintas fases climáticas y correlacionarlas con los estadios isotópicos globales, obteniendo así la evolución paleoclimática local.

## Área de estudio

El municipio de la Vall d'Uixó está ubicado en la provincia de Castellón, en la comarca de la Plana Baja (figura 1). Su situación geológica es relativamente particular ya que está en la zona de confluencia de dos dominios con características litoestratigráficas y tectónicas distintas: los macizos mesozoicos de la Sierra de Espadán y la Plana de Castellón.

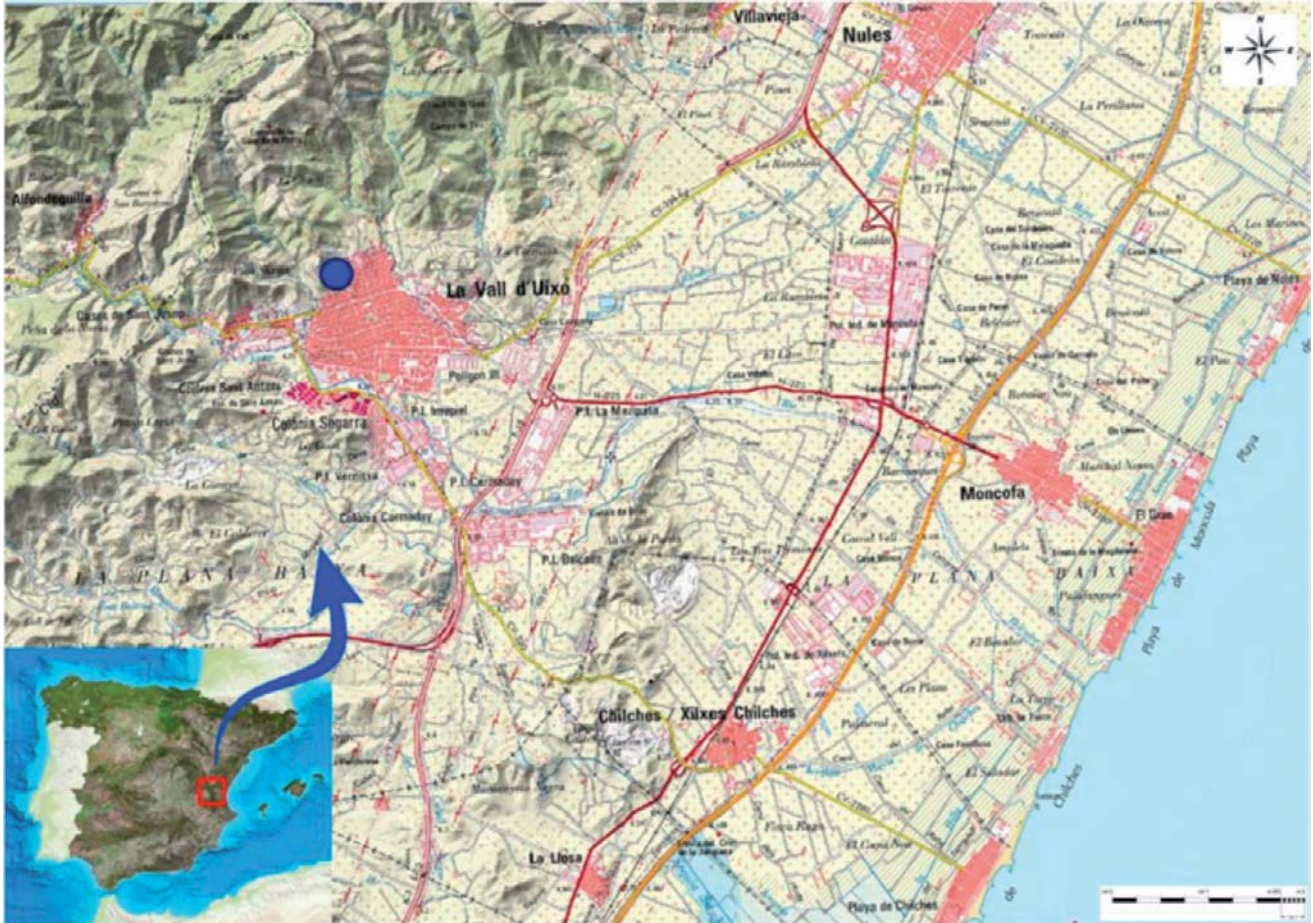


Figura 1. Situación geográfica el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep, La Vall D'Uixó, Castellón, España

La primera presenta una topografía abrupta en contraste con el llano aluvial de la Plana. Los materiales que afloran son todos prácticamente mesozoicos, salvo alguna excepción, ya que algunas depresiones contienen materiales del Terciario. Los sedimentos mesozoicos son tanto calizos como silíceos y con gran variedad de facies. También el Cuaternario aparece en las superficies adyacentes a los relieves mesozoicos, incluyendo materiales detríticos que fueron transportados por sistemas fluviales en fases de denudación reciente. Estructuralmente, en la zona domina una tectónica que divide el macizo en bloques y que da lugar a una serie de elevaciones y depresiones rellenas de materiales cenozoicos (Blázquez *et al.*, 1994). Las unidades morfoestructurales individualizadas coinciden con las unidades morfológicas de los macizos mesozoicos de la Sierra de Espadà-Pina y la Plana de Castellón. Los límites de la sierra en su margen costero están ligados a fallas con direcciones NE-NO y NO-SE. Desde el punto de vista hidrogeológico destaca el Río Subterráneo de Sant Josep que es una cavidad ubicada



en el acuífero que da nombre a la comarca. Presenta una surgencia activa que constituye el dren principal del sistema hidrogeológico, de tipo kárstico cuya área de recarga se extiende en más de 30 km<sup>2</sup>, coincidiendo aproximadamente con la cuenca hidrográfica del río Belcaire (Blázquez et al., 1994). Tiene una longitud de 2750 m de desarrollo, aunque existen todavía galerías que no han sido exploradas. La cavidad presenta un desarrollo NO-SE y NE-SO, con algunos tramos N-S. En la última parte visitable de la cavidad se han detectado varios tramos sifonados (figura 2).

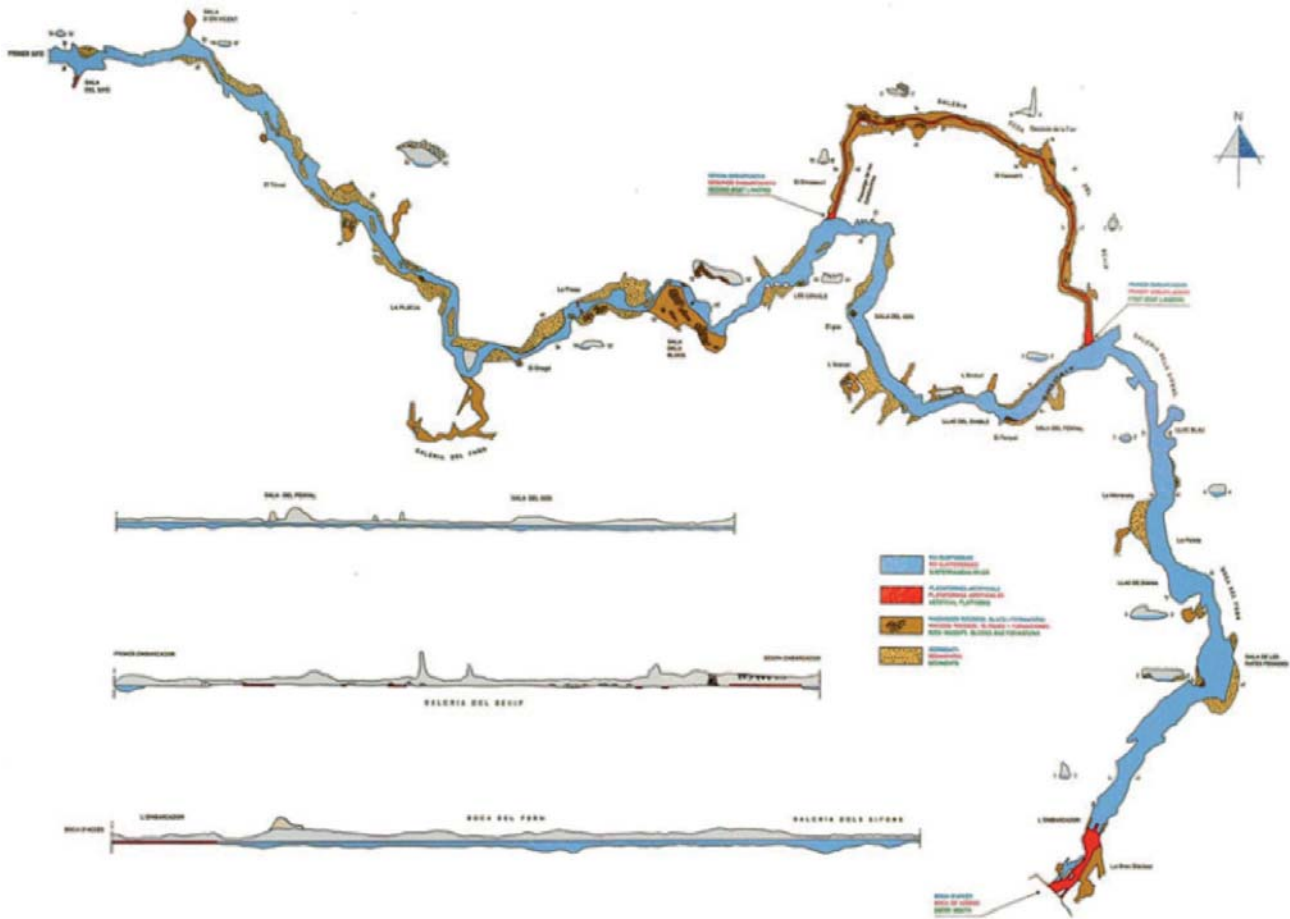


Figura 2. Plano topográfico el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep, La Vall s'Uixó, Castellón (<http://www.riosubterraneo.com/historia.html>)

## Metodología

Las espeleotemas en general y las estalagmitas en particular, son registros sedimentarios que permiten obtener una rigurosa señal paleoclimática a partir de indicadores químicos, físicos y biológicos (Fairchild et al., 2006; Durán et al., 2013). Debido a que el depósito de carbonatos al interior de cavidades ocurre en muchas ocasiones en condiciones isotópicas de equilibrio, es posible asociar el  $\delta^{18}\text{O}$  con procesos climáticos que afectan a la composición isotópica del agua de lluvia (Linge et al., 2001). Por ello, las estalagmitas son sensibles a cambios climáticos y puesto que la cronología de crecimiento se puede datar mediante técnicas radiométricas y la resolución cronológica puede llegar hasta una precisión anual, permite alcanzar una resolu-

ción temporal mayor que otros proxies (Chivelet *et al.*, 2004, Durán *et al.*, 2013). De hecho, la Subcomisión de Estratigrafía ha propuesto para un estratotipo de límite global del Holoceno inferior y superior el espeleotema de la Mawmluh Cave, Meghalaya, al noreste de la India, con un estratotipo auxiliar para el Holoceno medio a partir del registro del espeleotema de la Gruta do Padre, Brasil (Walker *et al.*, 2012).

La estalagmita el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep objeto de este trabajo, es un ejemplar que precipitó sobre un paquete de sedimentos detríticos groseros (gravas). Se trata de una estalagmita que tiene una longitud de 25 cm desde su base hasta su ápice (figura 3). Presenta un registro sedimentario muy nítido en el que la continuidad y el orden estratigráfico son claros, sin anomalías destacables o importantes discontinuidades o interrupciones sedimentarias. En la estalagmita se han realizado dos tipos de análisis; a) estudio geocronológico mediante dataciones absolutas de tres zonas de las estalagmita); b) un estudio paleoclimático mediante la realización de una amplia batería de análisis de isótopos estables del oxígeno y del carbono.



*Figura 3. Sección de la estalagmita en la que se observa las bandas de crecimientos y los sedimentos detríticos sobre los que se apoyaba durante su desarrollo*

Par determinar las edades absolutas se tomaron tres muestras en de la secuencia estratigráfica. Las muestras se identificaron como RSSJ1-1, RSSJ-2, RSSJ-3, siendo la primera la base de la estalagmita, la segunda en su zona central y la tercera en el ápice de la misma. Para obtener la edad de cada muestra se utilizó el método de las series de Uranio ( $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ) (Jaffey et al, 1971; Cheng et al, 2013). Los análisis se llevaron a cabo en el *Minnesota Isotope Laboratory*, (*Minnesota University*, EEUU).

En cuanto a los contenidos isotópicos del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  los métodos utilizados han sido los correspondientes al análisis de los isótopos estables del carbono y el oxígeno en las muestras obtenidas mediante perforación directa en cada capa elegida (figura 4). Posteriormente, han sido analizadas en los laboratorios del SIDI de la Universidad Autónoma de Madrid, utilizando patrones del laboratorio de Isótopos Estables de la Agencia de Energía Atómica de Viena y posteriormente normalizados. La metodología analítica ha consistido en la gasificación de la muestra y su análisis en un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas. La reproducibilidad de los resultados para  $1\delta$  se encuentra tanto en  $\delta^{18}\text{O}$  como en  $\delta^{13}\text{C}$  dentro de  $\pm 0,10/00$ . El patrón utilizado usualmente para el C y el O en muestra sólida es el PDB (*Belemnitella americana*, de la *Pee Dee Formation* (Carolina del Sur, EEUU), establecido por Craig (1957), aunque habitualmente se utilizan patrones propios y, posteriormente, los resultados se expresan normalizados respecto al PDB.

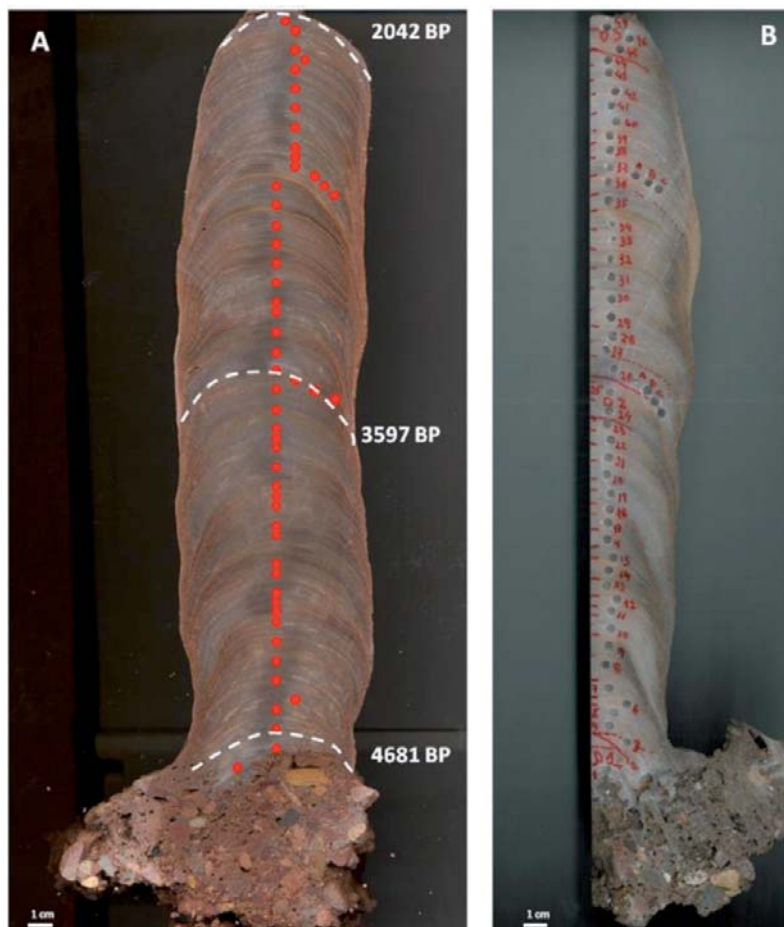


Figura 4. A) Detalle de las zonas muestreadas cada capa seleccionadas para las edades absolutas y los isótopos estables. B) Aspecto de la estalagmita en sección con las perforaciones realizadas para obtener el sedimento en polvo

## Resultados

Los datos obtenidos de las dataciones absolutas han reflejado una edad total para la estalagmita entre 4700 ka BP en su base y 2050 ka BP en su ápice (con una edad para la zona intermedia de 3600 ka BP) (figura 4). Estas edades indican que periodo geológico en el que se ha desarrollado la estalagmita tuvo lugar durante el Holoceno, exactamente en el Holoceno medio y superior de acuerdo con Walker *et al.* (2012). Además, de las edades obtenidas se deduce que el tiempo transcurrido para su desarrollo ha sido de unos 2650 ka, siendo por tanto la tasa media de sedimentación de 0,09 mm/año (9 mm cada 100 años).

En cuanto a los resultados isotópicos del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ , se tomaron un total de 45 muestras en su eje axial de crecimiento, con dos zonas en la que se verificó que el espeleotema se había formado en equilibrio isotópico (figura 4), siendo la J-1, la más cercana a la base de la estalagmita y la J-45 la ubicada justo en su ápice. Tanto los resultados del  $\delta^{18}\text{O}$  como de  $\delta^{13}\text{C}$  muestran una importante variabilidad en el contenido, con mayor amplitud para el  $\delta^{13}\text{C}$  (figuras 5 y 6). Los resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  presentan unos valores extremos entre -5,58 y -6,24, respectivamente, con un valor promedio de -5,9. En cuanto al  $\delta^{13}\text{C}$ , los valores extremos han resultado entre -9,16 y -10,05 respectivamente, con un valor promedio de -9,7. El  $\delta^{13}\text{C}$  presenta un rango de amplitud máxima cercano a 1, lo cual en sedimentos de precipitación química es habitual ya que el contenido isotópico en carbono puede verse más empobrecido o enriquecido isotópicamente en algunos momentos por la influencia del suelo y la vegetación en la zona de recarga o por el contacto con la roca encajante durante la circulación, mostrando en ocasiones un ruido en los resultados (Mook, 2002; Robledo, 2005).

## Discusión

El Holoceno en general, se ha considerado como un periodo cálido, donde se produce una evolución climática global desde condiciones frías a condiciones más atemperadas similares a las actuales, después de la gran crisis climática del último periodo glacial. El Óptimo Climático Global fue un período cálido que se produjo durante el intervalo comprendido aproximadamente entre 9000 y 5000 ka BP. Sin embargo, por distintas causas el calentamiento probablemente no fue uniforme en todo el Planeta (Bond *et al.*, 2001) y es importante atender a los pulsos climáticos regionales que pueden inducir importantes diferencias con respecto a las curvas globales obtenidas de registros de hielo o de sedimentos marinos. En el levante y sur de la Iberia Mediterránea las condiciones máximas de humedad son algo más tardías, entre 7000 y 6000 ka BP (Fernández *et al.*, 2007; Carrión *et al.*, 2007 y 2008). El inicio de estas condiciones más húmedas del Holoceno temprano parece que tampoco fue sincrónico a lo largo de la península. En algunas zonas del noreste de España hay indicios que lo sitúan a 9500 ka BP (Morellón *et al.*, 2009) pero otros registros del sur de la península lo reflejan hace unos 8000 ka BP (Pantaleón-Cano *et al.*, 2003). A partir de los 5000 BP, se inicia una tendencia hacia un clima más frío en el cual las temperaturas disminuyeron progresivamente hasta la actualidad (en periodos cíclicos de calentamiento/enfriamiento), con probables excepciones como el Óptimo Climático Romano (siglos I a IV) o el Óptimo Climático Medieval (siglos X a XIV). El punto culminante del máximo de enfriamiento fue la Pequeña Edad de Hielo, con tres máximos, 1650, 1770 y 1850. No obstante, las deducciones climáticas globales, casi siempre distan de



las condiciones regionales o locales, donde el efecto de la latitud, altitud o el mismo mar pueden ser claves y desviaciones considerables de las curvas climáticas globales.

En cuanto a la interpretación de los resultados obtenidos a partir de los datos de  $\delta^{18}\text{O}$  en el intervalo 4700-2000 ka BP, la tendencia general de la curva es hacia un clima más cálido, aunque se producen algunas anomalías destacables (figura 5). De los resultados se deduce que el máximo enfriamiento se produce al inicio de la formación del espeleotema (con un  $\delta^{18}\text{O}$  de -5,58) que además coincide, de acuerdo con el registro sedimentario, con una disminución de agua en el sistema y, por consiguiente, con una menor disponibilidad hídrica regional. Esto se ve reforzado por las evidencias de campo, ya que la estalagmita se apoya sobre un paquete de sedimentos detríticos groseros, constituido por cantos rodados de tamaños milimétricos y centimétricos, que sugieren que en ese momento había un flujo de agua lo suficientemente energético para transportar y depositar en el interior de la cueva este tipo de material. La disminución del aporte hídrico en la cavidad se traduce en cambio en el tipo de flujo de agua, pasando de turbulento a laminar o, únicamente un goteo, que además no se ve interrumpido durante al menos 2500 años por la dinámica del Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep.

Los valores del un  $\delta^{18}\text{O}$  muestran que el óptimo climático de la curva de la estalagmita de Sant Josep se produce en torno a los 3000 ka BP, (con un  $\delta^{18}\text{O}$  de -6,24), con un segundo óptimo

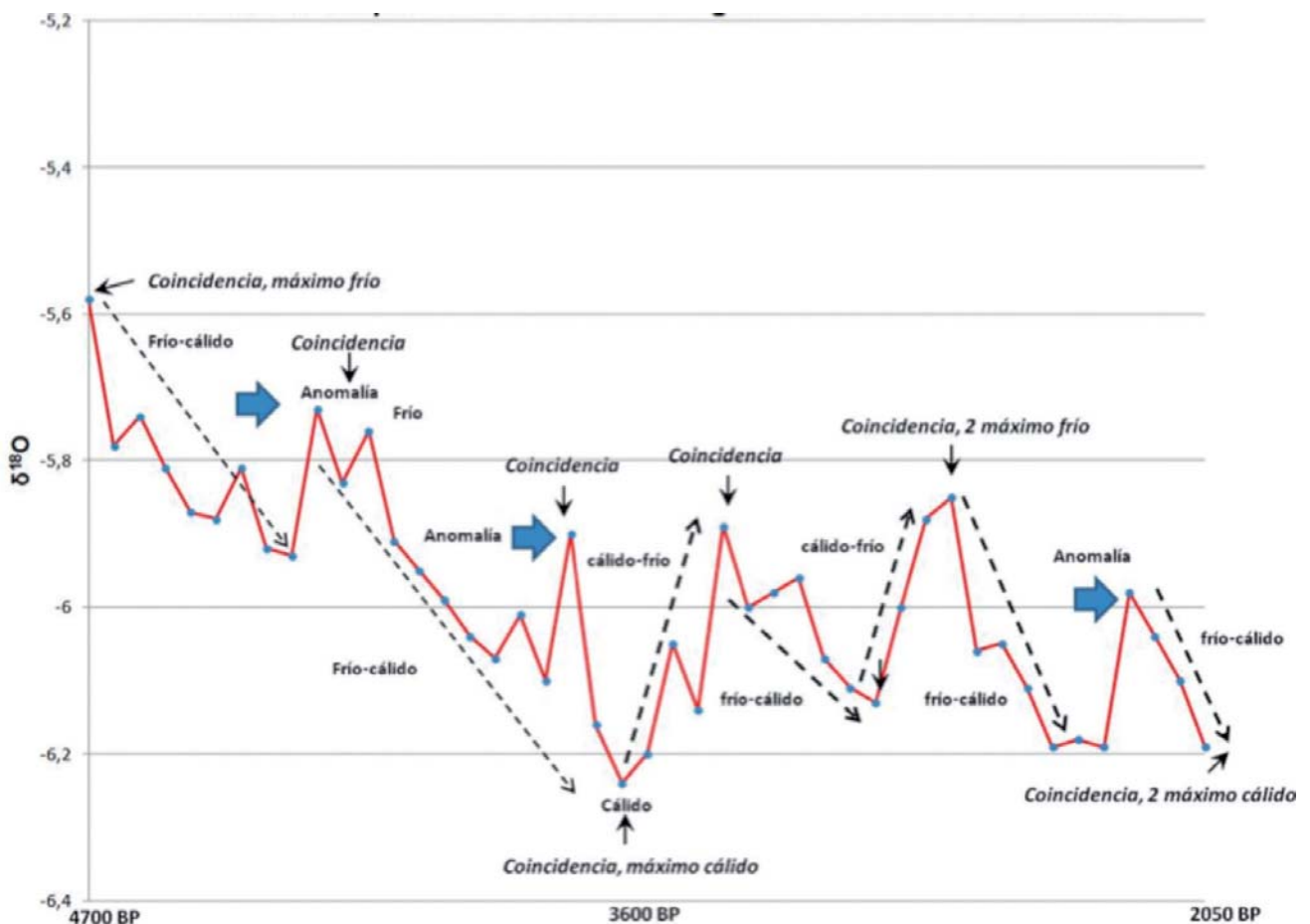


Figura 5. Curva isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  obtenida para la estalagmita el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep

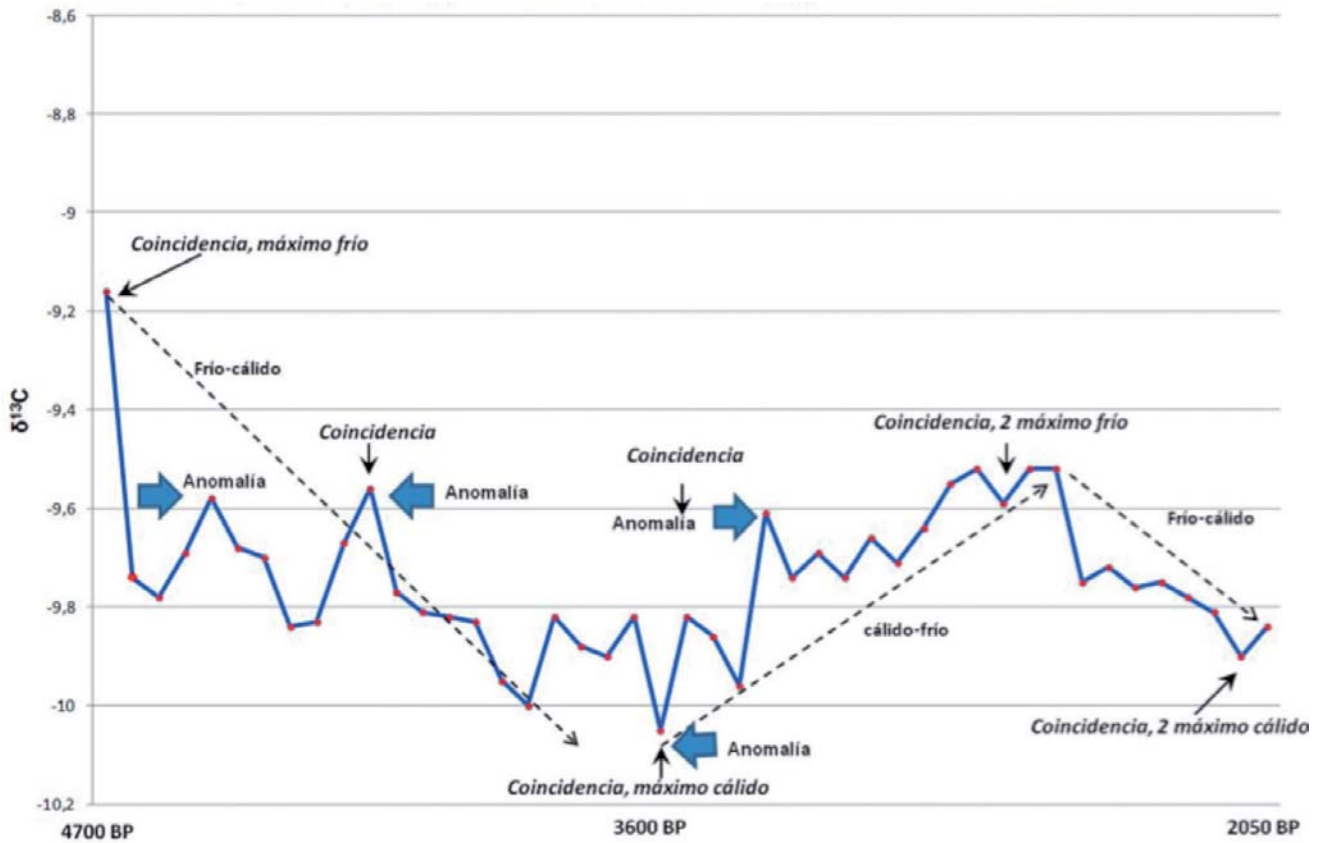


Figura 6. Curva isotópica de  $\delta^{13}\text{C}$  en la estalagmita el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep

regional muy cercano al primero, con un  $\delta^{18}\text{O}$  de -6,19 (figura 5). Cabe mencionar que de los resultados también se deducen cambios climáticos abruptos, algunos de los cuales se reflejan en anomalías de los registros obtenidos (tanto del  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ), con períodos fríos y cálidos, y secos y húmedos (figura 5 y 6).

La curva del carbono muestra una tendencia similar, con valores que van desde menos negativos a más negativos, aunque también muestra una alta variabilidad (figura 6). La correlación entre  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en este caso es directa, ya que ambas curvas muestran una tendencia global hacia valores más negativos (figura 6). Este aspecto es especialmente interesante, ya que una disminución de agua en el sistema puede dar como resultado contenidos isotópicos del carbono más ligeros, como los que se producen en este ejemplo.

Estas consideraciones deducidas de los registros del oxígeno y el carbono en la estalagmita estudiada coinciden con otros estudios globales, como los realizados por Broecker (2001); por una parte muestra la alta variabilidad climática en los últimos 10.000 años, con una importante fluctuación entre los 5000 y 2500 ka BP. Concretamente y coincidiendo con los resultados obtenidos en  $\delta^{18}\text{O}$  de la estalagmita, se observa que entre 5000 y 2500 ka BP, los períodos cálidos son los que presentan mayor amplitud temporal.

Esta última hipótesis puede no estar en consonancia con algunos trabajos que asocian casi siempre los eventos fríos a épocas secas. De hecho, en algunos momentos del Holoceno ha sido así, como en el evento 8200 ampliamente descrito (Cheng *et al.*, 2009), donde se produjo

un descenso de temperatura del clima global ligado a condiciones muy áridas. Sin embargo, el registro isotópico de la estalagmita aquí estudiada muestra que los periodos cálidos no necesariamente está asociado a épocas más húmedas, sino que efectivamente pueden coincidir con sequías importantes, por lo menos a escala regional.

## Conclusiones

Las dataciones absolutas y los valores isotópicos obtenidos en la estalagmita el Río Subterráneo de las Grutas de Sant Josep, ponen de relieve pulsos que pueden relacionarse con momentos cálidos y secos, ligados a una menor disponibilidad de agua en el ambiente, pudiendo darse importantes sequías. Teniendo en cuenta que el agua ha sido la clave para el asentamiento de las civilizaciones en el Mediterráneo occidental, estas variaciones son muy importantes, entre otras cosas, para entender la evolución de las poblaciones humanas en el levante español. Los cambios en la disponibilidad de agua regional ligados al acuífero y deducidos del registro sedimentario e isotópico, podrían haber afectado directamente a las civilizaciones que ocupaban el entorno concreto en ese momento, con posibles migraciones de éstas hacia lugares de la Península Ibérica donde el agua fuera más abundante. Estos cambios del clima también fuerzan de alguna forma al poblador del momento a modificar su sistema de vida, con influencias sobre el tipo de comercio o los productos que intercambian, necesarios para paliar ciertos déficits o aprovechar cierta abundancia. Pero también pueden influir de forma muy importante en el cambio y desarrollo de la agricultura, cambiando el tipo de cultivo, más adaptado a un clima cálido y seco.

Por todo ello, los resultados que se discuten en este trabajo ofrecen registros paleoclimáticos que abre una nueva ventana al conocimiento de la variación del clima durante casi 3000 años y su influencia con elementos clave como el sistema paleohidrogeológico en el que se desarrolló la estalagmita.

## Referencias

- Barea, J., Casas, J., Durán, J.J., López-Martínez, J. y Martín de Vidales, J.L. 2000. Interés paleoambiental del estudio de sedimentos detríticos endokársticos. Aplicación a cavidades del centro de la Península Ibérica. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 111 (2-3), 17-32.
- Blázquez, A., Garay, P. y Medina, R. 1994. Estudio de la Cova de Sant Josep (LaVall d'Uixó, Comparaca de la Plana Baja). Parte 1. Topografía. *Lapiaz*, 23, 19-34.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. y Bonan, G., 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*. Vol. 294 (5549), 2130-2133.
- Broecker, W. S. 2001. Was the Medieval Warm Period Global? *Science*. Vol. 291. 5508: 1497-1499.
- Carrión, J. Finlayson, S., Fernández, S., Finlayson, G., Allué, E., López-Sáez, J., López-García, P., Gil-Romera, G., Bailey, G. y González-Sampériz, P. 2008, A coastal reservoir of biodiversity for Upper Pleistocene human populations: palaeoecological investigations in Gorham's

- Cave (Gibraltar) in the context of the Iberian Peninsula, *Quaternary Science Reviews*, 27, 2118.
- Carrión, J. S., Fuentes, N., Gonzalez-Sampériz, P., Sánchez Quirante, L., Finlayson, J. C., Fernández, S. y Andrade, A. 2007, Holocene environmental change in a montane region of southern Europe with a long history of human settlement, *Quaternary Science Reviews*, 26, 1455.
- Craig H., 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochemical . Cosmochimica. Acta*, 12, 133-149.
- Cuenca, J., Robledo, P.A., Durán, J.J., Pardo-Iguzquiza, E., Cheng, H., Martos, S. Luque., J.A. y Moreno, L. Deducciones paleoclimáticas a partir del estudio de una secuencia sedimentaria alternante de espeleotemas y sedimentos detríticos en Sima Engañá, Sierra de las Nieves (Málaga). *Cuaternario y Geomorfología*. (En prensa)
- Nonat, J. y Bartolomé, J. 1961. Estudio geoespeleológico de la Cueva de San José (Vall de UxóCas tellón). *Boletín Geológico y Minero*. IGME, 64, 175- 195. Madrid.
- Cheng, H., Fleitmann, D. y Edwards, RL, *et al.* 2009. Timing and structure of the 8.2 kyr B.P. event inferred from  $\delta^{18}O$  records of stalagmites from China, Oman and Brazil. *Geology*, 37: 1007–1010.
- Cheng, H., Edwards, RL. y Shen, C.C. *et al.* 2013. Improvements in  $^{230}Th$  dating,  $^{230}Th$  and  $^{234}U$  half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector, inductively coupled plasma mass spectrometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 371-372: 82-91.
- Durán, J.J. 1989. Geocronología de los depósitos asociados al karst en España. En: *El Karst en España* (Durán, J.J.; López, J., eds.), Monografías, 4, 243-256. Sociedad Española de Geomorfología.
- Durán, J.J., Pardo-Iguzquiza, E., Robledo, P. A. y López, J. 2013. Ciclicidad en espeleotemas: ¿Qué señales climáticas registran? *Boletín Geológico y Minero*, 124 (2): 303-317
- Fairchild, I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D. y McDermontt, F. 2006. Modification y preservation of environmental signals in speleothems, *Earth- Science Reviews*, 75, 105-153.
- Fairchild, I. y Baker, A. 2012. *Speleothem Science: From Processes to Past Environments*. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, pp. 450.
- Fernández, J., J. P. Montávez, J. Sáenz, J. F. González-Rouco y E. Zorita 2007. Sensitivity of the MM5 mesoscale model to physical parameterizations for regional climate studies: Annual cycle, *Journal of Geophysical Research*. 1029.
- Ford, D.C. y Williams, P.W (Eds.). (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. Unwin and Hyman. Londres. 601 p.
- Henning, G.J., Grün, R. y Brunnacker, K. 1983. Speleothems, travertines and paleoclimates. *Quaternary Research*, Vol. 20, 1-29.
- <http://www.riosubterraneo.com/historia.html>
- Imbrie, J., Hays, J.D.; Martinson, D.G., McIntyre, A.; Mix, A.C., Morley, J.J., Paces, N.G., Prell, W.L., N. Shackleton, J. 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine  $^{18}O$  record. In: *Milankovitch and Climate*, Part I, edited by A. Berger *et al.*, 269-305, D. Reidel, Norwell, Mass.
- McDermott, F. 2004. Paleo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Review*, 23, 901-918.



- Mook, W.G. 2002. *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B., Vegas, T., González-Sampériz, P., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, M. y Corella, P. 2009. Late glacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: the Lake Estanya record (NE Spain), *Quaternary Science Reviews*, 28, 2582–2599.
- Muñoz, A., Peña, J.L., Sancho, C. y Martínez, M.A. 2001. Los espeleotemas de las cuevas de Ortigosa de Cameros (La Rioja): datos cronológicos y consideraciones paleoambientales. *Geogaceta*, 30, 95-98.
- Pantaleón-Cano, J., Yll, E.-I., Pérez-Obiol, R. y Roure, J. M. 2003. Palynological evidence for vegetational history in semi-arid areas of the western Mediterranean (Almeria, Spain), *The Holocene*, 13, 109-119.
- Robledo P.A. 2005. *Los Paleocolapsos kársticos en las plataformas carbonatadas del Mioceno superior de Mallorca: análisis geográfico, genético, geológico y evolutivo*. Tesis Doctoral, Universitat de les Illes Balears, 305 pp.
- Uzquiano, P. y Arnanz, A.M. 1997. Consideraciones paleoambientales del Tardiglacial y Holoceno inicial en el levante español: macrorrestos vegetales de El Tossal de la Roca (Vall d'Alcalà, Alicante). *Anales Jard. Bot. Madrid* 55(1): 125-133.
- Walker MJC, Berkelhammer M, Björck S, et al. 2012. Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*: 27, 649-659.

## Turismo subterráneo en Ecuador

R. Jordá-Bordehore <sup>(1)</sup>, L. Navas-Guzmán <sup>(2)</sup>, L. Jordá-Bordehore <sup>(1)</sup>, P. L. Romero-Crespo, <sup>(3)</sup> y J.J. Durán-Valsero, <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Rudnik Ciencias de la Tierra S.L., C/ Cañada nº5 p. A 2º izq., 28720 - Bustarviejo, Madrid, rafaél\_jorda@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (Ecuador)

<sup>(3)</sup> Escuela Politécnica del Litoral (Ecuador)

<sup>(4)</sup> Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosa, 23, 28003 - Madrid jj.duran@igme.es

---

### RESUMEN

Ecuador es uno de los países de menores dimensiones de América del Sur, sin embargo, presenta una de las mayores tasas de biodiversidad del planeta. Esto se debe principalmente a dos factores, las condiciones climáticas, dada su ubicación ecuatorial, y a su orografía, la cual está muy vinculada a su elevada geodiversidad. Ésta se ve representada no solo en superficie, sino también en el mundo subterráneo. Existe una variada tipología de cavidades, tanto naturales, como antrópicas, fruto del beneficio por parte del hombre de los recursos geológicos. El aprovechamiento turístico de estas cavidades es una realidad desde hace años en el caso de las Islas Galápagos y, en otras zonas, podría llegar a ser uno de los principales atractivos para un tipo de turista muy focalizado en cultura y naturaleza.

**Palabras clave:** Ecuador, geodiversidad, potencial turístico, turismo subterráneo.

## *Underground tourism in Ecuador*

### ABSTRACT

*Ecuador is one of the smallest countries in South America, but has one of the biggest taxes of biodiversity in the world. This fact is because two factors, the climate conditions for the equatorial situation and its orography, closely related to its high geodiversity. This is represented not only in the surface, but also in the underground world. There is a varied typology of cavities, both natural, as anthropic, result of the benefit by the man of geological resources. The tourism exploitation of these cavities is a reality for years in the case of the Galapagos Islands and in other areas, could become one of the main attractions for a type of very targeted tourists in culture and nature.*

**Key Words:** Ecuador, geodiversity, tourism potential, underground tourism.

### Introducción

A pesar de sus pequeñas dimensiones, con un territorio de 283.560 km<sup>2</sup>, Ecuador posee una gran riqueza natural, siendo el país con mayor número de ríos por km<sup>2</sup> y una de las mayores tasas de biodiversidad del planeta. Esta gran variedad natural y paisajística queda reflejada en las cuatro grandes regiones en las que se divide el país, desde las conocidas Islas Galápagos, la zona costera con sus manglares, selvas y playas vírgenes, pasando por la cordillera de los Andes, con numerosos nevados, para finalmente alcanzar la Amazonía, una gran extensión que ocupa casi la mitad del país, constituida por selvas y ríos caudalosos (Figura 1).



Figura 1. corte topográfico del Ecuador en sentido Oeste-Este, no sujeto a escala. Fuente: Ministerio de Turismo del Ecuador

Desde el punto de vista turístico, sin llegar a alcanzar las cifras de los países vecinos, Perú y Colombia, Ecuador está experimentando un potente desarrollo, con el objetivo de que sea el turismo a medio plazo, una de las principales fuentes de ingresos del país. A pesar de contar con ciudades Patrimonio de la Humanidad, como el caso de Quito o Cuenca, la mayor parte del turismo extranjero centra las visitas en las islas Galápagos con un cupo de visitantes limitado, marcado por la protección de tan único lugar. Las zonas costeras, así como la sierra y la Amazonia reciben principalmente turismo nacional.

En los últimos años, el país ha aumentado considerablemente el número de visitas, con más de 1,5 millones de turistas extranjeros en el año 2015 (similar a 2014, pero con un aumento de 100.000 visitantes anuales desde 2010). Un reflejo de este incremento, son los 22 trimestres consecutivos de aumento de ingresos por concepto de turismo (Figura 2), así como las 400.000 personas empleadas en el sector, siendo el tercero a nivel nacional en cuanto a número de empleados.

Cada vez es más frecuente el turismo de tipo cultural y de naturaleza, produciéndose una diversificación de destinos turísticos, lo que sin duda ayuda a un desarrollo sostenible, aportando una mayor estabilidad económica a numerosas zonas del país.

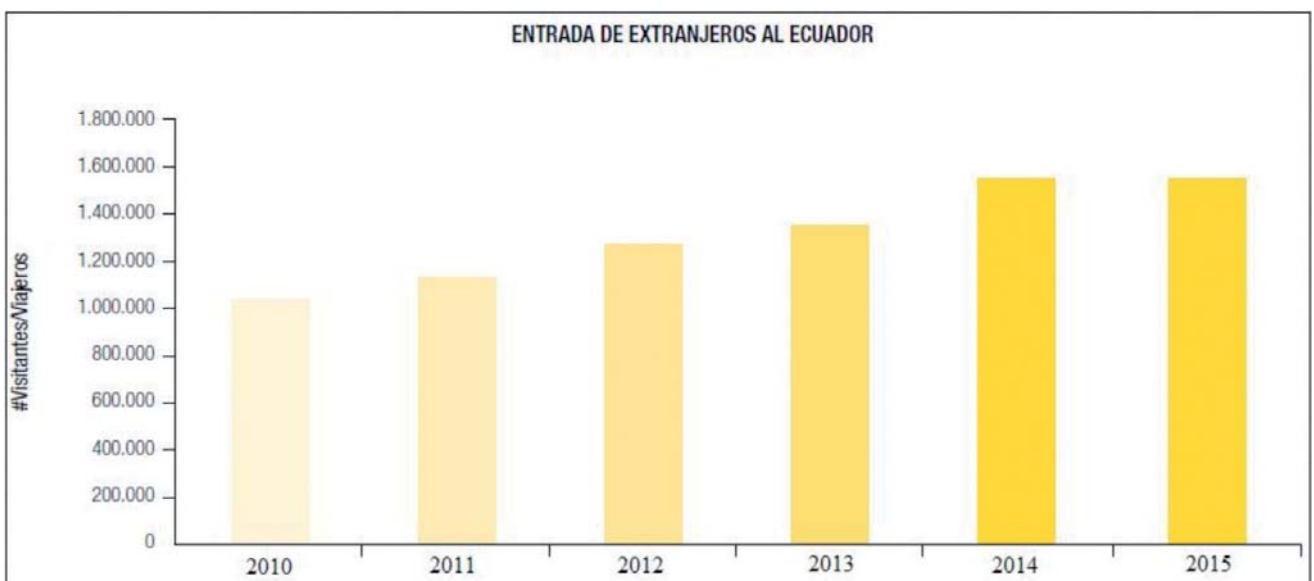


Figura 2. evolución de la entrada de extranjeros a Ecuador entre los años 2010 y 2015. Fuente: Ministerio de Turismo del Ecuador.

Uno de los alicientes que presenta Ecuador, es la presencia de numerosas cavidades de singular belleza, tanto de tipo natural, como antrópicas. Las primeras cuevas en ser acondicionadas para uso turístico, hace más de 40 años, fueron los túneles de lava de las Islas Galápagos, principalmente en la isla de Santa Cruz. Otras cuevas, a pesar de contar con renombre internacional, como en el caso de Los Tayos, en la región Amazónica, no han sido aprovechadas, hasta la fecha, como destino turístico. De manera general, el turismo subterráneo está aún por desarrollar, sin embargo, puede llegar a ser un aliciente más, o incluso un foco de atracción turística en algunas regiones.

En este artículo se enumerarán las principales cavidades, analizando tanto su origen como su gestión en aquellas que se encuentran acondicionadas y en explotación.

### Tipología de las cavidades de Ecuador

Aunque por lo general son poco conocidas, en Ecuador existen cerca de 40 cavidades visitables o en proceso de acondicionamiento, localizadas en dos zonas; por un lado, en las Islas Galápagos, caracterizadas por recorridos subterráneos que se desarrollan en túneles de lava; y por otro el área en la cual se encuentran los mayores afloramientos carbonáticos, en el paso

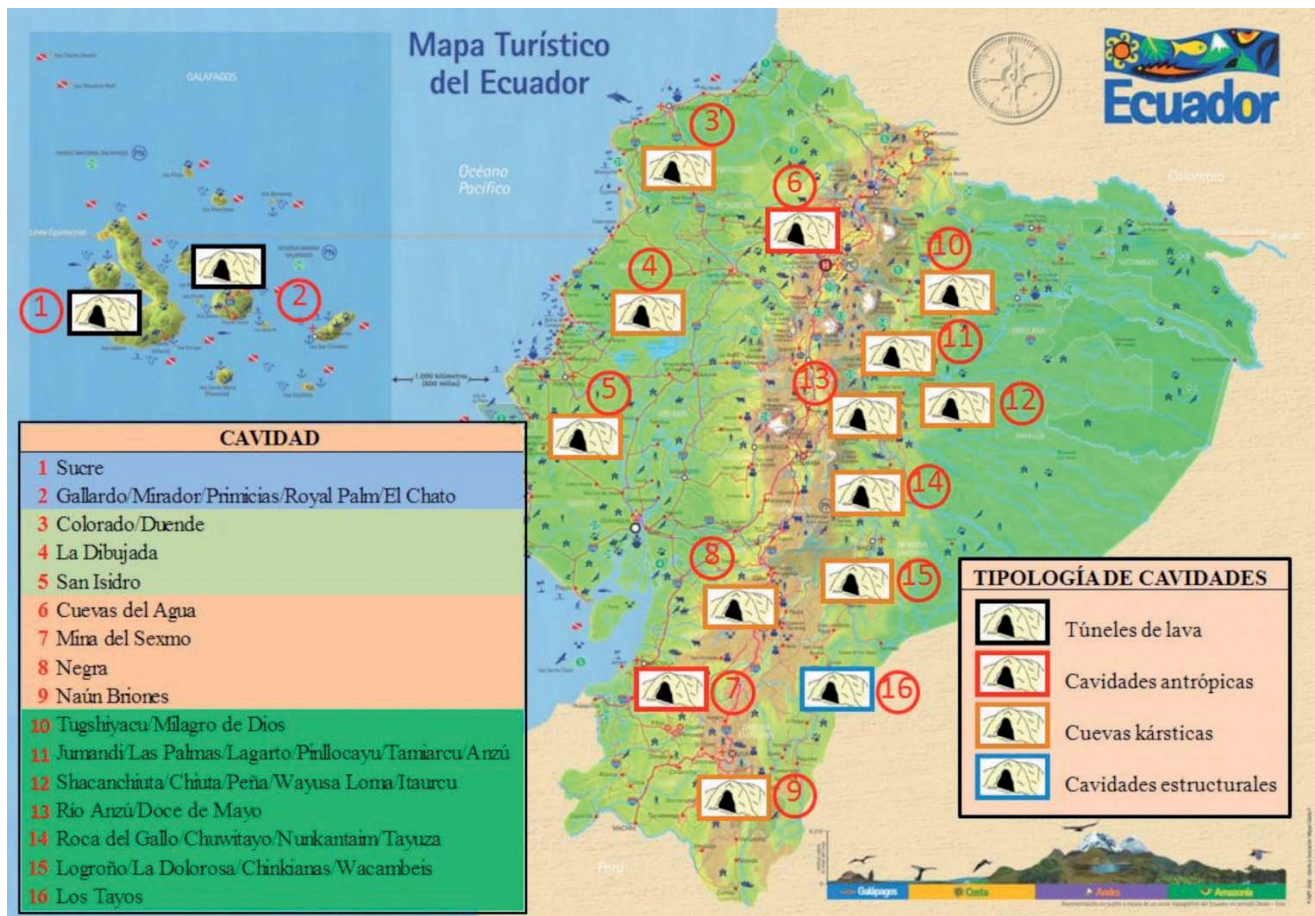


Figura 3. situación aproximada de las principales cavidades ecuatorianas. Modificado del mapa turístico del Ecuador, Ministerio de Turismo del Ecuador



de la zona de la cordillera a la llanura amazónica. El resto de cavidades se localizan dispersas en la zona costera y en la sierra.

La tipología de las cavidades ecuatorianas es muy variada, desde cuevas con origen volcánico, como es el caso de las Islas Galápagos, las clásicas cuevas kársticas producto de la disolución, algunas de tipo estructural, ligadas a colapso, como Los Tayos y finalmente, algunas de origen antrópico, vinculadas a la actividad extractiva o de aprovechamiento del subsuelo (Figura 3).

Los principales recorridos subterráneos, a excepción de las cavernas de Jumandi, en la zona amazónica, se localizan en terrenos privados, siendo las cavidades con mayor afluencia de visitantes aquellas situadas en las granjas turísticas de la Isla de Santa Cruz, en Galápagos y la mina de El Sexmo en la localidad de Zaruma, al sur del país. La gestión de las cavidades turísticas difiere de unas a otras, siendo en algunos casos, incluso, los accesos libres y sin acompañamiento de guías.

No existe una metodología ni legislación relativa al acondicionamiento de los espacios subterráneos y la bibliografía referente al uso del subsuelo con fines turísticos es prácticamente inexistente en Ecuador. En cuanto al número de visitantes, al estar incluidas la mayoría de las cavidades en circuitos turísticos más amplios no existe un registro de las entradas, siendo la mina de El Sexmo la única que cuenta con datos reales de los turistas que ingresan como se mostrará más adelante.

## **Túneles de lava**

Los túneles de lava de las Islas Galápagos son conocidos desde que Charles Darwin llegó a este archipiélago en el siglo XIX (Halliday, 1999). Se trata de cavidades subhorizontales formadas por un enfriamiento diferencial de la lava. Debido a que se localizan generalmente a poca profundidad, son habituales en este tipo de cavidades los colapsos superficiales, que suelen utilizarse como acceso para los visitantes. Por lo general, los túneles de lava de las Islas Galápagos se encuentran en ranchos particulares, en los que las visitas subterráneas están incluidas en un circuito más amplio, generalmente vinculado a las granjas de tortugas gigantes.

En la actualidad existen cinco túneles turísticos y uno en proyecto para su visita (Tabla 1). El primero en hacerse visitable fue la Cueva del Gallardo, situada en el área de Bellavista en la isla de Santa Cruz, con una longitud de 2200 metros y alturas que llegan a alcanzar los 16 metros (Jordá *et al.*, 2016); junto con la cueva de El Chato (Figura 4) son las dos cavidades con mayor afluencia de visitantes. Ambas se encuentran acondicionadas. También con una gestión privada, en la misma isla de Santa Cruz están los túneles de Primicias y Royal Palm, este último dentro de un complejo hotelero.

Con acceso libre, está la Cueva del Mirador (Figura 4) con una longitud de 600 metros y situada muy próxima al principal núcleo de población del archipiélago, la ciudad de Puerto Ayora. En la isla de Isabela se localiza la cueva Sucre, en terreno público y de acceso libre y un recorrido de 340 metros.

Nombre	Localidad	Visitable	Propiedad	Gestión	Guías
Cueva del Gallardo	Galápagos/Santa Cruz	Si	Privada	Dentro del Rancho Bellavista	No
Cueva del Mirador	Galápagos/Santa Cruz	Si	Pública	Acceso libre	No
Cueva de la Universidad	Galápagos/Santa Cruz	En proyecto	Pública	Cerrada	No
Primicias	Galápagos/Santa Cruz	Si	Privada	Dentro del Rancho Primicias	No
Royal Palm	Galápagos/Santa Cruz	Si	Privada	Dentro del complejo de un hotel	No
El Chato	Galápagos/Santa Cruz	Si	Privada	Incluido en la visita a la granja de El Chato	Si
Cueva Sucre	Galápagos/Isabela	Si	Pública	Acceso libre	No

*Tabla 1: Túneles de lava visitables en las Islas Galápagos*



*Figura 4. arriba a la izquierda tortuga gigante en el rancho de El Chato; a la derecha acceso a la cueva; abajo a la derecha, interior de la cueva de El Chato; a la izquierda, cueva del Mirador*

### **Cavidades kársticas**

A pesar de no contar con grandes extensiones de afloramientos carbonáticos, existen zonas donde el karst se encuentra moderadamente desarrollado. Se trata de antiguas plataformas carbónicas transarco. Previo a la formación de la cordillera de los Andes, se desarrolló una zona de arco isla, con el desarrollo de cuencas carbonáticas. Hoy en día, debido a la elevación de la Cordillera de los Andes, se localizan a una altura sobre el nivel del mar entre los 2500

y los 300 metros, en la zona comprendida entre la sierra y la cuenca amazónica. Es en esta región donde se localizan la mayor parte de las cavidades visitables del país (Tabla 2).

Nombre	Localidad	Visitable	Propiedad	Gestión	Guías
Colorado	Quinindé/Esmeraldas	Si	Pública	Reserva Mache Chindul	No
Duende	Atacames/Esmeraldas	Si	Privada	Previo permiso	Si
La Dibujada	Chone/Manabí	Si	Pública	Acceso libre	No
San Isidro	Paján/Manabí	Si	Pública	Turismo de aventura	No
Cueva Negra	El Sigsig/Azuay	Si	Asociación Comunitaria Chosbshi	Sitio arqueológico El Chobshi	Si
Tugshiyacu	Loreto/Orellana	Si	Pública	Acceso libre	No
Milagro de Dios	Loreto/Orellana	Si	Pública	Acceso libre	No
Jumandi	Archidona/Napo	Si	Pública	Complejo turístico Cuevas de Jumandi	Si
Las Palmas	El Chaco/Napo	Si	Pública	Tour Guiado	Si
Lagarto Martiri	Archidona/Napo	Si	Pública	Acceso libre/Tour Guiado	Si
Pinlloyacu	Carlo Julio/Napo	Si	Pública	Acceso libre/Tour Guiado	Si
Tamia Urcu	Tena/Napo	Si	Comunidad Kiwcha	Comunidad Kiwcha	Si
Shacanchiuta	Tena/Napo	Si	Pública	Acceso libre	No
Chiuta	Tena/Napo	Si	Pública	Acceso libre	No
Peña	Tena/Napo	Si	Pública	Acceso libre	No
Wayusa Loma	Tena/Napo	Si	Pública	Acceso libre	No
Itaurcu	Tena/Napo	Si	Pública	Acceso libre	No
Río Anzú	Mera/Pastaza	Si	Pública	Turismo de aventura	Si
Doce de Mayo	Pastaza/Pastaza	Si	Pública	Acceso libre	No
Roca del Gallo	San Juan Bosco/Morona	Si	Pública	Acceso libre	No
Chuwitayo	Morona Santiago	Si	Pública	Acceso libre	No
Nunkantaim	Méndez/Morona Santiago	Si	Pública	D. de Turismo de Santiago de Méndez	Si
Tayuza	Méndez/Morona Santiago	Si	Pública	D. de Turismo de Santiago de Méndez	Si
Logroño	Logroño/Morona Santiago	Si	Pública	Turismo de aventura	Si
La Dolorosa	Gualaquiza/Morona Santiago	Si	Pública	Turismo de aventura	No
Chinkianas	Tiwintza/Morona Santiago	Si	Pública	Acceso libre	No
Wacambeis	San Juan Bosco/Morona	Si	Pública	Acceso libre	No

Tabla 2. Cavidades kársticas turísticas de Ecuador (Bautista, 2010; Vásquez, 2015)

En la provincia amazónica de Orellana, en el cantón de Loreto existen dos cavidades que se visitan, destacando la cueva de Tugshiyacu, con un recorrido de 300 metros y con presencia de petroglifos probablemente pertenecientes a la cultura Omagua (1200-1600 d.C.). Esta cavidad, al igual que la cueva de Milagro de Dios, son de acceso libre y su visita suele incluirse dentro de las rutas de naturaleza que se ofertan en las comunidades locales.

La provincia que contiene mayor número de cuevas turísticas es Napo, destacando el cantón Tena con 6 cavidades visitables, en general de pequeñas dimensiones, a excepción de la cueva Peña con 400 metros de recorrido. Destacan en esta provincia la cueva del Lagarto Matiri, ya en el cantón El Chaco y la cueva de Las Palmas, en Archidona, ambas con la posibilidad de realizar un tour guiado por el interior y con un recorrido de 200 y 300 metros respectivamente. La principal cueva de la provincia y uno de los principales destinos turísticos subterráneos del país son las llamadas cavernas de Jumandi, incluidas dentro de un complejo turístico administrado



por el Consejo Provincial del Napo. Las visitas se realizan con acompañamiento de guías en una mezcla de turismo convencional y de aventura.

En la misma región amazónica, pero en la provincia de Pastaza, existe otra cavidad con bastante renombre en el país, las cavernas del Río Anzú, practicables solo como turismo de aventura, en el que es necesario el empleo de cuerdas y el acompañamiento de guías. Sin embargo, las cuevas más conocidas para turismo de aventura son las Cuevas de Logroño, de gestión privada y La Dolorosa, de acceso libre, ambas en la provincia de Morona Santiago (Figura 4). En la misma provincia se localizan numerosas cavidades, gestionadas generalmente por las Direcciones de Turismo de los cantones en que se ubican, como es el caso de las cuevas de Tayuza y Nunkantaim.

En la sierra, en la provincia de Azuay se localiza la cueva Negra, un sitio ceremonial para la cultura Cañari (antiguos pobladores de las provincias del Azuay y Cañar del Sur del Ecuador, que han mantenido sus tradiciones y costumbres hasta la actualidad). Ya en la región costera



*Figura 4. imagen superior, Cuevas de Logroño. Imágenes inferiores, cueva de La Dolorosa, ambas en la provincia amazónica de Morona Santiago*



destacan cuatro cavidades, dos en la provincia de Manabí y dos en la provincia de Esmeraldas. De las dos primeras, situadas en terrenos públicos de acceso libre, destaca la cueva de La Dibujada por sus grabados rupestres (petroglifos de la cultura precolombina Ñauza), ambas. La cueva del Duende, en Esmeraldas, con un yacimiento arqueológico en su interior, se ubica en una finca privada y su visita es gratuita con acompañamiento de un guía previa solicitud al propietario.

### Cavidades antrópicas

A pesar de que la actividad minera se ha desarrollado en Ecuador desde mucho antes de la llegada de los españoles y que desde hace años se está tratando de fomentar el desarrollo de un turismo geológico y minero, la puesta en valor del patrimonio minero subterráneo apenas tiene representación en el país. Existe tan solo una mina turística, la ya citada mina de El Sexmo, y se encuentra en fase de proyecto la rehabilitación de unas galerías en la misma ciudad de Quito (Tabla 3).

Nombre	Localidad	Visitable	Propiedad	Gestión	Guías
Mina del Sexmo	Zaruma/El Oro	Si	Privada	Entrada gratuita	Si
Cuevas del agua	Quito/Pichincha	En proyecto	Pública	Acceso libre	No

Tabla 3. Cavidades turísticas antrópicas de Ecuador

Esta última ciudad se encuentra enclavada en materiales de origen principalmente volcánico, siendo una de las unidades más representadas la denominada "cangagua", un material piroclástico de origen volcánico. En el Parque Metropolitano de Quito (donde se encuentran las



Figura 5. Cuevas del agua en el Parque Metropolitano de Quito



Cuevas del agua (Figura 5), la cangagua es muy compacta, con un comportamiento mecánico similar, en ocasiones, al de la roca y un material permeable, que permite el paso del agua a su través.

Dado que se trata de una zona relativamente seca, en la cual las lluvias se concentran en períodos concretos del año, el aprovechamiento de las aguas ha sido siempre una labor de primera importancia. Por estos motivos se realizaron túneles de captación en las que las galerías servirían como zonas de captación de las aguas subterráneas, para luego ser extraídas por gravedad al exterior.

A pesar de encontrarse en perfecto estado de conservación y no presentar un riesgo para los visitantes, las galerías aún no están incluidas en los recorridos turísticos ni senderos guiados del Parque Metropolitano de Quito, aunque desde el año 2014 están incluidas dentro del proyecto de puesta en valor del patrimonio arqueológico de origen incaico (Gondard y López, 1983) y geológico del mismo (Jordá, 2014).



*Figura 6. complejo turístico de la mina de El Sexmo en Zaruma, provincia de El Oro. La última imagen muestra la mineralización propia de la mina, vetas de cuarzo con calcopirita y pirita, y en la que se encuentra diseminada el oro*

En la provincia de El Oro se localiza La Mina El Sexmo, reconocida por ser la primera en explotación del distrito Zaruma-Portovelo. Actualmente no se la explota y en sus alrededores existe un complejo turístico, donde su principal atractivo es la visita al interior de la mina (Figura 6). La compañía minera BIRA S.A. es la propietaria de esta mina fuera de explotación desde 1996, y la ha conservado como un vestigio museográfico abierto y gratuito. La empresa rehabilitó la mina para convertirla en un punto de atracción turística.

Abierta al público desde el año 2000, ofrece un recorrido por una galería de más de 500 metros de largo que dura aproximadamente 30 minutos. Los visitantes ingresan acompañados con un guía nativo especializado. La experiencia termina en la casa de la compañía, con locales de exposición de rocas de cuarzo, piritas y fragmentos minúsculos de oro extraído de la mina, así como la exposición de joyas con los metales preciosos del paraje minero, que pueden adquirir los visitantes. En 2015 recibió más de 10.000 visitantes, es lo que se puede decir a la vista de los datos (Tabla 4).

<b>MINA TURISTICA EL SEXMO DE LA COMPAÑÍA BIRA BIENES RAICES S.A.</b>									
<b>No. de visitas que llegaron a la Mina "El Sexmo"</b>									
<b>MESES</b>	<b>2014</b>			<b>2015</b>			<b>2016</b>		
	<b>No. personas</b>	<b>Nacionales</b>	<b>extranjeros</b>	<b>No. personas</b>	<b>Nacionales</b>	<b>extranjeros</b>	<b>No. personas</b>	<b>Nacionales</b>	<b>extranjeros</b>
enero	445	408	37	1.051	956	95	906	833	73
febrero	300	268	32	1.038	977	61	1.048	1.033	15
marzo	700	682	18	683	653	30	938	919	19
abril	620	608	12	686	670	16	551	545	6
mayo	240	226	14	742	710	32		-	
junio	400	389	11	440	431	9		-	
julio	600	571	29	1.059	980	79		-	
agosto	600	570	30	1.757	1.711	46		-	
septiembre	150	124	26	620	578	42		-	
octubre	580	564	16	1.134	1.093	41		-	
noviembre	986	946	40	1.021	1.010	11		-	
diciembre	730	672	58	624	604	20		-	
<b>TOTALES</b>	<b>6.351</b>	<b>6.028</b>	<b>323</b>	<b>10.855</b>	<b>10.373</b>	<b>482</b>	<b>3.443</b>	<b>3.330</b>	<b>113</b>

Tabla 4. Número de visitas en la mina de El Sexmo durante los años 2014 a 2016. Fuente: Bira, S.A



## **Cavidades de origen estructural**

Menos comunes que las anteriores, en Ecuador existen dos algunas cavidades turísticas cuyo origen es de tipo estructural (Tabla 5), ligadas a grandes zonas de fractura, colapsos o a la estratificación propia del macizo rocoso. La más conocida a nivel internacional es la cueva de Los Tayos en la provincia amazónica de Zamora Chinchipe. Situada y gestionada por la comunidad indígena de los Kuankus, la visita a la cueva se realiza mediante el empleo de técnicas verticales, accediendo a unas grandes cámaras formadas por el colapso de los estratos de areniscas en los que se desarrolla.

La otra cueva visitable, de acceso libre, se localiza en la localidad de Sozoranga, en la provincia de Loja, al sur del país (Figura 3). Se trata de una galería que transcurre por una zona de falla en una zona granítica que da acceso a una pequeña cámara donde se refugió el bandolero Naún Briones en 1933 (Vásquez, 2005).

<b>Nombre</b>	<b>Localidad</b>	<b>Visitable</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Gestión</b>	<b>Guías</b>
Cueva de los Tayos	Coangos/Zamora Chinchipe	Restringida	Nativos del Centro Kuankus	Previo permiso	Si
Naún Briones	Sozoranga/Loja	Si	Pública	Acceso libre	No

*Tabla 5. Cavidades turísticas de origen estructural en Ecuador*

## **Conclusiones**

A pesar de contar con cerca de 40 cavidades visitables, el turismo subterráneo en Ecuador es hoy en día una actividad turística con escaso recorrido. No hay en el país una regulación ni un cuerpo doctrinal que estudie las actividades turísticas subterráneas, no existiendo una formación específica de guías. Esto conlleva a que haya zonas subterráneas con un rico patrimonio tanto arqueológico como geológico que puedan estar siendo afectadas por las visitas turísticas.

Al ser la mayoría de las cavidades de acceso libre o incluidas dentro de recorridos turísticos más amplios no existe un registro de visitantes, por lo que es difícil calcular el impacto de este tipo de turismo.

La única cavidad que cuenta con guías especializados es la mina de El Sexmo en la localidad de Zaruma. Esta cavidad es un ejemplo de contribución del mundo subterráneo a la economía local, puesto que es uno de los principales focos de atracción turística de la comarca en la que se encuentra, recibiendo en 2015 más de 10.000 visitantes al año.

Además de esta mina, las cavidades con mayor afluencia de visitantes, principalmente extranjeros, son los túneles de lava de las Islas Galápagos (aunque no hay datos oficiales se estima que el 50 % de los 250.000 turistas que visitan las islas recorren alguno de los túneles de lava). En cuanto a turismo nacional, más centrado en la zona del oriente, las Cavernas de Jumandi son las más visitadas.



Como turismo de aventura destacan las Cavernas del Río Anzú en Pastaza y las Cuevas de Logroño en Morona Santiago, siendo en el caso de ambas cavidades, al igual que las Cavernas de Jumandi uno de los principales focos turísticos de sus respectivas regiones, por lo que juegan un papel destacado en el desarrollo sostenible de la zona.

## Agradecimientos

Al Ministerio de Turismo de Ecuador y a la empresa BIRA, S.A. por la información aportada.

## Referencias

- Bautista, G. 2010. *Plan De Desarrollo Turístico del Cantón Santiago de Méndez, Provincia de Morona Santiago para Fomentar el Desarrollo Socioeconómico del Lugar*. Tesis de Grado, Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito, 269 pp.
- Gondard, P. y López, F. 1983. *Inventario arqueológico preliminar de los Andes septentrionales del Ecuador*. MAG/PRONAREG/ORSTOM, Quito, 275 pp.
- Halliday W.R., 1999. The roots of vulcanospeleology. *The Journal of Spelean history*, vol 33, pp. 54-58.
- Jordá, L., Toulkeridis, T., Romero, P.L., Jordá, R. y García, I. 2016. Stability assessment of volcanic lava tubes in the Galápagos using engineering rock mass classifications and by empirical approach. *Journal Tunnelling and Underground Space Technology*, subm.
- Jordá, R. 2014. Valoración del Patrimonio Geológico del Parque Metropolitano de Quito (Guanguiltagua). En: *Prospección, excavación y conservación del Pucará de Guanguiltagua en el Parque Metropolitano*. Informe interno Instituto Metropolitano de Patrimonio Cultural (Código LC-IMPQ-041-2013). Quito, Ecuador, 263 pp.
- Vásquez, G., 2015. *Ecuador en la Mitad del Mundo: Guía Turística y Ecológica*. GV & TOUR, Quito, 2011 pp.

## **Aspectos geomorfológicos del sistema cavernario Majaguas-Cantera. Campañas de exploración y topografía 2012-2016 (Pinar del Río, Cuba occidental)**

V. Otero-Collazo <sup>(1)</sup>; A. González-Ramón <sup>(2)</sup>; J. J. Valdés-Ramos <sup>(3)</sup>; J. M. Pajón-Morejón <sup>(4)</sup>; M. Alons-Martínez <sup>(5)</sup>; O. Chávez-Bonor <sup>(6)</sup>; M. Sluka <sup>(7)</sup>, G. García-Pulpeiro <sup>(6)</sup> y A. Pou-Royo <sup>(8)</sup>

<sup>(1)</sup> GEA Ciro Berrios SEC  
vlado6208@nauta.cu

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. Granada. España; antonio.gonzalez@igme.es. Asociación Espeleológica Velezana. Vélez Rubio-Almería. España, espeleovelez@gmail.com

<sup>(3)</sup> National Research Council Canada. Information and Communication Technologies, 1200 Montreal Rd, Ottawa ON K1A 0R6, Canada  
julio.valdes@nrc-cnrc.gc.ca.

<sup>(4)</sup> Museo Nacional de Historia Natural de Cuba. Obispo 61, Plaza de Armas, La Habana Vieja, La Habana, Cuba. CP: 10 100,  
jesusmpajon@gmail.com

<sup>(5)</sup> Sociedad de Ciencias Espeleológicas Alfonso Antxia,  
alonso.mariam@gmail.com

<sup>(6)</sup> Grupo Espeleológico Martel de la Sociedad Espeleológica de Cuba.

<sup>(7)</sup> Geospeleos, Czech Speleological Society and Speleoklub Cervene vrchy, Slovak Speleological Society,  
martinluka@mac.com

<sup>(8)</sup> Departamento de Ecología. Universidad Autónoma de Madrid. c/ Francisco Tomás y Valiente, 7. Universidad Autónoma de Madrid, Ciudad Universitaria de Cantoblanco, 28049, Madrid,  
antonio.pou@uam.es

---

### **RESUMEN**

El sistema Majaguas-Cantera se desarrolla en calizas jurásicas de la Sierra de San Carlos, que forman parte del karst tropical de mogotes de la Sierra de los Órganos (Pinar del Río, Cuba occidental). Se trata de una gran red de conductos kársticos relacionados con la red de drenaje vertiente al río Cuyaguateteje, el principal del occidente de Cuba. En la vertiente S de la Sierra se localizan varios cauces que penetran por sumideros en su interior. Los principales son los ríos Majaguas y Cantera, que dan nombre al sistema. Las surgencias de agua subterránea se localizan en los bordes N y O. La red kárstica se extiende a partir de varios niveles de cavernamiento que podrían relacionarse con superficies de erosión desarrolladas en los mogotes y en la cuenca vertiente a los sumideros, con variaciones glacioeustáticas del nivel del mar durante el Cuaternario, con reajustes neotectónicos y con la fracturación. El sistema fue descubierto en 1962 y durante varias décadas se realizaron trabajos de exploración y cartografía que permitieron aquilatar tanto la dimensión del sistema como sus características fundamentales. Sin embargo, en 2010 dos factores motivaron un replanteo de la investigación: *i)* la pérdida de accesibilidad respecto a gran parte del material cartográfico y *ii)* la constatación de que, producto del uso de diferentes técnicas e instrumentos (hoy en día anticuados) por parte de muy diferentes equipos de trabajo a lo largo de muchos años, la calidad de dicha base cartográfica estaba lejos de corresponderse con los estándares actuales. A partir de 2012, un grupo de investigadores y espeleólogos, cubanos en sus inicios y, posteriormente, también españoles y checos, han estado trabajando en campañas anuales con el objetivo de

levantar un nuevo mapa del sistema que constituya una base apropiada para la investigación científica en sus aspectos espeleogenéticos, en paralelo con estudios paleoclimáticos, geomorfológicos e hidrogeológicos del karst de la región. Se presentan los resultados más relevantes.

**Palabras clave:** dolina, fracturación, karst tropical, Sierra de San Carlos, sumidero.

## ***Geomorphological aspect of the Majaguas-Cantera cave system. Campaigns of exploration and surveying in 2012-2016 period. (Pinar del Río, Western Cuba)***

### **ABSTRACT**

*The Majaguas-Cantera cave system is placed in the Sierra de San Carlos Jurassic limestones which are part of the Sierra de los Organos mountain range (Pinar del Río, Western Cuba) with an impressive Mogotes and Kegelkarst landscape. It is composed of a large network of karst conduits related to the Cuyaguaje River drainage basin, the most important of western Cuba. Several rivers have sinks at the Sierra de San Carlos southern flank. The larger ones are the Majaguas and Cantera rivers, naming the system. Main water springs (resurgences and exurgences) are located at the N and W borders. The cave system spans a network of underground passages and chambers with several cave levels that can be related to erosion surfaces observed on the mogotes and on the basins associated to the ponors, being as well conditioned by Quaternary glacio-eustatic sea levels, neotectonic deformation and in connection to different fracture systems affecting the limestones. The cave system was discovered in 1962 and for several decades it was explored and surveyed. These works revealed the magnitude of the system as well as its main characteristics. However, in 2010 two fundamental elements motivated a reassessment of the research work on the system: i) the loss of accessibility with respect to a large body of underground cartography materials and ii) the realization that due to the use of different instruments and techniques, by so many different teams for so many years, the quality of such cartographic base was far from matching current standards and state of art. From 2012 a group of researchers and speleologists, Cubans initially and later also Spanish and Czech cavers, have been conducting annual campaigns with the objective of elaborating a comprehensive cartographic material in order to serve as an appropriate foundation for scientific research. It includes speleogenetic aspects, in parallel with paleoclimatic, geomorphological and hydrogeological studies of the karst region. The most relevant results of these campaigns are presented.*

**Key Words:** *doline, fracturation, kegelkarst, Sierra de San Carlos, sink.*

### **Antecedentes**

El sistema cavernario de Majaguas-Cantera ha sido utilizado por el hombre desde tiempos inmemoriales. Los indicios más antiguos encontrados se relacionan con la población aborigen (4000-2000 años B.P.) (Acevedo, 1979). En la cueva, además de los indocubanos encontraron refugio los cimarrones, los mambises y los guerrilleros castristas. Su exploración se inició en 1963, con el descubrimiento de las cavidades que se abren en el N de la Sierra de San Carlos (Acevedo, 1967) denominadas Cueva de Dos Anas, resurgencia del río Majaguas y Cueva de los Gigantes. Hasta el año 1966 se exploró también el sumidero del Majaguas, en la zona S, y otras cavidades de los niveles superiores.

El levantamiento topográfico comenzó en 1963 en los niveles superiores del sumidero del Majaguas hasta el salón de la Magnificencia. En esa fecha también se realizó la primera travesía, siguiendo el Cauce Actual y por el Laberinto del Aserradero hasta Cueva Fría, siguiendo la corriente principal de agua desde las bocas del sur de la sierra hacia las entradas de la ladera norte (Figs. 1, 3 y 10).





2001) indican que el sistema tiene más de 33 km, desarrollados en 9 niveles de cavernamiento. Posteriores trabajos mencionan desarrollos en torno a 35 km, si bien, siempre basados en citas del trabajo de Moleiro y Flores de 1997.

En 2010 dos factores motivaron un replanteo de la investigación: *i)* la pérdida de accesibilidad respecto a gran parte del material cartográfico y *ii)* la constatación de que, producto del uso de diferentes técnicas e instrumentos (hoy en día anticuados) por parte de muy diferentes equipos de trabajo a lo largo de muchos años, la calidad de dicha base cartográfica estaba lejos de corresponderse con los estándares actuales, especialmente en lo que respecta a los datos de inclinación, muy importantes a la hora de definir cotas de niveles de cavernamiento e interpretar las relaciones genéticas entre distintas zonas de la cavidad.

El objetivo de este artículo es describir los principales aspectos geomorfológicos de la cavidad y los nuevos trabajos que se están llevando a cabo en ella.

Las primeras nuevas campañas de topografía se centraron en la Cueva de Dos Anas. En 2012 se topografiaron 3193 m de galerías; las herramientas utilizadas fueron Brújula y clinómetro Suunto para direcciones y verticales y cinta métrica para distancias. En 2013 se introdujo el láser Disto D8 de Leica para distancias y verticales. En esta campaña se topografiaron 2576 m en total. En 2014 la distancia medida fue de 2375 m. Estas tres primeras campañas se desarrollaron en la Cueva de Santa Ana, como ya se ha indicado. En 2015 se organizó el levantamiento topográfico en dos equipos, uno con las mismas herramientas descritas y otro con un láser Leica Disto X310 modificado, con capacidad de medir los tres parámetros (distancia, ángulo vertical y horizontal) en un solo disparo. En esta campaña se topografió la cueva de los Gigantes, la Galería del XX aniversario, los niveles superiores del Sumidero de Majaguas, la Galería de las Ninfas y las grandes salas de la Cueva de los Pájaros, el total para ese año fue de 6290 m. Hasta 2015 se han retopografiado 14434 m.

Los datos topográficos han sido tratados con el programa Therion v 5.3.16 desarrollado por Stacho Mudrák y Martin Budaj (Budaj y Mudrák, 2008), que permite el tratamiento de las galerías en 3D (Fig. 8).

## **Localización geográfica**

La cavidad se encuentra en la Sierra de San Carlos, al SO de la región de Sumidero (Pinar del Río). Se trata de uno de los macizos que constituyen la Sierra de los Órganos, localizada a unos 200 km al SO de la ciudad de la Habana (Fig. 2) (Acevedo, 1971). La Sierra limita al N y NO con otros mogotes calcáreos por estrechos desfiladeros, tales como la Trinchera, la Herrería al E, y los Acostas (Mal Paso-La Estrechura) al O. Al SE un valle la separa de las cuchillas de la Alturas de Pizarra del Sur (Acevedo y Valdés, 1974). La principal vía de drenaje es el río Cuyaguaje. Varios cauces penetran a través de sumideros por el borde sur de la Sierra; los más importantes son los que dan nombre al sistema: el Río Majaguas con una cuenca vertiente de 8,5 km<sup>2</sup> y el río Cantera con una cuenca de 8 km<sup>2</sup> (Fig. 3).

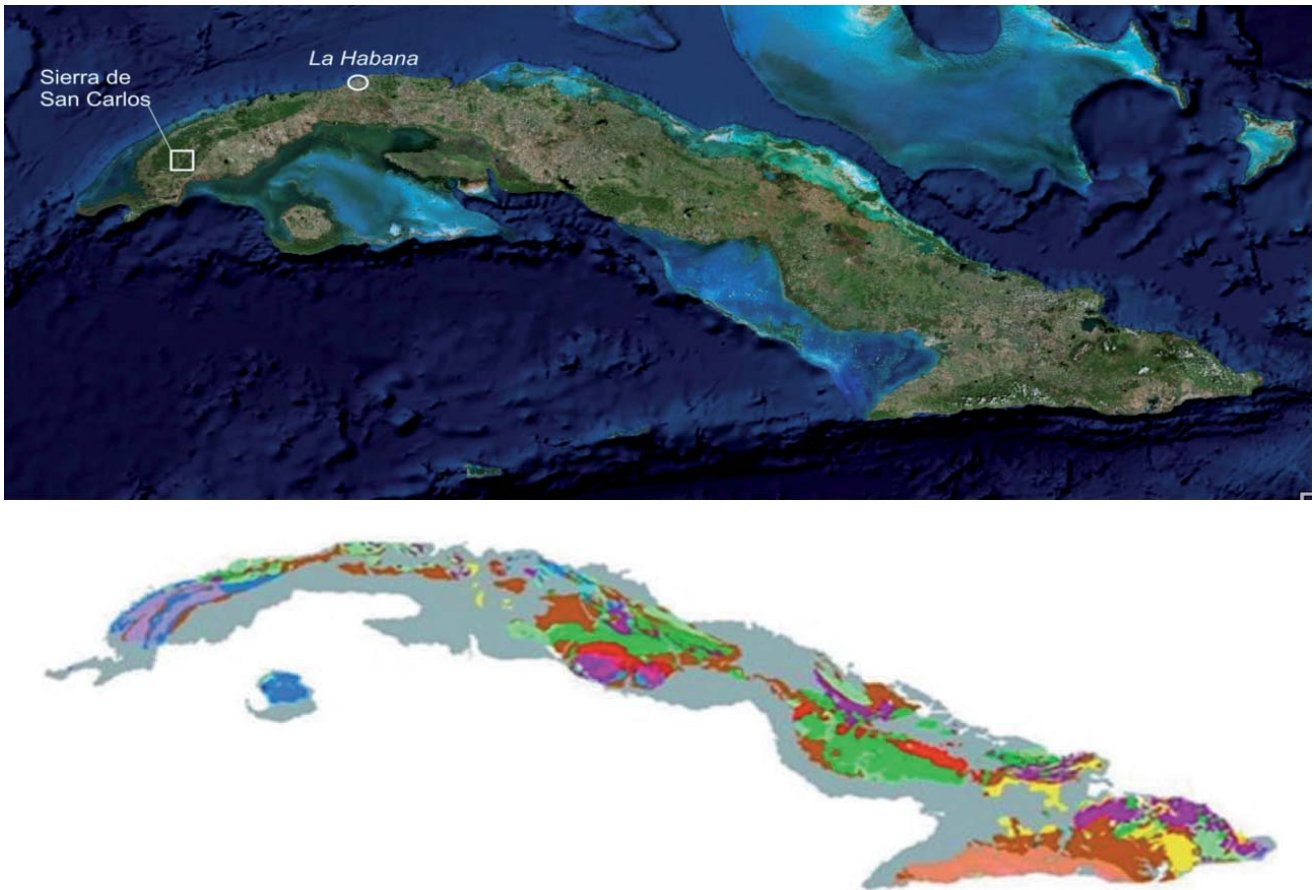


Figura 2. Arriba: localización geográfica de la Sierra de San Carlos (imagen de ESRI Imagery). Abajo: mapa geológico de Cuba (Gutiérrez-Domech, 2013)

La temperatura media anual en la zona se sitúa en torno a 21-25°C y la precipitación entre 1600 y 1800 mm, con una media de 1720 mm anuales (Pajón *et al.*, 2001). La época seca se extiende de noviembre a abril (Acevedo y Valdés, 1974).

### Aspectos geológicos y geomorfológicos

La Sierra de San Carlos esta formada por un afloramiento de carbonatos de 25,94 km<sup>2</sup> con una intensa karstificación superficial. Los bordes son abruptos, prácticamente verticales en casi todo su perímetro; la superficie aparece con una densa cobertura vegetal tropical, donde se ha labrado un lapiaz de crestas y agujas en las zonas donde los carbonatos aparecen descubiertos, lo que hace que caminar por su superficie sea complicado. El otro rasgo más característico es una intensa dolinización que afecta a todo el afloramiento y el desarrollo de bogaz en relación con las fracturas más importantes que atraviesan el mogote, que aparecen bien marcadas.

El mogote se desarrolla sobre materiales jurásicos. El substrato está formado por arcillas arenosas del Jurásico inferior de la formación San Cayetano, sobre la que se sitúan las formaciones Jagua y Viñales (Guassasa) del Jurásico superior. La primera está formada por calizas micríticas bien estratificadas con intercalaciones de esquistos arcillo-margosos y lutitas (Gutiérrez-Do-

mech y Barrientos-Duarte, 2001) de edad Oxfordiense medio-superior. A techo, la secuencia pasa a calizas micríticas y calcarenitas, a veces con sílex lenticular y generalmente masivas (Formación Guassasa), de edad Kimmeridgiense. Según algunos autores (Acevedo, 1971; Gutiérrez-Domech y Barrientos-Duarte, 2001), el sistema cavernario de Majaguas-Cantera, así como las grandes cuevas de la Sierra de los Órganos se desarrollan en la zona de contacto entre estas dos formaciones. Para estos autores, las formaciones citadas dan lugar a las áreas más karstificadas del país.

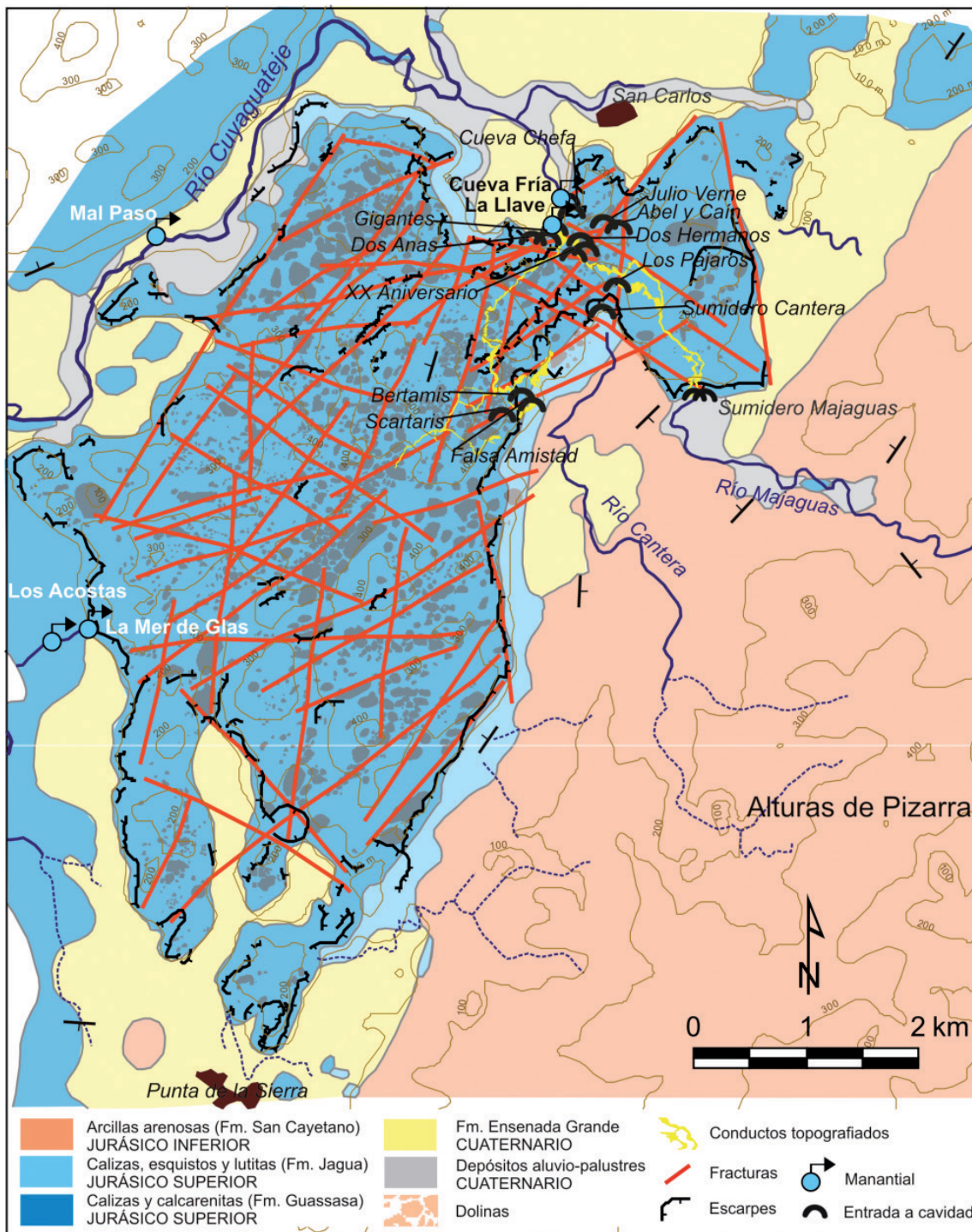


Figura 3. Mapa geomorfológico de la Sierra de San Carlos



La formación San Cayetano aflora al SO del mogote y da lugar a las denominadas "Alturas de Pizarra" en las que se han labrado las cuencas vertientes a los sumideros de los arroyos de Majaguas y Cantera, y otros menos importantes en el borde suroccidental de la sierra.

La región se encuentra configurada en diferentes unidades geomorfológicas (Acevedo, 1971). Los relieves están formados por estructuras kársticas representadas por los mogotes (Kegel y Turmkarst) y otras no kársticas que constituyen las alturas de Pizarra o "Cuchillas de Pinares". El denominado "Fondo de los Hoyos de terreno" representa la superficie aplanada de relleno sedimentario del Pleistoceno superior y del Holoceno que se desarrolla en la base de los mogotes, a cotas en torno a 80-100 m. Esta superficie (S0a y b en la Fig. 4) constituye el nivel de base de cavernamiento activo actual del sistema Majaguas-Cantera (Acevedo, 1971; Flores Valdés, 1995).

### ***Superficies de erosión y niveles de cavernamiento***

A partir del Modelo Digital del Terreno (mtd15m) se han diferenciado restos de superficies erosivas que afectan a la sierra de San Carlos en 7 niveles distintos (Fig. 4). La mejor representada y que más extensión ocupa es la S4, situada a cotas entre 300 y 350 m. Está afectada por una intensa karstificación superficial que da lugar a campos de dolinas, uvalas, bogaz y lapiaz y es la superficie fundamental que marca el límite del desarrollo de conductos endokársticos conocidos, junto con la S3. La superficie S4 fue identificada por Lehmann (1955, 1960 y 1968, en Acevedo, 1971) y Acevedo (1971) como el nivel de aplanamiento principal de las cimas de los mogotes de la Sierra de los Órganos. Estos autores consideran que se desarrolla a cotas entre 300 y 320 m. Acevedo (1971) la denomina *Superficie Pica Pica* y le atribuye una posible edad miocena. Flores Valdés (1995) le asigna una edad Mioceno superior o Plioceno, la sitúa a cotas 300-350 m y la asocia a un nivel de cavernamiento actualmente desmantelado, al igual que lo estarían otros posibles niveles asociados a las superficies superiores (S5, S6 y S7) más antiguos.

La superficie S3 se localiza a cotas entre 210 y 260 m y está peor representada en la Sierra de San Carlos. Acevedo (op. cit.) la denomina *Nivel de Cavernamiento Cima*, la sitúa a cotas entre 195 y 250 m y le atribuye una edad Plioceno. La denomina así porque considera que está asociada al nivel de cavernamiento más elevado de los explorados en la Sierra de los Órganos. Flores Valdés (1995) la denomina *Superficie de Nivel Cima* y le otorga una edad Plioceno final. Por debajo de esta superficie se encontrarían, según este autor, hasta ocho niveles de cavernamiento desarrollados entre las cotas 50 y 290 m. Todas las superficies inferiores a la S4 se localizan también en las Alturas de Pizarra (Corte NNE-SSO), donde actualmente se encuentran las cuencas vertientes a los sumideros que generan los cauces subterráneos del sistema.

A partir de la nueva topografía realizada entre los años 2012 y 2014 se obtienen los siguientes niveles de cavernamiento:

#### Sector de Majaguas

- Cota 265 m. Entrada a la Cueva de los Pájaros. Corresponde a una boca de hundimiento del techo de la cavidad. La zona de cavidad localizada entre la entrada y el Balcón de los



Pájaros corresponde a un extenso caos de bloques. Su nivel de base se correspondería con la superficie S3

- Cota 172 m. Balcón de la Cueva de los Pájaros. Se asociaría a la S2.
- Cota 144 m Cueva Chefa. Superficie S1.
- Cotas 104 – 114 m. Nivel superior del Sumidero, Galería del Tronco. Zonas fósiles. Nunca llega el agua a ellas. Solo a la primera en eventos de muy grandes avenidas, como en el caso de ciclones con grandes cantidades de lluvias. Se asociaría a la S0b.
- Cota 96 m. Zona de Trop Plein de XX Aniversario. Sólo funciona en época de lluvias. Superficie S0a.
- Cota 80 – 100 m. Cauce Actual, Laberinto del Aserradero, La Llave. Galerías por las que circula actualmente el agua del arroyo Majaguas. Superficie S0a.

### Sector Canteras

- Cota 237 m. Balcón Superior de los Bertamíes. Superficie S3.
- Cota 190 m. Bertamíes. Parte más baja del salón, sobre bloques. S2.
- Cota 140 m. Final del Salón del Palacio de Plutón. Sobre derrumbes, posiblemente más de 10 m. S1.
- Cota 105 m. Nivel Superior Colapsado del Salón de Dos Anas. S0b.
- Cota 92 – 110 m. Galería de la Hospitalidad, La Cimitarra, Carlos Roloff. Solo agua de infiltración. S0b.

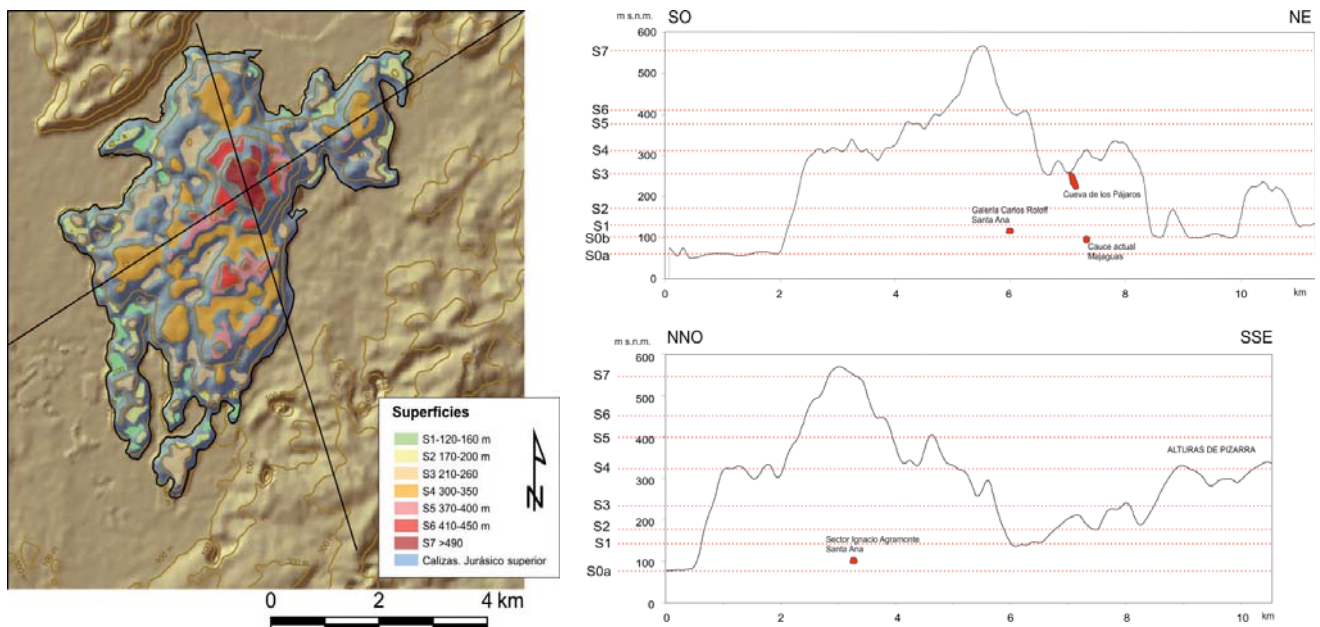


Figura 4. Izquierda: cartografía de los restos de superficies erosivas asociadas a la Sierra de San Carlos. Derecha: Cortes SO-NE y NNO-SSE con indicación de superficies y de algunas galerías topografiadas hasta 2014, sus trazas están indicadas con una línea negra en la figura de la izquierda

Flores Valdés (1995) considera además la existencia de un nivel completamente inundado y con circulación de agua sometida a presión que se relacionaría con el manantial de los Acosta,

a cota 51 m. Los niveles relacionados con las superficies S0a tendrían circulación vadosa o estacional, los niveles inferiores bajo la S0b tendrían circulación esporádica solo asociada a huracanes. En otros conductos más elevados y en los asociados a la S1 se ha desarrollado un gran concrecionamiento, en ellos se encuentran las salas y galerías más atractivas. Finalmente, en los niveles superiores las morfologías de hundimiento y los caos de bloques son dominantes.

Existe un acuerdo entre los distintos autores que han trabajado en la zona sobre un desarrollo espeleogenético de los cauces inferiores ligado a las variaciones climáticas cuaternarias, influenciados por los movimientos del terreno (neotectónica). Durante los periodos fríos, el descenso de nivel del mar provocaría un descenso en el nivel de base erosivo de los cauces, lo que llevaría a su paulatino encajamiento, con periodos más estables en épocas cálidas en las que se desarrollarían los distintos niveles. En los cauces abandonados y colgados sobre el nivel de base, el rezume y goteo de aguas de infiltración lenta (autogénica) ocasionaría el desarrollo de crecimientos de espeleotemas. En los niveles más elevados, la desestabilización de techos y suelos tiene como consecuencia su desplome y la formación de grandes salas, que finalmente son abiertas al exterior y erosionadas. Acevedo (1971), considera que los niveles superiores asociados a caos de bloques tendrían su origen en el Plioceno.

### Dolinas

Toda la superficie del mogote que da lugar a la Sierra de San Carlos aparece afectada por una intensa dolinización. A partir de la ortofoto de Google Earth para del año 2014 se ha realizado una cartografía de las dolinas que no es exhaustiva. Se han cartografiado 1672 dolinas; el

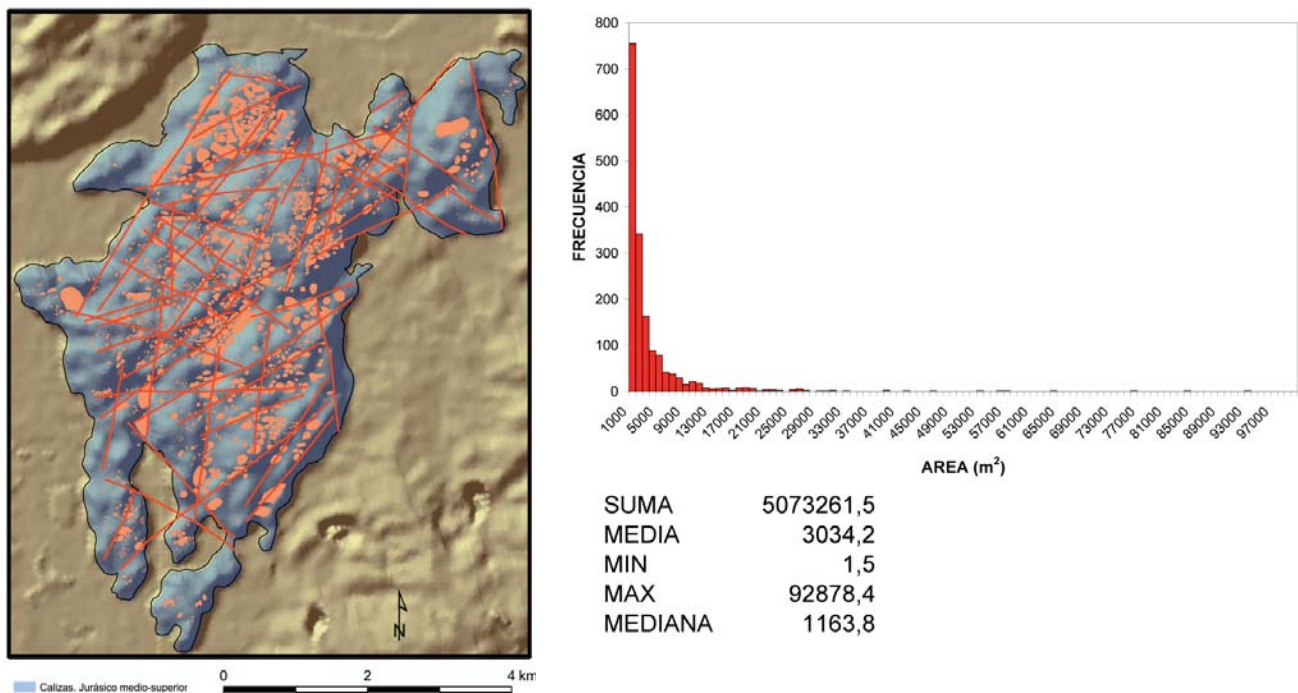


Figura 5. Mapa de dolinas cartografiadas en la Sierra de San Carlos y su relación con las principales fracturas (líneas rojas) que afectan al mogote. Gráfico de frecuencias absolutas de las áreas de las dolinas y datos estadísticos principales en m<sup>2</sup>

mapa obtenido se muestra en las Figs. 3 y 5, así como las estadísticas principales junto a un gráfico de frecuencias absolutas de las superficies de las dolinas.

La Sierra de San Carlos presenta una superficie de 26 km<sup>2</sup> de la que al menos el 20% aparece afectada por dolinas. El tamaño medio de las dolinas es de más de 3000 m<sup>2</sup>, con grandes diferencias entre las más pequeñas, de tan solo 1,5 m<sup>2</sup> y las mayores, de casi 93000 m<sup>2</sup>, si bien, más de la mitad tienen un tamaño inferior a 2000 m<sup>2</sup>. La densidad de dolinas es de 65 por km<sup>-2</sup>.

En cuanto a su distribución se observan claras alineaciones con tendencia a direcciones NE-SO y N-S, condicionadas por las principales fracturas que afectan al macizo. Como ya se indicó, en todas las superficies erosivas aparecen dolinas y también fuera de ellas, en las zonas de crestas.

### Fracturas

En los mapas de las Figs. 3 y 5 se han dibujado las fracturas de mayores dimensiones que se observan en el afloramiento y en la Fig. 6 las menores a partir de la ortofoto de 2014 de Google Earth. Los diagramas de rosas obtenidos a partir de las direcciones se muestran también en la Fig. 6. En lo que respecta a las fracturas mayores se obtienen direcciones preferentes para las familias N50-60E, N20-30E y N140-160E en un total de 264 direcciones de fracturas medidas. Las fracturas menores medidas han sido 1973 con direcciones preferentes mayoritarias para las familias N150-160E, que pueden agruparse en la N140-180E y otras menores en torno a N50-100E. Las direcciones que se ajustan a las familias la N50-60E se corresponden con las direcciones principales de las estructuras geológicas (Iturralde-Vinent, 1998), la segunda agrupación de fracturas, la N140-180E es más o menos perpendicular a la anterior.

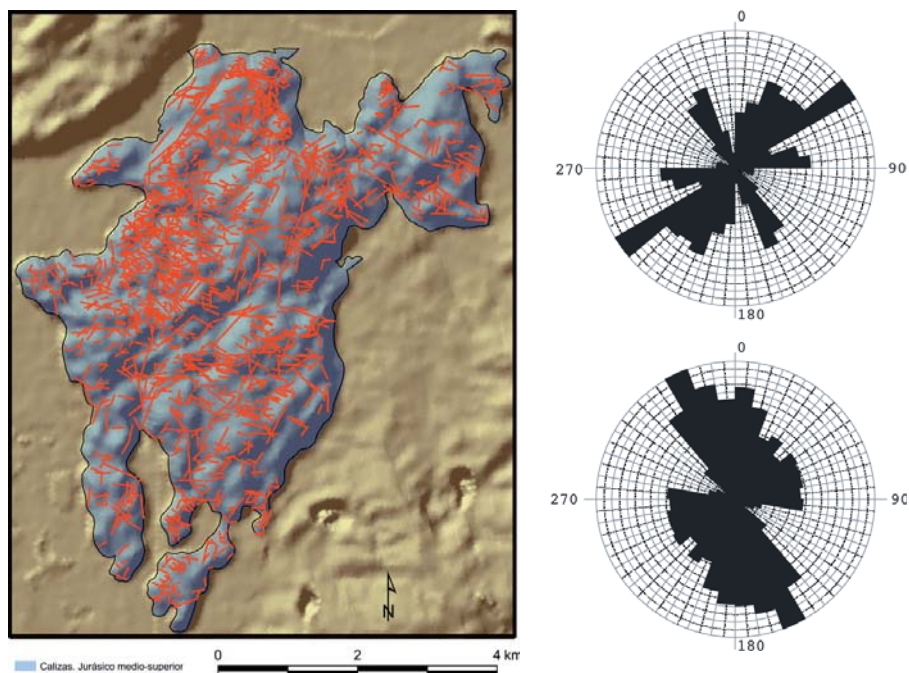


Figura 6. Mapa de fracturas obtenido a partir de la ortofoto de 2014 (Google Earth). Diagramas de rosas de fracturas principales (arriba) y de fracturas menores (abajo)



## Descripción del sistema cavernario

El sistema cavernario Majaguas – Canteras se ha dividido históricamente en dos subsistemas: Dos Anas (o Sector Canteras) y XX Aniversario (también denominado Sector Majaguas) y (Fig. 7). Aunque por su origen son dos cuevas independientes, ambos sectores se unen en la Cueva de los Gigantes, posiblemente cuando la pared del macizo estuviera algo más adentrada en la ensenada de Bordayo. El colapso del Hoyo de Helechos, con una morfología actual de dolina de hundimiento, provocó la separación virtual de ambas cavidades y también de otra cavidad menor: Cueva Chefa.

### Subsistema de Dos Anas

La cueva de Dos Anas es una cavidad emisiva, como se ha comprobado por las evidencias paleohidrológicas, específicamente por los *scallops* estudiados, con una paleocirculación de S a N, con una cierta predominancia del caudal alóctono sobre el autóctono, aunque éste último presenta una importante influencia en la morfología. Los *scallops* indican direcciones de flujo

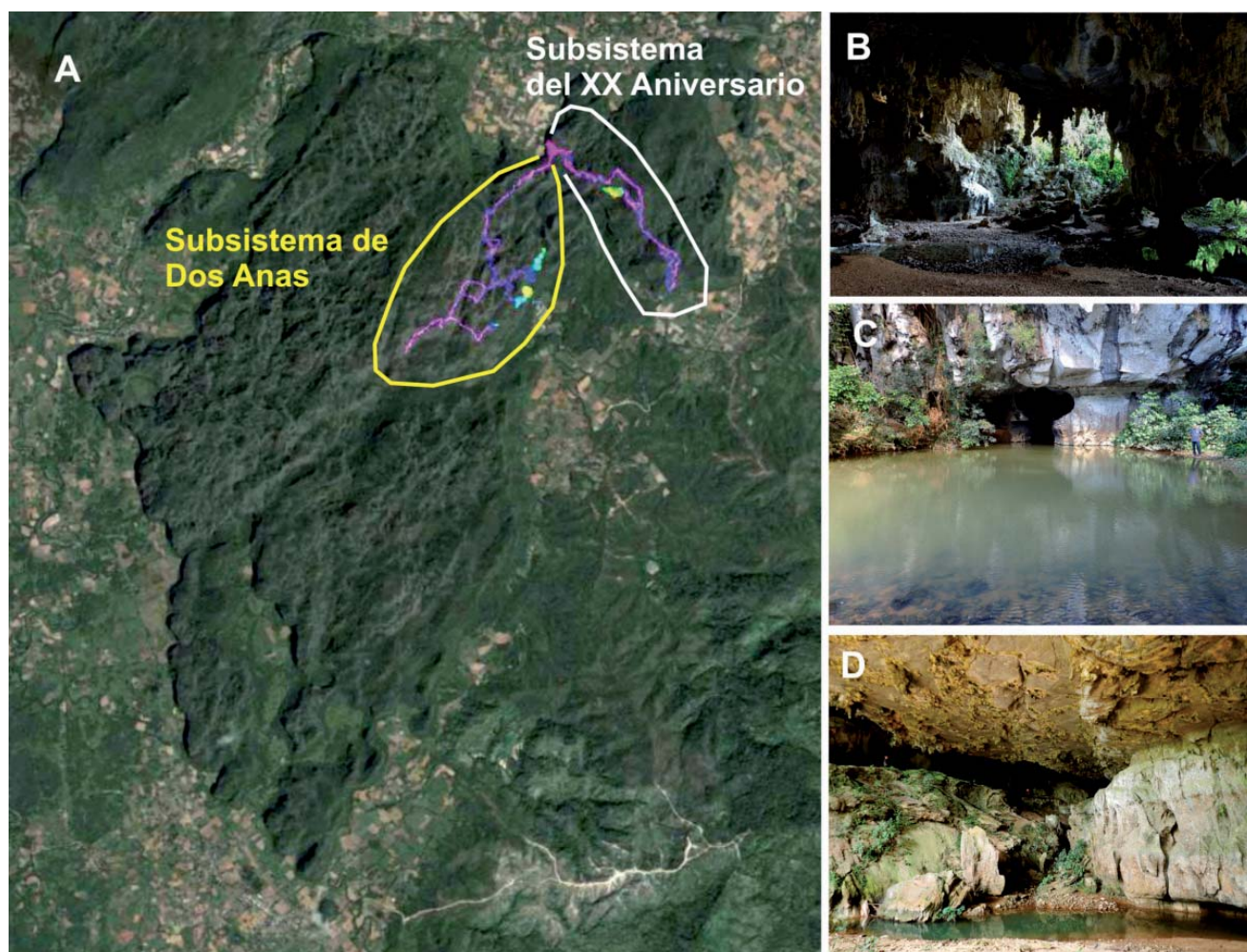


Figura 7. A: Ubicación del Sistema Cavernario Majaguas – Canteras con la nueva topografía realizada hasta 2015 en la Sierra de San Carlos y subdivisión en subsistemas. B: Cueva de Los Gigantes. C: Surgencia de La Llave. D: Sumidero del río Majaguas y acceso a las Galerías Superiores



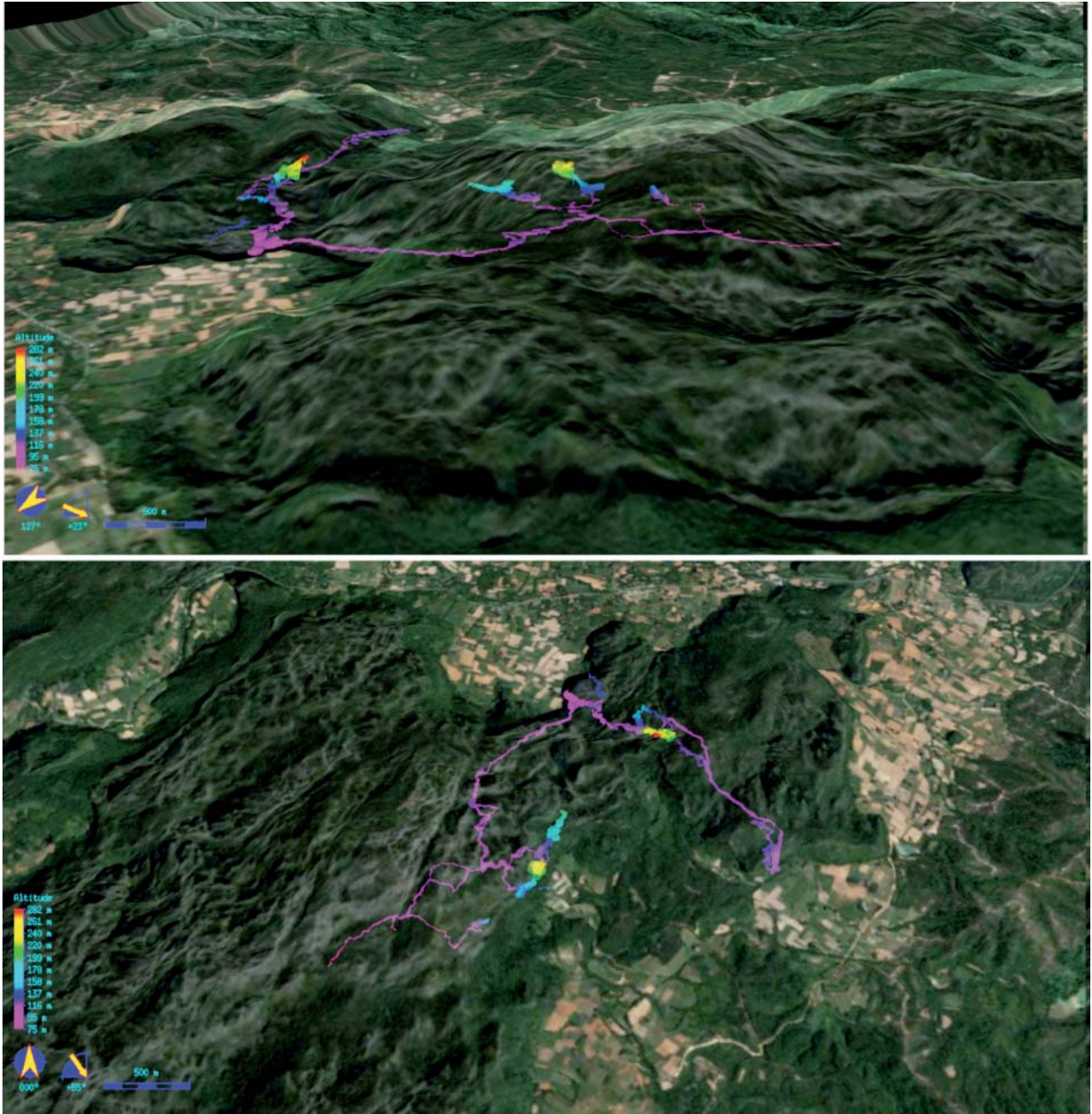


Figura 8. Salidas 3D de las galerías topografiadas hasta la campaña de 2016

en el sentido NO desde el sumidero del Canteras hacia la Ensenada de Bordayo por la entrada de la cueva de Dos Anas (Fig. 9A), pero en el punto de confluencia entre la galería del sumidero de Canteras con la Cueva de Dos Anas (El Meandro-El Comedor) hay una bifurcación del flujo con una componente en dirección SO, en dirección opuesta, hacia las zonas profundas de la Cueva de Dos Anas (Pajón et al., 2001).

Desde las primeras exploraciones, hasta finales de los años 1980, se asumió por parte de los investigadores que, el sumidero del Arroyo Canteras, era el responsable directo de la circulación actual del agua solo en las zonas profundas del sector Dos Anas, siendo la principal fuente

de alimentación de los manantiales Los Acostas y la Mer de Glas, en el sector más occidental de la sierra (Fig. 3). Se han observado crecidas en el arroyo Cantera que repercuten en las surgencias de XX Aniversario, por lo que parece que este arroyo drena directamente hacia el cauce actual del sector XX Aniversario, aunque todavía se desconoce el punto de unión entre ambas corrientes.

También se desconoce la zona de entrada del agua hacia los sectores más profundos de Dos Anas, donde se ha comprobado que hay aportes desde el Arroyo Canteras en época de crecidas, por la activación de los flujos en el sector del Laminador, el Submarino y la Gran Lateral (Fig. 9A).

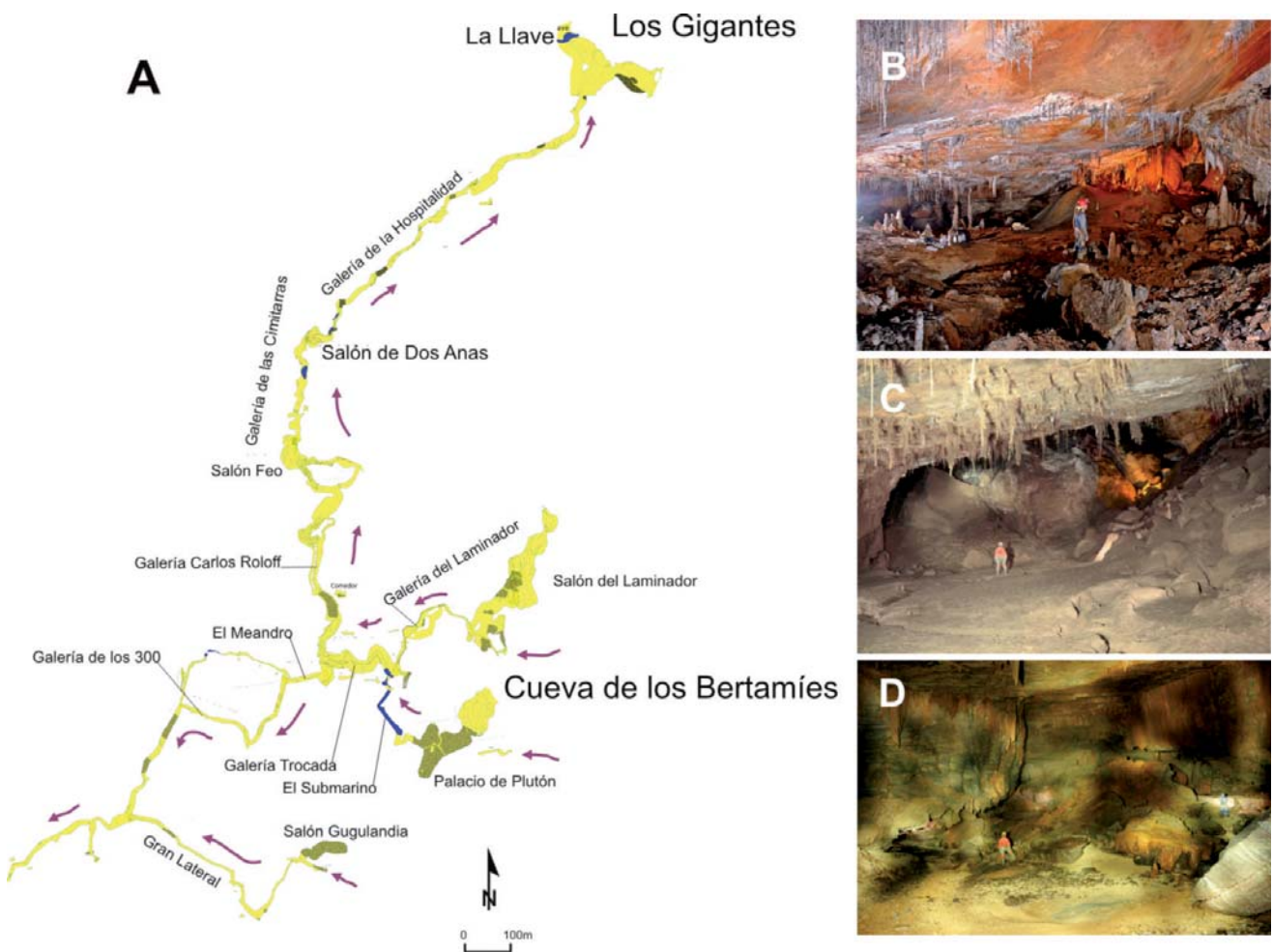


Figura 9. A: Topografía del Subsistema de Dos Anas realizada entre los años 2012 y 2014. B: Galería de las Cimitarras. C: Salón del Laminador. D: El Meandro, zona de bifurcación de flujos en dirección SO y N. Las flechas indican direcciones de flujo deducidas de scallops

En el sector Dos Anas hay topografiados hasta el momento 8185 m con cinco niveles de cavernamiento, sin continuidad en todo el sector pues aparecen en tramos truncados de galerías obstruidas por derrumbes. Presenta varias grandes salas que generalmente se ubican en la confluencia entre varios de estos niveles.



### Subsistema XX Aniversario

El subsistema del XX aniversario está genéticamente relacionado con el sumidero del río Majaguas situado al S de la Sierra de San Carlos. Actualmente el río penetra en el sistema a través de la gran galería denominada como "Cauce actual" (Fig. 10A) y continúa por el laberinto del Aserradero hacia la surgencia de Cueva Fría y La Llave (Fig. 1, 3 y 7C) ya en el borde N. Un conjunto de galerías superiores (Figs. 7D y 10B), a unos 10 m sobre el cauce actual, tienen su acceso ya en el mismo sumidero del río Majaguas y discurren más o menos paralelas hasta el gran derrumbe que constituye la Sala de la Sacristía (Fig. 10C) (parcialmente topografiadas hasta la fecha). La galería del XX Aniversario constituye un cauce intermedio recientemente abandonado pero que aún puede funcionar en épocas de grandes avenidas.

El acceso principal a la galería del XX Aniversario se produce a través del Hoyo de los Helechos por su borde SO (Fig. 10E). El Hoyo de los Helechos es una gran dolina de hundimiento que afecta a varias cavidades. Por la pared O se accede al gran salón de Los Gigantes (Fig. 7B), por el N, y tras escalar la pared vertical, a Cueva Chefa y en su zona central a la cueva de Dos Hermanos (Fig. 10D), que a su vez tiene comunicación con la galería del XX Aniversario.

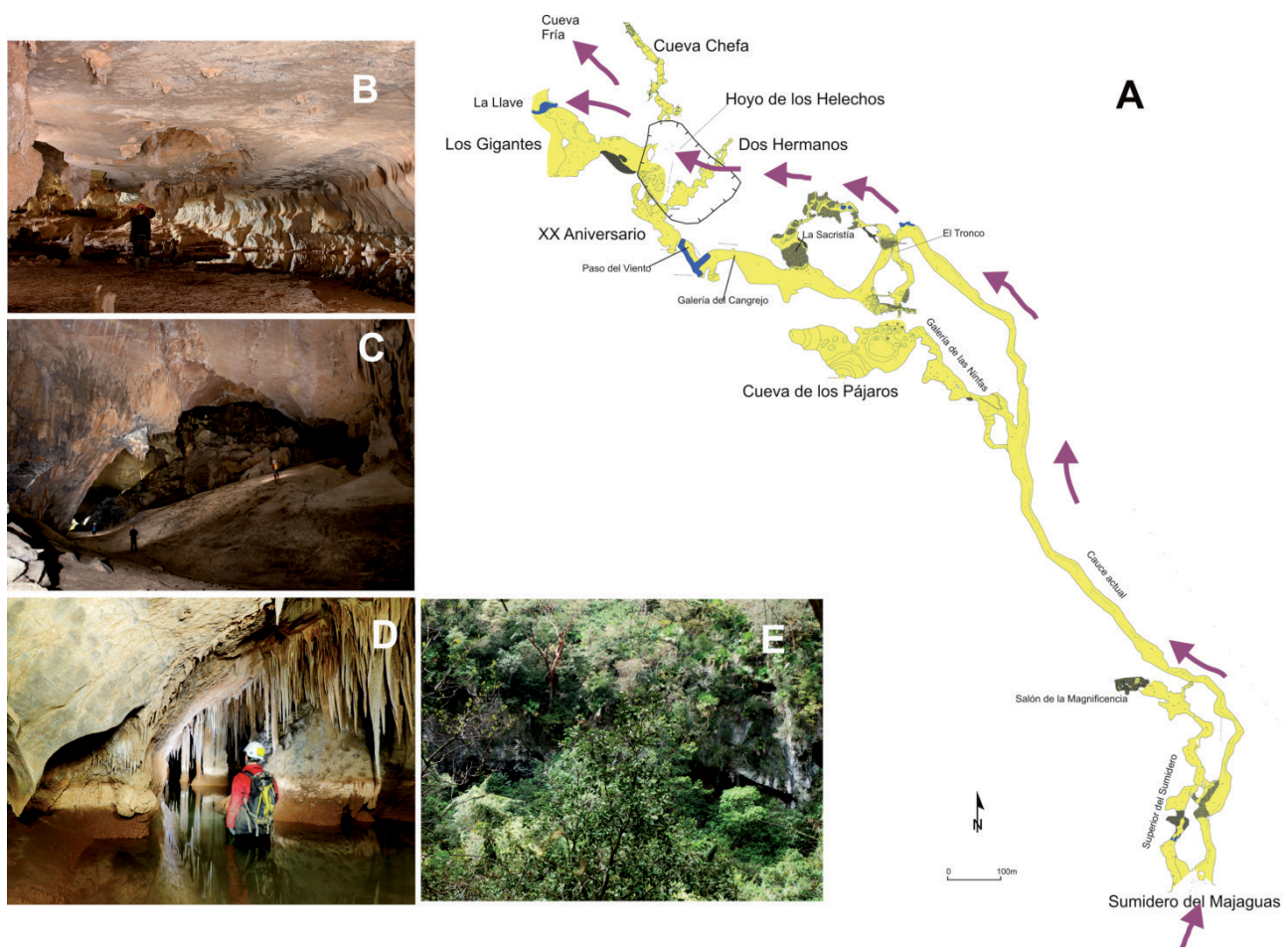


Figura 10. A: Topografía del Subsistema XX Aniversario realizada entre los años 2015 y 2016. B: Galerías Superiores del Sumidero. C: Galería del XX Aniversario y derrumbe de la Sacristía. D: Cueva de Dos Hermanos. E: Boca de entrada al XX Aniversario por el Hoyo de los Helechos. Las flechas indican direcciones de flujo deducidas de scallops

La Cueva de los Pájaros aparece en la zona más elevada del sistema, está formada por una enorme sala, considerada como la mayor del país. Tiene acceso al exterior de la sierra, ya en su ladera S, y comunica con el sistema a través de la Galería de las Ninfas y de la Galería del Tronco.

En el año 2015 se topografiaron en este sector un total de 6290 m y 1890 m adicionales en 2016.

## **Conclusiones**

El Sistema Cavernario de Majaguas-Cantera conforma una de las redes de conductos kársticos de tipo epigénico más extensas de Cuba. Su génesis aparece íntimamente ligada a varios cauces que penetran a través de sumideros en el borde S de la Sierra de San Carlos, formando extensas cuevas que atraviesan por completo el macizo kárstico.

Las cavidades se desarrollan en, al menos, 6 niveles de cavernamiento penetrables que se han relacionado genéticamente con las variaciones climáticas del Cuaternario y con los movimientos tectónicos del terreno. La karstificación superficial del macizo es muy intensa, caracterizada fundamentalmente por una gran densidad de dolinas asociadas a una tupida malla de fracturas.

En 2010 se replanteó la investigación desarrollada en la cavidad. Se realizó una reunificación de los trabajos previos, iniciados en los años 60 del pasado siglo, y se planificó un nuevo levantamiento topográfico que permitiera trabajar con datos espaciales en las tres dimensiones.

El sistema puede dividirse en dos grandes subsistemas que, aunque genéticamente relacionados, conforman en la práctica dos redes de galerías independientes que confluyen en la Cueva de los Gigantes, en la Ensenada de Bordayo. Hasta el año 2016 se han retopografiado del orden de 15 km de galerías, que conforman aproximadamente el 50% de los conductos que constituyen el sistema.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a Txema su generosa ayuda en todas las expediciones. A Mariano y a Silma por su colaboración en la campaña de 2016 y, especialmente, a Libán, a Deini y a Pastilla por acogernos durante las exploraciones.

## **Referencias**

- Acevedo, M. 1967. Le réseau souterrain de Las Majaguas, Pinar del Río, Cuba. Notes préliminaires. *Stalactite*, 2, 34-47.
- Acevedo, M. 1971. Geomorfología de Sumidero y sus inmediaciones, Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba. *Tecnológica*, IX, (3-4), 33-54.



- Acevedo, M. y Valdés, J. 1974. Introducción de métodos geomorfológicos e hidrogeológicos cuantitativos en la evaluación de sistemas cavernarios: aplicación al sistema Majaguas-Cantera. Pinar del Río. Cuba. *Revista tecnológica*, 1 Vol XII, 29-39.
- Acevedo, M. 1979. Geomorfología e hidrogeología cársticas del sistema cavernario Majaguas-Cantera, Sierra de los Órganos. Cuba. *Revista científico-metodológica del Instituto Superior Pedagógico*, 3, 136-145.
- Budaj M. y Mudrák, S. 2008 –Therion– digital cave maps. In: *Spelunca. Spelunca Mémoires* (French Federation of Speleology), 33, 138-141.
- Flores Valdés, E. 1995. Niveles de cavernamiento y fluctuaciones glacioeustáticas Cuaternarias de Cuba Occidental. *Congreso LV Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba*, 90 - 91.
- Gutiérrez-Domech, R. y Barrientos-Duarte, A. 2001. Las unidades litoestratigráficas carsificadas de Cuba occidental. *IV congreso de geología y minería. Geología del Cuaternario, geomorfología y carso*. La Habana.
- Gutiérrez-Domech, R. 2013. Observations about the geology of western Cuba, most significant aquifers, and the geomorphology of its catching landforms. H. Farfán González et al. (eds.), *Management of Water Resources in Protected Areas, Environmental Earth Sciences*, 339-346.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1998. Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33, 9-56.
- Iturralde-Vinent, M.A. y Gutiérrez-Domech, M.R. 1999. Some examples of karst development in Cuba. *Boletín informativo de la Comisión de Geoespeleología*, 14, 1-4.
- Núñez-Jiménez, A. y Gutiérrez-Domech, M.R. 1994. Visión general de la espeleología y la carsología en Cuba. *Programas y Resúmenes Segundo Congreso Cubano de Geología y Minería*, Santiago de Cuba, p. 76.
- Pajón, J.M., Hernández, I., Ortega, F., Macle, J. 2001. Periods of Wet Climate in Cuba: Evaluation of Expression in Karst of Sierra de San Carlos. *Interhemispheric Climate Linkages (Present and Past Interhemispheric Climate Linkages in the Americas and their Societal Effects)*. Chapter Long-Term Climate Variability. Academic Press, 217-226.
- Pedroso Herrera, I.I., Pajón Morejón, J.M., Fundora Granda, M.J. y Sagnotti L. 2001. Magnetismo ambiental de sedimentos cuaternarios en el sistema cavernario Majaguas-Cantera. Pinar del Río. *IV Congreso de Geología y Minería Geología del Cuaternario, Geomorfología y Carso*, 63-73.

Domínguez Sánchez, J. A. et al. Un recorrido por el patrimonio hidrogeológico de Alicante. Las formaciones kársticas y su potencial turístico. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 423-436.

## **Un recorrido por el patrimonio hidrogeológico de Alicante. Las formaciones kársticas y su potencial turístico**

J.A. Domínguez Sánchez <sup>(1)</sup>, R. Morales García <sup>(2)</sup>, L. Vega Martín <sup>(2)</sup>, J.J. Durán Valsero <sup>(2)</sup>, L. Rodríguez Hernández <sup>(3)</sup>, M. Fernández Mejuto <sup>(3)</sup> y J.A. Hernández Bravo <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Cirilo Amorós, 42. Entlo. 1ª. 46004 Valencia, ja.dominguez@igme.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid, r.morales@igme.es; l.vega@igme.es; jj.duran@igme.es

<sup>(3)</sup> Diputación Provincial de Alicante. Ciclo Hídrico. Avda. de Orihuela, 128. 03006 Alicante, lrodrigu@diputacionalicante.es; jhernand@diputacionalicante.es; mfmejuto@diputacionalicante.es

---

### **RESUMEN**

Los paisajes kársticos de Alicante, sus caprichosas formas y especialmente los abrigos con pinturas rupestres o las cavidades acondicionadas para ser visitadas constituyen un reclamo turístico, didáctico y recreativo muy en auge en las últimas décadas. Este conjunto de valores ha sido la base para poder clasificar elementos como barrancos, cuevas, simas, abrigos, gargantas, dolinas o campos de lapiazes como Lugares de Interés Hidrogeológico (LIHs). Se trata de enclaves singulares relacionados con el patrimonio hídrico natural de gran interés por su valor científico, cultural, social, medioambiental, didáctico, recreativo o paisajístico. Recientemente el Instituto Geológico y Minero de España y el Departamento del Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante han editado la guía "Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante". Se trata de una publicación didáctico-científica y de promoción turística, resultado de un riguroso proceso de valoración de los principales Lugares de Interés Hidrogeológicos de la provincia y una perfecta herramienta, sencilla y amena, para su divulgación a través de diez recorridos que dan a conocer la importancia de estos lugares. En esta comunicación se presenta la denominada Ruta 1 "Entre cuevas y barrancos" en la que se describen y analizan diferentes morfologías kársticas cuya difusión, puesta en valor y conservación son esenciales y en la que las cuevas acondicionadas para la visita tienen un papel destacado.

**Palabras clave:** Alicante, karst, LIH (Lugar de Interés Hidrogeológico), patrimonio, ruta.

## ***A tour of the hydrogeological heritage of Alicante. The karst formations and its tourism potential***

### **ABSTRACT**

*Karst landscapes, with their whimsical shapes and specially shelters with cave paintings or cavities equipped to be visited are a tourist, educational and recreational claim very booming in recent decades. This set of values have been the basis to classify elements such as ravines, caves, chasms, shelters, gorges, sinkholes or lapiaz' fields as Hydrogeological Interest Places (LIHs). It is unique places related to the natural water heritage of great interest for its scientific, cultural, social, environmental, educational, recreational or landscape value. Recently, the Instituto Geológico y Minero de España and the Departamento del Ciclo Hídrico of Diputación Provincial de Alicante have published the guide "Blue Routes by the Hydrogeological Heritage of Alicante". It is an educational-scientific and tourism promotion publication, as it is the result of a rigorous process of assessment of the main Hydrogeological Interest Places of the province and a perfect tool, simple and enjoyable, for their divulgation through ten tours that shows the importance of these places. Below is the so-called Route 1 "Between caves and ravines" which describes and analyzes different*

*karstic morphologies whose diffusion, value and conservation are essential and in which the caves equipped for the visit have a prominent role.*

**Key words:** Alicante, karst, heritage, LIH (Hydrogeological Interest site), route.

## Antecedentes

El patrimonio geológico forma parte del patrimonio natural e incluye formas, elementos y/o estructuras originadas por cualquier proceso geológico que presentan una especial singularidad debido, fundamentalmente, a su interés científico y/o didáctico. Concretamente, la diversidad de formas que aglutinan los entornos kársticos y los vestigios prehistóricos que en ellos ha dejado la raza humana permite infinidad de estudios temáticos globales o individualizados, así como múltiples usos, ya sea para la práctica de deportes de aventura, actividades educativas o como atractivo turístico. Existen infinidad los ejemplos de ello. Por su interés prehistórico se pueden mencionar los abrigos con arte levantino del barranco de la Valltorta en Castellón o la cueva de Altamira en Cantabria. Un marcado papel lúdico presentan los cañones kársticos de la sierra de Guara en Huesca, considerada un paraíso para los amantes del barranquismo. Si nos fijamos en el uso y potencial turístico se pueden nombrar, entre muchos otros lugares, la Ciudad Encantada de Cuenca, el Torcal de Antequera en Málaga o las cuevas del Drach en Mallorca.

Con el fin de aunar la divulgación científica y la promoción turística del patrimonio hidrogeológico de la provincia de Alicante, el Instituto Geológico y Minero de España (en adelante IGME) y la Diputación Provincial de Alicante (en adelante DPA) han editado recientemente la guía titulada "Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante" (IGME-DPA, 2015). A la par han implementado una *app*, o aplicación para dispositivos móviles, que permite realizar los recorridos propuestos mediante posicionamiento GPS, estando ambos productos vinculados a través de códigos QR. Este trabajo es fruto de la colaboración que mantienen ambos organismos a partir del Convenio-Marco de Asistencia Técnica suscrito en 1988. Concretamente del proyecto titulado "Patrimonio hidrogeológico en la provincia de Alicante" incluido en el "Acuerdo Específico de Cooperación 2010-2013 en materia de aguas subterráneas" firmado en octubre de 2010.

## Objetivos

Se pretende dar conocer al público en general la riqueza hidrogeológica provincial. Para ello se han inventariado y caracterizado los Lugares de Interés Hidrogeológico (en adelante LIHs) de cara a su conservación y uso sostenible.

Esta guía incluye diez rutas que recorren los principales LIHs de la provincia de Alicante. Estos itinerarios se han diseñado para que puedan ser recorridos en una jornada y en su mayor parte mediante utilitario o bicicleta. No obstante, se identifican los tramos que se aconseja realizar a pie, en bicicleta de montaña o en vehículo todo terreno. Varias de las rutas incorporan *microrrut*as, o pequeños recorridos, que únicamente pueden transitarse a pie, que sirven para conocer lugares que destacan por su encanto o interés especial.

El presente artículo describe la Ruta 1 titulada "Entre cuevas y barrancos". Se desarrolla en las sierras kársticas de Alfaro y Segaria, en la comarca de La Marina Alta, y se centra en la

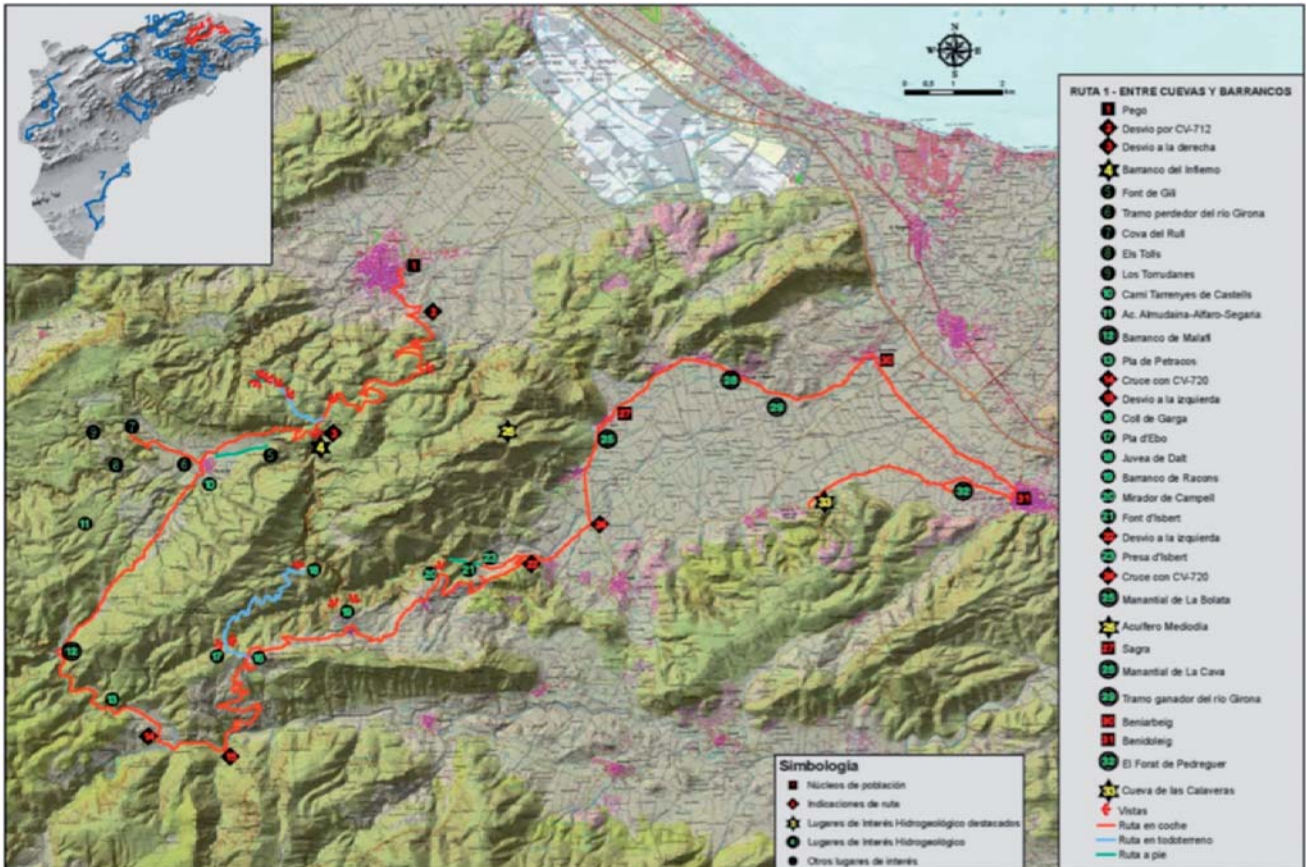


Figura 1. Mapa del recorrido de la Ruta 1: "Entre cuevas y barrancos"

descripción de las diferentes morfologías kársticas que en este reducido entorno se puedan encontrar. El recorrido propuesto, de apenas 59 km, incluye la visita de un lapiaz, varias simas, dos cuevas turísticas, abrigos con importantes pinturas rupestres, barrancos y gargantas y colapsos kársticos (figura 1).

### Una ruta por el mundo kárstico

El itinerario propuesto en la Ruta 1 se inicia en la localidad de Pegu. Por la carretera CV-712, en dirección a la localidad de La Vall d'Ebo, se asciende hasta el Coll del Pla de Molló y antes de alcanzar el punto kilométrico 19 se puede tomar un desvío a la derecha donde un cartel anuncia El Refugi La Figuereta. Este camino, individualizado en la guía como una microrruta, permite la visita de los avencs (simas) Ample, del Mig y Estret y recorre el lenar o lapiaz de Vall d'Ebo (figura 2).

El lenar de Vall d'Ebo es un ejemplo muy didáctico que se inicia con la visita al avenc Ample (sima Ancha o Amplia) (figura 3), situado a 300 m desde el Coll de Pla de Molló. Se trata de una sima de 60 m de profundidad, con un desarrollo horizontal de 111 m y una boca circular de unos 15 m de diámetro.

Unos 800 m más adelante, una pequeña señal con la inscripción "SL Travessia del Masset" indica el inicio de una senda. Por este camino, que únicamente se puede recorrer a pie, se llega



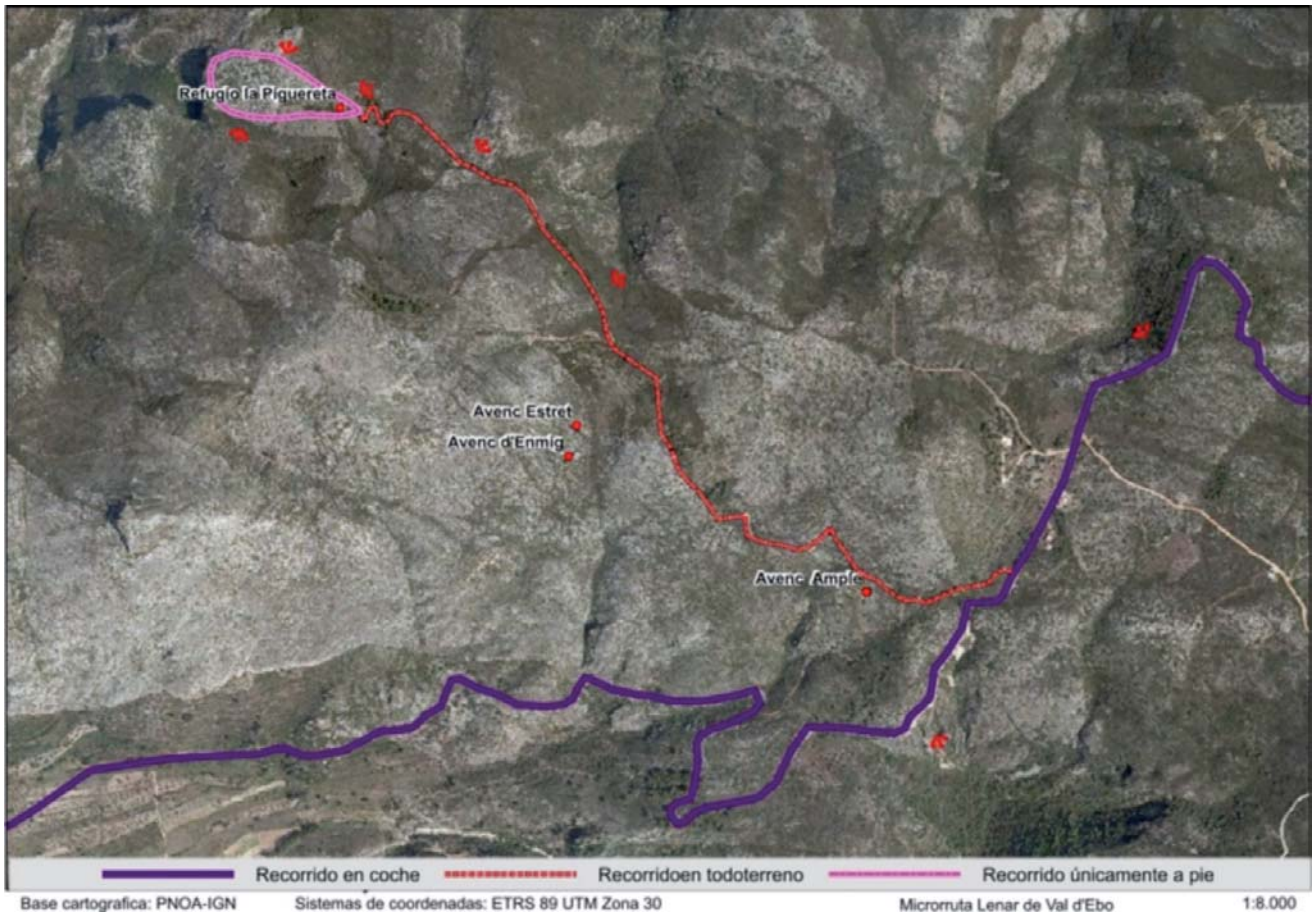


Figura 2. Microrruta por el lenar de Vall d'Ebo



Figura 3. Avenc Estret (imagen izquierda) y avenc Ample (imagen derecha)





*Figura 4. Imágenes del lapiaz de Vall d'Ebo*

al avenc Estret (sima Estrecha) (figura 3), de 142 m de profundidad y una boca de 15 x 12 m, situado a 150 m del camino principal y después, unos 50 m más adelante, al avenc d'Enmig (sima del Medio) con una profundidad de 80 m y una apertura de unos 20 x 15 m.

Algo más adelante, en el entorno del Refugi de La Figuereta, se pueden observar las típicas morfologías de un lenar o lapiaz. Aquí, la disolución de la roca carbonatada deja regueros, crestas, laminaciones y otras formas esculpidas en la piedra (figura 4).

La siguiente parada, continuando por la carretera CV-712 hacia la localidad de La Vall d'Ebo, es un mirador desde el que se puede ver la entrada norte del Barranco del Infierno (figura 5). Se trata de un cauce encajado entre las paredes carbonatadas de los altos de El Morral, al oeste, y el Pla del Montnegre, al este.



*Figura 5. Vista panorámica del Barranco del Infierno desde el mirador de la carretera CV-712 a La Vall d'Ebo*

Desde La Vall d'Ebo, por la misma CV-712, y a escasos 2 km en dirección a Alcalà de la Jovada, se encuentra la Cova del Rull. Muy cerca de este lugar se encuentran también las pozas naturales del paraje de Els Tolls o las pinturas rupestres del abrigo de Les Torrudanes.

La cueva del Rull (figura 6) fue descubierta en 1919 por el cazador José Vicente Mengual, más conocido como Tío Rull, de ahí su nombre. Tras varios propietarios que la acondicionaron para ser visitada, en 1995 pasa a ser de titularidad pública y se adecúa a la normativa vigente para su uso turístico. El trayecto de la visita, que es circular, tiene una longitud de 220 m y un desnivel de 19 m.

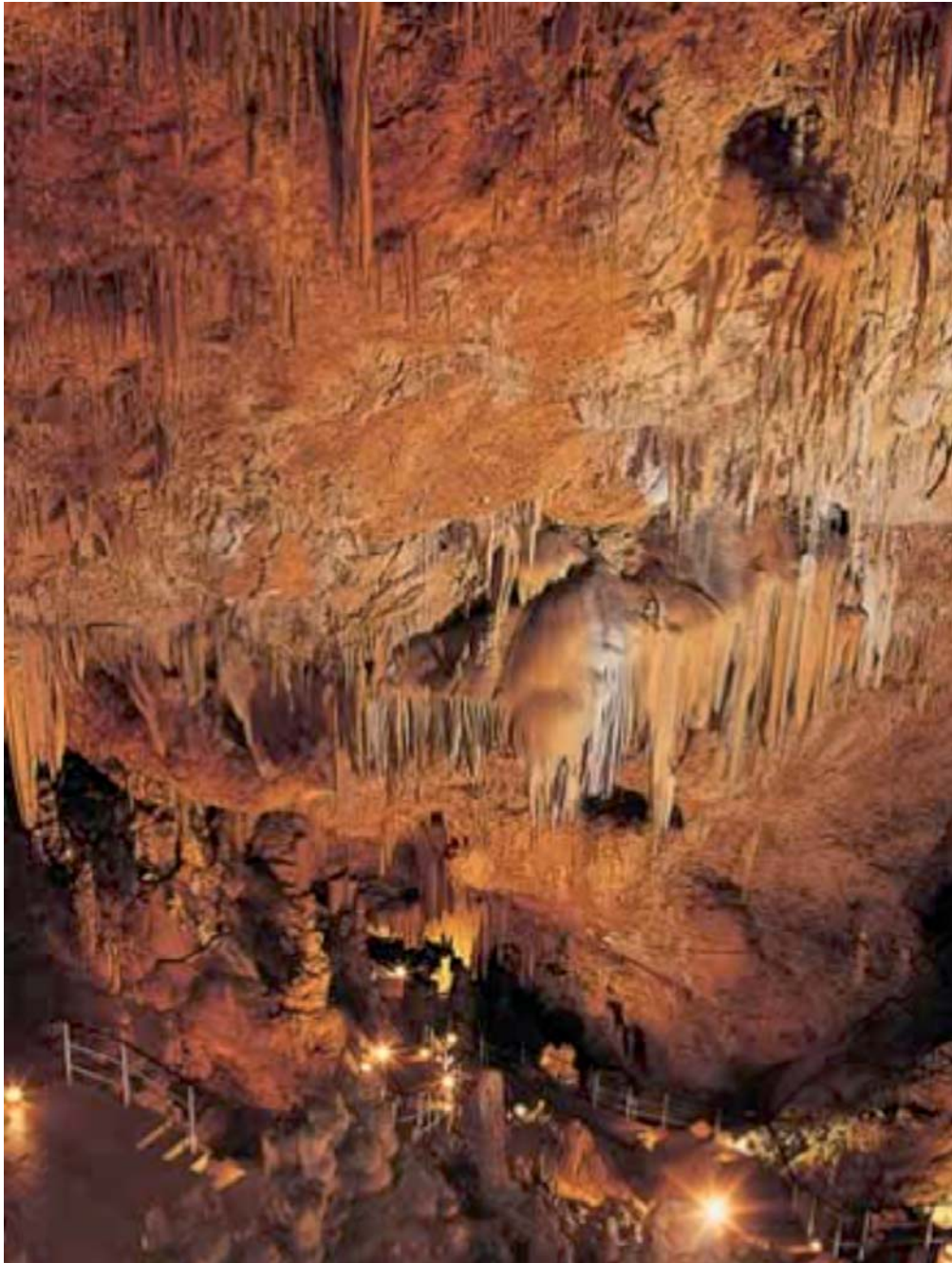


Figura 6. Cueva del Rull (Fuente: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. <http://www.cuevasturisticas.es>)



En el abrigo de Les Torrudanes, se muestran pinturas rupestres de color rojo representando esquemáticamente la figura humana y varios animales (figura 7). Se atribuyen al arte Levantino considerado Patrimonio Mundial de la Humanidad.



*Figura 7. Pinturas de figuras humanas y de animales del abrigo de Les Torrudanes (González Díez, 2008)*

Desde La Vall d'Ebo la ruta sigue, en dirección suroeste, por el Camí Tarrenyes de Castells (figura 8) hacia Castell de Castells. Se trata de una pista asfaltada de 9,3 km de longitud que atraviesa el acuífero carbonatado de Almudaina - Alfaro - Segaria. Este entorno kárstico, ejemplarizado en el Barranco de Malafi, de espectaculares farallones y masas rocosas fuertemente erosionadas, acarcavadas y meteorizadas, constituye una zona de recarga preferencial de las aguas meteóricas.



*Figura 8. Camí de Tarrenyes de Castells. Barranco de Malafi (al fondo)*





*Figura 9. Valle de Malafi desde los abrigos de Pla de Petracos*

A la altura del barranco de Malafi el camino gira hacia el sur-sureste y llega al conocido enclave del Pla de Petracos, donde se encuentra uno de los más valiosos ejemplos de arte rupestre Macroesquemático y Levantino de la provincia (figura 9). Las pinturas de estos abrigos fueron descubiertas en 1980 y han sido declaradas Bien de Interés Cultural. Su visita, libre y sencilla por la perfecta señalización y acondicionamiento, es casi obligada. Las figuras y formas dan testimonio de los primeros agricultores y alfareros que trajeron el Neolítico a la península ibérica, de sus conocimientos en alfarería, el utillaje pulimentado, las semillas de cereales y los primeros animales domésticos.

Entre las representaciones del arte Macroesquemático más destacadas de los abrigos de Pla de Petracos están los orantes. Son figuras humanas con los brazos extendidos hacia arriba que se considera relacionadas con algún tipo de culto celeste (figura 10).



*Figura 10. Figura en rito ceremonial en un abrigo del Pla de Petracos (izquierda) y Orantes del Pla de Petracos (derecha) (González Díez, 2008)*

La ruta sigue por la misma carretera CV-720 en dirección a la localidad de Benigembla. Tras recorrer por esta vía 1,45 km, se toma, a mano izquierda, el Camí dels Olivarets, que cruza el cauce (normalmente seco) del río Xaló. Esta pista, estrecha aunque asfaltada, asciende hasta el Coll de Garga. Desde este punto se puede tomar un camino de tierra, a mano izquierda, que nos permite llegar primero al Pla d'Ebo, collado desde el que al oeste se abre el barranco de Segués y al este el de Racons, y segundo, al paraje de Juvea de Dalt.

Desde este último lugar las vistas del Barranco del Infierno desde su vertiente sur son impresionantes.

En concreto, la panorámica del famoso Pas de l'Estret (Paso del Estrecho) es espectacular. En este punto el cauce llega a encajonarse de forma casi imposible (figura 11).



*Figura 11. Paso del Estrecho (Pas de l'Estret) en el barranco del Infierno*



El Barranco del Infierno constituye un tramo de la cabecera del río Girona. Este cauce, de 40 km de longitud y una cuenca de 117,2 km<sup>2</sup>, nace cerca de la localidad de Alcalá de la Jovada, en la cara norte de la Sierra de la Carrasca, a más de 1300 m de altitud.

Su curso alto transcurre por los barrancos de Els Penyals y l'Infern, donde recibe el nombre de río Ebo y es un claro ejemplo de los conocidos como ríos en roca (Wohl, 2000; Ortega, 2007 y Ortega, 2010), en los que la morfología está condicionada por el sustrato y por el régimen de caudales.

El cauce del Barranco del Infierno permanece seco la mayor parte del año. El factor litológico, en este caso, tiene una importancia menor en su formación y su modelado se debe básicamente a los efectos de las intensas precipitaciones de régimen torrencial que acontecen en esta zona del levante español.

De vuelta al Camí dels Olivarets, en el Coll de Garga, la ruta sigue hacia Benimaurell, localidad desde la que también se tienen unas preciosas vistas de los barrancos Infern y Racons, que se unen en este punto. Continuando por la CV- 7210 se pasa por Benimaurell, Fleix y El Campell, núcleos urbanos situados en el margen derecho del Barranco del Infierno (figura 12).



*Figura 12. Barranco del Infierno desde el mirador de la localidad de El Campell*

La ruta continúa por otras poblaciones y permite la visita de parajes como la presa de Isbert, el manantial de La Bolata o el manantial de La Cava (ver figura 1), no obstante, hay que acercarse hasta la localidad de Pedreguer para visitar otro elemento kárstico destacado, el conocido como Forat de Pedreguer (figura 13).



*Figura 13. El Forat de Pedreguer*

Para acceder a este lugar, desde el casco urbano del pueblo que le da nombre, se toma la CV-733 en dirección a Benidoleig. Tras recorrer 1550 m, se toma un desvío a mano izquierda que conduce a un campo de naranjos donde se encuentra este colapso kárstico.

Este socavón se produjo de forma instantánea la noche del 2 de agosto de 1982. Tiene una profundidad de 80 m, parte de ellos cegados por los propios derrubios, y una boca de aproximadamente 30 x 10 m.

Como colofón, la ruta termina con la visita a la Cueva de las Calaveras (figura 14), a cuya entrada se llega siguiendo por la CV-733, justo antes de alcanzar la localidad de Benidoleig.



Su nombre se debe al hallazgo, en el año 1768, de los restos óseos de una docena de personas que fueron atribuidos a agricultores musulmanes de la Edad Media que trabajaban en el abastecimiento de agua (Cavanilles, 1958). Esta cavidad turística está protegida por la Ley 4/1998 de Patrimonio Cultural Valenciano y se sitúa en el paraje del Tossal de Rafalet, en el flanco derecho del valle del Girona. Su gran boca, de forma ovalada, supera los 15 m de altura.

La gruta está abierta al público en su parte inicial o subaérea, de unos 500 m de longitud, con salas de hasta 20 m de altura. La zona más profunda, el conocido como Toll Blau, se encuentra inundada. Destacan los huecos ascendentes en el techo de la cueva y una gran estalactita conocida como la "Campana" (figura 14).



Figura 14. Interior de la Cueva de Las Calaveras. Detalle de las oquedades y formaciones en los techos (imágenes de la izquierda) y de la estalactita la "Campana" (imagen inferior)

Entre los restos prehistóricos hallados en su interior tienen especial interés los huesos de grandes mamíferos y útiles de corte y descarnado. También se han hallado enterramientos neolíticos con una antigüedad de 5.000 años. De la época íbero-romana datan los restos de ofrendas destinadas al culto de la fertilidad. Aparte de los restos óseos encontrados en el siglo XVIII, las

primeras investigaciones arqueológicas serias se realizan por el abate H. Breuil, entre 1913-1917, y más tarde por J.J. Senent entre 1931 y 1933. Durante la Guerra Civil española (1936-1939) la cueva se emplea como depósito de explosivos y su suelo es cementado. Finalmente, en los años 60, se acondiciona para el turismo (Aparicio *et al.*, 1982).

## Conclusiones

Los paisajes kársticos, las cuevas turísticas y los abrigos con pinturas rupestres constituyen elementos de elevado valor patrimonial cuya difusión, puesta en valor y protección han de constituir una prioridad. Las posibilidades de un uso sostenible y el desarrollo socio-económico y cultural que pueden representar han de marcar las líneas de actuación tanto a nivel institucional, como científico, educativo o lúdico-turístico.

Un ejemplo de esta contribución al desarrollo socio económico y cultural de una región, por parte de las instituciones públicas es la guía "Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante", editada en 2015 por el Instituto Geológico y Minero de España y el Departamento del Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante, que constituye un punto de partida para la conservación de la riqueza patrimonial. Además, la guía impresa se combina con una aplicación para dispositivos móviles que permite el posicionamiento GPS sobre los itinerarios y acceder fácilmente a información complementaria, lo que incrementa su potencial turístico.

En la mayoría de las rutas que incluye la guía se describen Lugares de Interés Hidrogeológico relacionados con el karst. No obstante, en la Ruta 1, denominada "Entre cuevas y barrancos" estos elementos morfológicos son el eje vertebrador del recorrido propuesto. En un trazado de apenas 59 km se puede visitar un lenar o lapiaz típico, varias simas, abrigos con importantes pinturas rupestres, barrancos encajados con diversidad de elementos morfológicos, estrechas gargantas, dos cuevas turísticas y un colapso kárstico.

## Referencias

- Aparicio, J. Pérez, M. Vives, E. Fumanal, P. y Dupré, M. 1982. La Cova de las Calaveres (Benidoleig, Alicante). *Serie de trabajos varios*, nº 75. Servicio de Investigación Prehistórica. Diputación Provincial de Valencia-Institución Alfonso el Magnánimo. 124 pp. Valencia.
- Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, 20/5/2016. <http://www.cuevasturisticas.es>.
- Cavanilles, A.J. 1958. *Observaciones sobre la Historia Natural, Geografía, Agricultura, Población y Frutos del Reyno de Valencia*.
- González Díez, G. 2008. *Prehistoria levantina. Hace seis mil años*. Editorial Club Universitario, 180 pp.
- IGME-DPA. 2015. *Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante*, 445 pp.
- Ortega, J.A. 2007. El estudio de la morfología de los ríos en roca. Implicaciones hidrológicas y evolutivas. *Boletín Geológico y Minero*, 118 (4), pp. 803-812.
- Ortega, J.A. 2010. El levante español. Ríos en roca de las provincias de Alicante (Cuencas del río Girona y Algar), Teruel (Beceite) y Tarragona (Els Ports). En J.A. Ortega y J.J. Durán (Eds.),

*Patrimonio geológico: Los ríos en roca de la Península Ibérica*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Geología y Geofísica, nº 4, pp. 269-296. Madrid.

Wohl, E.E. 2000. Mountain rivers. American Geophysical Society. *Water resources monograph*, 14, Washington, 116 pp.

Morales García, R. *et al.* Génesis de los enclaves kársticos de mayor interés patrimonial de Alicante. Una aproximación para su geoconservación y aprovechamiento sostenible. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 437-450.

## **Génesis de los enclaves kársticos de mayor interés patrimonial de Alicante. Una aproximación para su geoconservación y aprovechamiento sostenible**

R. Morales García <sup>(1)</sup>, J.A. Domínguez Sánchez <sup>(2)</sup>, J.J. Durán Valsero <sup>(1)</sup>, L. Vega Martín <sup>(1)</sup>, L. Rodríguez Hernández <sup>(3)</sup>, J.A. Hernández Bravo <sup>(3)</sup> y M. Fernández Mejuto <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Ríos Rosas 23. 28003 Madrid, r.morales@igme.es; l.vega@igme.es; jj.duran@igme.es

<sup>(2)</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Cirilo Amorós 42. Entlo. 1ª. 46004 Valencia, ja.dominguez@igme.es

<sup>(3)</sup> Diputación Provincial de Alicante. Ciclo Hídrico. Avda. de Orihuela, 128. 03006. Alicante, lrodrigu@diputacionalicante.es; jhernand@diputacionalicante.es; mfmejuto@diputacionalicante.es

---

### **RESUMEN**

La provincia de Alicante alberga numerosos espacios kársticos asociados fundamentalmente a materiales carbonatados, calizas y dolomías, que ocupan una superficie del orden del 25% de la región. Los territorios kársticos, en general, son ricos en Lugares de Interés Geológico (LIG), muchos de ellos relacionados con los aspectos ligados a su funcionamiento hidrogeológico y con los productos geomorfológicos resultantes de su evolución reciente. Por sus características físicas y su valor patrimonial, los espacios kársticos alicantinos han suscitado la elaboración de estudios técnicos diversos. En muchos casos, además, se han convertido en reclamos turísticos, didácticos y recreativos de primer orden, contribuyendo de este modo al desarrollo socioeconómico de la región. Es por ello que las entidades públicas han de tener como objetivo, estudiar y difundir el conocimiento de estos espacios, como paso previo y necesario para establecer medidas de protección que garanticen una adecuada preservación de los LIG. En este sentido, la génesis y evolución de los enclaves kársticos alicantinos ha quedado bien representada y explicada en la guía de rutas por el patrimonio hidrogeológico de Alicante, editada por el Instituto Geológico y Minero de España y el Departamento de Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante. Esta guía, además de un excelente instrumento de divulgación científica y de fomento turístico, explica, de forma amena y didáctica, la génesis de los principales enclaves kársticos alicantinos, mediante numerosos dibujos y esquemas 3D. En esta comunicación se analizan y describen los parajes y enclaves kársticos de mayor interés patrimonial desde un punto de vista eminentemente hidrogeológico. La explicación de la génesis de los abrigos con pinturas rupestres del Pla de Petracos, el megalapiaz de Els Frares, la cueva de Canelobre o el Barranco de la Encantada, ayuda a entender lo complicada y lenta que es, a escala humana, su formación y la necesidad de ser respetuosos con los mismos para su uso sostenible y geoconservación.

**Palabras clave:** Alicante, karst, gráficos 3D, LIG (Lugar de Interés Geológico), patrimonio.

### ***Genesis of karstic sites of greater heritage interest of Alicante province. An approach for geoconservation and sustainable use***

#### **ABSTRACT**

*Alicante hosts numerous karst areas primarily associated with carbonate materials, limestones and dolomites, covering an area of about 25% of the region. Karst territories, in general, are rich in Geosites (LIG), many of them spe-*



*cifically related to hydrogeological and geomorphological products resulting from its recent developments. By their physical characteristics and heritage value have generated the development of various technical studies. In many cases they have become tourist, educational and recreational claims first order, thus contributing to the socioeconomic development of the region. That is why public entities must have as prominent target, study and divulgate knowledge of these spaces as a preliminary and necessary step to establish protective measures to ensure adequate preservation of LIG. In this sense, the genesis and evolution of karstic enclaves of Alicante has been well represented and explained in the route guidance by the hydrogeological heritage of Alicante, recently published by the Instituto Geológico y Minero de España and the Departamento del Ciclo Hídrico of Diputación Provincial de Alicante. This guide, besides being an excellent tool for popularizing science and tourism development, explains, in an entertaining and educational, the genesis of the main karstic enclaves of Alicante including numerous drawings and 3D schemes. In this communication are analyzed and described the places and karstic enclaves of greater heritage interest from a point of view eminently hydrogeological. The explanation of the genesis of shelters with cave paintings of Pla de Petracos, the megalapiaz Els Frares, the cave of Canelobre or La Encantada canyon helps to understand how complicated and slow, on a human scale, is their training and the need to be respectful to them for their sustainable use and geoconservation.*

**Key words:** 3D graphics, Alicante, geosites, heritage, karst.

## Introducción

La provincia de Alicante alberga numerosos espacios kársticos de gran valor e interés patrimonial desde un punto de vista hidrogeológico, cuya protección y difusión, para que sean ampliamente conocidos y preservados a su vez, ha de constituir uno de los objetivos de las entidades públicas. En esta línea, el Instituto Geológico y Minero de España y la Diputación Provincial de Alicante han editado recientemente la guía "Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante" (IGME-DPA, 2015). En esta publicación se muestran, entre otros muchos espacios hidrogeológicos de elevado valor patrimonial, los enclaves kársticos provinciales más significativos. Esta guía tiene carácter divulgativo, con un marcado interés turístico, promocional y didáctico. Así, basándose en ejemplos reales, se describe la génesis y evolución de las formas kársticas más habituales. Para una mejor comprensión se incluye un apartado de definiciones y numerosas figuras y esquemas en 3D.

Estos esquemas ponen énfasis en los detalles importantes desde el punto de vista geomorfológico, pero con la intención de que el resultado sea claro y sencillo de comprender, de manera que las figuras tengan significado por sí mismas. Un ejemplo es el esquema 3D sobre el desarrollo de un paisaje kárstico y la génesis y evolución de sus principales elementos (figura 1).

Las formas que configuran un paisaje kárstico son muy variadas. Se habla de exokarst o epikarst para aglutinar las formaciones superficiales y de endokarst para las generadas bajo tierra.

Según la definición incluida en la guía, Karst es el sistema de flujo de las aguas subterráneas, caracterizado por el desarrollo de conductos de disolución que transmiten las aguas desde las zonas de recarga a zonas de descarga. Si la formación karstificada aflora en superficie, puede desarrollar un paisaje kárstico o exokarst, caracterizado por el escaso desarrollo de la red de drenaje superficial, la abundancia de formas kársticas de absorción (dolinas, poljes, colapsos kársticos, uvalas, simas, sumideros) y la presencia de formas de disolución (cuevas, lapiaces) (Diccionario Oxford-Complutense de Ciencias de la Tierra, 2000). Si este proceso se realiza bajo la superficie del terreno se habla de endokarst. El proceso de karstificación se da prefe-

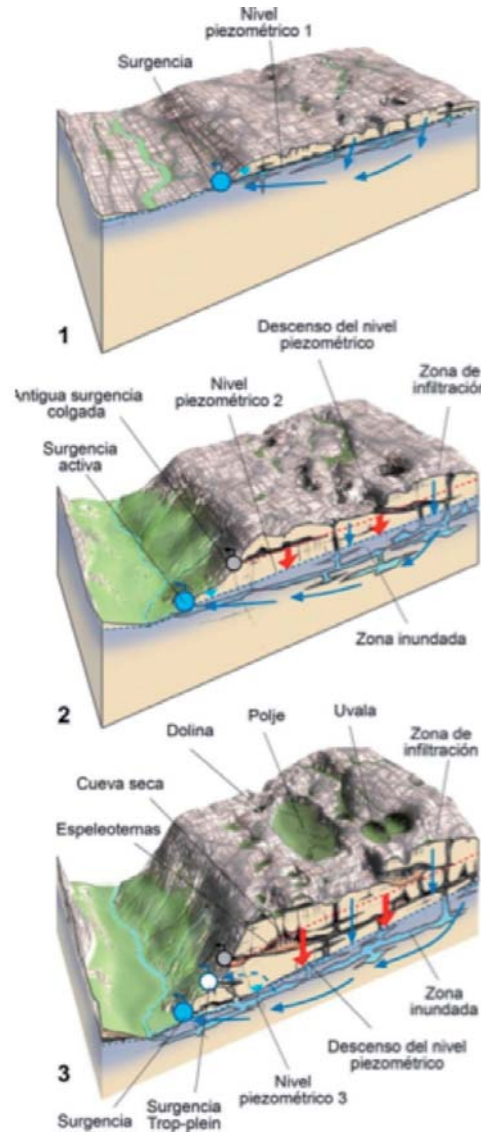


Figura 1. Desarrollo de un paisaje kárstico. Génesis y evolución de sus formas

rentemente en rocas carbonáticas (calizas y dolomías) y evaporíticas (yesos y halita), pero si las condiciones son favorables puede afectar a otras rocas menos solubles.

### Enclaves kársticos de Alicante

La riqueza de entornos kársticos de la provincia de Alicante queda perfectamente evidenciada en esta guía de rutas. En el mapa de la figura 2 se describen más de veinte enclaves kársticos con morfologías variadas (lapiaces, barrancos kársticos, cuevas, simas, abrigos, colapsos kársticos, dolinas, poljes, etc.) que, aparte de su interés hidrogeológico y geomorfológico general, llevan asociados otros muchos valores. Se ha de tener en cuenta, por ejemplo, el valor histórico de los abrigos del Pla de Petracos, ricos en pinturas rupestres de arte Macroesquemático; el potencial turístico de las cuevas visitables de Rull, Las Calaveras o Canelobre; el alto valor medioambiental de parajes como Els Frares, con especies endémicas de flora y fauna o, simplemente, la espectacularidad paisajística del entorno de las simas de Partagat.

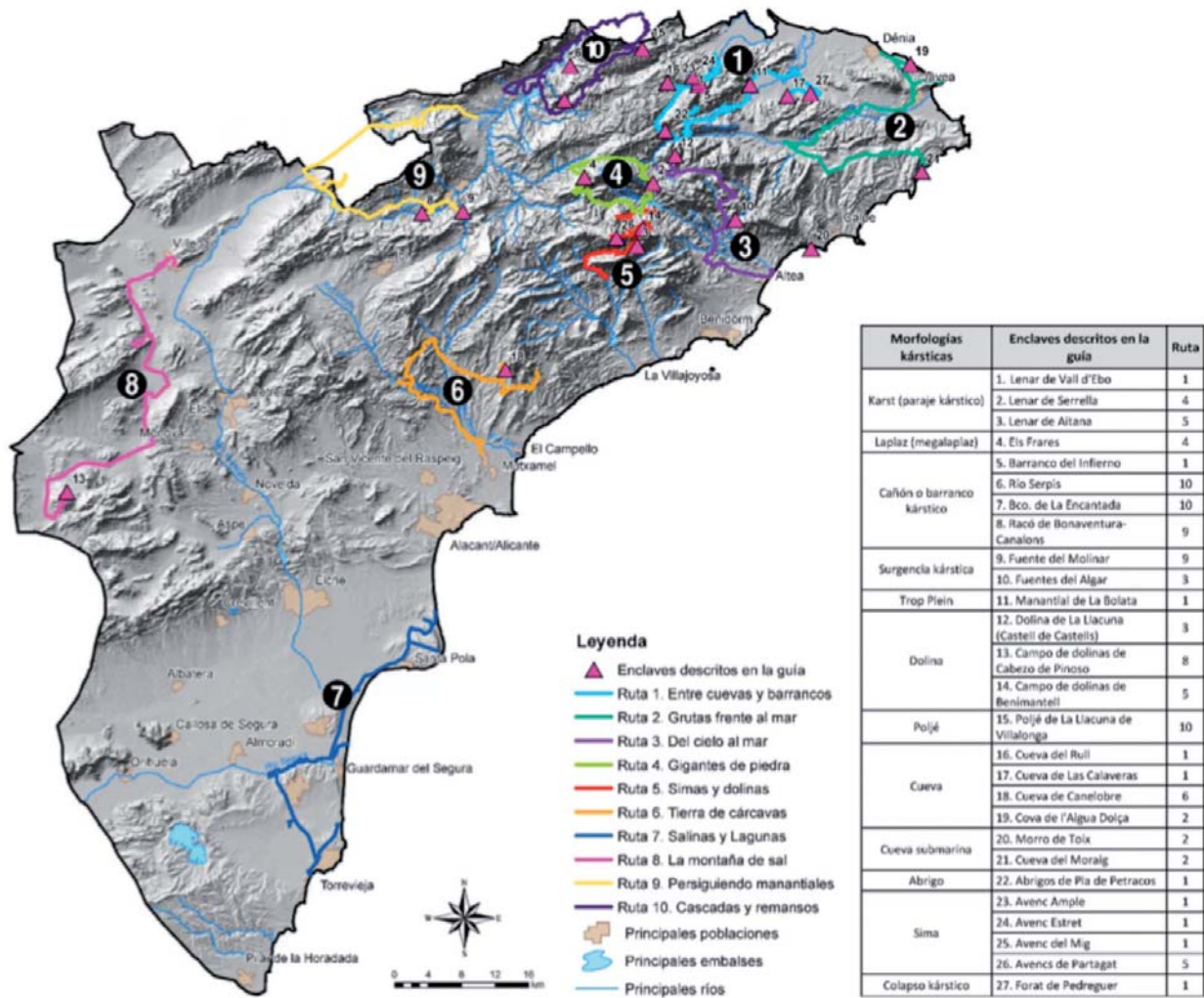


Figura 2. Enclaves kársticos dentro de los Lugares de Interés Hidrogeológico (LIHs) de la provincia de Alicante

De la mayoría de estos lugares se adjuntan descripciones, definiciones y esquemas explicativos de su formación, evolución y características. Se pretende hacer llegar al lector una variada y amena información para que conozca mejor estos entornos, los disfrute y, al mismo tiempo, se concencie de la necesidad de preservarlos.

A continuación se presenta una selección de enclaves alicantinos que ejemplifican las principales morfologías kársticas.

### El lapiaz de Aitana

El concepto de lenar o lapiaz es poco conocido por el público no especializado. Según la definición recogida en la guía (Johannes, 1985) un lapiaz, lenar o *karren* es un conjunto de microformas de distinto tamaño (de milímetros a metros), de morfología muy variada, producidas por la disolución de rocas solubles (calizas, yesos, etc.), constituyendo un fenómeno característico del modelado o morfología exokárstica. Cuando este fenómeno se produce sobre amplias zonas del territorio se habla de campo de lapiaces (figura 3).



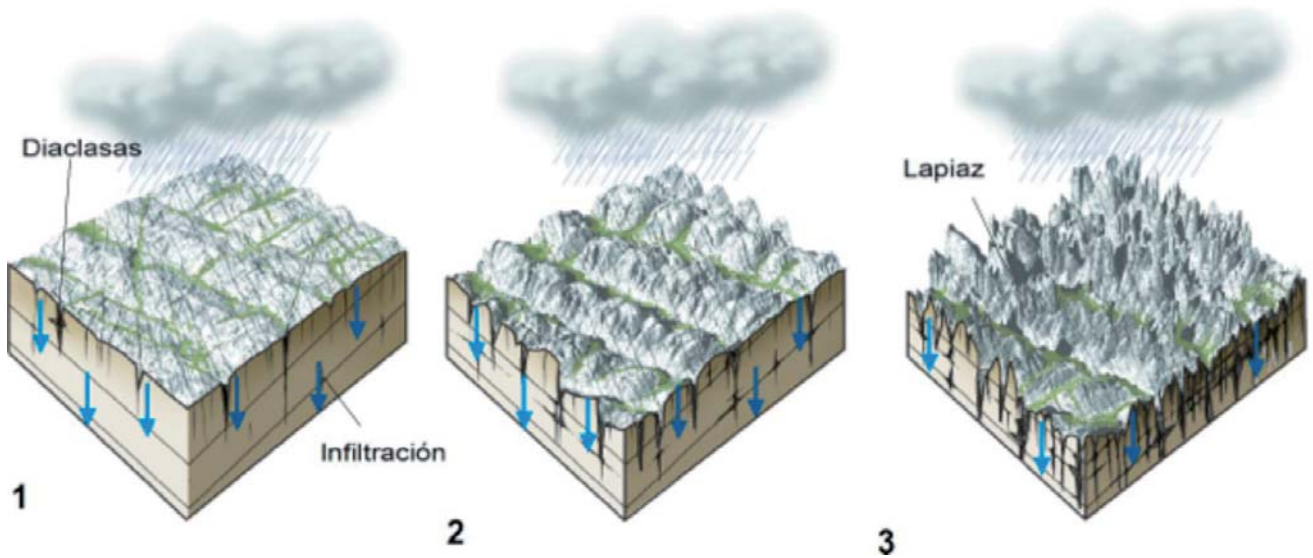


Figura 3. Desarrollo y evolución de un lapiaz o lenar

En la provincia de Alicante la mayoría de las áreas montañosas constituidas por terrenos carbonatados sufren procesos erosivos específicos que, en mayor o menor grado, favorecen el desarrollo de lapiazes. Uno de los más destacados es el conocido como lapiaz o lenar de Aitana. Este paraje, que se incluye en la ruta 5 de la guía, se origina fundamentalmente sobre las calizas arrecifales eocenas que forman el crestón de las zonas más altas de la sierra.

### **Megalapiaz de Els Frares**

Existen muchos tipos de lapiazes, clasificados tipológicamente en función de criterios morfológicos, genéticos o funcionales. Los megalapiaces son formas intermedias entre los lapiazes tradicionales, de pequeño tamaño, centimétrico a métrico, y las llamadas ciudades de piedra y karst en mogotes, cuyo tamaño es de escala decamétrica a hectométrica.

Un ejemplo espectacular de esta morfología kárstica, descrito en la ruta 4 de la guía, es el paraje de Els Frares (Los Frailes), que se sitúa en la vertiente norte de la sierra de Serrella. Este enclave se caracteriza por el avanzado desarrollo del lapiaz original y las dimensiones decimé-

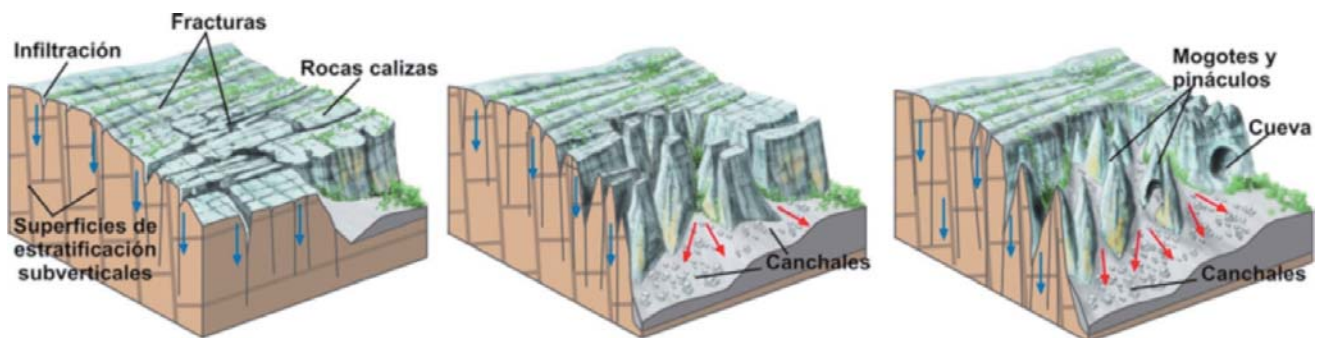


Figura 4. Génesis del megalapiaz de Els Frares



tricas de las formas resultantes, constituidas por mogotes y pináculos rocosos que le dan su nombre.

Su génesis ha tenido lugar durante el Cuaternario, en un proceso lento, activo actualmente, pero mucho más intenso durante los periodos fríos de esta época, y viene condicionada por la estratigrafía y la tectónica, que han sido la base para el desarrollo de estas estructuras, moldeadas poco a poco, por los agentes erosivos, principalmente el agua (figura 4).

La geología de la sierra de Serrella se caracteriza por una serie estratigráfica alternante, compuesta por capas muy compactas, como las calizas micríticas del Cretácico superior y las calizas arrecifales con nummulites del Eoceno; y otras capas blandas, de arcillas, margas y arenas. Estructuralmente, la sierra es un pliegue anticlinal con el flanco sur muy laxo y el septentrional muy verticalizado. Con esta disposición las rocas carbonatadas, verticalizadas y fracturadas, más resistentes a la erosión física que los terrenos blandos, pero más solubles, se van modelando lentamente.

La densa red de fracturas favorece la disgregación mecánica de la roca. Los fragmentos disgregados, de centimétricos a decamétricos, se acumulan en la base de los mogotes originando canchales, pedrizas o derrubios de ladera, mientras que los pináculos, paulatinamente, se hacen más altos y estilizados.

### **El barranco kárstico de la Encantada**

Se considera barranco kárstico al curso fluvial desarrollado, preferentemente, sobre rocas solubles carbonatadas por disolución de las mismas y que presenta elementos típicos de la morfología exokárstica (figura 5). El encajamiento progresivo del cauce en la roca se logra por la acción combinada de abrasión de la corriente al transportar cantos que golpean las paredes del cauce y la capacidad química de disolución del agua (IGME-DPA, 2015).

En el arco mediterráneo se encuentran numerosos cauces sobre terrenos carbonatados que, en muchos casos, permanecen secos la mayor parte del año. Aparte de la litología del sustrato, uno de los factores determinante en su génesis es el régimen hidrológico, es decir, la frecuencia de las avenidas que se canalizan por la red fluvial, producto de las intensas precipitaciones de origen convectivo típicas del levante español, y la magnitud de las mismas. En cortos periodos de tiempo se encauzan volúmenes muy grandes de agua que movilizan los sedimentos del



Figura 5. Formación de un cañón kárstico

cauce y son capaces de producir cambios significativos en su lecho y márgenes (Ortega, 2007; Ortega y Garzón, 2008).

El barranco de La Encantada, afluente del río Serpis por su margen derecho, es un buen ejemplo de este tipo de cauces, en los que el caudal varía notablemente de unas épocas a otras (figura 6). El marcado desnivel permite que en un trazado de pocos kilómetros se agrupen numerosos saltos, cascadas, gargantas, pozas, marmitas y otras formas características.



*Figura 6. Variación de caudal en el barranco de La Encantada. Imagen izquierda de febrero de 2013. Imagen derecha de marzo de 2013*

### ***Surgencia kárstica y trop-plein***

Una surgencia es la salida natural al exterior del agua subterránea al encontrar un nivel subyacente de rocas impermeables (Escuder, 2009). Un ejemplo es el conocido manantial de El Molinar de Alcoy, principal punto de drenaje del acuífero de Barrancones. Este manantial se aprovecha, desde 1421, para abastecer a la población de esta localidad y ha jugado un papel esencial en el desarrollo industrial de la zona durante gran parte del siglo XIX e inicios del XX (figura 7).

La sierra de Barrancones se estructura como un anticlinal formado por calizas pararecificales del Eoceno medio, calizas del Oligoceno y calcarenitas del Mioceno superior. El impermeable de base son las arcillas del Eoceno inferior. El manantial surge en el contacto mecánico, por falla, de los niveles permeables con las margas del Mioceno.

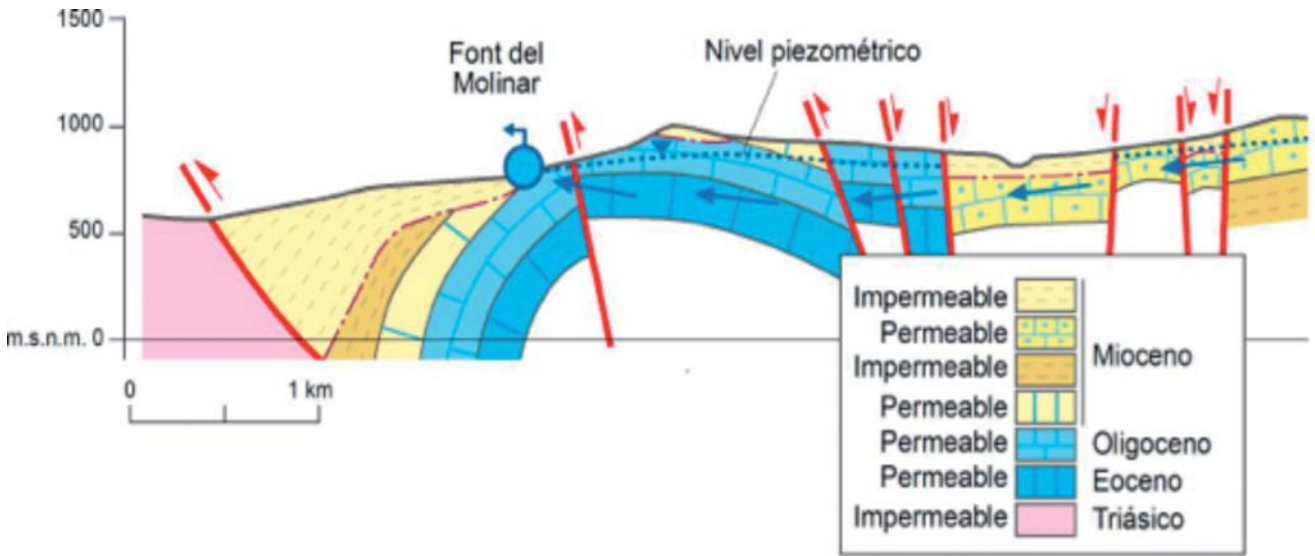


Figura 7. Corte hidrogeológico del manantial de El Molinar

Un tipo especial de surgencia kárstica natural es el *trop-plein* (en francés "demasiado lleno; rebosamiento"). Se produce por efecto de la sobrecarga estacional del nivel del agua en un acuífero kárstico cuando éste está demasiado lleno y rebosa por los niveles superiores a través de un conducto rocoso ya formado (IGME-DPA, 2015).

En la provincia de Alicante el acuífero de la sierra de Mediodía es drenado, en su extremo noreste, por los manantiales de La Cava, La Bolata y Sagra, con un caudal conjunto de 6,52 hm<sup>3</sup>/año. De estas surgencias, el manantial de La Bolata se comporta como un *trop-plein* y presenta picos de caudal muy acusados dependiendo del régimen de precipitaciones, de encontrarse seco en muchas épocas del año a drenar caudales por encima del m<sup>3</sup>/s (figura 8).

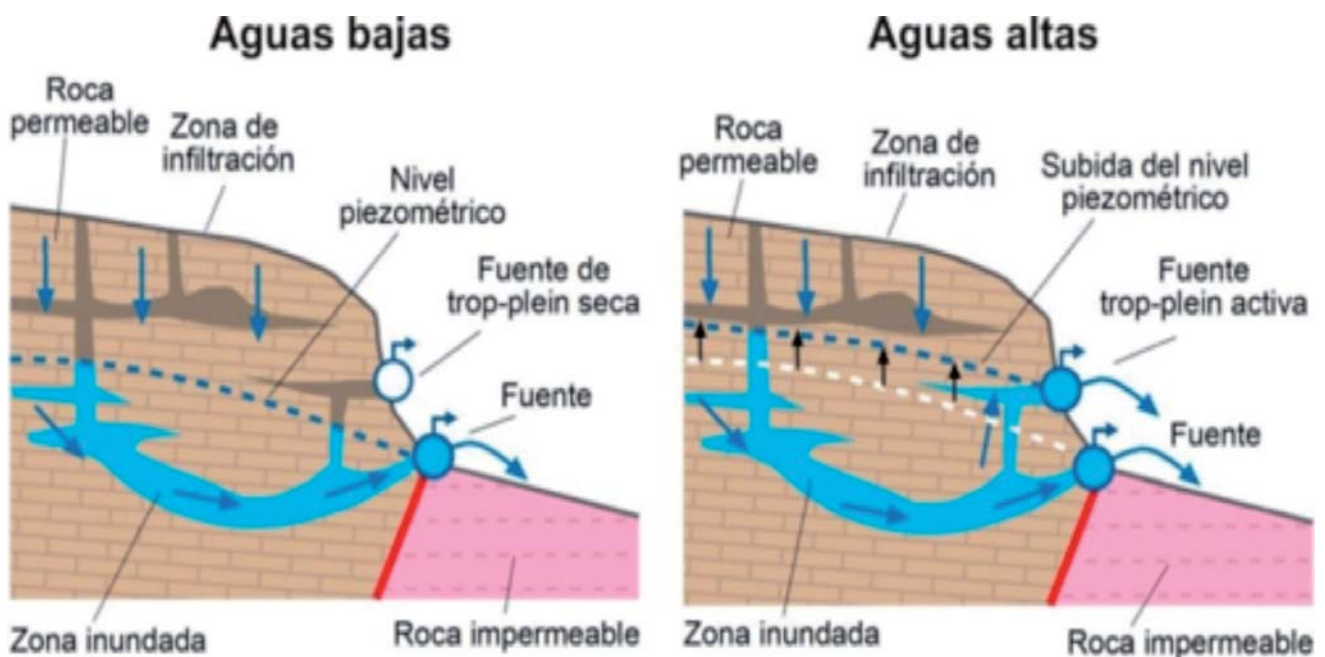


Figura 8. Manantial de tipo trop-plein de La Bolata



### **Dolina de La Llacuna**

Una dolina es una forma kárstica circular y cerrada, con bordes de pendiente muy variable, desde muy suave hasta casi vertical. Focalizan el drenaje superficial verticalmente hacia el interior del karst. Se pueden formar por disolución, por colapso o por una combinación de ambos procesos (Diccionarios Oxford-Complutense. Ciencias de la Tierra, 2000).

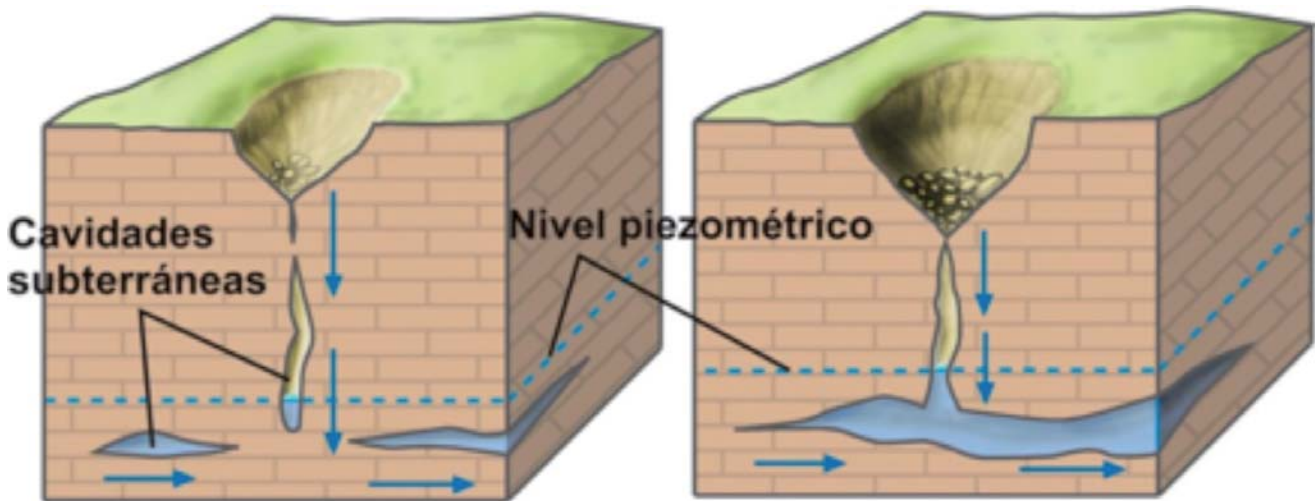


Figura 9. Formación de una dolina de disolución

La Dolina de la Llacuna de Castell de Castells, descrita en la ruta 3 de la guía, se ubica en las cercanías de esta población, al sureste del alto del Clotet. Se trata de una dolina de disolución (figura 9) de gran tamaño, 2,6 ha de extensión, con forma elíptica (180 x 105 m) y fondo plano recubierto por *terra rosa*. Es producto de la disolución del macizo cretácico en el que se encuentra. Las aguas meteóricas cargadas en CO<sub>2</sub>, en ácidos generados por la descomposición de la materia orgánica y en bacterias, son muy agresivas con la roca carbonatada. La densa red de fracturas y los planos de estratificación favorecen el proceso en el que el ácido carbónico disuelto en el agua reacciona con el carbonato cálcico, diluye el calcio y genera arcillas de descalcificación insolubles (IGME-DPA, 2015).

### **Polje de La Llacuna de Villalonga**

Se ha definido en la guía un polje como una morfología kárstica consistente en una depresión cerrada de gran tamaño (kilométrico), fondo plano, paredes escarpadas y drenaje subterráneo. Su génesis suele ser el resultado de la combinación de actividad tectónica y procesos de disolución. Temporalmente pueden encontrarse inundados (Johannes, 1985).

En la provincia de Alicante el caso más conocido es el Polje de La Llacuna, situado en el Tossal del Llamp, en el extremo nororiental de la sierra de Almirante. A partir de una pequeña cuenca receptora, los procesos erosivos y la acción disolvente del agua van generando sumideros, dolinas, úvalas y, con el tiempo, el hundimiento de cavidades, la unión de elementos exokársticos y el desarrollo final del polje (figura 10).



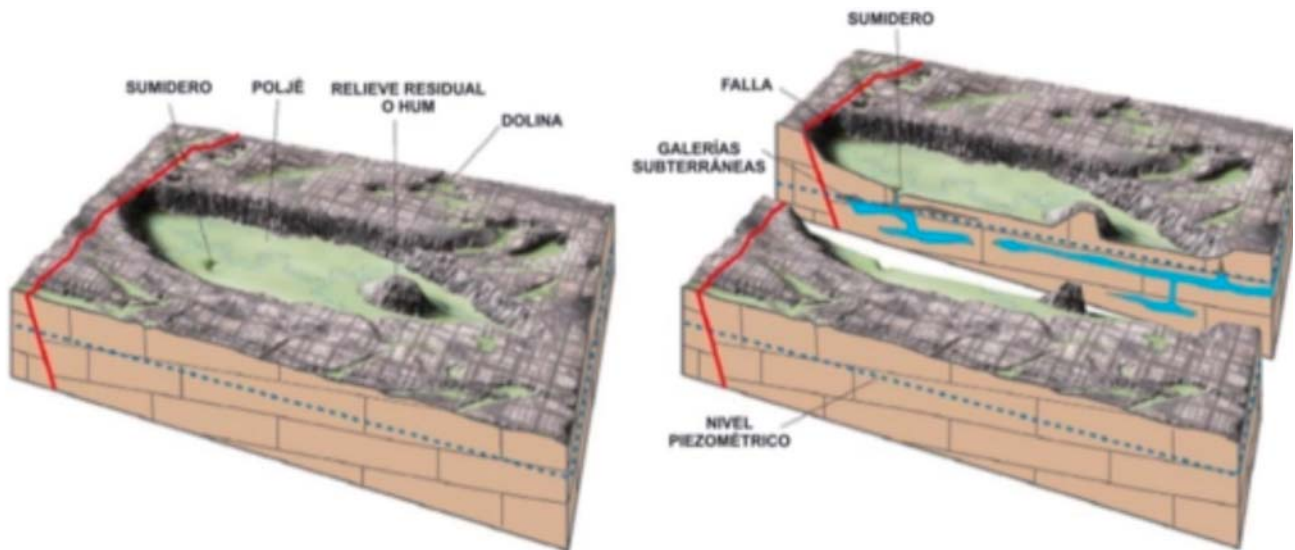


Figura 10. Generación del polje de La Llacuna

### Cueva de Canelobre

El Diccionario de la Lengua Española (RAE, 2014) define cueva a la cavidad subterránea natural lo bastante grande como para permitir el acceso del hombre. Una de las cuevas más espectaculares y turísticas de la provincia de Alicante es la de Canelobre (candelabro), situada en la falda sur-occidental de la elevación del Cabezón de Oro (Cabeçó d’Oro), en el término municipal de Busot. Los estratos que configuran la vertiente occidental de la sierra están muy verticalizados. La cavidad se desarrolla en materiales jurásicos en una zona próxima a un contacto, mineralizado en hierro, con calcarenitas cretácicas.

La cueva destaca por la abundancia y variedad de espeleotemas. Su nombre se debe a una estalagmita de gran tamaño que emerge, vertical y esbelta, desde el suelo a modo de gran candelabro. La génesis de la cavidad es singular. Aguas profundas y calientes, ascendieron a través de conductos verticales e interactuaron con ciertos minerales presentes en la roca encajante generando aguas ácidas. Estas provocaron la hiperdisolución de un volumen importante de material carbonatado del macizo rocoso y, a su vez, la formación de espeleotemas de mineralogía diversa (yeso, celestina). El resultado es una gran sala (50.000 m<sup>3</sup>) de cúpula hemisférica, y dos conductos estrechos y verticales, uno inferior por el que ascenderían las aguas termales y corrosivas y otro en la parte superior de la gran sala que alcanza la superficie del terreno (figura 11).

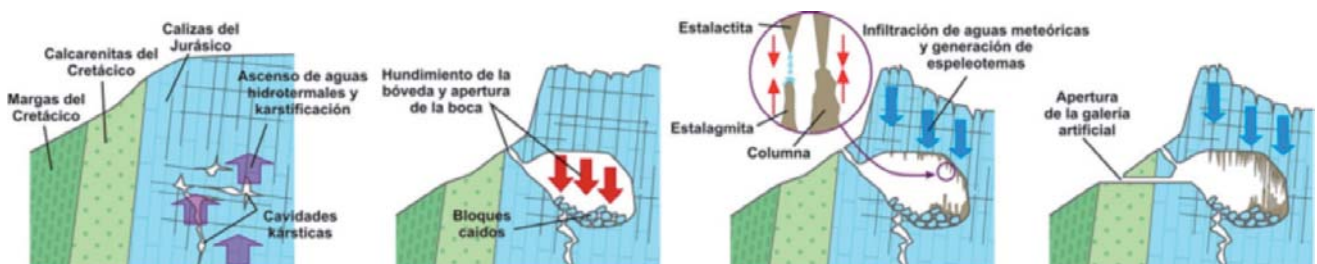


Figura 11. Estadios de evolución de la cueva del Canelobre

### Los abrigos del Pla de Petracos

Un abrigo es una cueva natural poco profunda (RAE, 2014). Muchos de estos lugares fueron utilizados por el hombre prehistórico como refugio. Los abrigos del Pla de Petracos albergan importantísimas pinturas rupestres de arte Macroesquemático y Levantino que atestiguan estos asentamientos humanos. Su génesis se describe, mediante un esquema 3D, en la ruta 1 de la guía. Esta morfología kárstica es el resultado de la progresiva excavación de los márgenes rocosos del barranco por el río. Con el paso del tiempo y el progresivo encajamiento del lecho, la oquedad o abrigo queda por encima del actual cauce (figura 12).

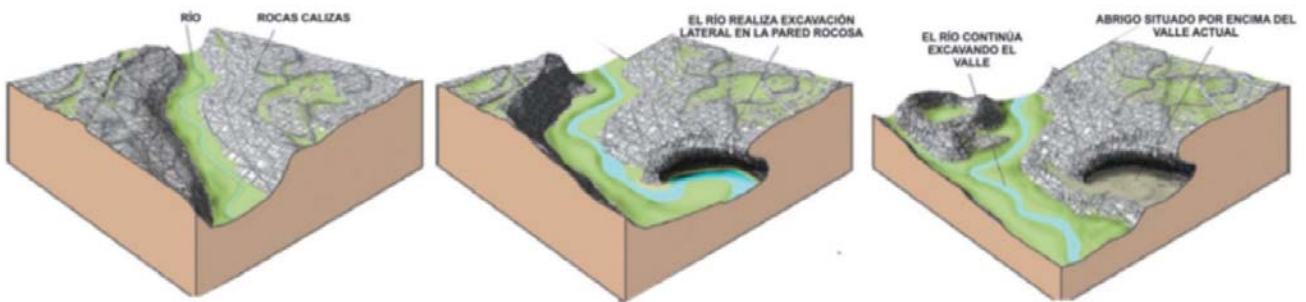


Figura 12. Génesis de los abrigos del Pla de Petracos

### Las Simas de Partagat

Una sima es una cavidad kárstica que se desarrolla básicamente en la vertical (Diccionarios Oxford-Complutense. Ciencias de la Tierra, 2000). Por la espectacularidad del entorno y sus características, las simas o *avencs* (en valenciano) de Partagat son un ejemplo ampliamente tratado en la ruta 5 de la guía. Se localizan en la vertiente norte de la Sierra de Aitana, muy cerca y al este de su cumbre, a una cota aproximada de 1.450 m s.n.m.

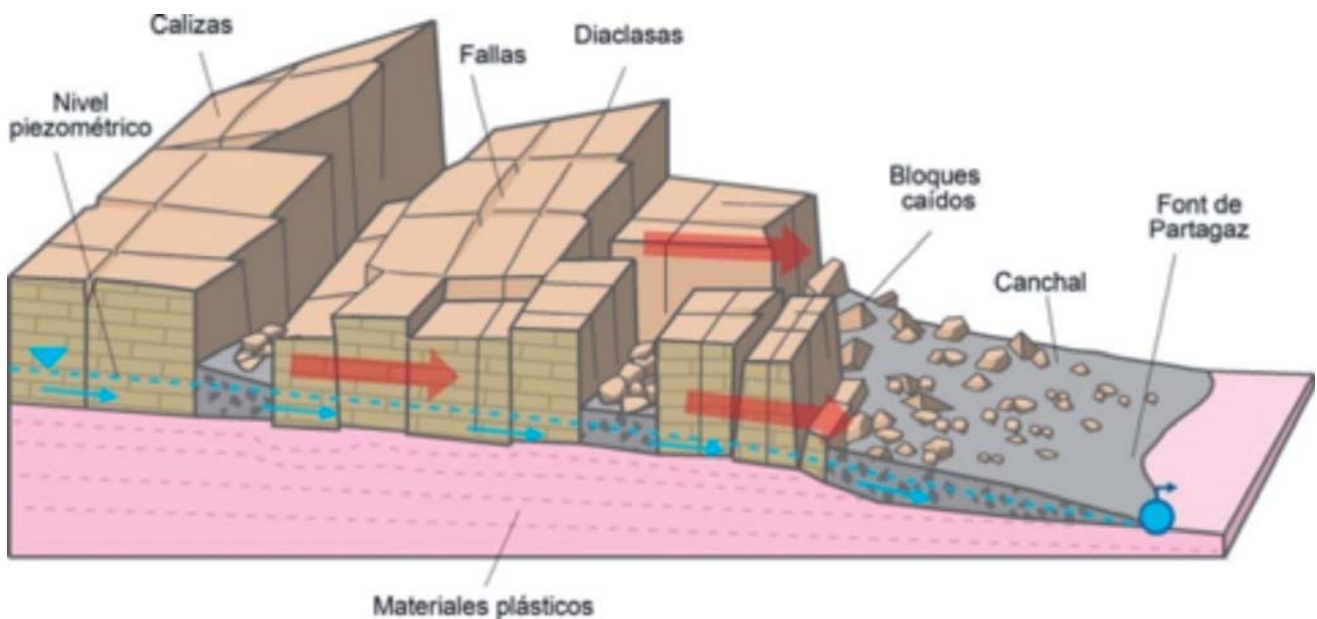


Figura 13. Génesis de las simas de Partagat

Son simas singulares ya que su formación se debe a aspectos geomecánicos más que geoquímicos. Los procesos de fracturación y deslizamiento de grandes bloques rocosos han sido la base de su desarrollo (figura 13).

El proceso formativo está estrechamente relacionado con la evolución geológica reciente del relieve de Sierra Aitana. Este macizo, perteneciente al dominio del Prebético Interno de la cordillera Bética, presenta una serie sedimentaria constituida básicamente por cuatro tramos litológicos: unas margas y calizas del Cretácico superior, unas margas verdes del Eoceno, unas calizas del Eoceno y unas calizas y margocalizas del Oligoceno.

Las calizas del Eoceno constituyen los relieves más elevados de la sierra, se encuentran muy fracturadas y karstificadas, originando extensos lenares. Infrayacentes, las margas, calcarenitas y arcillas paleocenas actúan de sustrato semiplástico sobre el que se deslizan los grandes bloques a favor de la pendiente. Estos se desgajan del frente septentrional del macizo dejando un relieve escalonado. Los bloques separados del macizo llegan a superar los 100 m de lado con volúmenes de más de un millón de metros cúbicos y aberturas entre ellos de decenas de metros. Estas fracturas, muy verticales, son las simas propiamente dichas y su profundidad ronda los 20 metros.

### ***El Forat de Pedreguer***

Se entiende por colapso kárstico la destrucción o hundimiento del techo de una cavidad o cueva subterránea de origen kárstico (IGME-DPA, 2015). El Forat de Pedreguer (Agujero de Pedreguer), que se describe en la ruta 1 de la guía, es un ejemplo de esta forma kárstica.



Figura 14. Formación del Forat de Pedreguer

El Forat es el resultado de la acción disolvente del agua subterránea. Las grietas se fueron ampliando progresivamente por efecto de la circulación del agua, tanto por infiltración desde la superficie como a través del acuífero, y por las variaciones de estabilidad generadas con las oscilaciones del nivel freático, de más de 100 m en algunas ocasiones.

La sobreexplotación del acuífero y las recargas súbitas en los periodos de intensas precipitaciones alteraban las presiones y ayudaban al proceso disolutivo. Las grietas evolucionaron a galerías y cavidades subterráneas de grandes dimensiones cuyos techos cedieron finalmente por el peso del terreno suprayacente (figura 14).

### **La geoconservación y aprovechamiento del patrimonio kárstico**

Es evidente la importancia en muchos aspectos de las formaciones kársticas descritas en este artículo, desde su atractivo meramente paisajístico o turístico, pasando por su esencial papel hidrogeológico o su interés científico. Es la propia geodinámica natural de estos entornos la que marca su evolución morfológica y su perdurabilidad. No obstante, es sencillo comprender que la acción del hombre es un factor determinante que puede acelerar esta geodinámica o incluso alterar o provocar la total destrucción del elemento kárstico en poco tiempo.

De las morfologías analizadas, probablemente las cuevas y abrigos son los enclaves que mayor riesgo presentan ante a la actuación humana ya que el propio acondicionamiento de una cavidad para su visita es una acción altamente modificadora. Otros enclaves, por sus características, pueden ser disfrutados sufriendo un impacto mucho menor. En cualquier caso, la presencia del hombre en los mismos, sea cual sea el fin buscado, científico, turístico, recreativo, deportivo, u otros, ha de procurar infligir el menor deterioro posible. Establecer distintas figuras de protección, específicas sobre el elemento o asociadas a ellos, ahondar en estudios concretos para su conservación, limitar el número de visitas o el tipo de actividades son algunas de las fórmulas ya empeladas.

Aunque dar a conocer estos enclaves sin alterarlos lo más mínimo parece inviable, la aplicación de medidas de conservación ha de permitir preservarlos y que se disfrute de ellos al mismo tiempo. Un ejemplo ilustrativo de esta dualidad *conservación-uso* es la cueva del Canelobre que recibe más de 60.000 visitas al año y en donde se realizan estudios que relacionan la hidroquímica de las aguas de goteo con las variaciones de las condiciones microclimáticas de la atmósfera subterránea. Estos estudios permiten conocer mejor la dinámica de la cueva y conservar los espeleotemas, de manera que contribuyen a una mejor gestión de su uso turístico (Cuevas, 2013; Plá y Pavía, 2006).

### **Conclusiones**

En el artículo se definen los principales elementos de un paisaje kárstico y se analiza la génesis de varios ejemplos alicantinos incluidos en la guía "Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante". Con ello se pretende enfatizar el papel didáctico de esta guía, ya que permite al público en general un acercamiento sencillo y ameno a estos enclaves, aportando



unos conocimientos técnicos básicos sobre su formación. Dar a conocer estos espacios, su importancia y potenciales usos es el primer paso para fomentar su conservación.

## Referencias

- Cavanilles, A.J. 1795. *Observaciones sobre la Historia natural, geografía, agricultura, población y frutos del Reyno de Valencia*, Volumen 1. Imprenta Real (Madrid). 236 pp.
- Cuevas, J. 2013. *Caracterización microclimática e hidroquímica de la cueva del Canelobre (Bussot, Alicante)*. Tesis doctoral, Universidad de Alicante. 252 pp. Alicante
- Real Academia Española. 2014. *Diccionario de la Lengua Española (23ª ed.)*. Consultado en: <http://dle.rae.es/>
- Diccionario Oxford-Complutense. *Ciencias de la Tierra*. 2000.
- Escuder, R. et al. 2009. *Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea*.
- IGME-DPA. 2015. *Rutas Azules por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante*, 445 pp.
- Johannes, K. 1985. Diccionarios Rioduero. *Geología y Mineralogía*. BAC. 240 pp
- Ortega, J.A. 2007. El estudio de la morfología de los ríos en roca. Implicaciones hidrológicas y evolutivas. *Boletín Geológico y Minero*, 118 (4), pp. 803-812.
- Ortega, J.A. y Garzón, G. 2008. Cambios geomorfológicos en ríos en roca tras inundaciones de baja frecuencia (Río Girona, Alicante). *Geogaceta*, 44, pp. 171-174.
- Plá, R. y Pavía, F. 2006. Cova del Canelobre. *Catálogo de cavidades de la provincia de Alicante*, 15 pp. Consultado en: [www.cuevasalicante.com](http://www.cuevasalicante.com)

Garai Urteaga, L. *et al.* Geoazkorri: Iniciativa geoturística para la valorización del patrimonio geológico del Macizo de Aizkorri-Aratz (Guipúzcoa). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 451-460.

## **Geoazkorri: Iniciativa geoturística para la valorización del patrimonio geológico del Macizo de Aizkorri-Aratz (Guipúzcoa)**

L. Garai Urteaga<sup>(1)</sup>, B. Abarrategi Badiola<sup>(1)</sup>, M. Zumalde Kortabarria <sup>(1)</sup> e I. Altube Egaña<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Oinatur, Koop.Elk, C/ San Juan, 14, 20560 Oñati, (Gipuzkoa),  
oinatur.koop@gmail.com

<sup>(2)</sup> Ayuntamiento de Oñati, Plaza de los Fueros 1, 20560 Oñati (Gipuzkoa),  
ogta@onati.eus

---

### **RESUMEN**

Geoazkorri es la iniciativa geoturística, de reciente creación, que tiene por objetivo promocionar y valorizar el entorno del Karst de Aizkorri desde la perspectiva del geoturismo. Esta tendencia de turismo alternativo que cada vez adquiere más protagonismo en la gestión turística tiene su base en el valor significativo de los elementos que conforman el patrimonio geológico de una zona determinada y las cuevas habilitadas al turismo se presentan como elementos relevantes a la hora de emprender proyectos turísticos de esta índole. Las Cuevas Oñati-Arrikutz reconocidas como lugar de interés geológico (LIG) y ubicadas en el entorno del Macizo de Aizkorri-Aratz son de referencia obligada a la hora de contextualizar la historia geológica de la zona. Junto con el complejo minero de Zerain y las Salinas de Leniz, representan la riqueza del patrimonio geológico del entorno de Aizkorri-Aratz y se convierten en los ejes para la interpretación del paisaje natural y cultural del entorno donde se ubican. Tres recursos singulares de la provincia de Guipúzcoa unidos por la evolución geológica del macizo que los engloba. En este trabajo se resume la iniciativa intermunicipal impulsada desde las Cuevas Oñati-Arrikutz donde se han englobado tres recursos geoturísticos habilitados en la actualidad al público que crean sinergias para formar un corredor geoturístico atractivo que recorra el conjunto de la comarca bajo una única marca representativa: Geoazkorri.

**Palabras clave:** Cuevas de Oñati-Arrikutz, Geoazkorri, geoturismo, macizo de Aizkorri-Aratz, patrimonio geológico.

## ***Geoazkorri: geotourism initiative for the enhancement of the geological heritage of the Massif Aizkorri - Aratz (Guipúzcoa)***

### **ABSTRACT**

*Geoazkorri is a new geoturistic proyect that aims to promote the Karstic area of Aizkorri form a geoturistic perspective. This type of alternative tourism is based on the geological heritage of a concrete area and the show caves are very significant at the time to undertake this type of touristic proyects. Oñati-Arrikutz caves are geological site of interest (GSIs) and are located at Aizkorri-Aratz montain range. The initiative is based on three independent georesources, nowadays open to public: Oñati-Arrikutz Caves (Oñati), Salt Valley of Leintz-Gatzaga and Aizpea Mines (Zerain). Three singular georesources linked by the geological development of the mountain range that represents the diversity of the geological heritage. Here we present the initiative that starts at Oñati-Arrikutz Caves to assemble three geoturistic resources to create a geoturistical attractive corridor across the region with Geoazkorri as brand image.*

**Key words:** Oñati-Arrikutz Caves, Geoazkorri, geotourism, geological heritage, Aizkorri-Aratz mountain range.

## Introducción

Cada vez son más las iniciativas encaminadas a fomentar la utilización sostenible del patrimonio geológico. El patrimonio geológico representa hoy, además de un recurso científico o educativo, una indudable oportunidad para el desarrollo económico sostenible, fundamentalmente en el ámbito rural. Dicho patrimonio recibe su valor por medio del geoturismo, entendiéndolo como un segmento de la actividad turística que tiene al patrimonio geológico como principal atractivo y busca la protección por medio de la conservación de sus recursos y de la sensibilización del turista, a la vez que promueve la divulgación y desarrollo de las Ciencias de la Tierra. Así, el geoturismo se centra en mostrar el patrimonio geológico de un territorio y en proporcionar recursos para que el visitante lo entienda, garantizando la conservación del lugar (Carcavilla et al., 2011).

Bajo esta premisa y conscientes del potencial geoturístico de las cuevas turísticas, a finales de 2014, las cuevas de Oñati-Arrikruz promueven la creación de una nueva iniciativa geoturística de promoción y revalorización del Macizo de Aizkorri-Arartz, claro exponente de la montaña calcárea de la cornisa cantábrica. Así, junto con dos georrecursos representativos de la evolución geológica de dicho macizo y visitables en la actualidad (Salinas de Leniz y Minas de Aizpea) se crea Geoazkorri, un nuevo corredor geoturístico para el interior de la provincia de Gipuzkoa.

Se ha tenido muy presente a la hora de la elaboración de la marca-imagen lo que el macizo de Aizkorri-Arartz en su conjunto representa como elemento de unión de los tres georrecursos y la nota geológica singular que aporta cada georrecurso. Así, se ha elaborado una marca turística, que engloba el carácter geológico de cada recurso turístico (mediante el prefijo "Geo") y ubica geográficamente el proyecto ("Aizkorri") (Garai et al., 2014. Fig.1).



Figura 1: Imagen turística

## Geoazkorri: Localización

La iniciativa se ubica en el extremo sur de la provincia de Gipuzkoa (España), y más concretamente en las comarcas del Goierri y Alto Deba.

En la actualidad participan en el proyecto tres georrecursos independientes: Las cuevas de Oñati-Arrikruz, las Salinas de Leniz y el complejo minero de Aizpea, ubicados en los municipios de Oñati, Leintz.Gatzaga y Zerain, respectivamente.

Estas dos últimas poblaciones distan entre si 44km, quedando Oñati a mitad de camino entre ambas.



*Figura 2: Localización geográfica*

El nexo de unión entre los tres municipios lo conforma el Macizo de Aizkorri declarado Parque Natural Aizkorri-Aratz en 2006 (BOPV, 2006). Uno de los máximos exponentes de la montaña caliza de la CAPV, característica que le confiere un indudable valor turístico derivado de la espectacularidad de su relieve kárstico (Calaforra y Fernández-Cortes, 2006), donde el carácter esencial del área lo constituyen los frentes calizos de Aizkorri-Aratz, Orkatzategi junto con los cañones de Arantzazu y Jaturabe (Gobierno Vasco, 2004).

Geológicamente, la sierra de Aizkorri-Aratz se ubica en el extremo sureste del Anticlinal de Bilbao, formando una estructura paralela al Sinclinorio de Bizkaia. Una gran masa de materiales carbonatados urgonianos que crea una alineación montañosa de dirección Este-Oeste con importantes resaltes, donde se encuentran las cotas más altas de la zona y de la CAPV. Estos materiales derivan en una estructura anticlinal-falla y dan lugar a un cabalgamiento con desplazamiento hacia el Norte (Gobierno Vasco, 2004).

La representación estratigráfica de los materiales comprende desde el Barremiense (Cretácico Inferior) al Turoniense (Cretácico Superior) y el Cuaternario. En estos materiales se encuentran ambientes sedimentarios que van desde someros de transición (Weald), pasando por facies arrecifales urgonianas, hasta ambientes de plataforma carbonatada (Turoniense) (Gobierno Vasco, 2004).





*Figura 3: Gran resalte kárstico de calizas urgonianas arrecifales que conforman la sierra de Aizkorri. La orientación de la fotografía es de Sur (izquierda) a Norte (derecha). (Fotografía: Borja Abarrategi)*

### **Geoazkorri: un macizo, tres singularidades geológicas**

Geoazkorri pretende revalorizar y promocionar el patrimonio geológico del macizo de Aizkorri-Arartz agrupando para ello recursos geológicos de calidad y que muestren aspectos singulares en el contexto geológico en el que se ubican. Creando así un corredor geoturístico atractivo al visitante y que le permita entender el significado, origen e importancia del territorio visitado, favoreciendo a su vez el desarrollo socioeconómico de la región (Carcavilla et al., 2011).

Compartiendo una historia geológica común, Geoazkorri, nace de la existencia de tres singularidades geológicas previamente revalorizadas y acondicionadas al público en los municipios antes citados: Cuevas de Oñati-Arrikruz (Oñati), Salinas de Leniz (Leintz-Gatzaga), Minas de Aizpea (Zerain). Dichos georrecursos representan en sí mismos la geodiversidad del territorio, acercando de forma lúdica-didáctica al visitante el patrimonio geológico del entorno. Pero a su vez, estos emplazamientos juegan un papel fundamental en la puesta en valor de otros lugares de menor valor geológico ubicados en su entorno. Ejerciendo así una labor tractora de nuevas ofertas o productos turísticos que puedan crearse bajo su influencia y que no serían viables sin esta labor tractora.

A continuación se describen de forma resumida las características de los georrecursos singulares que junto con las cuevas de Oñati-Arrikruz (este georrecurso se describe más adelante) conforman dicho proyecto:

### **Minas de Aizpea (Zerain)**

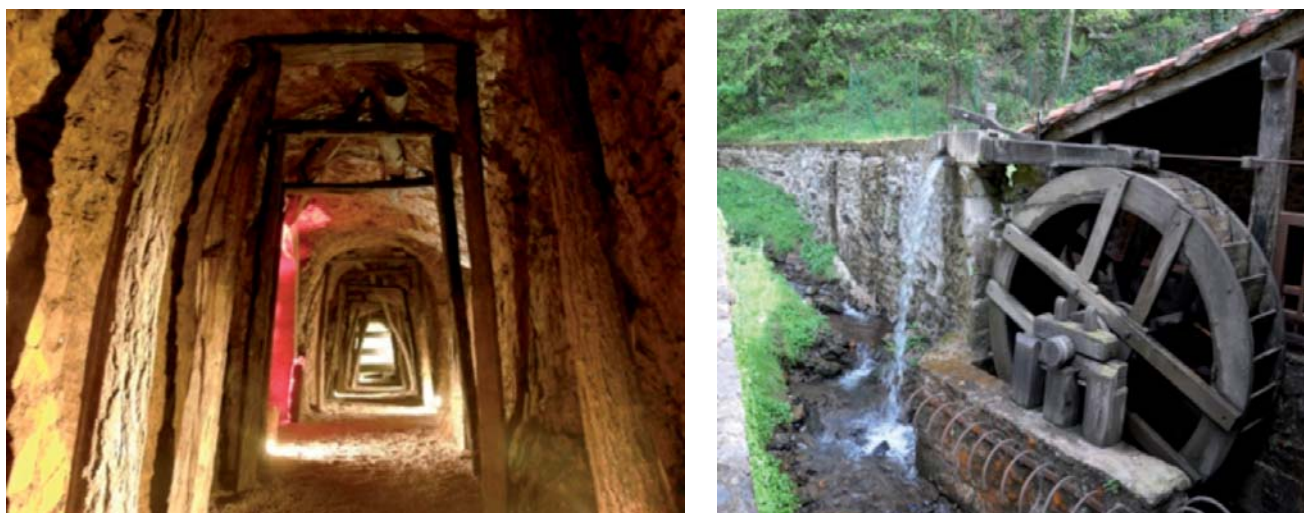
Las minas de Aizpea y su complejo minero (Fig. 4), representa la historia del aprovechamiento de los georrecursos mineralógicos de la zona. Dichos yacimientos se generaron en torno al Domo de Mutiloa, con una unidad carbonatada de plataforma de edad Aptiense como encajante, donde distintas fases de mineralizaciones y metasomatismo de extensas masas de caliza (Manera, 1987) han creado los yacimientos minerales explotados a lo largo de la historia tanto a cielo abierto como subterráneamente, así como el característico paisaje de la zona.

Explotados durante siglos y visitables desde 1995, recibe desde 2008 la catalogación de Bien Cultural, con la categoría de Conjunto Monumental (BOG, 2008).

### **Salinas de Leniz**

La historia y desarrollo del municipio de Leintz-Gatzaga ha estado ligada a la presencia de su manantial salino, producto de su singular localización geológica: próximo a un cabalgamiento con inyecciones de materiales del Triásico en facies Keuper y cercano al Domo de Aramaiona (Martinez-Torres y Morales, 1989), característica que influye en la salinidad de sus manantiales y que desde la antigüedad han sido explotadas con fines económicos. Siendo además, dicha explotación, la única visitable a nivel provincial, y donde destaca la evaporación del agua mediante fuego de leña obtenida de los bosques municipales.

Visitable desde 2001, el Eco-Museo de la sal (Fig. 4) es un recurso turístico de interés, y se están llevando a cabo los primeros pasos para la comercialización de su sal.



*Figura 4. Minas Aizpea (izquierda) y Ecomuseo de la Sal (derecha). Fuente: A. Makatzaga y A. Larrañaga*

### **Cuevas de Oñati-Arrikruz: Exponente del modelado kárstico**

Como se ha comentado anteriormente, Geoazkorri proporciona al visitante la información necesaria para interpretar el origen y evolución geológica del patrimonio geológico del macizo



de Aizkorri-Arartz. Además de singulares yacimientos minerales y su manantial salino, cabe destacar el relieve calizo característico de la sierra de Aizkorri-Arartz. Donde las cuevas de Oñati-Arrikruz representan el máximo exponente del endokarst de la zona.

Las Cuevas de Oñati-Arrikruz se localizan en el término municipal de Oñati, comarca de Alto Deba. Ubicado en el karst de Aranzazu forma parte del mayor sistema subterráneo conocido actualmente en Guipúzcoa, con un desarrollo aproximado de 15km (AMET, 1996). Además de su valor geológico cabe destacar los hallazgos paleontológicos realizados en su interior, en especial, el esqueleto completo de *Panthera leo spelaea* (Altuna, 1967. Fig. 5) y un impresionante yacimiento de *Ursus spelaeus* (Torres, 1984).

En este sentido, supone un emplazamiento de especial atracción turística, en especial por la espectacularidad de su modelado kárstico (Fig. 6) y la importancia de sus restos paleontológicos. Este último apartado, y en particular el mundo del cuaternario, es una temática habitualmente olvidada en la divulgación del patrimonio geológico siendo uno de las principales puntas de lanza de las Cuevas de Oñati-Arrikruz.



Figura 5. Réplica de Panthera leo spelaea. (Fotografía: Borja Abarrategi)

En 1997, el ayuntamiento de Oñati, a través de la Agencia de Desarrollo y Turismo de Oñati (OGTA, S.A), pone en marcha el proyecto de valorización turística del karst de Gesaltza-Arrikruz (Altube, 2010). Dicha iniciativa culmina con la apertura al público en 2007 de la Galería 53 en las Cuevas de Oñati-Arrikruz (AMET, 2004). Desde entonces se han llevado a cabo diversos trabajos complementarios de acondicionamiento, destacando la habilitación de la entrada original de la galería 53, los recorridos de espeleoturismo fuera de pasarela, y un recorrido geológico con rocas representativas del País Vasco. Sirviendo desde entonces de emplazamiento de ocio y divulgación.



*Figura 6. Detalle de la sala de las estalagmitas en la Cueva de Oñati-Arrikruz. Sistema kárstico más extenso de Gipuzkoa desarrollado en calizas de edad Aptiense-Albiense*

Hoy en día, las Cuevas de Oñati-Arrikruz están catalogadas como Lugar de interés geológico (LIG 65) y consideradas como uno de los 5 georrecursos con mayor valor didáctico-divulgativo dentro de La Estrategia de Geodiversidad de la C.A.P.V. 2020 (Gobierno Vasco, 2014).

### **Cuevas de Oñati-Arrikruz: puesta en valor del patrimonio geológico que nos rodea**

La relevancia y sobre todo el valor estético de determinados elementos del patrimonio geológico los convierten en ocasiones en recursos lo suficientemente importantes como para transformarlos en uno de los principales atractivos de un determinado entorno. Así, las Cuevas de Oñati-Arrikruz, y las cuevas turísticas en general, son un ejemplo de cómo un elemento



geológico puede llegar a ser un reclamo turístico de primer orden (Rivas *et al.*, 2004). Y a su vez, dicho potencial turístico puede ser utilizado para concienciar al público y para potenciar la visita a otros lugares de interés geológico menos espectaculares (Carcavilla *et al.*, 2011) o que por diferentes motivos no resulten accesibles al público. Estos motivos pueden ser: señalización o paneles interpretativos inexistentes, la falta de personal cualificado que guie las visitas, la inviabilidad económica para sustentar dicho servicio,... Es en este ámbito donde las cuevas turísticas pueden jugar un papel fundamental en la revalorización del patrimonio geológico del entorno en el que se encuentran, incorporando en su quehacer diario iniciativas geoturísticas de puesta en valor del patrimonio geológico circundante.

En este sentido, las cuevas de Oñati-Arrikruz pretenden impulsar el conocimiento y la puesta en valor del patrimonio geológico que le rodea. Impulsando el estudio científico y realizando, además de las vistas guiadas en la propia cueva, visitas guiadas con personal cualificado a diversos lugares de interés geológico de la zona (Fig. 7).



Figura 7. A, B-Geovisitas 2015. C- paleocueva Aitzulo desarrollada en las calizas micríticas del litosomo de Orkatzategui. D- vista de la entrada de la cueva de Gesaltza, 40 metros de alto y 18 metros de ancho es el sumidero del río Arantzazu. (Fotografías: Borja Abarrategi)

En los últimos años se han impulsado proyectos de colaboración con la UPV-EHU y se han realizado salidas guiadas a enclaves de alto valor geológico y/o estético. Destacando las llevadas a cabo a la espectacular paleocueva de "Aitzulo", el cañón y las surgencias del río Arantzazu (LIG 82) o el sumidero de Gesaltza (LIG 81).

## **Conclusiones**

Las cuevas turísticas ofrecen una gran oportunidad para fomentar el turismo geológico, en auge en los últimos años, en especial con la creación de la figura de los geoparques. Máximos representantes de las características geológicas de las regiones donde se enclavan, las cuevas habilitadas al público pueden jugar un papel importante en la divulgación del patrimonio geológico y la geodiversidad de su entorno, dinamizando proyectos geoturísticos gracias a su influencia tractora.

Así, en este artículo se presenta una nueva manera de entender la relación de las cuevas turísticas con su entorno geológico. Habitados a la confluencia entre iguales, valga como ejemplo las asociaciones entre cuevas turísticas como ACTE o LURPEA, se abre una nueva forma de colaboración entre diferentes. La Cueva de Oñati-Arrikruz como representante del carácter endokárstico del macizo junto con las mineralizaciones de las Minas de Aizpea y las Salinas de Leniz, que habiendo sido históricamente explotadas se ubican en torno al macizo de Aizkorri.

Geoizkorri representa tres relatos diferentes para entender un patrimonio geológico común: El macizo de Aizkorri-Aratz.

## **Referencias**

- AMET, 1996. Gesaltza- Arrikruz multzo karstikoa. *Karaitza*, 5,19-33.
- AMET, 2004. *Descripción de los elementos kársticos de la Galería 53 de las Cuevas de Oñati-Arrikruz*. Informe inédito de Aloñamendi Espeleologi Taldea. 19pags. Centro de documentación Cuevas de Oñati-Arrikruz.
- Altube, I. 2010. Las Cuevas de Oñati-Arrikruz como impulsoras de un turismo sostenible. En: J.J. Durán, y F. Carrasco (Eds.), *Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 63-70.
- Altuna, J. 1967. Hallazgo de un esqueleto de león de las cavernas en la cueva de Arrikruz (Oñate-Guipúzcoa). *Crónica de Historia Natural*:71,19(4),331-332.
- Calaforra, J.M. y Fernández-Cortés, Á. 2006. Geotourism in Spain: Resources and Environmental Management. *Geotourism*, 199-220. Elsevier y Butterworth Heinemann. Oxford, Reino Unido.
- Carcavilla, L., Belmonte, A., Durán, J.J. e Hilario, A. 2011. Geoturismo: Concepto y perspectivas en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (19.1), pp. 81-94.
- Boletín Oficial de Gipuzkoa. DECRETO 126/2008, de 1 de julio, *por el que se califica como Bien Cultural, con la categoría de Conjunto Monumental, el Coto Minero de Aizpea, sito en Zerain (Gipuzkoa)*.

- Boletín Oficial del País Vasco. DECRETO 76/2006, de 4 de abril, *por el que se declara el Parque Natural de Aizkorri-Arartz*
- Gobierno Vasco, Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial, 2014. *Estrategia de Geodiversidad de la Comunidad Autónoma del País Vasco 2020*, 14/04/2015, [http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/contenidos/plan\\_programa\\_proyecto/geodibertsitatearen\\_estrategia/es\\_def/adjuntos/geodivers\\_2020.pdf](http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/contenidos/plan_programa_proyecto/geodibertsitatearen_estrategia/es_def/adjuntos/geodivers_2020.pdf)
- Gobierno Vasco, Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, 2004. *Plan de Ordenación de los recursos naturales del área de Aizkorri-Arartz*, 14/04/2015, [http://www.gmf-fgm.org/fitxategiak/Aizkorri\\_PORN.pdf](http://www.gmf-fgm.org/fitxategiak/Aizkorri_PORN.pdf)
- Manera, A. 1987. El yacimiento piritico-polimetálico, Mina Troya. *Boletín Geológico y Minero*, 98 (2), 177-189.
- Martínez, L.M y Morales, T. 1989. Contribución del inventario de puntos de agua termales, sulfurosos y de contenido salino elevado al conocimiento de la tectónica de la Comunidad Autónoma Vasca. *Cuadernos de sección. Ciencias Naturales*, 5. 21-30.
- Rivas, A., Cabezas, J., Carrasco, F., Durán, J.J. y González-Ríos, M., (2004). Las cuevas turísticas españolas: un recurso natural de un gran interés ecológico, económico y social. En: Andreo, B. y Durán, J.J. (Eds.). *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*, 367-384. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Torres, T. 1984. *Úrsidos del Pleistoceno- Holoceno de la Península Ibérica*. Tesis Doctoral Inédita. Escuela Técnica Superior de Minas, Madrid.

## Las Minas de Burguillos del Cerro: turismo subterráneo y patrimonio geominero

F.J. Fernández Amo <sup>(1)</sup> y R. Pagés Rodríguez <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> TECMINSA, S.L. francis@tecmineras.com

<sup>(2)</sup> Dirección General de Turismo, Junta de Extremadura,  
rafaelpagesr@gmail.com

---

### RESUMEN

Las Minas de Burguillos del Cerro son dos minas de hierro abandonadas, situadas a dos kilómetros de Burguillos del Cerro (Badajoz). La mina Monchi junto con la mina Aurora, constituyen el recorrido de galerías de interior más extenso y espectacular de Extremadura. La Mina Monchi dispone de una galería principal con otras dos perpendiculares, que se abren a través de una bocamina. El proyecto contempla habilitar 500 metros de galerías, a lo largo de las cuales se podrán observar numerosas singularidades como un castillete minero de interior, filones mineralizados, espeleotemas asociados a procesos kársticos de la caliza de la Sierra del Cordel, centenares de metros de vías, vagonetas mineras, etc. La Mina Aurora también se distribuye a través de una galería principal con otras dos perpendiculares, a las que se accede a través de una bocamina. Se trata de una mina en la que se puede observar de una manera nítida y didáctica un yacimiento de tipo skarn. En sus más de 400 metros de galerías acondicionables para visitas destaca el manantial de aguas ferruginosas que origina un lago en la entrada, filones mineralizados, espeleotemas, geodas de sideritas, planos de fallas, etc. Las minas Monchi y Aurora disponen de accesos fácilmente habilitables ya que se trata galerías horizontales y sin desniveles, a lo que hay que unir que las condiciones geotécnicas de las galerías: techos y muros son en su mayoría estables. Por todo ello el acondicionamiento es además de sencillo muy económico, lo que convierte a las Minas de Burguillos del Cerro en uno de los proyectos más interesantes y fácilmente asumibles para su valorización y puesta en marcha de Extremadura. Además, se contempla la posibilidad de su adaptación para las visitas de personas con movilidad reducida, que podrían realizar el recorrido utilizando sillas de ruedas.

**Palabras clave:** acondicionamiento, Burguillos del Cerro, Extremadura, minas, turismo subterráneo.

### ***Mine Burguillos : underground tourism and geo-mining heritage***

#### **ABSTRACT**

*The Burguillos del Cerro's Mines are two abandoned iron mines, which are two kilometres away from Burguillos del Cerro (Badajoz). Monchi's mine together with Aurora's mine represent the longest and most spectacular route of inner mine in Extremadura. Monchi's mine has a main gallery and other two perpendicular galleries, to which one can enter through a mine entrance. The project aims to fit out five hundred meters of galleries, along which we can observe a lot of singularities, like a mining head frame, mineralized veins, karstic processes from Sierra del Cordel, hundred meters of rails, and some mine cart besides other patrimonial elements. Aurora's mine has a main gallery and other two perpendicular galleries, to which one can enter through the mine entrance. It is a mine where skarn ore mineralization can be easily observed. All through its four hundred galleries the ferruginous water spring stands out together with, mineralization veins, speleothems, siderite geodes and faults surfaces. Monchi and Aurora's mines access can be easily refurbished for visits, because they mainly consist of horizontal galleries without steps or pits. The geotechnical studies of the galleries regarding the ceiling and walls have shown them to be stable. Having all that into consideration we can say that the fitting-out is not only simple but also cheap. This turns Burguillos del Cerro's mines into an interesting and affordable project to increase their value and implementation in Extremadura.*

**Key words:** conditioning, Burguillos del Cerro, Extremadura, mines, underground tourism.



### Localización geográfica

Las Minas de Burguillos del Cerro se ubican en el Término Municipal de Burguillos del Cerro. Esta localidad se localiza al Sur de la provincia de Badajoz, más en concreto se sitúa a unos 76 kilómetros al sudeste de Badajoz capital. Localidades cercanas son: Fregenal de la Sierra, Jerez de los Caballeros o Zafra. Dentro del Término Municipal las Minas de Burguillos del Cerro se localizan en los parajes de "Sierra del Cordel", "Las Cañaveras" y "Cortijo del Chaparral", dichos parajes se encuentran al oeste y sudoeste de la localidad, a unos dos kilómetros del casco urbano de Burguillos del Cerro.

El conjunto de minas y registros ocupan un área de unos 2,5 a 3,5 kilómetros cuadrados y se encuentran situadas más concretamente en la Sierra del Cordel (Ver figura 1). Para acceder al yacimiento minero hay que tomar la carretera EX-112. a la salida de Burguillos del Cerro en dirección Brovales, a la altura del pk. 10,800 parte un camino a la derecha de la carretera, a unos 400 metros se localiza la Mina Monchi, la Mina Aurora se encuentra a unos 700 metros al nordeste.

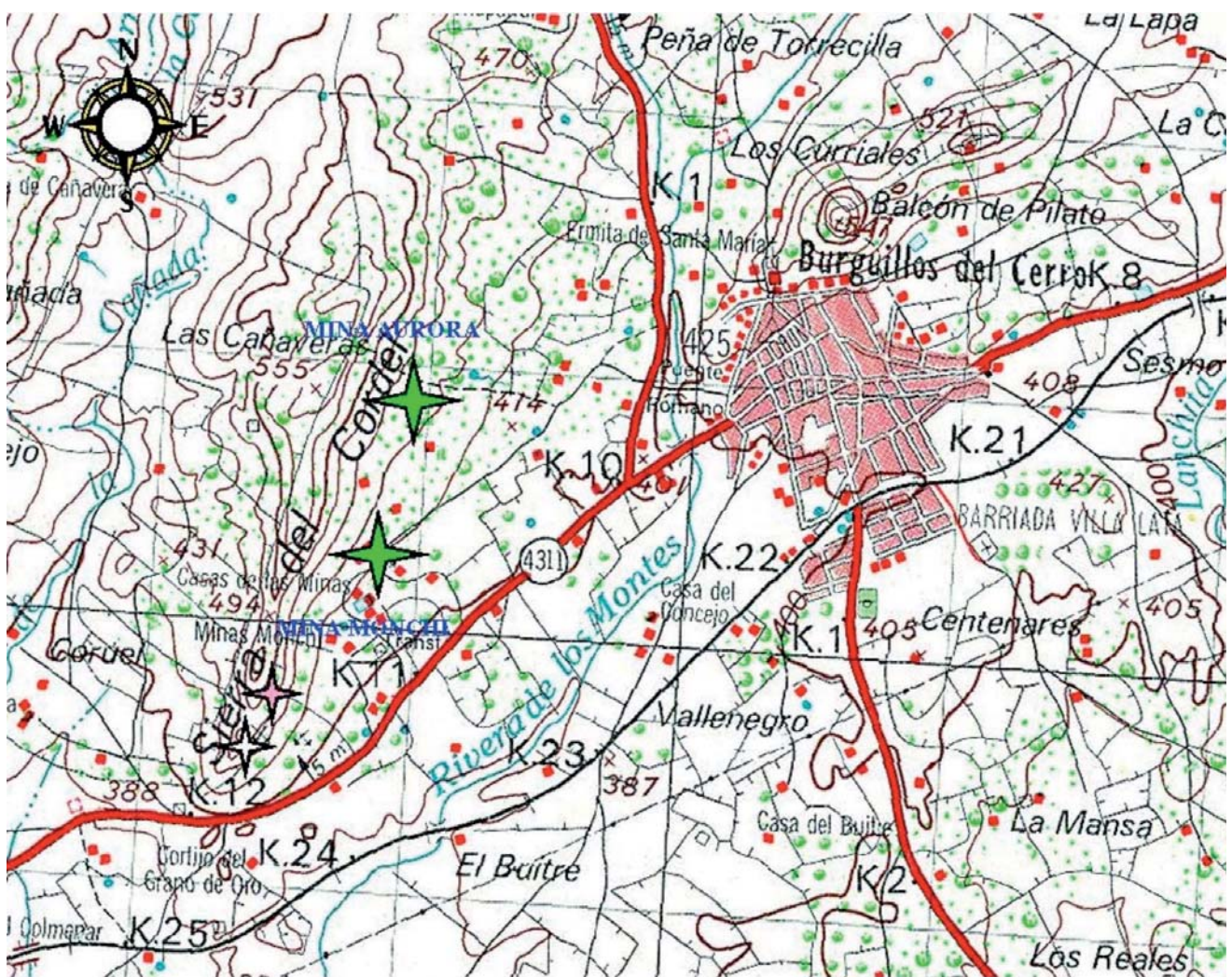


Figura 1. Localización geográfica



## Geología

Geológicamente la Mina Monchi se ubica en la Zona de Ossa-Morena, más en concreto se localiza dentro del Dominio Norte de la Antiforma Olivenza – Monesterio.

Dentro de este dominio aparecen materiales de origen Precámbrico, Cámbrico, Devónico, Carbonífero, Terciario y Cuaternario. La Formación diferenciada que dentro del dominio aparece en la zona de estudio es la: Formación Carbonatada Cámbrica de la Sierra del Cordel, que está afectada por la intrusión ígnea del batolito de Burguillos del Cerro. (Fernández Amo y Rebollada Casado, 2005)



*Figura 2. Filón de magnetita en el skarn de la Mina Aurora*

El yacimiento minero es de tipo *Skarn*. El *skarn* de la Mina Monchi y Aurora está localizado en las proximidades del contacto entre las rocas ígneas ácidas del batolito granítico zonado de Burguillos del Cerro y los mármoles cámbricos de la Sierra del Cordel.

El yacimiento se origina por el ascenso de la masa granítica y su emplazamiento en zonas superficiales, en contacto con las rocas carbonatadas anteriormente mencionadas. Como resultado de esta interacción, aparecen paragénesis minerales, entre las que se incluyen una gran diversidad de silicatos, sulfuros, óxidos, carbonatos y otros, cuya composición varía en función de los diversos factores que ocurren en su génesis.

Este yacimiento manifiesta unas peculiaridades que lo hace diferente y más atractivo desde el punto de vista científico que el resto de yacimientos afines en España. La principal peculiaridad del *skarn* que se observa en Monchi es el alto contenido en boro y tierras raras de los fluidos mineralizadores.

Como consecuencia del metasomatismo de fluidos ricos en boro y tierras raras aparece una paragénesis única en toda Europa, la cual pasamos a relacionar:

clinopiroxeno (diópsido-hedembergita), granate (melanito-andradita), anfíbol (actinolita-hornblenda), turmalina, axinita, allanita, epidota (pistachita-zoisita), crocidolita, riebeckita, magnetita, pirrotina, uraninita, lollingita, vonsenita, ilvaita, cobaltina, pirita, calcopirita, bismutina, molibdenita, bismuto nativo, esfena, calcita, yeso, eritrina, malaquita, uranotilo y otros menos comunes. (Fernández Amo, F.J. et al, 2006)

Esta paragénesis corresponde a la de un yacimiento formado durante el periodo pegmatítico-neumatolítico y su continuación en el catatermal. Se trata, pues, de un tipo de mineralización intermedia que caracteriza a los yacimientos de contacto con allanita y magnetita.

## **Patrimonio geominero de las Minas de Burguillos del Cerro**

En las minas de hierro de Burguillos del Cerro se empezó a explotar hierro a principios del siglo XIX y tuvieron varias épocas de explotación y parada, hasta que el 17 de mayo de 1.978 se cierra la Mina Monchi, en ese periodo también fue cerrada la estación del ferrocarril, al dejar de extraerse minerales. (Fernández Amo et al., 2006).

Tras casi cuarenta años de abandono de las minas de hierro de la Sierra del Cordel, han quedado kilómetros de galerías, la mayoría de ellas anegadas, y un prolífico y diverso patrimonio minero y geológico que hoy en día se puede recuperar para su valorización y puesta en marcha de un proyecto de desarrollo turístico subterráneo y geominero, que suponga un motor de desarrollo para la localidad.

Llegados este punto se plantea una pregunta necesaria: ¿Realmente tiene interés este espacio para poner en marcha un proyecto de valorización del patrimonio geominero y de turismo subterráneo asociado?.

La Mina Monchi, junto con la Mina Aurora, y el entorno que las rodea alberga una serie de elementos y figuras de interés geológico, patrimonial minero y natural, por las que han merecido un capítulo especial en el Libro de Patrimonio Geológico de Extremadura, y que a continuación se relacionan.

### *Mina Monchi*

La Mina Monchi es la mina de hierro más grande de Extremadura, tiene hasta 10 plantas y se llegó a explotar hasta los 340 metros de profundidad. El proyecto de puesta en valor tiene previsto acondicionar cuatro galerías del Nivel 0 de la mina, en total unos 500 metros longitudinales.



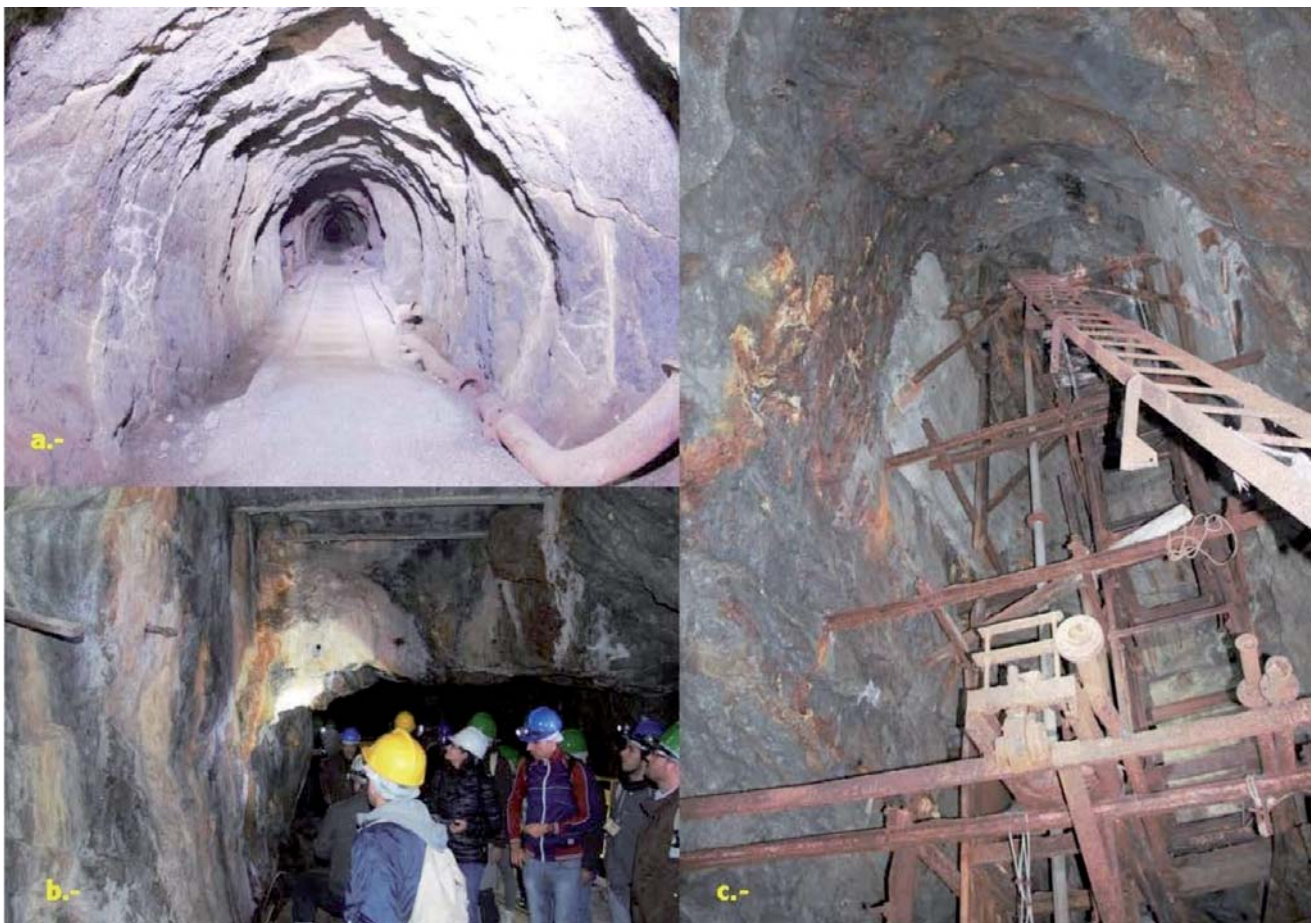
*Figura 3. Modelo 3-D de la Mina Monchi*

A lo largo de los 500 metros de recorrido de la Mina Monchi se pueden observar numerosos elementos de interés geológico como pueden ser: mineralizaciones de *skarn*, espejos de falla, espeleotemas (estalactitas, banderas y coladas), geodas, xenolitos, etc.

Todos estos elementos conforman una guía en la que los visitantes pueden observar, in situ, y de una manera sencilla y didáctica distintos procesos geológicos pasados y actuales como: el origen del yacimiento, procesos kársticos, geomorfología y petrología del granito, etc. Si bien la mina Monchi tiene un rico y variado patrimonio geológico, realmente por lo que destaca es por la singularidad del patrimonio minero que alberga. Lo primero que llama la atención



al visitante es el buen estado de conservación de la mina. Este buen estado de conservación se debe principalmente a dos motivos, el nivel 0 de mina está seco y el grado de humedad es muy bajo, y en segundo lugar se debe a que la entrada a la mina ha estado durante más de 30 años taponada, por el desprendimiento del murete de sujeción de la bocamina. La mala accesibilidad ha permitido que la mina Monchi permanezca prácticamente intacta, hecho que no ocurre con otras minas en Extremadura. Dentro de este rico patrimonio geológico destaca los más de 500 metros de galerías fácilmente acondicionables para visita, castillete de interior, conjunto de vías de las galerías en perfecto estado de conservación, cuadro de mandos de las jaulas mineras, tuberías de desagüe, vagonetas mineras, cámaras de explotación, coladeros, cueles mineros, e incluso utensilios manuales, cascos, vestimenta de mineros, etc.



*Figura 4. Mina Monchi. a.- Galería excavada sobre granito con vías y tuberías de desagüe. b.- Galería con mineralizaciones y neoformación de espeleotemas (coladas y estalactitas). c.- Castillete de interior de la Mina Monchi*

### **Mina Aurora**

Está situada a unos 700 metros al nordeste de la Mina Monchi, forma junto con esta el recorrido de galerías mineras visitables más extenso y espectacular de Extremadura.

La mina Aurora cuenta con unas 4 plantas que se han explotado hasta mediados de los años 70. Aunque tan sólo sería visitable la primera planta, se trata de una galería principal con otras

dos perpendiculares, que se abre a través de una bocamina, parcialmente inundada, por el desprendimiento de parte de la entrada de la bocamina y el acuífero del interior de la misma. La aparente mala accesibilidad, por un tramo de un lago interior de 100 metros, ha permitido una buena preservación de la mina Aurora.

Si la Mina Monchi destaca fundamentalmente por su rico patrimonio minero, la mina Aurora lo hace por su rico patrimonio geológico. El proyecto de puesta en valor tiene previsto acondicionar tres galerías del Nivel 0 de la mina, en total unos 400 metros longitudinales. En la visita se puede observar un corte tipo a un yacimiento minero de tipo *skarn*, ya que la galería principal atraviesa perpendicularmente los frentes del *skarn* objeto de explotación, y las perpendiculares discurren a través de los mismos.

A lo largo de los 400 metros de recorrido de la Mina Aurora se pueden observar numerosos elementos de interés geológico como pueden ser manantiales de aguas ferruginosas, filones de magnetita, geodas con cristales de siderita, cristales de calcita con hábito "diente de perro", superficies de falla, espeleotemas (estalactitas, velos y coladas), etc.

En lo que respecta al patrimonio minero destaca los más de 400 metros de galerías fácilmente acondicionables para visita, cámaras de explotación, coladeros, cueles mineros, utensilios manuales, vestimenta de mineros, etc.



*Figura 5. Mina Aurora. a.- Filón de magnetita. b.- Galería de la Mina Aurora. c.- Goteo de aguas ferruginosas en el interior de la Mina Aurora*



## Valorización de las Minas de Burguillos del Cerro

El ayuntamiento de Burguillos del Cerro a lo largo de los últimos años ha promovido la valorización de las Minas de Burguillos del Cerro con el objetivo del desarrollo de un proyecto de turismo subterráneo asociado, para ello se realizó un inventario de los recursos Geoturísticos existentes, y en este último año se ha realizado un proyecto de las obras de acondicionamiento de la Mina Monchi y su entorno. Así mismo se ha establecido una estrategia de actuación para que el proyecto se desarrolle en el menor tiempo posible.

En base a ello se establece que la valorización de la Minas de Burguillos del Cerro para el desarrollo de un proyecto turístico tiene cuatro fases, que se pueden solapar en proyecto tipo *Top down*, o bien se pueden encarar fase a fase en un proyecto tipo *Bottom up*, todo depende del grado de capitalización con el que se financie el proyecto.

Las actuaciones que se proponen en un proyecto *Bottom up* son las siguientes:

\* Creación de demanda turística inicial que vaya generando beneficios sobre los que apoyar siguientes fases: Creación de un museo geominero (GEOMINBU) y la Ruta Natural de las Minas de Burguillos del Cerro. En vistas de la situación económica de los últimos años, es complicado acceder fácilmente a fuentes de financiación que apoyen el proyecto, es por ello que se hace necesario obtener capitalización para las fases de actuación, con este objetivo y con un fin de la conservación del patrimonio geominero de Burguillos del Cerro, se ha creado GEOMIMBU.



Figura 6. Museo Geominero de Burguillos del Cerro (GEOMINBU)

Se trata de una colección de unas 1.000 piezas de minerales, rocas y fósiles, a la que hay que unir la colección de los restos del laboratorio minero, planos, documentos, carbureros, utensilios mineros de las Minas de Burguillos del Cerro. Este museo que se inauguró en enero de 2016, ha recibido en poco más de tres meses más de 3.000 visitas.

De reciente creación es la Ruta Natural de las Minas de Burguillos del Cerro por la Sierra del Cordel, en ella los visitantes pueden ver el rico patrimonio natural, geológico y minero que rodea a las minas.

\* Obras de cerramiento de las minas por motivos de seguridad y de protección, conservación y recuperación del patrimonio geominero de las minas Monchi y Aurora. En el presente año, y con financiación municipal, se está procediendo a la recuperación y cerramiento de la Mina Monchi.

La Mina Monchi es uno de los yacimientos mineros más visitados de Extremadura, por la singular mineralogía que alberga, ello ha motivado que a pesar de las dificultades de acceso que tenía, sea una mina muy frecuentada, con el consiguiente peligro que ello ocasionaba para los visitantes y con el deterioro del patrimonio que estaba sufriendo, sustracción de patrimonio minero, expolio de las geodas con cristales de calcita y siderita, etc. Para impedir que se siga produciendo este daño y sobre todo por motivos de seguridad, se ha acometido la rehabilitación de la antigua bocamina y se ha habilitado un cerramiento adecuado para este tipo de instalaciones.

\* Rehabilitación y acondicionamiento para visita pública de la Mina Monchi y de la Mina Aurora. Se han seleccionado estas dos minas para efectuar las obras de acondicionamiento para su puesta en valor para uso turístico. En el entorno existen numerosos registros mineros, se han seleccionado estos dos entornos, que contabilizan un total de unos 0,900 kilómetros de galerías visitables subterráneas, en base a:

- Ambas disponen de accesos fácilmente habilitables, son galerías horizontales y sin desniveles, fácilmente acondicionables.
- Los techos y las bóvedas de las galerías son en su mayoría estables, necesitando muy pocas estructuras de sostenimiento de la obra de acondicionamiento, exceptuando zonas de falla.
- Los costes de las obras de acondicionamiento son muy bajos y fácilmente asumibles.

En el caso de la Mina Monchi debido a su fácil accesibilidad, se contempla la posibilidad de su adaptación para las visitas de personas con movilidad reducida, que podrían realizar el recorrido utilizando sillas de ruedas

\* Centro de interpretación del Parque Geominero de Burguillos del Cerro. En los exteriores de la Mina Monchi existen numerosos edificios e infraestructuras mineras de interés patrimonial, los molinos, castillete minero de exterior, edificios mineros, etc, uno de estos edificios es la antigua capilla de Santa Bárbara que será rehabilitada para albergar un centro de interpretación y de recepción de visitantes.



## Proyecto turístico integral de Burguillos del Cerro

Burguillos del Cerro, situada a mitad de camino de dos importantes destinos turísticos de Extremadura, Zafra y Jerez de los Caballeros, cuenta con la calificación de Bien de Interés Cultural gracias a su conjunto histórico, que incluye restos de asentamientos celtas, romanos y visigodos. Es destacable el castillo templario construido en el siglo XIII, probablemente sobre los restos de un castillo musulmán.

También es reseñable la antigua iglesia de San Juan Bautista, recientemente restaurada y convertida en un interesante Centro de Interpretación de la Orden del Temple.

Desde el punto de vista gastronómico, Burguillos del Cerro es muy conocido por la calidad de los productos del cerdo ibérico que allí se pueden adquirir, sin embargo su producto estrella podría decirse que es el espárrago silvestre, del que se encuentran numerosos ejemplares en toda la zona.

Sin embargo y a pesar de sus múltiples atractivos, hasta el momento Burguillos no cuenta con un desarrollo turístico adecuado. En la localidad solamente podemos encontrar un hotel rural, un hostel y dos apartamentos rurales. Tampoco la oferta de restaurantes es muy elevada.

Su economía, tras el cierre de sus minas y canteras de granito, se centra en la agricultura y la ganadería básicamente. Es por ello que el proyecto de la habilitación para la visita turística de las Minas de Burguillos del Cerro, debe ser el impulso alrededor del que se produzca el despeque turístico de una localidad que cuenta con atractivos más que suficientes para convertirse en un punto de referencia en Extremadura.

Ejemplos de ello ya hemos podido observar a lo largo de toda la geografía española y concretamente en Extremadura son destacables los ejemplos de las minas de La Jayona y Logrosán, o las Cuevas de Fuentes de León. Todos estos recursos de turismo subterráneos se han convertido en los principales dinamizadores del turismo en todas las localidades, que, además, han experimentado un notable incremento en el número de empresas turísticas, alojamientos rurales, restaurantes, empresas de actividades, etc.

## Referencias

Fernández Amo, F.J. y Rebollada Casado, E. 2005. Mina "Monchi". En: *Patrimonio Geológico de Extremadura*. Junta de Extremadura, Mérida, pp. 245-255.

Fernández Amo, F.J., Carvajal Gómez D.J., Rebollada Casado E. y Merino Márquez, R 2006. Aprovechamiento social del grupo minero Monchi (Burguillos del Cerro, Badajoz). *IV Seminario recursos geológicos, ambiente e ordenamento do territorio*, Vila Real (Portugal).

Ruiz Márquez, R. M. *et al.* La Cueva de El Morrón (Torres, Jaén): Medidas para su conservación, protección y puesta en valor. En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 471-482.

## **La Cueva de El Morrón (Torres, Jaén): Medidas para su conservación, protección y puesta en valor**

R.M. Ruiz-Márquez <sup>(1)</sup>, R. Moreno-Jimenez <sup>(2)</sup>, J.L. Sanchidrián-Torti <sup>(1)</sup>, M.A. Medina-Alcaide <sup>(3)</sup>, Y. del Rosal-Padial <sup>(4)</sup>, C. Liñán-Baena <sup>(4)</sup>, J.M. Cobos-Pastor <sup>(1)</sup>, C. Molina-Crespo <sup>(1)</sup>, J.A. Peña-Villaverde <sup>(1)</sup> y A. Torres-Riesgo <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Córdoba, Plaza del Cardenal Salazar s/n, 14071-Córdoba, romrma@gmail.com, gt1satoj@uco.es, 122copaj@uco.es, clio\_cmc@hotmail.com, villaverdeja22@gmail.com, 122toria@uco.es.

<sup>(2)</sup> Ayuntamiento de Torres, Plaza de España 1, Torres (Jaén), romj85@gmail.com

<sup>(3)</sup> Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología de la Universidad del País Vasco UPV/EHU. Tomas y Valiente, s/n, 01008-Vitoria, m.medina.alcaide@gmail.com

<sup>(4)</sup> Instituto de Investigación Cueva de Nerja. Carretera de Maro s/n, 29787-Nerja, Málaga, yolanda@cuevadenerja.es, cbaena@cuevanerja.com

---

### **RESUMEN**

La finalidad de este artículo es la presentación de las medidas de conservación, protección y puesta en valor que estamos llevando a cabo en la cueva con arte paleolítico de El Morrón (Torres, Jaén). Los resultados de la Actividad Arqueológica Puntual "Diagnóstico destinado a la preservación y propuesta de medidas correctoras para la conservación de la Cueva de El Morrón (Torres, Jaén)", de carácter global e interdisciplinar, son la base para la determinación de las acciones de preservación a seguir. Las tareas de conservación y protección determinadas son el cerramiento urgente de la gruta, la delimitación del B.I.C, la medición de los parámetros medioambientales durante una anualidad para conocer el régimen natural de la cavidad y si existe la posibilidad de su apertura turística, junto con la limpieza superficial por un especialista de las pinturas rupestres.

Las indicaciones para su puesta en valor hacen referencia al tipo de iluminación a utilizar durante la visita, al acondicionamiento del sendero hacia la gruta, así como al modelo de gestión y a los trabajos de conservación a realizar para controlar cómo afectan estas estancias en el ciclo natural de la cueva.

**Palabras clave:** conservación, cueva decorada, interdisciplinariedad, Sur de la Península Ibérica, visita turística.

## ***Cave of El Morrón (Torres, Jaén): measures for conservation, protection and enhancement***

### **ABSTRACT**

*The purpose of this article is the presentation of conservation and protection measures that we are developing at the El Morrón's cave (Torres, Jaén) with Palaeolithic art. The results of the Archaeological Activity "Diagnostic for preservation and suggestion of correcting measures for the conservation of Morrón's cave (Torres, Jaén)", have a*

*global and multidisciplinary character, which provides a base for preservation actions to follow. The proposed work of conservation and protection are the urgent closure of the cave, delimitation of the B.I.C, measurement of environmental perimeters over the course of a year to know the natural activity of the cave as well as a superficial clean of the parietal art by a specialist.*

*Should it be possible to open for tourism, considerations for lighting on the artwork, remodelling of the pathway to the cave, management, and continued conservation should be carried out in order to control and monitor how these visits affect the natural cycle of the cave.*

**Key words:** *conservation, decorated cave, multidisciplinary, South of Iberian Peninsula, touristic visit.*

## Introducción

La Cueva de El Morrón se localiza en el término municipal de Torres (Jaén) en el Parque Natural de Sierra Mágina (figura 1) y en concreto al Oeste del Macizo de Aznaitín, en la vertiente norte del monte epónimo, y a 1000 metros de altura sobre el nivel del mar. A día de hoy es la única cavidad con arte rupestre paleolítico de la provincia de Jaén. Estas pinturas fueron descubiertas el 19 de abril de 1981 por los grupos espeleológicos Amaya y Equus. Posteriormente varios especialistas en Arte Rupestre Prehistórico visitaron la cavidad para verificar el hallazgo, realizando el estudio de las grafías rupestres para su presentación a la comunidad científica (López *et al.*, 1982 y Sanchidrián, 1982).

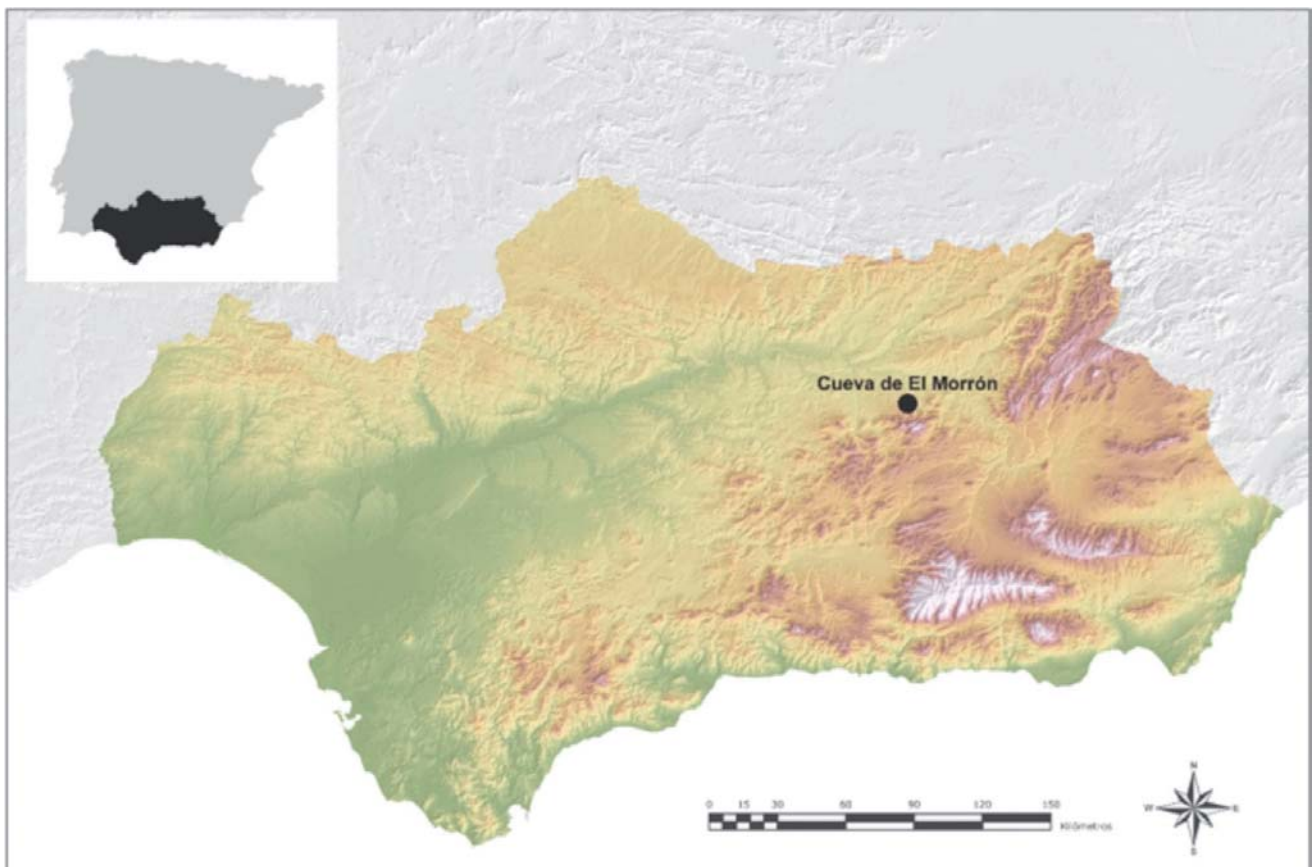


Figura 1. Mapa de situación de la Cueva de El Morrón en el marco geográfico de la Península Ibérica y la Comunidad Autónoma de Andalucía

En 2014 varios investigadores del área de Prehistoria de la Universidad de Córdoba, Universidad del País Vasco y del Instituto de Investigación de la Cueva de Nerja, dentro del proyecto Actividad Arqueológica Puntual "*Diagnóstico destinado a la preservación y propuesta de medidas correctoras para la conservación de la Cueva de El Morrón (Torres, Jaén)*", llevan a cabo una intervención en la cavidad para analizar el estado de preservación en el que se encontraba la Cueva de El Morrón tras treinta y tres años de su descubrimiento (Medina-Alcaide *et al.*, 2015). Los resultados de este análisis son la base científica para la determinación de las medidas de conservación y puesta en valor, las cuales desarrollaremos en este trabajo.

### **Actividad arqueológica puntual en la Cueva de El Morrón: metodología y principales resultados**

Partimos de un enfoque teórico por el que entendemos que una cavidad con arte prehistórico comprende una unidad de análisis arqueológico. Así, cualquier resto de origen antrópico nos aporta información concerniente a las actividades desarrolladas en la gruta a lo largo de la historia. Del mismo modo resulta de similar importancia el examen de los factores ambientales, geológicos y biológicos imbricados en esa unidad de análisis (Medina-Alcaide *et al.*, 2015).

Siguiendo este hecho nuestra metodología tiene un fuerte componente interdisciplinar que comprende las tres grandes áreas de estudios presentes en los medios kársticos antropizados: Biología, Geología y Arqueología (Sanchidrián *et al.*, 2015).

Como primer paso, y medida de conservación urgente, se procedió a la detección de los detritos modernos (restos orgánicos en descomposición y otras basuras) y posterior retirada al punto limpio correspondiente de los mismos, para evitar que siguieran degradando el medio físico y ambiental del cavernamiento así como el patrimonio arqueológico que alberga (Gillieson, 1996).

Después desarrollamos la prospección superficial del suelo de la cueva, con el objeto de documentar todos los vestigios de naturaleza arqueológica, junto con su posicionamiento en la planimetría, más una valoración sobre el estado de conservación de los restos registrados. En ningún caso se procedió al levantamiento del piso de los elementos arqueológicos.

Seguidamente se procedió a la prospección parietal del cavernamiento, para inventariar los vestigios antrópicos de las paredes y techos de la cueva, con independencia de su cronología.

En cuanto a la rama de la Biología, se desarrolló el análisis de la microbiota superficial y aérea del endokarst, así como la determinación y caracterización de la fauna presente en la misma.

Finalmente, desde el ámbito geológico, se procedió al análisis geomorfológico de la cueva y de sus alteraciones, además del examen de las aguas de goteo y condensación. Todo ello se complementó con el chequeo de los parámetros medioambientales de la gruta (temperatura, humedad, CO<sup>2</sup> y Radón).



Además, recopilamos toda la bibliografía científica y documentación administrativa y periódica para conocer las labores de investigación llevadas a cabo en la cueva, así como entrevistamos a algunos de los descubridores y primeros investigadores, quienes nos aportaron documentación oral, escrita y fotográfica de sus trabajos en la cavidad.

A continuación, exponemos los principales resultados de las tres áreas de estudio.

### **Arqueología**

Durante la prospección sistemática superficial del suelo se detectaron un total de 49 vestigios o conjunto de restos arqueológicos que se registraron en una base de datos *ex profeso* según la naturaleza de los restos: hueso (44) (diferenciando, cuando fue posible, entre fauna y restos antropológicos), cerámica (4) y lítica (1) (Medina-Alcaide *et al.*, 2015).



*Figura 2: Fotografía de los dos cápridos*

Del elevado porcentaje de elementos óseos – un 90 % sobre el total- debemos aclarar que la mayoría son restos faunísticos contemporáneos, llevados al interior de la cueva por diferentes factores como escorrentías o inserciones por parte de fauna troglófila y troglóxena. La única pieza lítica (sílex) detectada en la prospección no podemos relacionarla a ningún periodo histórico con total seguridad, puesto que se trata de una pequeña porción de un producto de talla. En el caso de los restos cerámicos, realizados a mano y a torno, tampoco podemos llevar a cabo un diagnóstico preciso en cuanto a su cronología, puesto que se tratan de piezas que por su técnica podrían adscribirse tanto a periodos de la Prehistoria Reciente como relacionarse con ciertas producciones groseras altomedievales (Solaun, 2005; Gutiérrez, 1986). De especial interés resulta la utilización de la cueva de El Morrón como depósito funerario, hecho documentado durante la prospección por la existencia de dos pequeños túmulos artificiales contruidos mediante bloques y sedimentos en los cuales se han hallado restos antropológicos.

En la prospección parietal se documentaron un total de 67 ítems, 54 son catalogados como grafitis contemporáneos y 13 elementos –organizados en cinco grupos- como manifestaciones rupestres de cronología paleolítica (Medina-Alcaide *et al.*, 2015). Durante la prospección parietal también se examinó el estado actual de las pinturas rupestres prehistóricas, observando que se ha producido un deterioro de las mismas, sobre todo por causas antrópicas.

De los vestigios paleolíticos sobresalen, en un diedro rocoso, la representación de dos cabras una en color negro y otra en rojo (Sanchidrián, 1982) (figura 2). El resto de las manifestaciones gráficas son de carácter no figurativo salvo, algunos trazos del grupo V, los cuales podrían tratarse de un posible motivo figurativo de técnica, estilo y coloración similar al cáprido rojo, parcialmente conservado.

## **Biología**

Los parámetros biológicos se evaluaron en base a su relación con procesos de biodeterioro, esto es, cambios indeseables en el sustrato como consecuencia de la actividad biológica (Hueck, 1965). En las cuevas, los procesos de biodeterioro pueden poner en riesgo la conservación de su patrimonio natural y/o cultural.

Para obtener información relacionada con la microbiota de la cueva se llevó a cabo un análisis microbiológico del aire exterior e interior de la cueva, basado en el estudio de unidades formadoras de colonias de mesófilos aerobios totales y de hongos, éstos últimos de especial interés para la conservación del patrimonio cultural en ambientes hipogeos (Bastian *et al.*, 2010). Los resultados indicaron una mayor concentración de ambos grupos de microorganismos en el interior de la cueva, respecto del exterior, así como una notable semejanza entre la microbiota del interior y del exterior. El incremento de la concentración de microorganismos en el interior de la cueva podría estar relacionado con una escasa ventilación natural o la presencia de fuentes de materia orgánica disponible en la cueva, que serían utilizadas como recurso nutricional por los grupos de microorganismos analizados (Medina-Alcaide *et al.*, 2015). En este sentido, en la cueva se observaron numerosos residuos antrópicos que podrían sustentar estas comunidades microbiológicas y, con ello, desplazar la microbiota autóctona de la cavidad.

Respecto a la fauna, los invertebrados representaron la población más numerosa de la cueva. Dentro de este grupo se observaron quilópodos, tricópteros, dípteros, ortópteros, estafilínidos, carábidos, formícidos, arácnidos y leiódidos (Medina-Alcaide *et al.*, 2015) y su presencia no se relacionó con alteraciones del sustrato. En relación con los vertebrados, durante las campañas de trabajo se observaron algunos quirópteros así como incisiones en las paredes que podrían haber sido realizadas por pequeños mamíferos, como garduñas, aunque no pudieron ser observados.

Finalmente, destacamos que los resultados obtenidos corresponden a una campaña de muestreo y como tal deben ser interpretados.

## **Geología**

El reconocimiento geológico de la cavidad ha aportado datos de interés sobre la geomorfología del endokarst, en el que se observa un bajo número de formas de precipitación química, pero muy variadas. Además, se reconocen numerosas formas de disolución, algunas similares a las descritas para cavidades de origen hipogénico, aunque este aspecto, de gran interés, debe ser estudiado en profundidad. Tanto los espeleotemas como la roca de caja muestran importantes alteraciones que son, mayoritariamente, de origen antrópico.

En cuanto a los aspectos hidrogeológicos, en Cueva de El Morrón no se han detectado aguas de condensación, pero sí aguas de goteo de carácter incrustante, aunque los puntos de goteo son escasos en la cavidad y de muy bajo caudal. La mayor parte de los goteros de la cueva se localizan en la galería distal y asociados a fracturas de la roca de caja (Medina-Alcaide *et al.*, 2015).

Los resultados preliminares del análisis medioambiental indican condiciones climáticas propias del endokarst, como son temperaturas estables y altos valores de humedad ambiental. El análisis de la concentración de CO<sub>2</sub> y Radón en el aire responde a su carácter potencialmente nocivo para la salud humana, por lo que su estudio pormenorizado supone una necesidad capital a la hora de su puesta en valor como recurso patrimonial. Las medidas preliminares de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la Cueva de El Morrón, muestran que se trata de un parámetro altamente sensible a la presencia humana (Medina-Alcaide *et al.*, 2015), si bien se requiere una monitorización ambiental a lo largo de, al menos, un ciclo anual, para analizar este aspecto con el suficiente rigor.

## **Medidas para la conservación y protección**

Los resultados obtenidos nos han permitido precisar una serie de propuestas para la conservación y protección de la gruta. La principal medida correctora es, evidentemente, el cerramiento urgente de la cavidad. Las características básicas del mismo debe ser un cierre basado en barras horizontales colocadas estratégicamente para evitar la entrada descontrolada de personas, así como que permita la entrada y salida de los murciélagos registrados en el interior





se produzca un descenso brusco de las temperaturas en el exterior o un aumento de la temperatura del interior (Medina-Alcaide *et al.*, 2015). Por ello, el cerramiento propuesto es muy importante que permita el paso de aire y no impida la ventilación natural de la gruta.

Para el anclaje del enrejado nos planteamos dos opciones: a) la instalación de dos muretes laterales realizados con materiales de la zona y adheridos con mortero de cemento, instalando los barrotes en los muretes; b) el anclaje de los barrotes a roca madre. La segunda opción es la elegida (aceptada por la Consejería de Cultura de Jaén) entre otras cuestiones por la menor probabilidad de destrucción por actos vandálicos.

Por tanto, el cierre que se instalará constará de una reja conformada por una serie de barras horizontales y paralelas colocadas para que impidan el paso de personas, pero que sí permitan la salida y entrada de murciélagos y la ventilación natural de la cavidad, la separación entre barrotes será de 15 cm. El material usado serán barrotes de acero templado macizo de 20 mm de espesor con tratamiento anticorrosión, además serán tratados con pintura anticorrosiva para la protección del acero.

Los orificios para anclar los barrotes serán adheridos con taco químico bicomponente anticorrosivo de alta resistencia a zonas húmedas (figura 3).

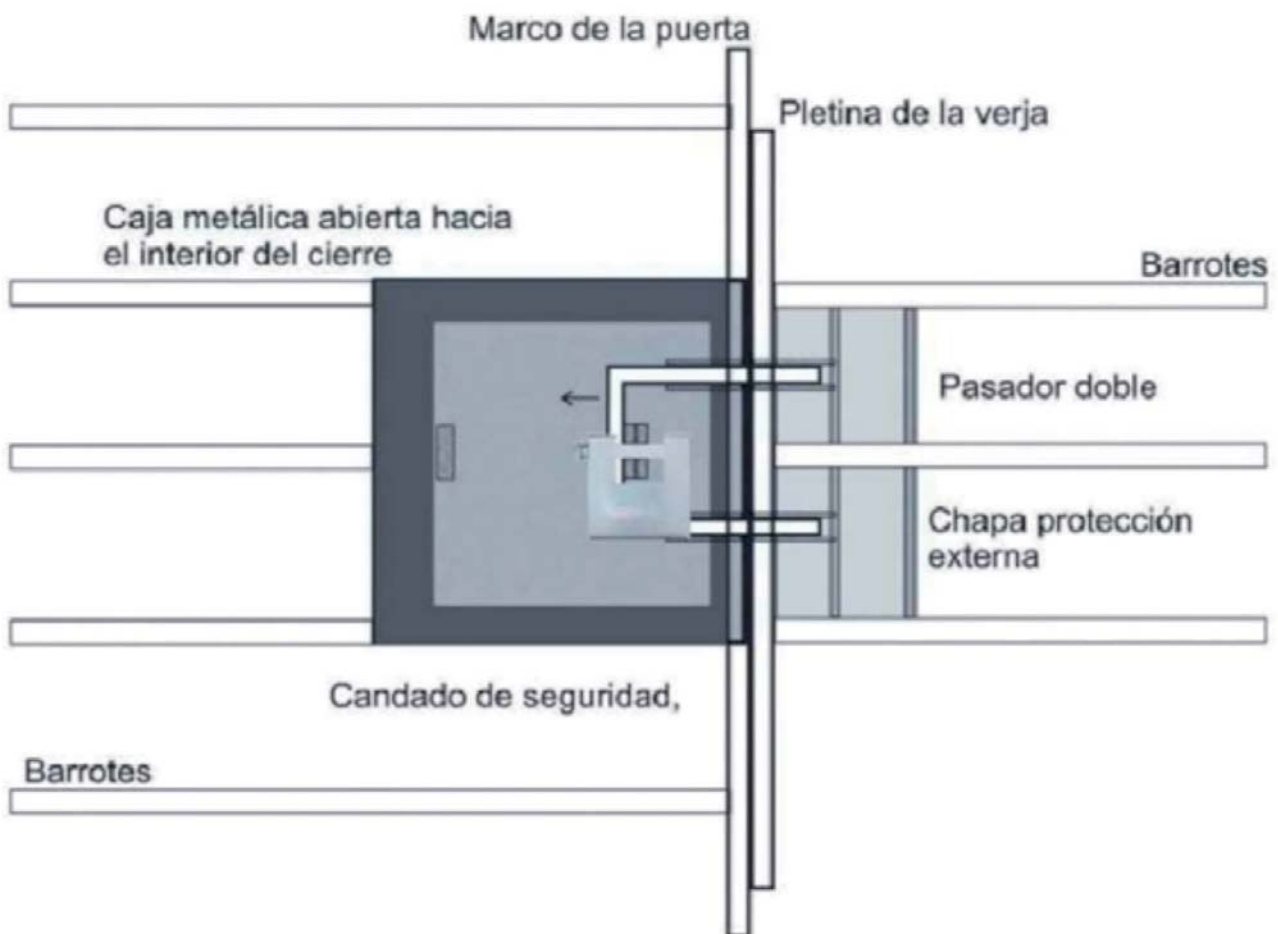


Figura 4: Vista desde el interior del sistema de instalación del candado (Montes, 2012)

El sistema de seguridad empleado será mediante la instalación de un candado incluido en una caja metálica abierta hacia el interior, así como pasadores y una chapa de protección exterior (figura 4). Este tipo de diseño evitará el acceder fácilmente al sistema de seguridad y lo protege del deterioro exterior.

Como ya hemos mencionado, todos los materiales serán tratados con anticorrosivos para impedir que el sistema de seguridad (candado y cierre) sufra alteraciones químicas. Además, se intentará minimizar el impacto visual todo lo posible, mimetizando el color de la puerta con el entorno.

Una vez realizada la medida correctora más importante, el cerramiento, los siguientes pasos para la protección de la cavidad serán:

- Delimitación del B.I.C. según los criterios geobioarqueológicos aplicados para otras cuevas de naturaleza similar (Carrasco *et al.*, 2006), y teniendo en cuenta criterios paisajísticos.
- Seguimiento de los parámetros medioambientales (temperatura, humedad, CO<sub>2</sub> y Radón) de la cavidad durante un periodo prolongado (una anualidad), con el objetivo de detectar el régimen natural de la cueva y así poder establecer un protocolo de visitas para la gestión sostenible de la cavidad.
- Limpieza superficial de las dos representaciones figurativas y de su soporte pétreo por un/a restaurador especializado, Eudald Guillaumet, en arte rupestre prehistórico, para devolver el aspecto original a las representaciones pictóricas, en la medida de lo posible ante su importante deterioro.

Para mayor información sobre las medidas de conservación de yacimientos con arte rupestre, tanto en cuevas como en abrigos, debemos mencionar el trabajo de Pérez (2012). Las actividades de preservación propuestas para El Morrón se encuentran entre las que determina este investigador.

## **Propuestas para su puesta en valor**

Una vez realizadas las medidas de conservación y protección, y en el caso que los resultados permitan la visita turística controlada, será necesario llevar a cabo el acondicionamiento de la cavidad y las zonas exteriores para este fin. Para ello proponemos las siguientes medidas básicas:

### ***Control lumínico de la cavidad***

En ningún caso se instalará luz fija en el interior de la cueva. Eso evitará someter a la gruta a condiciones perjudiciales como por ejemplo la radiación luminosa o el desarrollo de biofilms fotosintéticos (mal verde), los cuales son difíciles de eliminar (Del Rosal *et al.*, 2014). Por ellos, se proporcionará a los visitantes lámparas de LEDs (Olson, 2006) o cascos con iluminación integrada.

### ***Acondicionamiento del sendero que va hacia la cavidad***

Para el acondicionamiento del sendero se precisa la regularización del piso de algunas zonas del camino existente, para facilitar el tránsito, en la medida de lo posible, del visitante, junto con la instalación de una escalera que vaya desde la cima del cerro de El Morrón a la boca de la gruta (zona más difícil de franquear por su acusada inclinación). También, planteamos la instalación de balizas de madera con señalética adhesiva para indicar al visitante el camino a seguir.

Además, proponemos el establecimiento de una nueva cartelería para la indicación de la ubicación del sitio, que se distribuya desde el municipio de Torres hasta el principio del sendero. Si bien sería conveniente que no destacase demasiado en el entorno. En esta cuestión, debe tenerse en cuenta las diferentes indicaciones sobre la señalética de la Consejería de Medio Ambiente, donde se indica, entre otras cuestiones, que las señales se localizarán en las principales vías de acceso, en un lugar abierto y respetando los criterios de implantación recogidos en las ordenanzas de las administraciones públicas competentes.

### ***Modelo de gestión de las visitas***

Las visitas serán previamente concertadas bien a través de Internet o por teléfono. De este modo, podremos organizar un cronograma con los días de recepción de visitantes teniendo en cuenta la demanda de turistas en general, grupos escolares, universitarios y de investigación.

Cuando el visitante esté realizando la reserva para la visita, tendrá que aportar una serie de datos básicos para así, junto con el número de visitantes, poder volcar toda la información en una base de datos, mediante la cual, obtendremos una estadística de las características del turista interesado en nuestro producto y cuáles son los campos en los que tendremos que trabajar para ampliar el perfil de nuestro público. Además, en este momento, se informará al turista de la duración del recorrido, grado de dificultad de la actividad, tipo de indumentaria que ha de llevar, entre otras cuestiones que puedan ser de su interés sobre la logística de la visita.

### ***Conservación de la Cueva de El Morrón***

Se realizará un control constante de los parámetros medioambientales, el estado del arte rupestre y de los materiales arqueológicos que se encuentran en el interior de la gruta. Para la supervisión integral de la cueva en cuanto a su conservación.

### **Referencias**

- Bastian, F., Jurado, V., Novakova, A., Alabouvette, C. y Sáiz-Jiménez, C. 2010. The microbiology of Lascaux Cave. *Microbiology*, 156, 644-652.
- Carrasco, F., Corrales, M., Durán, J.J., Garrido, A. y Sanchidrián, J.L. 2006. Criterios de delimitación del patrimonio subterráneo: el ejemplo del B.I.C. Cueva de Nerja (Málaga). *Arte Rupestre Esquemático en la Península Ibérica*, 555-561.

- Del Rosal, Y., Roldán-Molina, M. y Hernández-Meriné, M. 2014. Biofilms fotosintéticos en la Cueva de Nerja: *Chroococcidiopsis* sp. En: Calaforra, J.M. y Durán, J.J. (Eds.), *Iberoamérica Subterránea. I Congreso Iberoamericano y V Congreso Español de Cuevas Turísticas*, 463-472.
- Gillieson, D. 1996. *Caves: Processes, Development and Management*. Wiley-Blackwell, Oxford, 340 pp.
- Gutiérrez, S. 1986. Cerámicas comunes altomedievales: contribución al estudio del tránsito de la antigüedad al mundo paleoislámico en las comarcas meridionales del País Valenciano. *Lucentum* V, 147-167.
- Hueck-van der Plas, E.H. 1965. The biodeterioration of materials as a part of hylobiology. *Material und Organismen*, 1, 5-34.
- López-Payer M.G., Soria-Lerma M., Alvarez J.A., Garcia F., Gila M. y Valverde F. 1982. *Las pinturas rupestres paleolíticas de la Cueva El Morrón, Jimena, Jaén*. La Carolina.
- Medina-Alcaide, M.A., Romero, A.J., Del Rosal, Y., Liñán, C., Sanchidrián, J.L., Ruiz-Márquez, R.M., Peña, J.A., Cobos, J., Molina, C., Torres, A., Valverde, R. y Jiménez-Mena, J. 2015. *Memoria Final: Actividad Arqueológica Puntual de Diagnóstico destinado a la preservación y propuesta de medidas correctoras para la Conservación de la Cueva de El Morrón (Torres, Jaén)* (REF.EXPTE.PU/022/14) (Inédito).
- Migens, E. *Protecciones para los murciélagos cavernícolas "bien diseñadas"*. Grupo de Murciélagos Estación Biológica de Doñana (CSIC). Informe inédito.
- Montes, R. 2012. Protecciones físicas para el arte rupestre: su filosofía, tipología, resultados y algunas propuestas novedosas. *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, patrimonio mundial, Alquézar (Huesca), 28-31 mayo de 2012*, 179-191.
- Pérez, A. 2012. La protección para la conservación del arte rupestre. Criterios de conservación preventiva complementarios a la conservación aplicada. *Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, patrimonio mundial, Alquézar (Huesca), 28-31 mayo de 2012*, 107-121.
- Sanchidrián, J. L. 1982. La Cueva del Morrón (Jimena, Jaén). *Zephyrus*, 34-35, 4-11.
- Sanchidrián, J.L., Medina-Alcaide, M. A., Romero, A. J., del Rosal, Y., Liñán, C., Cobos, J.M., Jiménez-Mena, J., Molina-Crespo, C., Peña, J.A, Ruiz-Márquez, R., Torres, A. y Valverde, R. 2015. Interdisciplinary review of current environmental conservation of Cueva de El Morrón (Torres, Jaén)/ Revisión interdisciplinar del estado actual de conservación de la Cueva de El Morrón. *IFRAO2015/ARKEOS*, 37, 483-488.
- Solaun, J.L. 2005. *La cerámica medieval en el País Vasco (siglos VIII-XIII)*. Vitoria, 422 pp.





## Para la pequeña historia

F. Pavón López <sup>(1)</sup>, E. González Caraballo <sup>(2)</sup> y M. Ruiz Ortega <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Consejo Asesor del Museo de Nerja. C/ Lucero, 26. 29740- Torre del Mar, Málaga, pacopavonl@gmail.com

<sup>(2)</sup> La Carpa SCA. C/ Dr. Laureano Casquero, 27. 29740, Torre del Mar, Málaga, piratesamariateresa@gmail.com, ruizortega90@gmail.com

---

### RESUMEN

La Cueva de Nerja y el Museo de Nerja disponen de un servicio especialmente creado para atender a grupos de estudiantes de todas las edades. Esta atención se realiza con un discurso adaptado desde los 3 años. Durante la temporada 2015 (excepto julio y agosto) fueron atendidos 20.582 usuarios.

Este servicio está pensado para informar y orientar a las personas que van a visitar la Cueva de Nerja o el Museo de Nerja, y también para ofrecer un conjunto de actividades y recursos didácticos que faciliten a los centros educativos y a los grupos de estudiantes un acercamiento y un mejor conocimiento de los contenidos que pueden encontrar en estos espacios de interés cultural. La actividad que desarrolla el "Grupo Didácticos Cueva de Nerja" queda reflejada en estas propuestas: a) Recepción y gestión de reservas, b) Atención de grupos a su llegada a la Cueva de Nerja o al Museo de Nerja, c) Guías adaptadas a las edades y particularidades del grupo de visitantes, d) *Viaje al Principio de los Tiempos*, actividad complementaria previa a la visita a la Cueva de Nerja, e) *Las Costumbres de los Cromañones*, actividad complementaria a la visita a la Cueva de Nerja y f) *La Cueva de la Música*, conciertos didácticos complementarios a la visita a la Cueva de Nerja.

**Palabras clave:** actividades, animación, recepción, recursos didácticos.

### *For the record*

#### ABSTRACT

*The Nerja Cave offer a service specially created for student groups of all ages. This attention makes a speech adapted from 3 years. During the 2015 season (except July and August) 20.582 users were attended.*

*This service is designed to inform and guide students that will visit the Cave or the Museum, and offer a range of activities and teaching resources to facilitate an approach and a better understanding of the content they can find in these places of cultural interest. Developed by the Educational Cave of Nerja Group reflects these proposals: a) Reception and management booking, b) Attention is giving to the groups on arrival to the Nerja Cave, c) Adapted Guides for the age and characteristics of the group, d) Trip to the beginning of time, complementary activity before the visit of the Nerja Cave, e) The Customs of the Cro-Magnon, complementary activity before the visit of the Nerja Cave and f) The Cave of Music, educational concerts complementary to the visit of the Nerja Cave.*

**Key words:** activities, animation, reception, teaching.

## Introducción

“Didácticos Cueva de Nerja” es el nombre de referencia de un grupo de personas pertenecientes a *La Carpa SCA*, que desarrolla en la Cueva de Nerja y en el Museo de Nerja la atención a los grupos de estudiantes que visitan estos espacios. Este grupo, así como la empresa que lo representa, desarrolla desde hace 27 años una continua actividad en torno a la infancia y la juventud, centrada en el teatro como centro de interés y, alrededor de éste, múltiples programas que inciden en el desarrollo integral de las personas que utilizan estos servicios.

Desde esta perspectiva iniciamos, en el año 2010, una serie de Conciertos Didácticos en la Sala de la Cascada de la Cueva de Nerja, con una orquesta de música clásica en directo y los actores y actrices de *La Carpa SCA*. A estos conciertos los denominamos *Mi Primer Concierto en la Cueva de Nerja*. La orquesta interpretaba un programa que contenía las piezas más populares de la historia de la música y la compañía *La Carpa* explicaba y dramatizaba las partes esenciales de las mismas. La aceptación fue espectacular ya que asistieron 6.360 personas en los tres días de concierto, con dos pases por día. En los años siguientes (2011 a 2015) continuó el programa de conciertos, con la incorporación de dos nuevos conciertos, denominados *Jóvenes y Clásicos en la Cueva de Nerja* y *Rock en la Cueva de Nerja* (desde 2015), destinados a grupos de personas más iniciadas en la música. En 2016, en función de la demanda existente y, sobre todo, por motivos relacionados con el impacto antrópico de los conciertos sobre el microclima de la cavidad, éstos se trasladaron al exterior de la cueva, concretamente al Área Recreativa, en la que se habilitó un pequeño espacio escénico. Hasta la fecha han asistido a los Conciertos más de 20.000 personas.

El éxito de esta experiencia y la comunicación con los grupos que asistieron a los Conciertos, a través de encuestas de valoración, nos hizo presentar a los órganos rectores de la Fundación Cueva de Nerja una propuesta de gestión de reservas y atención integral de los grupos, relacionados con el ámbito de la educación en todos sus niveles. Nuestra propuesta fue aceptada y dimos comienzo a nuestra actividad en septiembre de 2014.

Tras realizar los primeros estudios sobre el aprovechamiento didáctico de la Cueva de Nerja, por parte del equipo creativo y educativo de *La Carpa SCA* nos planteamos unos objetivos básicos a cubrir:

- Estudiar intervenciones para las distintas edades y características de los grupos que visitan la Cueva de Nerja, teniendo en cuenta la necesidad irrenunciable de establecer una comunicación con éstos.
- Utilizar elementos motivadores para el conocimiento del periodo histórico en el que la Cueva de Nerja tuvo su máxima actividad.
- Establecer estrategias de colaboración con los centros educativos, poniendo a su disposición una oferta de actividades orientadas al conocimiento del patrimonio cultural y del pasado de la Cueva de Nerja que sirviera a los alumnos para conocerla mejor y motivara la necesidad de la investigación y el estudio de la misma.

- Realizar una serie de acciones e iniciativas para concienciar sobre la necesidad de conservar y preservar el legado cultural que supone la Cueva de Nerja para transmitirlo en las mejores condiciones posibles a las generaciones futuras.

De esta forma preparamos al personal de *La Carpa SCA* para que, sin perder la imagen de seriedad y formalidad que exige el acercamiento a un monumento tan importante como la Cueva de Nerja, fuera capaz de transmitir un mensaje cercano, cordial y afectivo a los visitantes.

### **Actividad del “Grupo Didácticos Cueva de Nerja”**

El “Grupo Didácticos Cueva de Nerja” desarrolla las siguientes actividades:

- Recepción y gestión de reservas: se orienta a los grupos hacia el modelo de visita más apropiado, en función de sus características. La reserva se resuelve, normalmente, en un plazo máximo de 24 horas. Las demandas de reserva a través del correo electrónico han aumentado en la segunda temporada de funcionamiento de nuestro servicio, lo que nos da a entender que nuestras propuestas son claras y precisas. La valoración de los clientes indica que éstos están muy satisfechos con la rapidez y claridad de la gestión de sus peticiones. También debemos destacar el alto índice de satisfacción de las agencias de viajes y similares en la resolución de sus reservas y de los “incidentes” que van surgiendo hasta la concreción de las mismas.
- Atención de grupos a su llegada a la Cueva de Nerja. Una persona del “Grupo Didácticos Cueva de Nerja” espera la llegada de los participantes, les da la bienvenida y les acompaña hasta el Aula Didáctica (si van a realizar alguna actividad complementaria) o hasta la taquilla del recinto, para generar su entrada en caso de realizar solamente la visita a la cavidad. Las visitas guiadas que realizamos están adaptadas a las edades y particularidades del grupo. En el curso 2015/16, pusimos en marcha una guía especial para niños y niñas de Educación Infantil, para integrar el discurso de la misma en su proyecto curricular, en el que está incluida la Prehistoria. El resultado fue excelente, a la vista del número de reservas que se han realizado en el presente curso para este nivel educativo.
- Generación de recursos complementarios a la visita a la Cueva de Nerja. Con éstos aportamos información necesaria para el mejor aprovechamiento didáctico de la visita y buscamos eliminar el concepto del “ya hemos ido”, mediante el cual una visita justifica la no realización de otra al mismo lugar. Planteamos esta primera visita como el inicio de una gran aventura dirigida al conocimiento de los grandes contenidos que encierra esta gruta y su entorno. También provocamos la necesidad de visitar el Museo de Nerja, como lugar en el que se exponen restos encontrados en la Cueva de Nerja y que, indudablemente, nos dará una mejor idea de la importancia histórico-artística y patrimonial de la misma. Actualmente se está negociando con el Centro de Profesores de la Axarquía la inclusión de los programas didácticos que se desarrollan en la Cueva de Nerja en su oferta formativa. Desde esta perspectiva, el colectivo de profesoras y profesores podrán utilizar las instalaciones del Museo de Nerja para el estudio e investigación de los programas curriculares que se están desarrollando en los Centros.



Los dos programas que hemos desarrollado hasta ahora en la Cueva de Nerja con carácter divulgativo y didáctico están pensados para dos niveles diferentes de conocimiento. Los programas *Viaje al Principio de los tiempos* y *Las Costumbres de los Cromañones* se conciben como espectáculos didácticos, cuyo objetivo fundamental es preparar a los niños, niñas y jóvenes para su visita a la Cueva de Nerja. Queremos que esta experiencia sea muy importante para ellos y ellas. Somos pretenciosos, pero buscamos de alguna forma que lo aquí vivido pase a formar parte de sus recuerdos esenciales.

Es una evidencia que la Cueva de Nerja es una maravilla de la naturaleza, pero normalmente los niños y las niñas que vienen a visitarla, no lo saben. Muchas veces los niños y niñas visitan lugares preciosos e interesantísimos por su historia o por su importancia cultural, pero no saben verlos. Pasan por esos sitios sin pena ni gloria, haciendo preguntas o comentarios tales como ¿cuándo nos vamos?, ¿cuándo comemos?, ¡quiero hacer pipí!... Nosotros no queremos que esto suceda durante su visita a la Cueva de Nerja. Queremos preparar a nuestros jóvenes visitantes desde la motivación, para que aprendan a mirar con interés este espacio único, lleno de oscuridad y silencio, que nos sumerge en el pasado prehistórico.

En el espectáculo *Viaje al Principio de los Tiempos* participan dos personajes que, a través de un diálogo sencillo y muy ameno, les dan claves sobre:

- ¿Qué vamos a encontrar en la Cueva de Nerja?
- Preguntas esenciales que siempre se hacen: ¿hay murciélagos?...¿dónde?, ¿tenemos que escalar?, ¿en la cueva hay agua?, ¿en la cueva hay ventanas?, ¿por qué hay escaleras?, ¿este suelo es el de la cueva?, ¿esto se cae?, ¿cuántas galerías hay dentro de la cueva?...
- Representación del descubrimiento de la Cueva de Nerja y qué sintieron sus cinco descubridores.
- La vida en la Cueva en tiempos de la Prehistoria, explicada a través de un cuento.
- La importancia científica de los restos arqueológicos encontrados en la cavidad.

El programa *Las Costumbres de los Cromañones* se inicia con un divertido viaje en el tiempo, por el lejano oeste americano, la época medieval, el antiguo Egipto... hasta llegar al periodo de tiempo en el que vivió el hombre de Cromañón. Desde aquí establecemos una comparación dinámica y muy gestual entre éste y el hombre de Neandertal. Vista esta comparación entendemos mejor por qué prevaleció el hombre de Cromañón. A lo largo del espectáculo, de unos 45 minutos de duración, tratamos asuntos tales como:

- ¿De qué se alimentaba?
- ¿Cuál era el papel de la mujer en esta cultura?
- La utilización del fuego y del sílex
- La importancia de la caza y el aprovechamiento de todas las partes de animal cazado (alimentación, vestuario, adornos, herramientas...)

- El cómo y porqué del arte rupestre y del arte mueble...

Además, hemos continuado con los Conciertos Didácticos complementarios a la visita, que se enmarcan en el título genérico *La Cueva de la Música*. La petición de reservas para esta actividad ha disminuido mucho en el año 2016, debido fundamentalmente a que no se desarrollaba en el interior de la Cueva de Nerja.

## **Conclusiones**

La mayoría de los grupos han valorado muy positivamente que las representaciones se realicen previamente a la visita, ya que los alumnos adquieren conceptos que les son muy útiles a la hora de conocer la Cueva de Nerja y la ven "con otros ojos". Entre los programas más demandados por los grupos escolares destacan *Viaje al Principio de los Tiempos* y *Las Costumbres de los Cromañones*.

Los grupos que nos visitaron el año pasado y realizaron el programa *Viaje al Principio de los Tiempos* han valorado positivamente el hecho de que se realicen las actividades en el Aula Didáctica antes de la visita guiada ya que, según su opinión, dentro de la Cueva de Nerja el ambiente era más disperso, debido sobre todo al continuo trasiego de turistas al mismo tiempo que se desarrollaba la actividad.

La puesta en marcha de este servicio y todas las actividades que se ofrecen desde el "Grupo Didácticos Cueva de Nerja" ha supuesto un aumento muy significativo del número de reservas. En los cinco primeros meses del año 2016 se han reservado ya más de 19.000 visitas, de las que un 60% ha solicitado realizar actividades complementarias.

A partir de septiembre de 2016 aumentará la oferta de actividades con *Los Talleres de la Prehistoria*, por petición expresa de un gran número de profesores que nos han visitado. También ofreceremos a los grupos que nos visiten un *Cuaderno de Actividades*, con propuestas que el profesor o la profesora deberá seleccionar en función de la edad y circunstancias de su alumnado. Proponemos que, en las aulas, antes o después de la visita, se planteen actividades y las compartan con el resto de visitantes a la Cueva de Nerja a través de nuestro blog: Didácticos Cueva de Nerja.

Creemos haberlo conseguido. En gran parte justificamos esta afirmación analizando los resultados obtenidos en la Encuesta de Satisfacción de la visita que trasladamos a todos los grupos al finalizar la misma. Durante el año 2015, la nota media obtenida ha sido de 9,75 sobre un máximo de 10 puntos.



Pereña Ortiz, J. *et al.* Proyecto de recuperación y adecuación del sendero de la Cueva de Nerja-Sierra Almijara (Nerja, Málaga). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 489-496.

## **Proyecto de recuperación y adecuación del sendero de la Cueva de Nerja-Sierra Almijara (Nerja, Málaga)**

J. Pereña Ortiz <sup>(1)</sup>, C. Liñán Baena <sup>(2,3)</sup> y Y. del Rosal Padial <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Investigación y Divulgación Botánica, Jardín Botánico-Histórico La Concepción, Área de Sostenibilidad Medioambiental del Ayuntamiento de Málaga,  
jportiz100@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Instituto de Investigación, Fundación Cueva de Nerja, C/ Carretera de Maro s/n, 29787-Nerja (Málaga),  
cbaena@cuevadenerja.es, yolanda@cuevadenerja.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n,  
29071-Málaga,  
crilinbae@uma.es

---

### **RESUMEN**

Los Espacios Naturales cumplen una serie de funciones recreativas y de educación ambiental cada vez más importantes. Por ello, entre las actividades desarrolladas por las Administraciones encargadas de su tutela se encuentra el fomento y adecuación de zonas y equipamientos de uso público, compatibles con la conservación del entorno, que permitan el esparcimiento y disfrute de la naturaleza.

En la provincia de Málaga, concretamente en su costa, existe una demanda social creciente de actividades de ocio, recreativas, educativas, deportivas, culturales, medioambientales y turísticas, que van más allá del clásico turismo de sol y playa. En este sentido, la Fundación Cueva de Nerja trabaja para la mejora, renovación y nueva ejecución de instalaciones o infraestructuras que complementen la visita de la cavidad. El "Proyecto de Recuperación y Adecuación del sendero de la Cueva de Nerja-Sierra Almijara", desarrollado conjuntamente por la Fundación y el Parque Natural Sierras Tejeda, Almijara y Alhama, se implementa como una actuación enmarcada en las actividades de uso público que la Fundación Cueva de Nerja oferta a sus visitantes. El recorrido permite conocer el excepcional entorno natural de la Cueva de Nerja, a través de un cómodo paseo por un antiguo sendero de la Sierra Almijara, así como disfrutar de la cueva desde otra perspectiva, ya que su trazado coincide, en superficie, con el desarrollo de la cavidad.

La iniciativa y ejecución de este proyecto ha tenido por objeto principal interconectar y relacionar el exterior y el interior de la cavidad, poner en valor el excepcional entorno natural en el que se ubica y aportar alternativas de uso público en la Cueva de Nerja y en el propio Parque Natural Sierras Tejeda, Almijara y Alhama que contribuyan a su disfrute y conservación.

**Palabras clave:** Cueva de Nerja, ecoturismo, educación ambiental, sendero, Sierra Almijara.

## ***Recovery project and adequacy of the Cueva de Nerja-Sierra Almijara path (Nerja, Málaga)***

### **ABSTRACT**



*Natural Areas serve a number of recreational functions and increasingly important environmental education. Therefore, among the activities carried out by the Authorities of their care is the promotion and upgrading of areas and facilities for public use, compatible with conservation of the environment, allowing recreation and enjoyment of nature.*

*In the province of Malaga, particularly on the coast, there is a growing social demand for leisure activities, recreational, educational, sports, cultural, environmental and tourism, which go beyond the classic sun and beach tourism. In this sense, the Cueva de Nerja Foundation works for the improvement, renovation and new construction of facilities or infrastructure to complement the visit of the cavity. The "Recovery and Adaptation of the path of the Cave of Nerja-Sierra Almijara Project", jointly developed by the Foundation and the Sierra Tejeda, Almijara and Alhama Natural Park, is implemented as a performance framed in public use activities that the Foundation Cueva de Nerja offers its visitors. The tour allows you to experience the exceptional natural environment of the Cueva de Nerja, through a comfortable stroll through an ancient path of the Sierra Almijara, and enjoy the cave from another perspective, since its path coincides surface with the development of the cavity. The initiative and implementation of this project has been primarily intended to interconnect and relate the exterior and interior of the cavity to value the exceptional natural environment in which it is located and provide alternatives for public use in the Cueva de Nerja and in the own Natural Park Sierras own, that contribute to your enjoyment and conservation.*

**Keywords:** Almijara, Cueva de Nerja, ecotourism, environmental education, path.

## Introducción y objetivos

La Cueva de Nerja, una de las cuevas kársticas turísticas más importantes de España, se desarrolla en la vertiente meridional de la Sierra Almijara, dentro del Parque Natural Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama. A finales de la década de los años 70 se habilitó un sendero a través de la sierra Almijara que se ha ido deteriorando con el paso del tiempo. Dado que el trazado de este sendero coincide en superficie con el desarrollo de la cavidad, la Fundación Cueva de Nerja planteó, en 2015, la realización del denominado *Proyecto de recuperación y adecuación del sendero de la Cueva de Nerja-Sierra Almijara*. El objetivo principal de dicho Proyecto era el diseño y realización de las actuaciones necesarias para su perfecta puesta a punto y funcionamiento, con el fin de interconectar y relacionar el exterior y el interior de la cavidad y ofrecer alternativas de uso público, tanto en el Parque Natural como en el recinto de la Cueva de Nerja, distintas a las ya existentes.

La ejecución del citado Proyecto de recuperación y adecuación del sendero, precisó de un minucioso reconocimiento del medio exterior debido a que, por un lado, se ubica en una zona incluida en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía, muy rica en especies vegetales y animales, de las cuales, un porcentaje considerable está incluido en el Catálogo Andaluz de especies protegidas (Decreto 23/2012 de 14 de febrero). Por otro lado, la componente abiótica también presenta gran importancia, siendo la Cueva de Nerja su máximo exponente.

En este marco, se realizaron sucesivas campañas de trabajo en la zona de actuación, durante las cuales se inventariaron los diferentes elementos de flora (común y amenazada), y fauna, completados por diversos estudios y trabajos llevados a cabo por el propio Parque Natural y diferentes Universidades (Palomo, 1997-1999 y Tinaut *et al.*, 2000). Para la redacción del Proyecto se consultaron las investigaciones geológicas de Sanz de Galdeano (1986, 1989, 1990) y Andreo *et al.*, (1993) y los estudios hidrológicos e hidrogeológicos de Pérez y Andreo (2007). Asimismo, se recopilaron los datos climáticos registrados en la estación meteorológica de la Cueva de Nerja (Liñán *et al.*, 2007) y los del Instituto de Investigaciones Fitosociológicas (web-

site 2015). Los datos biogeográficos, bioclimáticos y series de vegetación se corresponden con los expresados por Rivas-Martínez *et al.* (2007).

## **Desarrollo del Proyecto**

El proyecto comenzó con el estudio previo, a partir del recorrido a pie, de las necesidades del trazado del sendero existente. Mediante GPS (ED 1950), se realizó una georreferenciación del trazado previsto para el sendero, así como de la ubicación de la señalización programada y de las actuaciones puntuales a desarrollar. En total se obtuvieron las coordenadas de 40 puntos (Fig. 1).

Para facilitar la ejecución de las actuaciones de recuperación y adecuación del sendero, se llevó a cabo una zonificación del territorio en cinco tramos (Fig. 2):

- Tramo I: de unos 100 m de longitud, ubicados íntegramente en el recinto de la Fundación Cueva de Nerja, titular de los terrenos.
- Tramo II: de 90 m de longitud, medidos desde la puerta de salida del recinto de la Fundación. Discurre por la Zona de Protección Integral del Bien de Interés Cultural Cueva de Nerja (Decreto 194/2006).



*Figura 1. Puntos de coordenadas trazados en la fase de reconocimiento*



- Tramos III, IV y V: con un total de 510 m de longitud y tres niveles de dificultad. Discurren íntegramente por el Parque Natural y por la Zona de Protección Integral del Bien de Interés Cultural Cueva de Nerja

En cada uno de estos tramos (Figs. 3 y 4) se hizo necesaria la ejecución de diferentes trabajos, para reabrir el sendero original (tramos II, IV y V) o habilitar nuevos tramos (tramo III), ya que la densidad de vegetación en la zona es bastante alta. Así, en el tramo III se construyeron trece escalones, para suavizar la pendiente topográfica en algunos puntos y en los tramos III, IV y V fue necesario retirar y recolocar las piedras que conformaban los laterales del antiguo sendero (Fig. 5). Otras actuaciones complementarias fueron la restauración de la puerta de salida del recinto de la Fundación y la habilitación de áreas de descanso a lo largo de la ruta, equipadas con bancos de madera (Fig. 5). Al final del itinerario se acondicionó la zona a modo de mirador, desde el que se contempla una espectacular vista de la línea de costa y del Parque Natural y que constituye uno de los principales atractivos del sendero (Fig. 6).

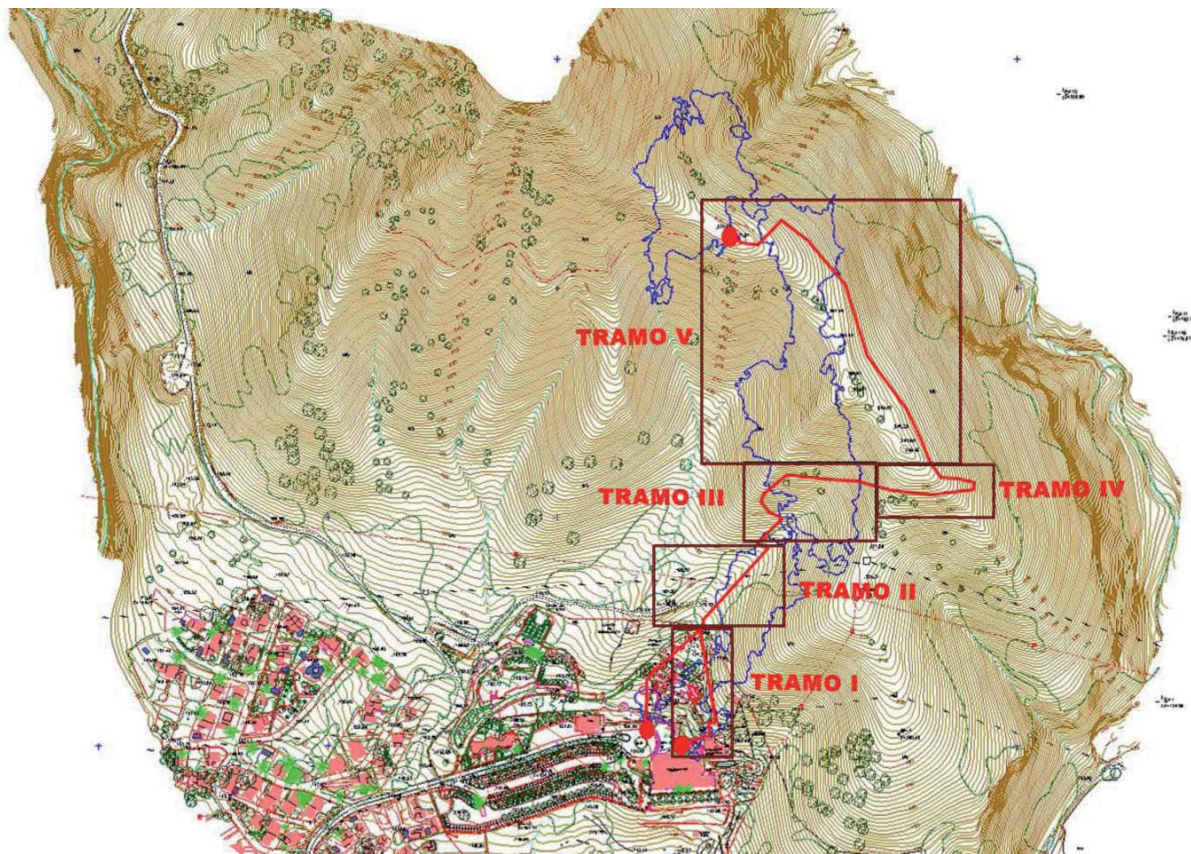


Figura 2. Zonificación en tramos del trazado del sendero





*Figuras 3 y 4. Aspecto del sendero en los tramos III y IV antes del desarrollo del Proyecto*



*Figura 5. Aspecto del sendero tras el desarrollo del Proyecto*





Figura 6. Vistas desde el mirador ubicado al final del sendero

## Señalización

El recorrido del sendero es bastante sinuoso en algunos tramos por lo que se instalaron balizas y señales a lo largo del mismo para evitar pérdidas y equivocaciones entre los usuarios (Fig. 7). Además, para un mayor aprovechamiento didáctico y reconocimiento de los valores naturales y culturales del entorno, a lo largo de la ruta se encuentran varios paneles informativos (Fig. 8). El primer panel, ubicado junto a la entrada de la Cueva de Nerja, sirve de introducción a la ruta y contiene, entre otra información, datos prácticos acerca de la duración estimada, longitud del recorrido y nivel de dificultad. El resto de paneles ofrecen información específica sobre: a) flora y vegetación del entorno, b) fauna y c) aspectos geológicos y geomorfológicos más significativos del recorrido, así como datos de salas de la Cueva de Nerja sobre las que discurre parte del sendero: d) Belén, e) Cataclismo, f) Lanza y g) Montaña.

Por último, en el mirador ubicado al final del sendero existe un cartel panorámico donde se señalan los elementos naturales y culturales más significativos que se divisan desde esa zona (Fig. 9).



Figura 7. Balizas y señales para orientación de los usuarios

En relación con la señalización empleada en el sendero, ésta se ajusta al manual de señalización de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, ya que la ruta discurre, en más de un 80 % de su trazado, por terrenos del Parque Natural.



*Figura 8. Ejemplos de paneles informativos del sendero*



*Figura 9. Vista panorámica desde el mirador. (Fotografía: Mariano Ibáñez Heredia)*



## Conclusiones

En base a los objetivos planteados en el *Proyecto de Recuperación y Adecuación del sendero Cueva de Nerja-Almijara*, se puede concluir que:

- Supone una ampliación de la oferta turística que brinda la Cueva de Nerja, así como un nuevo proyecto de difusión, que contribuye a su conocimiento.
- La conexión del interior de la cueva con el medio exterior mediante un sendero exterior, supone una iniciativa pionera entre las cuevas turísticas de España.
- Dada la buena acogida del proyecto por parte de los visitantes, se está trabajando en una segunda fase que ampliará el recorrido.

## Referencias

- Andreo B., Carrasco F. y Sanz de Galdeano C. 1993. Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja. En F. Carrasco (Ed), *Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, nº 3: 25-50.
- Decreto 23/2012, de 14 de febrero, por el que se regula la conservación y el uso sostenible de la flora y la fauna silvestres y sus hábitats. BOJA nº 60, de 27 de marzo de 2012. Junta de Andalucía.
- Liñán, C., Simón, M.D., del Rosal, Y. y Garrido, A. 2007. Estudio preliminar del clima en el entorno de la Cueva de Nerja (Andalucía, provincia de Málaga). En: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (eds.), *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, Publicaciones del IGME, Serie Hidrogeología y aguas subterráneas, nº 24, 159-167.
- Palomo, J. 1997. *Proyecto: Estudio de la fauna de vertebrados terrestres del entorno de la Cueva de Nerja*. Fundación Cueva de Nerja, 187 pp. Inédito.
- Pérez I. y Andreo B. 2007. Sierra Almijara y Alberquillas. En: *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga*, tomo 2, 143-148. J.J. Durán (Coord. Gral.). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Málaga.
- Rivas-Martínez S., Asensi A., Díez-Garretas B., Molero J., Valle F., Cano E. y Costa M. 2007. Mapa de series, geoseries y geopermaseries de vegetación de España (Memoria del Mapa de vegetación potencial de España), parte I. *Itinera Geobot.* 17: 5-436.
- Sanz de Galdeano C. 1986. Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra almijara (Zone Alpujarride, Cordillères Bétiques). *Estudios Geológicos*, 42: 281-289.
- Sanz de Galdeano C. 1989. Estructura de las Sierras Tejeda y de Cómpeta (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas). *Revista Sociedad Geológica de España*, Granada, 2: 77-84.
- Sanz de Galdeano C. 1990. Estructura y Estratigrafía de la Sierra de los Guájares y sectores próximos (conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas). *Estudios Geológicos*, 46: 123-134.
- Tinaut A., Lara, M.D. y Ruiz-Avilés, F. 2000. *Entomofauna de la Cueva de Nerja (Málaga)*. Fundación Cueva de Nerja, 288 pp. Inédito.
- Worldwide Bioclimatic Classification System, 1996-2015, S. Rivas-Martinez & S. Rivas-Saenz, Phytosociological Research Center, Spain. <http://www.globalbioclimatics.org>.

## Arqueología en el proyecto de conservación de la Cueva de Nerja

J.L. Sanchidrián Torti <sup>(1)</sup>, L.E. Fernández Rodríguez <sup>(2)</sup>, M.A. Medina-Alcaide <sup>(3)</sup>, R.M. Ruíz Márquez <sup>(1)</sup>, J.M. Cobos Pastor <sup>(1)</sup> y A.J. Torres Riesgo <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de Córdoba, Plaza del Cardenal Salazar s/n, 14071-Córdoba, gt1satoj@uco.es, romrma@gmail.com, l22copaj@uco.es, l22toria@uco.es

<sup>(2)</sup> Instituto de Investigación Cueva de Nerja. Carretera de Maro s/n, 29787-Nerja, Málaga, conservador@cuevadenerja.es

<sup>(3)</sup> Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología de la Universidad del País Vasco UPV/EHU. Tomas y Valiente, s/n, 01008-Vitoria, mangeles.medina@ehu.eus

---

### RESUMEN

En diferentes foros científicos, incluidas ediciones anteriores del Congreso Español sobre Cuevas Turísticas, se han ido presentando los logros y conclusiones del Proyecto General de Investigación Interdisciplinar Aplicada a la Conservación de la Cueva de Nerja, 2008-2013/2015, autorizado por la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía y financiado por la Fundación de Servicios Cueva de Nerja, relativas sobre todo a los ámbitos geológicos y biológicos. En esta ocasión, nos centraremos en los resultados desde la perspectiva arqueológica, aunque resulte difícil desgajar del resto de las disciplinas las conclusiones estrictamente arqueológicas debido al fuerte carácter transdisciplinar del proyecto. Uno de los objetivos fundamentales radicaba en la preservación de los cortes arqueológicos abiertos por las antiguas excavaciones en las salas con ocupación humana prehistórica de Mina, Vestíbulo y Torca, los cuales después de varias decenas de años de abandono sufrían un constante deterioro y desplomes de sus perfiles, con la pérdida inexorable del patrimonial histórico y natural que ello suponía. A este respecto, se ha conseguido solventar el problema en dos salas (Vestíbulo y Mina), quedando pendiente actuar para el fin enunciado en la Sala de la Torca. Por su parte, la actividad arqueológica denominada "Prospección Sistemática Superficial de la Cueva de Nerja" ha permitido establecer el Mapa de Riesgo de la cavidad, a partir de los restos arqueológicos detectados en las zonas interiores: industria lítica, hematites, alteraciones antrópicas de la geomorfología kárstica, huesos de animales y humanos y, sobre todo, restos carbonosos. La cronología de estos hallazgos se reparte en los distintos episodios desde la Edad de Cobre hasta el tránsito entre el Paleolítico superior y medio, con un importante número de fechas C14-AMS que aluden al Gravetiense (24 ka BP), Solutrense (21-19 ka BP) y Magdaleniense (14 y 12 ka BP).

**Palabras clave:** conservación, contexto-arqueológico-externo, contexto-arqueológico-interno, cueva decorada, dataciones C14-AMS.



## **Archaeology in the conservation Project of the Cueva de Nerja**

### **ABSTRACT**

*In some scientific forums, including previous editions of the Spanish Congress on Tourist Caves, the experts have presented the achievements and conclusions of the Interdisciplinary Research about Conservation of Cueva de Nerja General Project, 2008-2013 / 2015, authorized by the Andalusian Department of Culture (Andalusian Regional Government) and financed by the Cueva de Nerja Foundation. On this occasion, we will focus on the results from the archaeological perspective, although it may be difficult to separate it from the others perspectives due to the strong transdisciplinary nature of the project. One of the essential aims lies in the preservation of archaeological cuts opened by the old excavations in the prehistoric human occupation halls, such as Mina, Vestíbulo and Torca, which, after several decades of desertion, have suffered a constant deterioration on their profiles. In this regard, it has been managed to solve the problem in Vestíbulo and Mina halls, acting with the same purpose in the Torca hall remains to be determined. For its part, the archaeological activity called Superficial Systematic Research of Cueva de Nerja has allowed to establish the Risk Map of the cavity, from the archaeological remains found in some inside areas: lithic industry, hematites, anthropic alterations of the karst geomorphology, animal and human bones and, especially, carbonaceous residues. The chronology of these findings is distributed in the different episodes from the Copper Age to the transition between the Late and the Middle Paelolithic, with a significant number of C14-AMS dates which refer to the Gravettian (24 ka BP), the Solutrean (21-19 ka BP) and the Magdalenian (14 and 12 ka BP).*

**Key words:** AMS C14 dating, conservation, decorated cave, external-archaeological-context, inner-archaeological-context.

### **Introducción**

El objetivo fundamental del Proyecto General de Investigación Interdisciplinar Aplicada a la Conservación de la Cueva de Nerja 2008-2013/2015, autorizado por la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, persigue dotar a la Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja de los mecanismos, herramientas e información para el desarrollo de un Plan Racional de Gestión (conservación, investigación y difusión) del B.I.C. Este planteamiento básico se desglosa en objetivos específicos a tenor de las distintas macro áreas que intervienen en el estudio del endokarst: geología, biología y arqueología. En diferentes foros científicos se han ido presentando los logros y las conclusiones relativas, sobre todo, a los ámbitos geológicos y biológicos; en esta ocasión centraremos nuestra atención sobre los resultados estrictamente arqueológicos, aunque resulte difícil desgajarlos del resto de las disciplinas debido al fuerte componente transdisciplinar del propio proyecto (Sanchidrián *et al.*, 2008).

La vertiente arqueológica de nuestros trabajos, aparte de la relectura y documentación del arte rupestre, contempla dos aspectos prioritarios relativos a los vestigios de la cultura material prehistórica. Por un lado, aquellos que permanecen en el contexto sedimentario exterior y, por otro, los que en la actualidad se hallan a la intemperie en las zonas interiores. Esta doble órbita obligaba a dos tipos de intervenciones arqueológicas, que se materializaron en distintas actividades puntuales de carácter preventivo relativas a los abrigos de ocupación y una prospección sistemática superficial de las zonas profundas.

Respecto al contexto sedimentario, desde las últimas excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en Cueva de Nerja en el año 1987, los diferentes cortes estratigráficos abiertos en las salas de Torca, Mina y Vestíbulo permanecían sin ningún tipo de control ni medidas de preservación, lo cual había ocasionado numerosos desplomes con la consiguiente pérdida irreparable del

Patrimonio Histórico. En cuanto a los vestigios interiores en superficie resultaba imprescindible su detección, definición y situación, con vista a la delimitación de las distintas zonas para proceder a su protección.

## **Sala de la Mina**

La propuesta de conservación de la Sala de la Mina de la Cueva de Nerja conllevaba la estabilización y preservación de los cortes arqueológicos, a través de las siguientes fases: a) limpieza del espacio, b) recogida y tratamiento de los sedimentos desprendidos, c) regularización arqueográfica para la estabilización de los perfiles inestables, d) analíticas complementarias para la interpretación cronoestratigráfica, e) medidas de conservación y/o consolidación, f) adecuación y pliego de actuaciones en las áreas con sedimento arqueológico.

Con todo, se comenzó retirando de forma manual y controlada un importante cúmulo de desechos y más que nada basuras, aportada a la Sala durante años y procedente de varios focos de alteración, como son los elementos de infraestructuras deteriorados (pasarelas de madera, puente y escalera metálica, conductores eléctricos, luminarias, etc.) y desperdicios arrojados por los turistas que deambulaban por la escalera contigua.

Por su parte, todas las excavaciones arqueológicas realizadas en la Sala habían generado un total de 21 perfiles estratigráficos, los cuales ofrecían un aspecto caótico como consecuencia de los continuados desplomes. Así pues, se procedió a la recogida de todos los sedimentos desprendidos, geo-referenciando los conos de derrubios. Esta tarea produjo un total aproximado de 2.800 kg de tierra, que fueron trasladados a las instalaciones del Instituto de Investigación de la Fundación para su tratamiento; éste consistió en el cribado con agua a través de una columna de tamices de malla decreciente y la posterior selección del material arqueológico. De este modo, se recuperaron un total de 20.903 vestigios prehistóricos que fueron clasificados atendiendo a las siguientes categorías: macrofauna, microfauna, malacofauna, ictiofauna, antropología, industria lítica tallada y pulimentada, industria ósea, cerámica, adornos, antracología, carpología, alóctonos y otros. En conjunto, esos elementos corresponden desde una perspectiva crono-cultural a distintos episodios de la Edad del Cobre, varias fases del Neolítico y Epipaleolítico, así como al Magdaleniense Superior (Sanchidrián *et al.*, 2008).

Por otro lado, el programa de actividades especificaba la estabilización de todos los perfiles estratigráficos de las excavaciones antiguas tras su regularización. Sin embargo, cuando planteamos el comienzo de la intervención, pudimos apreciar que el estado de inestabilidad de la mayoría de los tramos hacía imposible siquiera el aproximarse a los mismos sin perjudicarlos. En consecuencia, se tomó la determinación de preservar los cortes arqueológicos cuanto antes, por medio del soterramiento urgente de los vacíos provocados por las excavaciones; para ello, se cubrieron con lienzo de fibra geotextil Geotesant NT-12 (100g/m<sup>2</sup>) los perfiles y el fondo de los espacios, procediendo al relleno manual con el tipo de material decidido tras los pertinentes análisis de índole físico-químico, que concluyeron en la conveniencia de un determinado árido calizo.

No obstante, en el sector oeste pudimos desarrollar la excavación, para la regularización de los perfiles, de un área de 2 m<sup>2</sup> y 1,8 m de profundidad relativa al Neolítico Antiguo. Los resultados

de esta actuación ayudan a conocer las características simbólicas (Aguilera *et al.*, 2015), paleobotánicas (Pérez-Jordá y Peña-Chocarro, 2008. Grupo de Investigación en Arqueobotánica, C.S.I.C., informe inédito) y nuevos datos cronológicos de este periodo en el sur peninsular.

También fue posible recoger las muestras requeridas para cumplir con el apartado concerniente a las analíticas complementarias destinadas a la interpretación cronoestratigráfica de los depósitos arqueológicos. En este sentido, los perfiles oeste, norte y este fueron muestreados para su examen palinológico (Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Murcia; examen negativo -sin presencia de polen fósil-) y su estudio sedimentológico (Aramburu y Berreteaga, 2009. Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad del País Vasco, informe inédito). Además, se llevó a cabo una prospección geofísica del volumen sedimentario total de esta sala y su contigua (Sala de la Torca), concluyendo con la presencia de 2,5 m (Mina) y 4 m (Torca) de depósitos sedimentarios que aún no han sido sondeados (Teixidó *et al.*, 2009. Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, informe inédito). A la vez, se extrajeron muestras miligramétricas de material carbonizado de varias de las secciones estratigráficas (oeste, norte y este) con el objeto de su datación radiométrica por C14-AMS; los resultados muestran columnas cronológicas de series coherentes, que informan de los distintos estadios de ocupación humana prehistórica de la Sala de la Mina, cuyas horquillas abarcan las secuencias B.P. (sin calibrar) de 18,7 ka, 12,1 ka, 6,3 y 6,1 ka, 5,7 y 5,6 ka, 4,1 ka y 3,7 ka. En este sentido, debemos destacar que se registra, por primera vez en este lugar, un nivel relativo al periodo Solutrense (Sanchidrián *et al.*, 2013).

## **Sala del Vestíbulo**

Sobre el estado de conservación de la Sala del Vestíbulo, varios factores hacían que ofreciera un aspecto lamentable y sufriera la pérdida del rico y excepcional Patrimonio Histórico que alberga. Por un lado, el abandono durante décadas de los cortes arqueológicos y las infraestructuras de musealización deterioradas al poco tiempo de su instalación, a todo ello se unieron los efectos de las lluvias torrenciales del 2007 y años posteriores, cuyas escorrentías inundaron los cortes y provocaron desprendimientos de una importante porción de los depósitos prehistóricos.

Ante esta situación se propuso y autorizó una intervención arqueológica a tenor de los siguientes objetivos: a) eliminación y retirada de las infraestructuras deterioradas, b) recogida, limpieza y tratamiento de los sedimentos desprendidos, c) documentación gráfica del espacio, d) muestreo para analíticas complementarias (sedimentología, palinología, dataciones absolutas, etc.), e) medidas de conservación de los cortes a través de su soterramiento, f) canalización y desviación de las escorrentías en el exterior de la cavidad.

Así pues, por medio de una acción directa y mecánica se eliminaron de los cortes arqueológicos y sus aledaños todas las basuras acumuladas en los últimos tiempos; a la vez, se extrajeron de la sala todos los elementos alóctonos (metálicos, eléctricos, orgánicos, etc.) deteriorados por el agua y otros agentes.

Los conos de derrubios provocados por los desplomes de los perfiles y las inundaciones fueron recogidos, referenciando su procedencia espacial según la cuadrícula general del espacio

arqueológico de las antiguas excavaciones. A continuación, se sometió a todos estos sedimentos a un tratamiento de cribado con agua, a través de una columna de tres tamices de luces decrecientes; tras el secado, se recolectaron todos los vestigios arqueológicos y trataron para su clasificación y conservación.

En total, en la última tarea comentada, se han recuperado 26.244 piezas prehistóricas. Los materiales se reparten en las categorías propias de las comunidades predadoras del Pleistoceno: macrofauna, microfauna, malacofauna, ictiofauna, material alóctono (cantos, ocre o lascas de esquistos), industria lítica (raspadores, buriles, morfotipos de dorso, productos laminares, lascas, debrís y fragmentos de núcleos), industria ósea (huesos trabajados, fragmentos de azagayas y apuntados, etc.) y adornos personales (sobre todo confeccionados en soporte malacológico). También se contabilizaron restos cerámicos procedentes de las capas arqueológicas superiores, como galbos, bordes y elementos decorados con incisiones y relieves aplicados (Sanchidrián *et al.*, 2012).

En la documentación gráfica del espacio se procedió a la realización a escala 1/20 de una nueva planta actualizada del sector de la Sala que conserva los cortes arqueológicos, indicando las diferentes cotas de los sondeos y banquetas sin excavar, referenciadas a partir del nivel cero de las antiguas excavaciones, así como las irregularidades de los perfiles. Al mismo tiempo, se llevó a cabo un registro 3D y fotogramétrico a nivel global de todo el volumen de la Sala y los perfiles estratigráficos (Aranburu *et al.*, 2013).

Para las analíticas complementarias se tomaron muestras por diferentes especialistas destinadas a los estudios sedimentológicos (Aranburu *et al.*, 2013) y palinológicos (López-Sáez, estudio en curso). En relación a la batería de dataciones radiométricas por medio de C-14 AMS, éstas ofrecen resultados numéricos según lo esperado, en función de los datos cronoculturales de las excavaciones arqueológicas del Prof. Jordá, en cuanto que las fechas sitúan los depósitos alrededor del 23 ka BP, 20-18 ka BP, 12 ka BP y 10 ka BP; es decir, de muro a techo tendríamos: una ocupación Gravetiense, seguida de los niveles adscritos al Solutrense, para terminar con las capas correspondientes al Magdaleniense Superior y el cambio Pleistoceno-Holoceno con un Epimagdaleniense o Epipaleolítico Microlaminar (Jordá *et al.*, 2011; Sanchidrián *et al.*, 2012).

En cuanto a las medidas correctoras se ha conseguido la estabilización y preservación de los cortes arqueológicos a través de su colmatación hasta el antiguo nivel del piso, por medio de material inocuo y vertido manual, semejante al sistema empleado para el mismo fin en la contigua Sala de la Mina. Por último, para evitar las inundaciones de la Sala del Vestíbulo, en el exterior de la cavidad, se impermeabilizó un pequeño sector y desviaron los drenajes al sistema de alcantarillado general de las instalaciones; además, en la actualidad, gracias a la remodelación de la Plaza de los Descubridores el problema ha sido solventado total y definitivamente.

Con posterioridad, para la correcta adecuación del espacio, se eliminó el murete de ladrillos y cemento que delimitaba el camino a los turistas e impedía, en cierta medida, las caídas involuntarias a los cortes arqueológicos, dotando a la Sala de este modo de un nuevo aspecto con el que se percibe su tamaño original, consiguiendo que sea agradable para el visitante su primer contacto con la cueva propiamente dicha. Igualmente, el paquete estratigráfico



colgado e intacto del sector derecho, según sentido de penetración, ha sido cubierto con una trama de acero inoxidable sujeta con bridas del mismo material (-M2- MALLA SOLD. INOX. AISI 304 25X25X2mm. 30X1mt.), lo que permite a la vez la estabilización del tramo arqueológico en cuestión; la base del tramo hasta el borde del pasillo se rellenó de grava similar a la de colmatación de los cortes, colocando entre el relleno y el sedimento una malla plástica bastante resistente y a prueba de colonización fúngica (Sanchidrián *et al.*, 2015).

### **Prospección sistemática superficial**

Curiosamente, Cueva de Nerja conserva en superficie numerosos vestigios arqueológicos a pesar de más de cinco décadas palde explotación turística. Uno de los objetivos fundamentales del Proyecto General de Investigación era la localización y delimitación de aquellas zonas que por contener sedimentación o material arqueológico en superficie debían ser objeto de especial atención en cuanto a su protección. Se trataba, por tanto, de que cualquier actividad (mantenimiento, investigación o visita), que pudiera desarrollarse en dichos lugares, estuviera sujeta a un protocolo específico de actuación que no resultara dañino para el yacimiento en general.

Así pues, se llevó a cabo una prospección sistemática superficial sustentada con los siguientes objetivos: a) localización de los vestigios de uso/frecuentación dejados en las diferentes superficies y relieves endokársticos por las comunidades prehistóricas, b) contextualización de los vestigios a partir de su documentación gráfica, c) muestreo para determinar la naturaleza y edad de los elementos detectados, d) delimitación de las áreas y medidas de protección.

En el trabajo de campo se desarrolló la prospección sistemática de todas las superficies a partir de equipos de prospectores compuestos por un mínimo de tres miembros cada uno. En algunas circunstancias muy concretas quedó reducido a dos. Cada equipo fue autónomo desde el punto de vista de la progresión en el medio subterráneo y el trabajo, bajo una única coordinación general; para este fin, se contó con un grupo de profesionales en Arqueología Subterránea y colaboradores, equipados con todas las medidas de seguridad e higiene, entrenados y experimentados, además de conocedores de los espacios interiores de Cueva de Nerja. A cada equipo se le asignó un área de trabajo prefijada a partir de la planimetría global del cavernamiento, sectorizada por medio de los elementos geomorfológicos naturales, de manera que se llevó un control exhaustivo y continuo del trabajo realizado en un medio tan caótico, con la seguridad de que todos los sectores han sido cubiertos en la prospección. Cada sector representa una unidad de trabajo, con inventario independiente para no afectar a otro sector, si bien fueron unificados en un único catálogo general al finalizar las tareas. Los prospectores portaron, como instrumentación mínima, la planimetría del sector asignado a una escala suficiente, lámparas LEDs (lámpara flexible Strip Light KB8, 3-4 h de duración, 130LED luz blanca), fichas diseñadas *ex profeso* para la catalogación del vestigio arqueológico, cámara fotográfica para tomas (general del emplazamiento y detalle del vestigio) que acompañan a la ficha (Medina-Alcaide y Sanchidrián, 2014).

El procedimiento para la documentación gráfica consistió en el examen visual lo más cercano posible al suelo o demás superficies por parte del equipo humano (prospectores). Una vez detectado el elemento en cuestión fue fotografiado con una cámara Canon EOS 20D + Canon

EF-S 18-55 mm, numerado y posicionado en la planimetría, rellenándose los campos de las fichas correspondientes. Para la determinación *in situ* de algunos elementos dudosos se empleó un juego de lupas de 8x-15x, así como microscopios portátiles de mayor aumento; a veces, para resaltar las sustancias colorantes, y como primera aproximación, se usó una cámara compacta Canon PowerShot SX150 IS con el programa *DStretch* incorporado. En algunos casos, se realizó una documentación fotográfica en detalle, para registrar con mayor precisión determinados aspectos que nos ayudasen a valorar el estado de conservación de la evidencia, utilizando una cámara y flash Nikon D610 + objetivo macro AF-S DX Micro-NIKKOR 40mm f/2.8G + LED Macro Ring Flash FC100; asimismo, toma de fotografía microscópica con Dinolite10-70x/400-460x instalado en un ordenador portátil MacBook Air; ésta instrumentación permite también la captura fotográfica inmediata y series a diferentes profundidades de campo que pueden ser compiladas a través del programa *Helicon Focus*. En laboratorio se llevó a cabo la situación de los vestigios en planimetría digital *AutoCAD*, tratamiento de las imágenes por medio de *Photoshop CC2014*, traslado de los datos de las fichas de campo a una base de datos generada con el programa *Filemaker Pro Advanced* (Medina-Alcaide y Sanchidrián, 2014).

En cuanto a los resultados, la prospección otorgó un total de vestigios prehistóricos que sobrepasa los novecientos elementos, repartidos tanto por las superficies verticales como horizontales (manifestaciones gráficas y restos del contexto-arqueológico-interno -Medina-Alcaide *et al.*, 2010; Romero *et al.*, 2010; Medina-Alcaide y Sanchidrián, 2014-). De ese cómputo global destaca desde la óptica numérica los restos de madera carbonizada, aunque también se han detectado cantos de material alóctono, ejemplares de malacofauna, estructuras arqueogeomorfológicas, fragmentos paleontológicos, porciones y manchas de hematites (Medina-Alcaide *et al.*, 2015) y piezas de industria lítica (raspadores, láminas y puntas) (Rios-Garaizar *et al.*, 2015).

Los restos carbonosos suelen aparecer dispersos (pequeñas porciones centimétricas aisladas), pero en ocasiones están concentrados en áreas de dimensiones variables (tanto en pequeñas concavidades naturales como en el piso); de cualquier forma, todos fueron catalogados como una unidad, aunque a veces ocupen varios metros cuadrados. La distribución espacial de las acumulaciones y evidencias de carbones prehistóricos, en cuanto al total del cavernamiento, resulta igualmente dispar, si bien ciertas salas de las Galerías Altas son más prolifas que las demás zonas de la cueva; en particular, debemos subrayar la importancia en número de la Sala de las Columnas de Hércules, zona de La Cocina/Laberinto de Entrada, así como los resaltes y cornisas que conducen desde la Sala del Cataclismo a la gatera de la Luz Roja (acceso y comunicación entre las Galerías Turísticas y las Galerías Altas/Nuevas). En los casos citados los restos de carbones se hallan exactamente en los pasos y caminos empleados, por lo habitual, para acceder a las salas interiores de Cueva de Nerja, fenómeno en cierto modo lógico si entendemos esos vestigios arqueológicos como restos de la iluminación necesaria para el deambular por la cavidad de los grupos humanos prehistóricos (Medina-Alcaide y Romero, 2011). No obstante, esta circunstancia plantea un problema serio de conservación de los documentos históricos, resuelto con algunas de las medidas correctoras adoptadas (ver *infra*) (Sanchidrián *et al.*, 2015).

El estudio de estos restos de combustión documentados en zonas interiores de Cueva de Nerja nos permite abordar cuestiones relacionadas con el material seleccionado para la frecuentación profunda de la cavidad por parte de las comunidades prehistóricas. Las analíticas efectua-

das para la caracterización y edad de los restos de combustión han sido: análisis antracológico específico, taxonómico, tafonómico y dendrológico (Medina-Alcaide, 2014; Medina-Alcaide et al., 2015), datación AMS de muestras miligramétricas (Medina-Alcaide y Sanchidrián, 2014); estudio de fitolitos y FTYR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) (Alonso y Albert, 2014. Universitat de Barcelona, informe inédito); micro-morfología de supuestas acumulaciones de cenizas (Polo, estudio en curso).

Por el momento, el análisis taxonómico, tafonómico y dendrológico de un centenar de macrorestos vegetales carbonizados indica que los grupos del Paleolítico Superior usaron la madera como materia combustible, preferentemente, las ramas de pino de pequeño y mediano calibre, compatibles con la anatomía de *Pinus sylvestris* (pino silvestre) y *Pinus nigra* (pino salgareño). Los motivos del uso recurrente del pino parecen relacionarse con su presencia en el entorno de la cavidad, como apuntan algunos indicadores paleobotánicos pero también por su calidad como combustible, sobre todo por su contenido en resina. La documentación de leguminosas junto con restos de pinos en varios de los contextos analizados sugiere la combinación de ambos combustibles o quizá el uso de estos especímenes arbustivos para la ignición del fuego. La presencia de hifas y micelios en más de la mitad de los restos carbonosos podría reflejar la utilización de madera muerta. Las alteraciones fruto del proceso de combustión, tales como vitrificación y grietas radiales, poseen una representación elevada. Además, la determinación de una yema vegetativa de *Pinus sylvestris* nos aporta información sobre la época del año en la que pudo ser frecuentada la gruta (otoño-invierno) (Medina-Alcaide, 2014; Medina-Alcaide et al., 2015).

Por su parte, los resultados radiométricos de los restos carbonizados apuntan a una frecuentación notablemente heterogénea en cuanto a su cronología. Al día de la fecha de redacción de estas páginas contamos con 41 resultados numéricos realizados por diferentes laboratorios (Beta-Analytic y LSCE-CNRS). Dos fechas corresponden con dataciones relativas a las etapas finales del Paleolítico Medio, 27 al Paleolítico Superior (2 Auriñaciense, 7 Gravetiense, 9 Solutrense, 9 Magdaleniense), 2 al Epipaleolítico y 10 a las fases de la Prehistoria Reciente (6 del Neolítico y 4 Edad del Cobre); las últimas se distribuyen por diferentes espacios de las Galerías Bajas o Turísticas, estando las más antiguas repartidas tanto en éstas como en las Galerías Altas (Medina-Alcaide et al., 2010; Romero et al., 2010; Romero y Medina-Alcaide, 2011; Sanchidrián et al., 2013; Medina-Alcaide y Sanchidrián, 2014).

Estas dataciones nos aportan información cronológica sobre una actividad particular: la frecuentación y el tránsito hacia las zonas interiores de la cavidad, al ser considerados la mayoría de estos restos como residuos de la necesaria iluminación prehistórica de la gruta (Medina-Alcaide, 2015). La relación de estas dataciones con otras actividades más concretas desarrolladas en el interior de la cueva (p.e., ejecución de las manifestaciones gráficas en el Pleistoceno o procesos de inhumación durante el Holoceno) están siendo analizadas en la actualidad, así como su vinculación con la ocupación de las zonas exteriores de habitación. No obstante, hemos presentado algunos avances en otros foros científicos (Medina-Alcaide y Sanchidrián, 2014).

Por último, las medidas de protección y conservación de las zonas interiores de la Cueva de Nerja se resumen en las siguientes prácticas: a) Situación planimétrica, previa digitalización, de todos los vestigios y conjuntos de restos detectados. Esta cartografía sirvió de base para las

siguientes acciones y para la determinación del protocolo de actuación, inmediato y futuro; b) a la vez, en la propia cavidad, se ha delimitado físicamente las zonas a proteger, por medio de un sistema de balizado inocuo a base de hilo de nylon de color amarillo y a veces blanco, como advertencia a los visitantes y operarios de la Fundación de la presencia de elementos prehistóricos en las diferentes superficies y espacios del endokarst. No obstante, en fechas inminentes, serán retirados esos elementos de balizado tras la puesta en marcha del protocolo final de actuación.

Ese protocolo de actuación contiene las propuestas a continuación reseñadas, la mayoría de ellas ya ejecutadas y otras en proceso de realización, concretadas gracias a las actuaciones desarrolladas dentro del P.G.I.: 1) Confección del mapa de riesgo de la cavidad, como síntesis de la conjunción de todas las áreas despejadas en la prospección, a partir de la totalidad de la información recogida en la actividad arqueológica y de los datos de archivos de la Fundación (sobre todo, catálogo de arte rupestre); 2) Anulación total de las visitas a las Galerías Altas dentro del marco de una actividad absolutamente inapropiada para un BIC, el "espeleoturismo". 3) Al hilo de lo anterior, clausura de las Galerías Altas a todo personal no autorizado y conocedor del medio y su contenido arqueológico, geológico y biológico. 4) Recomendaciones de uso, control y precaución de los espacios urbanizados, así como de las medidas de protección y conservación. 5) Prohibición de salir fuera de los caminos de todo personal no autorizado. 6) Realizar jornadas de formación y concienciación para el personal de la Fundación Cueva de Nerja: grupo operativo, guías, vigilantes de salas, etc. 7) Reducción progresiva y eliminación final de los denominados Festivales de Música y Danza dentro de la cavidad; plan comenzado en 2015 y proseguido en 2016, con la reducción drástica del espacio escénico, los sistemas de luz y sonido así como los días. 8) Erradicación del interior de todo tipo de actividades que impliquen concentraciones puntuales de numerosos asistentes. 9) Necesidad de desarrollar un SIG como herramienta de gestión, que incluya el catálogo con TIC de todo el patrimonio y medios de la cavidad.

## **Agradecimientos**

Quisiéramos mostrar nuestro agradecimiento a la Fundación Cueva de Nerja por la financiación de P.G.I. Asimismo, gracias a todos y todas los/las investigadores/as que han formado parte del Proyecto. Especial mención merecen los/as colaboradores/as del Área de Prehistoria de la Universidad de Córdoba por su arduo esfuerzo en el trabajo de campo. Lamentablemente, no queremos olvidar a nuestra compañera Ana M<sup>a</sup> Márquez Alcántara quien inició este proyecto con nosotros y que desgraciadamente hoy no nos acompaña; nuestro trabajo va dedicado a ella.

## **Referencias**

- Aguilera, M., Alcaide, M. Á. M., y Alonso, A. R. 2015. Nuevas aportaciones al Neolítico Antiguo de la Cueva de Nerja (Málaga, España). *5º Congreso do Neolítico Peninsular*, Lisboa, 273-279.
- Alonso, M. y Albert, R.M. 2014. *Análisis de fitolitos de la Cueva de Nerja (Málaga)*. Informe inédito. Equipo de Investigación en Arqueología y Arqueometría, Universitat de Barcelona. Barcelona.



- Aranburu, A. y Berreteaga, A. 2009. *Estudio sedimentológico de la Sala de la Mina de la Cueva de Nerja*. Informe inédito. Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad del País Vasco. Bilbao.
- Aranburu, A., Berreteaga, A. y Alonso E. 2013. *Cueva de Nerja-Málaga. Sala Vestíbulo. Estudio Sedimentológico, Ortofotografía secuenciada estratigráfica*. Informe inédito. Departamento de Mineralogía y Petrología, Universidad del País Vasco. Bilbao.
- Jordá, J., Maestro, A., Aura, E., Álvarez, E., Avezuela, B., Badal, E., Morales, J.V., Pérez, M. y Villalba, M.P. 2011. Evolución paleogeográfica, paleoclimática y paleoambiental de la costa meridional de la Península Ibérica durante el Pleistoceno superior. El caso de la Cueva de Nerja (Málaga, Andalucía, España). *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural*, 105 (1-4), 137-147.
- Medina-Alcaide, M. A. 2014. Análisis antracológico de restos localizados junto a paneles de Arte Rupestre Paleolítico y puntos de iluminación fija de Cueva de Nerja (Málaga). *CKQ Estudios de Cuaternario*, 4, 55-65.
- Medina-Alcaide, M. A. 2015. Remains of prehistoric illumination into inner archaeological context of the decorated caves: types and archaeological potential/ Indicios de iluminación prehistórica en el contexto interno de las cuevas decoradas: tipos y potencial arqueológico. *IFRAO2015/ARKEOS*, 37, 505-510.
- Medina-Alcaide, M. A., Cristo, A., Romero, A., y Sanchidrián, J. L. 2010. Otro punto de luz. Iluminación estática en los 'santuarios' paleolíticos. El ejemplo de la Cueva de Nerja (Málaga, España). In: Clottes, J. (dir.), *L'art pléistocène dans le monde. Actes du Congrès IFRAO, Tarascon-sur-Ariège, Préhistoire, Art et Sociétés*, LXV-LXVI, 105-121.
- Medina-Alcaide, M.A., Garate, D. y Sanchidrián, J.L. 2015. Marking the way: Towards a multifunctional explanation of cave-wall evidence/ Marcando el camino: hacia una explicación multifuncional de las evidencias parietales en cueva. *IFRAO2015/ARKEOS*, 37, 499-503.
- Medina-Alcaide, M.A. y Romero, A. 2011. Iluminando el Paisaje Subterráneo: reflexiones iniciales y primeros resultados. In: Montalvo, E. and Sabastián, M. (coord.), *El legado artístico de las sociedades prehistóricas*, Zaragoza, 49-52.
- Medina-Alcaide, M. A. y Sanchidrián, J. L. 2014. Hacia el lado oscuro: cueva de Nerja a la luz de los nuevos datos. In: Corchón, M.S. and Menéndez, M. (eds.), *Cien años de arte rupestre paleolítico. Centenario del descubrimiento de la cueva de la Peña de Candamo*, Salamanca, 133-141.
- Medina-Alcaide, M. Á., Sanchidrián, J.L., y Peña, L. Z. 2015. Lighting the dark: Wood charcoal analysis from Cueva de Nerja (Málaga, Spain) as a tool to explore the context of Palaeolithic rock art. *Comptes Rendus Palevol*, 14(5), 411-422.
- Pérez-Jordá, G. y Peña-Chocarro, L. 2008. *Informe arqueobotánico de la Cueva de Nerja-Sala de la Mina. Campaña 2008*. Informe inédito. C.S.I.C. Madrid.
- Rios-Garaizar, U., Perales, R., Bourrillon, J., Jiménez-Mena, J., Garate, D. y Medina-Alcaide, M.A. 2015. Parietal artistic expression and discreet archeological data inside the paleolithic caves: use-wear analysis from Nerja and Etxeberri lithic assemblages. *IFRAO2015/ARKEOS*, 37, 489-494.
- Romero, A. y Medina-Alcaide, M. A. 2011. Contextualización del arte rupestre y frecuentación pleistocena en Cueva de Nerja (Málaga, España). In: Montalvo, E. and Sabastián, M. (coord.), *El legado artístico de las sociedades prehistóricas*, Zaragoza, 52-56.

- Romero, A., Cristo, A., Medina-Alcaide, M. A., y Sanchidrián, J. L. 2010. Datación del contexto arqueológico y frecuentación pleistocena en la Cueva de Nerja (Málaga, España). In: Clottes, J. (dir.), *L'art pléistocène dans le monde, Actes du Congrès IFRAO, Tarascon-sur-Ariège, Préhistoire, Art et Sociétés*, LXV-LXVI, 1105-1122.
- Sanchidrián, J.L., Carrasco, F., Fernández, M., Liñán, C., del Rosal, Y. y Márquez, A. 2008. Proyecto General de Investigación Interdisciplinaria Aplicada a la Conservación de Cueva de Nerja. *Anuario Arqueológico de Andalucía, 2008*. Sevilla.
- Sanchidrián, J.L., Carrasco, F., Fernández, M., Liñán, C., del Rosal, Y., Márquez, A., Medina-Alcaide, M.A. y Romero, A.J. 2008. Primera anualidad. Proyecto General de Investigación Interdisciplinaria Aplicada, Cueva de Nerja. *Anuario Arqueológico de Andalucía, 2008*. Sevilla.
- Sanchidrián, J.L., Medina-Alcaide, M.A., Liñán, C., del Rosal, Y., Ruiz, R.M., Carrasco, F., Hernández, M., Calaforra, J.M., Sáiz, C., Vadillo, I., López, F. y Laserna, J.J. 2015. Actividad Arqueológica: Prospección arqueológica superficial Cueva de Nerja, control climático, estudio de agentes y procesos de alteración y toma de muestras. *Anuario Arqueológico de Andalucía/2015*. Sevilla.
- Sanchidrián, J. L., Medina-Alcaide, M. A., y Romero, A. 2012. El «Gravetiense profundo» de la cueva de Nerja (Málaga, Andalucía, España). In: de las Heras, C., Lasheras, J.A., Arrizabala, A. and de la Rasilla, M. (eds.), *Pensando el Gravetiense: nuevos datos para la región cantábrica en su contexto peninsular y pirenaico*, Madrid, 501-511.
- Sanchidrián, J.L., Medina-Alcaide, M. A., y Romero, A. 2013. Nuevos enfoques en el arte paleolítico de Andalucía: El caso de la cueva de Nerja como paradigma. In: De la Rasilla, M. (coord.), *F. Javier Fortea Pérez: Universitatis Ovetensis Magister: estudios en homenaje*, Ediciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, 401-413.
- Sanchidrián, J.L., Medina-Alcaide, M.A., Romero, A., Ruiz, R.M., Aranburu, A., Berreteaga, A. y Alonso, E. 2012. Actividad Arqueológica de Urgencia: Control arqueológico de movimientos de tierra de la Sala del Vestíbulo de Cueva de Nerja (Málaga). *Anuario Arqueológico de Andalucía/2012*. Sevilla.
- Teixidó, T., Peña, J.A. y Carmona, E. 2009. *Prospección geofísica en dos salas de la Cueva de Nerja, Málaga*. Informe inédito. Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada. Granada.



## Inventario de cuevas con yacimientos arqueológicos en Asturias

P. Turrero García <sup>(1)</sup>, M.J. Domínguez Cuesta <sup>(1)</sup> y M. Jiménez Sánchez <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geología, Universidad de Oviedo (c/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005, Oviedo, Asturias, pturrero@geol.uniovi.es, dominguezmaria@uniovi.es, mjimenez@geol.uniovi.es)

---

### RESUMEN

Este trabajo presenta una base de datos de yacimientos paleolíticos completamente digitalizada realizada a partir de información arqueológica dispersa, que contiene un total de 313 registros de cavidades kársticas con restos de diferentes edades dentro del Paleolítico y con características geomorfológicas muy diversas. Una base de datos del tipo aquí presentado facilita la realización de estudios posteriores al sistematizar la recogida de datos y optimizar la búsqueda de información, y la metodología seguida puede ser utilizada para crear bases de datos de yacimientos arqueológicos pertenecientes a otras cronologías.

**Palabras clave:** Asturias, base de datos, digitalización, Paleolítico, SIG.

## *Inventario de cuevas con yacimientos arqueológicos en Asturias*

### ABSTRACT

*This contribution presents a database on Palaeolithic sites from scattered archaeological publications and reports. The database built in this study contains 313 Palaeolithic archaeological sites in caves and shelters with different geomorphological features. A database of this type would improve data retrieval by systematizing information intake from the original sources, and this would in turn simplify future studies on related topics. The methodology followed here can be applied to sites from any chronological period.*

**Key words:** Asturias, database, digitization, GIS, Palaeolithic.

### Introducción

La presencia de yacimientos arqueológicos en cuevas aporta gran interés a las mismas desde los puntos de vista científico, turístico y didáctico. Este interés responde a su valor patrimonial, fundamentalmente desde el punto de vista cultural, pero acompañado también del propio valor ligado al patrimonio kárstico natural (p.ej. Jiménez-Sánchez et al. 2011). A menudo, la información sobre dichas cuevas se encuentra muy fragmentada y repartida entre numerosos informes, artículos y reseñas publicados en diferentes fuentes, normalmente poco accesibles para el público general o, incluso, para la Administración encargada de gestionarlas. Así, la creación de una base de datos sistemática que recoja todos los yacimientos arqueológicos en cavidades de una región resulta útil para permitir una mejor gestión de este recurso y facilitaría la realización de estudios, regionales o a mayor escala, que pongan en valor la presencia de



estas cuevas en el territorio, lo que a su vez permitiría una difusión mayor y más documentada de su interés turístico.

En este contexto se presenta esta contribución, en la que se muestra la metodología aplicada para construir un inventario de cuevas con yacimientos del Paleolítico de Asturias que ya ha permitido publicar estudios regionales a nivel internacional (Turrero et al. 2013), así como un resumen de sus resultados.

## Zona de estudio

El área de estudio comprende la provincia española de Asturias ( $43^{\circ}40'00''\text{N}/42^{\circ}53'50''\text{N}-7^{\circ}12'00''\text{W}/4^{\circ}32'20''\text{W}$ ), que presenta un sustrato geológico fundamentalmente sedimentario, con una cobertera mesozoica y terciaria dispuesta sobre rocas paleozoicas intensamente deformadas y fracturadas (Pérez Estaún et al., 1988). Las formaciones carbonatadas suponen cerca de un tercio del territorio, y en ellas se forman las cavidades kársticas en las que pueden aparecer ocupaciones paleolíticas. Éstas incluyen ejemplos relevantes a nivel nacional e internacional (p.ej. el Sidrón, Lalueza-Fox et al., 2011, o la Peña de Candamo, Corchón Rodríguez et al., 2011), destacando por su interés patrimonial las cinco cavidades inscritas en 2008 en la Lista de Patrimonio de la Humanidad formando parte del Bien de referencia 310, denominado "Cueva de Altamira y arte rupestre paleolítico del norte de España" (U.N.E.S.C.O. 1992-2015).

## Material y métodos

Para llevar a cabo este estudio se consultó toda la bibliografía al respecto disponible y accesible, siendo una fuente importante las Cartas Arqueológicas disponibles en la Consejería de Cultura del Principado de Asturias. Las Cartas Arqueológicas o Inventarios Arqueológicos son producto del traspaso de funciones y servicios del Estado a la Administración regional en materia de Cultura (R.D. 3149/1983), que obligaba a la realización de un inventario del patrimonio histórico, artístico, arqueológico, paleontológico y etnológico de cada concejo en los que se divide la Comunidad Autónoma. Las Cartas Arqueológicas han sido realizadas, a partir del año 1986, por equipos o personas diferentes, en distintos momentos y con metodologías variadas, por lo que hay poca uniformidad en las informaciones recogidas en esos inventarios. La extensión, precisión, cantidad y calidad de la información que contienen varía mucho de unas a otras; así, en algunos casos el inventario es simplemente una actualización de información sobre el estado de yacimientos previamente conocidos, mientras que en otras se prospecta activamente el concejo.

Se consultaron las 68 Cartas Arqueológicas depositadas en el Servicio de Patrimonio de la Consejería de Cultura del Principado de Asturias, así como 109 documentos adicionales: noticias de excavaciones de urgencia, informes de excavaciones arqueológicas, artículos publicados en revistas especializadas y otras fuentes de información (véase la lista completa en Turrero et al. 2013: Anexos 1 y 2).

Con el fin de sistematizar la toma de datos se elaboró una ficha sintética de toda la información considerada como relevante, estandarizada para el total de yacimientos, que fue cumpli-

mentada para cada uno de ellos. Esta ficha incluye diversos campos en los que se recogen datos sobre la posición de los yacimientos, la fauna y arte presentes en los mismos e información relacionada con la investigación desarrollada en cada uno (Figura 1). Como no todas las Cartas Arqueológicas contienen la misma cantidad y/o calidad de información se optó por un modelo de ficha del tipo presencia/ausencia. El objetivo final de esta base de datos, estructurada en fichas con distintos campos, es que permita realizar búsquedas con diferentes criterios; de este modo se pueden llevar a cabo selecciones de los yacimientos de acuerdo con la información de cualquiera de los campos de la ficha.

Todos los datos se incluyeron en una hoja de cálculo para permitir su transferencia, tratamiento y análisis mediante SIG (Sistema de Información Geográfica). La posición de los yacimientos viene determinada en las Cartas Arqueológicas por pares de coordenadas (UTM en unos casos y Geográficas en otros). Con el fin de calibrar la precisión espacial de la información recogida en la bibliografía se realizaron diversas salidas al campo, para tomar datos de posición mediante un terminal de posicionamiento global (GPS) en 11 yacimientos, y se comprobó la localización de otros 20 a partir de ortofotografías a escala 1:5000.

La información cartográfica utilizada comprende cartografías vectoriales a escala 1:25000 (litología, cursos de agua, roquedos) y matriciales o *ráster* con un paso de malla de 5 m (Modelo Digital de Elevaciones), publicadas por la Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras del Principado de Asturias. Es importante tener en cuenta tanto el tamaño de píxel (en el caso de los datos tipo *ráster*) como la escala (en el caso de los datos vectoriales), ya que ambos determinan la resolución de todos los mapas que se basen en esta información. Así, la escala de trabajo se encuentra condicionada por la precisión de los datos de partida (Cartas Arqueológicas) y por la escala y el tamaño de píxel de las informaciones cartográficas utilizadas como base (1:25000 y 5 metros, respectivamente).

La captura, manipulación, almacenaje, análisis y edición de la información se ha llevado a cabo mediante el software ArcGIS (versión 9.2) de la casa comercial ESRI (*Environmental Systems Research Institute*).

Yacimiento: Cueva de La Ancenia/Cueva Ubaldo		Estacionalidad:	
Taoces (Las Regueras)		Presencia de arte:	
Posición: X: 745775 (5º 58' 03'') Y: 4808445 (43º 23' 10'') Z: 110		(conservación)	
Litología: Caliza de Montaña		Explotada turísticamente:	
Formaciones superficiales/suelos: Terra rossa		Estado de conservación: Regular	
Distancia a río/mar: 25 m (río Nora)		Excavado: X (¿por quién?) Vega del Sella	
Cronología (Paleolítico): Magdaleniense		Corte estratigráfico: Nivel/es de los restos de interés:	
(Excavada o en superficie/limpieza) Excavación		Datado:	
Ocupaciones posteriores: Guerra Civil (refugio)		Dataciones calibradas: Fechas:	
Presencia de		Imágenes:	
peces: (tipos)		Bibliografía: Carta Arqueológica de Las Regueras (1995)	
concheros: (X) anfibios:		Otros:	
faunas frías: de montaña: de bosque: X			
especialización: (tipos)			

Figura 1. Ejemplo de ficha de recogida de datos

## Resultados y discusión

Todo el proceso detallado en el apartado metodológico ha permitido crear un inventario georreferenciado y exhaustivo del Paleolítico asturiano que facilita la consulta y el tratamiento de los datos. Así, se han podido localizar 313 cavidades con yacimientos arqueológicos paleolíticos en Asturias, entre el total de más de 600 yacimientos paleolíticos de la región (Figura 2). Ejemplos del potencial de una base de datos de este estilo son los estudios ya publicados por el equipo (Turrero et al., 2011, 2013).

El análisis de la base de datos ha permitido establecer que las cavidades con evidencias de ocupación se distribuyen en altitudes entre los 3 y los 1045 m (con una preferencia clara por altitudes inferiores a los 300 ms.n.m), teniendo su boca de entrada en laderas de macizos kársticos cuya pendiente oscila entre 1 y 57 grados (con una preferencia clara por las pendientes menores de 20 grados) y una orientación preferente hacia el Sur. 52 de los yacimientos registrados presentaban muestras de uso u ocupación posterior al Paleolítico, desde la Edad del Bronce a la Edad Media, y otros diez fueron utilizados en época moderna, principalmente durante la Guerra Civil (como refugio, establo o polvorín) pero también más tarde (como garaje, campamento o incluso como sala de fiestas). La visión de conjunto proporcionada por la base de datos ha permitido agrupar los yacimientos paleolíticos en dos grandes grupos (grupo Nalón-Narcea y grupo oriental) y un grupo menor (rasas occidentales).

La validación de los datos de ubicación espacial de los yacimientos ha mostrado que en todos los casos los errores de posición eran menores de 40 m y arbitrarios (es decir, sin un sesgo preferente); por otra parte, para la mayoría de los yacimientos el error en la posición era menor

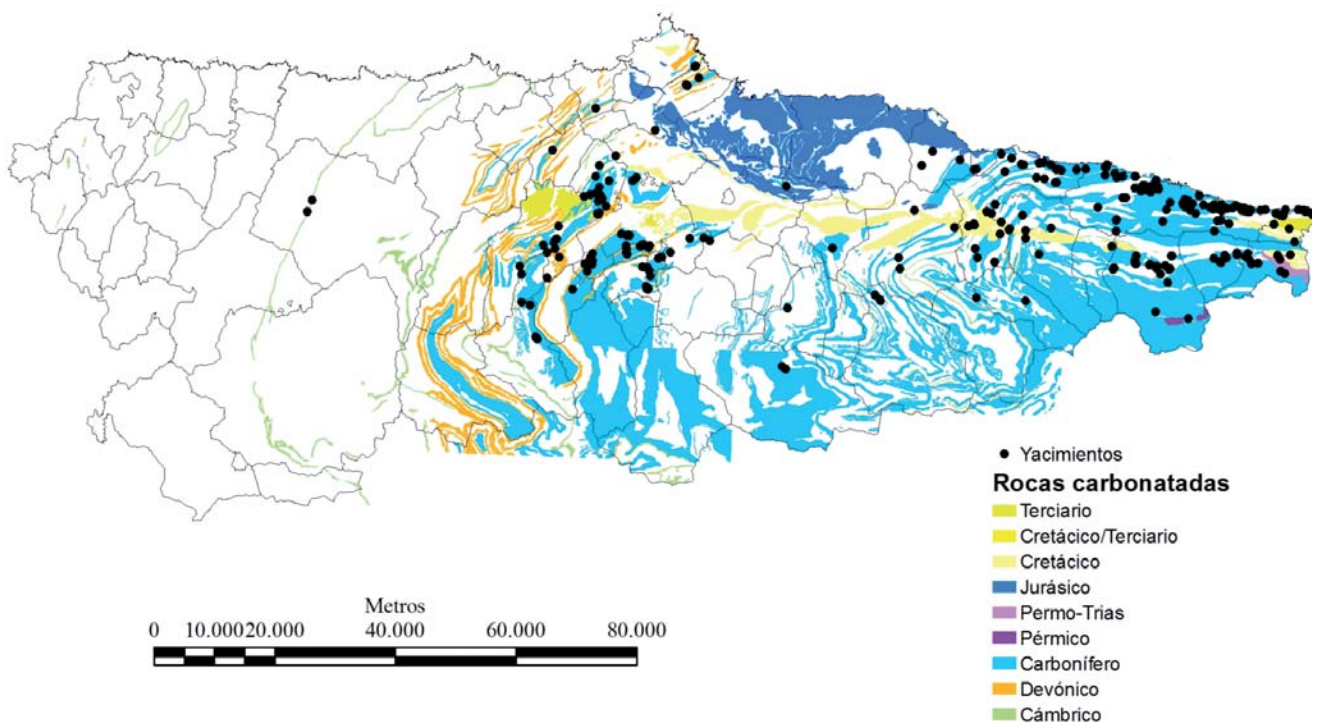


Figura 2. Localización de los yacimientos paleolíticos en cuevas en Asturias y su correspondencia con las formaciones carbonatadas

que la resolución del mapa. Por estos motivos se considera que las desviaciones son asumibles, ya que no afectarán de una manera sistemática a los resultados de un estudio basado en la información contenida en esta base de datos.

Por último, es interesante destacar que, según las Cartas Arqueológicas, 44 de los yacimientos paleolíticos asturianos en cuevas o abrigos presentan arte parietal, una característica de gran interés que potencia el interés turístico de las cuevas de la región.

## **Conclusiones y posible desarrollo**

La base de datos resultante supone un punto de partida sin precedentes en la investigación sobre el Paleolítico en Asturias y resulta vital para cualquier estudio que pretenda relacionar la posición de estos yacimientos con cualquier otra variable, permitiendo a la vez estudiar la interrelación de varias de éstas entre sí. Este trabajo proporciona una base metodológica para la contextualización general de los yacimientos paleolíticos en Asturias, mediante una base de datos que puede ser fácilmente actualizada, añadiendo nuevos yacimientos o nueva información a los ya contemplados en ella. Como aplicación inmediata, la base de datos resultado de este trabajo podría servir como punto de partida para la creación de un mapa de probabilidades que prediga la posición de nuevos yacimientos aún no prospectados, que sería de gran utilidad para la protección del patrimonio cultural asturiano (y con ello de gran interés para la Administración) o para futuros investigadores sobre el tema.

La metodología aquí presentada puede ser utilizada para crear bases de datos de cualquier cronología, siempre y cuando existan suficientes fuentes de información fiable. Sería interesante promover iniciativas de este tipo tanto a nivel de Comunidad Autónoma como a nivel nacional, ya que ello contribuiría a una mejor gestión del patrimonio arqueológico y cultural ligado a cavidades kársticas.

En lo concerniente a la promoción del turismo ligado a cuevas, inventarios de este tipo pueden ser una herramienta eficaz a la hora de establecer itinerarios temáticos, promover el conocimiento de este tipo de recurso, o planificar actuaciones de conjunto para la mejora de los accesos o presentar una imagen unificada de cara al público general.

## **Agradecimientos**

Este trabajo se enmarca dentro de las actividades del proyecto GEOCANTÁBRICA-GRUPIN14-044 financiado por la Consejería de Empleo, Industria y Turismo del Gobierno del Principado de Asturias y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

## **Referencias**

Corchón Rodríguez, M. S., Gárate Maidagan, D., González-Aguilera, D., Muñoz Nieto, Á. L., Gómez-Lahoz, J., y Sabas Herrero, J. 2011. Nouveaux regards sur la Grotte de La Peña (San Román de Candamo, Asturias, Espagne). *L'Anthropologie*, 115, 384-424.



- Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M. J., Aranburu, A. y Martos, E. 2011. Quantitative indexes based on geomorphologic features: a tool for evaluating human impact on natural and cultural heritage in caves. *Journal of Cultural Heritage*, 12(3), 270-278.
- Lalueza-Fox, C., Rosas, A., Estalrich, A., Gigli, E., Campos, P. F., García-Taberner, A., García-Vargas, S., Sánchez-Quinto, F., Ramírez, Ó., Civit, S., Bastir, M., Huguet, R., Santamaría, D., Gilbert, M. T. P., Willerslev, E. y de la Rasilla, M. 2011. Genetic evidence for patrilocal mating behavior among Neandertal groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(1), 250-253.
- Pérez-Estaún, A., Bastida, F., Alonso, J. L., Marquínez, J., Aller, J., Álvarez-Marrón, J., Marcos, A., y Pulgar, J. A. 1988. A thin-skinned tectonics model for an arcuate fold and thrust belt: the Cantabrian Zone (Variscan Ibero-Armorican Arc). *Tectonics*, 7(3), 517e537.
- Turrero, P., Domínguez Cuesta, M. J. y Jiménez Sánchez, M. 2011. Distribución espacial de yacimientos paleolíticos en Asturias: influencia de la geomorfología regional. *XIII Reunión nacional de Cuaternario. Andorra la Vella*, 239-242.
- Turrero, P., Domínguez Cuesta, M. J., Jiménez Sánchez, M. y García Vázquez, E. 2013. The spatial distribution of Palaeolithic human settlements and its influence on palaeoecological studies: a case from Northern Iberia. *Journal of Archaeological Science*, 40, 4127-4138.
- U.N.E.S.C.O. (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) 1992-2015. Cave of Altamira and Paleolithic cave art of Northern Spain. <http://whc.unesco.org/en/list/310> (accedido por última vez el 01/06/2016).

Martínez Villa, A. *et al.* Nuevos descubrimientos de arte paleolítico en cuevas de la comarca de Picos de Europa en Asturias (Benia de Onís). Recursos patrimoniales y geológicos para un turismo cultural y sostenible desde el Ecomuseo Centro de la Fauna Glacial de Avín (Onís, Asturias, España). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 515-526.

## **Nuevos descubrimientos de arte paleolítico en cuevas de la comarca de Picos de Europa en Asturias (Benia de Onís). Recursos patrimoniales y geológicos para un turismo cultural y sostenible desde el Ecomuseo Centro de la Fauna Glacial de Avín (Onís, Asturias, España)**

A. Martínez-Villa <sup>(1)</sup>, P. Solares Villar <sup>(1)</sup> y A. Alvarez Vena <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Ecomuseo Centro Fauna Glacial de Onís. Asturias

---

### **RESUMEN**

El hallazgo de dos cuevas en Onís (Asturias) con pinturas rupestres paleolíticas refuerza el trabajo de investigación y divulgación que se está haciendo desde el Ecomuseo Centro de la Fauna Glacial de Onís en Asturias. Estas evidencias de nuestro rico patrimonio arqueológico son parte del discurso expositivo del centro y se espera formen parte de las tareas de divulgación del mismo. El Centro busca fomentar con sus actividades un turismo responsable, cívico y sostenible que valore todos estos recursos naturales y arqueológicos. El eje de trabajo es el turismo subterráneo combinando las visitas al centro con rutas guiadas a diferentes cuevas.

**Palabras clave:** arte paleolítico, cuevas, turismo sostenible, turismo subterráneo.

### ***New discoveries of Paleolithic art in caves in the region of Picos de Europa in Asturias (Benia de Onís). Geological heritage and cultural resources and sustainable tourism from the Ecomuseum Center Glacial Fauna Avin (Onís, Asturias, Spain)***

#### **ABSTRACT**

*The discovery of two caves in Onís (Asturias) with paleolithic cave paintings reinforces the research and outreach is being done from the Ecomuseum Center Glacial Fauna de Onís in Asturias. These evidences of our rich archaeological heritage are part of speech exhibition center and expected to be part of the same outreach efforts. The Center seeks to foster its sustainable tourism activities responsible, civic and valuing all these natural and archaeological resources. The axis of the underground work is combining tourism center visits to different caves with guided tour.*

**Key words:** *caves, paleolithic art, sustainable tourism, subterranean tourism*

La comarca de Picos de Europa se sitúa en el extremo oriental del Principado de Asturias, en el centro de la cornisa cantábrica. Los Picos de Europa fueron constituidos en Parque Nacional en 1995 como ampliación del primer espacio protegido español –Parque Nacional de la Montaña

de Covadonga– declarado como tal en 1918. Forma parte del exclusivo Club de Reservas de la Biosfera (UNESCO, 9 de Julio de 2003).

Este espacio de especial biodiversidad está dominado por los imponentes macizos de calizas del Cornión, Urrieles y Ándara. Una comarca que tiene como principal característica conjugar biotopos alpinos con costeros en tan solo 30 kilómetros. Los Picos de Europa son producto de una gran actividad tectónica que hizo aflorar grandes masas calcáreas sumergidas a la que se unieron importantes procesos de mineralización. Sobre aquéllas actuaron intensos procesos geomorfológicos que propiciaron un original paisaje cárstico-glaciar. Este territorio tan particular y con gran cantidad de recursos naturales fue ocupado y aprovechado por el hombre desde el paleolítico. Sus cuevas sirvieron de refugio desde la prehistoria hasta nuestros días. Yacimientos que son objeto de investigación desde hace varias décadas. Sus riquezas minerales también fueron objeto de atención desde la Edad del Bronce pero especialmente desde mediados del siglo XIX con todos los procesos de industrialización en España y Europa. Por último, la actividad ganadera y pastoril –cuyo elemento más destacado ha sido la elaboración de queso en cueva– en un juego estacional verano-invierno ocupando valle y vegas altas. Una actividad trashumante que ha configurado espacio y cultura desde hace 4000 años.

Este compendio de recursos naturales, arqueológicos, históricos y etnográficos es la esencia, singularidad y materia prima para construir un destacado discurso expositivo atractivo al visitante y base de la investigación. Un juego de posibilidades y motor de desarrollo sostenible en la zona. Identificar, investigar, seleccionar, definir y construir productos dentro de un modelo de desarrollo sustentable social y medioambientalmente hablando. Actividad que se impulsa desde el Ecomuseo Centro de Fauna Glacial de Onís.

## **Introducción**

Aunque la comarca ha sido investigada durante décadas, el espacio, objeto de este trabajo, contaba con un inventario arqueológico de 1986 y algunos sondeos arqueológicos en varios yacimientos. Desde su apertura en 2010 el Ecomuseo Centro de Interpretación de la Fauna Glacial ha venido desarrollando tanto la actividad de gestión de las visitas a las grutas de La Cueva y Pozu la Peruyal en el municipio de Onís (Asturias) dentro del área del Parque Nacional Picos de Europa, como la investigación y divulgación del patrimonio arqueológico en la región y en concreto en esta comarca. La investigación, difusión y protección de nuestro patrimonio histórico, natural y arqueológico son parte de la visión y objetivos de este centro. Una labor que redundará en el desarrollo social y económico de la zona (Martínez Villa y Álvarez Vena, 2013).

Todas estas investigaciones permitirían acercarnos a una realidad histórica, analizar detenidamente los recursos patrimoniales y por tanto sus posibilidades para la divulgación a través de los centros reseñados. Y como se apuntaba anteriormente, como crear un discurso que conjugue los diferentes hallazgos y restos arqueológicos/paleontológicos, para ayudar a generar una visión clara de la evolución de la actividad humana en este territorio a lo largo del tiempo. Un discurso práctico, riguroso, documentado y claro que acerque al visitante a esa realidad histórica.

El Centro no sólo se ha ido enriqueciendo con contenidos expositivos propios sino que ha ido generando diferentes actividades: exposiciones temporales, publicaciones, conferencias, trabajo con colegios, excursiones etc. Actividades que acerquen al viajero a la historia y vida de la zona enriqueciendo la visita y haciendo al turista partícipe de la misma como parte de una experiencia de aprendizaje y ocio (un verdadero turismo de experiencias). Una experiencia que ayudara a la divulgación de valores conceptualizándose como un turismo cívico y sostenible. El objetivo final es dar a conocer nuestro patrimonio natural y cultural para que el el visitante pueda apreciarlo, valorarlo, protegerlo y difundirlo. En definitiva, que lo haga suyo.

Dentro de un de los grandes objetivos del centro se han venido desarrollando trabajos sobre la minería de cobre en la Edad del Bronce, estudios etnoarqueológicos sobre el pastoreo tradicional o la revisión de la Carta Arqueológica de la zona. Fruto de estas tareas es el descubrimiento de dos cuevas con pinturas y grabados rupestres: Pruneda y Soterraña. Dos estaciones que se unían a otra pequeña cavidad –El Molín– ya reconocido en 1986 por uno de nosotros.

El reconocimiento de estas grutas con arte rupestre prehistórico ha venido a engrosar la lista de lugares con evidencias artísticas del paleolítico superior en Asturias y especialmente en una zona donde, si bien abundaban los yacimientos de esta época, prácticamente –a excepción de la cueva del Buxu–, no se tenía conocimiento de más.

## **Descripción de los trabajos**

Las dos cuevas que centran principalmente este artículo (Molín y Pruneda) se sitúan en el valle del río Güeña, afluente del río Sella. Ambos forman parte del sistema hidrológico del macizo de Picos de Europa. El río Sella discurre de sur a norte, desde los Picos de Europa hasta la costa asturiana desembocando a la altura de la población de Ribesella-Ribadesella. En su curso medio se le une el río Güeña que fluye de este a oeste uniendo esta zona con otras dos cuencas: el río Las Cabras –que conecta el interior de la región con la costa– y el sistema del Cares (se trata de otras dos áreas de concentración. El valle Cares-Deva y el macizo de La Llera en la costa llanisca con las referencias de la desembocadura del río Bedón y la pequeña ría de Niembu). Las dos cuevas se encuentran en la cabecera del río Güeña pero forman parte de toda una red de asentamientos paleolíticos.

### **Cueva de Pruneda**

Conocida por la gente del lugar, ha sido utilizada para guardar ganado de manera tradicional y continuada. Desde los años 70 grupos espeleológicos han accedido y recorrido su sistema cárstico. Durante la realización de la Carta Arqueológica de 1986 fue incluida como yacimiento al detectarse algunas evidencias arqueológicas, pero no será hasta el año 2012 cuando un grupo de espeleólogos –coincidiendo con la revisión del Inventario Arqueológico del Concejo– encontrasen algunos trazos rojos en sus paredes. A partir de este primer hallazgo se realizó una primera evaluación e informe para la Consejería de Cultura y el Ayuntamiento de Onís. Actualmente se está llevando a cabo un estudio más detenido de la cavidad para determinar las diferentes zonas con arte y determinar los distintos episodios de ocupación de la misma.



Un trabajo que se viene realizando a la par que el Inventario Arqueológico de Onís por Mario Menéndez, Alberto Martínez, Juan Carlos Guisado, María José Bermúdez, Adrián Álvarez y Pablo Solares (adscritos al Ecomuseo Centro de Interpretación de la Fauna Glacial). Junto con otros profesionales como Beatriz García.

### *Localización*

La cueva de Pruneda (las coordenadas UTM (Dátum WGS84) de la boca son: 30 T X: 341297, Y: 4798831, y se sitúa a una cota de 444 m.s.n.m.) está situada sobre el valle del río Güeña, a la altura del pueblo de Benía. Se abre en el extremo sur de un poljé (pequeño poljé, al pie de un farallón rocoso, actuando ocasionalmente (en grandes crecidas) como sumidero temporal del pequeño curso de agua que vertebraba esta cuenca endorreica. En las condiciones hídricas habituales el caudal se sume en un ponor (sumidero kárstico) impenetrable situado a escasos 25 m al SO de la boca), al pie de un gran farallón calizo que cierra aquel por su lado norte, cantil formado sobre una falla tectónica. Una gran boca –al lado de un amplio abrigo– da paso a dos espacios. Una pequeña galería a la derecha y una gran sala a la izquierda. Al fondo de ésta la cueva sigue su desarrollo a través de una sima que da paso a un nivel inferior.

### *Descripción*

La boca (cota +0) se orienta hacia mediodía, con unas dimensiones de medidas amplias. En ella se aprecian dos espacios diferenciados: una sala horizontal a la izquierda, de techo bajo y sin solución de continuidad; y a la derecha una galería descendente de amplias dimensiones, la Galería de Entrada, de morfología freática (conforma un amplio tubo de presión) con presencia de grandes bloques producto del hundimiento de la visera de la boca. Tras una veintena de metros en continuo descenso el conducto amplía dimensiones y se bifurca. Por la izquierda prosigue la galería que veníamos siguiendo, hasta confluir poco más allá en la Sala Principal de la cueva. Por la derecha se desprende otro conducto amplio (Galería Superior), ligeramente en ascenso al principio y después en horizontal, que nos deja en una sala de dimensiones más modestas. Esta sala se abre sobre la Sala Principal (y también sobre la Galería de Entrada) a través de sendos balcones formando varios pozos verticales (entre 7 y 11 m). Esta Galería Superior de la derecha contiene dos paneles de pinturas y una zona de yacimiento.

La Sala Principal es de grandes dimensiones y techo elevado (con gran volumetría). Alberga en su lateral izquierdo (norte) los restantes paneles de pinturas, además de otros restos de interés arqueológico a lo largo de su superficie. Son dos las posibles continuaciones de la sala: una por la izquierda, tras realizar una corta escalada y la otra al fondo de la sala, a través de una serie de pozos verticales.

En el primer caso, tras efectuar una serie de trepadas delicadas, se alcanza la Galería Superior Norte, que alberga diversos restos arqueológicos. Continúa en ascenso con morfología freática (secciones circulares y grandes golpes de gubia) hasta alcanzar un culo de saco a cota -6.

Si seguimos por la otra vía, Vía de los Pozos, nos encontraremos con una serie de verticales encadenadas (P14+P10+P5+P9 para la vía principal) que nos depositan a cota -60 m en un nivel inferior de galerías, la Galería Principal. La Vía de los Pozos ofrece otras variantes de descenso,

pues son varias las chimeneas paralelas e interconectadas que encontramos en este tramo (la denominada Bloquera Intermedia). Una vez en su base, y superado un paso algo más estrecho, se llega a una sala relativamente amplia, la Sala Nottingham. Esta sala ofrece varias continuidades de escaso desarrollo, y otra mucho más evidente, hacia el norte. Si seguimos por esta nos encontraremos con una galería de morfología meandriforme formada a favor de una serie de diaclasas. Esta es la galería de mayor desarrollo de la cueva y presenta varios niveles. El de mayor continuidad es el nivel intermedio, pero en algunos puntos encontramos restos de otra galería meandriforme, a un nivel más alto, que se comunica mediante chimeneas. También existe un nivel aún más bajo, por el que circula el pequeño riachuelo sumido en las cercanías de la boca; este arroyo interior arranca de un pequeño sifón y finaliza en un punto bajo a cota -76 m (máxima profundidad de la cueva), en una estrechez impenetrable.

Si desechemos estos niveles inferior y superior, y proseguimos por la Galería Principal, esta empieza a ascender de forma decidida en una zona muy concreccionada, con abundantes y amplios gours. Concluye en otra sala amplia, la Sala Final, de la que parten algunas galerías menores de poco recorrido.

#### *Datos espeleométricos y apunte geológico*

El desarrollo del sistema alcanza 1088 m y un desnivel de -76 m. En la Cueva de Pruneda nos encontramos muy variadas morfologías, tanto formas de disolución-erosión como formas reconstructivas y sedimentarias. La cavidad se desarrolla en calizas del Carbonífero superior.

Entre las formas généticas encontramos tanto morfologías claramente freáticas (tubos de presión, golpes de gubia, cúpulas de disolución) como morfologías de origen vadoso (meandros estrechos a favor del diaclasado, marmitas, pozos y escalones verticales). Las primeras se sitúan principalmente en los niveles más altos de la cueva (Galería de Entrada y Galería Superior Norte), a cotas pocos metros por debajo del actual fondo del polje (pero también en cotas más profundas, como un ramal de la Sala Nottingham). Las morfologías vadosas, en cambio las encontramos principalmente en los niveles profundos de la cueva (Galería Principal y Nivel Activo).

Todo ello nos habla a las claras de una evolución del sistema kárstico y de un encajamiento relativamente rápido de los conductos. Evolución que debe relacionarse con los cambios en el nivel de base de los ríos Güeña y La Güesal.

Entre las formas de relleno y reconstructivas podemos distinguir:

1. Grandes clastos (caos de bloques) con origen en procesos gravitacionales. Lógicamente los encontraremos en las salas de mayor volumetría, como la Sala Nottingham, la Sala Final, y sobre todo la Sala Principal. En el caso de esta última, el volumen de materiales desprendidos de la bóveda es realmente impresionante, y todo indica que ha rellenado por completo las antiguas galerías que daban acceso a los niveles profundos de la cueva. Los pozos actuales de la Vía de los Pozos no serían sino grietas y huecos en el interior de este ciclópeo caos de bloques, muy cohesionado en la actualidad.

2. Espeleotemas y rellenos litoquímicos. Los encontramos a lo largo de toda la cavidad, pero con especial incidencia en la Galería Principal. En los niveles superiores y la Vía de los Pozos el concrecionamiento se reduce prácticamente a coladas y costras calcáreas. En las galerías profundas, en cambio, encontraremos diversidad de espeleotemas: estalagmitas y estalactitas (algunas excéntricas), grandes *gours*, columnas, coladas. Hemos documentado incluso algunas formas poco frecuentes, como pueda ser el caso de calcitas flotantes y de un par de pequeñas antiestalagmitas desarrolladas sobre los sedimentos arenosos de la Sala Final. El más espectacular de todos los espeleotemas es una amplia colada en la Galería Principal teñida de un color rojo vivo (probablemente debido a la presencia de óxidos de hierro), la Colada Roja, que de hecho ha dado nombre a todo ese sector de la cueva.
3. Rellenos sedimentarios. Más allá de los grandes clastos, encontramos otros tipos de sedimentos: cantos rodados, arenas y arcillas. Los cantos rodados son principalmente de cuarcita, y por tanto alóctonos, arrastrados al interior del sistema kárstico por el arroyo que recorre el poljé y la cueva. Las arenas son silíceas y tienen su origen en la meteorización de los cantos cuarcíticos. Unos y otros se encuentran en prácticamente todos los niveles de la cueva, con bancos de espesores importantes, de varios metros de potencia en algunos casos. Los cantos aparecen en ocasiones también como testigos colgados, lo que nos habla de una compleja historia de rellenos y vaciados de las galerías. Por su parte las arcillas, autóctonas principalmente, se localizan en la Galería Principal y, en menor medida, en la Sala Principal y la Sala Final, y en general en las galerías y conductos de menor pendiente.

Como curiosidad mencionar que en distintos puntos de la cueva podemos apreciar abundantes fósiles (principalmente artejos de crinoideos –incluso tallos completos–, pero también corales solitarios y algún braquiópodo espiriférido) y curiosas maclas de cristales de calcita, muy espectaculares.

### *Conjuntos de pinturas rupestres*

Los primeros trabajos –como se indicaba– han sido de reconocimiento de toda la cavidad identificando los diferentes paneles con vestigios de arte. En total se han reconocido cuatro puntos con figuraciones en rojo distribuidas en varios puntos de la cueva.

Conjunto A en la Galeria Superior, donde se han distinguido varios subconjuntos:

#### *Conjunto A.1: Panel de las Cabras*

El primer conjunto pictórico se encuentra a pocos metros de la entrada, en el acceso de la denominada Galería Superior. Ésta parte desde la boca de la gruta hacia la derecha avanzando unos 25 m hasta quedar colgada sobre la Sala Principal. Al comenzar la misma, en su pared derecha y sobre una pequeña repisa –a 80 cm del suelo actual–, se observan unas líneas rojas finas. Se trata de varias figuras de cápridos ejecutados en trazo rojo duro y continuo. Muy perdidas por la acción de algas y hongos que proliferan desde la base de la pared. Al menos

se observa cabeza, ojo, cuerno, cuello y lomo de una, y partes –morros y patas– de otras dos. Son figuras de unos 40 a 50 cms y de ejecución muy simple.

#### *Conjunto A.2: Panel de la Cabra*

El siguiente panel –avanzando hacia la izquierda y a 1,60 del suelo– lo forma otra figura –de unos 60 cm– que a simple vista se atribuyó a un cuadrúpedo. Una lectura más detallada parece indicar que sea trata de una cabra hembra con la cabeza vuelta hacia el lomo. Cerca se ven otros trazos rojos posiblemente un signo vulvar pintado entorno a una pequeña grieta natural. En este caso el trazo –aunque perdido– es más baboso y de un tono más ocre que las anteriores (el estado de las pinturas –muy deteriorado– ha obligado a aplicar una técnica de uso de diferentes filtros fotográficos aplicados por un software (*Dstretch* o *Decorrelation Stretching*), permite la recuperación de trazos aparentemente perdidos. Un primer análisis hecho por la Beatriz García, ha permitido detectar un área mayor de pintura en el panel de los signos y de las cabras.). La pintura se ha conservado parcialmente al adherirse con mayor fuerza a buena parte de restos fósiles de crinoides de la pared.

Finalmente, y sobre el arco que da paso al extremo de esta galería, se pueden observar una maraña de posibles grabados sobre la roca (dudosos). Realizados con un trazo simple, fino y poco profundo en la mayoría de los casos y aprovechando la costra más pululenta que se extiende sobre la pared fruto de la descomposición de las dolomías.

#### *Conjunto B. Galería Principal.*

El otro grupo de paneles se halla en el fondo de la galería principal. Se puede observar en la parte derecha un primer panel de trazos rojos posiblemente signos cuadrangulares en vertical con divisiones internas (¿tipo escaleriforme?) junto on otros trazos más perdidos. Éste antecede en unos metros a la figura de un ciervo que aprovecha el resalte de la roca para destacar su silueta, especialmente los cuartos traseros de los que se observa el arranque de la pata así como cierto sombreado correspondiente al pelaje en esa zona. La línea cérvico-dorsal acaba en la zona de los cuernos –muy perdidos–. Nuevamente se traza una línea en la base del cuello intentando representar la mancha de pelaje propia de los ciervos adultos. La cabeza perdida. Sin llegar a ser el mismo estilo tanto la forma como el tratamiento del color y la técnica nos recuerda a las figuras tamponadas de las cuevas de la zona cántabra de Ramales.

### **Cueva de Soterraña**

Al otro lado del valle de La Güesal – a menos de un kilómetro en línea recta de cueva Pruneda– se encuentran, al pie de un crestón calcáreo, las cuevas de Soterraña y Sopeña (Martínez-Villa 1986). Ésta última excavada hace varios años por Pinto (2012) y donde fueron registrados tres bloques de niveles: musterienses, auriñacienses y gravetienses (el bloque de ocupación Gravetiense y Paleolítico Superior Inicial corresponde a las capas I a XI con dataciones radiocarbónicas calibradas entre el 27.000 y 36.000 BC (24.300 y 32.870 BP convencional). La fecha más antigua corresponde al nivel, posiblemente se trate de una ocupación auriñaciense por fecha. Los niveles XII a XVI corresponden claramente al Musteriense. El nivel XII tiene una



fecha C-14 del 38.630+-800 BP y calibrada de 4119+-685 BC). Ambas cavidades se abren en la cara SO del Picu Castiellu y distanciada una de otra unos doscientos metros. Soterraña es una cueva con dos bocas que se unen en un véstíbulo amplio donde se pueden observar varios testigos con un nivel pardo oscuro de matriz arcillosa con restos de talla y huesos. Al fondo del vestíbulo principal se aprecia una galería a unos cuatro metros de altura a la que se accede ascendiendo por una colada estalagmítica. De dirección transversal al eje de la sala principal, presenta un desarrollo de unos cuatro metros. En uno de sus extremos, en la pared frontal de una hornacina, se aprecian varios grabados realizados en un trazo simple y poco profundo, en algunos casos cubiertos por cierta costra calcárea. No parecen representar ninguna forma concreta.

### ***Cueva del Molín***

Fue identificada tanto en sus pinturas como en sus restos arqueológicos durante la elaboración de la carta arqueológica en 1986.

Además de diferentes restos líticos y óseos de época paleolítica, se halló parte de una jarra cerámica trilobulada con decoración de ondas y de factura tosca y color grisáceo de apariencia altomedieval.

Las coordenadas UTM (Dátum WGS84) de la boca son: 30 T X: 341315, Y: 4799821, y se sitúa a una cota de 228 m.s.n.m.

Esta pequeña gruta había sido reconocida por uno de nosotros en 1986 detectándose un pequeño yacimiento arqueológico en su interior, así como algunas pinturas. La cueva era muy vistada por gentes del pueblo dejando numerosos grafitis en sus paredes, algunos de los cuales afectaron a las pinturas.

### *Localización*

Esta cueva de pequeño desarrollo se formó en la parte alta de un cueto calizo situado en el fondo del valle del río Güeña. Casi a la altura de la confluencia de éste con el río La Güesal y a unos doscientos metros de La Cueva de Avín.

Muy próxima (al este) existe otra cavidad, el Pozu'l Molín, que guarda una estrecha relación morfogenética con la que nos ocupa, aunque en la actualidad no están comunicadas.

### *Descripción*

La boca de esta cavidad –abierta al sur– es de escasas dimensiones y desciende casi en vertical dos metros hasta una pequeña bifurcación que da paso a dos galerías. A la derecha, se extiende como un tubo unos veinticinco metros acabando bruscamente en un culo de saco. Es al final de la misma donde se encuentran varios vírgulas, puntuaciones y manchas en ocre rojo intenso. La otra galería comienza en un pasaje estrecho por la izquierda y da paso a una sala algo más amplia e irregular, con algunos divertículos de muy escaso desarrollo.

### *Datos espeleométricos y geológicos*

Su desarrollo es de 89 m. y el desnivel -8 m. Nos encontramos en la Cueva'l Molín con una cavidad muy evolucionada, en la que diversos procesos posteriores enmascaran las morfologías genéticas. Únicamente en la galería de las pinturas nos encontramos morfologías claramente freáticas, pues en ella observamos los restos de un pequeño tubo que ha evolucionado de modo meandriforme, con presencia de golpes de gubia de pequeño tamaño. En el resto de la cueva dominan los procesos gravitacionales y reconstructivos, con presencia importante de rellenos sedimentarios de tipo arcilloso y arenoso, y sobre todo por numerosísimos y muy variados espeleotemas: estalactitas y estalagmitas, excéntricas, columnas, gours y aceras de calcita asociadas a ellos, corales, costras estalagmíticas, etc.

La otra cavidad próxima, el Pozu'l Molín, ofrece morfologías y espeleotemas semejantes, y dada la cercanía a nuestro centro ha sido empleada por el Ecomuseo de la Fauna Glacial de Onís en visitas con grupos reducidos de escolares. Su interés no se reduce únicamente a lo geológico y al ámbito de la prehistoria, sino que tiene también interés histórico (pintadas del s. XIX y de la Guerra Civil) y de tipo zoológico (murciélagos rinolófidos, opiliones, pseudoescorpiones, quilópodos, etc.).

### *Manifestaciones rupestres*

Las pinturas –en el fondo de la cueva– se ciñen principalmente a pequeños signos, en concreto puntos, vírgulas, líneas y haces de puntos. Fueron pintados en el lado derecho de la caverna formando un panel de 2,20 m. Todos los trazos están ejecutados en rojo y son de pequeño tamaño situándose entre una repisa a media altura y el techo de la galería. Comienzan –desde el fondo– con tres digitaciones en línea o pequeños puntos de dos cm; le sigue, un poco más abajo, otro de las mismas características. Volviendo a la parte superior se aprecian tres puntos como los iniciales asociados a un trazo en V sobre el que se pintó la única figura reconocible. Se trata de una cornamenta, cabeza, cuello y parte del lomo de una cabra en un color negro. Hacia el centro del panel se reconoce una forma más compleja formada por dos líneas ascendentes curvadas –una más corta que otra– en lo que parece una técnica de tamponado (sus medidas son unos 32 cm). Bajo esta forma se ven restos de pintura que podrían corresponder la misma forma. Siguen un punto y una vírgula (9 cm) en una posición inferior, cercana a la repisa antes mencionada. Finalmente, dos puntos como otros descritos y los restos de un tercero. En la bóveda se aprecia otra mancha roja muy perdida –de 72 cm de largo y 9 de ancho– que tras una observación detenida se puede decir que se trata de un haz de puntuaciones formadas por tres líneas haciendo una especie de meandro que parece interrumpido por una calcificación del techo. Finalmente, en la pared izquierda se pueden apreciar restos de pintura roja informe.

### **Otras grutas de interés geomorfológico y geológico**

El valle contiene numerosas cuevas algunas de ellas de gran interés y que se han añadido como recursos de cara a crear rutas y actividades espeleológicas desde el Centro de la Fauna Glacial.

### *Cueva de Puente Ingüanzu*

Se trata de una importante cavidad kárstica con más de 3 km de galerías. Se sitúa en el concejo de Cabrales, en el flanco izquierdo del río Casañu y a pocos kilómetros del centro Ecomuseo de la Fauna Glacial de Avín. Tiene tanto interés deportivo por sus numerosos obstáculos que, no obstante, no requieren el empleo de técnicas de progresión vertical. A su interés deportivo suma un indudable interés geológico-interpretativo. Tres elementos marcan su atractivo en este ámbito:

1. Formaciones estalagmíticas azules (probablemente debido a la presencia de vetas cupríferas) y otras vetas metálicas (hierro y manganeso).
2. Formaciones de yeso.
3. Abundantes fósiles en las paredes (crinoideos, braquiópodos, corales...)

### ***Cueva d'Alda o de la Rotura***

Alda es otra cueva próxima al Centro Ecomuseo de la Fauna Glacial de Avín, también situada en el vecino concejo de Cabrales. Se trata de una cavidad de corto recorrido, pero con gran volumetría y adornada de espectaculares espeleotemas, algunos de gran tamaño. Esta cueva ha sido trabajada por nosotros como iniciación para grupos reducidos de escolares por su facilidad y espectacularidad. Posibilita múltiples explicaciones sobre diferentes procesos de formaciones estalagmíticas, dada la profusión existente. Además, a escasos centenares de metros de la cueva se sitúa la Mina Delfina (o Mina de Alda), una importante explotación cuprífera fuera de uso que conserva el único castillete minero de la comarca oriental asturiana. Un vestigio industrial minero muestra del intenso laboreo al que se sometió la comarca entre mediados del siglo XIX y XX. Otro recurso más junto a la cercana Mina Milagro para el diseño de nuestros mapas de actividades culturales, deportivas y de natural.

### **Estudio de base para un planteamiento divulgativo**

El reconocimiento de estas dos estaciones de arte rupestre junto con otras cuevas y recursos patrimoniales de la zona ha llevado al equipo de gestión del Centro a plantear un proyecto de estudio global. Comenzando por la topografía de yacimientos y cuevas, la descripción de las diferentes manifestaciones artísticas, la documentación gráfica utilizando distintas técnicas fotográficas que ayuden a la restitución virtual de las figuras, la toma de muestras de la composición de pigmentos para cruzar los datos con pinturas rojas de cuevas próximas también en estudio, etc.

Todo este trabajo de campo buscaría un doble objetivo, por un lado estudiar a fondo estas y otras manifestaciones de arte paleolítico de la zona, por otro, generar la suficiente documentación —en especial gráfica— que dote de contenidos el Centro de la fauna Glacial. Crear, a través de la fotografía, paneles que permitan introducir al visitante del Ecomuseo en el mundo del arte paleolítico y en la mejor comprensión de la vida y espiritualidad del hombre de aquella

época. La comprensión y respeto de esta parte de nuestro patrimonio a la vez que enriquece la visita tanto a la cueva de La Peruyal con sus restos paleontológicos como a La Cueva con sus reproducciones sobre la fauna cuaternaria contextualizando mejor ambos. El eje de contenidos es el mundo subterráneo. Esa parte teórica explicada desde el centro se complementa con la visita de los diferentes recursos (esa conjunción de evidencias de arte rupestre –en especial la cueva de Pruneda– con la actividad de visitas en Cueva, Peruyal, Molín, Alda o Puente Ingüanzu junto a antiguas explotaciones mineras (Delfina o Milagro) son parte de los recursos patrimoniales y culturales con los que se cuenta.). El objetivo es proporcionar al visitante el conocimiento, a través del diseño de varias rutas guiadas y explicadas que incluyen el acceso a diferentes cuevas, de:

1. Como fueron los procesos geológicos y geomorfológicos que favorecieron la formación de cavidades kársticas y su evolución.
2. La fauna troglodita de las mismas.
3. Cómo nuestros antepasados aprovecharon las cuevas para vivir y hacer sus prácticas rituales y espirituales.
4. Como era la vida y fauna cuaternaria en la zona, y su aprovechamiento por el hombre a lo largo de la historia.

## Referencias

- Martínez-Villa, A. 1986. *Carta arqueológica de los Concejos de Onís y Cangas de Onís*. Universidad de Oviedo. Tesina Inédita.
- Martínez-Villa, A y Requejo, O. 1986. Aproximación cronológica de una serie de hallazgos cerámicos medievales en Asturias. *I Congreso de Arqueología Medieval Española*. Huesca 1985. Tomo.V, 333-346
- Martínez-Villa, A y Alvarez Vena, A. 2013. "El patrimonio arqueológico y minero en la comarca de Picos de Europa. Investigación y aplicación para un turismo sostenible." Comunicación en el *XIV Congreso sobre Patrimonio Geológico y Minero*. Castrillón (Asturias).
- Pinto, A y otros. 2012. The Sopeña Rockshelter a New Site in Asturias (North of Spain) bearing evidences on the middle and early upper paleolithic in northern iberia. *Munibe* 63, 45-79.











PATROCINAN



**Unión Europea**

Fondo Europeo Agrícola  
de Desarrollo Rural



JUNTA DE ANDALUCÍA

CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO



diputación de **málaga**



Excmo. Ayuntamiento de Málaga

ISBN 978-84-617-4702-3