

cuevaTUR 2014

I CONGRESO IBEROAMERICANO Y V CONGRESO ESPAÑOL SOBRE CUEVAS TURÍSTICAS

iberoamérica subterránea

Editores:
José María Calaforra
Juan José Durán

CONVOCA



ORGANIZA



Ayuntamiento de
Aracena
Consejo de Desarrollo Local y Turismo

CUEVATUR²⁰¹⁴

I CONGRESO IBEROAMERICANO Y V CONGRESO ESPAÑOL SOBRE CUEVAS TURÍSTICAS

iberoamérica subterránea

José María Calaforra y Juan José Durán (Editores)

Aracena, 2014

Selección de trabajos del Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas,
celebrado en Aracena (Huelva), en octubre de 2014

Cuevatur. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas / José María Calaforra y Juan José Durán, eds. - Aracena: Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), 2014.

496 pág. ; 24 cm
ISBN: 978-84-617-1908-2

1 Turismo Subterráneo. 2 Gestión y Conservación. 3 Control Ambiental. 4 Geoespeleología. 5 Bioespeleología.

Portada: Vistas panorámicas de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva)
Foto: LovetheFrame (Archivo del Ayuntamiento)
Diseño: Manuel Rodríguez

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: 978-84-617-1908-2

Depósito legal:

Diseño y maquetación:  gestocomunicación

Imprime: Egondi Artes Gráficas

ÍNDICE

1 Turismo Subterráneo

	Pág.
Eduardo Rebollada, Francisco J. Fernández-Amo y Rafael Pagés-Rodríguez. Turismo Subterráneo en Extremadura. <i>Subterranean tourism sites in Extremadura</i>	011
Francisco-Javier Carrasco-Milara. La transformación de una instalación minera en patrimonio mundial. El caso del Parque Minero de Almadén. <i>The transformation of a mining installation in World Heritage. The case of Almaden Mining Park</i>	019
Raúl Palacio Portillo. Cueva de Pozalagua. Mejor Rincón 2013 de la Guía Repsol. <i>Pozalagua Cave: Best Corner 2013 in Repsol Motoring Guide</i>	031
M. Paz Dorado-Martínez. La Mina Costanaza como motor de desarrollo rural: Proyecto Minas de Logrosán. <i>Costanaza mine as engine for rural development: Minas de Logrosán Project</i>	041
Francisco J. Fernández-Amo, Eduardo Rebollada-Casado y Pedro Muñoz-Barco. Actuaciones geoturísticas en el Monumento Natural Cuevas de Fuentes de León (Badajoz, Extremadura). <i>Tourism actions in the Natural Monument of Cuevas de Fuentes de León (Badajoz, Extremadura)</i>	051
Elias José da Silva y Jéssica Alecsandra de Jesus Silva. Análise de potencial para proposição do primeiro roteiro espeleoturístico do estado de Sergipe, Brasil. <i>Analysis of the potential of the proposal of the first speleotourism itinerary in the state of Sergipe, Brazil</i>	059
Marcela C. Pimenta, Patricia R. Pereira, Heros A. Lobo. Curso de capacitação para guias e condutores de espeleoturismo: aprimoramento da experiência turística em cavernas na bacia do Rio São Francisco (Brasil). <i>Cave tourism guides and conductors training course: improvements for the tourist experience in the caves of São Francisco River basin (Brazil)</i>	067
Víctor Ferrer y Michel Renda. Imagen para la exposición espeleológica Spéléorama en el viaducto de Millau (Francia). <i>Special display for the speleological exhibition in the Viaduct of Millau (France)</i>	077
Ilda Calçada e José António Crispim. Grutas turísticas e divulgação do património espeleológico em Portugal: o caso do Programa Geologia no Verão. <i>Show caves and dissemination of the speleological heritage in Portugal: the case of the program Geology in Summer</i>	089
Marcos Luís Faleiros Lourenção, Lívia Medeiros-Cordeiro, Lucas Padoan de Sá Godinho, Rodrigo Borghezán, José Antonio Basso Scaleante, José Ayrton Labegalini, Silmara Zago, Keny Marques Lima e Heros Augusto Santos Lobo. Gruta do Mateus (Bonito, Serra da Bodoquena): Caracterização ambiental, propostas de uso turístico e implantação da mais nova caverna turística brasileira. <i>Mateus Cave (Bonito, Serra da Bodoquena, Brazil): Environmental characterization, tourist use proposition and implementation of the newest Brazilian show cave</i>	101
Raquel Morales-García, José Antonio Domínguez-Sánchez, Leticia Vega-Martín y Juan José Durán-Valsero. La aplicación para dispositivos móviles de los Lugares de Interés Hidrogeológico de la provincia de Alicante. Un recurso turístico de última generación. <i>Mobile App for the Hydrogeological Interest Sites in the province of Alicante. A new generation of tourist resources</i>	113

2 Gestión y Conservación

	Pág.
Rubén Pérez-Álvarez, Gema Fernández-Maroto y Julio-Manuel De Luis-Ruiz. Modelización tridimensional con láser escáner en el complejo El Soplao. <i>Laser scanner 3D modelling of El Soplao complex</i>	127
Yolanda del Rosal, Cristina Liñán, José-Luís Sanchidrián y Francisco Carrasco. Recuperación del paisaje subterráneo en la Cueva de Nerja (Málaga, Andalucía). <i>Recovering the underground landscape of the Nerja Cave (Málaga, Andalucía)</i>	139
Eleuterio Baeza-Chico y Juan-José Durán-Valsero. Proceso de realización de moldes y réplicas de un espeleotema singular: el caso de "La Palmatoria", Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva). <i>Process of making molds and replicas of a unique speleothem: the case of "The Candlestick" Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva)</i>	149
José Antonio Mora-Luque. La Cueva del Yeso de Baena: ejemplo de conservación y protección. <i>The Gypsum Cave of Baena: an example of conservation and protection</i>	159
A. Láinez, Francisco M. Mesa, Conny Finke, Dragan Milenkovic. La Cueva del Viento, otra forma de interpretar y percibir el mundo subterráneo turístico. <i>The Wind Cave, another way to interpret and perceive the underworld world</i>	169
Hugo Rodrigues de Araujo, Arnaldo Freitas de Oliveira (jnr.) y Alexsander A. Azevedo. Valoração de serviços ambientais e a sustentabilidade do uso público de uma cavidade natural em Minas Gerais, Sudeste do Brasil. <i>Valuation of ecosystem services and the sustainability of public use of a natural cavity in Minas Gerais, Southeastern Brazil</i>	179
Lorenzo Jiménez-Cabrera, José López-Mena y José María Calaforra. Escaneado 3D de la Geoda Gigante de Pulpí y galerías principales de acceso: utilidad para su futura adecuación turística. <i>3D Scanning of the Giant Geode of Pulpí and its main access galleries: a useful tool for future tourist adaptation</i>	187
3 Control Ambiental	Pág.
Emilio Guirado, Fernando Gázquez, Ángel Fernández-Cortés, Alfredo Argumosa, y José María Calaforra. Cálculo de la visitabilidad máxima en cavidades turísticas mediante el método Cavix: El Soplao (Cantabria). <i>Calculating the maximum visitability in show cave by the Cavix method: El Soplao (Cantabria)</i>	199
Núria Monés-Cera, Montserrat Salvà-Catarineu, Ferran Salvador-Franch. Caracterización microclimática de las "Cuevas del Salnitre" (Montserrat, Catalunya). Primeros resultados. <i>Microclimatic characterization of the "Salnitre" Caves (Montserrat, Catalunya). First results</i>	205
José-Antonio Gázquez, Núria Novas, Jaime MacLennan, Rosa García y Manuel F. Ros. Telecontrol ambiental en tiempo real de la cueva de El Soplao. <i>Real-time environmental monitoring system of El Soplao cave</i>	215
Cristina Liñán-Baena, Yolanda del Rosal-Padial y Francisco Carrasco-Cantos. Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España). <i>Control of environmental parameters in the no-tourism sector of Nerja Cave (Málaga, Spain)</i>	229
Ángel Fernández-Cortés, Soledad Cuezva, Elena García-Antón, Miriam Álvarez-Gallego, Beatriz Cabeza, Consuelo Temiño, José-María Calaforra, Sergio Sánchez-Moral. Monitorización de las condiciones microambientales, hidrogeoquímicas y de conservación del sistema kárstico subterráneo de Ojo Guareña (Burgos). <i>Monitoring microenvironmental, hydrogeochemical and conservation conditions in the underground karst system of Ojo Guareña (Burgos)</i>	239

Sonia Santiago-Álvarez. Metodología aplicada en la cueva El Soplao para la medición de radón con detectores de cámara iónica de electretes. *Methodology applied in the Soplao cave for radon measurements with electret ion chambers*.

Alfredo Láinez, Ismael Fuente, Luis Quindós-López, José Luis Arteché, Carlos Sainz-Fernández, José Luis Gutiérrez-Villanueva, Luis S. Quindós-Poncela. Experiencia de dosimetría personal de radón en la Cueva del Viento. *Experience on personal radon dosimetry at the so-called Cueva del Viento*.

Carlos Sainz-Fernández, Ismael Fuente-Merino, Luis Quindós-López, Roberto Ontañón, R. Gutiérrez Rodríguez, José Luis Gutiérrez-Villanueva, José Luis Arteché, Luis S. Quindós-Poncela. El radón, un gas radiactivo de origen natural incluido como riesgo laboral: El caso de las cavidades subterráneas. *Radon, a radioactive gas from natural source included as labor risk: the case of underground cavities*.

Luis Quindós, Luis Santiago Quindós, Ismael Fuente, Wenceslao Martín-Rosales, Manuel López-Chicano y José Benavente-Herrera. Contenido de radón en aire en la Gruta de las Maravillas (Aracena). Primeros resultados. *Radon gas content in the Gruta de las Maravillas (Aracena). First results*.

4 Geoespeleología

	Pág.
Fernando Gázquez, Fernando Rull, José-María Calaforra, Emilio Guirado, Aurelio Sanz, Jesús Medina, Carmen de las Heras, Alfredo Praday José Antonio Lasheras. Análisis no destructivo e <i>in situ</i> de minerales y pigmentos en cuevas mediante espectroscopia Raman. <i>In situ non-destructive analysis on paintings and cave minerals using Raman spectroscopy</i>	297
Fernando Gázquez, Giovanni Badino, José-María Calaforra y Paolo Forti. Estrategias de conservación de los cristales de yeso gigantes. <i>Conservation strategies of the giant gypsum crystals</i>	307
Antonio González Ramón, Andrés Segura Herrera, Tomás J. Sánchez Díaz, Alex Ignatenko, Raúl D. Gea López, Pedro Pérez Martínez, Gonzalo Belmonte Jiménez y Rubén Carra Vélez. La cueva de Luchena, un ejemplo de cavidad hipogénica relacionada con descargas de aguas subterráneas en el acuífero Pericay-Luchena (Lorca, Murcia). <i>Luchena cave, an example of hypogenic cave related to the discharge of the Pericay-Luchena aquifer (Lorca, Murcia)</i>	319
Concepción Pla, María-Concepción Muñoz-Cervera, Miguel-Ángel Rodríguez-García, Jaime Cuevas-González, José-Miguel Andreu, María-Ángeles García-del-Cura, Soledad Cuezva, Juan-Carlos Cañaveras y David Benavente. Espeleotemas en la cueva del Rull (Vall d'Ebo, Alicante). <i>Speleothems in the cave of Rull (Vall d'Ebo, Alicante)</i>	331
Pedro A. Robledo, Juan José Durán y Alba Tienda. Análisis de espeleotemas mixtos y su relación con paleoniveles eustáticos en la Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca, España. <i>Analysis of mixed speleothem and the relation to eustatic paleolevels in the Vallgornera Cave, Mallorca, Spain</i>	341
José Benavente, Iñaki Vadillo, Cristina Liñán, Francisco Carrasco, Albert Soler y Carmen Almécija. Heterogeneidades hidrogeológicas en el entorno de la cueva de Nerja (Málaga). Consideraciones sobre la evolución karstogénica. <i>Hydrogeological heterogeneities in the vicinity of the Nerja Cave (Málaga). Considerations on the karstogenesis evolution</i>	351
Francisco José Martínez-Moreno, Jesús Galindo-Zaldívar, Antonio Pedrera, Teresa Teixido, José Antonio Peña, Lourdes González-Castillo, Patricia Ruano, Ana Ruiz-Constán, Manuel López-Chicano, Wenceslao Martín-Rosales y Antonio Azor. Integración de métodos geofísicos para el estudio de cavidades en el sistema kárstico de la Gruta de las Maravillas (Aracena).	359

José António Crispim, Ricardo Constantino y João Duarte. Espeleomergulho nas Grutas de Mira de Aire: importância para o conhecimento da rede espeleológica, a captação de água subterrânea e a divulgação das grutas turísticas. *Cave diving in Mira de Aire caves: importance to speleological knowledge, groundwater exploitation and show caves advertising*. 371

Francisco José Martínez-Moreno, Antonio Azor, Jesús Galindo-Zaldívar, Antonio Pedrera, Patricia Ruano, Manuel López-Chicano, Wenceslao Martín-Rosales. Estructura geológica del Cerro del Castillo y formación de la Gruta de las Maravillas (Aracena). *Geological structure of the Cerro del Castillo Hill and formation of the Gruta de las Maravillas (Aracena)*. 379

Adela Hódar-Pérez, Manuel López-Chicano, Francisco José Martínez-Moreno, Wenceslao Martín-Rosales, Jesús Galindo-Zaldívar, Antonio Azor, Antonio Pedrera y Patricia Ruano. Aportaciones al conocimiento hidrogeológico de la Gruta de las Maravillas (Aracena). *Contribution to the hydrogeological knowledge of the Gruta de las Maravillas (Aracena)*. 391

Andrés Ros, José-Luís Llamusí y Juan Sánchez . Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España). *Hypogenic caves in the Murcia Region (Spain)*. 403

5 Bioespeleología

Pág.

Isabel M. Belda-García, Pablo Barranco-Vega y Jaime García-Mayoral. Protección de la fauna invertebrada cavernícola en Andalucía. *Protection of the invertebrate cavernicolous fauna in Andalusia*. 419

Valme Jurado, Mariona Hernández-Mariné, Miguel Ángel Rogerio-Candelera, Irene Domínguez-Moñino, S. Gutiérrez-Patricioy Cesáreo Saiz-Jiménez. La Cueva del Tesoro: un paraíso microbiano. *Cueva del Tesoro: a microbial paradise*. 431

Raquel Daza y María-Ángeles Bustillo. Distribución, composición y génesis de espeleotemas silíceos en la cueva volcánica de Algar do Carvão: Terceira, Islas Azores, Portugal. *Distribution, composition and genesis of the opal speleothems in the Algar do Carvão volcanic cave (Terceira, Azores Islands, Portugal)*. 441

Irene Domínguez-Moñino, Valme Jurado, Bernardo Hermosín y Cesáreo Sáiz-Jiménez. Aerobiología de la Gruta de las Maravillas. *Aerobiology of the Gruta de las Maravillas*. 451

Yolanda del Rosal-Padial, Mónica Roldán-Molina y Mariona Hernández-Mariné. Biofilms fotosintéticos en la Cueva de Nerja: *Chroococcidiopsis* sp. *Photosynthetic biofilms in Nerja Cave: Chroococcidiopsis sp.* .. 463

Federico Ramírez-Trillo, Manuel José González-Ríos. Cueva de las Ventanas, 14 años de experiencias del mal verde y criterios para una nueva iluminación con diodos leds. *Cueva de las Ventanas, 14 years testing on lampenflora for a new LED lighting diodes design criteria*. 473

Félix L. Figueroa, Nathalie Korbee, Paula Celis-Plá, Celia G. Jerez, Félix Álvarez-Gómez, Yolanda del Rosal y Mariona Hernández-Mariné. Monitorización del estado fisiológico de los biofilms de la Cueva de Nerja (Málaga) mediante la fluorescencia in vivo de la clorofila a asociada al Fotosistema II. *Monitoring of physiological status of biofilms in Nerja cave (Málaga) by using in vivo chlorophyll a fluorescence by photosystem II*. 485

Prólogo

Este libro, titulado *Iberoamérica subterránea*, contiene una serie de trabajos relacionados directa o indirectamente con el ámbito del turismo subterráneo, desde una perspectiva múltiple, que aborda los aspectos de gestión, conservación y de investigación. Todos los trabajos que se incluyen fueron presentados en el transcurso de las sesiones del V Congreso Español sobre Cuevas Turísticas (CUEVATUR 2014) y el I Congreso Iberoamericano sobre Cuevas Turísticas, celebrados conjuntamente en la villa española de Aracena (Huelva) del 2 al 4 de octubre de 2014. Dicho año se celebra una efeméride fundamental en la historia de la localidad onubense, conmemorándose el centenario de la habilitación turística de la Gruta de las Maravillas, uno de los pilares del patrimonio de Aracena y símbolo de identidad de la localidad.

En esta quinta edición de CUEVATUR se han presentado 46 trabajos, lo que supone una consolidación al alza desde el inicio de este tipo de citas periódicas del mundo subterráneo. En esta ocasión, la Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), junto con la Asociación de Cuevas Turísticas Iberoamericana (ACTIBA) se han aliado para impulsar la puesta en común de experiencias de uno y otro lado del Océano Atlántico. Se han recibido trabajos procedentes de Brasil, Portugal, Francia y España. En lo referente al ámbito nacional, existen aportaciones de 17 cavidades turísticas españolas, incluyendo algunas minas, como es el caso de las de Almadén (Ciudad Real), declaradas recientemente Patrimonio de la Humanidad. La distribución geográfica de los trabajos pasa por numerosas comunidades autónomas: Andalucía, Extremadura, Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana, Cantabria, Canarias, Cataluña, Murcia y Castilla y León.

En esta edición de CUEVATUR, vuelven a destacar los trabajos procedentes de equipos de investigación consolidados, algunos de ellos en torno a grandes cavidades españolas, como Nerja, El Soplao o la propia Gruta de las Maravillas. No obstante, también aparecen nuevos focos de interés en relación con cavidades aún poco estudiadas y que a buen seguro, en el futuro serán merecedoras de estudios e investigaciones de más detalle.

Los trabajos que se presentan se pueden agrupar en tres grandes grupos: los relacionados con el turismo y la gestión en cavidades turísticas por un lado, los relativos al control ambiental por otro, y los referidos a aspectos de la geo y bioespeleología en tercer lugar. En el primero se agrupan 18 trabajos, con una temática diversa y variada. En el segundo, con 10 trabajos, destacan los relativos a la presencia de radón en cavidades turísticas como tema clave. En el tercero, con otros 18 trabajos, resaltan algunos aspectos más científicos, como las cavidades hipogénicas, los condicionantes hidrogeológicos de las cavidades o la fauna microbiana subterránea.

Es importante reseñar que en el proceso de revisión de los trabajos presentados en este libro han participado numerosos expertos en los diferentes ámbitos relacionados con el karst y las cavidades turísticas. Estos pertenecen a 19 instituciones diferentes, que incluyen universidades, centros de investigación y distintos organismos de las administraciones públicas. Se agradece encarecidamente la desinteresada colaboración de: Pablo Barranco Vega, Juan Carlos Cañaveras Jiménez, Francisco Carrasco Campos, José Antonio Cuchí Oterino, Soledad Cuezva Robleño, Ángel Fernández Cortés, Policarp Garay Martín, Fernando Gázquez Sánchez, Joaquín Ginés Gracia, Ángel Ginés Gracia, Mariona Hernández Mariné, Cristina Liñán Baena, Manuel López Chicano, Wenceslao Martín Rosales, Ana Isabel Ortega Martínez, Antonio Pulido Bosch, Luis Santiago Quindós Poncela, Pedro A. Robledo Ardila, Joaquín Rodríguez Vidal, Yolanda del Rosal Padial, Cesáreo Sáiz Jiménez, Sergio Sánchez Moral, Heather Stoll y Juan Ramón Vidal Romaní

José María Calaforra Chordí
Juan José Durán Valsero,
Editores

The image shows a cave interior with numerous stalactites hanging from the ceiling and stalagmites growing from the floor. The lighting is dramatic, highlighting the textures and colors of the rock formations. The overall scene is a typical representation of a cave's natural beauty.

1 TURISMO SUBTERRÁNEO

Turismo subterráneo en Extremadura

Francisco J. Fernández-Amo⁽¹⁾, Eduardo Rebollada-Casado⁽²⁾ y Rafael Pagés-Rodríguez⁽³⁾

(1) Técnicas Mineras de Santa Marta, S.L. (C/ Estatuto de Autonomía s/n, 06150, Santa Marta, Badajoz) (francis@tecmineras.com)

(2) Dirección General de Industria y Energía de la Junta de Extremadura. (Paseo Roma, s/n. 06800 Mérida (Badajoz) (eduardo.rebollada@hotmail.com)

(3) Dirección General de Turismo de la Junta de Extremadura. (Avda. de las Comunidades, s/n. 06800 Mérida (Badajoz) (rpagésr@citop.es)

RESUMEN

En Extremadura existen varios espacios subterráneos (cuevas y minas) que son visitables o que lo serán próximamente. Actualmente se visitan dos conjuntos kársticos: Cuevas de Fuentes de León y Cueva de Castañar de Ibor, y tres minas (Mina Jayona, en Fuente del Arco; Mina Costanaza, en Logrosán, y Mina Pastora, en Aliseda). Además de estos cinco espacios existen otros dos proyectos que se están desarrollando actualmente y que próximamente serán visitables: Minas de Santa Marta (Santa Marta de los Barros) y Mina Monchi (Burguillos del Cerro). El turismo subterráneo en Extremadura cuenta unas 35.000 visitas anuales. Tanto el mantenimiento, como las nuevas actuaciones que por parte de entidades públicas o privadas serán fundamentales para poner en valor las numerosas singularidades patrimoniales geológicas, geoarqueológicas y mineras, que hacen que cada vez sea mayor la demanda de este tipo de turismo en Extremadura.

Palabras clave: espeleoturismo, patrimonio geológico.

Subterranean tourism sites in Extremadura

ABSTRACT

In Extremadura there are several subterranean spaces (caves and mines) that can be visited or will it soon. Sources Lion Caves and Cave Ibor chestnuts, and three mines (; Mina Costanaza in Logrosan and Pastora Mina, Mina Aliseda Jayona, Fuente del Arco) are two karst sets are visited. In addition to these five areas there are two other projects that are currently being developed and will soon be visitable: Minas de Santa Marta (Santa Marta de los Barros) and Mina Monchi (Burguillos del Cerro, Badajoz). The subterranean tourism in Extremadura has 35,000 annual visits. Both maintenance and new actions by public or private entities will be key to value the many geological and mining heritage geoarchaeological singularities that make growing demand for this type of tourism in Extremadura is greater.

Keywords: speleological, geological heritage.

INTRODUCCIÓN

En Extremadura existen numerosos espacios subterráneos de elevado valor patrimonial, ya sean cuevas o minas abandonadas, el patrimonio geológico, cultural y natural que albergan ha motivado en muchos casos la declaración de monumentos naturales (Cueva de Castañar, Cuevas de Fuentes de León y Mina La Jayona), o bien ha motivado su puesta en valor como espacios singulares que ofrecen al visitante una amplia oferta geoturística.

Existen actualmente siete espacios con potencial geoturístico en Extremadura, algunos de ellos ya se están visitando y otros están acondicionándose para visita o está en proyecto la realización de las obras de adecua-

ción; en cualquier caso todos ellos cuentan con proyectos de puesta en valor que han valorado el alto valor patrimonial que albergan.

CUEVAS DE FUENTES DE LEÓN

Las Cuevas de Fuentes de León se sitúan en el municipio de Fuentes de León (provincia de Badajoz), siendo fronterizas por el sur con el término municipal de Cañaveral de León (provincia de Huelva). Constituye uno de los conjuntos kársticos más interesantes de Extremadura, razón por la cual fue declarado espacio natural protegido (Monumento Natural) en 2001 (Fernández-Amo, 2011; Fernández-Amo y Rebolada, 2007; Fernández-Amo et al. 2005)). Actualmente hay cuatro cuevas -Agua, Masero (Figura 1), Los Postes y Caballo- y otros espacios (centro de interpretación, centro de recepción de visitantes, museo geológico, museo de rocas, ruta botánica, surgencias kársticas, lapiaces y simas, etc.), todos ellos visitables en determinadas condiciones, gracias a las distintas obras y actuaciones realizadas por la Junta de Extremadura. Gracias a ello, los visitantes pueden contemplar numerosos elementos patrimoniales geológicos, arqueológicos y ambientales, que configuran hoy en día una oferta que amplía y mejora notablemente el atractivo geoturístico.



Figura 1. Cueva Masero (Cuevas de Fuentes de León).

CUEVA DE CASTAÑAR

La Cueva de Castañar se sitúa en la localidad de Castañar de Ibor en la provincia de Cáceres, es una cavidad kárstica de desarrollo laberíntico de unos 2.135 metros de desarrollo. Este desarrollo es básicamente horizontal, los conductos kársticos tiene escasa altura media y el máximo desnivel es de 31 metros.

Esta cueva destaca por su rica y variada formación de espeleotemas y sobre todo por la elevada presencia de helictitas (estalactitas excéntricas de aragonito, Figura 2). La abundancia y diversidad de los espeleotemas que

tapizan los techos, paredes y suelos de sus salas y galerías es verdaderamente única: estalactitas, estalagmitas, columnas, helictitas de aragonito, agujas, coladas, cristalizaciones arborescentes, etc. Todo un universo de hermosas formas que en muchas ocasiones contrastan sobre los oscuros materiales precámbricos que forman las paredes de la cueva (Alonso et al. 2005).

La Cueva se ha reabierto recientemente, las visitas son diarias en grupos de seis personas, incluido el guía.



Figura 2. Helictitas en la Cueva de Castañar (Castañar de Ibor, Cáceres).

MINA LA JAYONA

Se sitúa al sur de la provincia de Badajoz, en el término municipal de Fuentes de León. Este Monumento Natural es un claro ejemplo de comunión de factores geológicos, biológicos, climáticos y antrópicos, que hacen de este entorno un referente de la diversidad natural de Extremadura.

Se trata de una antigua mina de hierro rehabilitada para visita. En los tres niveles visitables de la mina se pueden apreciar elementos geológicos de elevado interés patrimonial como: estructuras tectónicas, fenómenos de karstificación y neoformación de minerales. Además se pueden ver numerosas estructuras mineras como cueles, llaves, galerías, bocaminas, barrenos, etc (Figura 3). En el interior de las cortas y galerías mineras se ha implantado una vegetación y una flora singular, destacando la presencia de la cigüeña negra, búho real, cárabo, y varias especies de quirópteros protegidos.



Figura 3. Mina la Jayona (Fuente del Arco, Badajoz).

MINAS DE LOGROSÁN

Las minas de Logrosán se encuentran dentro del término municipal de Logrosán, en la provincia de Cáceres. Integran una elevada cantidad de puntos de interés geológicos y mineros como filones de fosforita, zonas de falla, arcos de sostenimiento minero, Pozo María, etc. En los exteriores de la mina aún se conserva en buen estado el laboratorio de la mina (Fernández-Amo, 2010b). A todo ello hay que añadir la mineralogía que se puede ver en la cercana Sierra San Cristóbal, (única a nivel nacional por la calidad de las cristalizaciones de casiterita) y el Museo Geominero de Logrosán. Existen dos minas visitables: la Mina Costanaza y la Mina El Serranillo. En la actualidad se puede visitar la Mina Costanaza que está habilitada para su visita, Asimismo se puede visitar el laboratorio de la mina que alberga un centro de interpretación de la mina de fosfato y sus instalaciones. También se puede visitar el Museo Geominero de Logrosán en las instalaciones del antiguo almacén, junto al laboratorio y la Mina Costanaza (Figura 4), además se pueden hacer rutas geológicas por la Sierra San Cristóbal. Se tiene previsto la rehabilitación de la Mina El Serranillo y El Polvorín en los próximos meses.



Figura 4. Mina La Costanaza (Logrosán, Cáceres).

MINA LA PASTORA (ALISEDA, CÁCERES)

Se localiza en la localidad cacereña de Aliseda. Se trata de una mina de hierro y azufre del siglo XIX, con vestigios de explotación minera de origen romano. En el interior de las galerías se pueden observar numerosas oquedades que nos muestran el tipo de minería que existió en la zona (Minería de Realce).

Esta mina ya está rehabilitada para visita. En los tres niveles visitables de la mina se pueden apreciar elementos geológicos de interés patrimonial como: mineralizaciones de hierro, espejos de falla, manantiales, fenómenos de oxidación, etc (Figura 5).

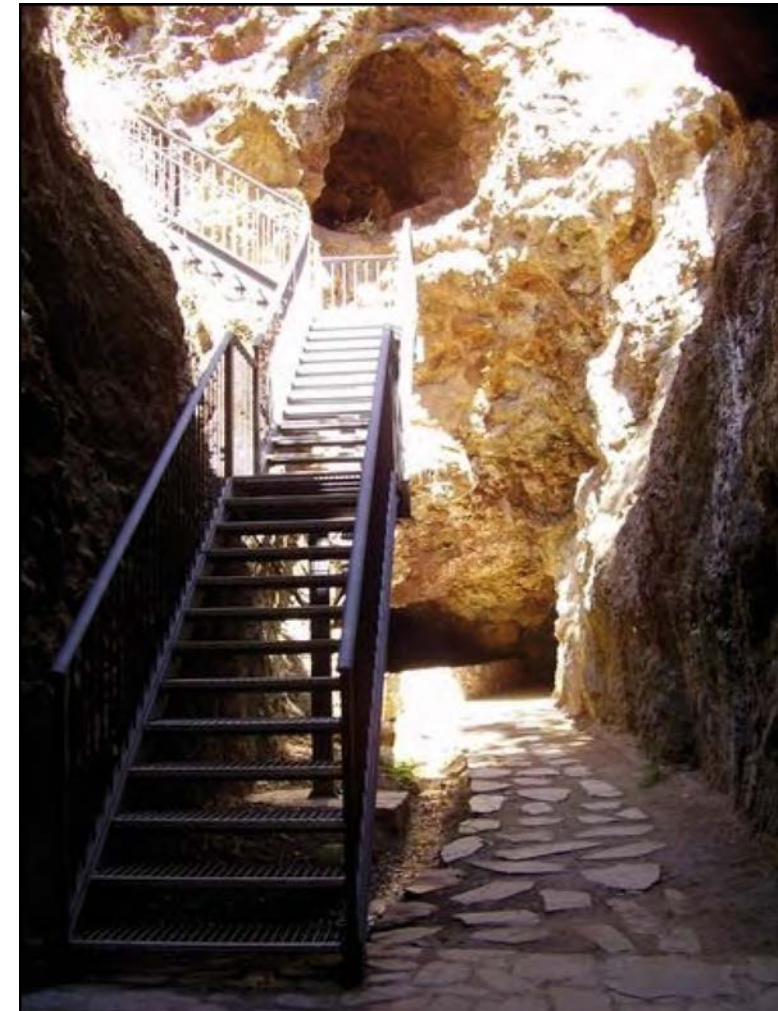


Figura 5. Mina La Pastora (Aliseda, Cáceres).

MINAS DE SANTA MARTA (SANTA MARTA, BADAJOZ)

Se localizan en el término municipal de Santa Marta de los Barros (Badajoz). A unos 43 kilómetros al sudeste de Badajoz.

Son unas minas de vanadio y plomo de finales del siglo XIX. Destacan por albergar una paragénesis mineralógica única a nivel mundial, además de otros elementos patrimoniales como: planos de falla, estalactitas de sulfatos, filones mineralizados, el poblado minero de Los Llanos y las instalaciones de la Mina Constante (Fernández-Amo, 2010a). Además destaca el MUGEMISA (Museo Geológico y Minero de Santa Marta) con una colección de más de 5.000 piezas de minerales, rocas, fósiles y utensilios mineros, que lo convierte en uno de los museos geomineros más importante del suroeste de España.

En la actualidad está en fase de restauración el poblado minero de Los Llanos y las instalaciones de la Mina Constante. Está previsto rehabilitar más de 500 metros de galerías de la Mina Garandina (Figura 6) y Mina Constante para su visita. Actualmente se puede visitar el MUGEMISA y el poblado minero.



Figura 6. Mina Garandina (Santa Marta, Badajoz).

MINAS DE BURGUILLOS DEL CERRO (BURGUILLOS DEL CERRO, BADAJOZ)

Se trata de un conjunto de dos minas (Mina Monchi y Aurora) ubicadas en la base de la Sierra del Cordel a unos dos kilómetros de la localidad pacense de Burguillos del Cerro.

Ambas minas cerradas a finales de los años setenta explotan un yacimiento de hierro de tipo skarn. Este yacimiento de hierro es uno de los más visitados por mineralogistas de toda España (Figura 7). Manifiesta un alto interés geológico y mineralógico, por la presencia de una paragénesis mineral singular con la presencia de numerosas especies minerales poco comunes y por albergar un patrimonio geológico y minero singular (Fernández-Amo y Carvajal, 2008).

Ya se ha realizado el Proyecto de Puesta en Valor, se ha inventariado el patrimonio y diseñado las obras de rehabilitación de más de 500 metros de galerías en la Mina Monchi y Aurora (Fernández-Amo y Rebollada, 2005).



Figura 7. Espejo de falla en el interior de la Mina Aurora (Burguillos del Cerro, Badajoz).

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.
- Fernández Amo, F.J. 2010a. 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. 2010b. Proyecto de Puesta en Valor de las Minas de Logrosán. *Exmo. Ayto. de Logrosán (Cáceres)*.
- Fernández Amo, F.J. 2011. Proyecto de Optimización de Recursos Geoturísticos de las Cuevas de Fuentes de León. *Exmo. Ayto. de Fuentes de León*.
- Fernández Amo, F.J. y Carvajal, D. 2008. Proyecto de Puesta en Valor de las Minas de Burguillos del Cerro (Badajoz). *Exmo. Ayto. de Burguillos del Cerro*.
- Fernández Amo, F.J., Carvajal, D., Merino, R. y Rebollada, E. 2007. Datos para el aprovechamiento turístico de las Cuevas de Fuentes de León. En: *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*. Durán, J.J., Robledo, P.A. y Vázquez, J. (Eds.), pp. 57-65. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Fernández Amo, F.J. y Rebollada, E. 2005. Punto de Interés Geológico Cuevas de Fuentes de León. En: Patrimonio Geológico de Extremadura. Muñoz, P. y Martínez, E. (Eds.), pp. 131-134. *Consejería de Agricultura y Medio Ambiente*, Badajoz.

Fernández Amo, F.J. y Rebollada, 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.

La transformación de una instalación minera en Patrimonio Mundial. El caso del Parque Minero de Almadén

Francisco Javier Carrasco-Milara

Minas de Almadén y Arrayanes, S.A., Cerco San Teodoro, s/n. 13400 Almadén, Ciudad Real (fcjavier.carrasco@mayasa.es)

RESUMEN

Las minas de Almadén, explotadas ininterrumpidamente desde la antigüedad, constituyen el mayor yacimiento de mercurio del mundo. Representan el 35% de los recursos de mercurio extraídos por el Hombre en toda su historia. La adopción de incipientes medidas restrictivas en la política de la Unión Europea con referencia al mercurio llevó a su cierre en 2003. En esta situación se decidió acometer actuaciones de remediación ambiental y de rehabilitación del patrimonio histórico de Almadén, procurando los medios precisos para conservarlo, a la vez que pudiera ser conocido, visitado y utilizado por el mayor número de personas. El proyecto de Parque Minero de Almadén gestiona el conjunto de elementos patrimoniales, inmobiliarios e industriales, su valor y adecuación para uso público. Este proyecto fue promovido por la empresa Minas de Almadén y Arrayanes y financiado parcialmente por fondos FEDER. En su recorrido el visitante percibe la riqueza del yacimiento de Almadén, la evolución de los diversos procesos mineros y metalúrgicos y el relevante papel del mercurio en la historia mundial. El Parque Minero de Almadén está formado por varios espacios que van desde el Real Hospital de Mineros de San Rafael, al Museo del Mercurio, pasando por otros elementos de indudable interés como el Centro de Interpretación de la Minería, los hornos de Bustamante, la puerta de Carlos IV y el Centro de Visitantes, pero el verdadero interés se encuentra en la mina subterránea, que convierte a este parque en un destino cultural y turístico excepcional. La visita al interior de la mina permite recorrer las explotaciones mineras de Almadén del periodo comprendido entre los siglos XVI y XIX. Se accede, mediante un elevador de mina, a la primera de las veintisiete plantas de la mina subterránea (a 50 metros de profundidad). Destaca de este recorrido el baritel del pozo de San Andrés, una bóveda de 13 m de altura, que alberga el malacate, sistema de extracción de mineral del siglo XVIII. Del interior de la mina se sale por medio de un tren minero que lleva al visitante al exterior, como lo hizo el mineral durante siglos. Casi de forma simultánea al fin de las obras de adecuación, allá en el año 2006, se iniciaron los trámites necesarios para inscribir estos bienes en la lista de Patrimonio Mundial de UNESCO, hecho que se consiguió en 2012 bajo el nombre de Patrimonio del Mercurio. Almadén e Idrija, tras casi 6 años de intenso trabajo de varias entidades.

Palabras clave: mercurio, minería, Patrimonio Mundial, UNESCO.

The transformation of a mining installation in World Heritage. The case of Almaden Mining Park

ABSTRACT

The Mines of Almadén which have been continuously exploited since ancient times, constitute the largest mercury deposit in the World. These mines represent the 35% of mercury resources extracted by humans in the whole history. The adoption of restrictive measures in the European Union policy related to mercury led to the closure in 2003. In this context, complementary actions were planned to the environmental remediation and the rehabilitation of the historical heritage of Almadén. Then, specific resources have been used to conserve it and at the same time, to be known, visited and used by the highest number of people as possible. The project of the Mining Park of

Almadén, manages the whole heritage elements such as real estates and industrials, its value and adaptation for public use. This project was promoted by the enterprise named Minas de Almadén y Arrayanes and it was partially financed by ERDF funds. In the tour the visitor notices the wealth of the Almadén deposit, the evolution of the several mining and metallurgical processes and the significant role of the mercury in the global history. The Mining Park of Almadén is constituted of several places such as the San Rafael Mining Hospital or the Mercury Museum, and other places with a great interest such as the Mining Interpretation Centre, the Bustamante furnace, the gate of Carlos IV and the Visitor Centre. In this way, it is important to emphasize that the real interest is found in the underground mine that converts this park in an exceptional cultural and touristic destination. The tour inside the mine traverses the mining operations of Almadén in the period between XVI and XVII centuries. The access to the inside of the mine is made in a cage of mine to the 1st floor (50 meters in depth) of the twenty-seven floors which are in the underground mine. From this tour, it is important to highlight the baritel of San Andrés which has a dome of 13 meters high. In this baritel, it is located the capstan that is an extraction system of the ore in the XVIII century. From the inside of the mine, the visitor is driven to the surface by a mining train, as the same as the ore made for centuries. In 2006, the necessary procedures to register this site in the list of World Heritage of UNESCO were simultaneously initiated at the end of the rehabilitation process. The final decision on this application was in 2012 under the name of "Heritage of Mercury. Almadén and Idrija", after almost 6 years of hard work from several entities.

Keywords: mercury, mining, World Heritage, UNESCO.

INTRODUCCIÓN

Las minas de Almadén, explotadas ininterrumpidamente desde la antigüedad, constituyen el mayor yacimiento de mercurio del mundo. Representan el 35% de los recursos de mercurio extraídos por el Hombre en toda su historia.

Las medidas restrictivas respecto al mercurio establecidas por la Unión Europea condujeron a su cierre en 2003. En esta situación se decidió acometer actuaciones de carácter medioambiental al objeto de minimizar los efectos de la explotación de más de 2000 años en el medioambiente y de rehabilitación del patrimonio histórico, preservando y garantizando su conservación. Procurando además los medios precisos para que este patrimonio pudiera ser conocido, visitado y utilizado por el mayor número de personas.

En Minas de Almadén se comprendió que, a diferencia de otras zonas mineras, la puesta en valor del patrimonio histórico requería la previa restauración ambiental. Se esperaba además aprovechar las oportunidades económicas y de generación de empleo derivadas de las nuevas formas de demanda turística y de la importancia creciente del turismo cultural, y dentro de él, del turismo industrial. La transformación de la mina de Almadén en un patrimonio cultural de primer nivel ha sido un proceso largo de casi diez años, culminado con su inclusión en la lista de patrimonio mundial en 2012.

LA RESTAURACIÓN AMBIENTAL

Una actuación previa y primordial fue minimizar el impacto de la actividad minera en el entorno, el proyecto ambiental más ambicioso fue la restauración de la escombrera del Cerco de San Teodoro. Esta escombrera acumuló durante siglos los estériles procedentes de las labores mineras y las escorias resto de los procesos metalúrgicos. La dimensión final alcanzó los 3,5 millones de toneladas, ocupando una superficie de diez hectáreas.

Las obras se iniciaron en el año 2005 y finalizaron en mayo de 2008. El proyecto supuso la remodelación de los taludes, mejorando las condiciones generales de estabilidad, y el encapsulamiento in situ de la escombrera mediante un paquete de geosintéticos, garantizando así su impermeabilización, la instalación de una red de recogida, circulación y evacuación de aguas que evitase los efectos erosivos y la implantación de una cubierta vegetal permitieron la integración paisajística de la escombrera (Fernández Rubio y Carrasco Milara, 2007).

EL DESARROLLO DEL PARQUE MINERO DE ALMADÉN

Las minas de Almadén se componen de un sistema de túneles y pozos de diferentes épocas, desde la antigüedad hasta nuestros días, y es posible observar la estratificación en diferentes sentidos. También están las áreas de trabajo de procesamiento de mineral y metal, edificios administrativos y almacenes a lo largo de las construcciones e instalaciones de diferentes épocas de la historia (Carrasco-Milara, 2009 y 2011). El Parque Minero de Almadén se crea para gestionar este conjunto de elementos patrimoniales, inmobiliarios e industriales y proyectar las actuaciones que permitieron adecuarlos para uso cultural y turístico. El proyecto fue promovido por la empresa Minas de Almadén y Arrayanes S.A., y financiado parcialmente por fondos FEDER. En su recorrido el visitante percibe la riqueza del yacimiento de Almadén, la evolución de los diversos procesos mineros y metalúrgicos y el relevante papel de Almadén y el mercurio en la historia mundial.

El Parque Minero de Almadén, con una inversión superior a los 12 millones de euros, ha logrado, como preveía su plan director, convertirse en motor de desarrollo social, económico y cultural para Almadén y su comarca, conjugando la conservación del conjunto patrimonial con el desarrollo de un turismo cultural que asegure la calidad de la visita e impulse la creación de infraestructuras turísticas (Gimeno, 2003).

El Parque Minero de Almadén, comprende varios espacios que van desde el Real Hospital de Mineros de San Rafael, hasta los Cercos Mineros, donde se encuentra el mayor atractivo sin duda para el visitante, la mina subterránea, que convierte a este parque en un destino cultural y turístico excepcional.

El Parque Minero está formado por diferentes inmuebles:

El Hospital de Mineros de San Rafael. El edificio, declarado Bien de Interés Cultural en 1992, se encuentra situado fuera de los Cercos Mineros. Es un espléndido inmueble construido entre 1755 y 1773. La rehabilitación realizada con el apoyo económico de los fondos FEDER y de la Fundación Caja Madrid respetó el cuerpo primitivo del siglo XVIII, permitiendo dotar al edificio de las instalaciones adecuadas para ser el archivo histórico de las minas de Almadén y contar con un espacio expositivo dedicado a la historia del hospital y a la comarca; la vida y costumbres de las gentes de Almadén.

Los Cercos Mineros. El Cerco de San Teodoro engloba las principales instalaciones mineras entre ellas se encuentran el Centro de Visitantes, el Centro de Interpretación de la Minería (antiguo edificio de compresores), los antiguos talleres mecánicos, de ajuste y de carpintería, el edificio de Dirección, así como los castilletes de los pozos de San Teodoro y San Aquilino. El Cerco de Buitrones alberga las instalaciones de tratamiento metalúrgico entre las que se encuentran hornos de diferentes épocas: los Bustamante del siglo XVIII y los Pacific del XX, la puerta de Carlos IV, la puerta de Carros, el Museo del Mercurio así como el pozo de San Joaquín.



Figura 1. Sala de máquinas y castillete pozo San Aquilino y pozo San Teodoro.

El Centro de Interpretación de la Minería. El antiguo edificio de compresores es un sencillo edificio de los años 20 con planta rectangular de una sola altura, rematado con ladrillo visto en esquinas, zócalo y huecos de ventanas y revocado en el resto de las fachadas. Todo este edificio se encuentra dedicado a la explotación de la mina, en él se muestran los diferentes sistemas de explotación que se han sucedido en Almadén en las diferentes épocas, con todas aquellas otras labores relacionadas con la extracción del mineral (el desagüe, la iluminación y el transporte del cinabrio hasta superficie).

El Centro de Visitantes. ubicado en la planta baja del edificio de oficinas, integra la recepción, tienda de publicaciones, minerales y recuerdos, consigna, aseos, maquetas y la sala de presentación de la mina. También se encuentran en él los servicios de cafetería y restaurante. En una zona acristalada del Centro se decidió incorporar una obra de Javier Velasco, "Lágrimas de lluvia", formada por un estanque de casi 4 toneladas de mercurio sobre el que una lluvia de cristales detenidos en el espacio y un sistema ingenioso producen el efecto de lluvia. Los talleres mecánico, de ajuste y carpintería, rehabilitados con su maquinaria original, el edificio de Dirección, con la sala de planos y administración incluida, y toda la maquinaria minera que trabajó en la mina en su última etapa, completan los elementos que se encuentran en el exterior.

LOS POZOS Y CASTILLETES MINEROS

El pozo de San Aquilino. Con su castillete metálico de 16,5 metros de altura situado sobre un pozo de 378 metros de profundidad y todo su guionaje construido en madera. El edificio de máquinas presenta planta rectangular con planta única de doble altura, muros de carga de ladrillo visto, con zócalo del mismo material y pilastras en las cuatro esquinas. En su interior se encuentra, en perfecto estado de uso, toda la máquina de extracción de dos tambores de primeros del siglo XX. Entre el edificio de la sala de máquinas (Figura 1) y el castillete se encuentran los restos de la primera sala de máquinas construida y que fue derruida tras la construcción de la actual.

El pozo de San Teodoro mantiene su último aspecto, una estructura metálica rectangular de 30 metros de altura que alberga toda la sala de máquinas intacta en su parte superior. Este pozo, excavado en 1757, fue el principal de la mina hasta 1975. Tiene unos 550 metros de profundidad. En él se ha instalado el elevador eléctrico que, simulando una jaula de mina, permite el acceso de las visitas a la planta primera de la mina de Almadén.

En la mina subterránea, con más de 700 m de profundidad, se buscó una zona para la visita pública con las máximas garantías de seguridad. La zona recuperada forma parte de la planta 1ª de la mina de Almadén, a unos 50 m de profundidad, es la de mayor valor histórico, accesible sólo en parte al inicio de las obras. Para la realización de las labores se recuperaron dos accesos distintos, los socavones del Pozo y del Castillo, (excavados en 1644 y 1696, respectivamente), que acceden a nivel de calle. Al final de las obras quedaron como salidas de emergencia. Además, se recuperaron los pozos de San Teodoro (por cuyo interior se accede a la mina), San Aquilino y San Andrés. Para tercera salida se habilitó una antigua galería del siglo XVIII conocida como galería de forzados, desde la que se acondicionó un acceso construido en la guerra Civil. La visita, después de recorrer zonas de explotación del siglo XVII, XVIII y labores del siglo XX llega al baritel de San Andrés (Figura 2) y la galería de forzados.

Posteriormente la visita accede, a través del pozo de San Teodoro de nuevo, a una galería superior donde un tren minero accionado por baterías transporta al grupo hasta la superficie. El sostenimiento realizado en las labores recuperadas se llevó a cabo distinguiendo su ubicación:

- Lugares de explotación. Zona de explotación en hurtos, en testereros y en bancos. Se realizó con las técnicas de la época, siglos XVII y XVIII. Entibación en madera.
- Lugares de paso. Se utilizaron todas las técnicas de sostenimiento empleadas en la actualidad, cuadros de madera, cerchas, bulones a la resina, hormigón proyectado y resina inyectada. Esta decisión permitió aumentar la seguridad y presentar al visitante los sistemas de entibación modernos.

La recuperación de los talleres de explotación se realizó con el máximo rigor, no se utilizaron los huecos existentes de la mina para representarlos. Se identificaron los lugares reales y se reconstruyó todo lo que el paso del tiempo se había llevado.



Figura 2. Baritel y malacate de San Andrés.



Figura 3. Galerías revestidas de mampostería del siglo XVII.

Para hacer más cómoda la visita, las galerías se rebajaron en su práctica totalidad unos 40 centímetros, aumentando el gálibo de éstas hasta 1,80- 1,90 m de altura. Se construyó una solera de hormigón como pavimento, que alberga además en su interior todas las conducciones de energía eléctrica, comunicación y seguridad.

El recorrido de la visita a la mina permite a los visitantes, tras vivir el ambiente de algunas de sus explotaciones históricas, recorrer sus galerías hasta llegar a la joya de la visita, el baritel de San Andrés. Construido en la primera mitad del siglo XVIII, es un hueco de planta circular y perfil elipsoidal de 13 metros de altura. Todo él se encuentra revestido de mampostería con hiladas intercaladas de ladrillos que se van haciendo dominantes en el techo, en su interior se reconstruyó el malacate o cabrestante de extracción accionado por mulas, pues sólo se conservaban de él los apoyos de la estructura original empotrados en la mampostería.

La ventilación de la zona recuperada se realiza de forma natural por la diferencia de cota entre los pozos y los socavones abiertos.

La incorporación de la galería de 16,5 a la visita permitió introducir un elemento de gran interés, un tren de mina (Figura 4) real que recorre la galería que transportaba el mineral y que transporta ahora a los visitantes hasta el exterior en la zona de metalurgia, haciendo así el mismo recorrido que hacía antes el cinabrio.



Figura 4. Vista del tren de mina en el que salen los visitantes.

Las locomotoras instaladas son Bartz de 3,5 toneladas de peso y 9 kW de potencia. Los vagones son de transporte de personal en mina, tipo DM 12 con capacidad para 12 personas cada uno. Se les ha dotado de ventanas con barrotes en lugar de chapas ciegas y unas puertas de seguridad en la parte inferior.

La recuperación de la mina de Almadén representó un enorme reto, con un sinfín de complejidades, en el que se pretendió integrar rigor histórico con seguridad y diversión en un espacio que pretende impresionar al visitante en un medio nuevo para él (Carrasco Milara, 2009).

La puerta de Carlos IV, es el acceso al Cerco de Buitrones (muralla perimetral de los hornos metalúrgicos) desde que se construyó en 1795. La restauración, que finalizó en el año 2004, fue realizada por el Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE), dependiente del Ministerio de Educación.

La puerta de Carros, es una puerta antigua de acceso al Cerco de Buitrones construida con arco rebajado de ladrillo y mampostería. Su geometría abocinada con su pequeña cubierta inclinada de teja árabe responde a la fisonomía del Cerco en su primera época. La calzada de acceso y la muralla anexa recogen el aspecto de las instalaciones mineras de Almadén en el siglo XVIII. La obra de rehabilitación del conjunto se realizó en dos fases durante los años 2006 y 2007. Fue financiada parcialmente por la Consejería de Educación de la Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha.

El Museo del Mercurio instalado recuperando el antiguo almacén de mercurio del Cerco de Buitrones. El edificio se construyó en 1941, es de planta cuadrada, con patio interior abierto, planta baja y sótano. Está formado por muros de carga de piedra y mortero de cal. El alzado principal muestra una portada con arco de entrada, con dos medallones y un frontón sobre cornisa.

La intervención en el edificio supuso la adaptación de un espacio industrial contaminado y deteriorado, convirtiéndolo en un espacio cultural que posibilita la visita de público. En este edificio se integran los museos más

importantes de todo el Parque Minero. Se encuentran en la planta baja salas dedicadas a la geología y la paleontología de la zona, las ciencias del mercurio con experimentos interactivos de física y química del mercurio, la historia de la metalurgia de este metal y la sala de pesaje y envasado de mercurio. El sótano está dedicado a la historia de las minas y al transporte desde Almadén a las atarazanas de Sevilla y desde allí hasta América.

Los hornos Bustamante. Los hornos San Eugenio y San Julián de 1718 son los únicos que se conservan de los 20 que se utilizaron entre 1646 y 1928. Estos hornos de tostación de cinabrio (mineral del que se obtiene el mercurio) son los mejor conservados del mundo y esta tecnología es la que más tiempo estuvo en producción (casi 300 años).

En 1992 se declararon Bien de Interés Cultural y entre 2006 y 2007 fueron restaurados por el Instituto de Patrimonio Cultural de España.

EL PLAN DE GESTIÓN DEL PARQUE MINERO DE ALMADÉN

El plan de gestión del Parque Minero de Almadén es un documento de gestión estratégica que recoge las actuaciones a desarrollar a corto y medio plazo para el mantenimiento de los objetivos previstos.

Las medidas se encuentran englobadas en cuatro ejes:

- Preservación de Bienes Inmuebles
- Preservación del Patrimonio Documental
- Sostenibilidad Ambiental
- Educación y Cultura

PRESERVACIÓN DE BIENES INMUEBLES

Preservar el patrimonio de las minas de Almadén se convirtió en una de las actividades primordiales de MAYASA tras el cierre de las minas. En el mismo momento, ICOMOS España decidió apostar por un proyecto transnacional sobre el binomio mercurio-plata en el Camino Real Intercontinental al objeto de incluirlo en la lista de Patrimonio Mundial de UNESCO. A tal efecto ICOMOS organizó en 2006 un congreso internacional sobre el patrimonio minero e industrial en los itinerarios culturales que reunió en Madrid y Almadén a un considerable número de especialistas. Las aportaciones de los participantes y los resultados de este encuentro llevaron a la confirmación del valor universal excepcional de las minas y de las posibilidades de inscribirlo en la lista de Patrimonio Mundial.

En junio de 2006 el Consejo de Patrimonio Histórico celebrado en Navarra incluyó las minas de Almadén en la lista indicativa española, lo que se comunica a UNESCO en abril de 2007. En noviembre 2008 y a propuesta de Minas de Almadén, la Consejería de Cultura de Castilla La Mancha declara Bien de Interés Cultural al Conjunto Histórico Minero de Almadén. El expediente de nominación se redactó por parte de ICOMOS España con el apoyo del ayuntamiento, la Escuela de Ingeniería de Almadén, y Minas de Almadén. Se presentó a UNESCO en 2008 bajo la denominación *Binomio Mercurio y Plata en el Camino Real Intercontinental* que incorporaba las minas de mercurio de Idria (Eslovenia), Almadén (España) junto con las de plata de San Luis de Potosí (México). La propuesta se debatió en la 33ª Sesión del Comité de Patrimonio Mundial de UNESCO celebrada en Sevilla en 2009 y tuvo el resultado de "REFER", o devolución al estado parte para completar o aportar información. El expediente se completó y se volvió a presentar a la 34ª Sesión de Comité de Patrimonio Mundial de UNESCO celebrada en Brasilia en 2010 donde, tras un intenso debate, se decidió calificarlo como "DEFER" o aplazamiento, el expediente requería una revisión sustancial o de fondo y era preciso iniciar de nuevo el proceso. El Comité no veía las minas de San Luis Potosí en el expediente y se optó por reducir la nominación a un proyecto menor: *El Patrimonio del Mercurio. Almadén e Idria*. En enero de 2011 se volvió a presentar un dossier basado ahora en el bien en serie del mercurio y su patrimonio minero. La misión de evaluación se llevó a cabo en septiembre de 2011 por ICOMOS. En diciembre de 2011 se requirió información adicional que se remitió en febrero de 2012.

El informe final de evaluación de ICOMOS previo a la siguiente Sesión del Comité de Patrimonio Mundial fue concluyente:

Los sitios mineros de Almadén y de Idrija forman un conjunto coherente con los componentes asociados, ilustrando convenientemente todos los aspectos técnicos, culturales y sociales asociados a la extracción del mercurio. Estos elementos están presentados en un número suficiente para proporcionar su adecuada interpretación. Estos son los lugares más importantes conservados en relación con esta actividad, tanto por el volumen producido, como por la duración a lo largo de la historia, como por la riqueza de los testimonios aportados.

En ambos lugares, la presencia de infraestructuras mineras subterráneas y en superficie, la presencia de artefactos técnicos unidos a la extracción minera, con sus necesidades (energía hidráulica, madera) y su transformación en azogue (hornos), su transporte y almacenaje son auténticos. (Belavilas, 2011).

- 1º Premio Regional de Turismo de Castilla La Mancha a la Iniciativa más Innovadora del Sector Turístico en 2006. Premio FITUR 2009 al mejor producto de Turismo Activo en la modalidad de Cultura.
- Premio Regional 2009 de Desarrollo Sostenible de Castilla La Mancha al proyecto de restauración de la escombrera del Cerco de San Teodoro.
- Finalista Premios RegioStar 2010 en la categoría CityStar a los mejores y más innovadores proyectos europeos financiados por fondos estructurales de la Unión Europea (FEDER).

Al margen de las obras ya realizadas existen otros bienes de interés de las minas incluidos en planes de recuperación para los próximos años. Entre los objetivos se encuentran el pozo San Joaquín, los hornos Pacific, la ermita de San Miguel, el resto de los socavones de la mina y en Almadenejos, el cerco y los restos de hornos Bustamante y el baril de San Carlos. Los hornos de tejeras y Berrens, recogidos ya en este plan, se recuperaron en 2008 y el antiguo laboratorio en 2010, con cofinanciación de la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha.

PRESERVACIÓN DEL PATRIMONIO DOCUMENTAL

El plan de recuperación del patrimonio documental de las minas de Almadén cuenta con dos líneas de actuación complementarias:

- La reorganización y catalogación del archivo con fondos históricos de 1725 a 1980. 112.000 expedientes de los que 17.487 son personales, disciplinarios y médicos.
- La búsqueda y recopilación de fondos depositados en otros archivos con la creación de una base de datos sobre las minas de Almadén de los fondos depositados en los archivos Histórico Nacional, General de Indias y General de Simancas.

Merece mención expresa la colección cartográfica que se remonta al siglo XVIII, con 38 planos restaurados, fechados entre los siglos XVII y XIX, algunos de ellos levantados por los técnicos alemanes que trabajaron en las minas. Reúne unos 14.500 documentos gráficos de gran valor para el estudio de la minería y de la metalurgia del mercurio de los que 11.430 están también almacenados en formato digital.

Se han iniciado los trámites para la declaración de Bien de Interés Cultural para todo este patrimonio documental por parte de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.

Sostenibilidad ambiental. La gestión adecuada de un bien de las características del Parque Minero de Almadén debe garantizar su preservación y por supuesto la seguridad y salud de los visitantes y trabajadores. En un segundo plano, pero no menos importante, las medidas tomadas deben asegurar que ningún resto de la actividad minera (escombreras rehabilitadas principalmente) afecte negativamente al medio ambiente. La gestión de visitantes en la visita a la mina es importante en lo referente a horarios, flujos, circulaciones, lugares de cruce en el interior y uso compartido del ascensor y del tren. Es importante maximizar el número de visitantes, pero una masificación en la mina podría comprometer la calidad de la visita y especialmente la seguridad.

Los parámetros básicos definidos para la visita a la mina son:

- Grupos organizados y guiados por personal de acompañamiento, todos antiguos mineros, con un número máximo de 24 personas/grupo.
- Bajada en ascensor, máximo 12 personas. Duración 3 minutos.
- Salida en tren máximo 24 personas. Duración 15 minutos.
- Tiempo mínimo de visita estimado: 60 minutos.
- Capacidad máxima de 6 grupos simultáneos en la mina y 144 personas en total. Capacidad máxima diaria de 936 personas.



Figura 5. Placa conmemorativa de la inscripción en la lista de Patrimonio Mundial.

El Parque Minero se incluyó en la lista de Patrimonio Mundial de UNESCO (Figura 5) en la 36ª Sesión del Comité de Patrimonio Mundial de UNESCO celebrada en San Petersburgo dentro del bien: “Patrimonio del Mercurio. Almadén e Idrija (Eslovenia)”. Este patrimonio cumple con 2 de los 10 criterios establecidos por el Comité:

- (ii): Ser la manifestación de un intercambio considerable de valores humanos durante un determinado periodo o en un área cultural específica, en el desarrollo de la arquitectura o de la tecnología, las artes monumentales, la planificación urbana, el diseño paisajístico.
- (iv): Ser un ejemplo sobresaliente de un tipo de construcción, de un conjunto arquitectónico o tecnológico, o de paisaje que ilustre una o más etapas significativas de la historia de la humanidad.

Al margen de otros reconocimientos, el Parque Minero de Almadén ha obtenido hasta la fecha las siguientes distinciones:

A la fecha se han atendido en visita guiada a más de 100.000 visitantes, sin incidentes destacables.



Figura 6. Visitantes accediendo a la mina por el pozo San Teodoro.

Garantizar la seguridad de las visitas ha sido el objetivo primero de las obras de adecuación, a tal efecto:

- Se han rehabilitado o construido hasta seis salidas de emergencia además del ascensor.
- Se ha instalado una señalización de evacuación por leds, alarma de incendios con detectores de humo y puertas cortaincendio en todos los lugares con armarios eléctricos o madera.
- Se ha instalado un sistema de iluminación de emergencia en todo el recorrido en caso de pérdida de fluido eléctrico en el exterior.
- Un circuito de 11 intercomunicadores que permiten hablar con el Centro de Visitantes y el ascensor completan las principales medidas de seguridad.

Para garantizar el mantenimiento de las condiciones higiénicas con respecto a los niveles de mercurio en el aire se realizan mensualmente una media de 14 controles en diversos puntos del Parque Minero. Estas medidas se complementan con reconocimientos médicos específicos para el mercurio y controles mensuales de los niveles de mercurio en sangre y orina a los trabajadores del Parque.

Se han realizado hasta la fecha 4 simulacros de evacuación de las galerías a plena capacidad, uno de ellos con apoyo de los servicios de emergencia, con salvamento y evacuación de heridos.

Para velar por los objetivos últimos de la restauración de la escombrera del Cerco de San Teodoro se puso en marcha un plan de vigilancia ambiental. En él se realiza el control de diversos parámetros en aguas subterrá-

neas, superficiales, suelos y aire, garantizando así que no se producen efectos nocivos al medioambiente. La duración prevista es de 30 años.

EDUCACIÓN Y CULTURA

El proyecto del Parque Minero tiene un valor cultural y educativo importante. Se ha convertido en un importante destino para los viajes educativos en Castilla La Mancha gracias a su incorporación a los programas de actividades complementarias para los centros docentes de la región y regiones limítrofes. Existen guías didácticas a disposición que complementan la visita.

El Parque Minero de Almadén participa en numerosas actividades de comunicación y difusión con el fin de dar a conocer y difundir el patrimonio cultural e histórico de las Minas de Almadén.

REFERENCIAS

- Belavilas, N. 2011. Evaluations of Nominations of Cultural and Mixed Properties of the World Heritage List. *ICOMOS Report for the World Heritage Committee*, 36th sesión, 2012, pág 339-355.
- Carrasco-Milara, F. J. 2009. Las minas de Almadén. Historia Reciente. Editado por MAYASA y Fundación Almadén, 182 pp.
- Carrasco-Milara, F. J. 2011. The mining park of Almadén. *Urban Research and Practice*. Vol 4 nº2 págs 215-218.
- Fernández-Rubio, R., Carrasco-Milara, F. J. et al 2007. Activos Ambientales de la Minería Española. Editado por el Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas. 415 pp.
- Gimeno, J. M. et al. 2003. Plan Director de la mina de Almadén. Editado por Quality System España S.A. Ministerio de Educación, Cultura y Deportes, 26/05/14, <http://www.mcu.es/patrimonio/CE/PatrMundial/Introduccion.html>

Cueva de Pozalagua: Mejor Rincón 2013 de la Guía Repsol

Raúl Palacio Portillo

Alcalde del Valle de Karrantza | Concha 1, 48891, Karrantza, Bizkaia | (alkatea@karrantza.org)

RESUMEN

Es intención de este artículo, dar a conocer la experiencia vivida en una pequeña localidad de Bizkaia, el Valle de Karrantza. En junio de 2013 se inició el concurso El Mejor Rincón, de la Guía Repsol. La participación de la Cueva de Pozalagua, representando a la Comunidad del País Vasco en dicho concurso, se ha vivido con una extraordinaria pasión, y se ha culminado con la proclamación del Mejor Rincón. Esto no habría sido posible sin tres factores claves en este proceso: primero, el sentimiento de orgullo que nos embarga a todos los karrantzanos cuando se habla de esta deslumbrante gruta que se encuentra en nuestro territorio. En segundo lugar, por visualizar rápidamente, tanto los responsables municipales como la ciudadanía en general, a través de la creación de la Plataforma Pozalagua, la repercusión y beneficios que dicho concurso podría acarrear, y por último, el trabajo en equipo de éstos, y el resto de Instituciones Vascas. Todos ellos, han sido capaces de dar un ejemplo de unidad en pos de un objetivo común, algo tan sencillo pero a la vez tan difícil en estos tiempos de penurias políticas, donde el distanciamiento entre la ciudadanía y los representantes políticos resulta tan evidente. La repercusión mediática del concurso ha conseguido aumentar el número de visitas de Pozalagua en más de un 80% con respecto al año anterior. Este aumento de visitantes, fortalece el papel de la Cueva como referente y motor del sector turístico, todo ello en un municipio eminentemente rural como el de Karrantza, donde las explotaciones ganaderas de leche, base de su economía, están atravesando una importante crisis. Es por ello, que se antoja fundamental para el presente y futuro del Valle de Karrantza la consolidación de la Cueva de Pozalagua, como dinamizador de los diversos recursos turísticos de la comarca.

Palabras clave: concurso, guía Repsol, Karrantza, promoción, turismo.

Pozalagua Cave: Best Corner 2013 in Repsol Motoring Guide

ABSTRACT

The object of this article is to make public what has happened in a small place in Bizkaia, the Valley of Karrantza. In June 2013 the contest for the Best Corner in Spain was launched, organized by the Repsol Motoring Guide. The Pozalagua Cave was chosen to represent the Basque Country in this contest and the participation was such a passionate experience that it ended up being proclaimed the Best Corner. This would not have been possible had it not been for three key factors in the process: the pride all of us in Karrantza feel on hearing any mention of this dazzling grotto to be found in our enclave; the swift realization on behalf of both the municipal authorities and the general public, through the creation of the Pozalagua Platform, of the consequences and rewards that this contest would lead to; and the teamwork shown by them and by the rest of the Basque Institutes. All of them have managed to give an example on how to unite forces and work together for a common cause, something so simple yet so difficult nowadays with political impoverishment, where the distance between the general public and the political representatives is so obvious. The media impact of the contest resulted in an increase of 80% in visits to the Pozalagua Cave compared with the previous year. This increase in visitors strengthens the driving role of the Cave in the tourism sector, in a region so rural as is Karrantza where dairy farming, the foundation of its

economy, is going through a serious crisis. That is why it is so important for the future of Karrantza to consolidate the Pozalagua Cave as a driving force and model for the different tourism resources in the area.

Keywords: contest, Repsol Guide, Karrantza, promotion, tourism.

CONOCIENDO EL VALLE DE KARRANTZA

En el extremo más Occidental de Bizkaia, dentro de la comarca de Las Encartaciones, y limitando con las provincias de Cantabria y Burgos, se encuentra el Valle de Karrantza (Figura 1). A escasos 10 kilómetros en línea recta del mar Cantábrico, esta localidad posee una peculiar orografía, ya que las cadenas montañosas que la delimitan, oscilando entre los 737 metros de altitud de la Peña de Ranero, y los 1.335 metros del monte Zalama, forman un perfecto cuadrilátero que le confiere un carácter singular. Sus 138 kilómetros cuadrados, le convierten en el municipio más extenso de Bizkaia. Sin embargo, la densidad de población es singularmente baja, ya que tan solo cuenta con 2.800 habitantes distribuidos por los 49 barrios que jalonan las laderas y los fondos de los valles, conFigurando un municipio eminentemente rural.

Los primeros vestigios de la presencia humana en Karrantza corresponden a la fase final del Paleolítico Medio, unos 35.000 años a.C. (www.karrantza.org). Además de los grabados de la Cueva de Venta Laperra, Paleolítico Superior, son incontables los restos de monumentos megalíticos diseminados por los cordales de sus montes, por lo que podemos afirmar que la cultura pastoril del Neolítico y la edad de Bronce se encuentra ampliamente representada.

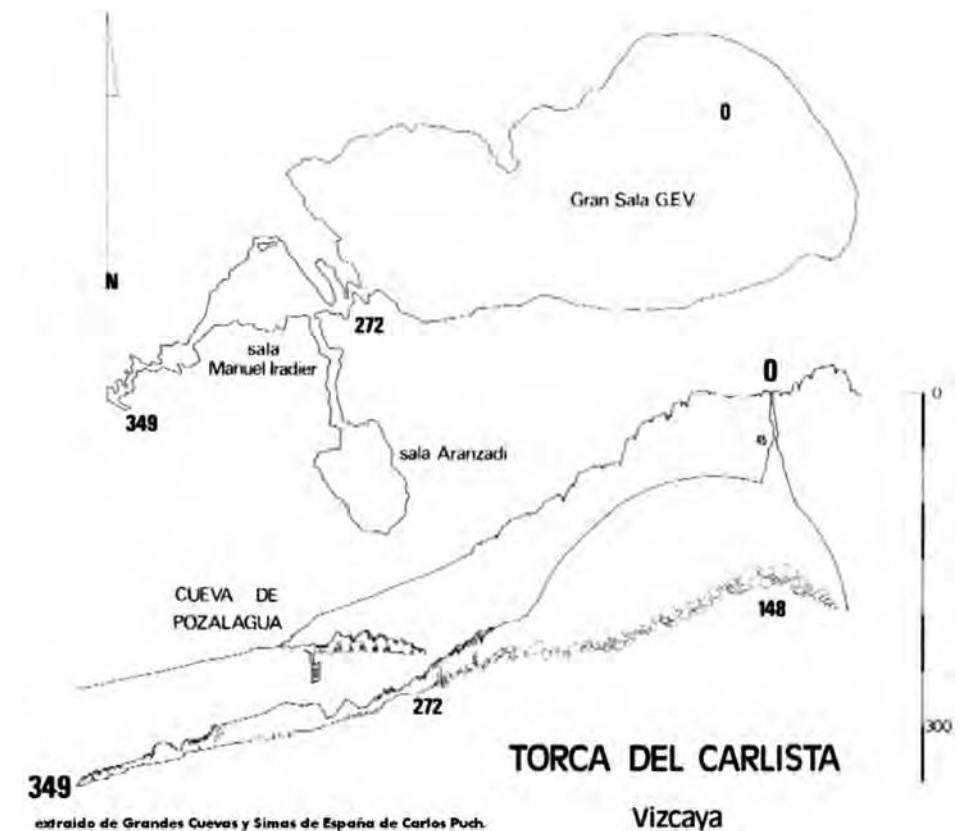
La economía del Valle ha dependido durante siglos de la agricultura, que junto a la ganadería, han constituido la principal fuente productiva del caserío. Sin embargo, a lo largo del primer tercio del s.XX, se inicia una progresiva especialización hacia la producción de leche con la introducción de la vaca frisona. A partir de ese momento, la ganadería se convertirá en la principal actividad sobre la que se sustenta la base económica del municipio. No obstante, la actual crisis del sector, implica una necesidad de diversificación del entramado económico de Karrantza, y es ahí donde el sector turístico adquiere una mayor relevancia. En este sentido, me atrevo a asegurar, que la Cueva de Pozalagua es uno de los atractivos turísticos más singulares, no solo del Valle de Karrantza, sino de la comarca de Las Encartaciones y de Euskadi en general.



Figura 1. Vista panorámica de Karrantza, con el Parque Natural de Armañón al fondo.

CUEVA DE POZALAGUA

En la vertiente norte del valle de Karrantza, se encuentra el Parque Natural de Armañón. Otorgada esta calificación en el año 2006, este enclave posee 3.519 hectáreas de monte. Uno de los motivos que impulsó a las administraciones vascas a realizar esta declaración de Parque Natural, reside en la singularidad del conjunto kárstico de la Peña de Ranero. Este karst tiene un origen sedimentario debido a acumulaciones que se produjeron a lo largo de una antigua línea de costa durante el periodo Cretácico Inferior (entre 120 y 100 millones de años). Está caracterizado por conformar una superficie con espectaculares relieves y por esconder en su interior más de 200 simas y cuevas catalogadas, conformando un conjunto de gran interés geológico, paleontológico, espeleológico y biológico. Entre estas formaciones kársticas, destacamos dos de las más relevantes: la monumental Torca del Carlista, una cavidad que presume de ser la sala más grande de Europa con sus 500 metros de largo, 230 de ancho y 125 de altura, lo que supone un hueco en el interior de la montaña de 4.000.000 de metros cúbicos y una superficie de 76.620 metros cuadrados, y la espectacular Cueva de Pozalagua (Figura 2).



extraído de Grandes Cuevas y Simas de España de Carlos Puch.

Figura 2. Corte imaginario de la Peña de Ranero, con Pozalagua (izq) y Torca del Carlista (dcha). (Carlos Puch, 1998).

El descubrimiento de esta cavidad fue fruto de la casualidad. En 1956, el Ayuntamiento de Karrantza concedió una licencia de extracción para una cantera de dolomía al aire libre, que se adjudicó a la empresa Dolomitas del Norte. La extracción de mineral se realizaba mediante cargas de dinamita y fue el 28 de Diciembre de 1957, con una de esas explosiones, como se descubrió la Cueva de Pozalagua y se accedió a ella por primera vez. La cantera siguió trabajando hasta 1976, fecha en que se cerró definitivamente. Por ese motivo, y a pesar de que

la trayectoria de la explotación, y por tanto de las voladuras, se modificó por el descubrimiento de la cueva, estas causaron daños en el interior de la galería. Hoy día, en la oscuridad que delata la existencia de esa antigua cantera, se encuentra un anfiteatro excavado en la propia piedra caliza con la técnica de corte con hilo de diamante, donde se han celebrado diversos conciertos musicales por la extraordinaria calidad acústica que posee.

La Cueva de Pozalagua (Figura 3) consiste en una gran bóveda que tiene aproximadamente unos 125 metros de largo por 75 de ancho, una altura máxima de 17 metros y un desnivel de 6 metros. La temperatura es constante, de 13 °C todo el año, y la humedad ronda el 100%. Su laberíntico recorrido, flanqueado por estalactitas, grandes coladas y columnas estalagmíticas, junto a una cuidada iluminación y una pasarela metálica equipada para personas con problemas de movilidad, convierten la visita en una experiencia extraordinaria. Sin embargo, lo que le confiere una personalidad propia a la Cueva de Pozalagua, es la increíble proliferación de estalactitas excéntricas de dolomía, y el gran tamaño de estas, especialmente en la denominada sala Versalles, debido probablemente al absoluto hermetismo en el que ha permanecido a lo largo de cientos de miles de años.



Figura 3. Cueva de Pozalagua.

Tras un largo periodo de 34 años desde su descubrimiento, la Cueva de Pozalagua fue abierta al público en 1991, evitando de esta forma visitas incontroladas e iniciando una nueva etapa como recurso turístico. Pese a que no se comenzaron a archivar los datos de las visitas que se recibían en la cueva hasta el año 2003, durante la última década el número de visitantes ha ido decreciendo paulatinamente, hasta tocar fondo en el año 2012, en el que acudieron a la cueva 20.146 personas, frente a las 47.474 de 2003. Esto llevó a los actuales responsables del Ayuntamiento de Karrantza, a plantearse la necesidad de dar pasos que permitieran revertir esa tendencia a la baja, para lo cual, se tomaron una serie de medidas, condicionadas por la nula disponibilidad económica de las arcas municipales. Por ello, ese impulso promocional debía de girar, con una pequeña dosis de imaginación, sobre la creación de noticias y promociones diversas que sirvieran para atraer la atención de los medios de comunicación, de forma que periódicamente se publicara algún artículo u ofreciera alguna noticia relacionada con Pozalagua. Se inició una campaña de constantes notas de prensa sobre promociones relacionadas con la cueva, como entradas gratuitas para las mujeres en el Día de la Mujer, o para los parados en determinados periodos del año, diversas promociones y descuentos en el Día mundial de las Cuevas, o en

carnavales, etc....Además, se ofertan descuentos a los turistas que pernocten en la Comarca, de forma que se visualice un mayor protagonismo de Pozalagua como motor económico del sector turístico de la zona.

INICIO DEL CONCURSO MEJOR RINCÓN 2013

Y estábamos en éstas, cuando se inicia la segunda edición del concurso Mejor Rincón 2013, organizado por la Guía Repsol, en el que los usuarios de esta prestigiosa guía turística, proponen lugares especiales por su valor cultural o natural, con el objetivo de descubrir rincones insólitos de todo el estado. Tras recibir 1244 candidaturas, un jurado de la Guía Repsol, selecciona un lugar como representante de cada Comunidad Autónoma. Elegidos los 17 candidatos, éstos se enfrentan entre sí en diferentes fases eliminatorias a través de los votos electrónicos de la ciudadanía. Tras superar las diversas y disputadas rondas a lo largo de los meses de verano, la Cueva de Pozalagua alcanzó la final en la que se enfrentó a la Judería de Hervás de Extremadura, resultando ganadora del concurso con una increíble cifra total de 898.026 votos.

La repercusión de esta “pequeña revolución” en nuestro pueblo ha contribuido a dar un impulso turístico a la Cueva de Pozalagua, y éste ha superado nuestras expectativas más optimistas. Sin embargo, detrás de todo ello, se esconden varios factores que han resultado determinantes a lo largo de los meses que duró el concurso: muchas horas de trabajo y dedicación, una implicación total de la gente del municipio, un trabajo conjunto con el resto de Instituciones de la comarca y la provincia (Ayuntamientos, Diputación Foral de Bizkaia y Gobierno Vasco), así como con otras instituciones de gran calado en Bizkaia como el Athletic Club de Bilbao (Figura 4), Petronor, diferentes artistas, etc.



Figura 4. Los futbolistas del Athletic Markel Susaeta, Emery Laporte y Ander Iturraspe.

La aventura comenzó tras el envío de una propuesta de una visitante de la cueva, Naiara Ortiz, para que Pozalagua participara en el citado concurso. A partir de ahí, el Ayuntamiento, de la mano de un grupo de trabajo formado por vecinos y vecinas de Karrantza (Plataforma Pozalagua), sin el cual nada de esto hubiera sido posible, iniciaron un trabajo de promoción del mismo, solicitando el voto de la ciudadanía para ir superando las diversas fases del concurso. No podemos obviar que como ya se ha indicado, Karrantza cuenta con 2.800 habitantes, que es una localidad rural, dispersa, con una media de edad relativamente elevada (un 25% mayor de 65 años), y con un porcentaje de usuarios de internet relativamente bajo, por lo cual necesitábamos que el interés y apoyo a Pozalagua trascendiera nuestras fronteras. La comarca donde nos encontramos, una de las más despobladas de Bizkaia, cuenta con unos 30.000 habitantes, por lo que también intuíamos que debíamos dar un paso más y recabar el apoyo de la gente, no solo de Bizkaia, sino de todo Euskal Herría. Para ello, también se unió a esta iniciativa Enkartur, asociación responsable de la promoción turística de la comarca. El objetivo era socializar el mismo, hacerlo visible y reconocible, e incitar a la participación, de forma que la Cueva de Pozalagua contara con esos votos electrónicos diarios que permitieran ir dando pasos hacia la final. Por tanto, y con la colaboración en la difusión por parte de los medios de comunicación, redes sociales, etc., se llevaron a cabo una serie de iniciativas populares (Figura 5) e institucionales que rápidamente encontraron eco en la sociedad: sorteos de obras de arte donadas altruistamente por artistas de Karrantza, innumerables notas y ruedas de prensa, así como entrevistas en radios, televisiones y otros medios de comunicación, caravanas recorriendo los pueblos vecinos hasta acercarnos al Ayuntamiento de Bilbao recabando el apoyo de los municipios de nuestro entorno, creación de una bandera con logotipo propio, contactos con las casas vascas distribuidas por todo el mundo, divulgación de trípticos informando de cómo participar en el concurso, sorteos de entradas en emisoras de radio...



Figura 5. Acto de apoyo a la candidatura de Pozalagua en la plaza del Ayuntamiento.

SATISFACCIÓN POR LA VICTORIA FINAL

Y así, voto tras voto, se iban superando las diferentes eliminatorias, lo cual iba generando una mayor expectativa a todos los niveles, hasta alcanzar y superar a nuestro adversario en la gran final. El cierre de las votaciones y la designación definitiva de Pozalagua como Mejor Rincón 2013 (Figura 6), se vivió con gran emotividad en el salón de plenos del Ayuntamiento, con la asistencia de varios medios de comunicación (prensa escrita, radios, televisiones...). Tras la finalización del concurso, los asistentes tuvieron la oportunidad de acudir al entorno de la propia cueva, donde la alegría por el objetivo cumplido se desbordó y se celebró con una parrillada popular. Trascurrido un mes, tuvo lugar el acto oficial de entrega de la placa conmemorativa del concurso por parte de los responsables de Repsol. A este acto, además de acudir diversos representantes institucionales, acudieron igualmente diversos medios de comunicación (Figura 7).



Figura 6. Resultado final.



Figura 7. Alcaldes de la localidad de Olivenza, ganadora del Mejor Rincón 2012, y Karrantza.

CONSECUENCIAS DEL CONCURSO

El resultado de todo este proceso, ha sido espectacular: las visitas a la Cueva, que habían descendido en los últimos tiempos de forma significativa, se incrementaron en el 2013 en un 85% con respecto al año anterior (Figuras 8 y 9), generando una riqueza en el sector terciario que siempre es bienvenida en un municipio de nuestras características. El reconocimiento adquirido gracias a este concurso ha acarreado otra serie de iniciativas que igualmente están colaborando en la promoción de la cueva, incluso meses después de terminar el mismo. Así, el Gobierno Vasco, en el acto de entrega de los premios de Comercio y Turismo Euskadi 2013, hizo una mención especial a la Cueva de Pozalagua (Figura 10). Igualmente, el pasado 27 de mayo de 2014, la ONCE, a propuesta del Ayuntamiento de Karrantza, accedió a editar un cupón especial dedicado a esta Cueva. Además, los medios de comunicación son más propensos a hacerse eco de cualquier noticia relacionada con Pozalagua, por lo que la aparición en los mismos sigue siendo constante.

Gracias a estos y otros eventos, a lo largo de los meses transcurridos hasta que se escribe este artículo (junio de 2014), esa tendencia al alza se mantiene, llegando a duplicarse el número de visitantes que han acudido a Pozalagua (7.595 personas en 2013, por 15.687 en 2014. Datos obtenidos del Ayuntamiento de Karrantza). Lógicamente, esto implica la creación de nuevos puestos de trabajo para hacer frente a la demanda generada, y un beneficio para todo el municipio, especialmente para las empresas relacionadas con el sector turístico.

AÑO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
VISITAS	41.096	31.510	27.876	25.718	23.348	20.146	37.263	15.687

Figura 8. Cuadro visitas anuales a Pozalagua (2014 de enero a mayo)

	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Ju	Ju	Ag	Se	Oc	No	Dic	Total
2012	209	351	1164	2476	1450	2754	2558	3738	1861	1400	790	625	20146
2013	197	315	3206	1578	2299	3489	2903	5885	5181	6640	3299	2294	37263
2014	1017	1270	2586	5643	5171								

Figura 9. Cuadro visitas mensuales a Pozalagua

Además, durante los últimos días de julio, los responsables de la Guía Repsol, han grabado un anuncio publicitario en la localidad, para presentar y difundir la tercera edición del concurso Mejor Rincón, con lo cual, la onda expansiva promocional derivada del citado concurso, perdurará aún un tiempo más, ya que previsiblemente los diversos medios de comunicación volverán a contactar con nosotros para explicar los efectos de dicho concurso, y por la inevitable relación del Mejor Rincón 2013, con los rincones propuestos para el 2014 que vayan pasando las rondas eliminatorias pertinentes.



Figura 10. Raúl Palacio, alcalde de Karrantza, y Leyre Barreras (centro) en representación de la Plataforma de Pozalagua, junto al Lehendakari y la Consejera de Turismo, en la entrega de los premios Comercio y Turismo Euskadi.

Sin embargo, y a pesar de la importancia del incremento de visitas que se traduce en un beneficio económico para el Ayuntamiento y el pueblo en general, no podemos ni queremos obviar otro aspecto fundamental que debe prevalecer sobre su explotación turística: su conservación. Para ello, continuamos con un exhaustivo trabajo de control y seguimiento de los parámetros de CO₂, temperatura, humedad, PH del agua, etc., gracias a las diferentes estaciones de medición repartidas a lo largo de la cueva. Estos indicadores nos demuestran que la cueva goza de buena salud. El palpitar de su corazón, escuchado y sentido a través de su lento goteo, nos ratifica que la cueva sigue viva, y que sus caprichosas formaciones continúan su ralentizado crecimiento. Y así debe perdurar para las siguientes generaciones.

Por todo ello, y a modo de conclusión, podemos afirmar que esta iniciativa de Repsol, además de satisfacer sus lógicos objetivos publicitarios, ha servido para relanzar un punto de interés turístico como la Cueva de Pozalagua, y nos ha demostrado que desde la unidad y la perseverancia, se pueden alcanzar grandes objetivos. Lo vivido durante estos meses en este pequeño pueblo vizcaíno de Karrantza, así lo atestigua.

REFERENCIAS

Puch Ramírez, C. 1998. Grandes cuevas y simas de España. *Espeleo Club de Gracia*. Barcelona.

Ayuntamiento de Karrantza 2014 in:

<http://www.karrantza.org/es-ES/Ayuntamiento/Historia/Paginas/default.aspx>.

La Mina Costanaza como motor de desarrollo rural: Proyecto Minas de Logrosán

M. Paz Dorado-Martínez

Excelentísimo Ayuntamiento de Logrosán (museo.logrosan@hotmail.com)

RESUMEN

Minas de Logrosán es la denominación de un amplio proyecto de puesta en valor del patrimonio minero que el Ayuntamiento de Logrosán viene desarrollando desde 2008 cuando la adquisición de unos terrenos destinados a una cesión de suelo hizo que parte de las antiguas instalaciones mineras de la compañía Fosfatos de Logrosán, S.A. pasaran a ser propiedad municipal y atrajeran el interés hacia este patrimonio olvidado y abandonado durante décadas. Consultas con especialistas pusieron de relieve la importancia del patrimonio geológico y minero de Logrosán y la alcaldía vio en esa riqueza una oportunidad para el desarrollo local en base al turismo. El máximo atractivo del proyecto Minas de Logrosán es en la actualidad la Mina Costanaza que fue una importantísima fuente de fosfatos en España durante la primera mitad del siglo XX. Esta cavidad conjuga experiencia subterránea con un gran potencial didáctico y está haciendo de Logrosán un destino turístico maduro a nivel regional y esperamos que paulatinamente también a nivel nacional e internacional. La consecución de este objetivo se apoya además en la colaboración con otras iniciativas como el Geoparque Villuercas Ibores Jara, el Sendero Internacional de los Apalaches, la Vía Verde de las Vegas del Guadiana y el Camino Natural de las Villuercas (GR-116). Desde su apertura al público en agosto de 2012 hasta abril de 2014, la Mina Costanaza ha recibido casi 10.000 visitantes. Estas cifras nos hacen sentir optimistas respecto al futuro y se van traduciendo en una mayor atención por parte del gobierno regional con ayudas económicas para nuevas actuaciones que nos dan la oportunidad de seguir creciendo.

Palabras clave: minería, fosfato, Mina Costanaza, didáctica, patrimonio, desarrollo rural.

Costanaza mine as engine for rural development: Minas de Logrosán Project

ABSTRACT

Minas de Logrosán is the name of a wide project to enhance mining heritage that Logrosán Council has been developing since 2008 when some land was acquired for a grant and a part of Fosfatos de Logrosán, S.A. Company old installations become city hall properties and attracted interest to this forgotten heritage abandoned for decades. Advice with experts stand out the important geological and mining heritage in Logrosán and Town Council see in this wealth an opportunity for local development based on tourism. The main attraction in Minas de Logrosán project is nowadays Costanaza Mine, a very important resource of phosphate in Spain during the first half of the XX century. This cavity combine underground experience with a high didactic potential and is turning Logrosán in a ripe regional tourist destination and we hope gradually national and international. Achieving this objective rests as well in collaboration with other enterprises such as Villuercas Ibores Jara Geopark, International Appalachian Trail, Vegas del Guadiana Green Way or Villuercas Natural Path (GR-116). Since opening to the public in august 2012 to April 2014 Costanaza Mine has received nearly 10.000 visitors. This number make us feel optimistic about future and translate into greater attention from regional government with financial aid for new performance that gives us a chance to keep growing up.

Keywords: mining, phosphate, Costanaza Mine, didacticism, heritage, rural development.

INTRODUCCIÓN: EL PATRIMONIO GEOLÓGICO Y MINERO DE LOGROSÁN

En la actualidad Logrosán es un municipio de unos 2.000 habitantes situado al sureste de la provincia de Cáceres al pie de un plutón granítico denominado Sierra de San Cristóbal (Figura 1). Desde el punto de vista geológico se incluye en la zona Centro-Ibérica del Macizo Hespérico en el sinclinorio de Las Villuercas, un plegamiento hercínico arrasado y remodelado en un relieve apalachense de sierras paralelas con dirección NO-SE. El anticlinal de Logrosán es una estructura convertida en penillanura por la erosión y formada por los materiales precámbricos del Alogrupo Domo Extremeño (Fernández, 2008). En este contexto, la formación granítica ha dado lugar a una serie de yacimientos minerales que han convertido Logrosán en un importante centro minero a lo largo de la historia (Boixereu, 2004).



Figura 1. Logrosán al pie de la Sierra de San Cristóbal.

Las explotaciones más antiguas se encuentran en lo alto de la Sierra de San Cristóbal y se remontan al primer milenio antes de Cristo. Se trata de un poblado minero dedicado a la extracción de casiterita (SnO_2) como mena de estaño para la aleación del bronce (Sos 1977), así lo atestiguan los trabajos arqueológicos llevados a cabo por Craigh Merideth (Merideth, 1998) y Alonso Rodríguez entre 1998 y 2000 y Alonso Rodríguez (Rodríguez *et al.* 2001) y Mark Hunt en 2013 (Rodríguez *et al.* 2013).

La formación granítica da lugar además a yacimientos peribatolíticos de una roca filoniana, la fosforita, en los que se da una gran concentración de un fosfato de calcio, el fluorapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$), que se documenta en Logrosán por primera vez en el siglo XVIII por un hallazgo fortuito de Guillermo Bowles (Bowles, 1775) que culminará en un artículo escrito por Louis Proust publicado en 1779 y titulado "Sobre la Piedra Fosfórica de Extremadura" (Proust, 1779). Este hallazgo se traduce en una explotación minera en la segunda mitad del siglo XIX (Gutzwiller, 1919) como fuente de materia prima para la fabricación de abonos destinados a la gran demanda que provoca en Europa la Revolución Industrial y que culmina en la década de 1920 llegando a tener el municipio una población cercana a los 11.000 habitantes. Las explotaciones cesan en 1944 por la dificultad que supuso atravesar el macizo montañoso de Las Villuercas durante la construcción de la línea ferroviaria de Villanueva de la Serena (Badajoz) a Santa Quiteria (Toledo) que iba a cubrir el transporte del molido de Logrosán a la fábrica de abonos de Fosfatos de Logrosán, S.A. en Villanueva de la Serena y que se abandonó sin terminar después de la Guerra Civil ya que no resultaba rentable por la bajada de precio del abono provo-

cada por los fosfatos norteafricanos. Sin ferrocarril las minas de Logrosán ya no tenían sentido económico y se cerraron definitivamente en 1946.

En 1949 los hallazgos de cristales de casiterita que encontraban los buscadores de oro que bateaban los arroyos de la localidad hicieron que mucha gente subiera al cerro en busca de filones lo que provocó la explotación anárquica que encontró el geólogo Vicente Sos Baynat cuando llegó a Logrosán en 1950 a organizar las explotaciones mineras de casiterita para la compañía del Matadero de Mérida contratado por José Fernández López. Estas explotaciones industriales de estaño se mantuvieron hasta principios de los años sesenta en los cerros de la Sierra de San Cristóbal y El Serranillo prolongando algo más de una década la actividad minera en Logrosán (Sos, 1967). Después, una especie de amnesia histórica provocada tal vez por el recuerdo de la enfermedad y la dureza de los trabajos mineros borró de la memoria el pasado y la tradición minera y todo lo que tenía relación con esta actividad cayó en el olvido y el abandono.

EL PROYECTO MINAS DE LOGROSÁN

El primer paso para este proyecto fue la creación del Museo de Logrosán, una exposición ecléctica que tuvo como base una colección de minerales y fósiles donada por TECMINSA, S.L. que se complementó con algunas piezas relativas a la historia del municipio. Esta colección pronto empezó a crecer a partir de donaciones de algunos miembros de la Asociación Geológica de Extremadura y de los propios habitantes de Logrosán que buscaron entre sus pertenencias recuerdos de este pasado minero.

Al mismo tiempo, la Diputación de Cáceres, a través del desaparecido Organismo Autónomo de Desarrollo Local, decidía presentar para la comarca de Las Villuercas la candidatura como Geoparque. Para la preparación de la candidatura se identificaron y definieron 44 sitios de interés geológico entre los que se contaron la Mina Costanaza, la Sierra de San Cristóbal y la mina de El Serranillo. Como consecuencia, se destinaron fondos para la realización de la puesta en valor de la Mina Costanaza y para la musealización del Museo de Logrosán, por entonces el único punto activo, junto al Centro de Interpretación de la Cueva de Castañar, en toda la comarca.

Tras la rápida adscripción del Geoparque extremeño a la Red Europea en 2011, se realizaron más inversiones entre las que se financió la creación del Centro de Interpretación del Fosfato que se ubicó en el antiguo laboratorio de la Mina Costanaza y que hoy sirve además para la recepción de los visitantes de la mina.



Figura 2. Centro de Interpretación del Fosfato.

Al mismo tiempo, el Ayuntamiento rehabilitó un almacén minero junto al laboratorio donde hoy se ubica el Museo Geológico y Minero Vicente Sos Baynat en que se ha desglosado el Museo de Logrosán quedando en las antiguas instalaciones el Museo y Archivo Histórico de Logrosán donde permanece la exposición dedicada a la historia del municipio. El Geológico y Minero alberga hoy en día una estupenda colección geológica y paleontológica nutrida de donaciones entre las que cabe destacar, además de las de TECMINSA, S.L. que continúa aportando piezas, las de Vicente Sos, aportadas por su hijo Alejandro, que incluyen muestras de casiterita de la Sierra de San Cristóbal, la de la colección de Miguel Ángel de San José, compuesta por rocas y fósiles procedentes de los Montes de Toledo y en especial de Las Villuercas y los fósiles villuerquinos aportados por el geólogo Juan Gil Montes, de la Asociación Geológica de Extremadura.

Los dos museos, el centro de interpretación y la mina, abierta al público en agosto de 2012, conforman hoy la parte en funcionamiento del proyecto Minas de Logrosán. Pero el proyecto sigue desarrollándose. Entre las actuaciones futuras se cuentan las excavaciones arqueológicas de la Sierra de San Cristóbal, comenzadas con una campaña de tres meses en el verano de 2013 cuyos resultados se publicarán en breve, esta parte del proyecto contempla la excavación y el estudio de los restos arqueológicos así como su consolidación y musealización para hacerlos visitables; la ampliación del recorrido de la Mina Costanaza, para lo que el Gobierno de Extremadura ha adjudicado una dotación que pondrá en valor los restos del polvorín de la mina; la rehabilitación de una antigua galería minera en el cerro de El Serranillo para la que ya existe un proyecto; y por último, la musealización de los restos de las instalaciones mineras del Matadero de Mérida en la Sierra de San Cristóbal, esta última fase está aún sin concretar.

En resumen: el Parque Minero de Logrosán contará con el Museo Geominero, el Centro de Interpretación del Fosfato (Figura 2), restos arqueológicos de minería protohistórica y ejemplos de minería a cielo abierto y de interior preparados para las visitas destinadas al turismo cultural. Los objetivos de este proyecto son en primer lugar detener la pérdida del patrimonio, conservarlo de forma sostenible y utilizarlo como motor de desarrollo en base al turismo.

LA MINA COSTANAZA

Sin lugar a dudas, la estrella del proyecto Minas de Logrosán es la Mina Costanaza. La visita a las galerías del pozo María conjuga el valor didáctico y cultural con la experiencia espeleológica y el disfrute estético.



Figura 3. Pozo Calles en el Filón Costanaza.

La visita comienza en superficie desde donde se observan el castillete minero y el edificio de motores del Pozo Calles (Figura 3), dos construcciones de mampostería y ladrillo macizo perfectamente conservadas, emblemáticas para el municipio y que se han convertido en la imagen del proyecto Minas de Logrosán. Junto a la almazara, antiguo edificio de motores del pozo María, sirven de referencia para orientar la dirección del filón Costanaza.

A continuación se accede al primer nivel de la mina a través del pozo María en un ascensor hasta la galería principal, que data de 1907 y está entibada en ladrillo macizo desde el pozo hasta la mitad del recorrido, a partir de ahí no existía sujeción de ningún tipo y en la actualidad se ha reforzado con un entibado de cercha de hierro y madera para seguridad de las visitas realizado por SADIM (Grupo HUNOSA). Bajo la bóveda de entibado, unos desplomes que se produjeron en 1950 y fueron solucionados con cinco arcos de sostenimiento, permiten ver ya el segundo nivel de galerías a través del *tramex* transparente que se ha utilizado como pasarela. Al final del entibado de ladrillo, un nuevo sostenimiento abierto deja al descubierto la zona milonizada del filón y bajo ella se puede observar el estéril que rellena las galerías mineras. En esta zona se abre un acceso a través de una escalera que conduce al segundo nivel de galerías.

En el segundo nivel se ha rebajado el estéril en una zona seca donde se ve una cámara de explotación de una gran belleza. Aquí se diferencia perfectamente el filón que rellena la falla y las lutitas precámbricas que forman la roca encajante; se observan además estructuras brechoideas que indican depósitos con componentes de formación tectónica, el nivel freático de la mina, chimeneas de aireación y un compresor con barrena de 1936. En esta cámara se abre una pequeña galería colgada a la que se accede por una escalerilla y que termina en un pequeño pozo, probablemente una chimenea de aireación. En esta pequeña galería se observa con claridad el metamorfismo de contacto, pequeños filones en los que se distinguen muy bien las bandas de cuarzo y fluorapatito que forman la roca filoniana y neoformaciones de estalactitas en los techos.

Subiendo por el mismo acceso por el que se desciende, la visita continúa el recorrido por el primer nivel hasta la bocamina. En este último tramo se pueden ver barrenas, agujeros de barreno en las paredes de roca y un entibado de cuadros de madera en el último tramo de la galería donde espera un trenecillo con tres vagones para salir a la superficie que encanta a los más pequeños (Figura 4). Es un trayecto corto que permite, después de acceder a través del pozo, como los mineros, salir en vagoneta por la bocamina, como el mineral.

Una vez en el exterior se pueden ver otras instalaciones mineras como los hornos de pirita, únicos restos de la antigua fábrica de ácido sulfúrico destruida en un incendio sobre 1926; la arquitectura industrial de la fábrica de superfosfato, por el momento utilizada como almacén municipal; la fábrica de finos convertida en cafetería-restaurante; el laboratorio, recreado en el piso superior del Centro de Interpretación del Fosfato y que conserva elementos originales como el suelo o parte del mobiliario; o un antiguo almacén, hoy Museo Geológico y Minero Vicente Sos Baynat. Todo esto en una zona de recreo con jardines, bancos para el descanso, un lago, parque infantil y parque de adultos.

ESTRATEGIA DE PUESTA EN VALOR: LA DIDÁCTICA DEL PATRIMONIO COMO FACTOR DIFERENCIADOR

La puesta en valor del patrimonio requiere en primer lugar una rehabilitación física de las instalaciones que las acondicione para una visita segura, pero esto solo no basta, son necesarias otras estrategias que potencien los valores de este patrimonio, lo diferencien de otras opciones y lo hagan atractivo.

La Mina Costanaza, además de los valores estéticos y de experiencia subterránea, posee una característica muy especial: la evidencia con la que se muestran todos los procesos. Esta característica la dota de un enorme valor didáctico que no requiere ningún esfuerzo ni conocimientos previos y que resulta muy enriquecedora a la vez que refuerza la autoestima de los visitantes que se ven capaces de comprender procesos aparentemente complejos. Sólo hacen falta unas claves de interpretación que facilitan los guías.

Para la elaboración de las claves de interpretación no olvidamos nunca que se trata de un proceso de comunicación, el mensaje tiene que llegar al receptor para que tenga éxito, de manera que el primer paso es estudiar el perfil del visitante para conocer a nuestro interlocutor. En la Mina Costanaza éstos son muy variados, por eso hay que adaptar el discurso dependiendo de las características del grupo. Con la práctica se puede conseguir observando a los visitantes y haciendo una evaluación previa que se personaliza sobre el terreno a partir de las preguntas que surgen durante la visita, pero tenemos preparado un discurso adecuado a los perfiles generales de nuestros visitantes en función sobre todo de la edad, el grado cultural y la homogeneidad del grupo.

Para los más pequeños, nuestro objetivo es que la experiencia suponga una primera toma de contacto con el interior de la corteza terrestre, la experiencia subterránea se ve subrayada por la necesidad de ponerse un casco protector, antes de entrar buscamos conocimientos previos que les motiven y les ubiquen: los enanitos de Blancanieves eran mineros. Una vez dentro les dejamos tiempo para observar y hacerse conscientes de sus propias experiencias, como pisar sobre el vacío en el *tramex* transparente desde el que se ve el nivel inferior iluminado desde abajo. Escuchamos también los ruidos de la mina en un disco de sonido ambiente en el que se oyen golpes de picos, vagonetas corriendo por los raíles y la detonación de un cartucho. Finalmente, descubrir el pequeño tren al final del recorrido y salir de nuevo a la luz del día en las vagonetas les encanta.



Figura 4. Salida en tren de grupos escolares.

Los niños más mayores, ya en Educación Primaria, disfrutaban igualmente de todos estos atractivos, pero además la visita les permite aplicar conocimientos adquiridos en el aula. Como ejemplos de esto: diferenciamos el sector primario del secundario explicando los procesos de extracción del mineral y de la fabricación del abono; repasamos la fotosíntesis para comprender cómo una piedra puede ser una materia prima para la fabricación de abonos; aprovechamos las filtraciones para recordar el ciclo del agua y ver qué ocurre en el interior de la corteza terrestre; o vemos cómo se empiezan a formar las estalactitas y cuánto crecen en un siglo o cómo los hongos colonizan las maderas muertas de los entibados y se reproducen con setas que una vez que han dejado libres sus esporas maduras mueren. Utilizamos técnicas como el aprendizaje a través de los objetos dejando que manipulen alguna pieza, por ejemplo un candil de carburo. Para grupos escolares esto se adapta al currículo, en grupos heterogéneos (familias con niños de distintas edades), como los grupos son reducidos (12 personas), el discurso se dirige específicamente a cada niño según la edad. Esto agrada a los maestros y produce satisfacción en los padres en primer lugar porque hablar a los niños de cosas que conocen atrae su interés y ven que además de divertirse, aprenden y si el nivel cultural es bajo, esta información básica ayuda también a los padres, de forma indirecta, a comprender lo que están viendo.

A partir de edades comprendidas en la Enseñanza Secundaria se dan claves de interpretación más precisas y multidisciplinarias. Aquí juega un papel primordial la utilización del Centro de Interpretación que ofrece una información previa que prepara para la visita con un recorrido por la historia humana, la historia geológica, las labores de extracción, el tratamiento posterior, el transporte y los procesos químicos de fabricación de superfosfato. Termina con un audiovisual de ocho minutos de duración en el que uno de los protagonistas, Miguel Martín, de 94 años, que fue mozo de carga y ayudante de camiones para Fosfatos de Logrosán, hijo de fogonero, hermano de barrenero y cuñado de clasificadora de mineral, cuenta aspectos humanos de los mineros de Logrosán: cuánto cobraban, cómo se vestían, las enfermedades que sufrían... Esta información previa se aplica luego durante el recorrido de la visita a la galería en que se observan rocas encajantes, filones, ganga y mena, formación del yacimiento (fracturas rellenas, estructuras brechoides...), entibados y herramientas y se disfruta además de la singular belleza de la cámara de explotación del segundo nivel en la que todo el mundo se fotografía (Figura 5).



Figura 5. Cámara de explotación en el segundo nivel de la Mina Costanaza. Se observa perfectamente la diferencia de coloración entre las rocas encajantes y el filón de fosforita.

Los grupos de adultos requieren un discurso multidisciplinar que explique la existencia de la mina desde todos los puntos de vista, adaptado según el nivel cultural y que haga hincapié en aspectos técnicos, humanos o geológicos en función de los intereses del grupo de visita. Las personas con formación científica suelen interesarse más por las características del yacimiento, si la formación es humanística normalmente preguntan más por aspectos históricos, los grupos de mayores se interesan por la dureza del trabajo y las enfermedades asociadas... En ocasiones esta adaptación es muy especializada, por ejemplo, los ferroviarios se interesan por los detalles del transporte del molido.

RESULTADOS

Los datos estadísticos recogidos hasta el momento desde el 1 de agosto de 2012 hasta el 30 de junio de 2014, a falta de un mes para cumplir los dos años, son escasos pero empiezan a arrojar luz sobre la evolución de las visitas a la Mina Costanaza.

Gráficamente se observan dos picos que se corresponden con los meses de agosto y abril, el primero se debe a la gran expectación que generó la apertura de la mina en la comarca y supone un 42% de las visitas computadas durante ese mes en 2012; el segundo coincide con la temporada alta con un notable incremento en 2014 (Figura 6). Desde finales de febrero aumenta el número de visitas porque empieza la temporada de centros educativos que se prolonga hasta junio, en estos meses, el descenso de visitas este año se debe a los recortes provocados por la crisis económica que han disminuido el número de centros educativos adscritos al programa "Conoce Extremadura" de 23 en 2013 a 12 en 2014.

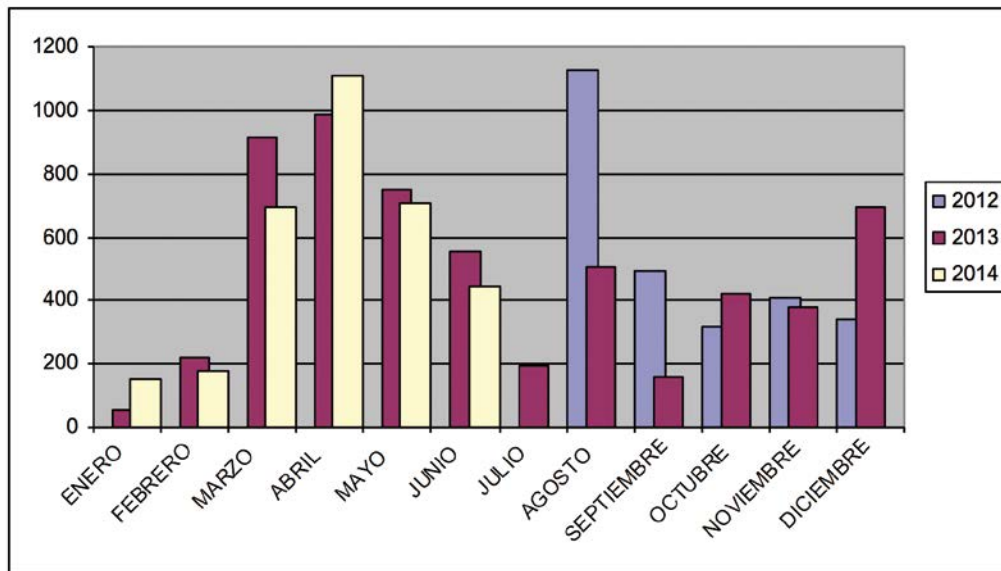


Figura 6. número de visitantes por meses desde agosto de 2012 a junio de 2013.

Las vaguadas marcan los meses más bajos que son enero y septiembre, aunque este último en 2012 es más alto debido a que arrastra esa expectación de que hablábamos para agosto. En julio se observa una nueva bajada que aumenta en agosto por la afluencia de emigrantes que vuelven a la comarca para pasar sus vacaciones hasta septiembre que es un mes también muy bajo. En enero y febrero de 2014 se observa también una bajada en 2014 debido a que durante esos meses la mina permaneció cerrada al público durante algunos días mientras se realizaron obras de rehabilitación.

En estos casi dos años nos han visitado 11.805 personas, lo que nos da unas cifras de casi 6.000 visitas anuales, de las cuales 5.836 corresponden al año 2013, el único que aparece completo en el análisis y que corrobora la media anual. En general estamos satisfechos con este balance como acogida del público, pero esperamos que en los próximos años se incremente al menos hasta las 20.000 visitas anuales. Para alcanzar estas cifras nos queda seguir trabajando y a ello nos animan los comentarios del público que quedan en el libro de visitas, tanto de turistas como de especialistas, que nos alientan, nos felicitan y en general reflejan satisfacción tras su paso por la Mina Costanaza.

REFERENCIAS

Boixereu, E. 2004. Mina de fosfato La Costanaza, Logrosán, Cáceres. En: *Tierra y Tecnología: Revista de Información Geológica*, nº 26: 25-34.

Bowles, G. 1775. Introducción a la Historia Natural y a la Geografía Física de España. *Imprenta de D. Francisco Manuel de Mena*, Madrid, 56.

Fernández, F.J.; Solanilla, J.A. 2008. Inventario del Patrimonio Geológico y Minero de las Minas de Logrosán. *Informe inédito. Museo Geológico y Minero Vicente Sos Baynat*, Logrosán.

Gutzwiller, O. 1919. Informe sobre los yacimientos de fosforita de Logrosán, prov. De Cáceres. Informe inédito. *Museo Geológico y Minero Vicente Sos Baynat*, Logrosán.

Merideth, C. 1998: El factor minero: el caso del estaño y el poblado de Logrosán (Cáceres). En A. Rodríguez Díaz (ed.): *Extremadura Protohistórica: Paleoambiente, Economía y Poblamiento*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Extremadura. Cáceres: 73-96.

Proust, L. 1779. Sobre la Piedra Fosfórica de Extremadura. En: *Anales de Historia Natural*, tomo I, Imprenta Real de Madrid, Madrid. 127-135.

Puché, O.; Boixereu, E.; Dueñas, J. 2013. Custodia del Territorio Minero Español. En: *De Re Metálica*, nº 21. Madrid. 37-43.

Rodríguez, A., Pavón, I., Merideth, C. y Juan, J. 2001: El Cerro de San Cristóbal, Logrosán, Extremadura, Spain. The archaeometallurgical excavation of a Late Bronze Age tin-mining and metalworking site. *British Archaeological Reports*, International Series 922, Archaeopress. Oxford.

Rodríguez, A., Pavón, I., Duque, D., Ponce de León, M., Hunt, M. y Merideth, C. 2013. "La explotación tartésica de la casiterita entre los ríos Tajo y Guadiana: San Cristóbal de Logrosán (Cáceres)". *Trabajos de Prehistoria* 70. Nº1, enero-junio 2013, pp 95-113.

Sos, 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.

Sos, V. 1977. Los hallazgos prehistóricos de Logrosán (Cáceres). *Revista de Estudios Extremeños* XXXIII-2: 261-286.

Actuaciones geoturísticas en el Monumento Natural Cuevas de Fuentes de León (Badajoz, Extremadura)

Francisco J. Fernández-Amo⁽¹⁾, Eduardo Rebollada-Casado⁽²⁾ y Pedro Muñoz-Barco⁽³⁾

(1) Técnicas Mineras de Santa Marta, S.L. (C/ Estatuto de Autonomía s/n, 06150, Santa Marta, Badajoz) (francis@tecmineras.com)

(2) Dirección General de Industria y Energía de la Junta de Extremadura. (Paseo Roma, s/n. 06800 Mérida (Badajoz) (eduardo.rebollada@hotmail.com)

(3) Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura. (Avda./ Luis Ramallo, s/n. 06800 Mérida (Badajoz) (pedro.munoz@gobex.es)

RESUMEN

Las Cuevas de Fuentes de León se sitúan en el municipio de Fuentes de León (provincia de Badajoz), siendo fronterizas por el sur con el término municipal de Cañaveral de León (provincia de Huelva). Constituye uno de los conjuntos kársticos más interesantes de Extremadura, razón por la cual fue declarado espacio natural protegido (Monumento Natural) en 2001. Actualmente hay cuatro cuevas (Agua, Masero, Los Postes y Caballo) y otros espacios (centro de interpretación, centro de recepción de visitantes, museo geológico, museo de rocas, ruta botánica, surgencias kársticas, lapiazes y simas, etc.), todos ellos visitables en determinadas condiciones, gracias a las distintas obras y actuaciones realizadas por la Junta de Extremadura. Gracias a ello, los visitantes pueden contemplar numerosos elementos patrimoniales geológicos, arqueológicos y ambientales, que configuran hoy en día una oferta que amplía y mejora notablemente el atractivo geoturístico.

Palabras clave: Patrimonio geológico, karst, geoturismo, Fuentes de León, Badajoz.

Tourism actions in the Natural Monument of Cuevas de Fuentes de León (Badajoz, Extremadura)

ABSTRACT

The Cuevas de Fuentes de León are located in the town of Fuentes de León (Badajoz), with border on the south by the municipality of Canaveral de León (Huelva). It is one of the most interesting sets of Extremadura karst, which is why it was declared a protected (Natural Monument) natural area in 2001. There are currently four caves (Water, Masero, Studs and Horse) and other spaces (interpretation center, visitor reception center, geological museum, museum of rocks, botanical path, karst springs, sinkholes and caves etc..), All visitable them under certain conditions, thanks to the various works and actions taken by the Junta de Extremadura. As a result, visitors can see numerous geological, archaeological and environmental assets, which constitute today a deal that expands and greatly improves the attractiveness geotourism.

Keywords: Geological heritage, karst, geotourism, Fuentes de León, Badajoz.

INTRODUCCIÓN

El conglomerado de espacios expositivos existentes en Fuentes de León, centros de interpretación y de recepción, museos de geología y de rocas (El Jardín de las Piedras), visita a las cuevas, talleres y actividades programados, rutas activas y rutas naturales y culturales; conforman una amplia y variada oferta con un claro objetivo, que las Cuevas de Fuentes de León sean autogestionables.

En base a ello la Dirección General de Medio Ambiente el Gobierno de Extremadura lleva varios años realizando inversiones para la mejora en la puesta en valor del Monumento Natural "Cuevas de Fuentes de León", habilitando nuevas salas en las diferentes cuevas para visitas, mejorando la accesibilidad a las mismas, y a la misma vez potenciando la conservación del patrimonio geológico y natural (Durán y Robledo, 2003). Además se han creado nuevas infraestructuras y espacios expositivos en el entorno de las cuevas, que han ampliado en pocos años la oferta geoturística de uno de los espacios naturales más singulares de Extremadura.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y GEOLÓGICA

Las Cuevas de Fuentes de León se ubican en la zona meridional del término municipal. Fuentes de León se localiza al Sur de la provincia de Badajoz, en la frontera con la provincia de Huelva, más en concreto se sitúa a unos 120 kilómetros al este de la localidad pacense. Localidades cercanas son: Fregenal de la Sierra (20 km), Jerez de los Caballeros (43), Zafra (60 km) o a Aracena (Huelva) (21 km.). Pertenece a la mancomunidad de Tentudía. El Monumento Natural "Cuevas de Fuentes de León" tiene una extensión de 1.020 ha (Figura 1), situado al sudeste del término municipal. Las cuevas se ubican a unos 5 km de la localidad, en el paraje conocido como Suerte de Montero. Se accede a las mismas a través del Camino del Rincón, habilitado para el acceso rodado con cualquier tipo de vehículo.



Figura 1. Localización del Monumento Natural "Cuevas de Fuentes de León" (en verde).

Geológicamente, el área de estudio pertenece a la Zona de Ossa-Morena (ZOM). Comprende una transversal casi completa del denominado Anticlinorio Olivenza-Monesterio. Dentro de la ZOM las cuevas se encuentran incluidas en el Dominio Alconera-Arroyomolinos, que se subdivide en dos unidades: Unidad Arroyomolinos y Unidad Herrerías. Las Cuevas de Fuentes de León pertenecerían a la Unidad Herrerías.

De las tres formaciones que componen la Unidad Herrerías, la Formación Carbonatada es la que presenta los fenómenos de karstificación (Díaz del Olmo *et al.*, 1988), origen de las cuevas. Se trata de mármoles calcolomíticos que forman las sierras del Puerto, Bujo, Castillo del Cuerno y Ruar. Presenta una potencia variable, siendo la máxima del orden de los 250 metros. La litología de los carbonatos es micrítica y biomicrítica, además de niveles dolomíticos de distribución lateral y vertical muy irregular.

Sedimentológicamente, el depósito carbonatado estaría condicionado por la existencia de mallas de algas en el fondo marino (medio restringido). Al Sur de la Sierra del Bujo han aparecido, en los niveles de calizas rizadas, algunos moldes de cálices de arqueociátidos (*Coscinocyathus sp.*, *Aldanocyathus sp.*), característicos del Ovetiense y el Marianiense inferior, por lo que es probable que la Formación Carbonatada comenzara a depositarse en el Ovetiense o incluso llegara al Vendiense (Cámbrico Inferior).

Desde el punto de vista estructural, encontramos tres familias de fracturación: N°140-160°E, N40-60°E y N10-20°E, todas de origen varisco y tardi-varisco. El conocimiento de la red de fracturación es de vital importancia, ya que condiciona el desarrollo tridimensional de la karstificación, siendo común que las direcciones de máximo desarrollo de las galerías de las diferentes cuevas tengan direcciones como la N40°E, N°160°E o la N-S.

Geomorfológicamente, la zona está constituida en su inmensa mayoría por rocas calizas y/o dolomíticas fisuradas y solubles, lo que origina sumideros y surgencias, con caudal en ocasiones importante, que afloran por todo el conjunto kárstico. Existen afloramientos comunes de rocas calizas con arcilla de descalcificación (terra rossa) y, a veces, rendzinas. La erosión caótica y atormentada de la superficie desnuda de la roca origina numerosos lapiaces y otras estructuras exokársticas.

Hidrogeológicamente, el acífero existente por karstificación, tiene una circulación subterránea modesta, más desarrollada en algunas cuevas que en otras (e.g., Cueva del Agua), con surgencias localizadas (Cueva de La Lamparilla, Fuente de los Sapos), que conforman una unidad hidrogeológica en sí misma.

LAS CUEVAS DE FUENTES DE LEÓN

Las Cuevas de Fuentes de León son el conjunto kárstico más importante de la provincia de Badajoz. Consta de cinco grutas conocidas (Agua, Masero o Bonita, Lamparilla, El Caballo y Los Postes) y varias simas entre las que destacan (Cochinos, Miranda, Rebuscá, la Cabra, Sima La Mina, etc.).

La principal característica que define la oferta geoturística que ofrecen las Cuevas de Fuentes de León es la variabilidad. Actualmente existen cuatro cuevas visitables con singularidades patrimoniales completamente diferentes entre ellas, siendo la Cueva Masero, Cueva los Postes y la Cueva del Agua las de mayor interés.

En la Cueva Masero destaca el patrimonio geológico que alberga, a pesar de ser una cueva de reducidas dimensiones (90 metros lineales de recorrido), alberga una gran cantidad de espeleotemas: coladas, gours, velos, estalagmitas, estalactitas, excéntricas, columnas, travertinos, etc.; aparecen repartidos por toda la cueva, conformando salas de espectacular belleza. Destacan algunas estalactitas por la singularidad de su morfología (Figura 2), que hacen de esta gruta una de las más atractivas de Extremadura.

La Cueva del Agua es la cueva más grande de Fuentes de León descubierta hasta la fecha. Además del patrimonio geológico que alberga en las salas más interiores, destacan tres elementos que hacen de esta cueva un lugar de elevado interés patrimonial.



Figura 2. Estalactitas con distintas morfologías en la Cueva Masero "Cuevas de Fuentes de León".

Por un lado, la presencia de un lago subterráneo (Figura 3), que constituye uno de los acuíferos más singulares de Extremadura; por otro, la presencia de grabados rupestres y restos arqueológicos del calcolítico y neolítico; y, por último, una de las colonias de murciélagos más importantes del suroeste ibérico, motivo por el cual la cueva está declarada como Lugar de Importancia Comunitario. Todo ello hace de esta cueva un enclave único que aúna elementos patrimoniales culturales, naturales y geológicos de gran valor.



Figura 3. Lago subterráneo de la Cueva del Agua "Cuevas de Fuentes de León".

El interés de la Cueva de los Postes radica fundamentalmente en el yacimiento arqueológico que alberga, que constituye uno de los yacimientos Neolíticos tardíos y Epipaleolíticos más importantes de Extremadura. Su principal hallazgo es la localización de una falange de un Hombre de Neandertal (Figura 4), con una datación superior a 180.000 años. Además se han localizado restos humanos de hace más de 10.000 años. Esta cueva presenta singularidades arqueológicas como la presencia de un cráneo trepanado o la existencia de huellas de dientes en algunos de los huesos humanos hallados, indicando prácticas caníbales. Además son numerosos los restos hallados del calcolítico y de época romana. A todo ello hay que unir el elevado valor paleontológico de la cueva, ya que se han hallado restos de numerosos animales hoy ya extintos en Fuentes de León, e incluso extintos a nivel mundial. Destaca por su singularidad la presencia del oso pardo, de hace unos 170.000 años, siendo esta la primera datación de este animal en este periodo en el suroeste de España.



Figura 4. Falange de Homo Neanderthalensis hallada en la Cueva de Los Postes "Cuevas de Fuentes de León".

Además de las tres cuevas mencionadas se puede visitar la Cueva Caballo que además de albergar restos romanos y calcolíticos, contiene algunas de las coladas parietales más espectaculares de todo el monumento natural.

A las cuatro cuevas visitables hay que añadir la Cueva Lamparilla y la Sima de la Mina como espacios subterráneos de interés pero que aún no están acondicionados.

ACTUACIONES GEOTURÍSTICAS EN EL MONUMENTO NATURAL CUEVAS DE FUENTES DE LEÓN

En el mes de julio del año 2014 se han cumplido 13 años de la declaración de las Cuevas de Fuentes de León como Monumento Natural de Extremadura (las cuevas fueron declaradas Monumento Natural de Extremadura mediante el Decreto 124/2001, de 25 de julio y publicado en el Diario Oficial de Extremadura el día 31 de Julio del 2.001). En estos años se han acometido una serie de actuaciones que han conservado y puesto en valor de una manera ejemplar el Monumento Natural. Además, distintas entidades públicas y privadas han colaborado para que actualmente Fuentes de León disponga de un recurso geoambiental de difusión nacional, siendo la Dirección General de Medio Ambiente del Gobierno de Extremadura, responsable de la gestión del espacio natural, la que más ha contribuido a la conservación y puesta en valor de las Cuevas de Fuentes de León.

Una cronología de la historia de la puesta en valor y actuaciones geoturísticas en las Cuevas de Fuentes de León sería la siguiente:

Año 2000.- El antiguo Gabinete Geológico Salvar la Encina, actual TECMINSA, S.L., explora Masero y propone al Exmo. Ayto. de Fuentes de León la protección de todas las cuevas y la elaboración de un Anteproyecto de Puesta en Valor de las Cuevas de Fuentes de León.

Año 2001.- La Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura declara las Cuevas de Fuentes de León como Monumento Natural de Extremadura.

Año 2003.- Financiadas por la Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura se realizan las primeras actuaciones geoturísticas con las obras de acondicionamiento de la Cueva de los Postes y la Cueva del Caballo. En las obras de acondicionamiento se descubre el yacimiento arqueológico de Los Postes. Se contratan vigilantes-guías.

Año 2004.- Financiadas por la Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura, mediante pequeñas obras se adecúa el entorno de la Fuente de Los Sapos, una surgencia kárstica de interés hidrogeológico, se instalan vallados de madera y se realizan distintos senderos entre las cuevas. Financiado por la Diputación de Badajoz se construye el Centro de Interpretación de las Cuevas de Fuentes de León dentro del casco urbano. Se inicia las campañas de excavación arqueológica de las Cuevas de Fuentes de León, que se vienen prolongando hasta la actualidad.

Año 2005 - 2007.- Donación por parte de TECMINSA, S.L. de una colección de minerales, fósiles y rocas que se instala en el Centro de Interpretación. Construcción del Centro de Recepción de Visitantes en el entorno de las Cuevas.

Año 2008.- El Ministerio de Medio Ambiente financia las obras de acceso a la entrada a la Cueva Masero, y el asfaltado y electrificación de los 7 km. que separan las cuevas del casco urbano de Fuentes de León. La Dirección General de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura realiza las obras de acceso a la primera sala de la Cueva Masero y el acceso al interior de la Cueva del Agua.

Año 2009-2010.- La Dirección General de Medio Ambiente financia la musealización del Centro de Recepción de las Cuevas de Fuentes de León y su entorno, con la colocación de paneles, maquetas, y con la creación de un museo de rocas al aire libre (El Jardín de las Piedras). Se construye un albergue y una cafetería en el entorno de las cuevas.

Año 2011.- El Exmo Ayto. de Fuentes de León decide financiar la elaboración de un proyecto para la optimización de recursos turísticos de las Cuevas de Fuentes de León, con el objetivo de potenciar turísticamente las cuevas. Se crean rutas por todo el monumento natural con la dotación de paneles financiados por el Ayuntamiento y empresas locales, así como dotación de materiales para la realización talleres geológicos y arqueológicos.

Año 2012.- La Dirección General de Medio Ambiente del Gobierno de Extremadura, en base al proyecto de optimización elaborado por el Ayuntamiento de Fuentes de León, decide apoyarlo, financiando las obras de acceso a la segunda y tercera sala de la Cueva Masero, ampliando la red de senderos de la zona, y realizando varias obras de acondicionamiento por todo el espacio natural.

Año 2013.- La Dirección General de Medio Ambiente del Gobierno de Extremadura financia las obras de acceso a la cuarta y quinta sala de la Cueva Masero, se crea una ruta botánica y se mejora la exposición del museo de rocas al aire libre.

Año 2014.- La Dirección General de Medio Ambiente del Gobierno de Extremadura financia las obras de acceso a la sexta sala de la Cueva Masero, siendo visitable en su casi totalidad, se realizan varias obras de seguridad

por todas las cuevas. TECMINSA, S.L. dona unas 1.000 muestras al Ayuntamiento de Fuentes de León para la creación del Museo Geológico de Fuentes de León, lo que unido a la colección existente lo convierte de uno de los museos geológicos más completos de Extremadura.

Como se puede apreciar en la cronología, a lo largo de 13 años se han realizado continuamente obras de acondicionamiento y se han creado nuevas infraestructuras en lo que ha venido a ser un proyecto tipo bottom-up: en el que paso a paso se han ido haciendo inversiones que han potenciado que el espacio natural de las Cuevas de Fuentes de León sea un referente del geoturismo en Extremadura.

Las inversiones realizadas en los últimos años en la Cueva Masero han sido fundamentales para la proyección del proyecto, con unas inversiones de unos 150.000 € se ha conseguido habilitar salas para todos los visitantes en las que antes tan sólo podían entrar espeleólogos, todo ello ha motivado un incremento exponencial en las visitas tanto en el número de visitantes, que se acerca a los 10.000 anuales como en la duración de las visitas.

PRÓXIMAS ACTUACIONES GEOTURÍSTICAS EN EL MONUMENTO NATURAL "CUEVAS DE FUENTES DE LEÓN"

Las Cuevas de Fuentes de León suponen un patrimonio único en Extremadura (Fernández y Rebollada, 2005, Fernández *et al.*, 2007, Fernández, 2001)), en un espacio en el que los valores naturales, geológicos y culturales alcanzan un elevado y singular valor patrimonial. Con los espacios visitables existentes y los potenciales se quiere establecer un programa de visitas que permita atender a más visitantes a la vez, potenciando el aumento de visitas y la duración de las mismas.

Las próximas actuaciones previstas son la habilitación de nuevas salas en la Cueva Masero, la habilitación de la Cueva Lamparilla y Sima La Mina, ampliación de la visita actual a la Cueva del Agua, así como la potenciación de actividades de rutas activas y de aventura por el monumento natural. A lo que hay que unir la ampliación del museo de rocas al aire libre, el aumento continuo del interés arqueológico de las Cuevas de Fuentes de León con ayudas a las campañas de excavación arqueológica en las cuevas.

Todas estas actuaciones incrementarán exponencialmente la oferta geoturística del espacio natural con el objetivo puesto en alcanzar las 25.000 visitas y conseguir una estacionalidad de dos a tres días en la zona.

REFERENCIAS

- Díaz del Olmo, F., Baena Escudero, R. y Álvarez García, A. 1998: *Karst y paleokarst de Sierra Morena (Sector Ossa Morena, Hespérico Meridional)*. En: Karst en Andalucía. Durán, J.J. y López Martínez, J. (Eds.), pp. 87-92. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Durán, J.J. y Robledo Ardila, P.A. 2003: *Hacia una nueva geología ecológica: geodiversidad y patrimonio geológico*. En: *Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional*. Rábano, I., Manteca, I. y García, C. (Eds.). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, pp. 15-19.
- Fernández, F.J. y Rebollada, E. 2005: *Punto de Interés Geológico Cuevas de Fuentes de León*. En: *Patrimonio Geológico de Extremadura*. Muñoz, P. y Martínez, E. (Eds.), pp. 131-134. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, Badajoz.
- Fernández, F.J.; Carvajal, D.; Merino, R. y Rebollada, E. 2007: *Datos para el aprovechamiento turístico de las Cuevas de Fuentes de León*. En: *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*. Durán, J.J., Robledo, P.A. y Vázquez, J. (Eds.), pp. 57-65. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Fernández, F.J. 2011; *Proyecto de Optimización de Recursos Geoturísticos de las Cuevas de Fuentes de León*. Exmo. Ayto. de Fuentes de León.

Análise de potencial para proposição do primeiro roteiro espeleoturístico do estado de Sergipe, Brasil

Elias José da Silva y Jéssica Alecsandra de Jesus Silva

*Centro da Terra – Grupo Espeleológico de Sergipe
Avenida Enos Sadock de Sá, 216. Bairro Suissa. CEP 49050-300 Aracaju-Sergipe
(centrodaterra@bol.com.br)*

RESUMO

A proposição de criação de um roteiro espeleoturístico, foco principal da presente análise, surge como alternativa para conservação do patrimônio espeleológico de Sergipe que atualmente vem sofrendo impactos de origem antrópica, em parte causados pelas comunidades do entorno das cavernas. Apesar de Sergipe possuir atualmente 63 cavernas cadastradas em bases de dados, até o momento já foram identificadas quase 100 cavidades, distribuídas em 18 municípios. De acordo com investigações preliminares, apenas cavernas dos municípios de Laranjeiras, Simão Dias e Canindé de São Francisco apresentam condições para o uso turístico. Neste contexto, faz-se necessário a proposição de um roteiro espeleoturístico ligando esses três municípios, para que possa ocorrer uma maior valorização do patrimônio espeleológico e consequentemente a diminuição dos impactos para a sua conservação.

Palavras chave: Cavernas, Conservação, Espeleoturismo, Sergipe.

Analysis of the potential of the proposal of the first speleotourism itinerary in the state of Sergipe, Brazil

ABSTRACT

The proposition of creating a speleotourism itinerary, main focus of the present analysis, arises as an alternative to speleological heritage conservation of Sergipe is currently has been suffering the impacts of anthropogenic origin, partly caused by the surrounding communities of the caves. Sergipe currently owns 63 caves registered in databases, but with almost 100 wells identified, distributed in 18 cities. According to preliminary investigations, only caves of the cities of Laranjeiras, Simão Dias and Canindé de São Francisco present conditions for tourist use. Therefore, it is necessary to the proposition of a speleotourism itinerary, linking these three cities, for a greater appreciation of the speleological patrimony and consequently reducing the impacts to their conservation.

Keywords: *Caves, Conservation, Espeleotourism, Sergipe.*

INTRODUÇÃO

A visitação turística em áreas naturais ocorre pelos mais variados fins, bem como por grupos diversificados de visitantes. Em todo o mundo vários segmentos do turismo levam pessoas a contemplarem paisagens e elementos naturais e culturais de inestimável valor. Tais visitas quando bem aproveitadas nos diversos contextos que se propõe, sejam eles cultural, histórico ou natural, despertam no visitante e/ou turista o interesse pelo conhecimento da temática a qual está sendo abordada, mantendo sempre a conservação dos ambientes visitados.

Conforme Barretto (2003) esses vários tipos de turismo se classificam de acordo com critérios que levam em conta a nacionalidade dos turistas (nacional ou estrangeiro), a sua natureza (emissivo ou receptivo), o volume (minorias ou de massas), a composição social (classes privilegiadas, média ou popular), a autonomia (livre ou dirigido), a duração (de fim de semana, de férias, excursionista e de tempo indeterminado), a frequência (regular ou esporádico) e a motivação (cura, descanso, desportivo, gastronômico, profissional, religioso ou de interesse específico).

Apesar dessa segmentação existir, segundo Moreira (2011) há certa confusão entre segmentos que acabam sendo, na prática, denominados de ecoturismo, e por mais que esses vários segmentos tenham áreas naturais como foco principal da visitação, a ênfase maior na interpretação ambiental é dada para elementos bióticos, deixando os elementos geológicos em segundo plano.

A autora afirma ainda que, com uma ênfase particular na conservação, educação e atrativos turísticos em relação aos aspectos geológicos, interpretar o ambiente em relação aos processos que o modelaram pode ser uma ferramenta de educação ambiental, proporcionando um melhor aproveitamento dos recursos que a natureza nos oferece.

Contudo, tão importante quanto enfatizar elementos geológicos em um dado roteiro, é acrescentá-los e destacá-los para agregar mais valor ao roteiro visitado, complementando e enriquecendo os demais elementos bióticos presentes, potencializando o atrativo como foco de interpretação ambiental no intuito de auxiliar nas ações que minimizem os impactos negativos de origem antrópica.

Seguindo o interesse por ambientes naturais, o turismo em cavernas ou espeleoturismo, tem se desenvolvido em várias partes do Brasil e do mundo. O Patrimônio Espeleológico, incluindo as diversas fisionomias de relevo cárstico, é utilizado para atrair visitantes e gerar renda. As cavidades naturais subterráneas representam o principal atrativo do relevo cárstico, sendo que outras formas também podem ser utilizadas, tais como dolinas, abrigos, paredões rochosos e cânions (Medeiros, 2013).

O Estado de Sergipe possui 63 cavernas cadastradas em bases de dados nacionais, como o Cadastro Nacional de Cavernas da Sociedade Brasileira de Espeleologia (2014) – CNC/SBE e o CANIE, base de dados do CE-CAV – Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas, mas prospecções realizadas atualmente pelo Centro da Terra – Grupo Espeleológico de Sergipe confirmam a existência de 99 cavernas distribuídas em 18 municípios. Essas cavernas apesar de serem pequenas, com desenvolvimento horizontal inferior a 400 m, são dotadas de beleza cênica além de grande riqueza biológica e histórico-cultural, possuindo forte ligação com as populações locais através das lendas e com ocorrências paleontológicas e arqueológicas em seu interior ou em seu entorno, mas que apesar disso não são utilizadas turisticamente, de maneira efetiva.

Muitas comunidades que habitam o entorno dessas cavernas possuem informações sobre elas limitadas apenas às lendas e, por desconhecer sua importância ambiental e cultural, têm causado consideráveis agressões a estes ambientes, como descarte de resíduos sólidos, quebra de espeleotemas, desmatamentos do entorno das cavernas, o que consequentemente gera a degradação e até destruição, caso não haja intervenção para mitigar tais impactos.

Nos últimos quatro anos algumas ações como cursos, palestras e visitas técnicas vêm sendo realizadas pela Ong Centro da Terra através de projetos, com o objetivo de contribuir com a conscientização e divulgação sobre o patrimônio espeleológico. Diante desse processo o que se tem observado é que o interesse em conhecer as cavernas tem se manifestado positivamente por parte das comunidades locais atendidas. Essas ações motivaram a elaboração da presente proposta como ferramenta de valorização e diminuição dos impactos e consequente conservação das cavernas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estado de Sergipe está localizado na região Nordeste do Brasil e abrange uma superfície de cerca de 22.000 km² (Bomfim, 2002) (Figura 1). A área estudada compreende cavernas e seu entorno, localizados nos municípios de Laranjeiras, Simão Dias e Canindé de São Francisco (Figura 2).

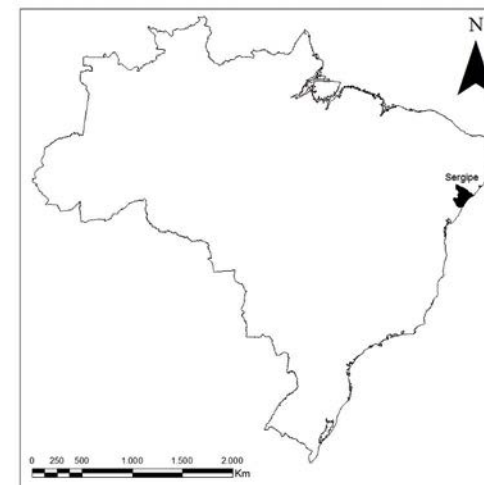


Figura 1. Localização do Estado de Sergipe.

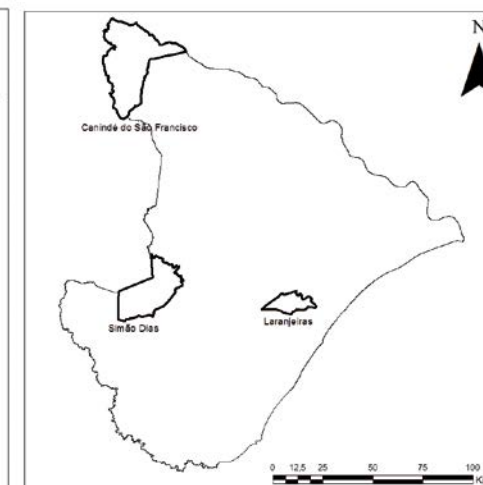


Figura 2. Localização dos municípios estudados.

Para a seleção de áreas potenciais para o roteiro espeleoturístico, foram analisados dados do projeto Pro Cavernas Laranjeiras, executado entre os meses de junho e dezembro de 2012, no município de Laranjeiras; além de dados do projeto *Expedição Centro da Terra – conhecendo as cavernas no meio ambiente*, que vem sendo realizado desde maio de 2013 até outubro de 2014 em 10 municípios sergipanos.

O município de Laranjeiras está localizado na região leste do Estado de Sergipe, limitando-se a norte com os municípios de Maruim e Riachuelo, a sul com Nossa Senhora do Socorro, a oeste com Areia Branca e Itaporanga d'Ajuda e a leste com Santo Amaro das Brotas. (Bomfim, 2002).

Ao todo, em Laranjeiras, 17 cavernas foram encontradas (Tabela 1), dentre elas somente a Gruta da Pedra Furada (Figura 3) se destaca para o roteiro espeleoturístico pelos primeiros registros em pesquisas do geólogo inglês John C. Branner, em 1888 (Branner, 1888); e pelo autorretrato feito em uma de suas paredes por Horácio Hora, ilustre pintor nascido em Laranjeiras que no século XIX projetou sua fama na França. A caverna faz ainda parte do imaginário popular pela lenda dos Jesuítas e de uma passagem secreta que a ligaria ao altar mor da Igreja da Nossa Senhora da Conceição da Comandaroba, datada de 1734 (Figura 4). No entorno dessa caverna há ainda outras cavidades, feições exocársticas, ou elementos arqueológicos e paleontológicos que podem ser explorados de maneira didática agregando alto valor ao roteiro, como por exemplo, um dente fóssil de tubarão do gênero *Ptychodus* que viveu no Cretáceo (Carvalho e Gallo, 2002).

Tabela 1. Cavernas do município de Laranjeiras.

Nº	Nome da Caverna
1	Toca das Colmeias
2	Gruta da Pedra Furada da Mussuca
3	Gruta da Pedra Furada
4	Gruta Maria Passava
5	Gruta Raposinha
6	Gruta dos Orixás
7	Gruta dos Jesuítas
8	Gruta do Tramandaí
9	Gruta do Faleiro
10	Toca da Raposa
11	Gruta Matriana
12	Gruta dos Morcegos
13	Gruta Mimosinha
14	Caverna do Túmulo
15	Caverna do Lumo
16	Caverna dos Aventureiros
17	Toca do Outro Lado



Figura 3. Gruta da Pedra Furada.



Figura 4. Igreja da Comandaroba.

Simão Dias está localizado no extremo oeste do Estado de Sergipe, limitando-se a norte com os municípios de Pinhão e Pedra Mole, a leste com Macambira e Lagarto, a sul com Riachão do Dantas e Lagarto e a oeste com Tobias Barreto, Poço Verde e o Estado da Bahia (Bomfim, 2002). No município atualmente há 11 cavernas cadastradas (tabela 2), destacando-se a caverna Toca da Raposa (Figura 5) e a Gruta do Pórtico, sendo a primeira a mais visitada atualmente, situada em propriedade particular cujo proprietário conduz visitantes ao seu interior, além disso, até o presente momento ela é considerada a maior caverna do estado com aproximadamente 400m de desenvolvimento e umas das mais ornamentadas com espeleotemas. Nela foram encontrados fósseis de megafauna pleistocênica com representantes de *Glyptodon clavipes* e *Galea spixii*. (Dantas, 2009).

Tabela 2. Cavernas do município de Simão Dias.

Nº	Nome da Caverna
1	Abismo de Simão Dias
2	Toca da Raposa
3	Furna do Lixo
4	Furna da Pedreira
5	Furna do Pau Ferro
6	Furna do Ailton
7	Furna do Tonho
8	Furna do Bié
9	Caverna do Pórtico
10	Caverna do Cumbe
11	Caverna do Sacrifício



Figura 5. Gruta da Raposa e Gruta do Pórtico.

O município de Canindé do São Francisco situa-se no extremo noroeste do Estado de Sergipe, estando limitado a norte com o Estado de Alagoas, a oeste e sul com o Estado da Bahia e a leste com o município de Poço Redondo (Bomfim, 2002). Em Canindé há até o momento 11 abrigos e tocas (Tabela 3) que em conjunto com a paisagem externa e pinturas rupestres apresentam um potencial para trilhas interpretativas em meio ao bioma Caatinga, endêmico do nordeste brasileiro (Instituto Chico Mendes, 2012). Em Canindé a proposta é explorar a trilha do Vale dos Mestres (Figura 6), agregando mais valor através de abordagem que inclua na visita informações sobre as tocas e abrigos existentes, com ocorrência de grafismos rupestres.

Tabela 3. Abrigos e tocas do município de Canindé.

Nº	Nome da Caverna
1	Toca da Rocha Arenítica
2	Toca do Lado da Parede de Baixo
3	Toca dos Poucos Metros
4	Laje do Mocó
5	Toca dos Garranchos
6	Toca das Equilibristas
7	Toca da Bela Vista
8	Toca Teto Baixo
9	Toca das Três Toquinhas
10	Abrigo dos Marimbondos
11	Gruta do Rei
12	Abrigo do Mirante
13	Toca das Macambiras



Figura 6. Trilha do Vale dos Mestres com abrigos sob rocha, tocas e pinturas rupestres.

CONCLUSÕES

No Estado de Sergipe há quase 100 cavernas distribuídas em 18 municípios, e tais cavernas por desconhecimento das comunidades locais vem sofrendo agressões que tem causado impactos negativos nelas e no entorno. Das cavernas conhecidas, três apresentam potencial para entrarem na proposta de roteiro espeleoturístico e outras formam um conjunto associado ao Vale dos Mestres, uma trilha já utilizada turisticamente (Tabela 4).

O espeleoturismo tem sido visto como uma alternativa viável na utilização dos recursos naturais. Por outro lado, tal atividade deve ser muito bem conduzida em razão da fragilidade do sistema, tornando assim, a elabo-

ração de planos de manejo espeleológicos, a capacitação de guias e a conscientização de todos os envolvidos – empresários, prestadores de serviço, comunidades e turistas – ferramentas fundamentais para garantir o uso sustentável do ecossistema cavernícola (ICMBio, 2012).

A proposta de um roteiro espeleoturístico surge como forma de minimizar os impactos que as cavernas do Estado de Sergipe têm sofrido, contribuindo para a conscientização e o envolvimento das comunidades locais na conservação e valorização do patrimônio espeleológico sergipano.

Tabela 4. Cavernas com potencial para o roteiro turístico.

Nº	Nome da Caverna	Município
1	Gruta da Pedra Furada	Laranjeiras
2	Toca da Raposa	Simão Dias
3	Caverna do Pórtico	Simão Dias
4	Tocas e abrigos/Vale dos Mestres	Canindé de São Francisco

REFERÊNCIAS

- Barretto, M. 2003. Manual de iniciação ao estudo do turismo. 13. ed. *Papirus*, Campinas.
- Bomfim, L. F. C. 2002. Projeto Cadastro da Infra-Estrutura Hídrica do Nordeste: Estado de Sergipe. *CPRM*.
- Branner, J. C. 1888. The Cretaceous and Tertiary Geology of the Sergipe-Alagoas basin of Brazil. *Transactions of the American Philosophical Society – New series* 16(3): 369-434.
- Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil. Regiões do Brasil 2014. Acesso em: 09/07/2014. <http://www.cavernas.org.br/cnc/CavernasBW/RegioesBrasil>.
- Carvalho, M. S. S. de e Gallo, V. 2002. The presence of *Ptychodus* (Chondrichthyes, Hybodontidae) in the Cotiguiba formation, upper Cretaceous of the Sergipe - Alagoas basin, northeastern Brazil. In: *Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, 6 / Simposio sobre el Cretácico de América del Sur, 2*, São Pedro, SP, p. 307-309.
- Dantas, M. A. T. 2009. Primeiro registro de fósseis de mamíferos pleistocênicos em caverna de Sergipe, Brasil. *Revista brasileira de paleontologia* 12(2):161-164, Maio/Agosto.
- Instituto Chico Mendes 2012. Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da Bacia do Rio São Francisco / Lindinalva Ferreira Cavalcanti et al.; organizadores Lindalva Ferreira Cavalcanti et al. – Brasília: *Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade*, 140 p.: il. Color.; 24 cm. (Série Espécies Ameaçadas, 27).
- Medeiros, R. de C, S. de 2013. Lista de cavernas turísticas em duas áreas prioritárias do PAN Cavernas do São Francisco. In: *Revista Brasileira de Espeleologia*, Volume 2 – Número 3.
- Moreira, J. C. 2011. Geoturismo e interpretação ambiental. *Editora UEPG*, Ponta Grossa.

Curso de capacitação para guias e condutores de espeleoturismo: aprimoramento da experiência turística em cavernas na bacia do Rio São Francisco (Brasil)

Marcela C. Pimenta⁽¹⁾, Patricia R. Pereira⁽¹⁾, Heros A. Lobo⁽²⁾

(1) Projeto Curso de Capacitação em Espeleoturismo Rio São Francisco (marcela@iabs.org.br, patricia.reis@iabs.org.br)

(2) Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – Campus Sorocaba. Rod. João Leme dos Santos, Km 110, bairro do Itinga, Sorocaba – SP – Brasil. CEP 18052-780 (heroslobo@ufscar.br)

RESUMO

Este trabalho apresenta a experiência do curso de capacitação para guias e condutores de espeleoturismo realizado na região da Bacia do Rio São Francisco e desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e CECAV/ ICMBio, órgão do poder executivo federal. A necessidade de capacitação de guias e condutores foi identificada durante a construção do Plano de Ação Nacional para conservação das áreas Cársticas da Bacia do Rio São Francisco (PAN Cavernas do São Francisco). Nesse contexto, foi aprovado um projeto em edital do Fundo Brasileiro de Biodiversidade para realização de três cursos de capacitação – Alto, Médio e Baixo São Francisco –, com 120h cada, abordando conceitos básicos sobre espeleologia, meio ambiente, o trabalho do condutor, segurança, primeiros socorros, turismo sustentável e organização comunitária, com conteúdos elaborados pelos próprios instrutores. Os módulos foram realizados em locais que possibilitaram hospedar os participantes, visando ampliar a troca de experiências e fortalecer o vínculo e identidade do grupo. Foram capacitados 82 alunos dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins, Sergipe, Alagoas e Mato Grosso. Observou-se que o perfil dos guias e condutores de espeleoturismo atendidos pelo projeto é extremamente diversificado, tanto no que diz respeito ao nível de conhecimento relacionado as cavernas, quanto na sua relação com a função de condutor de visitantes nestes ambientes. Com os resultados das avaliações dos módulos, verificou-se que o curso atingiu os objetivos esperados, sendo destacado pelos participantes que agregou valor no que diz respeito ao trabalho de condução e gestão do turismo adequado nos ambientes naturais e nas cavernas. Uma das possibilidades futuras é a continuidade e aprimoramento da capacitação em espeleoturismo, a partir da experiência do primeiro curso, assim como a implantação de atividade que permitam a integração do grupo de condutores identificado nesta primeira experiência de capacitação.

Palavras chave: Curso de capacitação, espeleoturismo, cavernas, regiões cársticas, Bacia do Rio São Francisco.

Cave tourism guides and conductors training course: improvements for the tourist experience in the caves of São Francisco River basin (Brazil)

ABSTRACT

This paper describes the experience of Cave Tourism guides and conductors training course, held in the area of São Francisco River Basin and developed by Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) and CECAV/ ICMBio, national government organism. The need to train tourist guides and conductors was identified during the construction of the National Action Plan to preserve karst areas of São Francisco River Basin (PAN Cavernas do São Francisco). A project was approved in a call from Fundo Brasileiro de Biodiversidade to deliver three

training courses – High, Medium and Low São Francisco regions – with 120 hours each, including basic concepts about speleology, environment, conducting, safety, first aid, sustainable tourism and community organization. The material content was all made by the instructors. The courses were delivered in places where participants could stay in order to expand experience interchange among participants and strengthen the group connection. 82 students from Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins, Sergipe, Alagoas and Mato Grosso states were trained. It has been observed that cave tourism guides and conductors trained had different profile according to their knowledge related to caves and to their relation with the conducting responsibilities while guiding in cave environment. The results of the evaluation showed that the training course reached the expected objectives and the participants emphasized that it has added value to the conducting and to tourism management in natural environments and cave environments. One of the future possibilities is to continue and improve cave tourism training courses, from the first course experience, as well as carrying out activities that allows conductors trained in this first experience to gather and integrate.

Keywords: Training course, Cave tourism, Karst areas, São Francisco River basin.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, presencia-se a expansão da atividade econômica no Brasil com consequente aumento da pressão sobre os recursos naturais. Tornou-se iminente a necessidade de um aparato legal para garantir a proteção do patrimônio espeleológico nacional, bem como normatizar seu uso. Nesse sentido, a Constituição Federal de 1988, em seu Art. 20, inciso X, instituiu que as cavidades naturais subterrâneas são bens da União.

Considerando a necessidade de aprimorar os instrumentos de gestão ambiental do Patrimônio Espeleológico, entre 2010 e 2011, o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) elaborou, em cinco oficinas participativas e com 130 representantes de 70 instituições públicas e privadas, o Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico nas Áreas Cársticas da Bacia do Rio São Francisco (PAN Cavernas do São Francisco). O objetivo do projeto é contribuir para a conservação do Patrimônio Espeleológico brasileiro, por meio do conhecimento, promoção do uso sustentável e redução dos impactos antrópicos, prioritariamente na sua área de abrangência, nos próximos cinco anos (RELATÓRIO PAN, 2014). Para elaboração do PAN Cavernas do São Francisco foram indicadas ações prioritárias propostas a partir do levantamento das ameaças e das lacunas de conhecimento sobre o Patrimônio Espeleológico, ambientes cársticos e espécies associadas. Entre as atividades levantadas como principais impactos potenciais a estes ambientes foi a adaptação ao turismo e/ou uso religioso e a visitação descontrolada. Sendo a capacitação para guias e/ou condutores em espeleoturismo indicado como uma das ações a ser implementada correlacionada a este impacto.

Nesse contexto, o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) vem se envolvendo com o tema espeleologia, e participou ativamente no processo de construção deste Plano de Ação Nacional, tanto junto do CECAV na condução das oficinas participativas, quanto como membro destas oficinas realizadas. Atualmente, compõe o grupo assessor¹ que acompanha as atividades. No âmbito das atividades assumidas por cada um dos participantes, o IABS se comprometeu com a realização de cursos de capacitação para guias e condutores de espeleoturismo, para o qual obteve recursos por meio do Fundo Brasileiro de Biodiversidade (FunBio). Os cursos foram realizados em três núcleos – Alto, Médio e Baixo São Francisco, com 120h cada, divididas em módulos temáticos.

A essência dos cursos partiu do pressuposto de que é indispensável a disseminação do conhecimento atual acerca desse patrimônio nacional, que abriga rica biodiversidade e geodiversidade, mas que ao mesmo tempo é altamente ameaçada pelas atividades antrópicas. Justificou-se também pela existência de interfaces implícitas e de extrema importância do patrimônio espeleológico brasileiro com os ciclos hidrológicos e demais fluxos necessários à sobrevivência das florestas tropicais brasileiras, em específico nos biomas do Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, onde se encontra a Bacia do Rio São Francisco.

¹ Portaria de 02 de março de 2012 - institui o Grupo Assessor para acompanhar a implementação e realizar monitoria do Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico nas Áreas Cársticas da Bacia do Rio São Francisco - PAN Cavernas do São Francisco - Publicado no DOU em 05-03-2012.

LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO

A Bacia do rio São Francisco ocupa 8% do território brasileiro, sendo a terceira maior do país. Compreende 57,18% do Bioma Cerrado, 39,55% do Bioma Caatinga e 3,28% do Bioma Mata Atlântica (Déstro et al., 2007), além de áreas de ecótono entre Caatinga e Cerrado (10,97% da Bacia) e biomas costeiros (0,42%), segundo IBAMA (2007), conforme ilustrado na Figura 1.

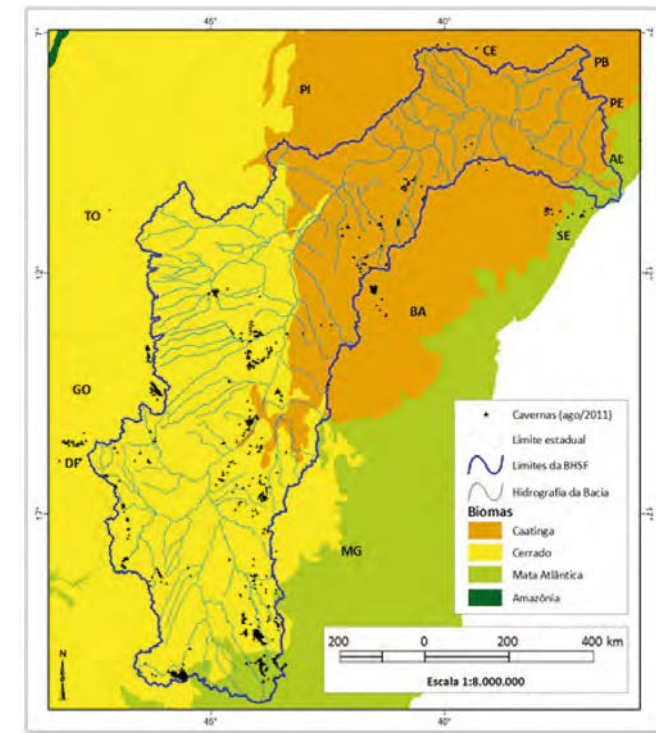


Figura 1. Mapa dos Biomas da Bacia do São Francisco (IBAMA, 2007).

Fundamental pelo volume de água transportada para o Semiárido, a Bacia abrange 521 municípios em seis estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás, além do Distrito Federal. Devido sua extensão e diversidade, está dividida em quatro unidades: Alto São Francisco, que vai das cabeceiras do rio São Francisco até Pirapora/MG, Médio São Francisco, de Pirapora (início do trecho navegável) até Remanso/BA, Sub-Médio São Francisco, de Remanso até Paulo Afonso/BA, e o Baixo São Francisco, de Paulo Afonso até a foz (ANA, 2010). Abrange três diferentes Províncias Geológicas (do São Francisco, da Borborema e do Tocantins) e na Bacia são encontradas várias regiões cársticas, destacando-se o Grupo Bambuí e a Região do Quadrilátero Ferrífero, além do Grupo Paranoá, Supergrupo Canudos e Formação Caatinga. A Região da Bacia do Rio São Francisco apresenta expressivas paisagens cársticas, inúmeros paredões e entradas de cavernas que favorecem a preservação de vestígios arqueológicos e paleontológicos, riquezas minerais e hídricas, aspectos históricos, pré-históricos e culturais, diversidade de fauna e flora. De acordo com Piló e Auler (2011), entender as cavernas possibilita abrir caminho para melhor compreensão do passado, vez que registros fossilíferos permitem pesquisas sobre a Paleontologia de vertebrados do Pleistoceno brasileiro. Esses depósitos são frequentes em cavernas nas regiões cársticas do São Francisco, em Minas Gerais e Bahia. Nesses sítios encontram-se ossadas de animais como a preguiça-gigante e o tigre dente de sabre entre outros (CECAV, 2012).

No âmbito espeleológico, a Bacia do Rio São Francisco engloba uma das mais importantes áreas cársticas brasileiras em extensão e representatividade, sobretudo para efeitos de conservação e uso público (Lobo *et al.*, 2010). Destacam-se no Alto São Francisco as áreas como Pains, Arcos, Doresópolis, Iguatama, o Carste de Lagoa Santa e suas cavernas estruturadas para visitação em larga escala (Rei do Mato, Maquiné e Lapinha). Na porção média da Bacia, destacam-se as regiões o Parque Estadual da Lapa Grande, o Parque Nacional das Cavernas do Peruaçu, a Serra do Ramalho e, já em transição com o a região do Baixo São Francisco, a Chapada Diamantina e a Área de Proteção Ambiental Gruta dos Brejões. Por fim, a região do Baixo São Francisco, que é a porção menos estudada da Bacia sob o ponto de vista espeleológico, mas com cavidades já conhecidas no estado de Sergipe, como a caverna da Fumaça e o abismo de Simão Dias.

ANTECEDENTES CONCEITUAIS DO PROJETO

A Geodiversidade e o Patrimônio Geológico são a memória da Terra, um bem comum, cuja destruição é irreversível. Assim, torna-se imperativo a preservação para as gerações presentes e futuras. O Patrimônio Geológico é um conjunto de elementos geológicos de elevado valor científico, educativo, cultural e recreativo, que permite contar a história da Terra (Rodrigues, 2009). Entender este patrimônio é a primeira ação que irá possibilitar a sua conservação, assim, capacitações técnicas para guias e condutores destes atrativos é de suma importância, uma vez que irá possibilitar a divulgação adequada deste patrimônio e consequentemente a sua conservação.

O tipo de ação de conservação a desenvolver deve ser analisado caso a caso. De qualquer forma, o objetivo principal deverá ser sempre o de manter a integridade física do local classificado como geossítio, assegurando, ao mesmo tempo, a acessibilidade do público e a sua conservação. Contudo, é necessário ter em conta que a exploração de atividades de geoturismo e espeleoturismo deve ser precedida, ou desenvolvida paralelamente, com estratégias de geoconservação (Brilha, 2002).

Dos geossítios nas áreas cársticas, as cavernas estão entre os mais relevantes sob a ótica do turismo, sendo fundamentais para o desenvolvimento de segmentos como geoturismo (Cigna y Forti, 2013) o ecoturismo e o espeleoturismo (Lobo *et al.*, 2010). Por outro lado, constituem-se em ambientes frágeis, marcados pela dispersão mais limitada dos impactos antrópicos, em função da circulação relativa de energia (Heaton, 1986; Cigna, 2002) e mesmo dos tipos de intervenções realizadas para o desenvolvimento do turismo. Outro aspecto fundamental neste cenário é o trabalho de condução de visitantes, não somente pelo potencial de educação e interpretação ambiental (Neiman y Rabinovici, 2008), como também pela segurança para o ambiente e para os visitantes. Assim, o condutor de visitantes, também denominado de monitor ambiental em algumas regiões do Brasil, assume papel fundamental como agente de desenvolvimento do turismo e, ao mesmo tempo, guardião para a conservação do ambiente.

CARACTERÍSTICAS DO PROJETO DE CAPACITAÇÃO DOS GUIAS/CONDUTORES DE ESPELEOTURISMO

Considerando o contexto teórico-conceitual apresentado, com destaque para todas as possíveis ameaças do turismo ao Patrimônio Espeleológico – detalhadas em Lobo (2006), entre outros – e o conhecimento ainda incipiente sobre estes ambientes na maioria das cavernas turísticas brasileiras, o PAN Cavernas do São Francisco identificou a necessidade de conscientização e capacitação dos monitores e condutores para uma atuação adequada nas atividades de espeleoturismo.

No cenário identificado inicialmente, os monitores e condutores que atuam em cavernas na região em questão, em sua grande maioria, não contam com informações necessárias para prover uma experiência de visitação adequada e menos impactante ao ambiente. Além disso, apesar da não existência de dados concretos sobre o fluxo turístico nas cavernas inseridas na área de atuação do Projeto, foi possível verificar, por meio de levantamento preliminar realizado pelo CECAV com órgãos turismo dos Estados e grupos de espeleologia inseridos na área da Bacia, diversos relatos sobre cavernas que recebem um fluxo de visitantes, com diferentes motivações (CECAV, 2013). Este contexto gerou a necessidade de capacitar os guias e condutores, com objetivo de qualificar a experiência turística e promover maior interação entre o ambiente e o visitante.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

Dada à amplitude da área de abrangência do projeto, foram realizados três cursos: Alto (Ouro Preto, MG), Médio (São Desidério, BA) e Baixo (Laranjeiras, SE) São Francisco. Os cursos foram montados com um formato flexível, contendo 120 horas totais de aulas práticas e teóricas, compreendido em 3 módulos de 40 horas/aula. O objetivo era trabalhar temas básicos e promover um momento de nivelamento do grupo, que se apresentou bastante heterogêneo em termos de conhecimento.

No Alto São Francisco, as aulas teóricas foram realizadas nas estruturas do Parque Estadual do Itacolomi e as aulas práticas foram realizadas na gruta Rei do Mato, gruta da Lapinha e gruta do Maquiné, todas em Minas Gerais. No Médio São Francisco as aulas teóricas foram realizadas no Centro Cultural Celso Barbosa e as atividades práticas foram realizadas na gruta das Palmeiras, caverna do Catão (Parque Municipal Lagoa Azul), gruta da Beleza e na gruta Manoel Lopes, na Bahia em São Desidério. Já no Baixo São Francisco as aulas teóricas do módulo 1 e 2 foram realizadas na Escola Municipal Zizinha Guimarães em Laranjeiras, sendo as visitas técnicas destes módulos foram realizadas na Pedra Furada, toca da Raposa e no Refúgio de Vida Silvestre Mata do Junco, em Sergipe. O terceiro módulo do Baixo São Francisco foi realizado em Campo Formoso (BA) sendo a parte teórica na Escola Rural Glicíndia Carvalho e a aula prática realizada na toca do Angico e toca da Barriguda.

O material didático foi elaborado através da sistematização de informações existentes, estudos realizados, trabalhos técnicos, pesquisas científicas e legislação correlata ao tema². Para ministrar os cursos foram escolhidos profissionais de referência regional e nacional em cada tema. A ementa foi composta com os seguintes temas: Módulo I – Meio Ambiente, Cultura e Espeleologia: Unidades de conservação, patrimônio espeleológico, patrimônio paleontológico, aspectos ambientais (para cada região), patrimônio histórico-cultural, espeleologia, geologia cárstica e espeleogênese, espeleotemas, riscos ambientais associados ao ambiente subterrâneo, plano de manejo espeleológico. No último dia de cada módulo foi realizada uma visita de campo, o foco da visita do primeiro módulo era “descobrir o mundo subterrâneo e seus aspectos relacionados ao meio ambiente, cultura e espeleologia”.

O Módulo II – Noções em condução turística – continha os seguintes temas: monitor/condutor local e sua atuação profissional, planejamento e técnicas de condução de grupos em áreas naturais, apresentação pessoal e postura profissional, atividades lúdicas e educativas na natureza, monitoramento e manejo da visitação pública, noções básicas de orientação e navegação, práticas de interpretação de trilhas, cavernas e outros atrativos, princípios das atividades de mínimo impacto, prevenção de impactos sócias decorrentes das atividades, legislação e o trabalho dos condutores/ monitores ambientais, comunicação, noções básicas para o gerenciamento de riscos em equipamentos, primeiros socorros e animais peçonhentos, plano de contingência, acessibilidade, noções de prevenção de acidentes e combate a incêndios. A visita técnica se dedicou a “colocar em prática os principais aspectos estudados em relação a condução turística”.

Já o Módulo III – A construção de um turismo sustentável – abordou temas relacionados aos conceitos básicos de turismo, tipologia turística, turismo na atualidade e tendências, conceitos de sustentabilidade, relação entre turismo e sustentabilidade, turismo na comunidade e princípios do planejamento turístico, o condutor e a cadeia do turismo, áreas de visitação e roteiros turísticos, associativismo e cooperativismo, empreendedor individual, estudo de mercado, marketing turístico, infraestrutura local e regional. A visita técnica do módulo III abordou a “utilização das ferramentas estudadas para enriquecer a experiência turística do visitante”.

² Apostilas disponíveis no site do IABS: <http://www.editoraiabs.com.br/portal/index.php/publicacoes/category/1-turismo>.

O curso foi divulgado através de redes sociais, site do IABS e dos parceiros, sendo que foi enviada carta convite e realizado contato telefônico principalmente nos locais onde já se havia identificado a visita em cavernas e em Unidades de Conservação que tem cavernas como atrativos turísticos. Para seleção dos participantes, foi reunido um comitê de seleção formado pelos responsáveis, financiadores e apoiadores do projeto e tendo como base alguns critérios como, por exemplo, ser um profissional que trabalha com condução turística em cavernas, disponibilidade para participar do curso, entre outros.

PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Considerando os três cursos realizados, foram capacitados 82 condutores de espeleoturismo (Figuras. 2-4). Embora seja difícil traçar um padrão único para todos os participantes, alguns pontos em comum podem ser destacados.

Muitos dos participantes não vivem exclusivamente da atividade de condução de visitantes, nas três realidades em que o curso foi desenvolvido. Na maioria dos casos, isto se deve ao fato de que o turismo ainda é bastante sazonal na região, mesmo nos destinos mais consolidados que tiveram condutores atendidos pelo projeto, como o Parque Nacional da Chapada Diamantina (BA) ou o Parque Estadual do Sumidouro (MG), entre outros exemplos. Esta sazonalidade é marcada pela intensificação da visita nos finais de semana, feriados e férias escolares. Assim, mesmo que o desejassem, a maioria dos capacitados ainda não pode viver exclusivamente da condução de visitantes, pelo baixo volume do espeleoturismo.



Figura 2. Participantes do Alto São Francisco, na gruta da Lapinha (MG).



Figura 3. Participantes do Médio São Francisco, na gruta do Catão (BA).



Figura 4. Participantes do Baixo São Francisco, em Laranjeiras (SE).

Em relação ao aproveitamento dos conteúdos ministrados, percebeu-se grande interesse dos participantes nos temas gerais de conservação, educação e interpretação ambiental, demonstrando que a sua formação ambiental, ainda que informal em alguns casos, já existia previamente ao curso. Este fator foi fundamental para o bom desenvolvimento das discussões durante o curso, elevando o nível para além de um simples repasse de informações por parte dos instrutores. No caso de temas relacionados: ao papel do condutor, mínimo impacto, programa de risco e primeiros socorros; identificou-se o interesse e envolvimento dos participantes em todos os cursos, sendo destacada por eles a importância destes temas, uma vez que o espeleoturismo envolve risco tanto para o meio quanto para o visitante. Muitos dos participantes não tinham nenhuma base em primeiros socorros, tema de extrema importância para a formação de guias e condutores em áreas naturais (Figuras. 5-6).



Figura 5. Atividade prática de condução de visitantes.



Figura 6. Atividade prática de técnicas de resgate.

O terceiro e último módulo tem como objetivo despertar o interesse dos participantes para a profissionalização do turismo, visando o aprimoramento da experiência turística em cavernas. Traçando estratégias que vise a conservação do ambiente e a geração de renda para os envolvidos. Apresentando exemplos nacionais e internacionais, elaborando oficinas entre os participantes a fim de desenvolver os seus produtos turísticos, identificar quais são as suas carências e potenciais para transformar o recurso natural em produto turístico. Como os módulos dos cursos foram realizados através de imersão dos participantes no local de realização, esta imersão pode ser considerada como um ponto chave e enriquecedor do curso, uma vez que possibilitou a troca de experiência, de ideias e a integração entre os participantes, sendo que as origens dos mesmos são distintas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da experiência vivenciada com a realização dos três cursos na região da Bacia do Rio São Francisco, observou-se a grande necessidade de continuidade nos processos de capacitação para guias e condutores de espeleoturismo, tendo em vista o grande número de profissionais atuantes em espeleoturismo, a fragilidade destes ambientes e as especificidades de usos que estes necessitam.

Na busca de aprimoramento destes cursos foi entregue para os participantes uma ficha de avaliação, cujo objetivo era avaliar tópicos relacionado ao conteúdo, aos instrutores, ao espaço físico, organização e auto avaliação, ficando um espaço para descrever os pontos fracos e fortes do curso. Assim, tendo como base o andamento dos cursos e as avaliações entregues pelos participantes, identificou-se que o processo de imersão para realização dos módulos é de grande valia, pois este permite uma maior troca de experiência entre os participantes, lembrando que necessita de locais adequados para hospedagem e alimentação. Entretanto não é fácil identificar um local que tenha cavernas próximas para realização de aulas práticas e que possa hospedar todos os participantes.

Outro ponto identificado e apontado pelos participantes é a necessidade de maior quantidade de horas-aula práticas. Como existe a necessidade de conteúdo teórico para a boa realização de aula prática, talvez seja necessário aumentar a carga horária do curso inserindo mais aulas práticas.

Como as despesas para a realização deste curso foram custeadas com recursos do Funbio/TFCA, os guias e condutores não tiveram investimento para participação como também para hospedagem e alimentação. Entretanto observou-se algumas evasões e falta de comprometimento por parte de alguns alunos durante as aulas. Sendo assim, percebe-se que para realização destes cursos se faz necessário alguma forma de contrapartida destes participantes ou forma de avaliação para entrega de certificado ou mesmo certificação junto ao Ministério do Turismo.

Por fim, algumas necessidades básicas de aperfeiçoamento foram também detectadas, como mobilização, *feedback* para os parceiros, acompanhamento sistemático dos participantes entre um módulo e outro, bem como a maior comunicação entre os instrutores. Evidenciou-se a necessidade de aprimoramento da experiência turística nas cavernas da bacia do rio São Francisco, bem como a conservação destes ambientes e a certificação de que os guias e condutores estão aplicando os conteúdos absorvidos durante o curso. Para tanto, o acompanhamento destes participantes pós-realização do curso se faz necessário. Para esta etapa, identificou-se que é viável a criação de uma rede de guias e condutores de espeleoturismo que participaram desta capacitação, para que estes possam realizar trocas de experiências, vivenciar o ambiente que os outros colegas trabalham, bem como o monitoramento da aplicação de práticas sustentáveis no manejo das cavernas exploradas turisticamente nesta região.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. *Bacias Hidrográficas - Região Hidrográfica do São Francisco*, 2010. 26/7/2104 <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/SaoFrancisco.aspx>
- Brilha, J. 2002. Geoconservation and protected areas. *Environmental Conservation*, 29 (3), 273-276.
- CECAV. 2012. Plano de Ação Nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da Bacia do Rio São Francisco. *ICMBio*, Brasília, 138 pp.
- CECAV. 2013. Relatório Final da Oficina de Cavernas Turísticas – Parte II. *ICMBio*, Brasília, 49 pp.
- Cigna, A. A. 2002. Modern trend in cave monitoring. 31 (1), 35-54.
- Cigna A. A. y Forti P. 2013. Caves: the most important geotouristic feature in the world. *Tourism and Karst Areas*, 6 (1), 9-26.
- Déstro, G. F. G., Bacellar, A. E. F., Dias, J., Botura, G. y De Carvalho, C.B. 2007. Lacunas de Conhecimento da Fauna na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. *VIII Congresso de Ecologia do Brasil*. Caxambu, 30/6/2009. <http://www.seb-ecologia.org.br/viiiiceb/pdf/1509.pdf>
- Diário Oficial da União*. 2012. Portaria de 02 de março de 2012.
- Heaton, T. 1986. Caves: a tremendous range in energy environments on earth. *National Speleological Society News*, 8 (44), 301-304.
- IBAMA. 2007. Estado da arte da fauna na bacia hidrográfica do rio São Francisco (ictiofauna, avifauna e mastofauna). *IBAMA*, Brasília, 62 pp.
- Lobo, H. A. S. Caracterização dos impactos ambientais negativos do espeleoturismo e suas possibilidades de manejo. *Iv Seminário de Pesquisa em Turismo do Mercosul*. Caxias do Sul, 1-15.
- Lobo, H. A. S., Sallun Filho, W., Veríssimo, C.U.V., Travassos, L.E.P., Figueiredo, L.A.V. y Rasteiro, M.A. 2010. Espeleoturismo: oferta e demanda em recente expansão e consolidação no Brasil. En: Castro, S.F.L., Souto, W., Rangel, B.B. (Coords.) *Segmentação do turismo: experiências, tendências e inovações – artigos acadêmicos*. Ministério do Turismo, Brasília, 35-58.

Piló, L. B. y Auler, A. Introdução à Espeleologia. En: CECAV (Ed.). *III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental*. CECAV/Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília, 7-23.

Rodrigues, J. Geoturismo: uma abordagem emergente. En: Neto de Carvalho, C. y Rodrigues, JC (eds.), *Geoturismo y Desenvolvimento Local, Idanha-a-Nova*, p. 38-61, 2009.

Neiman, Z., y Rabinovici, A. 2008. Espeleoturismo e educação ambiental no PETAR-SP. *Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas*, 1 (1), 57-66.

Imagen para la exposición espeleológica Spéléorama en el viaducto de Millau (Francia)

Víctor Ferrer^(1,2) y Michel Renda^(1,3)

(1) La Salle 3D International Team.

(2) C/ Martorell, 14 - 08757 Corbera de Llobregat, España (flashblackcorb@hotmail.com)

(3) 11, rue Gambetta -11400 Castelnaudary, France (michel.renda@neuf.fr)

RESUMEN

La Fédération Française de Spéléologie celebró sus 50 años. Para celebrar dicho evento realizamos una exposición en la zona del Viaducto de Millau, en la sala de exposiciones del Conseil Général de l'Aveyron. La gran mayoría de los turistas hacen una parada para admirar la vista del Viaducto. Los turistas que acceden a la zona en la ciudad de Millau son más de un millón de visitantes cada año. La exposición se basó en el mural panorámico «La Fresque» compuesto por imágenes de las cuevas más representativas del mundo formando una “topofotografía” con una medida de 9x2 metros en alta resolución. Esta gran imagen compuesta por más de 310 fotos, invita a un “viaje bajo el horizonte”. Cuevas de hielo en Austria, buceo en cenotes de México, la Grotte Chauvet y el arte parietal, los ríos subterráneos de Cuba, las cuevas de las mina de Naica (México) y Cerdeña y las cavidades de nuestras regiones Mediterráneas. El viaje da una visión general de la diversidad y la riqueza de este “mundo oculto”. La ilustración ha sido realizada por Víctor Ferrer quién ha participado con su archivo de imágenes de cuevas de España, Francia e Italia. Michel Renda y Antonio Danieli también han aportado el archivo de La Salle 3D International Team. Gracias a fotógrafos y asociaciones que han aportado puntualmente otras imágenes hemos podido completar nuestra idea y transformarla en una herramienta didáctica.

Palabras clave: Mural fotográfico, exposición, espeleología, protección de cavidades.

Special display for the speleological exhibition in the Viaduct of Millau (France)

ABSTRACT

The Fédération Française de Spéléologie has been celebrated its 50 years of foundation. To commemorate the event we made a special display in the area of the Millau Viaduct in the exhibition hall of the Conseil Général de l'Aveyron. The majority of tourists visiting the area stop and admire the view of the famous Viaduct. Tourists at the city of Millau are more than a million per year. The exhibition was based on a panoramic mural we named "The Fresque" composed by some of the most representative images from different caves of the world forming all together like "photosurvey profil" with 9x2 meters size and high resolution picture (HQ). This great image composed of more than 310 photos invites to a "trip into the horizon." Ice Caves in Austria, diving into the cenotes of Mexico, the Grotte Chauvet and the prehistoric cave art, underground rivers of Cuba, the mine caves of Naica (Mexico) and Sardinia and the cavities of our Mediterranean regions. The trip gives an overview of the diversity and richness of this "hidden world". Victor Ferrer who was involved with the image file caves of Spain, France and Italy made the illustration. Michel Renda Antonio Danieli also provided for the task the photo archive of La Salle International Team 3D. Thanks to photographers and associations that have timely submitted other images we were able to transform our idea into a real and useful educational tool.

Keywords: Photo mural, exhibition, speleology, cave protection.

INTRODUCCIÓN

La Salle 3D International Team en el mundo

La Salle 3D International Team se dedica a la producción de audiovisuales 3D, producción de exposición fotográfica, producción editorial, organización de exposiciones, proyecciones y eventos culturales, organización de expediciones, exploraciones y de documentación, organización de reuniones y talleres de fotografía (Figura 1).

Los integrantes del grupo somos de diversas nacionalidades. Francia, Italia, Alemania, Eslovenia, Suiza, Cuba, Estados Unidos, España, Chile, Chequia y Rumania.



Figura 1. Proyección 3D.

Imagen para la exposición Spéléorama en la zona del Viaducto de Millau

El proyecto de la exposición es una realización de Michel Renda.

El objetivo de esta exposición fue:

- Dar a conocer el medio subterráneo al máximo número de personas
- Informar al público sobre la diversidad de las actividades relacionadas con este medio
- Crear conciencia de la belleza y la fragilidad del medio subterráneo
- Revelar los ecosistemas que se incluyen en este entorno

Cómo:

- Dar a conocer el medio subterráneo al máximo número de personas
- Creando una visual "legible" para el público no especializado
- Sin usar ningún término científico que pueda cansar a un público desinformado
- Apoyándonos en gran medida en los colores, las formas, la belleza y las imágenes espectaculares
- Con el fin de despertar la curiosidad del visitante

Mediante la realización de un "mural panorámico" que represente el medio subterráneo de manera:

- Muy concentrada y más completa
- Lúdica: el visitante sólo tendrá que ir siguiendo la "lectura visual" del panel
- Informativa y atractiva

Dicha imagen central se complementa con 5 paneles tamaño 3x2 m (Figura 2):

- Buceo en Cuevas
- Cañones
- PNR (Parques Naturales)
- RNF (Reservas Naturales de Francia)
- *Conservatoire du Littoral*

La mayor parte de las fotografías utilizadas proviene de la experiencia del Víctor Ferrer en el campo de la fotografía subterránea y han sido publicadas previamente en diversas monografías y artículos (Ferrer 2004, 2009, 2012, 2013; Ferrer y Calaforra 2010, Ferrer y Flash-Black-Corb 2010), otros autores (Widmer 1991, Audra 2010, Renda y Crochet 2012) y referencias web citadas en esta comunicación.



Figura 2. Aspecto general de la sala de exposiciones.



Figura 3. Proyección 3D en LCD.

Y finalmente proyección permanente de diaporamas en relieve (máximo 5 minutos duración, Figura 3).

MURAL PANORÁMICO "LA FRESQUE"

Ilustración espeleológica realizada por Víctor Ferrer. El mural panorámico es el fruto de la colaboración de Víctor Ferrer y de Michel Renda a lo largo de tres meses de trabajo.

Metodología

El programa utilizado para realizar la ilustración fotográfica es el Photoshop. La base del trabajo consiste en efectuar la mayor parte de fotografías dentro de la cueva observando unas normas básicas (Figura 4). Las fotografías tienen que ser en su mayor parte panorámicas tomadas de la sección de una misma galería o sala. Es importante disponer de un amplio archivo de fotos tomadas de esta forma totalmente atípica ya que se trata de construir una "fototopografía". Para las intersecciones las fotos se hacen en el sentido de la marcha.

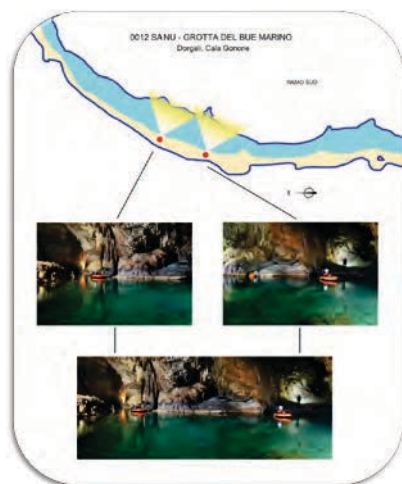


Figura 4. Forma de tomar las topografías para poder construir las galerías.

Para una mayor comprensión del trabajo que representa desarrollaremos el proyecto en 5 fases visualizadas mediante la secuencia de Figuras 5 a 22.

Fase 1: Composición de la estructura geológica del macizo.

Fase 2: Composición del fondo del cielo mediante imágenes crepusculares.

Fase 3: Adición de fotografías de montañas, sedimentos, fósiles, volcanes, islas, formaciones coralinas, blue-holes, etc.

Fase 4: Composiciones de cuevas en hielo, cavidades hidrotermales, hipogénicas, cuevas y minas, grandes cristales, Naica, Lechuiguilla, Hawaii, Sicilia, etc.

Fase 5: Adición de imágenes específicas de cañones, dolinas, meandros, pozos, ríos subterráneos, arte rupestre, imágenes subacuáticas, etc.



Figura 5. Fase nº 1. Fondo con los estratos. 16 imágenes de estratos de la Pedreira do Galinha en la vertiente Este de Serra d'Aire en Portugal. Fotos Víctor Ferrer.



Figura 6. Fase nº 2. Fondo cielo. 3 imágenes. Zona litoral de Barcelona en España. Fotos Víctor Ferrer.



Figura 7. Fase nº 3. Montañas (34 imágenes). Mar (7 imágenes). Coral (22 imágenes). Sedimentos (27 imágenes). Isla Volcánica (9 imágenes). Imágenes de Italia, Francia, Estados Unidos y México. Fotos de Víctor Ferrer y de archivo.



Figura 8. Fase nº 3. Detalle de la zona de las montañas.



Figura 9. Fase nº 3. Detalle de la zona de los sedimentos.



Figura 10. Fase nº 3. Detalle de la zona del coral y del blue hole.

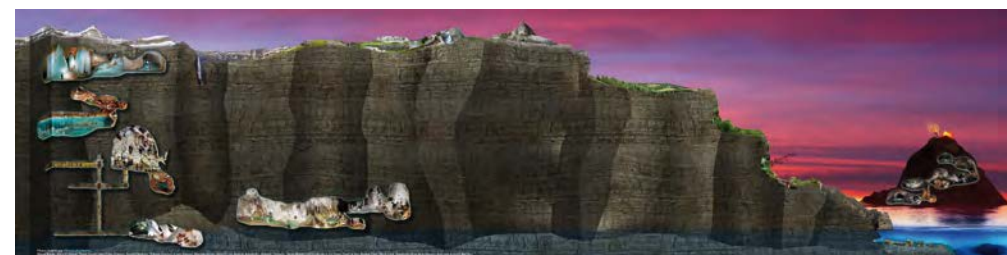


Figura 11. Fase nº 4. Cueva de hielo en Austria (3 fotos de Michel Renda y Antonio Danieli). Cueva hidrotermal en España (11 fotos de Víctor Ferrer). Santabarbara y mina de San Giovanni en Italia (15 fotos de Víctor Ferrer). Naica en México (3 fotos de Antonio Danieli). Lechugilla (Widmer, 1991) en Estados Unidos (11 fotos de Michel Renda, Peter Bosted y Daniel Chailloux). Cueva volcánica de Hawai y Sicilia (12 imágenes de Philippe Crochet, Michel Renda y Peter Bosted). Murciélagos (9 ilustraciones de Víctor Ferrer).



Figura 12. Fase nº 4. Detalle de cueva de hielo.

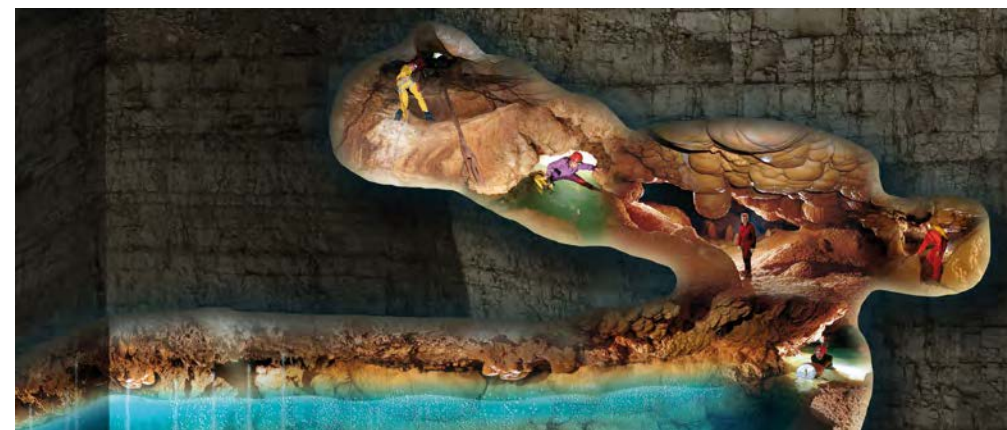


Figura 13. Fase nº 4. Detalle de cueva hidrotermal o hipogénica.



Figura 14. Fase nº 4. Detalle de cueva hidrotermal o hipogénica.



Figura 15. Fase nº 4. Detalle de cueva de mina.



Figura 16. Fase nº 5. Cañón de Cuba, España y Estados Unidos (7 fotos de Michel Renda, Antonio Danieli y fotos de archivo). Meandros (21 ilustraciones de Víctor Ferrer). Pozos de España y Estados Unidos (5 fotos de Víctor Ferrer y Peter Bosted). Río subterráneo de Francia, Italia y Cuba (19 fotos de Víctor Ferrer, Antonio Danieli, Daniel Chailloux y Michel Renda). Galerías fósiles de España, Francia, Italia, Suiza y Cuba (36 fotos de Víctor Ferrer, Antonio Danieli, Michel Renda y Daniel Chailloux). Arte parietal de Francia (Grotte Chauvet y Cueva de las Ventanas de España (12 imágenes de Jean Marie Chauvet y Víctor Ferrer). Galerías subacuáticas de Francia y México (23 fotos de Frank Vasseur y Anatoly Beloshchin).



Figura 17. Fase nº 5. Detalle del cañón y entrada al colector principal.



Figura 18. Fase nº 5. Detalle de los pozos, dolinas y meandros.

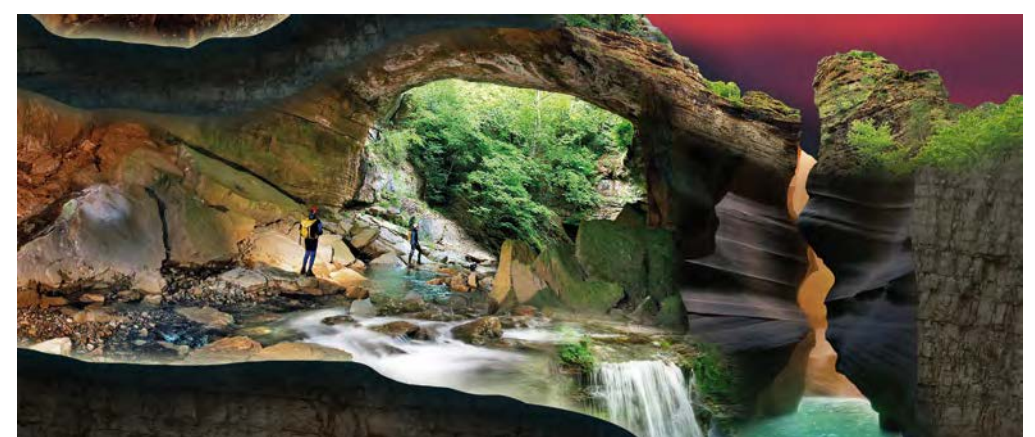


Figura 19. Fase nº 5. Detalle del río subterráneo, cascada y salida de la cueva.



Figura 20. Fase nº 5. Detalle de las galerías fósiles, aragonito y cristalización.



Figura 21. Fase nº 5. Detalle de la cueva con arte parietal y recreación neolítica.



Figura 22. Fase nº 5. Detalle de la cueva subacuática.



Figura 23. Aspecto final de la exposición del panel.

DATOS TÉCNICOS

311 imágenes

9 x 2 metros con una resolución de 220 dpi

Imagen en capas 5,94 GB en formato psb.

Imagen acoplada 2,90 GB en formato psb.

Los Sponsors:

La Fédération Française de Spéléologie

Le Conseil Général d'Aveyron

ANECAT (Cuevas de Francia)

RNF (Reservas Naturales de Francia)

PNR (Parques Naturales)

Conservatoire du Littoral

La Società Speleologica Italiana

Terre Sauvage Magazine

REFERENCIAS

Widmer, U. 1991. Lechugilla. *Speleo Projects*, Bassel-Suisse, 144 pp.

Ferrer, V. 2004. Grandes Cuevas y Simas del Mediterráneo. de *Gibraltar a Catalunya Nord*. 344 pp. Barcelona. ISBN: 978-84-933711-0-4.

- Ferrer, V. y Calaforra, J.M. 2010. *La Sima de la Higuera*. 80 pp. Barcelona. ISBN 978-84-933711-5-9.
- Ferrer, V. (2009). *Grandes Cavités Méditerranéennes (Languedoc et Rouergue)*. Barcelona, 276 pp. ISBN: 978-84-933711-2-8.
- Audra, Ph. *Et al.* 2010. *Grottes et karsts de France*. Karstologia Mémoires núm. 19. *Asociación Française de Karstologie*. 358 pp. ISBN: 9782950422255 295042225X.
- Ferrer, V. y Flash Black Corb 2010. 10 Anys de'activitats a la Mediterrània. *EspeleoCat, Revista de la Federació Catalana d'Espeleologia*, 8: 38-41.
- Renda, M. y Crochet. P. 2012. *Premières Rencontres Internationales des Photographes du Monde Souterrain*. Olargues 2011. 174 pp.
- Ferrer, V. 2012. *La rivière souterraine de Bramabiau*. 48 pp. Barcelona. ISBN 13: 978-84-933711-8-0
- Ferrer, V. 2012. La Cova de Santa Bàrbara i les Coves de la mina de San Giovanni. *EspeleoCat núm, Revista de la Federació Catalana d'Espeleologia*, 9: 26-29.
- Ferrer, V. 2013. Barrancos, Cuevas y Simas. Els Ports, En: *Avenc de Massana*, 86-87. Barcelona.
- Ferrer, V. 2014. *La Cova Urbana de Tarragona*. 112 pp. ISBN: 9788493371173. Barcelona.

REFERENCIAS WEB

- Le site officiel de Frank Vasseur (CELADON), 24/07/2014, <http://celadons.free.fr/>
- Le site officiel de Philippe Crochet (PHILIPPE CROCHET), 24/07/2014, <http://www.philippe-crochet.com/>
- Le site officiel de La Salle (La Salle 3D International Team), 24/07/2014, <http://www.lasalle3d.com/>
- CavePics Home Page de Peter and Ann Bosted (Cave Photography of Peter and Ann Bosted), 24/07/2014, <http://www.cavepics.com/>
- Home Page de Antonio Danieli (Antonio Danieli), 24/07/2014, <http://www.fotocommunity.it/fotografo/antonio-danieli/foto/768738>
- Home Page de Wikipedia (Cueva de Chauvet), 24/07/2014, http://es.wikipedia.org/wiki/Cueva_de_Chauvet
- Home Page de Anatoly Beloschin (Underwater Caves), 24/07/2014, <http://www.anatoly.pro/en/photoalbums/38>
- Home Page de Víctor Ferrer (espeleovictor), 24/07/2014, <https://sites.google.com/site/espeleovictorcom/venta-de-libros/galeria-de-imagenes>

Grutas turísticas e divulgação do património espeleológico em Portugal: o caso do Programa Geologia no Verão

Ilda Calçada⁽¹⁾ e José António Crispim⁽²⁾

(1) Sociedade Portuguesa de Espeleologia (ilda_calcada@hotmail.com)

(2) Sociedade Portuguesa de Espeleologia e Centro de Geologia da Universidade de Lisboa (jacrispim@fc.ul.pt)

RESUMO

As grutas turísticas portuguesas estão concentradas na região litoral-centro de Portugal onde os calcários do Jurássico formam vários maciços. Destes, o Maciço Calcário Estremenho é o que apresenta maior número de grutas e fenómenos cársicos superficiais mais bem desenvolvidos. Em 2000 a Sociedade Portuguesa de Espeleologia iniciou um processo de cooperação com a Agência para a Cultura Científica e Tecnológica – Ciência Viva para divulgação do património espeleológico no âmbito do subprograma Geologia no Verão. Os percursos de divulgação científica delineados no início desta parceria situam-se nos arredores das quatro grutas turísticas (Mira de Aire, Santo António, Alvados e Moeda). Atualmente, decorridos 14 anos de atividade ininterrupta das campanhas, estão delineados 13 percursos de divulgação científica e as regiões abrangidas incluem não só o Maciço Calcário Estremenho mas também a Serra do Montejunto, a Serra da Arrábida e as áreas calcárias da Plataforma Litoral situadas a oeste daqueles relevos. No total, os percursos incluem a visita de 28 grutas cujas características se adaptam a um público sem formação específica. Sendo o objetivo principal do percurso, a visita às grutas é acompanhada da observação de um conjunto variado de aspetos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos da região percorrida. Os guias dos percursos são membros da Sociedade Portuguesa de Espeleologia que juntam os seus conhecimentos de espeleologia à sua formação geológica universitária. Estas ações, que decorrem nos fins-de-semana dos dois meses de verão, servem de complemento cultural a muitos participantes que já visitaram as grutas turísticas da região e também estimulam o interesse pela visita das grutas turísticas naqueles que são mais adeptos do turismo de natureza. O número máximo de participantes chegou a superar o milhar por campanha anual.

Palavras chave: Divulgação científica, Grutas turísticas, Património espeleológico.

Show caves and dissemination of the speleological heritage in Portugal: the case of the program Geology in Summer

ABSTRACT

Portuguese show caves are concentrated in the central coastal belt of Portugal where Jurassic limestones form several massifs. The Estremenho massif has the largest number of caves and is where surface karst phenomena are better developed. In 2000 the Portuguese Speleological Society has initiated a partnership with the Portuguese Agency for Scientific and Technological Culture - Ciência Viva (Live Science) for promotion of speleological heritage within the subprogram Geology in Summer. The first routes to be outlined are located around the four show caves (Mira de Aire, Santo António, Alvados and Moeda). At present, after 14 years of uninterrupted activity, there are 13 routes, some of them outside the Estremenho massif (Montejunto massif, Arrábida massif and others). In total, the routes include visits to 28 caves whose characteristics adapt to an audience without specific training. The purpose of these routes is not only visiting the caves but also showing the geology, geomorphology

gy and hydrogeology of the region where the caves are. The routes are guided by members of the Portuguese Speleological Society with academic qualification in geology and speleological training. These actions, which take place at week-ends of the two summer months, are a cultural complement to the many participants who have visited the show caves in the region, and help stimulate the interest in visiting the show caves in those who are most adept of nature tourism. The maximum number of participants has exceeded one thousand on one annual campaign.

Keywords: Scientific dissemination, Show caves, Speleological heritage.

INTRODUÇÃO

A Ciência Viva - Agência para a Cultura Científica e Tecnológica, mais conhecida por Ciência Viva, foi criada em Julho de 1996, tendo como missão a promoção da cultura científica e tecnológica junto da população portuguesa, ainda como uma unidade do Ministério da Ciência e da Tecnologia. Mais tarde foi constituída a Associação Ciência Viva, em 1998, que teve como membros associados a Agência de Inovação, SA, a FCT e várias instituições científicas do país. O programa adotou três instrumentos de ação: um programa de apoio ao ensino experimental das ciências à promoção da educação científica na escola; uma Rede Nacional de Centros Ciência Viva para facilitar o acesso da população a espaços interativos de divulgação científica; e campanhas nacionais de divulgação científica. Estas campanhas nacionais de divulgação científica têm como objetivo estimular o associativismo científico e proporcionar à população oportunidade de observação de índole científica e de contacto direto e pessoal com especialistas em diferentes áreas do saber. Nestas campanhas encontra-se inserido o Programa Ciência Viva no Verão, que atualmente tem as iniciativas: Astronomia no Verão, Geologia no Verão, Biologia no Verão, Engenharia no Verão, Ciência nos Castelos e Faróis no Verão com a Ciência Viva. Na edição de 2013 contou com a participação de 165 entidades.

A Sociedade Portuguesa de Espeleologia foi das primeiras entidades a contribuir para este programa e atualmente, passadas 14 edições em que participou ininterruptamente, já desenvolveu 13 percursos de divulgação científica diferentes (Tabela 1). A maioria das ações (7 percursos de divulgação científica) localiza-se no Maciço Calcário Estremenho (Figura 1) onde também se inserem as principais grutas turísticas do país em calcários (Mira de Aire, Alvados, Santo António e Moeda). Por isso mesmo este programa pode ser visto como um complemento cultural a muitos participantes que já visitaram as grutas turísticas da região e também estimula o interesse pela visita das grutas turísticas naqueles que são mais adeptos do turismo de natureza. Os restantes 6 percursos estão distribuídos pela Serra do Montejunto, Serra da Arrábida e áreas calcárias da Plataforma Litoral situadas a oeste daqueles relevos (Figuras 2 e 3). No total, os percursos incluem a visita de 28 grutas cujas características se adaptam a um público sem formação específica e com uma ampla faixa etária (idade mínima de 6 anos para a maioria dos percursos). Sendo o objetivo principal do percurso a visita às grutas, esta é no entanto acompanhada da observação de um conjunto variado de aspetos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos da região percorrida. Os guias dos percursos são membros da Sociedade Portuguesa de Espeleologia que juntam os seus conhecimentos de espeleologia à sua formação universitária em geologia.

Ref.º Percurso	Percursos	Ref.º Gruta	Gruta	Calendário de edição
PDC1	Grutas e nascentes de Porto de Mós	GDC1	Cova da Velha	2000-2013
		GDC2	Mouraço	
PDC2	Passeio pela serra de Montejunto entre o anfiteatro de Pragança e o Vale das Rosas	GDC3	Lapa dos Areiros	2001-2004 2008-2013
		GDC4	Lapa Salve-Rainha	
PDC3	Da arriba fóssil da serra dos Candeeiros às grutas e nascentes de Chiqueada	GDC5	Poço Suão	2002-2013
		GDC6	Lapa da Ervideira	
PDC4	Do canhão da Caranguejeira, pelo Menino do Lapedo, às Fontes do rio Lis e ao Buraco Roto	GDC7	Abrigos do Lapedo	2005-2013
		GDC8	Buraco Roto	
PDC5	As nascentes dos rios Almonda e Alviela e a água que forma as grutas e os tufos calcários	GDC9	Gr. Nascente do Almonda	2005-2013
		GDC10	Grutas do Alviela	
PDC6	As grutas que escondem as águas subterráneas da serra da Arrábida	GDC11	Fisga	2006-2013
		GDC12	Lapa das Pombas	
		GDC13	Gruta dos Morcegos	
PDC7	Grutas da Praia da Adraga e Pedra d'Alvidrar, com a serra de Sintra à vista	GDC14	Grutas de Olelas	2008-2013
		GDC15	Gruta da Adraga	
		GDC16	Fojo da Adraga	
		GDC17	Pedra d'Alvidrar	
PDC8	Grutas e nascentes do vale em canhão do Rio Ota e de Alenquer	GDC18	Cova da Moura	2008-2013
		GDC19	Lapa dos Morcegos	
PDC9	O Polje de Minde, a pincha e a Gruta do Regatinho	GDC20	Lapa da Ovelha	2010-2013
		GDC21	Regatinho	
PDC10	Do Olho de Mira à Pedra do Altar e às Ventas do Diabo	GDC22	Olho de Mira	2010-2013
		GDC23	Ventas do Diabo	
PDC11	Nas faldas da serra dos Candeeiros, desde as Penas da Andorinha até à Gruta das Alcobertas	GDC24	Pena da Andorinha	2011-2013
		GDC25	Gruta das Alcobertas	
PDC12	A nascente do Olho Marinho e as grutas da Columbeira, no vale tifónico de Óbidos – Caldas da Rainha	GDC26	Grutas da Columbeira	2011-2013
PDC13	No Portinho da Arrábida entre as Fendas do Creiro e a Lapa de Santa Margarida	GDC27	Lapa Santa Margarida	2011-2013
		GDC28	Lapa da Figueira-Brava	

Tabela 1. Listagem dos percursos de divulgação científica e grutas visitadas.

MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO

Na Figura 1 podem-se observar os sete percursos inseridos no Maciço Calcário Estremenho e as grutas visitadas, cujas referências estão de acordo com as da Tabela 1. Nesta Figura também se pode observar a localização das grutas turísticas.

O percurso “PDC1 - Grutas e nascentes de Porto de Mós” foi o primeiro a ser delineado para o programa Geologia no Verão e continua a ser um dos percursos mais apreciados pelos participantes. O trajecto tem cerca de 9 km de extensão e 200 m de desnível. Começa-se por visitar a Fórnea de Alvados que é um imponente anfiteatro com cerca de 1 km de diâmetro escavado nos calcários margosos, margas e calcários do Jurássico inferior e médio, rico em fósseis de amonites e belemnites (Formação do Barranco do Zambujal (Rugot-Perrot, 1961)). Nas suas vertentes existem várias nascentes temporárias que são consideradas responsáveis pela formação desta fórnea pelo processo de erosão regressiva que provocou o recuo das cabeceiras das linhas de água. A meia encosta visita-se uma das nascentes mais elevadas, onde a água brota da gruta da Cova da Velha (GDC1) que é visitável na sua parte inicial. Na parte da tarde o percurso desenvolve-se ao longo de vales onde afloram as margas, calcários margosos e dolomitos do Jurássico inferior, por vezes contactando por falha com os calcários do Jurássico médio que formam o “Castelo de Alcaria”. Na vertente norte deste relevo limitado por escarpas íngremes situa-se a gruta da Mouração (GDC2) que domina o vale das nascentes do Lena. A visita termina na povoação de Ribeira de Cima passando por várias nascentes temporárias até à nascente perene do Rio Lena.

No percurso “PDC3 - Da arriba fóssil da serra dos Candeeiros às grutas e nascentes de Chiqueda” começa-se por visitar a vertente ocidental da serra dos Candeeiros e, posteriormente, a Plataforma de Aljubarrota (Serra *et al.*, 2003). A vertente ocidental da serra dos Candeeiros constitui uma muralha com 300 metros cuja génese, ainda controversa, pode ser atribuída à existência de uma falha ou ser o resultado da erosão marinha, constituindo, deste modo, a arriba de um paleolitoral. No sítio conhecido por Casa do Caçador, podem-se observar testemunhos em favor desta última hipótese, sendo estes constituídos por seixos rolados, achatados, em matriz areno-argilosa, cobertos por espessura considerável de areias. Blocos de calcário que podem ter resultado do desmonte da arriba depositaram-se sobre as areias, constituindo atualmente o tecto de uma gruta artificial resultante da exploração das areias subjacentes. Este pequeno percurso desde a localidade de Pedreiras até à Casa do Caçador é o objeto de visita da parte da manhã. De tarde, já na Plataforma de Aljubarrota (ou de S. Jorge), na região de Chiqueda, onde os calcários do Jurássico superior são cortados pelo vale encaixado da Ribeira do Mogo, visitam-se várias grutas, entre as quais a Lapa da Ervideira (GDC6), e as nascentes do Poço Suão (GDC5) e Olho de Água de Chiqueda. As águas que surgem nestas nascentes têm provável origem nas infiltrações nos lapiás dos calcários do Jurássico médio da serra dos Candeeiros, mas também em sumidouros existentes na própria formação do Jurássico superior da Plataforma Litoral, conforme foi comprovado por experiências de traçagem da circulação subterrânea com corantes fluorescentes (Crispim, 2010a).

O percurso “PDC4 - Do canhão da Caranguejeira, pelo Menino do Lapedo, às Fontes do rio Lis e ao Buraco Roto” é o que tem o trajecto mais extenso pois é composto por vários pontos de interesse espaçados entre si. Começa-se pela nascente do Olho de Vale Sobreiro que debita para a ribeira da Caranguejeira água com temperatura acima da média regional. Esta ribeira escavou nos calcários cretácicos um troço de vale em canhão que apresenta vários abrigos. A escavação arqueológica de um deles forneceu fósseis de um humano de tenra idade (“Menino do Lapedo” GDC7) que se julga poderem demonstrar a existência de mestiçagem entre neandertais e humanos modernos (Duarte *et al.*, 1999). Posteriormente visita-se a localidade de Fontes, na extremidade setentrional do Maciço Calcário Estremenho, onde ocorrem várias nascentes que dão origem ao rio Lis. Um pouco a sul (na localidade de Reguengo do Fetal), suspensa a meio de uma vertente levantada por falha (com um espetacular “espelho de falha”), existe a gruta do Buraco Roto (GDC8) formada por uma galeria extensa que se ramifica em fendas preenchidas por areia. Em períodos de cheia, as águas que nascem nesta gruta despenham-se por uma ruidosa cascata, que forma um ribeiro afluente do Lis.

O percurso “PDC5 - As nascentes dos rios Almonda e Alviela e a água que forma as grutas e os tufos calcários” tem como principais pontos de visita as duas maiores nascentes de Portugal, a nascente do rio Alviela e a

nascente do rio Almonda, que têm as designações locais de Olhos de Água do Alviela e Olho do Moinho da Fonte. O trajecto começa com a visita da nascente do rio Almonda que drena os calcários do Jurássico médio e superior da serra de Aire. No seu percurso subterrâneo as águas desta nascente formaram a Gruta da Nascente do Almonda que tem uma extensão superior a uma dezena de quilómetros. Logo à saída da nascente as águas são represadas e captadas para abastecimento da Renova, Fábrica de Papel do Almonda. Após atravessar uma barra de calcários do Miocénico, o Rio Almonda descreve vários meandros e ao longo da sua evolução durante o Quaternário depositou tufos calcários que têm espessuras consideráveis nalguns locais, nomeadamente em Ribeira Ruiva, Ribeira Branca e Lapas. Nesta povoação, já perto de Torres Novas, foram escavados vários túneis utilizados pelo Homem e com interesse arqueológico. Associada à nascente dos Olhos de Água do Alviela, que se visita na parte da tarde, existe uma extensa rede de galerias subterrâneas, a maior parte apenas visitável em mergulho, na qual os espeleomergulhadores da Sociedade Portuguesa de Espeleologia desceram já à profundidade de 130 metros sem atingir o fim da gruta. Perto desta nascente confluem as águas da ribeira dos Amiais. Ao atravessar o afloramento de calcários onde se situa a nascente do Alviela, esta ribeira perde-se numa gruta (a Perda da ribeira dos Amiais) e ressurgue após 250 metros de percurso subterrâneo, correndo então mais cerca de 100 metros por um estreito vale em canhão até se cruzar com as águas da nascente.

O Polje de Minde, em conjunto com as grutas turísticas que se situam nas suas imediações, são os pontos centrais de dois percursos: “PDC9 - O Polje de Minde, a pincha e a Gruta do Regatinho” e “PDC10 - Do Olho de Mira à Pedra do Altar e às Ventas do Diabo”. O percurso “PDC9 - O Polje de Minde, a pincha e a Gruta do Regatinho” inicia-se com a subida ao cimo da imponente escarpa de falha designada por Costa de Minde, onde são apresentados os traços essenciais da morfologia e da tectónica do Polje de Minde e da circulação das águas subterrâneas na região. Num percurso ao longo da escarpa de falha pode observar-se a entrada da Lapa da Ovelha (GDC20) e aproveita-se para especular sobre a evolução das grutas nesta região. A descida em direcção a Minde permite observar algumas das formações do Jurássico inferior e médio e algumas falhas associadas ao grande acidente que está na génese da escarpa de falha. Continuando o percurso até Minde, pode-se observar um depósito grosseiro designado por “pincha”, que serve de motivo para discussão sobre a génese do Polje de Minde e a sua evolução no Quaternário. Em seguida visitam-se as antigas lagoas de decantação dos efluentes das indústrias de curtumes, discutindo-se os problemas relacionados com a contaminação das águas subterrâneas da região. Os últimos pontos a visitar são o sumidouro da Pousia dos Algares e a Gruta do Regatinho (GDC21), uma das nascentes que contribui para as cheias periódicas do Polje de Minde, cujas águas se perdem naquele sumidouro.

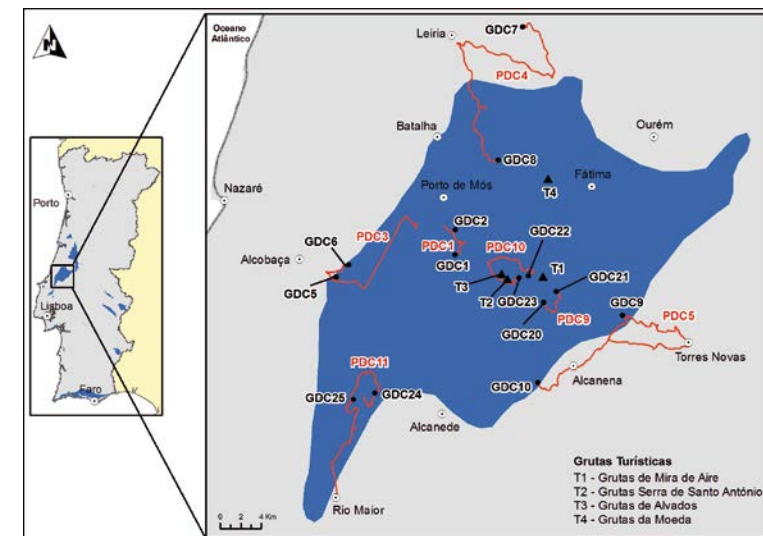


Figura 1. Localização dos percursos de divulgação científica inseridos no Maciço Calcário Estremenho (Mapa de enquadramento das regiões cársicas, segundo Crispim, 2010).

O percurso “PDC10 - Do Olho de Mira à Pedra do Altar e às Ventas do Diabo” começa na gruta do Olho de Mira (GDC22) onde é explicada a estruturação das circulações subterrâneas na região. É visitada uma parte da gruta que ainda contém elementos do antigo sistema de captação de água instalado no interior da gruta. Seguidamente visitar-se-á o poço com mais de 100 de metros, construído para intercalar a galeria ativa e captar água diretamente (Paradela, 1971). A segunda parte desta ação inicia-se na Pedra do Altar, ponto elevado sobranceiro ao Olho de Mira. Aqui podem-se observar dobras e falhas resultantes da compressão no sector de coalescência entre as falhas de Alvados e de Minde. Entre as camadas do Jurássico médio a observar merecem especial atenção os calcários com sílex e os calcários dolomíticos que constituem um relevo curioso denominado Penedo Padrão. A última parte da ação consiste na visita de um conjunto de cavidades situadas na zona mais tectonizada. As conhecidas Ventas do Diabo (GDC23) são as duas maiores grutas e recebem esta designação por se situarem numa saliência da escarpa de falha e terem o aspecto de duas narinas. Além das suas relações com a tectónica, estas grutas são importantes por conterem restos de preenchimentos detríticos de origem endocársica.

O percurso “PDC11 - Nas faldas da serra dos Candeeiros, desde as Penas da Andorinha até à Gruta das Alcobertas” decorre no sopé da serra dos Candeeiros e região limítrofe. Esta serra alinha-se na direcção NNE-SSW ao longo de um grande acidente que se estende, na sua expressão máxima, desde Porto de Mós até Rio Maior. É uma falha complexa acompanhada da extrusão de rochas evaporíticas e argilosas da formação das margas de Dagorda e da intrusão de doleritos numa faixa com maior expressão desde Rio Maior até Portela da Teira. Nesta área é possível observar as salinas de Fonte da Bica onde é obtido o sal por evaporação de águas que dissolvem o sal-gema contido em diversos níveis das margas de Dagorda, ao circularem nesta formação. Mais a norte, perto de Teira, antigas pedreiras exibem disjunção prismática em rochas basálticas. Ainda mais a norte, são visitados grandes espelhos de falha do acidente de Rio Maior – Porto de Mós, no Vale do Barco, e abrigos resultantes da erosão diferencial das camadas de calcários e calcários margosos do Jurássico superior, num local designado por Penas da Andorinha (GDC24). O aquífero regional é escoado pela nascente cársica do Olho de Água de Alcobertas, que também se visita. O final da tarde é reservado à visita da Gruta das Alcobertas (GDC25), uma das primeiras a ser divulgada como gruta com potencial turístico e que é um dos melhores exemplos da carsificação na serra dos Candeeiros.

SERRA DE MONTEJUNTO, OTA E ALENQUER

O percurso “PDC2 - Passeio pela serra de Montejunto entre o anfiteatro de Pragança e o Vale das Rosas” inclui um trajeto com cerca de 8 km de extensão e 200 m de desnível. De manhã, antes do início da subida para o miradouro de Salve-Rainha sobre o anfiteatro de Pragança, visita-se a Lapa dos Areeiros (GDC3) também conhecida por Barroco da Areia onde se pode observar as cascalheiras consolidadas, os areeiros e pequenas grutas situadas sob os blocos de brecha ou resultantes da exploração de areia (Crispim, 2008). Continuando a subida para o cimo da serra, encontra-se no talude da estrada uma pequena gruta horizontal, a Lapa de Salve-Rainha (GDC4). Atingido o topo da serra acima dos 600 metros de altitude, desfruta-se extensa panorâmica pela Bacia do Tejo, pela Plataforma Litoral, pela Serra de Todo o Mundo, constituída por rochas basálticas, e pelo Maciço Calcário Estremenho. Durante o almoço visita-se a Real Fábrica do Gelo, única no país. De tarde faz-se a descida do Vale das Rosas, que se estreita em garganta e apresenta as vertentes cobertas por mantos de cascalheiras. Perto da estrada florestal, observa-se as camadas fortemente inclinadas, dobras de arraste, estrias, veios de calcite e outras estruturas associadas à passagem da Falha de Montejunto.

O percurso “PDC9 - Grutas e nascentes do vale em canhão do Rio Ota e de Alenquer” tem como objetivo dar a conhecer a espetacular garganta atravessada pelo Rio da Ota e as nascentes e grutas relacionadas com as serras calcárias da região de Ota e Alenquer. A acção inicia-se com um pequeno percurso pelo vale, nas imediações da localidade de Ota que dá nome ao rio, passando por algumas cascalheiras e pela base das escarpas até um ponto onde se pode ter uma vista geral do imponente vale em canhão. A existência de duas pedreiras que interrompem o trecho conservado do vale levanta a problemática da conservação do património geológico e desenvolvimento sustentável em regiões calcárias. Quase à saída do vale em canhão do Rio Ota pode visitar-

se a Cova da Moura (GDC18) e já à saída a captação de água da margem direita, discutindo-se as condições propícias ao aparecimento de nascentes neste local e explicando-se a existência de estações arqueológicas nos pontos que dominam a zona. Do topo dos cabeços observa-se o Monte Redondo, isolado por falhas e que constitui o último bloco da Serra de Ota que confina com a Bacia do Tejo. De tarde, já perto de Alenquer, num afluente encaixado da margem esquerda do Rio Alenquer, visita-se a Lapa dos Morcegos (GDC19). É uma gruta com entrada a meia encosta suspensa cerca de 8 metros acima do fundo do vale, onde, após uma dezena de metros de percurso, se encontra um sifão com água que impede a progressão (Crispim, 2008). Esta nascente temporária situada nos calcários do Jurássico superior é motivo para a discussão sobre os problemas de contaminação das nascentes situadas em perímetros urbanos.

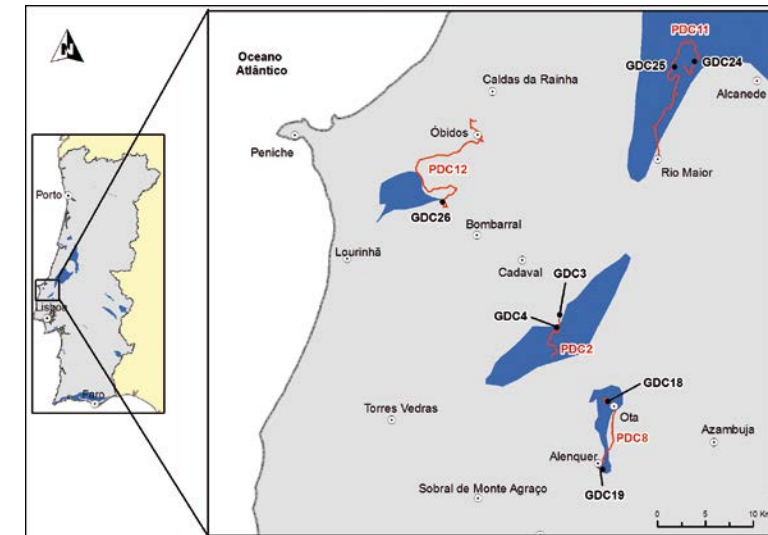


Figura 2. Localização dos percursos de divulgação científica inseridos na Serra de Montejunto, Ota e Alenquer e na região de Obidos.

ÁREAS CALCÁRIAS DA PLATAFORMA LITORAL

O percurso “PDC7 - Grutas da Praia da Adraga e Pedra d’Alvidrar, com a serra de Sintra à vista” em conjunto com os da Serra da Arrábida, são dos circuitos que têm maior afluência, talvez por se localizarem perto da capital. O início da acção tem lugar no vale da Calada no qual se abre um conjunto de cavidades conhecidas por Grutas de Olelas (GDC14) onde foi explorado um importante espólio arqueológico (Sousa, 1996). Segue-se a visita dos campos de megalapiás da Granja dos Serrões e de Negrais formados em calcários cretácicos que foram sujeitos à erosão cársica que formou esculturas naturais consideradas monumentos geológicos, atualmente em fase de requalificação como monumento natural. A acção termina no litoral com a visita a alguns retalhos de calcários do Jurássico superior que circundam a norte o maciço eruptivo da Serra de Sintra, desde a Praia da Adraga até à Pedra d’Alvidrar. São aí conhecidas várias grutas, umas resultantes do alargamento de fracturas pela erosão marinha, outras da dissolução dos calcários e outras do desmonte das rochas vulcânicas intruídas na massa calcária, como é o caso do espetacular Fojo da Adraga (GDC16). A gruta da Praia da Adraga (GDC15) é um exemplo da conjugação de todos os processos descritos. Já a gruta da Pedra d’Alvidrar (GDC17), constitui um conjunto de galerias que descem até ao mar abertas ao longo das camadas fortemente inclinadas.

O percurso “PDC12 – A nascente do Olho Marinho e as grutas da Columbeira, no vale tifónico de Obidos – Caldas da Rainha” tem como pano de fundo o maior vale tifónico português e os fenómenos cársicos

superficiais e subterrâneos da periferia. Resultante do fenómeno de diapirismo, o vale tifónico é constituído por um fundo rebaixado entre áreas planálticas com as quais contacta em geral por escarpa de falha. Neste fundo afloram as argilas e margas da formação da Dagorda, do Hetangiano, acompanhadas por gessos e calcários dolomíticos a que se associaram rochas intrusivas doleríticas. Calcários e doleritos, rochas mais resistentes à erosão, formam pequenos relevos que se elevam acima dos terrenos constituídos por argilas, mais brandas. A visita das gessseiras permite presenciar as técnicas de exploração do gesso a céu aberto ou em lavra subterrânea e permite a observação da forma de ocorrência deste mineral, disseminado em massas terrosas ou formando agregados cristalinos. As áreas planálticas que circundam o vale tifónico são constituídas por calcários do Jurássico médio e superior, onde a paisagem cársica pouco desenvolvida é dominada pela erosão fluvial que escavou profundos entalhes no rebordo do vale tifónico. Um dos casos mais interessantes é o do Vale Roto, por onde corre a Ribeira da Columbeira (ou da Zambujeira), afluente do Rio Real, que atravessa todo o vale tifónico. Nas vertentes escarpadas abrem-se várias grutas (Grutas da Columbeira – GDC26) constituídas por galerias relacionadas com antigas nascentes das águas infiltradas nos planaltos vizinhos. Estas grutas forneceram espólio arqueológico (Cardoso et al, 2002) e uma delas permite atingir o nível da água do aquífero. No entanto, é em Olho Marinho que se situa a mais importante nascente cársica da região, à qual se associa um extenso afloramento de tufo calcários com várias texturas e com alguns níveis de carvão fóssil intercalados.

SERRA DA ARRÁBIDA

O percurso “PDC6 - As grutas que escondem as águas subterrâneas da serra da Arrábida” inicia-se no castelo de Sesimbra, local sobranceiro ao diapiro com o mesmo nome, onde se começa por expor a geologia da região, chamando a atenção para o facto de as águas que se infiltram nos calcários da Plataforma do Cabo Espichel e na Serra da Arrábida terem um circuito subterrâneo ainda pouco conhecido. No Cabo Espichel desce-se ao Focinho do Cabo para ver a Fisga (GDC11) que constitui o prolongamento sudoeste da Lapa das Pombas (GDC12) percorrido pelo mar. Caminhando por um corrimão num rebordo da arriba virada a norte, atinge-se a entrada da Lapa das Pombas onde se pode observar, além da grande sala que forma a maior parte desta lapa, a entrada da Furna dos Segredos que se abre na arriba situada a nordeste. Ambas as grutas são formadas em camadas do Jurássico superior com forte inclinação (Teixeira *et al.*, 2003). A acção continua na serra do Risco. Aqui, observa-se os sumidouros onde se perdem as águas que nas chuvadas fortes inundam a depressão da cabeceira do Ribeiro das Terras do Risco e conduzem a água até uma nascente litoral relacionada com a Gruta dos Morcegos (GDC13), no sítio denominado Fojo, como foi comprovado por traçagens recentes (Crispim *et al.*, 2006). A descida por uma ravina estreita até à arriba permite ver as falésias alcantiladas na base das quais se abre a entrada da gruta. Esta acção permite relacionar a variação do nível do mar desde os tempos da transição entre o Pliocénico e o Quaternário, passando pelo recuo do oceano para distâncias que atingiram cerca de 40 km para oeste da posição atual, até à situação presente, em que as nascentes cársicas estão bloqueadas pela subida do nível do mar.

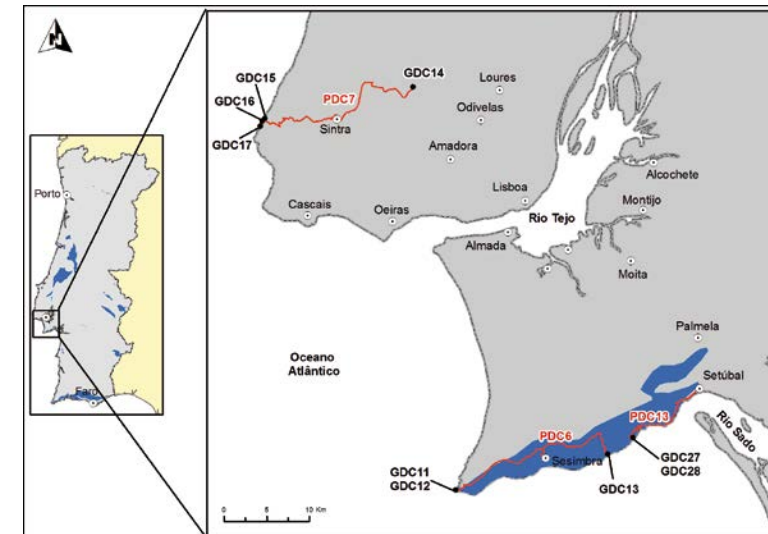


Figura 3. Localização dos percursos de divulgação científica inseridos na Serra da Arrábida e na região de Sintra.

Todo o percurso “PDC13 - No Portinho da Arrábida entre as Fendas do Creiro e a Lapa de Santa Margarida”. decorre na enseada do Portinho da Arrábida onde é possível observar um importante conjunto de aspetos da geologia da Arrábida. O primeiro é a discordância dos calcários do Miocénico depositados em camadas subhorizontais sobre os calcários do Jurássico fortemente inclinados. Esta disposição estrutural das camadas, associada à forte erosão da vertente, originou o escorregamento da parte inferior e tombamento das camadas do Jurássico, com formação de grandes corredores entre camadas quase verticais. Em direcção à Chã da Anicha e Pedra da Anicha observa-se a geometria das formações cenozóicas e é possível interpretar a estrutura e associá-la aos movimentos tectónicos que originaram a Cadeia da Arrábida. Para oeste do Portinho da Arrábida há vestígios de um nível do mar mais elevado que o atual (Breuil y Zbyszewski, 1945; Inácio *et al.*, 2003). São estreitos patamares talhados nos calcários do Miocénico, entre Alpertuche e o Portinho, a que se associam duas grutas interessantes, a Lapa de Santa Margarida (GDC27) e a Gruta da Figueira-Brava (GDC28) (Antunes, 1990/91; Sena *et al.*, 2003). Ambas apresentam vestígios paleontológicos e arqueológicos, pelo que são bastante importantes para o estudo do Quaternário em Portugal.

CONCLUSÕES

O processo de cooperação entre a Sociedade Portuguesa de Espeleologia e a Agência para a Cultura Científica e Tecnológica – Ciência Viva no âmbito do subprograma Geologia no Verão, iniciado em 2000 e contando já com 14 anos de realização ininterrupta, fomentou a expansão do conhecimento do património espeleológico de Portugal. O progresso nesta área da cultura científica forneceu pretexto para desenvolvimento de outros temas relacionados com as regiões calcárias, não só as várias vertentes das componentes geológica e geomorfológica mas também os aspectos relacionados com a circulação, captação e contaminação das águas subterrâneas e ainda a utilização das grutas pelo Homem pré-histórico. Estas acções de divulgação científica são um complemento cultural dos muitos participantes que já visitaram as grutas turísticas da região e contribuem também para a propagação do interesse pelas grutas turísticas aos simpatizantes do turismo de natureza.

AGRADECIMENTOS

O sucesso do programa de acções de Geologia no Verão desenvolvidas pela SPE não seria possível sem a colaboração de muitos coordenadores e monitores, cerca de oito dezenas no total, a quem deixamos um agradecimento comum. É justo distinguir o nome de Pedro Ferreira, o coordenador do programa no seu arranque.

Os nossos agradecimentos vão também para Ana Noronha, responsável da ANCCT pelo programa Ciência Viva no Verão, e seus colaboradores pelo empenho e interesse com que acompanharam desde o início as nossas propostas e o aperfeiçoamento das acções de divulgação.

Também são devidos agradecimentos às câmaras municipais de Porto de Mós, de Torres Novas e de Alcanena, assim como à Cooperativa Terra Chã e Ecoteca de Porto de Mós pelo apoio indispensável aos diferentes percursos que decorrem nas suas regiões.

BIBLIOGRAFIA

- Antunes, M. T. 1990/91. O Homem da Gruta da Figueira Brava (ca 30000 BP). *Memória Academia Ciências de Lisboa*, XXXI, 487-536.
- Breuil, A. y Zbyszewski, G. 1945. Contribution à l'étude des industries paléolithiques du Portugal. *Comunicações dos Serviços Geológicos Portugal, Lisboa*, XXVI, 678 pp.
- Cardoso, J. L., Raposo, L. y Veiga Ferreira, O. 2002. A Gruta Nova da Columbeira. *Câmara Municipal do Bombarral, Bombarral*, 38 pp.
- Crispim, J. A., Lopes, L.M., Teixeira, E., Machado, J. y Monteiro, C. 2006. Experiências de traçagem da circulação subterránea nas Terras do Risco (Sesimbra, Arrábida). *VII Congresso Nacional Geologia*, Évora, 541-544.
- Crispim, J. A. 2008. Património Geológico da Serra de Montejunto. *Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, Lisboa, 113 pp.
- Crispim, J. A. 2010a. O sistema Aquífero do Maciço Calcário Estremenho: características e importância das traçagens para o conhecimento da circulação subterránea. En: ARH Tejo (eds.), *Os Aquíferos das bacias hidrográficas do Rio Tejo e das ribeiras do Oeste: Saberes e Reflexões*. ARH Tejo, Lisboa, 158-165
- Crispim, J. A. 2010b. Panorama das regiões cársicas de Portugal. En: Cotelos Neiva, J.M., Ribeiro, A., Victor, M., Noronha, F. y Ramalho, M. (eds.), *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. Associação Portuguesa Geólogos y Sociedade Geológica Portugal, Lisboa. Vol. I, Geologia Clássica, Cap. V, *Geomorfologia*, 469-478
- Duarte, C., Maurício, J., Pettitt, P.B., Souto, P., Trinkaus, E., Van der Plicht, H., y Zilhão, J. 1999. The early Upper Paleolithic human skeleton from the Abrigo do Lagar Velho (Portugal) and modern human emergence in Iberia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 96, nº 13, 7604-7609.
- Inácio, A., Crispim, J. A., Sena, C., Oliveira, M. A., Vivas, M. y Lopes, S. 2003. Características da carsificação no Miocénico do Portinho da Arrábida (Setúbal, Arrábida). *Espeleo Congresso 2003 da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, Alcanena.
- Paradela, P. L. 1971. Ligação de uma galeria em fundo de poço ao algar do molho de água, localizado por geofísica, em Mira de Aire. *I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica*, Madrid, 735-753.
- Ruget-Perrot. 1961. Études stratigraphiques sur le Dogger et el Malm inférieur du Portugal au nord du Tage. Bajocien, Bathonien, Callovien, Lusitanien. *Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal*, 7, 1-197.
- Sena, C., Crispim, J. A., Inácio, A., Oliveira, M. A., Vivas, M. y Lopes, S. 2003. Tipologia das grutas costeiras entre Alpertuche e Portinho da Arrábida (Setúbal, Arrábida). *Espeleo Congresso 2003 da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, Alcanena.

Serra, B., Crispim, J. A., Rodrigues, P., Machado, J., Azevedo, J., Subtil, R., Inácio, A., Lourenço, A., Guerra, S., Miguéns, F., Martins, I. y Cordeiro, V. 2003. Interesse didáctico e cultural de um percurso entre a Serra dos Candeeiros e as Nascentes de Chiqueda. *Espeleo Congresso 2003 da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, Alcanena.

Sousa, A.C. 1996. O Neolítico Final e o Calcolítico na área de Cheleiros. Dissertação de Mestrado em Pré-história e Arqueologia, *Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa*, 165 pp.

Teixeira, E., Crispim, J. A., Vicente, E., Lira, F. y Ferrão, M. 2003. As grutas associadas ao nível litoral inferior do Forte da Baralha (Cabo Espichel – Sesimbra). *Espeleo Congresso 2003 da Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, Alcanena.

Gruta do Mateus (Bonito, Serra da Bodoquena): Caracterização ambiental, propostas de uso turístico e implantação da mais nova caverna turística brasileira

Marcos Luís Faleiros Lourenção⁽¹⁾, Lívia Medeiros Cordeiro^(1,2), Lucas Padoan de Sá Godinho⁽³⁾, Rodrigo Borghezan^(1,4), José Antonio Basso Scaleante⁽⁵⁾, José Ayrton Labegalini⁽⁵⁾, Silmara Zago⁽⁶⁾, Keny Marques Lima^(1,7) e Heros Augusto Santos Lobo^(1,6,8)

(1) Grupo de Espeleologia da Serra da Bodoquena (GESB) (marcoslourencao@ufgd.edu.br)

(2) Universidade de São Paulo (USP) (liviamc@hotmail.com)

(3) Instituto de Geociências/Universidade de São Paulo (IGC/USP) (lucaspsgodinho@gmail.com)

(4) Universidade Anhanguera-UNIDERP (rodrigo_borghezan@hotmail.com)

(5) Estação Floresta Assessoria Ambiental e Turismo Ltda. (scala@estacaofloresta.com.br, ja.labegalini@uol.com.br)

(6) União Paulista de Espeleologia (UPE) (silmara_zago@ig.com.br)

(7) Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) (kenyddos@hotmail.com)

(8) Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) (heroslobo@ufscar.br)

RESUMO

A região de Bonito, no estado de Mato Grosso do Sul, é um dos mais importantes destinos brasileiros de ecoturismo e turismo sustentável. Os principais atrativos turísticos são formados por feições cársticas, com destaque para os rios de águas límpidas, cachoeiras de tufas carbonáticas e cavernas. Nesse contexto, a gruta do Mateus recebeu estudos de caracterização ambiental entre os anos de 2012 e 2013, para verificar suas condições para o uso turístico. Foram desenvolvidas pesquisas dos temas de geologia, geomorfologia, espeleoclimatologia, fauna cavernícola, organismos patógenos, vegetação do entorno, potencial para visitação e educação ambiental. A identificação do potencial para visitação, associada aos níveis pouco elevados de fragilidade do ambiente, permitiram a delimitação do planejamento espacial interno e externo da caverna, da capacidade de suporte de 304 visitas por dia e de um programa de gestão que aborda aspectos gerenciais, recreacionais, educacionais e estruturais, entre outros. Após um processo de avaliação e aprovação formal realizado pelo Instituto de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso do Sul (IMASUL), a gruta foi aberta para a visitação em janeiro de 2014. Como resultados preliminares, a gruta vem obtendo um fluxo inicial de aproximadamente 200 visitantes por mês, mesmo sem uma divulgação efetiva do atrativo. As perspectivas futuras dizem respeito à necessidade de implantação dos protocolos de monitoramento do ambiente, de forma a verificar a tolerância do ambiente aos impactos da visitação e a aceitação do produto no mercado turístico da região da Serra da Bodoquena, bem como a ampliação da capacidade de carga do atrativo conforme definido em seu Plano de Manejo Espeleológico.

Palavras chave: Conservação Ambiental; Ecoturismo; Espeleoturismo; Plano de Manejo Espeleológico.

Mateus Cave (Bonito, Serra da Bodoquena, Brazil): Environmental characterization, tourist use proposition and implementation of the newest Brazilian show cave

ABSTRACT

The Bonito region, in the Mato Grosso do Sul state, is one of the most important Brazilian destinations for ecotourism and sustainable tourism. The main tourist attractions are composed by karst features, with emphasis on clear water rivers, waterfalls of carbonate tuff and caves. In this context, the Mateus cave received environmental characterization studies between the years of 2012 and 2013, to verify its tourist use conditions. Developed researches include the themes of geology, geomorphology, speleoclimatology, cave fauna, pathogen organisms, surrounding vegetation, potential for visitation and environmental education. The identification of the visiting potential, associated to the low environmental fragility levels, allowed the delimitation of the cave's internal and external spatial planning, the carrying capacity of 304 persons per day and one management program that considers management, recreational, educational and structural aspects, among others. After an official evaluation and approval process, taken by the Environmental Institute of the Mato Grosso do Sul State (IMASUL), the cave was opened for visitation in January 2014. As preliminary results, the cave has obtained an initial flux of about 200 visitors monthly, even without an effective divulgation of the attractive. The future perspectives concerns with the necessity of implementation of the environmental monitoring protocols, aiming to verify the tolerance of the environment to the visiting impacts and the product acceptance in the Serra da Bodoquena region tourist market, likewise the attractive carrying capacity amplification, as defined by its Plan of Speleological Management.

Keywords: Environmental Conservation; Ecotourism; Speleotourism; Plan of Speleological Management.

INTRODUÇÃO

A visitação de cavernas no Brasil, ou espeleoturismo, é uma atividade ainda pequena se comparada com as demais formas de turismo de natureza no país, mas cujo destaque tem se ampliado nas últimas três décadas, pelo menos. Estudos recentes apontam para quase 200 cavernas turísticas no país (Lobo, 2008), número este que certamente deverá ser ampliado à medida que o esforço de catalogação das cavernas turísticas se intensifica. Neste cenário, a região da Serra da Bodoquena, no estado do Mato Grosso do Sul, é uma das mais conhecidas áreas cársticas carbonáticas brasileiras. O espeleoturismo na região data dos anos de 1970 (Vargas, 2001), tendo a gruta do Lago Azul como precursora para seu desenvolvimento, em um universo de 206 cavidades naturais identificadas na região (Sallun Filho *et al.*, 2010) – embora apenas 101 delas estejam formalmente cadastradas no Cadastro Nacional de Cavernas (SBE, 2014). Destas, 5 cavidades naturais já eram abertas ao espeleoturismo – grutas do Lago Azul e São Miguel, abismo Anhumas, lagoa Misteriosa e buraco das Araras – antes do estudo ora apresentado, que possibilitou a abertura da gruta do Mateus¹.

Do total atual de 6 cavernas turísticas da Serra da Bodoquena, 4 estão localizadas em Bonito – incluindo a gruta do Mateus, a menos de 3 km do centro da cidade – e 2 em Jardim. O município de Bonito está a aproximadamente 300 km de Campo Grande, a capital do estado de Mato Grosso do Sul (Figura 1).

A gruta do Mateus encontra-se na borda Leste do carste da Serra da Bodoquena, em uma zona caracterizada por planícies com morros residuais isolados, cujas cristas são orientadas segundo a direção norte-sul, que coincide com a foliação metamórfica regional (Sallun Filho, 2005). Os carbonatos do carste da Serra da Bodoquena pertencem ao Grupo Corumbá, cujo início da deposição foi marcado por uma fase *rift*, com depósitos clásticos de leques aluviais, seguidos por uma fase *drift*, que apresenta sedimentos marinhos rasos a profundos (Almeida, 1984; Boggiani, 1998). A gruta do Mateus encontra-se encaixada em dolomitos me-

tamorfisados da Formação Bocaina, interpretados como de ambiente de planície de maré (Boggiani *et al.*, 1993). O mármore dolomítico que abriga a gruta do Mateus possui foliação metamórfica com direção norte-sul e mergulho de 45° para leste, que condicionou a formação dos condutos mais volumosos da caverna, com padrão linear (Palmer, 1991) e direção paralela à da foliação principal. Condutos menores, com padrão em fenda e direção leste-oeste, truncam os condutos principais, sendo condicionados por fraturas de alto ângulo. A caverna não apresenta cursos d'água perenes, sendo rara a ocorrência de água, limitada a alguns gotejamentos esparsos. Os espeleotemas, compostos por aragonita, apresentam a superfície intemperizada, indicando um longo período com pouca infiltração. Ocorrem brechas sedimentares clásticas próximas às entradas da caverna, formadas por fluxos de detritos, que abrigam grande concentração de fósseis de morcegos e outros pequenos vertebrados.

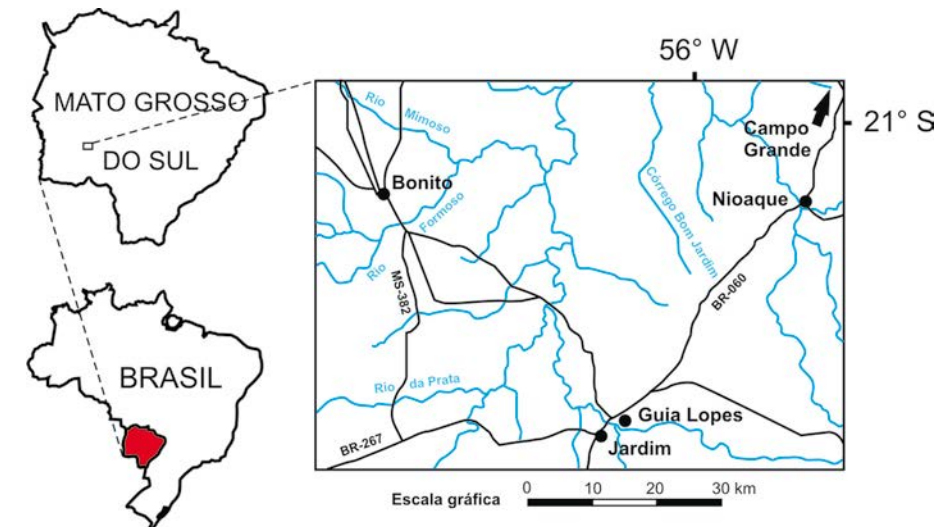


Figura 1. Localização da área de estudo.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta os principais resultados da elaboração do Plano de Manejo Espeleológico (PME) da gruta do Mateus, para permitir sua abertura para a visitação. Segundo a legislação brasileira (Resolução CONAMA 347/2004), a existência do PME é requisito fundamental para que uma caverna possa ser utilizada de forma regular para o turismo. Além disso, pela legislação do estado de Mato Grosso do Sul, as cavernas estão entre os empreendimentos turísticos que precisam de licença para funcionamento (cf. SEMAC, 2010), sendo o PME um pré-requisito para permitir a operação comercial das atividades de espeleoturismo, que deve ser autorizada pelo órgão responsável da administração estadual – o IMASUL (Instituto de Meio Ambiente do Mato Grosso do Sul).

MÉTODOS E ETAPAS

A elaboração do PME da gruta do Mateus se baseou no Termo de Referência do IMASUL (2012), o qual apresenta os estudos mínimos necessários. A experiência anterior da equipe também foi fundamental, de forma que as metodologias empregadas, em sua maioria, já tinham sido utilizadas em outros projetos de conservação de áreas cársticas ou gestão de cavernas. Foram desenvolvidas investigações de campo do meio físico, biótico e de aspectos inerentes ao turismo. O enfoque geral dos estudos ambientais foi a identificação de fragilidades específicas relativas ao turismo, com base no método proposto em Lobo *et al.* (2013).

¹Embora registrada formalmente como gruta do Mateus, o empreendedor optou por nomear o atrativo turístico como gruta São Mateus, nome pelo qual a caverna é comercialmente conhecida.

Para o estudo do meio físico, a delimitação das zonas de fragilidade foi realizada com base em critérios essencialmente geológicos e geomorfológicos da caverna, como padrão de condutos, rocha encaixante, depósitos clásticos, espeleotemas, hidrologia e relações da morfologia da caverna com a morfologia do meio externo. As zonas de fragilidade variaram de acordo com a susceptibilidade de degradação dos indicadores físicos ao uso intensivo do meio, podendo ser baixa, média, alta ou absoluta (*sensu* Lobo et al., 2013). As principais características consideradas para avaliar a fragilidade dos indicadores físicos foram: localização ao alcance dos visitantes ou no substrato, ocorrência rara na caverna e importância científica ou relevância considerável em comparação a outras cavernas da região. Ainda no meio físico, os estudos atmosféricos foram desenvolvidos por meio de um monitoramento, envolvendo tanto o microclima externo quanto o espeleoclima. O monitoramento foi desenvolvido entre os meses de junho e novembro de 2012. Os resultados permitiram a identificação das fragilidades atmosféricas da gruta (*sensu* Lobo et al., 2013), que foram avaliadas, sobretudo, em função da conectividade com o microclima externo e em função do potencial de dispersão dos impactos da visita.

O levantamento da fauna cavernícola foi realizado em duas etapas, em março e junho de 2012. Os invertebrados foram coletados manualmente, com pinças e pincéis, e uma armadilha do tipo *pittfall trap* foi exposta durante 48 horas em cada um dos 23 setores definidos para o estudo bioespeleológico. Os espécimes coletados foram fixados em álcool 70%, triados em estereomicroscópio e identificados ao menor nível taxonômico possível junto aos especialistas. Morcegos foram capturados com rede de neblina estendida na entrada principal da caverna, sendo cada exemplar pesado e medido o comprimento do antebraço, fotografados e soltos próximo à entrada da caverna. Outros vertebrados foram fotografados durante os trabalhos de campo e considerados para o presente levantamento. Após a análise da riqueza, diversidade e similaridade entre os setores amostrados, no *software* PAST versão 2.17 (Hammer et al., 2001), os setores foram classificados em quatro níveis de fragilidade (absoluta, alta, média e baixa), seguindo a proposta de Lobo et al. (2013). Os critérios para a determinação dos níveis de fragilidade biológica foram: riqueza e abundância de espécies, riqueza de recursos tróficos, presença de espécies vulneráveis e/ou de função importante para o ecossistema cavernícola (ex. morcegos e roedores) e presença de substratos inorgânicos importantes para os animais cavernícolas (ex. sedimentos inconsolidados e substratos umidos). Ainda no meio biótico, foram desenvolvidos estudos sobre potenciais organismos nocivos à saúde, com foco nos mosquitos vetores de Leishmaniose e no fungo *Histoplasma capsulatum*, causador da histoplasmose. Foram feitas coletas de material orgânico dentro da caverna para este último, bem como capturas em armadilhas luminosas para os mosquitos. O material coletado foi analisado em laboratório, por meio de PCR (*Polimerase Chain Reaction*).

Para a análise do atual e do potencial uso turístico da gruta foram consideradas as seguintes etapas: 1 – realização de atividades de campo, com registros fotográficos, entrevistas com o proprietário, guias e órgãos públicos (IMASUL e Secretaria Municipal de Turismo); 2 – Avaliação do potencial espeleoturístico baseando-se nas fragilidades ambientais e potencialidades turísticas gerais e para o turismo de contemplação (Lobo, 2007); 3 – projeção de um cenário hipotético de visita, por meio de medições espaciais e temporais com grupo-piloto de visitantes, com a preocupação de se evitar danos ao ambiente. Sobre a infraestrutura pré-existente no interior da gruta – fruto de uma tentativa anterior de abri-la para visita, em data que não foi descoberta, mas seguramente entre o início dos anos de 1980 e o final dos anos de 1990 –, verificou-se que essa infraestrutura era precária para atender com segurança o visitante, bem como para preservar o ambiente. A infraestrutura até então instalada não oferece segurança aos visitantes e os materiais empregados são inconvenientes ao ambiente cavernícola. Assim, os estudos realizados propuseram a substituição da maior parte da infraestrutura de visita.

PRINCIPAIS RESULTADOS

Com relação ao meio físico, foram distinguidas 4 zonas de fragilidade do meio físico para a gruta do Mateus. Foi atribuída média fragilidade a zona I, que ocorre em um estreito conduto em fenda, oferecendo risco por pisoteamento às carapaças de moluscos ali existentes. A zona II possui baixa fragilidade, por estar situada no conduto mais volumoso da caverna, permitindo a elaboração de um roteiro turístico que evite suas feições mais frágeis. A zona III possui média fragilidade, pois consiste em uma área estreita com delicadas formações em

sua parede: *box works* de veios de quartzo muito proeminentes na rocha encaixante. Por fim, a zona IV apresenta alta fragilidade, devido à presença de depósitos fossilíferos em abundância no substrato, que podem ser danificados pelo pisoteamento. No caso do espeleoclima, foram definidas duas zonas de fragilidade, sendo a zona perto dos acessos a de baixa fragilidade e a zona mais ao interior da gruta de média fragilidade. No geral, o espeleoclima responde rapidamente às variações do meio externo, além de não sofrer grandes impactos a partir da visita nos limites estudados.

Quanto às fragilidades biológicas, foi identificado o total de 46 morfoespécies de invertebrados, distribuídos em 20 ordens, incluindo uma nova espécie de opilião do gênero *Eusarcus*. Não foram identificados invertebrados com troglomorffismos que indicassem possível especialização ao hábito exclusivamente cavernícola. Entre os vertebrados, foram identificadas 9 espécies entre anfíbios, répteis roedores, aves e morcegos. Com base nos critérios utilizados para determinação das classes de fragilidade biológicas, recomendou-se que não haja visita em quatro trechos da caverna, devido: à riqueza de recursos tróficos, presença do depósito de microfósseis, presença do depósito de sedimentos finos (locais importantes para reprodução dos grilos cavernícolas) e abundância de grilos *Endecous* sp. Como ação para minimizar os impactos sobre a comunidade cavernícola recomendou-se, também: a instalação de escadas de material inerte (aço inoxidável ou plástico), suspensas em relação ao plano do solo e com degraus vazados (do tipo treliça), para permitir o fluxo da fauna de invertebrados; a instalação de sistema de iluminação de baixa intensidade, ligado unicamente durante as visitas; minimização da poluição sonora através da orientação dos monitores; e o uso de roupas adequadas (calças, blusas de manga comprida e calçados fechados) para evitar acidentes com aranhas marrons (*Loxosceles* sp.) que ocorrem na caverna. Também foram encontrados resultados positivos para *H. capsulatum* e para Leishmaniose, ao que foram recomendadas medidas profiláticas e preventivas aos visitantes, como o uso de luvas durante a visita e de repelentes de insetos.

Constatou-se também que o uso turístico da gruta do Mateus era irregular e inadequado, e se configurava em visita descontrolada, há vários anos. Esse fenômeno acaba por gerar impactos negativos no ambiente físico como pichações e pisoteio de espeleotemas, assim como impactos no meio biológico, e um dos fatores determinantes é a proximidade da gruta com a região urbana do município. Por outro lado, essa proximidade com o centro urbano também é um fator positivo para alavancar a visita controlada. Outro aspecto positivo é o fato da gruta estar em uma propriedade particular onde já existe uma estrutura de receptivo adequada, com sala de recepção, banheiros, e principalmente um museu de três andares que, segundo o PME proposto, fará parte do roteiro oferecido ao visitante.

O resultado obtido com a aplicação do método consolidado por Lobo (2007) permitiu enquadrar a gruta do Mateus na categoria de uso classe C, com alto potencial espeleoturístico para o turismo de contemplação, e que sugere que a gruta possui potencial para o desenvolvimento de no mínimo um tipo de atividade turística de alta qualidade. Assim, foi possível comparar a gruta do Mateus com as demais cavernas turísticas de Bonito (Tab. 1), antes mesmo de sua abertura formal para a visita.

Cavidade natural	Resultado final	Potencial para Contemplação	Categoria de Uso
Abismo Anhumas	15	83,3 % (ABSOLUTO)	Classe A
Gruta do Lago Azul	15	83,3 % (ABSOLUTO)	Classe A
Grutas de São Miguel	12	66,66 % (ALTO)	Classe C
Gruta do Mateus	12	66,66 % (ALTO)	Classe C

Tabela 1. Comparativo da pontuação e categoria de uso público das principais grutas turísticas do município de Bonito. Fonte: Lobo et al. (2008) e pesquisa dos autores.

Por fim, foi desenhado o cenário inicial de visitação, que teve como base a análise do mapa topográfico da gruta e a definição de quatro pontos para paradas interpretativas (Figura 2).

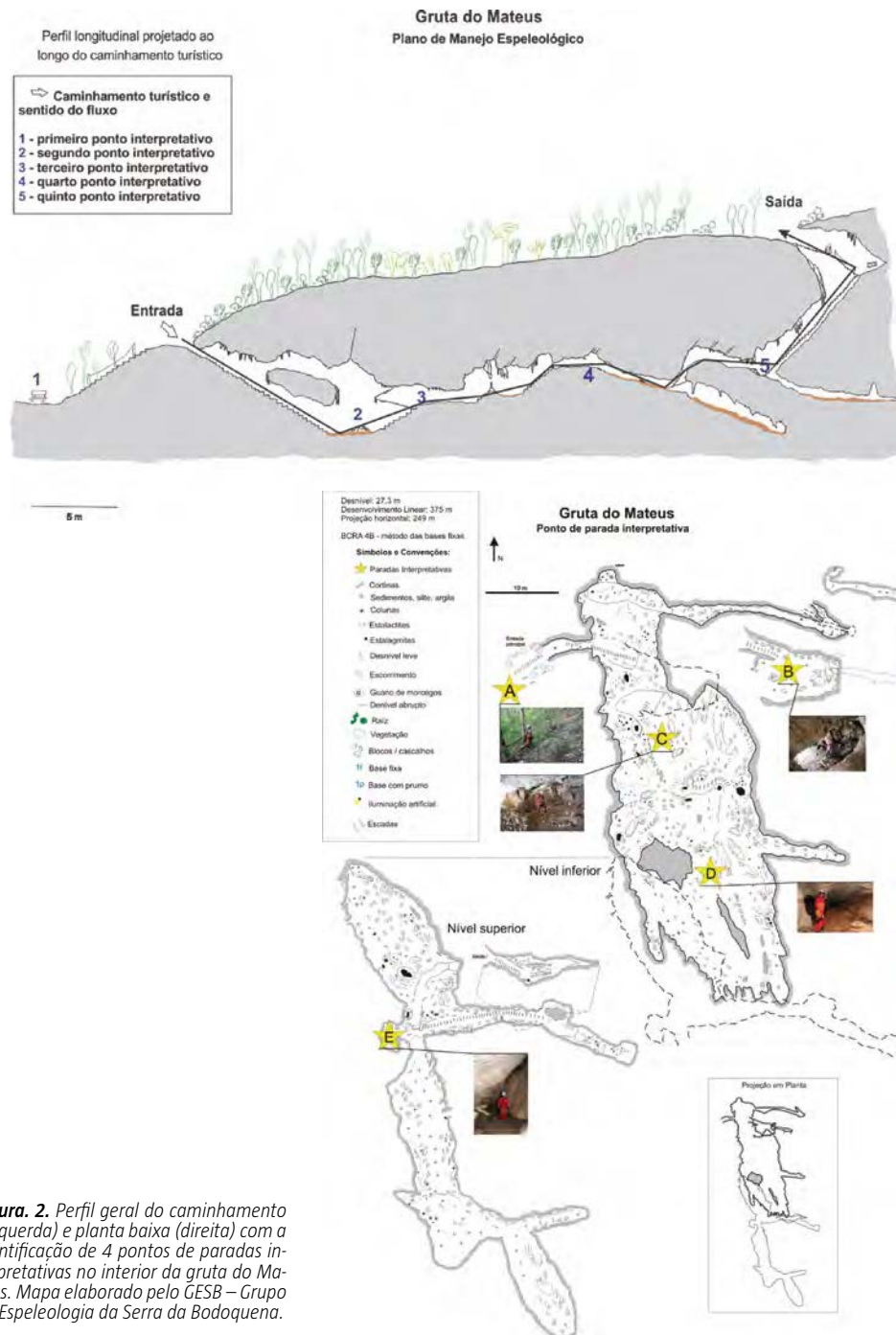


Figura 2. Perfil geral do caminhamento (esquerda) e planta baixa (direita) com a identificação de 4 pontos de paradas interpretativas no interior da gruta do Mateus. Mapa elaborado pelo GESB – Grupo de Espeleologia da Serra da Bodoquena.

Com as visitas piloto de grupos de diferentes tamanhos, foram analisados o tempo gasto pelos grupos para percorrer a gruta, o espaço que estes grupos ocupavam e a área disponível para paradas interpretativas. As áreas disponíveis em cada ponto interpretativo também foram medidas, considerando ser esse um fator limitador para a definição do tamanho dos grupos e, portanto, um fator importante para a capacidade de carga da gruta.

Com base nos dados apresentados, considerou-se a seguinte premissa: o número máximo de visitantes por grupo não poderá ser maior que o número máximo de visitantes que o salão de menor volume (dos salões definidos como pontos interpretativos) acomodar, buscando assim evitar o pisoteio de espeleotemas e contatos com o teto da gruta. As áreas disponíveis nos pontos interpretativos de número 3 e 4 permitem acomodar aproximadamente 13 à 16 visitantes, número máximo considerado no cenário inicial de visitação.

A partir dos estudos realizados, foram definidas as zonas de Fragilidade Integrada da gruta do Mateus, Máximas e Médias, conforme metodologia definida em Lobo et al. (2013). Os resultados são apresentados na Figura 3.

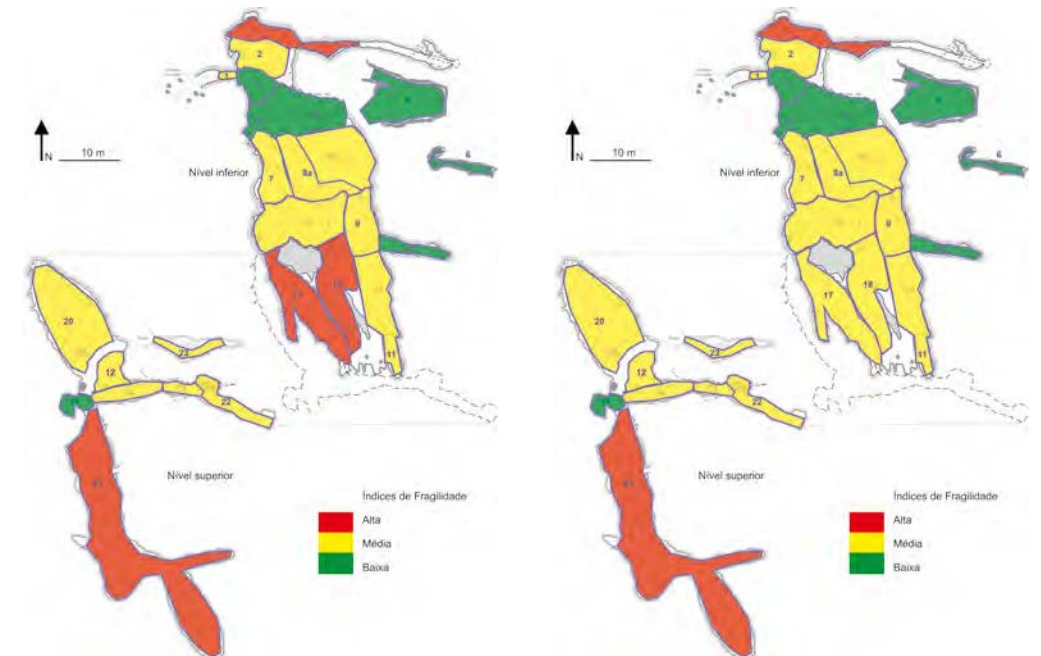


Figura 3. Diagramas de fragilidades integradas: Máximas (esquerda) e Médias (direita) da gruta do Mateus, com base nas fragilidades do meio físico, espeleoclima e espeleobiologia.

No caso da gruta do Mateus, as fragilidades integradas máximas e médias são praticamente idênticas entre si. A exceção aconteceu nos setores 17 e 18, onde na Fragilidade Integrada Máxima o índice foi "Alta" e na Fragilidade Integrada Média o índice foi "Média". Estes índices são resultantes da composição entre os 3 mapas temáticos de fragilidades considerados (meio físico, espeleoclima e espeleobiologia), sendo que o aumento da fragilidade nos setores 17 e 18 ocorreu, sobretudo, em função da espeleobiologia. Entretanto, a maior parte do circuito de visitação proposto está localizada em zonas cujos índices de Fragilidade Integrada são baixos e médios, não afetando os principais elementos de conservação da gruta e excluindo as principais zonas mais frágeis: 5, 17, 18 e 21.

Das fragilidades, desenvolveu-se o zoneamento ambiental da gruta do Mateus, uma exigência legal dos PMEs no Brasil. O zoneamento é um instrumento de planejamento espacial que permite definir categorias de uso e restrição para cada trecho de uma caverna, em acordo com suas características ambientais. As zonas definidas para elaboração do zoneamento ambiental do ambiente cavernícola da gruta do Mateus totalizaram quatro categorias, a saber:

- Zona de uso intensivo: áreas que compõem o caminhamento turístico e os locais de paradas interpretativas. Estas áreas podem conter infraestruturas como escadas e outras;
- Zona de recuperação: áreas consideravelmente danificadas e passíveis de recuperação, tanto por processos naturais quanto induzidos. É uma zona provisória que, assim que recuperada, será reclassificada. O objetivo é conter a degradação ou restaurar a área;
- Zona de uso restrito: área preservada, com pequena ou mínima intervenção humana e que contem processos ou elementos significativos do ambiente cavernícola. O uso público só é permitido de forma restrita, com objetivo de pesquisa, monitoramento e espeleologia.
- Área de influência: é a área do entorno da gruta, representada por um raio mínimo de 250 metros medidos dos limites do mapa topográfico da gruta, projetado em planta na região onde se localiza, conforme preconiza a Resolução CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) Nº 347, de 10 de setembro de 2009.

Essa classificação foi pensada especificamente para o caso da gruta do Mateus e teve como base os conceitos e demais classificações de zoneamento ambiental espeleológico contidas em Lobo (2009). O zoneamento ambiental interno da gruta do Mateus é apresentado na Figura 4.

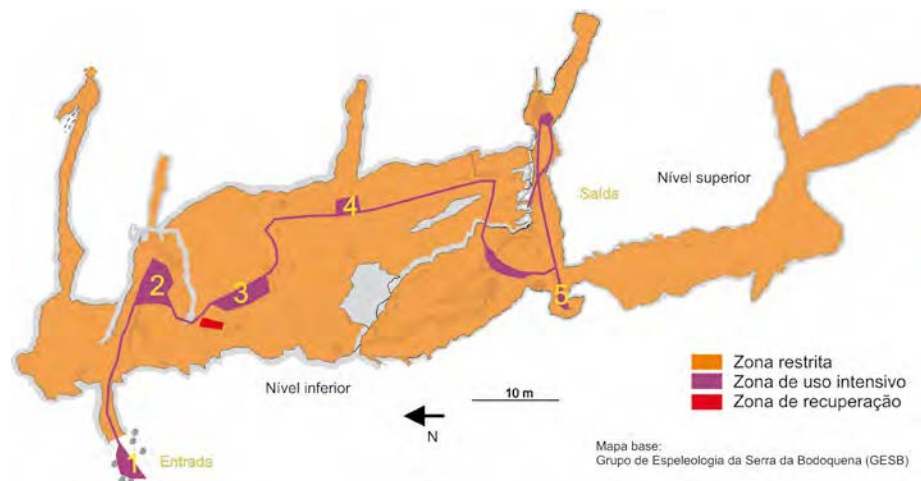


Figura 4. Zoneamento ambiental para o uso turístico e conservação da gruta do Mateus.

A elaboração da capacidade de carga provisória da gruta do Mateus partiu dos cenários projetados pela equipe de uso público. Com base nos diagnósticos ambientais e no diagnóstico de uso público, a limitação do tamanho dos grupos, a princípio, está baseada na limitação espacial detectada em pontos de parada interpretativa dentro da caverna. As paradas interpretativas de número 3 e 4 (Figura 2) são as que possuem as menores áreas disponíveis para abrigar os grupos de visitantes. Considerando que a fragilidade integrada das zonas que compõem essas duas paradas interpretativas foram definidas como de nível médio (Figura 3), e que há recomendação de realizar paradas mais rápidas nestes dois pontos, diferente das paradas de número 2 e 5, recomendou-se a ampliação do tamanho máximo dos grupos para o público de turismo educativo, passando do cenário de 12 pessoas mais o condutor para o cenário de 15 pessoas mais um condutor, ou um condutor, um professor e 14 alunos. Não houve objeções a este cenário após avaliação sob a óptica das fragilidades ambientais nas três temáticas do estudo: meio físico, espeleoclima e bioespeleologia. Essa ampliação ficou condicionada à clara delimitação da área disponível para a dispersão do grupo, principalmente nas paradas interpretativas propostas no zoneamento (Figura 4). Diante das considerações expostas, a capacidade de carga provisória da gruta do Mateus ficou estipulada da forma como apresentado na Tab. 2.

Perfil	Total de visitantes	Total de guias	Dias / horários	Tempo de visitação	Intervalo entre grupos	Grupos/dia	Total de pessoas/dia
Geral	12	1	7h – 17h	30 min.	30 min.	16	208
Escolas	15	1	7h – 17h (dias úteis)	45 min.	25 min.	19	304

Tabela 2. Capacidade de carga provisória da gruta do Mateus.

ASPECTOS CENTRAIS DA GESTÃO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL

O empreendimento gruta do Mateus conta com um Programa de Gestão para nortear seu planejamento e o desenvolvimento do espeleoturismo. Este programa concretiza o conhecimento gerado nos estudos ambientais do PME, e busca o desenvolvimento de uma atividade turística responsável em relação ao meio ambiente e ao visitante. O programa se divide em cinco eixos (gestão organizacional, uso público, educação ambiental, pesquisa e monitoramento e diretriz de infra-estrutura). Cada eixo possui suas linhas de ação, e em cada linha de ação, são descritas quais as atividades necessárias. Com isso, o Programa de Gestão traz uma série de intervenções e ações para o desenvolvimento do empreendimento e da gestão da gruta. No sentido de proporcionar a associação entre sustentabilidade ambiental e econômica, as ações do cronograma de implantação foram organizadas em uma ordem de prioridade e segundo a necessidade de parcerias e investimentos de maior vulto. No cronograma desenhado no PME há prazos de 12, 24, 30 e 36 meses, contados da aprovação do PME (dezembro de 2013) para algumas ações de pesquisa e monitoramento, por exemplo.

Um destaque foi dado para a Educação Ambiental. Durante o planejamento da gestão do empreendimento, na análise da demanda do produto gruta do Mateus e inclusive na análise da capacidade de carga da gruta, foram considerados diversos perfis de visitantes, entendendo que cada perfil tem características peculiares e comportamentos diferentes. Isso se torna ainda mais relevante se considerada a intenção da gestão do empreendimento de facilitar o acesso para escolas públicas do município de Bonito, permitindo atividades de educação ambiental e a difusão do conhecimento do ambiente cavernícola na população local. Também há intenção de realizar parcerias com outras instituições públicas e privadas de ensino, procurando diminuir custos e facilitar o acesso para esse público.

As ações de Educação Ambiental na gruta do Mateus deverão incluir e transcender a educação curricular, apoiando-se em conteúdos das áreas de Biologia, Ecologia, Geologia, Geografia, Química, História, Pedagogia, Ciências Sociais, entre outras áreas do conhecimento, de modo a incentivar a mobilização da comunidade de Bonito para a preservação do patrimônio espeleológico e da natureza. Estas ações deverão estimular a vivência, o contato do visitante com o ambiente natural, sendo tão importante quanto transmitir conceitos.

Tais vivências contribuem para o afloramento de motivações intrínsecas ao ser humano e geram mudanças nos hábitos culturais que, se canalizados corretamente, formarão cidadãos mais conscientes e atuantes na conservação ambiental (Neiman, 2007).

A diretriz de educação ambiental da gruta do Mateus visa criar condições para a participação dos diferentes atores sociais no processo educacional e no entendimento de seus papéis como agentes e cidadãos em busca da melhoria da qualidade de vida individual e coletiva. Sua aplicação pode ser vista também como uma forma de fortalecimento dos aspectos positivos do empreendimento e de mitigação dos impactos negativos causados no ambiente natural, inerentes à atividade humana.

Desse modo, a principal meta a ser perseguida no desenvolvimento dos trabalhos de educação ambiental da gruta do Mateus é o envolvimento direto dos diferentes agentes sociais da cidade de Bonito, tais como, secretaria municipal de educação, guias de turismo, funcionários do empreendimento, professores e coordenadores das escolas do município, ONGs e demais interessados e envolvidos. A integração de parcerias interinstitucionais visa, basicamente, a estruturação de uma rede de instituições que agregue e coopere no planejamento conjunto e na execução de ações educativas e de comunicação. O envolvimento destes diferentes agente sociais deverá ser construído de forma processual através de reuniões e debates, onde sejam tomadas e assumidas decisões conjuntamente. Para tanto, foram propostas as seguintes etapas:

- a) **Mobilização:** O objetivo desta atividade é chamar a atenção dos diferentes agentes sociais de Bonito. Envolve, basicamente, a convocação dos interessados através de visitas, divulgação por convites, cartazes e outros instrumentos de comunicação formais e informais;
- b) **Sensibilização:** O objetivo das ações de sensibilização é aprimorar a mobilização dos agentes sociais, promovendo reuniões, exibições de vídeos e palestras sobre educação ambiental como instrumento de gestão. Nesta fase são apresentados os componentes do Programa de Gestão da gruta e o papel de cada agente social na condução dos trabalhos;
- c) **Qualificação:** Nesta fase, o objetivo principal é a qualificação dos agentes sociais através de cursos e oficinas temáticas, abrangendo diferentes temas pertinentes às atividades do empreendimento, de modo que todos estejam qualificados para atuar na promoção da educação ambiental voltada à conservação do patrimônio espeleológico;
- d) **Prevenção e conscientização:** Os funcionários e guias de turismo serão treinados para que observem as condições ambientais da caverna, de saúde e segurança dos visitantes, de modo a prevenir danos ao patrimônio espeleológico, assim como estar alerta quanto à ocorrência de acidentes e disseminação de doenças na área do empreendimento.

Com isso, encerra-se a exposição dos principais aspectos obtidos na elaboração do PME da gruta do Mateus.

SITUAÇÃO ATUAL DA IMPLANTAÇÃO DO PME

O plano de manejo da gruta do Mateus foi aprovado pelo IMASUL em dezembro de 2013. O proprietário do empreendimento iniciou a execução do plano em janeiro de 2014, com a construção e instalação de corrimãos propostos, adequação de alguns trechos de caminhada do percurso turístico, manutenção da trilha externa da gruta e das suas pontes de acesso, assim como revitalização do receptivo e do museu que o compõe, organização de escalas de guias para conduzir os grupos, dentre outras medidas. Como resultado, a implantação da nova infraestrutura reduziu os impactos do turismo e tornou o empreendimento economicamente viável para o início das operações.

Também foram produzidos materiais publicitários sobre a gruta do Mateus, e feitas parcerias com o *trade* turístico para inserir o produto no mercado turístico do município. Vale lembrar que a gruta do Mateus possui produtos concorrentes no mercado local já consolidados como a gruta do Lago Azul, o Abismo Anhumas e a gruta de São Miguel. Porém, se considerar a gruta e seu entorno (trilha externa estruturada, receptivo já cons-

truído e museu de três andares no receptivo), e se considerar a localização do empreendimento em relação aos seus concorrentes, a gruta do Mateus se torna um produto competitivo. Até o fechamento deste artigo (junho/2014) a gruta estava recebendo uma média de 200 visitantes por mês.

No que tange à capacidade de carga, o IMASUL autorizou uma capacidade de carga menor que a definida no PME, já citada anteriormente, e definiu o limite de 50 pessoas/dia. O proprietário solicitou a ampliação da capacidade de carga junto a esse órgão. Após análise, o IMASUL autorizou capacidade de carga de 135 pessoas por dia, e é esse o limite que a gestão do empreendimento está considerando atualmente (julho/2014). Vale ressaltar que a capacidade de carga definida pelo IMASUL de 50 pessoas por dia limita a recepção de grupos com o perfil de turismo educativo, definida no PME, vez que esse perfil de visitante se desloca em grupos grandes (40 ou mais pessoas). A capacidade de carga de 135 pessoas não influencia atualmente a gestão do empreendimento, entendendo que a atividade turística está em fase inicial e não há demanda ainda para capacidade de carga maior. Porém, caso haja a consolidação desse produto no mercado local, esse limite de visitantes pode influenciar negativamente, se tornando um fator limitador tecnicamente injustificado para o desenvolvimento do produto gruta do Mateus. Assim, ações futuras do empreendedor deverão ser tomadas junto ao IMASUL, para que a capacidade de carga atual possa ser elevada aos limites propostos no PME da gruta – o estudo que, tecnicamente, é o mais adequado para definir questões desta natureza.

AGRADECIMENTOS

A autoria do manuscrito agradece aos empreendedores, Sr. José Wanderlei Engel e sra. Miriam Regina Klock Engel, proprietários do atrativo turístico Gruta São Mateus, por acreditar no espeleoturismo como forma de sustentabilidade ambiental e econômica, bem como pelo apoio local durante a realização do Plano de Manejo Espeleológico. Agradecemos também: à espeleóloga Bruna M. Cordeiro (GESB), pelo apoio na confecção do mapa da caverna, à bióloga Ana Paula de Azevedo, pelo auxílio na triagem e pré-identificação de invertebrados, e aos taxonomistas Dr. Antonio Brescovit, Dr. Ricardo Pinto-da-Rocha, Dr. Amazonas Chagas Junior, Me. Alan Fred Erickson, Me. Alessandro Marques de Oliveira e Me. João Paulo Barbosa, pela identificação de espécimes da fauna cavernícola.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. 1984. Província Tocantins, Setor Sudoeste. En: Almeida, F.F.M. y Hasui, Y. (Eds.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. Edgard Blücher, São Paulo, 265-281.
- Boggiani, P. C., Fairchild, T.R. y Coimbra, A.M. 1993. O Grupo Corumbá (Neoproterozóico – Cambriano) na região central da Serra da Bodoquena (Faixa Paraguai), *Mato Grosso do Sul*, 23 (3), 301-305.
- Boggiani, P. C. 1998. Análise estratigráfica da Bacia Corumbá (Neoproterozóico) – Mato Grosso do Sul. *Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo*, São Paulo.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2004. Resolução CONAMA nº 347 de 10 de setembro de 2004. *Diário Oficial da União*, 176 (1), 54-55.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4 (1). http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- IMASUL – Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. 2012. *Termo de referência para o plano de manejo espeleológico (PME) de cavidades subterrâneas com atividades turísticas*. 7/7/2014, <http://www.imasul.ms.gov.br/control/ShowFile.php?id=110253>
- Lobo, H. A. S. 2007. Método para avaliação do potencial espeleoturístico do Parque Nacional da Serra da Bodoquena, MS. *Caderno Virtual de Turismo*, 7 (3), 99-110.
- Lobo, H. A. S. 2008. Capacidade de carga real (CCR) da caverna de Santana, PETAR-SP e indicações para o seu manejo turístico. *Geociências*, 27 (3), 369-385.

- Lobo, H. A. S. 2009. Zoneamento ambiental espeleológico (ZAE): aproximação teórica e delimitação metodológica. *Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas*, 2 (2), 113-129.
- Lobo, H. A. S., Lourenção, M.L.F. y Camargo, R. R. 2008. Aplicação do Método de multipotencialidade espeleoturística em atrativos e recursos naturais na Serra da Bodoquena, em Mato Grosso do Sul. V *Seminário da Associação Nacional de Pesquisa e Pós Graduação em Turismo*. Belo Horizonte, 1-15.
- Lobo, H. A. S., Trajano, E., Marinho, M. A., Bichuette, M. E., Scaleante, J. A. B., Scaleante, O. A. F., Rocha, B. N. y Laterza, F. V. 2013. Projection of tourist scenarios onto fragility maps: framework for determination of provisional tourist carrying capacity in a Brazilian show cave. *Tourism Management*, 35, 234-243.
- Neiman, Z., 2007. A educação ambiental através do contato dirigido com a natureza. *Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo*. 239 p.
- Palmer, A. N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1-21.
- Sallum Filho, W. 2005. Geomorfologia e geoespeleologia do carste da Serra da Bodoquena, MS. *Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo*, São Paulo, 195 p.
- Sallun Filho, W., Karmann, I. y Lobo, H. A. S. 2010. Cavernas da Serra da Bodoquena. *O Carste*, 22 (2), 27-33.
- SEMACE – Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Planejamento, Ciência e Tecnologia. 2010. *Resolução SEMACE nº24/2010*. 8/7/2014, http://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-24-2010-ms_138875.html
- SBE – Sociedade Brasileira de Espeleologia. *Cadastro nacional de cavernas do Brasil (CNC)*. 4/6/2014, <http://www.sbe.com.br>
- Vargas, I.A. 2001. A gênese do turismo em Bonito. In: Banducci Júnior, Á. y Moretti, E.C. (orgs.). *Qual paraíso? Turismo e ambiente em Bonito e no Pantanal*. Chronos/UFMS, São Paulo, 127-149.

La aplicación para dispositivos móviles de los Lugares de Interés Hidrogeológico de la provincia de Alicante. Un recurso turístico de última generación

Raquel Morales-García⁽¹⁾, José Antonio Domínguez-Sánchez⁽²⁾, Leticia Vega-Martín⁽¹⁾ y Juan José Durán-Valsero⁽¹⁾

(1) 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)

(2) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Cirilo Amorós 42. Entlo. 1ª. 46004 Valencia (ja.domingez@igme.es)

RESUMEN

El proyecto de Patrimonio Hidrogeológico de la provincia de Alicante, llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España y el Departamento de Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante durante los años 2013 y 2014, nace con la finalidad de identificar los lugares y elementos hidrogeológicos de mayor valor de la provincia, para promover su conservación y potenciar su uso y disfrute sostenibles. Entre los objetivos del proyecto destaca la divulgación y puesta en valor de estos elementos, para lo cual se han diseñado diez rutas e itinerarios que recorren los cuarenta Lugares de Interés Hidrogeológico (LIHs) que integran el Patrimonio Hidrogeológico Natural de la provincia de Alicante. Entre estos elementos de interés se encuentran las tres cuevas turísticas alicantinas de las Calaveras (Benidoleig), del Rull (Vall d'Ebo) y de Canelobre (Busot), de gran atractivo geológico. Las dos primeras se localizan en el recorrido de la ruta 2 "Entre cuevas y barrancos" y la tercera se incluye en la ruta 7 "Malas tierras". Las diez rutas se describen de forma detallada en una interesante guía en formato impreso. Esta guía editada se encuentra vinculada mediante códigos QR a una *app* o aplicación para dispositivos móviles (*smartphones* y *tablets*), lo cual permite el recorrido de las rutas mediante posicionamiento GPS. De esta manera se consigue facilitar el acceso a la información al mayor número de usuarios posible, al tiempo que se incorporan las modernas y actuales tecnologías de información y comunicación como recurso turístico de primer orden, aplicable a las cuevas turísticas.

Palabras clave: Alicante, *Apps*, cuevas turísticas, divulgación, patrimonio hidrogeológico.

Mobile App for the Hydrogeological Interest Sites in the province of Alicante. A new generation of tourist resources

ABSTRACT

The project of Hydrogeological Heritage of the province of Alicante was carried out by the Geological Survey of Spain (IGME) and the Water Cycle Department of the Diputación Provincial de Alicante during the years 2013 and 2014. The focus of this project is to identify the geosites and hydrogeological elements (LIHs) of greater value in the province and, also, to promote conservation and sustainable use. The objectives of the project include the outreach and valuation of these LIHs, for which have been designed ten routes that run through forty LIHs representatives of the Natural Hydrogeological Heritage of the Alicante province. These LIHs include three show caves: Las Calaveras Cave (Benidoleig), Rull Cave (Vall d'Ebo) and Canelobre Cave (Busot). The first two are located in the path of the route 2 "Between Caves and Ravines" and the third is included in the route 7 "Bad Lands". Ten routes

are described in an interesting guide in printed format. This edited guide is linked with QR codes to an App, or application for mobile devices (smartphones and tablets), which allows travel routes through GPS positioning. In this way gets access to information to the largest possible number of users, and incorporates current and modern technologies of information and communication as a first order touristic resource, including show caves.

Keywords: Alicante, Apps, hydrogeological heritage, outreach, show caves.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de la información y comunicación constituyen una fuente imprescindible de recursos que, puestos a disposición de gestores y consumidores, promueven la interacción constante y bidireccional entre los diferentes ámbitos de la sociedad. Entre las herramientas informáticas existentes en la actualidad, destacan, por su eficaz poder de divulgación, las Apps o aplicaciones para dispositivos móviles (*smartphones* y *tablets*).

Un ámbito donde las potencialidades de estas tecnologías son muy elevadas es el de la divulgación del patrimonio natural y cultural. En los últimos decenios, los estudios e inventarios de patrimonio geológico en general se han visto incrementados notablemente en España. De igual manera, más recientemente, el patrimonio hidrogeológico ha ido tomándose progresivamente en consideración en algunos ámbitos territoriales, como por ejemplo, en Andalucía, con un inventario publicado de Lugares de Interés Hidrogeológico (Durán *et al.*, 2008), Baleares o la provincia de Alicante, en la Comunidad Valenciana.

El patrimonio hidrogeológico y las cuevas turísticas como elementos integrantes de este patrimonio, constituyen un activo socioeconómico de primer orden, por lo que es preciso promover su difusión de la forma más efectiva posible.

ANTECEDENTES

En el ámbito del Convenio-Marco de Asistencia Técnica suscrito entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Diputación Provincial de Alicante desde 1988, se firma en octubre de 2010 el “Acuerdo Específico de Cooperación 2010-2013 en materia de aguas subterráneas” dentro del cual se incluye el desarrollo del proyecto titulado “Patrimonio hidrogeológico en la provincia de Alicante”.

El patrimonio geológico está formado por elementos geológicos que presentan una especial singularidad debido, fundamentalmente, a su interés científico y/o didáctico. El patrimonio geológico forma parte del patrimonio natural e incluye formas, elementos y/o estructuras originadas por cualquier proceso geológico. Está formado por todos aquellos enclaves relevantes para cualquier disciplina de la geología, como la geomorfología, estratigrafía, tectónica, petrología, mineralogía, paleontología, hidrogeología, geología ambiental, etc. Por ello, es frecuente que se realicen estudios temáticos, utilizándose términos como patrimonio mineralógico, geomorfológico, paleontológico o, como es el caso que nos ocupa, el patrimonio hidrogeológico.

Las primeras citas bibliográficas referidas al estudio del patrimonio geológico en nuestro país datan de finales de la década de 1970, siempre ligadas a proyectos de investigación del IGME. Se puede considerar que los estudios de patrimonio geológico como tal empiezan en España en 1978, cuando el IGME pone en marcha el “Inventario Nacional de Puntos de Interés Geológico”, más conocido hoy en día por sus siglas: PIG. El resultado de estos trabajos y otros estudios posteriores en la provincia de Alicante, dan lugar a un total de 22 Puntos de Interés Geológico, de los cuales siete presentan interés hidrogeológico (Barranco de la Encantada, Lenar de Vall d’Ebo, Cueva de las Calaveras, Curso alto del río Guadalest, Nacimiento del río Algar, Cueva de Canelobre y Curso y bandlands del río Blanco) y entre los cuales figuran ya dos de las tres cuevas turísticas de Alicante. Por su parte, el Departamento de Ciclo Hídrico de la Diputación Provincial de Alicante ha desempeñado un papel protagonista en la difusión de la riqueza hídrica provincial, dando lugar a notables publicaciones que recogen elementos de gran valor patrimonial.

OBJETIVOS

Dada la riqueza y variedad del patrimonio geológico e hidrogeológico de la provincia, el objetivo que se plantea en este trabajo es el inventario y caracterización de los Lugares de Interés Hidrogeológico (LIHs) de cara a su conservación y uso sostenible. Para que ello sea posible, el objetivo final de este estudio tiene que conllevar necesariamente la divulgación y puesta en valor de este patrimonio hidrogeológico natural.

Con este fin, después de la identificación, la valoración homogénea del interés de los LIHs y la estimación de su prioridad de protección, se han diseñado las 10 rutas que recorren la práctica totalidad de la geografía alicantina. Ahora bien, para lograr que la divulgación de las rutas sea efectiva y tenga la máxima difusión posible, la información ha de presentarse de forma adecuada y atractiva, al tiempo que se han de abordar técnicas de comunicación modernas y actuales. Así, como resultado de este estudio se derivan dos productos: una guía de rutas tradicional en formato impreso y una *app* o aplicación para dispositivos móviles que permitirá el recorrido de las rutas de la guía mediante posicionamiento GPS, estando ambos productos vinculados a través de códigos QR impresos en la guía.

METODOLOGÍA

La metodología aplicada para la identificación y valoración de los Lugares de Interés Hidrogeológico de Alicante se basa en la desarrollada por el Área de Investigación en Patrimonio Geológico y Minero del IGME para la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (García-Cortés y Carcavilla, 2009) previsto en la Ley 42/2007 del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, que actualiza la hasta ahora existente en este Organismo para el Inventario Nacional de Puntos de Interés Geológico. Se trata de una adaptación de esta metodología a nivel provincial y únicamente para identificar y valorar puntos de interés en el ámbito hidrogeológico.

En síntesis, la metodología plantea una primera fase de consulta a expertos que proporcionan un listado de lugares de interés que serán objeto de un estudio in campo y gabinete para su posterior valoración cuantitativa, de acuerdo con unos parámetros de valor intrínseco ligados a su potencialidad didáctica y turístico-recreativa. De esta forma se obtendrán los Lugares de Interés Hidrogeológico (LIHs) agrupados y ordenados en tres colecciones según su interés científico, didáctico y turístico-recreativo. A continuación se evalúa su susceptibilidad a la degradación y, a partir de ésta y de la valoración previa de sus grados de interés, se deducen las prioridades de protección.

LOS LUGARES DE INTERÉS HIDROGEOLÓGICO: IDENTIFICACIÓN, VALORACIÓN Y DIVULGACIÓN

Para llevar a cabo el inventario de LIHs, en primer lugar es necesario definir qué tipo de lugares y elementos se han de incluir. Los lugares y elementos de interés hidrogeológico (LIH) que en conjunto configuran el Patrimonio Hidrogeológico Natural de la provincia de Alicante se han agrupado en las siguientes tipologías, siguiendo un esquema conceptual que pretende reproducir los principales elementos de la fase subterránea del ciclo hídrico:

- ZONAS DE INFILTRACIÓN:
 - Áreas de recarga preferente en acuíferos
 - Tramos de río perdedor
 - Campos de lapiares (morfológicas exokársticas)
 - Dolinas, poljes, y colapsos kársticos (morfológicas exokársticas)
 - Barrancos kársticos (morfológicas exokársticas)
 - Cavidades kársticas: cuevas, simas (*avenes*) y ríos subterráneos (morfológicas endokársticas)
- ZONAS DE DESCARGA:
 - Humedales, zonas encharcadas (albuferas, marjales) y lagunas
 - Tramos de río ganador y surgencias de flujo difuso
 - Nacimiento de ríos y manantiales notables

- Surgencias y sumideros submarinos
- Manantiales de aguas minerales y/o termales

• ACUÍFEROS Y OTROS

La puesta en común de los lugares propuestos por los expertos en cada una de las tipologías definidas, ha dado como resultado la identificación de 102 Lugares de Interés Hidrogeológico Natural, de los cuales finalmente han sido seleccionados 40 LIHs que se considera que conforman el Inventario de LIHs (Figura 1). Siguiendo la metodología, se procede a su valoración homogénea y se obtiene la puntuación del interés científico, didáctico, turístico y total de cada uno. La tabla 1, que ordena los LIHs de mayor a menor puntuación según el interés total, nos proporciona un sistema de medida relativo de la importancia de los 40 LIHs estudiados. También se muestra la puntuación obtenida en cada tipo de interés y se resaltan en rosa los que caen en un rango de interés muy alto, en amarillo los de interés alto y en verde los de interés medio. Destaca en esta valoración la cueva de las Calaveras como el elemento de mayor interés total de la provincia, con un interés científico, didáctico y turístico muy alto.

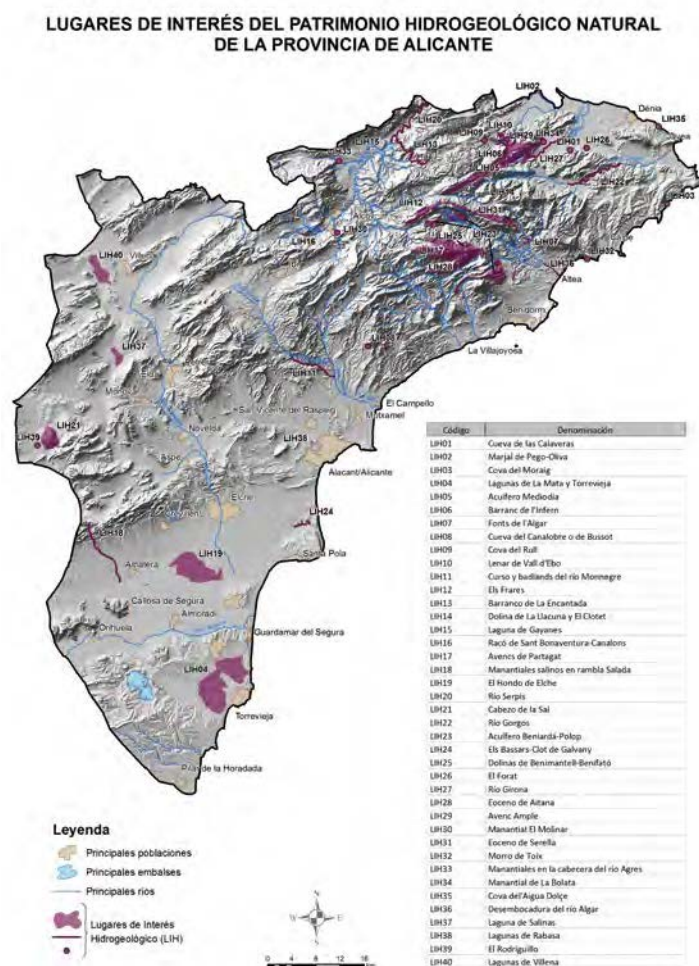


Figura 1. Situación de los Lugares de Interés del Patrimonio Hidrogeológico Natural seleccionados.

Código	Denominación	Interés Científico	Interés Didáctico	Interés Turístico	Interés Total
LIH01	Cueva de las Calaveras	275	275	280	830
LIH02	Marjal de Pego-Oliva	265	305	260	830
LIH03	Cova del Moraig	265	260	210	735
LIH04	Lagunas de La Mata y Torrevieja	170	275	260	705
LIH05	Acuífero Mediodía	200	240	265	705
LIH06	Barranc de l'Infern	220	220	250	690
LIH07	Fonts de l'Algar	210	230	220	660
LIH08	Cueva del Canalobre o de Busot	185	250	215	650
LIH09	Cova del Rull	160	245	240	645
LIH10	Lenar de Vall d'Ebo	250	195	190	635
LIH11	Curso y badlands del río Monnegre	215	235	165	615
LIH12	Els Frares	280	195	130	605
LIH13	Barranco de La Encantada	145	210	240	595
LIH14	Dolina de La Llacuna y El Clotet	220	195	170	585
LIH15	Laguna de Gayanes	170	195	215	580
LIH16	Racó de Sant Bonaventura-Canalons	115	225	240	580
LIH17	Avencs de Partagat	230	180	155	565
LIH18	Manantiales salinos en rambla Salada	170	220	175	565
LIH19	El Hondo de Elche	145	220	195	560
LIH20	Río Serpis	155	210	190	555
LIH21	Cabezo de la Sal	200	155	180	535
LIH22	Río Gorgos	195	205	130	530
LIH23	Acuífero Beniardá-Polop	140	205	185	530
LIH24	Els Bassars-Clot de Galvany	130	210	170	510
LIH25	Dolinas de Benimantell-Benifató	160	185	150	495
LIH26	El Forat	170	175	140	485
LIH27	Río Girona	145	195	145	485
LIH28	Eoceno de Aitana	190	170	110	470
LIH29	Avenc Ample	155	175	135	465
LIH30	Manantial El Molinar	120	180	165	465
LIH31	Eoceno de Serella	190	170	90	450
LIH32	Morro de Toix	205	140	95	440
LIH33	Manantiales en la cabecera del río Agres	105	175	150	430
LIH34	Manantial de La Bolata	135	135	125	395
LIH35	Cova del'Aigua Dolçe	115	140	100	355
LIH36	Desembocadura del río Algar	80	135	120	335
LIH37	Laguna de Salinas	65	115	140	320

Tabla 1. Lugares de Interés del Patrimonio Hidrogeológico Natural ordenados por su interés total.

Para la divulgación y puesta en valor de los LIHs se han diseñado 10 rutas que recogen los 40 puntos que constituyen el Inventario de LIHs Naturales de la provincia. Las rutas, cuya situación puede verse en la Figura 2, recorren la práctica totalidad de la geografía alicantina y se han denominado:

- Ruta 1: Cascadas y remansos
- Ruta 2: Entre cuevas y barrancos
- Ruta 3: Cuevas frente al mar
- Ruta 4: Del cielo al mar
- Ruta 5: Gigantes de piedra
- Ruta 6: Simas y dolinas
- Ruta 7: Malas tierras
- Ruta 8: Salinas y lagunas
- Ruta 9: La montaña de sal
- Ruta 10: Buscando manantiales

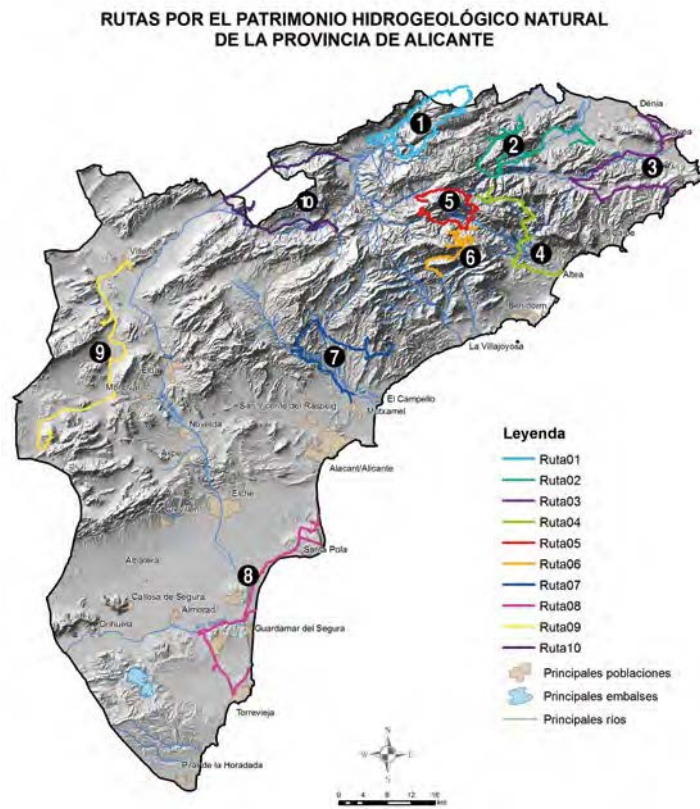


Figura 2. Rutas por el Patrimonio Hidrogeológico de Alicante.

LA GUÍA IMPRESA DE RUTAS Y LA APP: DIVULGACIÓN EFICAZ

Para lograr que la divulgación y puesta en valor de los 40 LIHs que integran el Patrimonio Hidrogeológico Natural de la provincia de Alicante sea efectiva y tenga la máxima difusión posible, la información de las 10 rutas propuestas ha de presentarse de forma clara, atractiva y bien estructurada, al tiempo que se han de incorporar técnicas de comunicación más modernas y actuales. Para ello se han diseñado dos productos interconectados: la guía de rutas en formato impreso y una aplicación para dispositivos móviles.

La guía impresa, un producto tradicional al servicio de las nuevas tecnologías

La guía de rutas, en formato impreso, incluye la descripción detallada de cada ruta con un amplio reportaje fotográfico, mapas topográficos detallados desplegados y un texto explicativo de los Lugares de Interés Hidrogeológico más destacados de cada ruta con su correspondiente esquema de funcionamiento hidrogeológico en 3D.

En síntesis, la guía se estructura en dos apartados:

Primera parte: Patrimonio Hidrogeológico de la provincia de Alicante. Contiene los aspectos técnicos que han dado lugar a la guía, como son la metodología empleada en la valoración del interés de los LIHs, así como los resultados y valores obtenidos para el conjunto provincial.

Segunda parte: Rutas y Lugares de Interés Hidrogeológico destacados. En este apartado se presentan las 10 rutas. Cada una comienza con una presentación general del itinerario donde se indica cuál es el eje vertebrador de la ruta, la dificultad que presenta y cuál es su interés didáctico, científico, recreativo y paisajístico. A continuación muestra algunos datos técnicos (como distancias o tipo de vehículo adecuado) y un croquis del trazado de la ruta acompañado de un índice de los Lugares de Interés Hidrogeológico destacados (los que se describen al final de la ruta), otros Lugares de Interés Hidrogeológico que se pueden visitar, así como distintos sitios de interés (fundamentalmente infraestructuras hidráulicas) que se recorren en la ruta. Seguidamente se presenta el mapa y la descripción detallada de la ruta, ilustrada con las fotografías más emblemáticas. Al final de la ruta se describen Lugares de Interés Hidrogeológico destacados y, si existen, se detallan las microrrutinas, es decir los pequeños recorridos a pie que puedan ser interesantes de realizar.

La app para móviles, el complemento adecuado

Para mejorar el contenido cartográfico de las rutas, aspecto más limitado en una publicación tradicional impresa en papel, se ha desarrollado una *app* o aplicación para dispositivos móviles (*Smartphone* y *tablets*) en los sistemas Android e IOS, que cubren prácticamente la totalidad de los usuarios.

La idea de hacer una *app* para fomentar la divulgación de las rutas hidrogeológicas propuestas se basa en la potencialidad que tienen estas aplicaciones para mejorar el contenido gráfico y, particularmente, el contenido cartográfico que sustenta las rutas. Además, tiene la posibilidad de incorporar material audiovisual, de manera que el usuario podrá integrar toda la información de la guía de papel y del móvil para poder interpretar correctamente lo que está viendo sobre el terreno.

La aplicación desarrollada, descargable a través de internet, permite al usuario la navegación por las rutas mediante posicionamiento GPS, la visualización de mapas superpuestos con zonas interactivas en los mismos y la animación de los gráficos y Figuras. Asimismo contiene un lector de códigos QR para su relación con la guía editada en papel.

La relación guía-app: los códigos QR

Si bien la guía y la *app* inicialmente se conciben como dos productos separados y pueden utilizarse de forma independiente, la guía editable está vinculada a la aplicación mediante códigos QR, según el diseño que se muestra en la Figura 3. De esta manera se consigue facilitar el acceso a la información al mayor número de

usuarios posible, al tiempo que se complementan los valores tradicionales con las novedosas tecnologías de la comunicación.

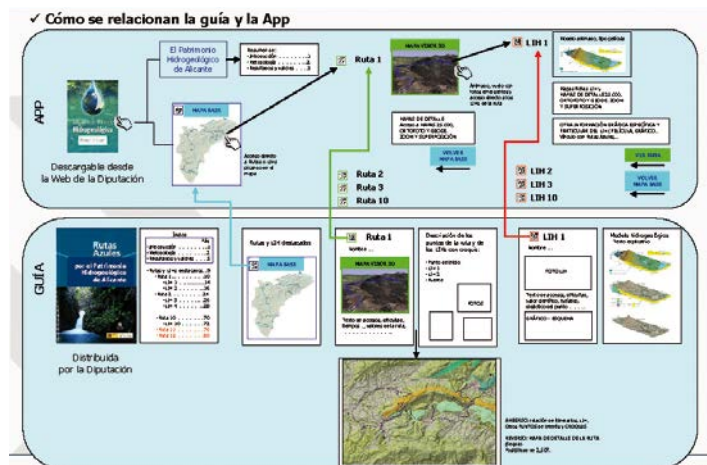


Figura 3. Relación de la guía de rutas impresa y la aplicación para dispositivos móviles.

LAS TRES CUEVAS TURÍSTICAS EN LA GUÍA Y EN LA APP

De acuerdo con la metodología de valoración del interés de los LIHs, las cuevas turísticas alicantinas presentan gran interés, especialmente turístico. La cueva de las Calaveras es el LIH mejor valorado de los 40 identificados en la provincia, ocupando las cuevas del Canelobre y del Rull los puestos octavo y noveno respectivamente (Tabla 1).

Respecto a la susceptibilidad a la degradación, los resultados indican que es la cueva de las Calaveras la más susceptible a la degradación de las tres, ocupando el quinto lugar respecto al total del conjunto de LIHs. Las cuevas del Rull y de Canelobre ocupan los puestos 12 y 15 respectivamente.

La prioridad de protección según los valores calculados en las tres cuevas es alta. El orden de actuación establecido para plantear medidas de protección adecuadas es la cueva de las Calaveras el tercer puesto, la cueva del Rull en octavo puesto y la del Canelobre en décimo lugar.

Respecto a su localización, las cuevas de las Calaveras (Benidoleig) y del Rull (Vall d'Ebo) se localizan en el recorrido de la ruta 2 "Entre Cuevas y Barrancos" (Figura 4), mientras que la Cueva de Canelobre (Busot) se incluye en el recorrido de la ruta 7 "Malas Tierras" (Figura 5).

Además, la cueva de las Calaveras constituye un LIH destacado dentro de la ruta 2 por lo que al final de la misma, se le dedica un amplio apartado. Se presentan algunas singularidades de la cueva, cómo y porqué se formó, la calidad de sus aguas y la historia y leyendas asociadas a la misma. También se incluye un esquema de funcionamiento hidrogeológico (Figura 6) que, en la aplicación, consta de tres bloques que se presentan de forma animada, pasando secuencialmente de la topografía, al modelo geológico y al modelo hidrogeológico.

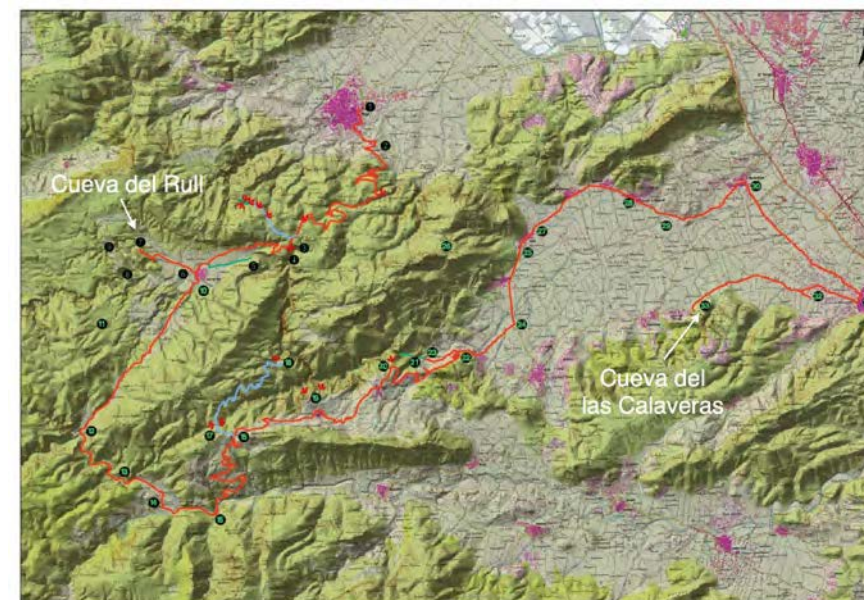


Figura 4. Mapa topográfico con el itinerario de la ruta 2, donde se visitan las cuevas de las Calaveras (33) y del Rull (7).

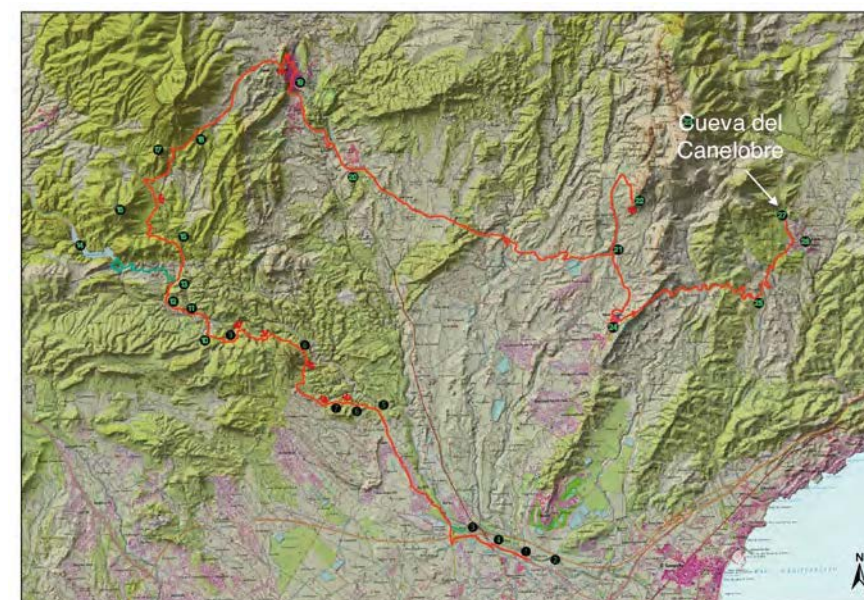


Figura 5. Mapa topográfico con el itinerario de la ruta 7, donde se visita la cueva del Canelobre (22).

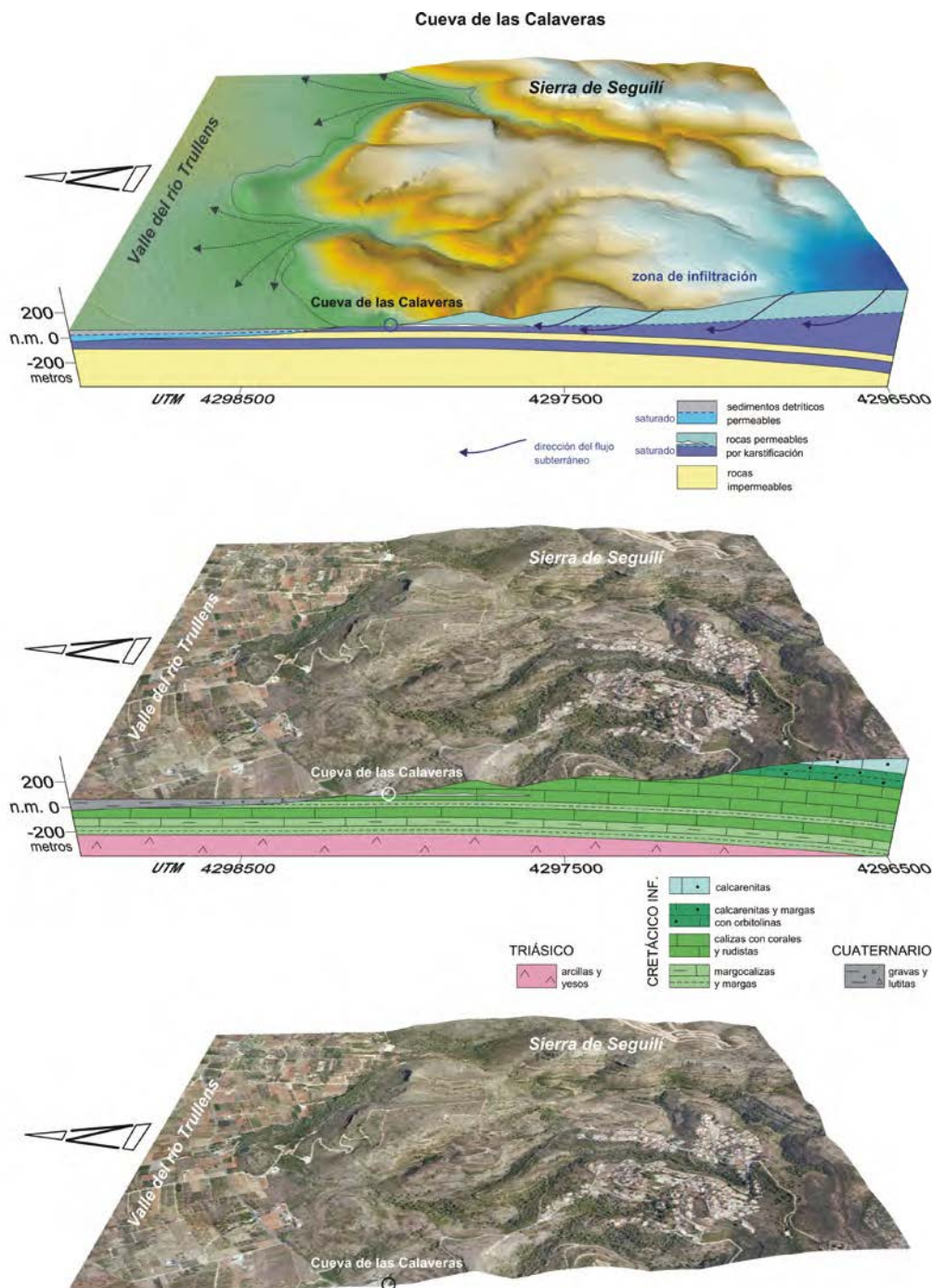


Figura 6. Esquema gráfico conceptual de funcionamiento hidrogeológico 3D en la cueva de las Calaveras.

CONCLUSIONES

Las modernas aplicaciones *apps* para dispositivos móviles pueden ser un complemento ideal para la divulgación de la información científica y, en particular, para la divulgación del Patrimonio Hidrogeológico y de las cuevas turísticas.

La combinación de los productos tradicionales (guía impresa en papel) con las técnicas más modernas (*apps* y códigos QR), permite conseguir nuevas realidades de comunicación, al tiempo que se incrementa el acceso a la información a un mayor número de usuarios.

La aplicación para dispositivos móviles desarrollada permite incorporar y mejorar el contenido gráfico y, particularmente, el contenido cartográfico de las rutas que recorren los LIHs alicantinos, lo cual contribuye a una mayor difusión del Patrimonio Hidrogeológico y a su puesta en valor.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al personal del departamento de Ciclo Hídrico de la Diputación provincial de Alicante su participación y seguimiento del proyecto *Patrimonio Hidrogeológico en la provincia de Alicante*, llevado a cabo en convenio de colaboración con el Instituto Geológico y Minero de España. Y a Cardinalia Factoría de Contenidos S.L. su interés en el desarrollo de la aplicación para dispositivos móviles.

REFERENCIAS

- Cabero, J. 2005. Cibersociedad y juventud: la cara oculta (buena) de la Luna, en AGUIAR, M. V. y FARRAY, J.I. 2005: *Un nuevo sujeto para la sociedad de la información*. A Coruña, Netbjblo, 13-42. <http://tecnologiaedu.us.es/bibliovir/pdf/ciberjuve.pdf>
- Durán, J. J., Robledo, P. A. y de la Hera, A. (Coords.) (2008). Lugares de interés hidrogeológico de Andalucía. *Instituto Geológico y Minero de España-Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía*. (CR-Rom).
- García-Cortés, A. y Carcavilla, L. 2009. Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). *Instituto Geológico y Minero de España*. 61 pp. <http://www.igme.es/internet/patrimonio>.



2 GESTIÓN Y CONSERVACIÓN

Modelización tridimensional con láser escáner en el complejo El Soplao

Rubén Pérez-Álvarez, Gema Fernández-Maroto y Julio-Manuel de Luis-Ruiz

Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía. Bulevar Ronda Rufino Peón, 254. 39316 Torrelavega-Cantabria (ruben.perez@unican.es; gema.fernandez@unican.es; julio.luis@unican.es)

RESUMEN

La solución de un gran número de problemas prácticos, que existen en muchas áreas de la actividad humana, pasa por realizar medidas topográficas que permiten crear modelos del mundo real, a partir de los cuales es posible conseguir un cierto conocimiento sobre los objetos que son medidos y plantear la mejor solución posible para el problema suscitado. Para realizar las medidas es importante adquirir la información de forma rápida, precisa y con costes mínimos, lo que justifica la búsqueda constante de nuevas técnicas, que permitan la medida directa y continua de forma tridimensional. Así, en los últimos años de la década de los 90, se empezó a desarrollar una técnica denominada exploración con láser escáner terrestre. La aparición de estas tecnologías altera sustancialmente los métodos de trabajo y, por tanto, los resultados, siendo éstos notablemente más satisfactorios. El láser escáner modifica la concepción de levantamiento tridimensional, al obtener mediante barrido láser miles de puntos en un corto espacio de tiempo con excelentes precisiones. En base a un escaneado tridimensional de los objetos existentes en el terreno, los productos derivados de la toma de datos son múltiples, mostrando precisiones en la posición relativa de los puntos de entre 5 y 10 milímetros, a una distancia menor de 100 metros, dependiendo de la densidad de escaneado y distancia al objeto. La aplicación de esta nueva tecnología se presenta como la mejor alternativa para cubrir las expectativas de rapidez y comodidad en la captura de observables que permitan el desarrollo de bases de datos, realmente fieles, y que posibiliten conservar en formato digital la información suficiente para el mantenimiento e incluso la reconstrucción del objeto tomado. En la presente comunicación se describen los trabajos realizados en este sentido en el complejo minero en el que se ubica la Cueva El Soplao (Cantabria-España).

Palabras Clave: El Soplao, Láser Escáner, Modelización Tridimensional.

Laser scanner 3D modelling of El Soplao complex

ABSTRACT

The solutions for many practical problems that can be found in many areas of human activity require the development of topographical measurements that allow generating models of the real world. These models provide certain knowledge about the objects which are measured, in order to purpose the best solution for the problem considered. It is important to acquire the information in a fast, accurate and non-expensive way, what justifies a constant research for new techniques that provide a direct and continuous 3D measure. Hence, during the late 90s the development of a technique called terrestrial laser scanner began. The emergence of these technologies substantially alters work methods and therefore the results, which are remarkably satisfactory. Laser scanner modifies the conception of 3D survey, as it captures thousands of points per second with excellent accuracies. On a basis of a 3D scan of the objects that exist on the terrain, outputs obtained from the data acquisition are numerous, showing relative accuracies for the points that range between 5 and 10 mm, depending on the density of the scan and the distance to the object. The application of this new technology is shown as the best alternative in order to meet speed and comfort expectations in the capture of observables that allow developing reliable data-bases to

apply in the maintenance and reconstruction of the object observed. The works conducted in the mining complex where Cave El Soplao is located (Cantabria-España), are described in this communication.

Keywords: El Soplao, laser scanner, 3D-modelling.

ANTECEDENTES, EL GRUPO MINERO LA FLORIDA

Los trabajos descritos en la presente comunicación han sido desarrollados en El Grupo Minero La Florida que se encuentra en el borde oeste de Cantabria, próximo a la frontera con Asturias. Las labores se distribuyen en los municipios de Rionansa, Valdáliga y Herrerías (Figura 1), situándose la mayoría de las explotaciones en la denominada Corona de Arnero, comprendida entre la Sierra de Arnero y el Escudo de Cabuérniga.



Figura 1. Situación de los municipios de Rionansa, Herrerías y Valdáliga.

Las actividades mineras desarrolladas en dicho complejo tuvieron como consecuencia el descubrimiento en 1908 de la Cueva El Soplao (Figura 2), mundialmente conocida además de por los múltiples hallazgos científicos que ha propiciado, por la profusión de espeleotemas, especialmente relevantes son las formaciones excéntricas. Desde hace ya algunos años, se ha atribuido la generación y desarrollo de las excéntricas a fenómenos de capilaridad, que podrían explicar la génesis de las múltiples morfologías asociadas a este tipo de depósitos. En El Soplao existen numerosos ejemplos de estas morfologías, destacando las ubicadas en la Galería de la Ópera, comúnmente considerada “Capilla Sixtina de la Geología”, en la que se pueden observar excéntricas en sierra, vara, mariposa, concha, cinta, rotativa ascendente, en cuerno de ciervo, o de tipo tornado (Robledo y Durán, 2009). El Soplao comprende unos 19,8 km de galerías exploradas, localizados en un paquete de carbonatos marinos del Aptiense (Cretácico Inferior).



Figura 2. Vista parcial de las instalaciones de El Soplao.

Los primeros testimonios históricos documentados relacionados con las Minas del Grupo La Florida, datan de los comienzos de la segunda mitad del S. XIX. En 1857, la reina Isabel II otorga la concesión “Isidra” a la recién constituida “Compañía de Minas y Fundiciones de la Provincia de Santander” (Cueto Alonso, 2008). Con anterioridad a 1930 la explotación se dividía en tres sectores: el occidental (La Cuerre: “Tres Amigos”, “Elvira”), el central (La Florida: “Isidra”, “Isidora”, “Josefita”, “Primera” y “Clara”), y el oriental (Grupo de Minas de Cuévanos, carente de explotación regular). Una descripción del yacimiento de dicha época (Mazarrasa, 1930), señala la presencia de calamina roja de gran riqueza (40-45% de Zinc) desde la superficie hasta unos 160 m de profundidad (ubicación de la Cueva El Soplao), y de sulfuros por debajo de dicho nivel (20-25% Zn, 8% de Pb y 6-8% Fe). La producción anual aproximada era de 650 t de calamina y 600 t de blenda, quedando constatada ya la importancia del aprovechamiento de dicha mena sulfurada, que con posterioridad y junto a la galena serían objeto exclusivo de beneficio. El total de obreros adscritos al Grupo era de 100 mineros en interior y 50 empleados en exterior.

A partir de 1948 acontece una época de gran desarrollo en el Grupo Minero de La Florida, estando en actividad de Este a Oeste: Cuévanos (donde las labores de investigación cortaron mineralizaciones de entidad insuficiente para justificar posteriores labores), Ligorias, La Clara, Cereceo, Plaza del Monte, La Isidra y La Cuerre. Este periodo viene ligado a la aplicación de nuevas estrategias extractivas y a un mayor grado de mecanización, que contribuyeron a situar la producción media anual de los últimos 20 años de explotación en el entorno de las 75.000 t, con riquezas medias en Zinc y Plomo de 4,5% y 0,6% respectivamente (Colina et al., 2003). En 1979 se abandonaron los trabajos, si bien durante un tiempo determinado se continuaron las labores de mantenimiento.

El 27 de Marzo de 2012 se firmó el convenio en el que se sentaron las bases sobre las que se cimentaron los trabajos para obtener “Un modelo tridimensional de la zona de galerías mineras existentes en el entorno de la Cueva El Soplao”, al amparo de otros firmados previamente y que pretendían establecer la colaboración en materia de investigación, desarrollo e innovación de la Universidad de Cantabria con la empresa pública El Soplao, S.L.

OBJETIVOS DE LA MODELIZACIÓN TRIDIMENSIONAL

Los objetivos de este trabajo consisten en la generación de un modelo 3D de aquellas galerías del Grupo Minero La Florida que son susceptibles de un potencial aprovechamiento a través de su puesta en valor para su uso turístico, así como las salidas gráficas derivadas del mismo.

De esta forma, se han obtenido las nubes de puntos constituyentes de dicho modelo, que pueden considerarse además un producto de naturaleza intermedia, a partir del cual generar infografías, ortoimágenes o incluso recorridos virtuales. La simulación de itinerarios a lo largo de trayectorias definidas supone una de las aplicaciones más destacables desarrolladas a partir de los modelos tridimensionales. Los vídeos así obtenidos permiten facilitar el acceso virtual de personal no experto a las labores, así como su distribución y puesta en conocimiento del común de la sociedad, a través de las plataformas 2.0. Entre las ventajas de este producto está la versatilidad, ya que una vez captada la nube de puntos, existe la libertad de marcar el itinerario mediante la inserción de cámaras y trayectorias, pudiendo a partir de un modelo inicial, obtener infinidad de vídeos distintos.

La obtención de dichas salidas gráficas implica la consecución de una serie de materiales que pueden resultar tanto idóneos para la difusión *on-line*, como para la propia gestión interna, proporcionando una base en función de la cual desarrollar cualquier potencial proyecto de puesta en valor que pueda plantearse, además de un documento de gran interés desde el punto de vista de la gestión de emergencias.

INSTRUMENTAL

El desarrollo de modelos de determinados elementos de la realidad constituye una alternativa de gran interés a la hora de estudiar el comportamiento de ciertos fenómenos, o alcanzar un adecuado conocimiento de los mismos. Dada la naturaleza tridimensional de la realidad, los medios destinados a su captura habrán de serlo igualmente, máxime en la época actual, en la que el nivel de desarrollo tecnológico facilita las tareas de procesado y la propia visualización eficiente de los datos 3D. Esta observación ha de ser rápida y precisa, además de económica.

Por otro lado, los métodos aplicados tradicionalmente en topografía, tales como los basados en el empleo de las estaciones topográficas, se caracterizan por proporcionar información de naturaleza discreta. Determinadas estaciones topográficas, que presentan la opción de exploración (barrido de las superficies de interés a través de la adquisición de puntos equiespaciados) o la fotogrametría digital, son algunas de las alternativas que han resultado útiles en el planteamiento de iniciativas de puesta en valor y conservación de elementos patrimoniales.

El principal instrumental aplicado en el desarrollo del presente trabajo es el láser escáner, que en esencia se compone de un distanciómetro láser, y una unidad deflectora del rayo, que permite que éste describa un barrido por la superficie o elementos que se deseen capturar. La irrupción de la nueva tecnología basada en el láser escáner supone una revolución no únicamente en lo relativo al instrumental de observación, sino también en la metodología a aplicar, tanto durante la captura como en el propio procesado de datos, además de en la propia concepción de los levantamientos topográficos, auspiciada por la posibilidad que ofrece de adquirir mediante el barrido láser miles de puntos en reducidos lapsos de tiempo. Es común que un único escaneo no ofrezca una visión completa del elemento a considerar, por lo que la identificación de puntos homólogos materializados a través de referencias estandarizadas (dianas, esferas o patrones bicolors), o de elementos de geometría particular que aparezcan en varias capturas, puede contribuir a la unión de dichos escaneos, incrementando la densidad de la nube de puntos resultante hasta parámetros de espaciado entre puntos que pueden resultar inferiores a 1 cm. El producto así obtenido, en contraposición con las alternativas tradicionales de modelización en base a puntos codificados y croquización, se caracteriza por su masividad, una cuasi-continuidad, y por la no jerarquización de la información: una vez estacionado el instrumento en un punto, y habiéndose fijado el área a captar, se observará el total de elementos que ofrezcan una superficie sobre la que el láser pueda incidir, pro-

porcionando además de información métrica (coordenadas x,y,z relativas con respecto al propio instrumento, que con posterioridad podrán referirse a un sistema absoluto), datos radiométricos.

El láser escáner cuenta con numerosas aplicaciones en ámbitos diversos, tales como estudios geotécnicos (Mah *et al.*, 2013), obtención de modelos de suelos de alta resolución (Hancock *et al.*, 2008), análisis de fenómeno de flujo de terrenos (Tarolli *et al.*, 2013), monitorización de costras de origen biológico en elementos de obra civil o arquitectónicos (González-Jorge *et al.*, 2012), análisis de geodinámica litoral (Barbarella y Fiani, 2013), puesta en valor y conservación de patrimonio arquitectónico (Núñez *et al.*, 2012; Oreni *et al.*, 2012), auscultación de edificios (Bonali *et al.*, 2013), generación de modelos urbanos de inundación (Sampson *et al.*, 2012) o aplicaciones silvícolas y de evaluación de biomasa (Pueschel, 2013) entre otras.

La disponibilidad de esta tecnología y los procesos asociados a la misma invitan a cuestionar las metodologías clásicas empleadas en la representación, tradicionalmente bidimensional, en favor de los productos que el láser escáner permite generar, que cuentan con aplicaciones tanto para la gestión y conservación de un determinado activo de patrimonio geológico-minero, como para la puesta en valor y publicitación del mismo a través de las plataformas 2.0.

METODOLOGÍA

En todo trabajo de índole topográfica que se desarrolle en una determinada localización, resulta de vital importancia contar con un sistema de referencia que permita proceder a todos aquellos encajes planimétricos y altimétricos que puedan requerirse para el normal del mismo. Este sistema posibilita además el establecimiento de un marco unificado para la superposición de los diversos niveles de información con que se pueda contar, resultando de gran interés para todas aquellas actividades de gestión a las que puedan destinarse. Dada la existencia de redes tanto planimétricas (Red Geodésica Nacional), como altimétricas (Red de Nivelación de Precisión), resulta relativamente cómodo dotar de coordenadas en base a dichos sistemas de referencia (X,Y,Z) a una red local, que facilite el desarrollo y gestión de los posteriores trabajos.

Es por ello que como paso previo a las actividades de modelización se requirió la implantación de una serie de vértices topográficos que cumplieren la misión anteriormente señalada. Tras un estudio de detalle de las redes preexistentes, se diseñó aquélla a establecer en los exteriores de las principales unidades consideradas en el desarrollo del trabajo. Su implantación y observación mediante GPS garantiza en un futuro la existencia de una red de vértices desde la cual enganchar todos aquellos trabajos topográficos que puedan realizarse, dotando a los mismos de coordenadas en un sistema de referencia absoluto. Las características principales de dicho sistema quedan recogidas a continuación:

- Sistema de Referencia ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*). El R.D. 1071/2007 de 27 de julio regula la adopción en España del sistema de referencia geodésico global ETRS89, sustituyendo al sistema geodésico de referencia regional ED50.
- Coordenadas planimétricas en Proyección UTM (*Proyección Universal Transversa de Mercator*), proyección oficial desde julio de 1970.
- Coordenadas altimétricas respecto al NMMA (Nivel Medio del Mar en Alicante), mediante nivelación GPS y con enganche previo a clavos de la red de nivelación.

Con el fin de garantizar una precisión de la red adecuada, y adoptando una escala de representación 1/500, se procedió a la observación y enganche de los vértices topográficos con la estación permanente del Gobierno de Cantabria ubicada en Puentenansa, empleando para ello dos receptores GPS marca Leica, modelo del sensor GS-15, con observación de fase en L1 y L2, observando mediante RTK y grabando las coordenadas de cada una de las bases cuatro veces. Las coordenadas finales se obtuvieron a partir de la media de dichas observaciones, siempre y cuando la diferencia no superase los 3,5 cm. Con el fin de actualizar la cartografía exterior existente, se desarrollaron igualmente una serie de levantamientos topográficos mediante GPS y estación topográfica

(marca Geodimeter, modelo System 540) en las inmediaciones de las bocaminas de Cereceo, Clara, La Cuerre, Isidra y Plaza del Monte.

Una vez concluidos los trabajos de observación en exterior, se configuró y observó la red interior en las galerías mineras, mediante el empleo de estación topográfica. Dada la complejidad de las labores, la magnitud del trabajo, y la necesidad de intervisibilidad entre las bases, esta red (Figura 3), que sirvió con posterioridad para la adecuada georreferenciación de las nubes de puntos, se caracterizó por una mayor complejidad que la establecida en el exterior, contando con un total de vértices próximo a los 350.



Figura 3. Superposición de la poligonal interior y la ortoimagen correspondiente.

Dadas las características de las labores a observar, con una importante componente lineal en determinados tramos, se realizaron un total de 675 escaneos, con un posicionamiento de 14.000 millones de puntos, que definen de forma pormenorizada el modelo tridimensional de las galerías mineras, con una información inicial asociada de 72 Gb. De los 25,6 km de galerías mineras identificadas con los que a priori cuenta el entramado minero, se han observado unos 6 km (Figura 4). El instrumento seleccionado para esta fase de observación fue un láser escáner marca FARO, modelo FOCUS 3D, caracterizado por unas reducidas dimensiones y peso, resultando ideal para el tránsito por labores estrechas. Su interfaz táctil posibilita además un manejo sencillo, no requiriendo del transporte y utilización de un ordenador portátil para el control de la operación. Este instrumento permite medir distancias de rangos comprendidos entre los 0,6 y los 120 m, con precisiones próximas a los 2 mm y ritmos de captura próximos al millón de puntos por segundo.

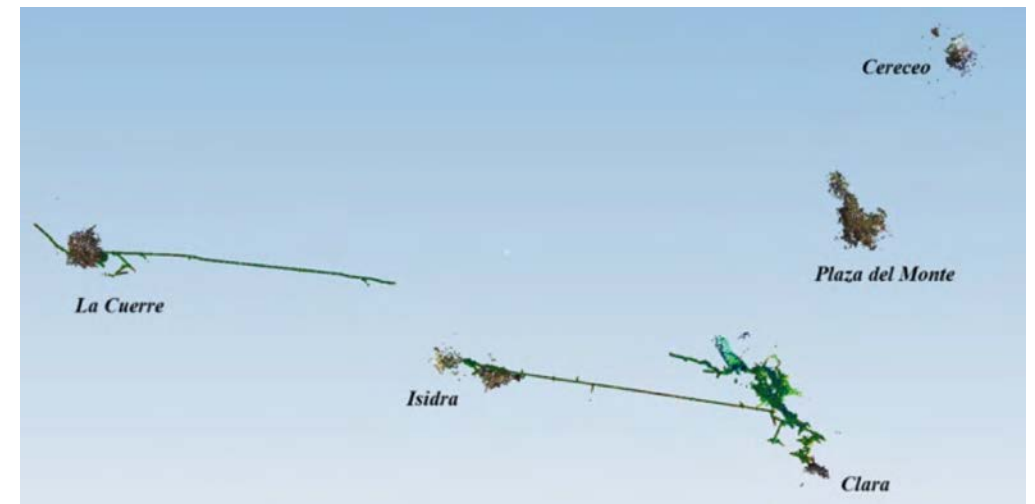


Figura 4. Relación de labores observadas, representadas en planta.

El recorrido descrito en las labores de captura puede definirse en base a dos localizaciones principales. Los trabajos en la primera de ellas, asociada a la Mina Isidra, comenzaron en la bocamina próxima al transformador, avanzando hasta la entrada de la torca, cercana a la primera. Seguidamente se accedió a la Galería de La Maestra, prosiguiendo la observación hacia Mina Clara, ascendiendo hasta el exterior, para posteriormente descender, alcanzando la cabeza del plano inclinado de Isidra (Figura 5). Desde aquí se trazaron dos recorridos principales: el primero de ellos siguió dicho plano inclinado hasta alcanzar la zona derrumbada, y el segundo de ellos describió el itinerario alternativo que existe, hasta alcanzar el final de dicho plano inclinado y el nivel de la Cueva El Soplao. Una vez ahí, se avanzó hacia la zona comúnmente conocida como "El Infierno", anexa a la Galería de la Sirena. Seguidamente se retornó al nivel de la Cueva, para posteriormente descender hasta el distribuidor, y proseguir el avance a la Galería de los Sondeos. El acceso a Ana y Las Ligorias no fue posible por la anegación de dichas labores.

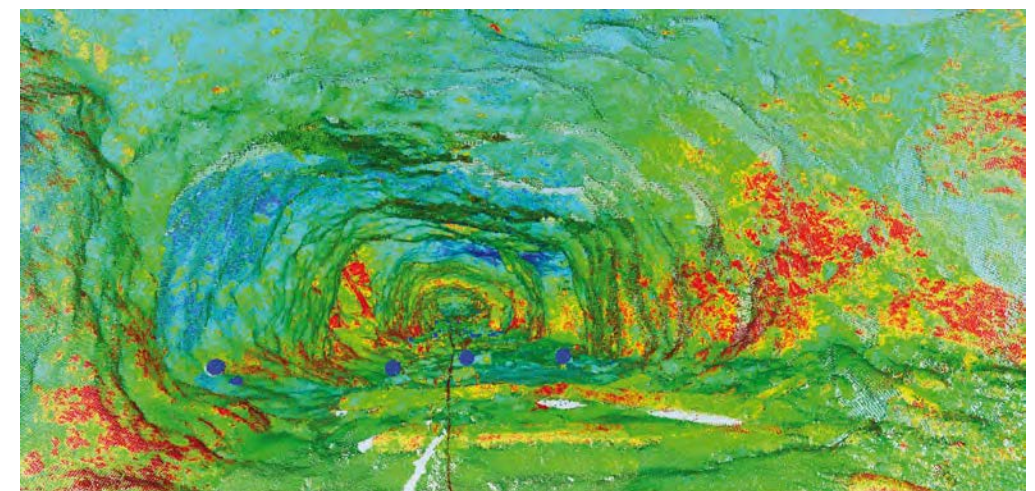


Figura 5. Plano inclinado de La Isidra.

La segunda zona fundamental a considerar en los trabajos es la asociada a la Mina de La Cuerre (Figura 6). Accediendo por la denominada "Puerta de Hierro", se alcanzó por la rampa de explotación el Segundo Nivel, ascendiendo a partir de éste hasta el Primer Nivel. Las condiciones de la rampa de descenso, que dificultaban significativamente el acceso aun sin instrumental topográfico, y la imposibilidad de establecer conexión alguna entre las zonas de La Isidra y La Cuerre a través de la Galería General de Transporte de Cereceo, hizo que los esfuerzos se centraran en la definición de esos dos primeros niveles, susceptibles de una sencilla puesta en valor.



Figura 6. Cargadero en La Cuerre.

El láser escáner proporciona nubes de puntos brutas en un sistema de referencia local, de forma que una vez realizada toda la secuencia de escaneos que se desea llevar a cabo, requiere de la unificación y georreferenciación en una única nube de puntos. Dichas nubes de puntos pueden considerarse el primero de los productos obtenibles a partir de las metodologías de trabajo basadas en el láser escáner. La plataforma elegida para el tratamiento de datos, debido básicamente a su volumen, ha sido el programa Cyclone de Leica, herramienta informática que se ha especializado precisamente en la gestión de datos procedentes de láser escáner, aunque éstos no procedan de equipos desarrollados por dicho fabricante.

Los paquetes de gestión de datos existentes en la actualidad presentan algoritmos específicos destinados a la depuración, la identificación de formas geométricas primitivas en base a las que modelizar estructuras, la generalización o simplificación de las nubes, etc. Como operaciones básicas del procedimiento de gestión seguido para el tratamiento de la nube de puntos pueden señalarse el registro de varios escaneos (alineación y referencia de los mismos con respecto al sistema de coordenadas relativos de uno de ellos), depuración, unificación (generación de una única nube de puntos a partir de las capturas independientes) y georreferenciación (traslación de la nube de puntos a un sistema absoluto, a partir de la caracterización de las bases de unión consideradas y de sus coordenadas con respecto al mismo). Conviene señalar que el orden de desarrollo de dichas operaciones puede diferir en función de las necesidades específicas de tratamiento, que se suele caracterizar por notables demandas en tiempo, recursos de hardware/software y formación específica del personal dedicado al mismo.

RESULTADOS

A partir del desarrollo de los trabajos se ha obtenido un modelo que recoge labores emplazadas en las localizaciones de La Cuerre y La Isidra, incluyéndose además las capturas exteriores anteriormente señaladas. Uno de los principales aspectos de interés del modelo reside en la precisión relativa entre puntos del mismo,

posibilitando la realización de mediciones en el ámbito reducido de las zonas en las que se prevea la actuación, proporcionando en tal caso precisiones de orden centimétrico. Éste es precisamente el gran potencial del modelo realizado: tener representadas tridimensionalmente las galerías y poder llevar a cabo las mediciones que se deseen, perfiles longitudinales, secciones transversales, cubicación de movimiento de tierras, generación de cartografía convencional, etc., de forma sencilla, rápida y precisa, a través del empleo del software adecuado.

A partir de la nube de puntos se han obtenido igualmente ortoimágenes de elementos singulares que pueden resultar de especial interés para El Soplao, S.L., tales como el Castillete de La Cuerre, el transformador anexo, o el edificio del compresor de la Plaza del Monte. Para la obtención de las ortoimágenes, desarrolladas mediante Cyclone, se ha adoptado un plano de referencia significativo con respecto al elemento observado. Una vez definido éste, se fijó un sistema de proyección ortográfico, seleccionándose posteriormente una cámara virtual a partir de la cual realizar la captura en perpendicular al plano de referencia, exportando los elementos recogidos en pantalla en un formato adecuado.

El tercer producto de interés a considerar es el constituido por los recorridos virtuales. En la obtención de estos videos se ha empleado nuevamente el programa Cyclone de Leica. Para el desarrollo de los videos se seleccionó una serie de puntos en los que se emplazaron cámaras virtuales, dispuestas a alturas de observación determinadas. A partir de las mismas, se generó una *spline* (Figura 7): dicha curva describe el desplazamiento del observador en el modelo. Para completar la definición de las características del video, se definieron aspectos tales como la tasa de *frames* por segundo, la resolución, el factor de compresión y el formato. Estos productos se caracterizan por un importante peso si se obtienen a máxima resolución, por lo que suele recomendarse recurrir a tramos determinados de longitud no excesiva, que los mantenga por debajo de los 2 Gb. Teniendo en cuenta la naturaleza de las labores, con una longitud total observada de 6 Km, se optó por la realización de recorridos significativos en zonas concretas (La Isidra, Plaza del Monte, La Cuerre, Clara, etc.), adoptando puntos de vista que van desde el recorrido en primera persona de un potencial observador que visite las labores, a vuelos externos y rotaciones que aportan una adecuada visión de la geometría del conjunto, resultando productos muy intuitivos para el usuario final al que el video se destine.

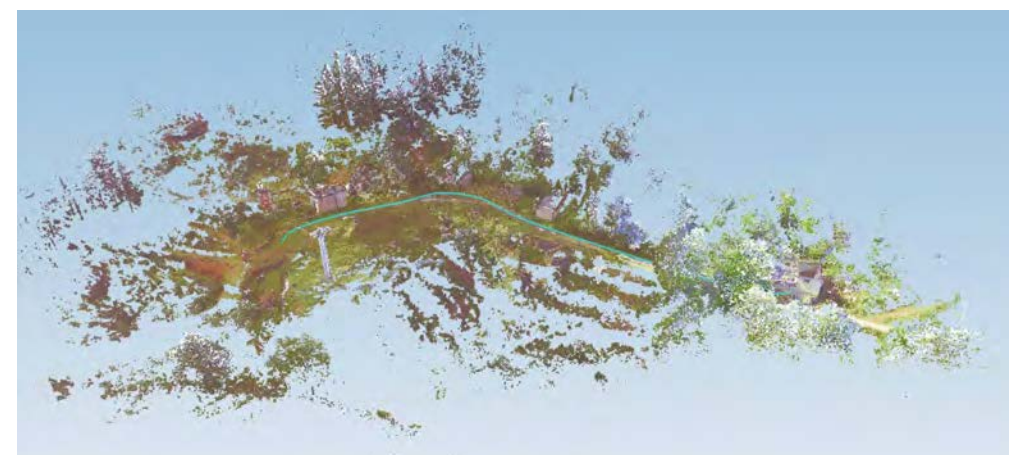


Figura 7. En azul, spline para la introducción del recorrido a realizar en la generación de un itinerario virtual.

Las posibilidades que esta tecnología ofrece no quedan restringidas a los productos obtenidos a partir de la nube de puntos, ya que la generación de mallas a través del empleo de software adecuado, supone una alter-

nativa de trabajo que amplía dichas opciones (Figura 8). Concibiendo la malla, al igual que ya se hiciese con la nube de puntos, como un producto que cuenta con una entidad tanto final como intermedia, es posible obtener salidas de diversa índole: infografías, ortoimágenes, recorridos virtuales, o aplicaciones y PDFs interactivos.



Figura 8. Nube de puntos del entorno del Castillete de La Cuerre, y malla del mismo.

CONCLUSIONES

Los trabajos realizados y los resultados obtenidos a partir de los mismos permiten afirmar que el modelo tridimensional de las galerías mineras existentes en el entorno de la Cueva El Soplao satisfará una serie de objetivos fundamentales, en base a los que se planteó:

- Permitirá generar documentos gráficos con un adecuado nivel de detalle, que posibilite la redacción de los pertinentes proyectos de habilitación y valorización de zonas de potencial interés turístico en el entorno de El Soplao.
- Aportará una información vital ante una intervención de los servicios de urgencia.
- Facilitará la difusión digital del complejo turístico mediante recreaciones virtuales del entramado minero existente en la zona.
- Permitirá avanzar en el proyecto de investigación iniciado con la Cátedra El Soplao.

La generación de este modelo tridimensional constituye en sí mismo una herramienta única en el ámbito de las Cuevas y Minas Turísticas, que ofrece una gestión totalmente diferente desde el punto de vista técnico, científico y de difusión turística de la propia Cueva. Todas estas alternativas pueden revestir interés tanto para la propia gestión interna del bien patrimonial puesto en valor (pudiendo aplicarse en iniciativas formativas, conservación, peritajes, auscultaciones, etc.), como para el desarrollo de campañas divulgativas. Las aplicaciones que pueden darse a los mismos adquieren por tanto una doble vertiente: tanto *off-line* como *on-line*.

AGRADECIMIENTOS

Desde estas líneas queremos agradecer a la empresa pública El Soplao, S.L. y a la Universidad de Cantabria por haber facilitado los medios e instalaciones que han permitido realizar esta ponencia.

REFERENCIAS

Barbarella, M. y Fiani, M. 2013. Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing. *European Journal of Remote Sensing*, 46. 126-151.

Bonali, E., Pesci, A. Casula, G. y Boschi, E. 2013. Deformation of ancient buildings inferred by terrestrial laser scanning methodology: the Cantalovo Church case study (Northern Italy). *Archaeometry*. 26/06/2014. DOI: 10.1111/arc.12028.

Colina, J., Argumosa, A., Gómez, F., Siegried, V. y de Manuel, A. 2003. *El Soplao, una cavidad única*. Consejería de Cultura, Turismo y Deporte del Gobierno de Cantabria, Santander, 233.

Cueto Alonso, G. 2008. Una experiencia fallida en la minería del Norte de España: la Compagnie des Mines et Fonderies de la Province de Santander et Quiros 1855-1888. *De Re Metallica*, 10-11, 47-56.

González-Jorge, H., González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P. y Arias, P. 2012. Monitoring biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners. *Construction and Building Materials*, 31. Pp. 119-128.

Hancock, G. R., Cawter, D., Fityius, S.G., Chandler, J. y Wells, T. 2008. The measurement and modelling of rill erosions at angle of repose slopes in mine spoil. *Earth Surface Processes and Landforms*. vol. 33, 1006-1020.

Mah, J., Samson, C., McKinnon, S.D. y Thibodeau, D. 2013. 3D laser imaging for surface roughness analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58, 111-117.

Mazarrasa, J. M. 1930. Estudio de los criaderos minerales de la provincia de Santander. Criaderos de Cinc. Boletín Oficial de Minas, Metalurgia y Combustibles. 157, 521-550; 158, 571-600; 159, 631-651; 160, 675-692; 161, 711-754.

Núñez, M. A., Buill, F., Regot, J. y de Mesa, A. 2012. Levantamiento arquitectónico de la Puerta de Antioquía (Alepo). *Informes de la Construcción*, 64(538), 487-496.

Oreni, D., Brumana, R., y Cuca, B. 2012. Towards a Methodology for 3D Content Models: The reconstruction of ancient vaults for maintenance and structural behavior in the logic of BIM management. *18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, VSMM 2012*, Milán, 475-482.

Pueschel, P. 2013. The influence of scanner parameters on the extraction of tree metrics from FARO Photon 120 laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 78, 58-68.

Robledo Ardila, P. y Durán-Valsero, J. J. 2009. Datos preliminares sobre la tipología, distribución y génesis de las excéntricas en la Cueva El Soplao, Cantabria, España. En: Durán, J.J. y López-Martínez (Ed.), *Cuevas turísticas, cuevas vivas*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, Pp. 13-25.

Samspon, C. C., Fewtrell, T. J., Ducan, A., Shaad, K., Horritt, M. S. y Bates, P. D. 2012.

Use of terrestrial laser scanning data to drive decametric resolution urban inundation models. *Advances in Water Resources*. 41, 1-17.

Tarolli, P., Calligaro, S., Cazorzi, F. y Dalla Fontana, G. 2013. Recognition of surface flow processes influenced by roads and trails in mountain areas using high-resolution topography. *European Journal of Remote Sensing*, 46, 176-197.

Recuperación del paisaje subterráneo en la Cueva de Nerja (Málaga, Andalucía)

Yolanda del Rosal, Cristina Liñán^(1,2), José-Luís Sanchidrián^(1,3) y Francisco Carrasco^(1,2)

(1) Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación y Consejo Científico Asesor C/ Carretera de Maro s/n, 29787-Nerja (Málaga) (yolanda@cuevadenerja.es; cbaena@cuevadenerja.es)

(2) Universidad de Málaga, Grupo de Hidrogeología, Departamento de Ecología y Geología, Área de Geodinámica Externa, Campus de Teatinos s/n, 29071-Málaga, (fcarrasco@uma.es)

(3) Departamento de Geografía y Ciencias del Territorio. Área de Prehistoria, Universidad de Córdoba (gt1satoj@uco.es)

RESUMEN

La Cueva de Nerja, ubicada en el sector oriental de la provincia de Málaga, es una de las cuevas kársticas más significativas de Andalucía y uno de los principales atractivos turísticos de la Costa del Sol, con una media en torno a 480.000 visitantes anuales. Aproximadamente un tercio de su volumen está acondicionado para la visita turística desde 1960, un año después de su descubrimiento. En una de las salas del sector turístico se instalaron, en la década de los años 70, unas gradas de grandes dimensiones para acomodar al público del Festival Internacional de Música y Danza *Cueva de Nerja*. Estas gradas, con capacidad para 470 personas, han producido, durante décadas, un importante impacto visual en el paisaje subterráneo. La presente publicación recoge la metodología empleada y los trabajos desarrollados en el año 2013 para la eliminación de este graderío del interior de la cavidad sin causar impacto en su conservación. La retirada de esta imponente estructura ha permitido recuperar una de las panorámicas más espectaculares del paisaje de la Cueva de Nerja así como descubrir restos arqueológicos de gran interés que permanecían ocultos bajo la misma.

Palabras clave: conservación, Cueva de Nerja, graderío, paisaje subterráneo.

Recovering the underground landscape of the Nerja Cave (Málaga, Andalucía)

ABSTRACT

The Nerja Cave is located in the eastern part of the province of Malaga and is one of the most significant karst caves of Andalusia. With an average around 480,000 visitors annually, it is one of the main tourist attractions of the Coast of the Sun. About one third of its volume is suitable for visiting, since 1960, a year after its discovery. In one hall, in the tourist gallery, were installed in the early 70's, large bleachers to accommodate the public of the Nerja Cave International Festival of Music and Dance, which have been for decades an important visual impact of this underground landscape. This work presents the methodology used for the removal of bleachers inside the cavity without impacting conservation, during 2013. Remove this structure has allowed to recover one of the most spectacular views of the subterranean landscape from the Cave of Nerja and discover interesting archaeological remains of that were hidden underneath.

Keywords: bleachers, conservation, Nerja Cave, subterranean landscape.

INTRODUCCIÓN

La Cueva de Nerja representa un importante recurso turístico de la Costa del Sol, con casi 500.000 visitantes anuales, que la erigen en una de las cavidades turísticas más visitadas de España. Está catalogada como Bien de

Interés Cultural con categoría de Zona Arqueológica y Lugar de Interés Geológico de Relevancia Internacional. El volumen total de la cueva es de unos 300.000 m³, aunque tan sólo un tercio, las llamadas Galerías Turísticas, se encuentra habilitado para su visita. El resto de la cueva, las denominadas Galerías Altas y Nuevas, sólo dispone de una mínima infraestructura que permite la realización de actividades de espeleoturismo a grupos reducidos de visitantes.

La cavidad fue descubierta el 12 de enero de 1959 y los trabajos de acondicionamiento turístico comenzaron en septiembre de ese mismo año. La apertura al público tuvo lugar en junio de 1960 y el acto elegido para la inauguración fue la celebración de un Festival de Música y Danza en la Sala de la Cascada o del Ballet, un marco natural de incomparable belleza y excepcional acústica, que contribuyó al éxito del evento. Desde entonces y hasta la actualidad, el Festival se celebra anualmente, con la participación de artistas de reconocida trayectoria nacional e internacional. En la década de los 70 se instaló en la Sala del Ballet un graderío fijo fabricado en madera y con capacidad para 500 personas. Posteriormente esta infraestructura fue reemplazada por otra fabricada en hierro, con capacidad para 470 personas, que es la que ha permanecido en el interior de la cavidad hasta su retirada en el año 2013 (Figura 1).



Figura 1. Vista parcial del graderío instalado en la Sala de la Cascada.

A pesar de las tareas de mantenimiento y restauración periódicas realizadas en el graderío, el paso del tiempo y la constante elevada humedad ambiental fueron deteriorando la estructura. En el año 2012, siguiendo las recomendaciones técnicas de diferentes empresas especializadas, el graderío fue definitivamente clausurado. En base a ello, el Consejo Científico Asesor de la Cueva de Nerja aconsejó la eliminación definitiva de toda la estructura de hierro y los elementos asociados (asientos, cableado, pilares de hormigón...) del interior de la cavidad. Esta propuesta del Consejo Científico, argumentada en base a la conservación de la cavidad y a la recuperación del paisaje subterráneo, fue apoyada por la Junta Plenaria de la Fundación Cueva de Nerja, bajo la premisa de acometer todas aquellas actuaciones necesarias para eliminar el graderío sin producir un impacto sobre el Patrimonio Cultural y Natural de la cavidad. Dada la condición de Bien de Interés Cultural (BIC) de la Cueva de Nerja, los trabajos de eliminación del graderío se llevaron a cabo en el marco de una Actividad Arqueológica Preventiva, autorizada por la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía (Sanchidrián et al., 2013).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El proyecto inicial de desmontaje del graderío, redactado por un Ingeniero Técnico Industrial (Gutiérrez, 2013), recogía la metodología, materiales y tiempo necesarios para llevar a cabo el objetivo propuesto, teniendo en cuenta la fragilidad del entorno en el que se realizarían los trabajos. El informe estimó que se retirarían de la cueva unas tres Toneladas Métricas de material, por lo que proponía la participación de ocho trabajadores durante siete jornadas de trabajo. Además, contemplaba la realización de las siguientes actuaciones: señalización y acotado de las zonas de trabajo; instalación en el exterior de la cueva de cubas para la correcta retirada y gestión de los residuos resultantes; protección del medio natural con elementos mecánicos e inertes; desmontaje y retirada de los asientos; corte de los elementos de la estructura, comenzando por los no portantes y finalizando por los pilares y vigas principales; retirada manual del material y transporte al exterior y puesta en práctica de las medidas de seguridad y salud preceptivas.

Por su parte, el Instituto de Investigación y el Consejo Científico Asesor elaboraron un *Protocolo de Actuación* (Corrales et al., 2013) para el desarrollo de los trabajos, que posteriormente se integraría parcialmente al proyecto de ejecución inicialmente planteado. El citado Protocolo recogía una serie de medidas de actuación, con objeto de:

1. Evaluar el estado ambiental de la cavidad previo, durante y posterior a la realización de los trabajos de desmontaje.
2. Prevenir cualquier tipo de impacto negativo en la Cueva de Nerja o, en su caso, minimizar los efectos perjudiciales que pudieran derivarse de dichos trabajos y que pudieran incidir en la conservación del BIC Cueva de Nerja o en la salud de trabajadores y visitantes.
3. Documentar gráficamente el proceso de desmontaje del graderío.
4. En caso necesario, aplicar medidas correctoras inmediatas e incluso paralizar los trabajos.

La puesta en práctica de los enunciados recogidos en este documento se consideró condición indispensable para la realización de los trabajos, en base a una adecuada conservación de la cavidad, su patrimonio y la salubridad del ambiente. A continuación se exponen, de forma resumida, los apartados contemplados en este documento:

a) Programación de los trabajos: teniendo en cuenta el patrón de ventilación natural de la cavidad así como su naturaleza turística, los trabajos se desarrollarán durante el mes de septiembre y en horario nocturno. Aunque en este periodo de tiempo el grado de ventilación de la cavidad es menor que en otras épocas del año, el sentido general de los flujos de aire favorece la eliminación de cualquier efecto antrópico que se produzca en el sector turístico, ya que el aire se dirige desde las Galerías Altas y Nuevas hacia las Galerías Turísticas y desde éstas hacia el exterior (Liñán et al., 2009; Liñán y Rosal, 2014). Durante el tiempo de trabajo nocturno se mantendrán abiertas las puertas de entrada y salida de la cavidad, así como la puerta de entrada a las salas de Mina y Torca, donde se ubican las dos torcas naturales, para favorecer la ventilación natural de la cavidad.

b) Control de la producción y depósito de polvo: se minimizará la generación de polvo en suspensión y el posterior depósito sobre paredes y espeleotemas. Como primera medida, antes de comenzar a desmontar cualquier elemento, se realizará una limpieza con paños húmedos del graderío (sillas, vigas, barandillas...). Además, la realización de cualquier otra actividad que genere polvo o similar deberá contar con el trabajo paralelo de una aspiradora, para eliminar estos residuos.

Para determinar la posible deposición de polvo sobre el soporte rocoso que se derive de la realización de los trabajos de desmontaje, se dispondrán Placas de Petri en puntos seleccionados del sector turístico, que actuarán a modo de testigos.

c) Trabajos de desmontaje, corte y retirada: para evitar la generación de residuos y siempre que sea posible, se optará por el trabajo manual frente al empleo de maquinaria. Cuando sea imprescindible cortar elementos de hierro, se empleará una metodología que garantice la protección y conservación la Cueva de Nerja y de las personas que se encuentren en su interior. Al respecto fueron planteadas dos opciones de corte: una basada en el oxicorte y otra basada en el empleo de una cortadora de hoja radial. La ausencia de referentes sobre su empleo en el interior de cuevas motivó que se programara la realización de una prueba de ambos métodos de corte, *in situ*, para valorar sus posibles ventajas e inconvenientes y decidir la opción más adecuada.

Los pilares de hormigón y ladrillo que sustentan la estructura metálica del graderío serán eliminados mediante el empleo combinado de cemento expansivo, machotas y un taladro perforador a mínima potencia y puntero húmedo. En ningún caso se actuará sobre pilares que afecten directamente a espeleotemas.

Los residuos generados se almacenarán en las zonas indicadas por el Instituto de Investigación de la Fundación hasta ser transportados con sumo cuidado hacia el exterior de la cueva. Los fragmentos a trasladar deben ser de tamaño reducido, a fin de evitar el contacto con paredes rocosas y espeleotemas, así como con otros elementos del mobiliario interior de la cueva. Se indicará a todos los operarios y responsables de obra aquellas zonas o elementos especialmente vulnerables, así como las áreas que presentan mayor dificultad para el traslado de piezas de mayor volumen.

Después de cada jornada de trabajo, se deberá recoger y almacenar tanto el material de trabajo como los residuos generados, a fin de que su presencia no sea peligrosa para la integridad de visitantes o trabajadores de la cueva durante el horario de apertura al público de la cavidad.

d) Control medioambiental: se emplearán sensores de temperatura, humedad y contenido en CO₂ y ²²²Rn del aire, que mantendrán su ubicación habitual en el interior de la cavidad. Un sensor adicional de temperatura, humedad y CO₂ será instalado junto a los paneles de arte rupestre más próximos a la zona de trabajo. En todos los casos la periodicidad de medida será de 15 minutos en lugar de 60 minutos, que es la normalmente programada, una vez comiencen los trabajos. Esta periodicidad de medida podrá ser reajustada, en función del trabajo desarrollado en cada momento.

Como valores límite para cada uno de los parámetros de control se consideran aquellos que excedan los valores máximos de su fluctuación "natural". En este sentido, se tendrá en cuenta que no se dispone de datos ambientales previos a la apertura turística de la Cueva de Nerja, por lo que la fluctuación "natural" considerada para cada uno de los parámetros corresponde, en realidad, a la suma de la variación natural y la producida por las visitas. En el caso del dióxido de carbono, el valor máximo establecido es de 3000 ppm, para evitar posibles fenómenos adversos, como la corrosión por condensación (Dragovich y Grose, 1990). Este valor límite también tiene en cuenta la normativa vigente sobre Salud Pública, que establece 5000 ppm como valor límite de exposición profesional diaria durante 8 horas (INSHT, 2000). En relación con la temperatura del aire, se establecen incrementos máximos permisibles de 2 °C, salvo en el entorno inmediato de las pinturas rupestres, en el que el incremento máximo permitido es de 0,5 °C. Para reducir el impacto ambiental derivado de los sistemas de iluminación, se utilizarán lámparas de bajo consumo y de baja emisión de calor, con reflectores para canalizar la luz hacia la zona que se desee iluminar.

e) Control microbiológico: se determinará la microbiota suspendida en el aire antes, durante y después de la realización de los trabajos, para determinar posibles alteraciones ambientales atribuibles al desmontaje del graderío. La metodología de trabajo y los parámetros de control microbiológico serán los empleados habitualmente en el análisis del aire de la cueva (Rosal et al., 2007).

f) Protección de espeleotemas: como norma general, se procederá al recubrimiento de toda la zona de trabajo con películas de geotextil que se extenderán hasta un radio de cuatro veces el área de trabajo. Cuando se considere necesario, se incrementará la zona de protección, como medida preventiva ponderada. Las películas de geotextil serán previamente humedecidas para prevenir incidencias derivadas de escapes de chispas y escorias y permitir su fácil captura. En el área circundante inmediata a la zona de corte también se dispondrán lonas ignífugas y se instalarán planchas verticales en las que impacten las chispas y escorias derivadas del corte y faciliten su recogida.

g) Conservación del arte rupestre y del sedimento arqueológico: para la protección del arte rupestre presente en las inmediaciones de la zona de trabajo se contemplan una serie de medidas específicas destinadas a su protección física, ambiental y vigilancia arqueológica. En primer lugar, se balizará y señalizará todo el conjunto de arte rupestre de la Sala del Ballet. Para el balizamiento se empleará una cinta plástica, inocua y de color, mientras que la señalización se realizará mediante carteles que avisen de la presencia de zonas de especial protección así como la prohibición de paso y almacenamiento de material en las zonas previamente balizadas. Dado que el arte rupestre más próximo al graderío se ubica a una distancia de unos 20 metros, se desestima el empleo de un sistema de protección física adicional, que podría generar incrementos indeseables de temperatura y dióxido de carbono en el entorno inmediato de las pinturas. No obstante, este sistema de protección integral estará preparado para su instalación si se observara un importante depósito de polvo en los testigos instalados en las inmediaciones de estos paneles de arte rupestre.

Para el control ambiental y microbiológico de las zonas con arte rupestre se emplearán los mismos parámetros descritos para el control de la cavidad en su conjunto, pero con un rango de alteración tolerada más restrictivo.

El sedimento arqueológico sobre el que se ubica el graderío se protegerá mediante la instalación de películas de geotextil que cubran la superficie de trabajo y eviten el acceso de residuos al sedimento.

h) Control, vigilancia y documentación de los trabajos: la importancia y envergadura de los trabajos previstos, la fragilidad del medio en el que se llevarán a cabo y la condición de actividad arqueológica en la que se enmarca la actuación, precisará del seguimiento diario de los técnicos del Instituto de Investigación, bajo la dirección del Conservador y la tutela del Consejo Científico Asesor. El objetivo principal de esta labor de vigilancia será verificar la correcta ejecución de las medidas preventivas, proponer y ejecutar medidas correctoras inmediatas e incluso paralizar los trabajos, si las circunstancias así lo requieren.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

Siguiendo las pautas de actuación recogidas en el *Protocolo de Actuación*, comenzaron las medidas preventivas, el control medioambiental y la vigilancia arqueológica (Figuras 2a y 2b). En el graderío se llevó a cabo una profunda limpieza de todos los elementos de la estructura y, posteriormente, se procedió a retirar manualmente los asientos (Figura 2c) y el material eléctrico, mediante destornilladores de varios calibres, llaves inglesas, palancas tipo "pata de cabra", etc.

Posteriormente, se llevó a cabo, *in situ* y en presencia de miembros del Consejo Científico Asesor y responsables de la empresa encargada de los trabajos, una prueba de corte de hierro mediante oxicorte. Analizadas las ventajas e inconvenientes de la aplicación de esta técnica, las consecuencias ambientales derivadas (humos, olores, etc.) aconsejaron desestimar su uso en la Cueva de Nerja. La prueba de corte mediante hoja radial permitió comprobar su eficacia y la ausencia de incidencias destacables, salvo un leve olor a metal quemado durante el corte y en los momentos posteriores, que progresivamente iba disminuyendo hasta desaparecer por completo. Por ello, se optó por emplear esta metodología de corte, en los casos en que fuese preciso.

Para evitar la persistencia del olor referido en la cavidad y posibles molestias a los visitantes del día siguiente, se redujo a dos el número de cortes a realizar en cada viga de hierro y a tres el número máximo de vigas a cortar en cada jornada de trabajo, debiendo realizarse los trabajos con radial al principio de cada jornada y finalizar, como máximo, a la 01:00 a.m. La aplicación de este horario de corte permitió que el olor a metal quemado desapareciera durante las horas nocturnas, antes de la apertura de la cueva al público. Los operarios fueron informados de las medidas recogidas en el *Protocolo de Actuación*, en particular de aquellas relacionadas con la protección física del medio, cuya puesta en práctica ofreció resultados muy satisfactorios (Figuras 2d, 3a y 3b).

Los trabajos de desmontaje de la estructura de metal (Figuras 2e, 2f, 2g y 2h) comenzaron por la parte superior (Figura 3c), lo que permitió almacenar los residuos en la zona inferior del graderío (Figura 3d). A continuación se desmontaron los pasillos de acceso a esta zona superior y, finalmente, se retiró la parte baja del graderío y los pilares de hormigón sobre los que se sustentaba (Figuras 3e y 3f). La metodología de trabajo estipulada y la limitación horaria motivaron la reducción del número de operarios previsto inicialmente a cuatro, salvo durante los trabajos de transporte del material previamente desmontado al exterior, en los que llegaron a participar hasta 16 operarios (Figuras 3g y 3h).

La retirada de toda la estructura metálica precisó de 27 jornadas de trabajo y finalizó antes de producirse el cambio estacional en la ventilación natural de la cueva, tal y como estaba previsto.

CONCLUSIONES

El graderío de la Sala de la Cascada ha sido eliminado del interior de la cavidad según las medidas y propuestas recogidas en un *Protocolo de Actuación* específico, elaborado por el Instituto de Investigación y el Consejo Científico Asesor de la Cueva de Nerja. La metodología empleada ha permitido eliminar el graderío en un período de tiempo muy breve, inferior al mes, sin que se produzcan afecciones desde el punto de vista de conservación de la cavidad ni de salubridad del ambiente.

En este sentido, los parámetros medioambientales, microbiológicos y los testigos instalados para el control del depósito gravitacional de polvo no han mostrado variaciones atribuibles al desarrollo de los trabajos de desmontaje. La elección del mes de septiembre como periodo de trabajo, cuando los flujos de aire se dirigen hacia el exterior de la cueva y la visitabilidad de la cueva es menor, ha sido favorable desde el punto de vista de la conservación y de la visita turística, ya que ha permitido eliminar eficaz y rápidamente cualquier impacto antrópico derivado del desarrollo de los trabajos y minimizar las molestias a los visitantes de la cueva. El seguimiento diario de los trabajos por parte del personal técnico se considera un aspecto clave en la consecución del proyecto, en base a los principios de conservación del medio subterráneo.

Como era previsible, la actividad arqueológica relativa al desmontaje y retirada de las gradas no ha proporcionado ningún tipo de material arqueológico, puesto que no se ha intervenido directamente sobre el yacimiento prehistórico sino sobre elementos estructurales modernos. Sin embargo, la retirada de estos elementos ha dejado al descubierto paredes de la cueva y perfiles arqueológicos antes ocultos tras la estructura, en los que se observan restos prehistóricos de gran interés, como motivos de arte rupestre no catalogados hasta la fecha o un perfil rico en restos de carbón, entre los que destaca la presencia de un hogar (Figuras 4a y 4b).

La eliminación del graderío ha significado una mejora estética y ambiental de la cavidad, ya que ha permitido recuperar una de las panorámicas más espectaculares del paisaje subterráneo de la Cueva de Nerja (Figura 5), eliminar una fuente de contaminación ambiental y nutricional de microorganismos contaminantes y reducir sustancialmente el aforo de público asistente al Festival Cueva de Nerja, disminuyendo así el impacto antrópico relacionado con la celebración anual de este evento en el interior de la cavidad (Carrasco *et al.*, 2002).

En una siguiente fase de trabajo, deberá acometerse la retirada de los elementos de hormigón anexos a espeleotemas que sustentaban el graderío, previa evaluación técnica de la viabilidad del proyecto, así como la realización de un proyecto de habilitación turística específico para la Sala de la Cascada, en base a su estado actual.

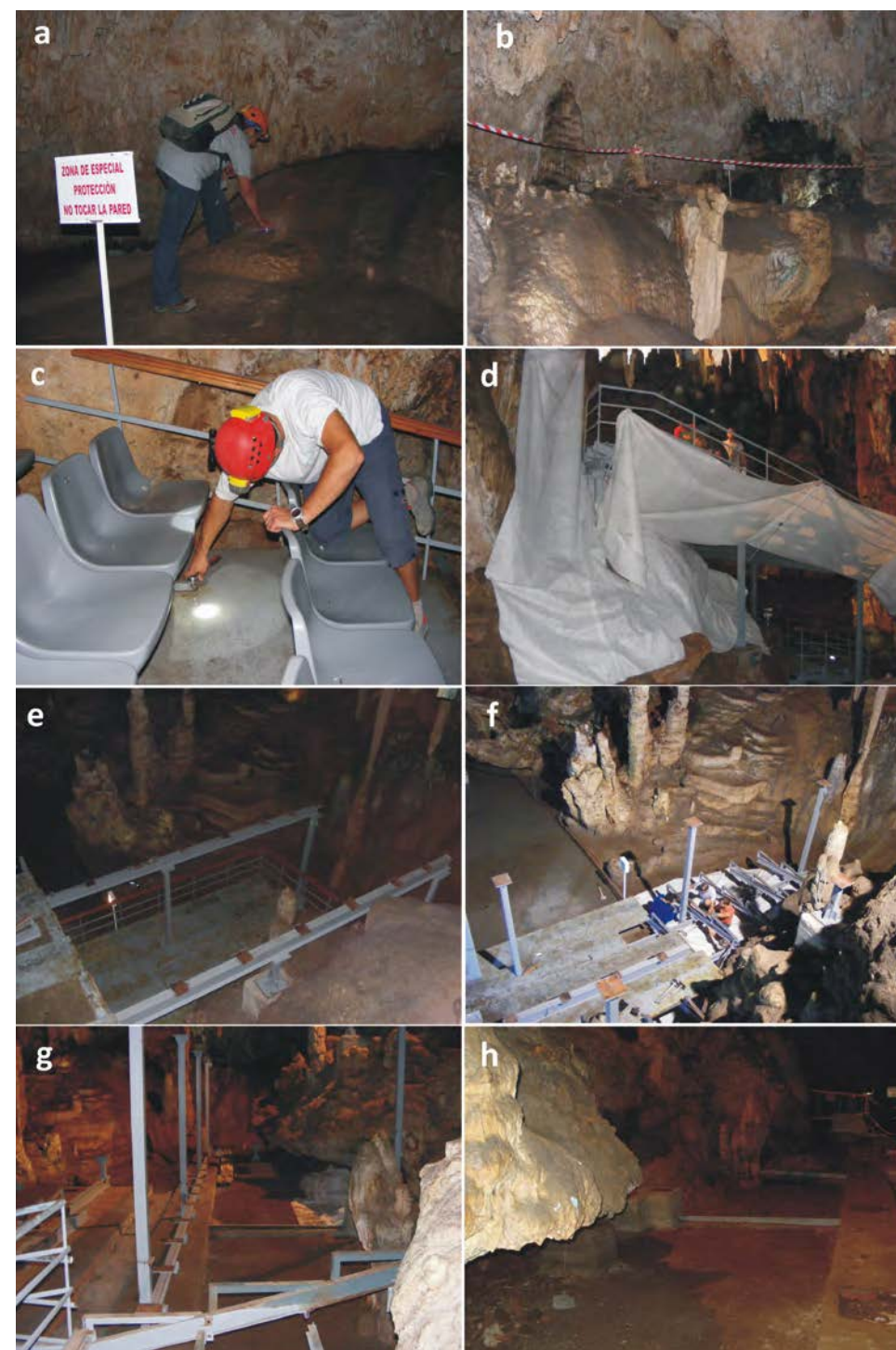


Figura 2. a) Instalación de testigo de polvo en zona anexa al graderío. b) Zona con arte rupestre tras balizado y señalización. c) Retirada manual de los asientos. d) Protección del soporte pétreo mediante geotextil. e) - h) Evolución de los trabajos en uno de los sectores de la Sala de la Cascada.

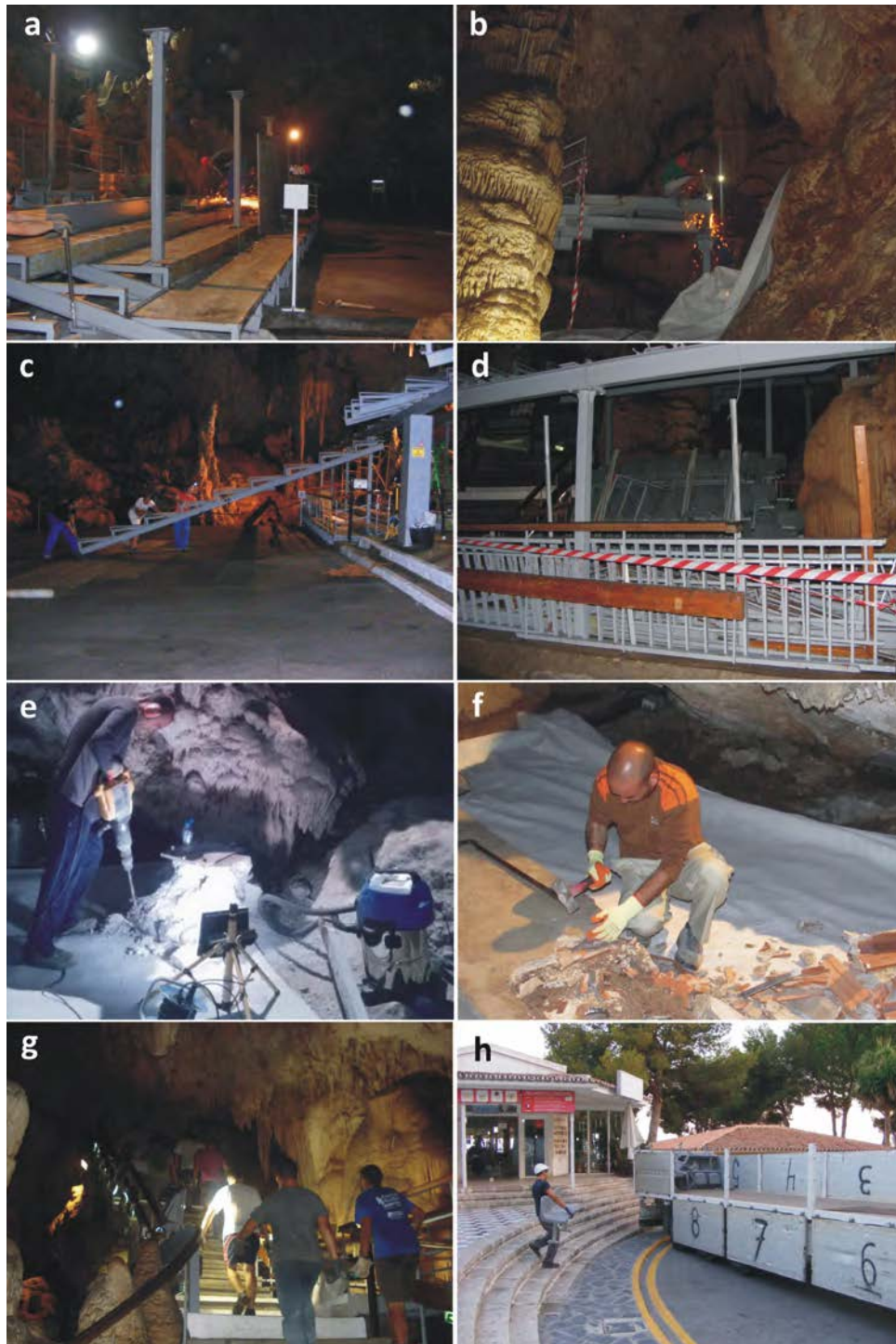


Figura 3. a) y b) Corte con radial, empleando pantallas y geotextil para la protección del entorno. c) Desmontaje de la parte superior del graderío. d) Almacenamiento de materiales desmontados en la zona baja del graderío. e) y f) Retirada de soportes de mampostería. g) y h) Traslado al exterior de los elementos desmontados.

AGRADECIMIENTOS

La Fundación Cueva de Nerja agradece al Consejo Científico su asesoramiento y dedicación durante la realización de los trabajos y a los operarios que han participado en las tareas de desmontaje del graderío su compromiso con la conservación de la Cueva de Nerja.

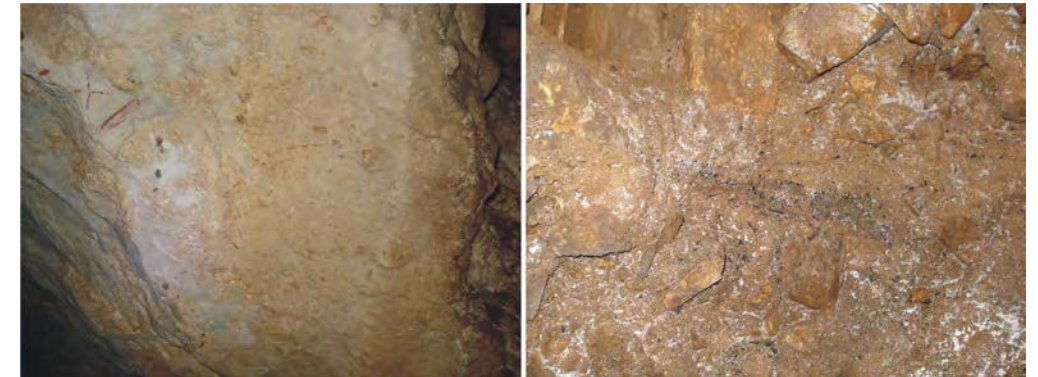


Figura 4. Algunos de los restos arqueológicos que permanecían ocultos tras el graderío. A la izquierda, motivos de arte rupestre; a la derecha, restos de un hogar.



Figura 5. A la izquierda, panorámica de la Sala de la Cascada en el año 1969 (tomada de Ortega et al. 1970). A la derecha, misma panorámica en 2013 una vez desmontadas las gradas.

REFERENCIAS

- Corrales, M., Sanchidrián, J. L., Carrasco, F., Hernández-Mariné, M., Calaforra, J. M., Sanchez-de las Heras, C., Pérez, A., Ruiz, A., Liñán, C. y Rosal, Y. 2013. Protocolo de Actuación ampliado relativo al desmontaje del graderío de la Sala de la Cascada y medidas correctoras de actuación. *Consejo Científico Asesor Cueva de Nerja*, 12 pp. Inédito.
- Dragovich, D. y Grose, J. 1990. Impact of tourists on carbon dioxide levels at Jenolan Caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management. *Geoforum*, Vol. 21, nº 1, 111-120.
- Carrasco, F., Liñán, C., Durán, J. J., Andreo, B. y Vadillo, I. 2002. Modificaciones de los parámetros ambientales de la Cueva de Nerja provocadas por la entrada de visitantes. *Geogaceta*, 31: 15-18.

- Gutiérrez, J. 2013. Proyecto para determinar las actuaciones a realizar para el desmontaje y retirada de los materiales de las gradas sito en la Sala de la Cascada de la Cueva de Nerja. *Colegio oficial de Peritos e Ingenieros Técnicos e Industriales de Málaga*, Visado 7073/2013, 107 pp.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo 2000. NTP 549: *El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior*. 6 pp.
- Liñán, C., Carrasco, F., Calaforra, J. M., Rosal, Y., del Garrido, A. y Vadillo, I. 2009. Control de parámetros ambientales en las Galerías Altas y Nuevas de la Cueva de Nerja (Málaga). Resultados preliminares. En: Durán, J.J., López –Martínez J (eds). *Cuevas turísticas, cuevas vivas*. ACTE, Madrid, 131-144.
- Liñán, C. y Rosal, Y. del, 2014. Natural ventilation of karstic caves: new data on the Nerja Cave (Malaga, S of Spain). *Environmental Earth Sciences*, Vol. 1, En: Andreo, B. (ed.): *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. In press.
- Ortega-Rodríguez, E., Garcés, R., Fusté, M., Cobos, A. y Mercado, J. A. 1970. La Cave de Nerja. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga, 182 pp.
- Sanchidrián, J. L., Liñán, C. y Rosal, Y. del, 2013. Informe-Memoria Actividad Arqueológica Preventiva: Control arqueológico de movimiento de tierra relativo al desmontaje y retirada de las gradas de la Sala de la Cascada de Cueva de Nerja (Málaga). *Delegación Provincial de Málaga, Consejería de Cultura*. Expte. 61/13, 54 pp.
- Rosal, Y. del, Martínez-Manzanares, E., Marín, F., Liñán, C. y Simón, M. D. 2007. Análisis de la calidad microbiológica aérea en el interior de la Cueva de Nerja. 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*, nº 24, J., 181-190.

Proceso de realización de moldes y réplicas de un espeleotema singular: el caso de "La Palmatoria", Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva)

Eleuterio Baeza-Chico⁽¹⁾ y Juan-José Durán-Valsero⁽²⁾

(1) Museo Geominero, Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid (e.baeza@igme.es)

(2) Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid (jj.duran@igme.es)

RESUMEN

En las cuevas turísticas es frecuente la presencia de elementos geológicos singulares de alto valor patrimonial. Muchos de estos elementos son espeleotemas de diversos tipos, algunos con un importante significado simbólico o representativo de la propia cavidad. Es los casos de elevada vulnerabilidad o fragilidad, es conveniente la realización de un molde que asegure la posibilidad de replicar el elemento en las condiciones óptimas, con diversos fines. Por un lado, asegurar la posibilidad de reponer el elemento en caso de vandalismo, robo o accidente; por otro, permitir la realización de réplicas en distintos materiales para usos diversos (expositivos, conmemorativos, didácticos, comerciales, entre otros). En este trabajo se detalla el proceso técnico de realización del molde de un espeleotema singular concreto (la denominada "Palmatoria", un bello espeleotema mixto epiacuático), especialmente representativo del patrimonio geológico inmueble presente en el interior de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, Sur de España). Este elemento posee un gran significado estético e histórico y una alta representatividad de los elevados valores geológicos de la cavidad, constituyéndose en uno de los iconos emblemáticos de la misma. Por ello, se ha considerado necesario garantizar su conservación, tanto en el sentido de protegerlo adecuadamente de posibles alteraciones naturales o antrópicas, como en el de realizar las acciones que permitan su restauración o reposición en el caso de que fuera necesario. En este último sentido, la confección de un molde de alta calidad y la replicación con diversos materiales y escalas asegura este objetivo.

Palabras clave: espeleotema, conservación, Gruta de las Maravillas, molde, réplica.

Process of making molds and replicas of a unique speleothem: the case of "The Candlestick" Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva)

ABSTRACT

The presence of unique elements of interest from the geological heritage point of view is common in show caves. Many of these elements are speleothems, some with a high value, symbolic or representative of the cavity itself. The cases of high vulnerability or fragility, is suitable for mold making that ensures the possibility of replicating the element in optimum conditions, with different objectives. On the one hand, to ensure the possibility to replace the element in the case of vandalism, theft, or accident; on the other hand, enable replicas on different materials for different applications (exhibition, commemorative, educational or commercial). This work details the technical making of the mold of a singular speleothem called "La Palmatoria", that means "The Candlestick", a beautiful mixed epiaquatic speleothem. This speleothem is representative of the geological heritage present in the interior of the Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, South Spain). This element has a great aesthetic and historical significance and is representative of the geological values of the cave, becoming one of its most emblematic icons. Therefore it is considered that it is necessary to ensure its conservation, protecting

it from natural or anthropogenic alterations, and carry out actions that allow its restoration or replacement if necessary. In this latter sense, the preparation of a high quality mold and replication with different materials and scales ensures this objective.

Keywords: conservation, Gruta de las Maravillas, mold, replica, speleothem.

INTRODUCCIÓN

Las cuevas turísticas contienen numerosos elementos geológicos singulares de alto valor patrimonial. Estos elementos están representados habitualmente por morfologías erosivas, sedimentos detríticos o espeleotemas de diverso tipo. En el caso de los espeleotemas, debido a su gran variedad (de origen, tamaño, forma y color) y belleza, es frecuente que algunos de ellos se constituyan en iconos o símbolos representativos de la cavidad que los alberga.

Un ejemplo de este valor simbólico de ciertos elementos puntuales del patrimonio geológico inmueble de una cavidad turística es la denominada "Palmatoria" de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva). Este singular espeleotema es una combinación de cristales calcícticos de origen epiacuático, con una estalagmita central, cuya resultado es un conjunto armónico, de gran belleza y espectacularidad (Figura 1). La Palmatoria tiene, además del valor intrínseco como espeleotema singular, un notable valor histórico, puesto que ha sido protagonista de algunas anécdotas relacionadas con las visitas de algunos personajes ilustres a lo largo de la dilatada historia de la Gruta de las Maravillas, que en el año 2014 cumple 100 años de su descubrimiento y habilitación, constituyendo un extraordinario ejemplo de cueva turística sostenible.



Figura 1. Espeleotema singular, denominado "La Palmatoria", presente en la Gruta de las Maravillas de Aracena. El diámetro aproximado de la forma circular exterior es de unos 20 cm.

Curiosamente, el de "La Palmatoria" onubense no es el único ejemplo emblemático conocido en una cueva europea de este tipo de espeleotemas de origen mixto. En la cueva rumana de Piatra Altarului (*Altar de Piedra*), ubicada en un espacio natural protegido de las Montañas Bihor y con un elevado nivel de protección dentro del mismo, debido a la cantidad y variedad de los espeleotemas que contiene, existe un ejemplar similar, que ha sido elegido como símbolo de la cavidad y utilizado como elemento representativo de la misma (Figura 2).



Figura 2. Espeleotema epiacuático similar a "La Palmatoria" de la Gruta de las Maravillas de Aracena, situado en la cueva rumana Piatra Altarului (izquierda), cuya imagen siluetada ha sido utilizada como marca de agua en material publicitario de la cavidad (centro y derecha).

Estos elementos emblemáticos no están exentos de riesgos de cara a su conservación. Por un lado, pueden producirse alteraciones de carácter más o menos natural o inducido antrópicamente de manera involuntaria; por otro, se han documentado casos de vandalismo, o expolio, vinculados, en ocasiones, precisamente al carácter emblemático de dichos elementos. Un caso paradigmático reciente es la agresión intencionada llevada a cabo por un visitante (rotura parcial y desaparición posterior) sufrida por un espeleotema con forma de mariposa que constituía el emblema de las famosas *Caverns of Sonora*, en Texas, EEUU. El día 21 de noviembre de 2006, un desaprensivo que visitaba la cueva formando parte de un grupo aprovechó un descuido del guía para mutilar una de las "alas" del extraordinario espeleotema. Se llegó a ofrecer 20.000 dólares de recompensa por la devolución del fragmento mutilado y robado, sin éxito, para intentar la recuperación del emblemático espeleotema.

También en España se han dado en algunas cuevas turísticas, en los últimos años, varios casos de vandalismo e intentos de hurto de algunos espeleotemas singulares. Afortunadamente, las medidas de seguridad y la actuación conjunta de los guías y gerentes, junto con las fuerzas y cuerpos de seguridad del Estado y la diligente maquinaria judicial han permitido, en todos los casos conocidos y denunciados, el adecuado castigo de los responsables, aunque los daños causados han sido de imposible reparación. Con estos antecedentes, parece claro que, entre las actuaciones de carácter preventivo que aseguren la adecuada protección del patrimonio geológico de una cueva turística debe estar la realización de las acciones que permitan la restauración o reposición de estos elementos emblemáticos en el caso de que fuera necesario.

La confección de moldes de alta calidad de elementos de pequeño y mediano tamaño es relativamente frecuente en el ámbito del patrimonio mineralógico y paleontológico (Baeza, 1995, 2000; Baeza y Llorente, 2004; Baeza et al., 2006, 2008). También este tipo de estrategias de conservación se ha aplicado a los objetos de arte tridimensionales (Pereira 1999 a y b). En este trabajo se describe el proceso de realización de un molde de alta calidad de "La Palmatoria" y la posterior realización de réplicas en diferentes materiales, a la misma escala que el original o a menor tamaño. Esta actuación, junto con otras medidas de protección, asegura la posibilidad de replicar el elemento en las condiciones óptimas, con diversos objetivos. Por un lado, permitiría reponer el elemento en caso de vandalismo, robo o accidente; por otro, permite, igualmente, la realización de réplicas en distintos materiales para los usos más diversos: expositivos, conmemorativos, pedagógicos, comerciales, entre otros.

MATERIALES Y MÉTODOS

El empleo de moldes y réplicas en el ámbito de la conservación de bienes culturales (y más recientemente, naturales) es relativamente habitual desde hace décadas (Fleischmann, 1979; Smith y Bruce, 1985). El desarrollo de ciertos materiales plásticos y resistentes, como la silicona, ha facilitado mucho esta labor (Chaney, 1989). En el caso de "La Palmatoria" de la Gruta de las Maravillas, las especiales condiciones del lugar donde se encuentra, a gran distancia de la boca de la cueva y con alta humedad relativa y la ubicación del espeleotema, en el interior de un *gour* parcialmente relleno de agua en su interior, así como el goteo de estalactitas situadas sobre el elemento a replicar *in situ*, han determinado, junto a la compleja morfología de la pieza, el método y los materiales que ha sido necesario emplear (Figura 3).



Figura 3. Transporte de materiales por el interior de la gruta y ubicación del espeleotema a replicar, en un gour con el fondo parcialmente ocupado por agua.

La morfología de la pieza a moldear y replicar presentaba unas características muy especiales, que ha condicionado el método empleado para la realización del molde. Su forma central de diábolo y la existencia de un borde superior estrecho y delicado, rematado con el ápice de la estalagmita que sirvió de nucleación al resto del espeleotema epiacuático, ha hecho necesaria la realización de un molde de una sola pieza para evitar rebabas en las zonas más visibles. Sin embargo, la carcasa ha tenido que confeccionarse en múltiples piezas, como se detallará posteriormente, y el propio molde ha debido cortarse in situ para permitir el desmoldeo y volver a ser reintegrado en laboratorio.

Las fases sucesivas del trabajo realizado, ordenadas cronológicamente han sido: 1) protección del original y su entorno, 2) fabricación del molde y la carcasa, 3) obtención del máster, 4) realización de réplicas en diversos materiales y 5) reproducciones a tamaño diferente del original.

Respecto a los diferentes materiales utilizados, en la tabla 1 se indican los más importantes, indicándose la composición, utilidad y otras características de interés.

Denominación	Función	Composición
Silicona RTV 3481	Material de moldeo	Polixiloxano
RTV 3081 F Curing agent	Catalizador de silicona	Compuesto orgánico de estaño
Film polietileno	Aislante separador	Polietileno
Thixo additive	Agente tixotrópico	Alquileter sulfato sódico
Blanco óxido cinc	Carga y pigmento	óxido cinc
Fluoline A	Consolidante/protector	Resina acrílica fluorada
Molikote spray	Separador/desmoldeante	Base alcohólica
Fetadur 55/63	Endurecedor Resina epoxy	Bisfenol A
Fetadit 55/63	Base Resina epoxy	Epiclohidrina
Escayola Alamo-70	Escayola dureza media	Sulfato cálcico hemihidrato
Escayola exaduro	Escayola alta dureza	Sulfato cálcico hemihidrato
Marmolina impalpable	Carga	Carbonato cálcico
Carbonato de cal ligero	Carga	Carbonato cálcico
Cosmoloid 80 H	Desmoldeante	Cera microcristalina

Tabla 1. Materiales utilizados en el proceso de realización del molde de "La Palmatoria".

Protección del original y su entorno

En primer lugar, sobre la superficie del gour se ha colocado una capa de polietileno resistente para no manchar los grandes cristales de calcita que tapizan la zona de trabajo. El ápice de la estalactita que goteaba de forma constante sobre la palmatoria, se ha rodeado con papel absorbente y cinta a modo de reservorio. El hecho de que la pieza a replicar se encontrara permanentemente mojada, suponía una ventaja a la hora de aplicar silicona sobre ella, por su carácter hidrófugo, aunque ha habido que eliminar parte del agua presente, que creaba pequeños charcos. Pese a ello, para mayor seguridad, se ha aplicado un desmoldeante en spray de base alcohólica que no deja ningún tipo de residuo. El material de trabajo se colocó fuera del gour en un entorno seguro a ambos lados del camino cercano, para evitar cualquier problema relacionado con vertidos accidentales.



Figura 4. Protección del entorno y colocación de los diversos materiales necesarios para llevar a cabo el molde.

Fabricación del molde y la carcasa

Para la fabricación del molde se ha utilizado silicona RTV-2 Silastic 3481 mediante colada y pincelado (Figura 5), catalizadas con catalizador rápido (3081F) al 8 % ya que el pequeño tamaño de la pieza lo permite y se acelera el proceso. Una vez iniciado el proceso de coagulación de ésta primera capa de silicona y antes de que termine de reticular, se aplica una segunda capa igual que la anterior pero añadiendo agente tixotrópico al 2 % en peso y se extiende mediante pincel y, posteriormente, mediante espátula humectada, por toda la superficie de la pieza. Se ha colocado, posteriormente, sobre todo el conjunto, una lámina de polietileno y se ha suavizado la silicona para evitar la formación de llaves accidentales.

El siguiente paso fue la fabricación de tres carcasas alrededor de la pieza, dejando libre la zona superior, donde posteriormente se construyó una cuarta carcasa para completar el armazón del molde y que servirá de base rígida al conjunto (Figura 6). Se decidió la utilización de escayola por la facilidad de aplicación, la posibilidad de realización de llaves y el control preciso de los tiempos de fraguado. Se ha utilizado una escayola de baja dureza, pero de calidad suficiente (Álamo-70). Se ha dotado a cada carcasa, una vez iniciado el fraguado, de llaves semicirculares y paralelepípedicas, pincelando y aislando cada una con una solución de jabón negro. Este modo de proceder se ha llevado a cabo hasta completar la serie de tres piezas (Figura 7). Posteriormente, se ha añadido una cuarta carcasa, de base plana, que corona el conjunto. Una vez fraguadas todas, se han numerado y extraído, más tarde, con ayuda de una espátula.

El molde de silicona se ha seccionado con un bisturí por un lateral y se ha desmoldeado muy lentamente, dada la extraordinaria fragilidad de los bordes de "La Palmatoria", formada por grandes cristales planos de calcita, imbricados entre sí. Se ha obtenido, así, un molde final de una sola pieza (Figura 8) que se selló, posteriormente en laboratorio, con silicona ácida especial. Mediante este procedimiento se ha conseguido salvaguardar la morfología original con gran detalle y sin riesgo alguno para el espeleotema (Figura 9).



Figura 5. Aplicación de silicona tixotrópica de forma puntual y fluida mediante colada.



Figura 6. Detalle de la palmatoria recubierta de silicona e inicio de la base para la construcción de la carcasa.



Figura 7. Fabricación de las cuatro piezas de la carcasa de escayola y sus llaves correspondientes.



Figura 8. Extracción de las piezas de la carcasa y del molde de silicona.



Figura 9. Aspecto de la Palmatoria tras el trabajo de moldeo y desmoldeo.

Obtención del máster

Una vez en el laboratorio, con las carcasas completamente secas e impermeabilizadas con resina acrílica (Fluoline-A, diluida al 50 % en acetona) y aplicado el desmoldeante, (cera microcristalina en *white spirit*) se procedió a vaciar una escayola dental (escayola Exaduro) previamente sometida a vacío para extraer las pequeñas burbujas generadas durante el batido en el interior del molde (Figura 10). Dicho molde nos ha servido, posteriormente, para enviar a la empresa de prototipado en 3D (fundición CAPA) y realizar las copias en bronce mediante el procedimiento de la cera perdida.



Figura 10. Máster de "La Palmatoria" en escayola de alta resistencia, realizado al mismo tamaño que el original.

Realización de réplicas en diversos materiales

Entre los materiales más adecuados para imitar el original están las siguientes resinas: poliuretano transparente, epoxy y poliéster (Hildreth-Werker y Werker, 2006). Todos ellos deben incluir la pigmentación y las cargas necesarias para imitar al original. Para poder tener el molde a punto con estos materiales de alta fluidez, fue necesario sellar con silicona ácida y una pequeña gasa, el corte practicado en el molde durante su extracción. Se ha llevado a cabo un vaciado en epoxy de dos componentes (Fetadit 55/63 de Feroca) cargado con polvo de mármol de baja granulometría y carbonato de cal ligero, así como blanco de zinc como pigmento (Figura 11). Para el vaciado de la resina y dado el gran tamaño del molde así como su carácter exotérmico, fue necesario efectuar el vaciado en múltiples etapas.



Figura 11. Réplica de "La Palmatoria" realizada en resina epoxy, al mismo tamaño que el original.

Posteriormente, se ha realizado, con la colaboración de la empresa CAPA, el vaciado de piezas en bronce a escala 1:1. Se trata de una aleación de bronce silíceo ($\text{Cu Si}_3 \text{Mn}$) de alta dureza, mediante el procedimiento de la cera perdida, para lo cual se ha realizado un molde en silicona, sobre éste se ha obtenido una réplica en cera, a la que se ha aplicado, en primer lugar, un baño cerámico (Molochite) y posteriormente chamota (una mezcla de escayola y ladrillo pulverizado). La cera se funde, con recuperación, en autoclave y en su hueco se vacía el bronce a 1250 °C. en un horno de inducción, con recubrimiento de grafito.

Reproducciones a tamaño diferente del original

El proceso ha consistido en realizar una copia a una escala diferente de la original. En este caso se ha realizado un máster a $\frac{1}{4}$ del tamaño original, mediante un prototipado en 3D con un escáner 3DROMER Ra-733051 (3D Reshaper). Posteriormente, una vez obtenida la imagen tridimensional, se ha pasado a una impresora zprinter 650 que utiliza un material (Zp 151) al que se hace fraguar mediante un líquido, logrando una resolución de 87 micras. El vaciado posterior se ha realizado en bronce con el mismo proceso y características que las piezas a escala 1:1.

ALGUNAS REFLEXIONES FINALES A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las cuevas turísticas presentan numerosos elementos geológicos que forman parte del patrimonio inmueble de las mismas, de gran belleza y fragilidad. En ocasiones, algunos de estos elementos son representativos y emblemáticos de la cueva que los contiene, convirtiéndose en iconos o símbolos de la misma.

Muchos de estos elementos son muy vulnerables, debido a diferentes razones: su situación, a veces cercana a los caminos, la fragilidad intrínseca de algunos tipos de espeleotemas, la extraordinaria belleza o singularidad de los mismos y su potencial atracción, son algunas de ellas. Esta realidad obliga a considerar la existencia de un riesgo de deterioro, rotura o pérdida de estos elementos debido a actos vandálicos, por accidente u otras posibles causas.

La realización de moldes de alta calidad y réplicas de elementos geológicos singulares del patrimonio inmueble subterráneo es una medida sencilla, barata y eficaz, que complementa cualquier estrategia de conservación y protección integral de una cueva turística.

La combinación de las más modernas técnicas de moldeo y replicado, con la utilización de los mejores materiales disponibles, ha demostrado, en el caso de "La Palmatoria" de la Gruta de las Maravillas, que este tipo de actuaciones son aplicables a cualquier elemento geológico, con independencia de su complejidad y fragilidad, sin causar daño alguno al elemento a replicar ni a su entorno, siempre y cuando estas actividades estén perfectamente estudiadas, planificadas y realizadas por profesionales competentes, con la autorización, supervisión y control de los gestores de la cueva.

La elaboración de moldes de alta calidad y réplicas de diferentes materiales y a distintas escalas de elementos emblemáticos de una cavidad posee numerosas ventajas y aplicaciones. Además de la más importante, la posibilidad de reposición de una parte o la totalidad del elemento en caso necesario (por rotura o pérdida debida a vandalismo o accidente), existen múltiples usos posibles de las réplicas: conmemorativos, pedagógicos, comerciales, propagandísticos, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

A Manuel Durán, por su decidido apoyo y su ayuda sobre el terreno durante todo el proceso de elaboración del molde. Al personal de la Gruta de las Maravillas por la asistencia en la gruta. A la empresa fundición CAPA, por su colaboración en el replicado con diferentes materiales y a diferentes escalas.

REFERENCIAS

- Baeza, E. 1995. Las réplicas en Paleontología. Técnicas y materiales de moldeo y vaciado. *Tierra y Tecnología*, nº 11. pp. 7-13 Madrid.
- Baeza, E. 2000. El uso de copias y réplicas de objetos singulares. Su justificación en la actualidad. *Boletín de Productos de Conservación*, nº 46, pp. 2-3. Madrid
- Baeza, E. y Llorente Bárcena, M. 2004. Patrimonio paleontológico de alto valor científico y exposiciones itinerantes: aplicación de técnicas y métodos de conservación al registro de grandes mamíferos plio-pleistocenos (Fonelas P-1, Cuenca de Guadix-Baza, Granada). *XX Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología*, Libro de resúmenes pp. 25-26. Alcalá de Henares.
- Baeza, E. Lozano, R. P., de Frutos, M. C. y De la Fuente, M. 2006. Reproducción de una cavidad miarolítica del granito de La Cabrera (Madrid) en el Museo Geominero (Instituto Geológico y Minero de España). *Boletín Geológico y Minero*, vol. 117, nº 3, pp.457-465
- Baeza, E., De Frutos Sanz, C., Gutiérrez-Marco, J. C. y Rábano, I. 2008. Realización de una gran réplica icnológica en las cuarcitas del Ordovícico Inferior del Parque Nacional de Cabañeros (Castilla-La Mancha): aspectos técnicos y aplicaciones. *Resúmenes XXIV Jornadas de la SEP*, pp. 19-20, MUJA, Colunga.
- Chaney, S. 1989. Mold making with room temperature vulcanizing silicone rubber. In R.M. Feldman, R.E. Chapman, y J.T. Hannibal (Eds.), *Paleotechniques*, pp. 284-304. Knoxville,.
- Fleischmann, M. 1979. Open-face mold making. *Curator*, vol. 22 (4), pp. 265-270
- Hildreth-Werker V. y Werker J. C. 2006 (Eds.) Cave Conservation and Restoration. *National Speleological Society* 500 pp.
- Pereira, C. 1999a. Facsímiles de objetos de arte tridimensional, 1ª parte: moldeo. *Restauración y Rehabilitación*, 25, pp. 66-71.
- Pereira, C. 1999b. Facsímiles de objetos de arte tridimensional, 2ª parte: vaciado. *Restauración y Rehabilitación*, 26, pp. 66-71.
- Smith, A. y Bruce, L. 1985. The Joy of casting. *Explorer*, 27(4):4-5, pp. 22-24.

La Cueva del Yeso de Baena: ejemplo de conservación y protección

José Antonio Mora-Luque

Presidente de la Asociación Espeleológica Baenense G.A.E.A.
Ayuntamiento de Baena, Plaza de la Constitución, 1. 4850 Baena (Córdoba)
(prensa@ayto-baena.es)

RESUMEN

Como cuarta cueva de mayor desarrollo horizontal de España y la primera a nivel provincial, la Cueva del Yeso de Baena es la única cavidad de génesis freática existente en el valle del Guadalquivir. Alberga una de las mayores colonias andaluzas de murciélagos, con un centro de cría constituido por seis especies, así como una serie de endemismos biológicos actualmente en estudio, como los pseudo-Niphargus. La parte más amplia de la cavidad, que coincide en su extremo superior con la nueva boca, abierta para la visita turística, tiene un recorrido de casi 200 metros. Se desarrolla sobre zonas de grandes proporciones, superando las galerías en algunos casos los 13 metros de alto y más de cinco de ancho. Las visitas se realizan por la sala de las Raíces, galería de la V, sala de los Cristales, lago de los Sumideros, galería de los Sumideros, lago de los Niphargus y sala del Pozo. La parte superior de la cavidad, representada en su inicio por la boca clásica de entrada a la misma, tiene un acceso más difícil, lo que la hace más apta para la práctica de deporte de aventura, una variante turística cada vez más demandada. Las numerosas galerías como el paso de la S, paso de la Grieta, galería del Chorizo, sala del Laminador, galería del Meandro, galería del Tobogán, galería G.A.E.A., galería G-40 y la recién descubierta galería Angulo, de 106 metros de desarrollo, conforman esta cueva de yeso.

Palabras clave: conservación, historia, murciélago, protección, yeso.

The Gypsum Cave of Baena: an example of conservation and protection

ABSTRACT

As fourth largest cave horizontal development of Spain and the first at the provincial level, Gypsum Cave of Baena is the only existing water cavity genesis in the Guadalquivir valley. It houses one of the largest bat colonies in Andalusia, with a breeding center consists of six species, as well as a number of biological endemism under study, pseudo-niphargus. The widest part of the cavity, which coincides at its upper end with the new mouth open for tourist visits, has a distance of almost 200 meters. It develops on areas of proportions, surpassing the galleries sometimes 13 meters high and five wide. Tours are conducted by the living Roots, V gallery room, the Crystals, the lake drains, sinks gallery, Lake of the room Niphargus and Pozo. The top of the cavity, represented initially by classical inlet, has a more difficult access, making it more suitable for the practice of adventure sports, a tourist variant increasingly demanded. The many galleries as the passage of the S, passing the crack, Chorizo gallery, room Laminator, Meander gallery, gallery slide, GAEA gallery, Gallery G-40 and the newfound gallery Angulo, 106 meters of development, make this cave gypsum.

Keywords: conservation, history, bat, protection, gypsum.

INTRODUCCIÓN

La Cueva del Yeso se encuentra situada a ocho kilómetros de Baena, en dirección Norte y en su mismo término municipal, en un lugar conocido como Puente de "la Maturra". Su nombre lo recibe de los materiales en que se encuentra alojada, los yesos triásicos de las Unidades Béticas (Figura 1).



Figura 1. Entorno de la Cueva del Yeso de Baena. Ladera norte (izq.) y ladera oeste con la boca de entrada a la cueva (der.).

Este importante entramado subterráneo está formado por una amplia red de galerías cuyo desarrollo conocido supera los 2.600 m (Mora-Luque *et al.*, 2011) (Figura 2). La cavidad presenta un desnivel de menos 36 metros. En desarrollo horizontal y constituye la mayor cavidad en yeso de la provincia (Mora-Luque 1995 y 2001), la tercera mayor de Andalucía, la cuarta mayor de España y la trigésimo segunda a nivel mundial (González-Ríos 1996, Calaforra, 1996).



Figura 2. Topografía más reciente de la cavidad.

INTERÉS DE USO PÚBLICO Y DE ADECUACIÓN AMBIENTAL

La cavidad presenta unas condiciones magníficas para su uso público en varias direcciones:
 1.- Utilización para una actividad muy de moda como es el deporte de aventura (Figura 3).



Figura 3. Sala del pozo (izq.) y Galerías del sector este (der.).

2.- Lugar como actividad formativa por sus características geomorfológicas (Figura 4).

3.- Como actividad turística en general, con visitas guiadas para distintos tipos de colectivos.



Figura 4. Cristales estalactíticos de gran desarrollo (izq.) y espeleotema coraloides parietales (der.).

HISTORIA

El primer relato sobre esta cueva nos lo deja la nada despreciable tradición oral. Entre los lugareños más viejos la cavidad era conocida como la "Mina", seguramente por la peculiar morfología de sus galerías (Figura 5). La cavidad era visitada con el fin de recoger guano de murciélago, para ser utilizado como fertilizante en los numerosos huertos existentes por aquel entonces en el valle del Guadajoz. Existía la creencia de que la mina era obra de moros y estaba conectada con las torres árabes existentes en la comarca (Torre Paredones y Torre del Montecillo).



Figura 5. Galería del Chorizo (izq.) y Laminador y meandro desfondado (der.).

En 1945 se publica la primera noticia escrita sobre la Cueva del Yeso de Baena, en esta ocasión nombrada como la cueva de las "Palomas", el segundo nombre que recibe la cavidad, probablemente tomado de su entorno más próximo, conocido como Salinas de Cuesta Paloma. El autor de este artículo es Antonio Carbonell Trillo-Figueroa y se publica en el Boletín nº 53 de la Real Academia de Ciencias, Letras y Nobles Artes de Córdoba, con el título *Espeleología Cordobesa* (Carbonell, 1945). Desde este momento se abre la veda a las exploraciones de todo tipo y procedentes de todas partes (Molina-Muñoz 1981, Magariño, 1996).



Figura 6. Primeras exploraciones documentadas años 60 (izq.) y exploraciones años 70 (der.).

Es a mediados de los años 60 del pasado siglo cuando se explora gran parte de la cavidad y se levantan los primeros planos, ampliando y mejorando los ya existentes a finales de la década de los 70 (Figura 6).

Las décadas de los 70 y 80 se cierran para esta cavidad con una serie de eventos puntuales de tipo educativo, para retomar la actividad con renovada fuerza en el primer lustro del siglo XXI, concretamente en el 2004, cuando las autoridades políticas de la localidad empiezan a mostrar su interés por la protección y conservación de este medio encargando a la Sociedad Espeleológica local G. A. E. A. el proyecto de declaración de Monumento Natural de la cueva, amparándose en el Decreto 225/1999 de 9 de noviembre, de Regulación y desarrollo de la Figura de monumento natral de Andalucía. En el artículo cuatro del citado decreto se establecen los tipos

que pueden ser objeto de declaración: geológicos, bióticos, geográficos, ecoculturales y mixtos. De estos cuatro tipos podemos ver perfectamente representados en la cueva del Yeso de Baena los geológicos, los bióticos y los mixtos (Figura 7). Se trata de un expediente pendiente de resolución.



Figura 7. Elementos de interés en la cueva del Yeso. Geológicos, espeleotemas (izq.) y fauna troglobia pseudo-niphargus (der.).

Es en el año 2009 cuando se inicia un estudio multidisciplinar conjunto en el que participan las sociedades Espeleológicas G. A. E. A. de Baena y G-40 de Priego de Córdoba (Mora-Luque, 2011) (Figura 8).



Figura 8. Grupo de trabajo de exploración y topografía en el año 2009.

Como fruto de este trabajo se hace una nueva topografía que complementa las ya existentes, con la ampliación del desarrollo conocido de la misma en más de 826 metros, casi un tercio de lo conocido hasta ese momento. También se localizan los posibles puntos de conexión con el exterior (Figura 9), así como los elementos que incorporan al sistema los puntos de máxima vulnerabilidad derivada de las actividades de naturaleza antrópica externa, principalmente actividades de naturaleza agrícola.

Con estos datos facilitados al Ayuntamiento de Baena, el Consistorio decide implicarse en los trabajos de puesta en valor de una parte de la cueva. Fue a finales del año 2009, una decisión tomada por unanimidad entre todos los grupos políticos que integran la corporación municipal, que decidieron comprar los terrenos que afectan a la parte más vulnerable de la cavidad, la que está más próxima a la superficie o más en contacto con el exterior.



Figura 9. Topografía de la Cueva del Yeso trazada sobre la ortofoto.

A finales del 2009 termina el estudio multidisciplinar iniciado a finales de 2008 por parte de las sociedades espeleológicas G. A. E. A. de Baena y G-40 de Priego, resultando de dicho estudio la obtención del primer premio de investigación Espeleológica de Andalucía 2010 (Figura 10).

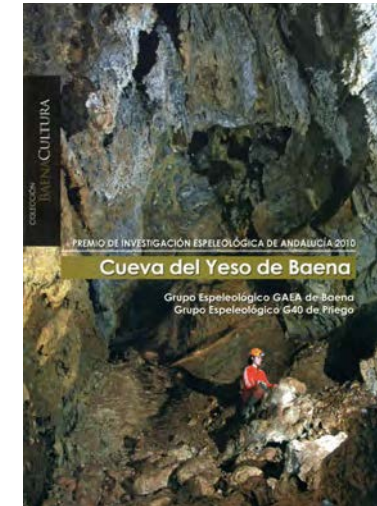


Figura 10. Portada de la publicación conjunta G. A. E. A. de Baena y G-40 de Priego.

Este mismo año, por parte del Ayuntamiento de Baena, se encargan dos estudios técnicos, el primero al Departamento de Ingeniería Geológica y Minas de la Universidad de Castilla la Mancha. El citado estudio planteaba la conexión de la galería inferior que se pretende poner en valor mediante un túnel de tres por tres metros, con una longitud de entre 10 y 12 metros y dos chimeneas circulares de ventilación y evacuación de un diámetro de 1.5 metros y una longitud de entre 20 y 25 metros.

El segundo estudio relacionado con la comunidad de quirópteros existentes en la cavidad hay que atribuirlo a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes de la misma universidad. Durante el año 2010 se instaló un cierre perimetral en la única boca de entrada conocida en ese momento para evitar los actos vandálicos que se habían venido produciendo por parte de visitantes incontrolados. Esta verja, consistente en un cuadrado en torno a la actual boca de entrada, ocupa una superficie de unos 30 metros cuadrados, con una altura de 2,30 metros, permitiendo sin dificultad la entrada y salida de quirópteros y limitando la entrada no deseada de visitantes. Posteriormente, se reforzó esta verja con un segundo cierre perimetral de acceso, reforzado con barrotes de hierro, un material que hace más difícil la entrada clandestina.

En enero de 2011, el Ayuntamiento de Baena contrata los servicios de Alberto Fijo León para la realización de un trabajo de seguimiento y evolución de la colonia de murciélagos en el interior de la cavidad. Los trabajos en la cueva dan comienzo en marzo, iniciándose los mismos con la colocación en el interior, dentro de la galería afectada por el proyecto de explotación turística, de dos sensores de movimiento (TRAILMASTER TM700V) y un detector registrador de ultrasonidos (Song Meter SM2.) Dicho seguimiento generó a lo largo del año cinco informes parciales y uno final, del cual se deduce que en la zona afectada no se detecta la presencia de ninguna especie de murciélago durante los meses de noviembre y diciembre, por lo que se asume que tampoco habrá durante enero y febrero (Figura 11).

Paralelamente se hacen seguimientos por parte del Grupo de Investigación en Sistemática y Ecología de quirópteros de la Estación Biológica de Doñana (CSIC). Por parte de la empresa pública EMASA, se realizan los censos.



Figura 11. Trampas para captura de murciélagos y colocación de aparatos.

Durante el año 2013 se firma un convenio entre el Ayuntamiento y el profesor José María Calaforra Chordi para el seguimiento durante un año de las variables ambientales de la cavidad: humedad relativa, temperatura, presión atmosférica interna, CO₂, gas radón, PH, conductividad del agua y variación de los niveles en las zonas inundadas de la cavidad.



Figura 12. Toma de datos microclimáticos de las estaciones interiores.

En febrero de 2014 se inician los trabajos de localización de los puntos internos de conexión con el exterior, para lo cual, sobre la sala final de la galería de las raíces, se hace una superposición exterior de la superficie de esta última sala, con el fin de determinar los puntos de prospección que nos conduzcan a la localización de la nueva apertura. Para ello, se realizó en exterior una plataforma de veinte metros cuadrados, una superficie sobre la que se hicieron unas pequeñas perforaciones verticales de un diámetro de 70 milímetros, hasta la conexión con la sala interior (Figura 13).



Figura 13. Sondeos realizados para la localización de la cavidad.

Desde este punto, se hizo un plano del relleno de la boca primitiva, superponiéndolo con el exterior, lo que permitió a una cota sobre la plataforma de perforación de menos seis metros la excavación de un callejón y la localización de la boca primitiva, esto es, la apertura de la futura boca de entrada. Una vez localizada, se procede a su cierre mediante un muro de ladrillo, para evitar la modificación de las condiciones ambientales internas. Sobre el callejón abierto se pretende construir una sala de unos 30 metros cuadrados, herméticamente cerrada con dos puertas que en ningún caso permanecerían abiertas a la vez. Se trata de un habitáculo que servirá como centro de interpretación y estancia previa a la entrada en la cueva (Figura 14).



Figura 14. Inicio de la construcción de la sala de recepción y puerta de entrada (esquina derecha).

La parte excavada para localizar el punto vertical, que se rebajó en su día un metro sobre la cota inicial, una vez ejecutado el proyecto se volverá a completar el relleno del rebaje con el fin de evitar percolaciones de agua y evitar la penetración rápida de las aguas de la lluvia a la cueva.

CONCLUSIONES

El proceso de la puesta en valor turístico de la Cueva del Yeso de Baena ha intentado ser lo menos agresivo posible para este entorno subterráneo de indudable valor. Para ello se han estudiado previamente los condicionantes bióticos (colonias de quirópteros, endemismos), geoambientales (microclimatología, espeleotemas),

explorativos (topografía espeleológica de precisión) e ingenieriles (construcciones e infraestructuras de mínimo impacto). Todo ello de be asegurar que su adecuación turística, siempre con visitas de grupos reducidos e infraestructura interior mínima, influya lo menos posible sobre los valores naturales que la cavidad alberga en la actualidad.

REFERENCIAS

- Carbonell-Trillo, A. 1945. Espeleología Cordobesa, *Boletín nº 53 de la Real Academia de Córdoba*.
- Calaforra, J. M. 1998. Karstología de yesos. *Universidad de Almería y Servicio de publicaciones Instituto de Estudios Almerienses*.
- González-Ríos, M. J. 1996. Grandes cavidades de Andalucía, *Subterránea* 6.
- Magariño, F. 1996. II Campamento Espeleológico Intersocial. Operación Fuente Alhama, *Revista Omeya* nº 5. Diputación Provincial de Córdoba.
- Molina-Muñoz, J. A. 1981. Cuevas de yeso de la provincia de Málaga, Aniversario de la Sociedad Excursionista de Málaga, publicación especial, núm. 75.
- Mora-Luque, J. A. 1995. La cueva del yeso de Baena, *Deporte y Naturaleza* nº 7.
- Mora-Luque, J. A. 2001. Cuevas y Simas de la provincia de Córdoba, *Estudios de Medio Ambiente, Diputación Provincial de Córdoba*.
- Mora-Luque, J. A. et al. 2011. Cueva del Yeso de Baena, premio de investigación espeleológica de Andalucía 2010, *Grupo Espeleológico GAEA de Baena y Grupo Espeleológico G40 de Priego*.
- Mora Luque, J. A. 2006. *Cuevas y Simas de la Provincia de Córdoba*. Diputación Provincial de Córdoba.
- Molina Muñoz, J. A. 1980. *Los Karst en Yesos de la Provincia de Málaga*.

La Cueva del Viento, otra forma de interpretar y percibir el mundo subterráneo turístico

A. Láinez⁽¹⁾, Francisco M. Mesa⁽¹⁾, Conny Finke⁽¹⁾, Dragan Milenkovic⁽²⁾

(1) Centro de Visitantes Cueva del Viento, Ctra. de los Piquetes 51, 38480 Icod de los Vinos. Tenerife, Islas Canarias (alfrelainez@hotmail.com; fmesaluis@cuevadelviento.net; fabelwesen@hotmail.com)

(2) Parque Nacional del Teide. Guía Interprete Cueva del Viento. C/ La Vera nº 2, Vda. 6. 38390 Santa Ursula. Tenerife. Islas Canarias (milenkovic.dragan3@gmail.com)

RESUMEN

Desde que abrió sus puertas el 20 de Junio del 2008 esta cavidad volcánica, 5ª mayor del mundo en terreno volcánico, y primera de Europa, está siendo un referente a la hora de interpretar nuestro patrimonio subterráneo, dedicado al turismo. Ya no es solamente por la belleza del entorno de la Cueva, paisaje de medianías del Norte de Tenerife, ni por ella misma, sino por el modo en el que se interpreta la visita. El cariño y la implicación de los guías en la difusión de los recursos, la hace una visita diferente. Y difiere de otro tipo de visitas a cavidades turísticas, donde prevalecen las luces, los focos, la música, etc. En la visita a la Cueva del Viento, predomina el estado natural del patrimonio a interpretar, al visitante le asombra la Flora, la Fauna, las vistas de los Volcanes (Teide y Pico Viejo), los afloramientos de lavas, la historia y la acción de la mano del hombre, en la construcción de caminos reales, casas antiguas tradicionales y su poder para estructurar el terreno en terrazas (abalancar). Todo culmina en el fascinante mundo del silencio y la oscuridad de la Cueva. Los turistas se ponen en la piel del volcán, de su poder y de su fuerza, en la creación de conductos para llevar la lava hasta el mar. La visita se estructura en tres partes diferenciadas: una presentación del grupo de 16 personas con el guía, utilizando como recursos interpretativos un panel, una audiovisual y el contacto directo, que confiere el grupo reducido. La segunda parte, consiste en un traslado desde el Centro de Visitantes hasta las inmediaciones de la Cueva, donde caminaremos por el bosque, en una zona de medianías. Durante unos 20 minutos, el visitante podrá disfrutar de los atractivos de la zona. Y en la tercera parte, estaremos inmersos en el mundo subterráneo, con la perspectiva que nos da una visita espeleológica. Se desarrolla la ruta, buscando de forma intencionada que el visitante tenga una "experiencia" basada en cuatro premisas fundamentales: la diversión, el aprendizaje, la exclusividad y la participación. En estos casi seis años ya han pasado unas 72.000 personas, por nuestra cueva, que nos han dejado sus comentarios en nuestros diez libros de visitas, que respaldan y avalan nuestro gran trabajo diario. Este recurso, debido a su gran valor natural, tanto desde el punto de vista geológico, paleontológico, biológico, etnográfico y cultural, debe ser protegido y cuidado por todos. Con lo que, seguimos realizando acciones, para que se den los pasos necesarios para la creación de una ley encaminada en este sentido. La huella que intentamos dejar busca marcar un antes y un después en el conocimiento y sensibilidad del visitante, hacia el mundo subterráneo. "Como canario, tinerfeño, ciudadano del mundo, me siento orgulloso de saber que esta joya geológica, reside en Tenerife. Si además se interpreta de la forma magistral como lo hacen. Si además se trasluce el corazón de quienes lo interpretan, ya no hay formas de agradecer la visita a este maravilloso mundo subterráneo" (Juan Antonio Jorge Peraza. Premio Tenerife Rural 2009).

Palabras clave: Interpretación, Cueva del Viento, lava, Tenerife, volcán, Turista.

The Wind Cave, another way to interpret and perceive the underworld world

ABSTRACT

Since opening its doors on June 20, 2008 this volcanic cavity, 5th largest in the world and the largest in Europe, remains a reference to our underground heritage, dedicated to the inhabitants of the island and its visitors. It is

not only the sheer beauty of the surroundings of the cave in the upper foothills of northern Tenerife that make a visit unforgettable, but mainly the way the cave is presented. The dedication and personal involvement of the guides allows a different approach. It is very different from other kinds of presentation which usually involve lights and music. At the Cueva de Viento de natural state of the cave and its direct environment predominates: the flora, the fauna, the views to the two largest volcanoes Teide and Pico Viejo, the pine forests, the lava flows and outcroppings as well as the traditional houses, the ancient paths laid by the forefathers and the terraced fields. It all culminates in the fascinating world of silence and the darkness of the cave. The visit is organized into three distinct parts: The first part is held at the visitors centre for a group of no more than 16 people and entails an audiovisual presentation, showing lava flows and eruptions in Tenerife and other parts of the globe and gives an insight into the world of volcanoes. The second part consists in a transfer from the visitors centre to the vicinity of the cave and a short but very interesting walk through pine forest and glades. For about 20 minutes the visitors can enjoy the attractions of the area, the forest, the birdsong, the fresh mountain air. During the third part the visitors will be immersed in the underworld, experiencing an volcano from the inside, learning about life that exists in darkness and how darkness and silence effect oneself. In the last six years 72.000 visitors have passed through the cave and have written their comments in our guest books, evaluating and supporting our daily work. These volcanic caves have to be protected and cared for worldwide for their natural value in terms of geological, paleontological, ethnographic and cultural aspects and steps have been taken for creating the necessary laws. What we are trying to achieve is to awaken sensibility and awareness for underground phenomena. "As canary, Tenerife, world citizen, I feel proud to know that this geological gem lies in Tenerife. If addition is interpreted on magisterial way they do. If also the hearts of those who interpret it transpires, there are no ways to thank this wonderful visit to the underworld" (Juan Antonio Jorge Peraza. Tenerife Rural Award 2009).

Keywords: Interpretation, Wind Cave, lava, Tenerife, volcano.

Nota del editor: Citas introducidas por los autores, provenientes de diversas fuentes y de los Libros de Visita del Centro de Visitantes de la Cueva del Viento. Tomos I-X. 2008 -2014.

"Cualquier persona que haya obtenido algún placer de la Naturaleza, debería devolverle algo"
Gerald Durrell, Naturalista.

La Naturaleza nos enseña al ser humano un sinfín de bellezas cada día.

"08/08/2013 Paradójicamente en la Cueva del Viento me habéis hecho ver la luz. Seguid siendo auténticos y no permitáis que nadie desvirtúe vuestro trabajo divulgativo."
Saludos Nico. Vigo

INTRODUCCIÓN

Practicando la espeleología, es como podemos acercarnos a una de las facetas de este fascinante universo que nos rodea: el mundo subterráneo.

Los espeleólogos, con el afán de descubrir, explorar y conocerlo, hemos puesto nuestra vida, alma y corazón en ir desentrañando los misterios de las diferentes cavidades que existen en nuestra tierra, una de ellas son las Cavidades Volcánicas, formadas por extensas coladas de lava fluida, procedentes de un tipo de volcán denominado "de tipo Hawaiano". Por ese motivo, y debido a su continua formación geológica, las islas Hawaianas amparan en su interior las cuatro mayores cavidades volcánicas del planeta.



Figura 1. Galerías del primer nivel Cueva del Viento-Sobrado.

LA CUEVA DEL VIENTO

En otro gran archipiélago volcánico, el Canario, se encuentra la 5ª cavidad que las sigue en este planeta, la Cueva del Viento, con 18.500 metros explorados y topografiados en la actualidad por parte de los espeleólogos del Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare (G.E.T. Benisahare), con posibilidad de unión con otra cueva cercana a 150 metros, de 3 km. de desarrollo, con lo que se podría llegar a sumar 21.500 metros, pasando a ser la 4ª cavidad mayor después de las hawaianas mencionadas anteriormente (Figura 1).

Los espeleólogos del GET Benisahare han continuado la labor de los pioneros en la exploración de la misma: los miembros de la Sección de Exploraciones Vulcanoespeleológicas de La Guancha, que fueron los primeros en adentrarse en sus galerías en los años 1969, topografiando y explorando en aquellos años 6.181 metros, siendo por aquel tiempo la Cueva del Viento la mayor del mundo en estas dimensiones.

Hoy en día la topografía realizada por del Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare aún sigue pendiente de que algún organismo se interese por su publicación. Aquellos sucesivos descubrimientos fueron poco a poco generando un gran interés por nuestra Cueva (Lainez et al. 2006ª y b, AA.VV. 1995). A ello vinieron a sumarse diferentes grupos de bioespeleólogos de la Universidad de La Laguna: se empezó a descubrir y a catalogar unas 107 especies de fauna invertebrada que habitan la Cueva, 44 de las cuales troglobias, y 5 endémicas, únicas en el mundo.

LOS DESCUBRIMIENTOS. ARQUEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA

Al mismo tiempo que se realizaban estos estudios espeleológicos, biológicos y topográficos, los espeleólogos descubrieron restos de animales de gran tamaño cuya existencia en Tenerife u otras islas se desconocía hasta la fecha, destacando entre ellos el lagarto gigante "Galliotia goliath", descubierto por el gran maestro, vulcanólogo y naturalista D. Telesforo Bravo Expósito, junto con restos de una rata gigante, la denominada "Canariomys bravoii", y otros tantos de pájaros y fauna desconocida (Rando y López, 1996). A estos descubrimientos cabe añadir los valiosos hallazgos arqueológicos que se encontraron en algunas de las entradas al complejo vulcanológico, tal como enterramientos, que se remontan al período prehistórico.



Figura 2. Laberinto de Maestro Pepe. Cueva de Felipe Reventón, cercana a la Cueva del Viento.

La abrumadora complejidad de su formación geológica, desarrollada en un amplio laberinto (Figura 2) que se extiende por tres niveles de galerías, no conociéndose ninguna otra descrita al día de hoy en el mundo, junto con lo anteriormente expuesto, hace que la Cueva del Viento sea un auténtico museo viviente y único que entre todos debemos de cuidar y proteger, muchísimo más de lo que se está haciendo en la actualidad.

ADECUACIÓN TURÍSTICA DE LA CUEVA DEL VIENTO

Este conjunto de descubrimientos llevó al Excmo. Cabildo de Tenerife, a través del Museo de Ciencias Naturales del Cabildo de Tenerife y en colaboración con el Ayuntamiento de Icod de los Vinos, a ejecutar un proyecto de acondicionamiento de un tramo de la Cueva del Viento que posteriormente pasaría a ser gestionado por la empresa Ideco S.A.

Los primeros trabajos se realizaron en el año 1994, asesorados por espeleólogos, bioespeleólogos y técnicos del Museo, contando también con la gran ayuda y el apoyo de los amigos de Asociación de Cuevas Turísticas de España (A.C.T.E.). Previamente a la apertura, se fue configurando un equipo humano multidisciplinar preparado, que fuera capaz de dar a conocer aquella maravilla de nuestro patrimonio natural con los conocimientos requeridos, pero también con ilusión, pasión, y respeto hacia el valioso entorno medioambiental, etnográfico y geológico de la Cueva del Viento (Figura 3).

D. Sergio Socorro, Técnico del O.A.M.C. del Cabildo de Tenerife, junto con Alfredo Lainez, Instructor de la Escuela Española de Espeleología y Francisco Mesa, espeleólogo y biólogo, elaboraron una ruta didáctica única en este complejo, a la que fueron añadiendo su experiencia, dedicación, y voluntad de protección del sitio.

13/10/2012 *¿De dónde vinimos? De la naturaleza, y ella es la que nos da vida ¿no deberíamos valorarla? Esta gente lo hace... Ayúdenles.*
Miriam

29/11/2012 *He visitado cuevas en muchos países y esta manera de presentarla es el mejor que he encontrado nunca.*

Después de 2 años de funcionamiento se unió a este equipo el guía alemán autónomo Dragan Milenkovic. Posteriormente, considerando el aumento de la demanda y del número de visitantes, se incorporó a Cornelia Finke, diplomada en turismo y administrativa, que le ha dado ese toque de amabilidad, cariño y de atendimiento al público visitante.

A medida que la demanda de nuestros visitantes extranjeros ha ido aumentando, se han programado una serie de cursos para Guías Intérpretes de la Cueva del Viento, y se ha sumado al equipo nuestra guía francesa autónoma, France Gavarone, y otros guías autónomos que han unido sus conocimientos a los del equipo, compartiendo nuestra pasión, así como la divulgación de la existencia de esta visita tan excepcional dentro del turismo de cuevas ante el público nacional y extranjero.

El 20 de Junio del 2008, la Cueva del Viento abrió sus puertas al público, y un gran reto se nos presentó a los guías intérpretes: dar a conocer las bellezas y especificidades de la 5ª cueva volcánica mayor en el mundo con los medios de los que disponíamos. Muchos dudaron de que se pudiera triunfar con una cueva sin luz, sin focos, sin música ni efectos psicodélicos, y que por lo tanto no podía competir con la gran mayoría que por doquier disponen de tales equipamientos.

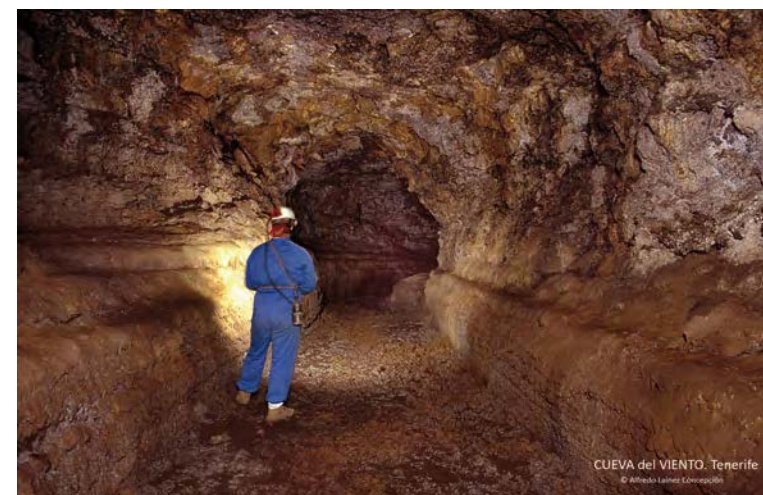


Figura 3. Tramo visible Cueva del Viento.

Sin embargo, como decíamos desde aquella época: todas las cavidades en igualdad de condiciones son "todas iguales". Mientras tanto, nosotros apaguemos las luces, sintamos como es el mundo del silencio y la oscuridad de nuestras cuevas, y dejemos que nos sorprenda el entorno subterráneo "al natural". Ahí es donde entra el conocimiento, el cariño y el respeto de los guías intérpretes y del equipo al completo de la Cueva del Viento para llevar al visitante hacia la experimentación de sensaciones nuevas y enriquecedoras.

A lo largo de estos 6 años que llevamos abiertos, ya han pasado por nuestras instalaciones provisionales 74.000 visitantes, de las cuales han podido entrar a la cavidad 64.000. Las rutas se hacen en grupos máximos de 16 personas, actualmente comentadas en español, alemán, francés e inglés, no mezclando idiomas, lo que la hace ser una visita de grupos reducidos, personalizada y de gran calidad (Figura 4).

24/08/2013 *La diferencia entre el aprendizaje y el aprendizaje sin duda radica en el maestro. "sois geniales y España necesita de lugares y personas como los que hoy hemos disfrutado, muchas gracias."*



Figura 4. Ruta exterior por campos de lava y pinar canario.

LA VISITA GUIADA

La ruta sorprende gratamente al visitante que espera una visita “típica y tópica”, según nos comentan al final de la visita.

26/11/2010 He venido pensando en una cosa, una visita normalita y me he llevado una bonita sorpresa, el mensaje, la profesionalidad y la información ha sido perfecta, contentísima y recomendable.
Carla R. (UMA)

07/08/2010 Sorprendido e Impresionado, tras años residiendo en la isla he descubierto una nueva opción de turismo sostenible y autóctono que queda para explotar.
Oscar Hernández.

Comienza con una introducción de unos 15 minutos en el Centro de Visitantes, ubicado en el Barrio de la Cueva del Viento. En la misma se explica, mediante unos paneles y videos, cómo se ha formado este complejo y laberíntico edificio volcánico: su origen no fue el agua, como en la inmensa mayoría de las cavidades que se conocen, donde predominan estalactitas, estalagmitas, ríos subterráneos.... sino las lavas y un volcán, no el más conocido como es nuestro gran Teide sino otro, muy cercano a él, el volcán Pico Viejo.

Hace unos 27.000 años, el Pico Viejo arrojó unas lavas basálticas muy fluidas conocidas científicamente como lavas “Pahoehoe”, de altísima temperatura, que bajaron por toda la pendiente norte del Valle de Icod hasta el mar, corrieron también hacia la costa del suroeste de la isla de Tenerife y rellenaron parte de las Cañadas, en el parque nacional del Teide (Carracedo *et al.*, 2008). Posteriormente, gran parte de estas lavas fueron sepultadas por otras erupciones volcánicas, destacando en el valle de Icod de los Vinos las del Volcán de los Roques Blancos.

Esta charla introductoria ha sido diseñada para que los guías intérpretes acerquen al público, de forma entendible, amena y entretenida, a una mejor comprensión de la génesis y del contexto geológico de la Cueva del Viento (Figura 5).



Figura 5. Explicaciones a los visitantes de la formación del tubo volcánico, primer panel de la Cueva del Viento.

Finalizada la introducción, se le entrega al visitante un gorro higiénico, un casco con batería y luz para iluminarse en la oscuridad del túnel de lavas, y como medida de protección bajo tierra. Acto seguido el grupo sube a bordo de un minibús, rumbo a las cercanías de la cavidad, atravesando un paisaje de fincas rurales y de monte canario. Tras bajar de la guagua cada uno se coloca el equipo personal, y caminando por un sendero se empieza la ruta hacia la entrada de la galería, entre pinos canarios, brezos y laureles.

Una importante labor realizada por técnicos del Organismo Autónomo de Museos y Centros del Cabildo de Tenerife, los guías intérpretes de la Cueva, las Escuelas Taller y el personal del Ayuntamiento de Icod de los Vinos ha hecho posible, mediante la limpieza de antiguas huertas de cultivo, que salgan a la luz aquellos afloramientos tan peculiares de las lavas “Pahoehoe”, con sus elevaciones en forma de túmulos y formaciones “cordadas”, que son vistas y explicadas al visitante, al tiempo que se le comentan datos sobre la flora, fauna y etnografía de aquellos bellos parajes rurales y agrícolas.

La ruta nos sigue llevando por una antigua red de Caminos Reales trazados después de la conquista de Canarias: al transitarla, se le hace apreciar al visitante la labor de nuestros antepasados para comunicarse por la isla, aprovechando en esta zona de Icod de los Vinos las características de las lavas fluidas y lisas en sus obras de construcciones.

19/03/2011 El entusiasmo, conocimiento y dedicación de los guías en conjunto con el estupendo entorno y la preciosidad de la Cueva hacen de la visita una cosa única, una experiencia maravillosa

Llegamos a la entrada de la Cueva: cascos puestos, normas de seguridad debidamente comunicadas, empieza la bajada hacia el tramo visitable de la Cueva, no sin sacudirse previamente las suelas de las botas para no introducir tierra, ni semillas, ni nada que pueda alterar el ecosistema de la cavidad.

Una vez en el interior, iluminado con la luz de su frontal, el visitante se adentra en el descubrimiento de las galerías visitables “como un espeleólogo”: el guía marca el ritmo, alternando paradas en los paneles didácticos que vienen a complementar lo expuesto en la charla introductiva, paradas explicativas de las formaciones

lávicas que conforman el tubo volcánico, tramos transitados con atención y cuidado, tanto para la seguridad del visitante como para no dañar suelo, paredes y techo. Tal entorno y forma de recibirlo, no deja indiferente: nacen las preguntas, las dudas, las interacciones visitante-guía.

Al cabo de unos 60 minutos en el interior de la Cueva, el guía hará que el público asistente se sienta como un "insecto de la cavidad": durante ese minuto "mágico" se apagan una tras otra las luces de los cascos, y de repente aparece la "verdadera" Cueva del Viento y su mundo del silencio y de la obscuridad, que es como son "Todas las cavidades en igualdad de condiciones", permitiendo que cada uno sienta y viva en su interior una experiencia única, personal, y auténtica.

21/08/2013 Una experiencia única, por lo que es, pero sobre todo por lo que sientes visitando esta joya de la naturaleza. Impresionante como está explicado y como consiguen que vivas la naturaleza a tope.

31/08/2013 Increíble toda la visita, de principio a fin. A destacar el cariño con el que se dan las explicaciones. Felicidades por el gran trabajo que hacéis.

La visita concluye nombrando a todos los visitantes "Embajadores de la Cueva del Viento": aplausos, sonrisas o miradas expresan que "aquí ha pasado algo". Y a veces, pasa algo más. La cavidad en su estado natural ha sido y es visitada por grupos de invidentes, sordomudos, y en alguna ocasión, por parapléjicos llevados en una silla especial con la asociación Montaña Para Todos, con el esfuerzo de nuestros guías, la colaboración de la ONCE, y familiares.

REFLEXIÓN FINAL

Todo esto es lo que hace ser la Cueva del Viento muy diferente al resto de las cavidades visitables: un gran respeto al medio, el esmero en su interpretación, en la que los guías conducen al visitante a este mundo subterráneo y lo hace partícipe de la vivencia única que supone adentrarse en una cueva en su estado natural, con todo el cariño y cuidado que este se merece. Nuestros visitantes agradecen infinitamente lo aprendido de forma inesperada, el amor que ponemos y transmitimos, que queda reflejado en los comentarios de nuestros libros de Visita, en los diferentes idiomas.

16/08/2011 Muchas gracias por enseñarnos con tanta pasión y cariño lo maravilloso de este espacio natural, que tan privilegiados estamos de tener en Tenerife y de transmitirnos la importancia de cuidar nuestra madre naturaleza.

Oliver

04/09/2013 Gracias por enseñarnos de esta maravillosa forma, la Cueva del Viento, mostrando un respeto único por la naturaleza y amor al mismo, ojalá seáis escuela de todos! Xavi y Ale.

18/04/2013 Visita espléndida. Un brindis por todo el equipo y que sigan cuidando este magnífico vestigio de la Naturaleza. Familia Duran, Francia.

26/12/2013 Que felicidad sentimos en este lugar único, que es preciso preservar de toda tecnología, para poder apreciar plenamente la oscuridad y el encanto progresivo, paso a paso.

Marie, Francia.

04/03/2014 Me encanto ir a la cueva y tener una linterna en la cabeza! Me encanto la visita ! No todos los días se hacen cosas así! Me encanto estar en la oscuridad! He aprendido hoy más cosas que en la escuela el año pasado.

Grupo de niños franceses.

Y COMENTARIOS DE PRENSA:

"Adentrarse en la Cueva del Viento es descubrir otro mundo. En el tramo visitable de la 5ª cavidad volcánica más grande del planeta no hay luz artificial, ni música, ni guías que les ponen nombres a las piedras. Se trata de una ruta que no solo lleva a los visitantes a sentir, sin artificios, lo que el volcanismo ha dejado, sino que, además, es capaz de despertar sus conciencias. Parte de la culpa la tiene Alfredo Láinez, el Responsable-Guía Interpretador de la Cueva del Viento, que en dos horas es capaz de hacer que todo aquel que se adentre en la gruta acabe enamorado de ella y, lo más importante, listo para hacer lo que esté en sus manos para proteger y divulgar un patrimonio subterráneo único. Alfredo Láinez hace que la visita a los pocos más de 250 metros de la cueva abiertos al público sea especial. El resto de Guías no son una excepción: han aprendido de su maestro, para el que lo más importante es que quien se adentre bajo el barrio de Los Piquetes, en Icod de los Vinos, sepa que allí hay algo "especial" y, sobre todo, "muy frágil" "Ustedes son ahora los Embajadores de la Cueva del Viento" ... Rosa Rodríguez. Periódico Canarias 7. Enero 2013.

"Como canario, tinerfeño, ciudadano del mundo, me siento orgulloso de saber que esta joya geológica, reside en Tenerife. Si además se interpreta de la forma magistral como lo hacen. Si además se trasluce el corazón de quienes lo interpretan, ya no hay formas de agradecer la visita a este maravilloso mundo subterráneo". Juan Antonio Jorge Peraza. Premio Tenerife Rural 2009.

Muchas cavidades tienen desarrolladas rutas interpretativas, y otras buscan ideas nuevas para hacerlas más llamativas y diferentes. Nosotros, desde la Cueva del Viento, animamos a incorporar decididamente la labor interpretativa de los guías como parte fundamental de una oferta de calidad, y a mantener las cuevas en su estado natural, para que el visitante tenga la oportunidad de descubrir un entorno lo más auténtico y preservado posible, "como un espeleólogo". El atractivo lo tienen casi todas las cuevas. El resto lo forjan los guías con sus conocimientos y pasión, la atención que pongan las Administraciones, y las implicaciones de todos en dar a Conocer, Conservar y Proteger nuestro valioso Patrimonio Subterráneo Español a través de esa "Ley del Patrimonio Subterráneo Español" y "Ley de Protección de la Cueva del Viento" que ya pedimos en el último Congreso de A. C. T. E. del 2012 (Láinez y Socorro 2012) y aún "No existe" (Figura 6).



Figura 6. Vertido de Aguas Fecales y restos de residuos sólidos a la Cueva del Viento. Falta esa "Ley de Protección de la Cueva del Viento y del Patrimonio Subterráneo Español".

Esta legislación a favor de nuestro patrimonio de Cavidades Españolas es primordial para su protección y correcta conservación para las futuras generaciones.

“El valor de una civilización no se mide por lo que es capaz de crear, si no por lo que es capaz de conservar”
Edouard Herriot, político y escritor francés.

REFERENCIAS

- AA. VV. 1995. Catalogo Espeleológico de Tenerife. Museo de Ciencias Naturales de Tenerife. *Organismo Autónomo de Museos y Centros*. Cabildo de Tenerife. 168 pp.
- Carracedo, J. C., Badiola, E., Paris, R., Torrado, F., González, A. y Socorro, J. S. 2008. Erupciones del Edificio central. (cap.12) in. Carracedo, J.C. (Ed.) *El Volcán Teide. Tomo 3 Análisis de las erupciones y excursiones comentados. Ediciones y Promociones Saquiro*, S.L. Santa Cruz de Tenerife. 109-195.
- Gavarone, F. 2013. Revista bimestral nº 163. Lave. *Asociación Volcanológica Europea*. Julio 2013. 26-31 pp.
- Lainez, 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.
- Lainez, A., Rijo, F., Bonilla, J. A. y Yanes, J. C. G. E. T. Benisahare. 2006a. La Vulcano-espeleología en Canarias. Viaje a las entrañas del volcán. *Vulcanismo. Ecosistemas Cavernícolas. 1er Congreso Valencia d' espeleologia*. Alcoi. 367-400.
- Lainez, A., Rijo, F., Bonilla, J., Yanes, J. C. y de la Concepción, G. G. E. T. Benisahare. 2006b. Estudio Medio Ambiental del Complejo Volcánico Cueva del Viento-Sobrado y Cueva Felipe Reventón. *Icod de los Vinos*. Tenerife. 151-222.
- Lainez, A. y Socorro Hernández, J. S. 2012. La Cueva del Viento cuna de la espeleología en canarias, interpretación subterránea y “grito por su protección y una ley del patrimonio subterráneo español” *IV Congreso Español sobre Cavidades Turísticas*. Aguilar de Campoo. Palencia.
- Libros de Visita del Centro de Visitantes de la Cueva del Viento. Tomos I-X. 2008 -2014.
- Rando, J. C. y López, M. 1996. Un nuevo yacimiento de vertebrados fósiles en Tenerife (Islas Canarias). 7th. *International Symposium on Vulcano-espeleology*. Santa Cruz de La Palma. 171-173.

Valoração de serviços ambientais e a sustentabilidade do uso público de uma cavidade natural em Minas Gerais, Sudeste do Brasil

Hugo Rodrigues de Araujo⁽¹⁾, Arnaldo Freitas de Oliveira (jnr.)⁽²⁾ y Alexander A. Azevedo⁽³⁾

(1) Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP. Endereço: Campus Universitário Morro do Cruzeiro. CEP: 35400-000 Ouro Preto-MG (hugo@biotropicos.org.br)

(2) Instituto Federal de Minas Gerais-IFMG (Campus Ouro Preto). Endereço: Rua Pandiá Calógeras, 898. Bauxita. CEP: 35400-000 Ouro Preto-MG (arnaldo.freitas@ifmg.edu.br)

(3) Instituto Biotrópicos. Endereço: Praça JK, 25, Centro. CEP: 39100-000 Diamantina-MG. (alex@biotropicos.org.br)

RESUMO

No Brasil, embora as cavidades naturais sejam consideradas patrimônios ambientais resguardados por lei, muitas sofrem pressões que acarretam riscos a sua conservação. O problema deve-se, em parte, à ineficiência da fiscalização do Estado, e ao equívoco de muitas pessoas que se sentem no direito de usufruir indiscriminadamente dos serviços ambientais prestados pelas cavidades ao julgá-las como bens públicos. Os serviços ambientais podem ser as condições que garantem a sobrevivência das espécies da fauna e flora exclusivas do ambiente cavernícola e muitos outros benefícios sociais, culturais, espirituais, estéticos, recreativos e educativos que satisfazem, direta ou indiretamente, as necessidades humanas. Como são oferecidos de forma livre e gratuita pela natureza, também podem ser utilizados até a exaustão. Diante disso, a valoração econômica tem sido considerada uma importante ferramenta para preservar a manutenção dos serviços ambientais na natureza. Isso não significa taxá-los e colocá-los à venda, mas estabelecer um valor que funcione como um indicador representativo de sua importância econômica e bem-estar social. Essa estratégia foi aplicada à Gruta do Salitre, situada no maciço quartzítico da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço. A proximidade de Diamantina (Minas Gerais, sudeste do Brasil), cidade histórica e Patrimônio da Humanidade, eleva o potencial turístico da gruta. A gestão do uso público, realizada por uma ONG (Instituto Biotrópicos), ainda é incipiente e, por isso, carece de apoio para conseguir manter o monitoramento local. O grande desafio é desenvolver o potencial turístico regional, melhorar a qualidade de vida da comunidade vizinha e assegurar a conservação ambiental da gruta. Portanto, há uma grande necessidade de se conciliar as inúmeras atividades que ocorrem na área do afloramento rochoso da gruta (práticas esportivas e concertos musicais) com a conservação ambiental do ecossistema de caverna. Visando contribuir para o alcance da sustentabilidade da gestão do uso público da gruta, este estudo buscou identificar e valorar monetariamente os serviços ambientais prestados pela Gruta do Salitre utilizando o Método de Valoração Contingente (MVC). Para tanto, no período de agosto a outubro de 2013, entrevistou-se os visitantes da gruta utilizando-se questionários semi estruturados com o intuito de identificar os objetivos da visita e avaliar a sua disposição a pagar (DAP) pela conservação do atrativo natural em questão. Ao todo foram realizadas 126 entrevistas. O valor anual estimado referente aos benefícios gerados pela Gruta do Salitre totalizou R\$ 4.807.542,85. Demais informações contidas nos questionários geraram um banco de dados, cujos parâmetros estudados subsidiarão a adoção de políticas públicas voltadas para conservação ambiental e para a avaliação da viabilidade de projetos empresariais destinados à utilização das potencialidades turísticas desse patrimônio natural.

Palavras chaves: Gruta do Salitre, Serra do Espinhaço, Serviços ambientais, Sustentabilidade, Uso Público.

Valuation of ecosystem services and the sustainability of public use of a natural cavity in Minas Gerais, Southeastern Brazil

ABSTRACT

In Brazil, although the natural cavities are considered environmental heritage safeguarded by law, many suffer pressures that give rise to their conservation. The problem is due, in part, to ineffective supervision of the State, and the misconception of many people who feel entitled to enjoy indiscriminately environmental services provided by the cavities to judge them as public goods. Environmental services may be conditions that ensure the survival of species of fauna and flora to take the cave environment and many other social, cultural, spiritual, aesthetic, recreational and educational benefits that satisfy, directly or indirectly, human needs. How are supplied free by nature and free form, can also be used to exhaustion. Therefore, the economic valuation has been considered an important tool to preserve environmental services in nature. This does not mean tax them and put them on sale, but set a value that will work as a representative indicator of its economic importance and social welfare. This strategy was applied to the Cave called as Gruta do Salitre, located in the quartzitic range of the Biosphere Reserve of Serra do Espinhaço. The proximity of Diamantina (Minas Gerais, Southeastern Brazil), a historic town and World Heritage Site, rises the tourist potential of the cave. The management of public use, held by an NGO (Biotrópicos Institute), is still limited and therefore needs support to be able to keep the location tracking. The great challenge is to develop regional tourism potential, improve the quality of life of the surrounding community and ensure environmental conservation. So there is a great need to reconcile the numerous activities that occur in the rocky outcrops of the cave (sports and concerts) with the conservation of the ecosystem of the cave area. To contribute to the achievement of sustainable management of public use of the cave, this study sought to identify and monetarily assess the environmental services provided by the Gruta do Salitre using the Contingent Valuation Method (CVM). To this end, during August to October 2013 were collected from visitors to the cave using semi-structured questionnaires to identify the objectives of the visit and assess their willingness to pay (WTP) for the conservation of natural attraction in question. Altogether 126 interviews were conducted. The annual value of the benefits generated by the cave was R\$ 4.807.542,85. A database whose parameters were studied will subsidize the adoption of related to environmental conservation and to assess the feasibility of business projects for use of the tourist potential of these natural heritage policies.

Keywords: Environmental Services, Espinhaço range, Public Use, Salitre Cave, Sustainability.

INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, especialmente após a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro em 1992, as discussões sobre os impactos das atividades humanas sobre a natureza têm se estendido a toda a sociedade. Atualmente, a necessidade de ampliar a capacidade para a avaliação dos serviços ambientais é um tema recorrente, assim como a necessidade de maior divulgação de informações sobre diferentes abordagens de avaliação e valoração dos serviços ambientais.

Os serviços ambientais correspondem aos benefícios providos pelos ecossistemas que garantem a sobrevivência das espécies no planeta e que satisfazem, direta ou indiretamente, as necessidades humanas (Guedes e Seehusen, 2011). Assim, a manutenção da qualidade do ar, a provisão de água de qualidade para consumo, a fertilidade dos solos e muitos outros benefícios sociais, culturais, espirituais, estéticos, recreativos e educativos são exemplos de serviços ambientais (De Groot et al., 2002).

Atualmente, um agravante à destruição do meio ambiente é o pequeno valor que o ser humano dá aos serviços ambientais. Uma das explicações para isso é que muitos desses serviços têm a características de bens públicos, devido as propriedades de não exclusividade e de não rivalidade (Constanza et al., 1997). A não exclusividade corresponde a impossibilidade de excluir alguém do consumo dos serviços ambientais, como a água, o ar e

a beleza cênica. A não rivalidade refere-se à ausência de competição no consumo de um serviço, ou seja, a utilização de um bem por um indivíduo não diminui a quantidade disponível para outro, como a respiração do ar pelos seres vivos (Young e Fausto, 1997).

Devido às características de não rivalidade e não exclusividade, os direitos de propriedades aos serviços ecossistêmicos não são completamente definidos, e sendo assim, os preços não se formam e não atuam para racionar o uso ou gerar receitas para a conservação dos serviços, podendo resultar em sua degradação ou exaustão (Motta, 1998).

Esse é o caso dos serviços ambientais prestados por cavidades naturais subterrâneas, popularmente conhecidas como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna ou buraco. No Brasil, a partir da promulgação da Constituição Federal, as cavidades naturais passaram a fazer parte do universo dos bens naturais pertencentes à União (Artigo 20, inciso X, Constituição Federal, 1988). Entretanto, apesar do uso das cavernas brasileiras estar sujeito ao controle e fiscalização do poder público por intermédio do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (CECAV/ICMBio), uma grande parte encontra-se em perigo, devido, sobretudo, à ineficiência do Estado e à intensa exploração e pressões geradas pelo atual modelo socioeconômico de desenvolvimento do país. Além disso, as características de bens públicos fazem com que as pessoas atribuam para si o direito ao uso indistinto das cavidades, independente de autorização do poder público, impulsionando ainda mais a degradação dos frágeis ecossistemas cavernícolas.

Essa situação de degradação decorrente do uso indiscriminado, sem monitoramento e gestão, caracterizava até recentemente o cenário da Gruta do Salitre, localizada em Diamantina, Minas Gerais (Azevedo e Araujo, 2011). A encantadora paisagem e, ao mesmo tempo, a proximidade com o centro urbano fazem dessa cavidade um atrativo natural amplamente frequentado pela população local e por turistas. Porém, nos últimos 3 anos, como iniciativa inédita no país, uma Organização Não Governamental de caráter científico e socioambiental (Instituto Biotrópicos) assumiu o desafio de estruturar a gestão do uso público desse frágil ecossistema e transformar a gruta em um modelo de gestão sustentável do patrimônio natural e cultural, para assegurar a conservação ambiental local e para promover a inclusão social (Azevedo e Araujo, 2011).

Contudo, a entidade sem fins lucrativos não conta com recursos financeiros para desenvolver projetos de educação ambiental ou ações que busquem a segurança dos visitantes e a inclusão social dos moradores da comunidade vizinha, nem mesmo para a conservação do patrimônio ambiental. Paralelamente, o desconhecimento da dimensão dos benefícios, diretos e indiretos, proporcionados pela Gruta do Salitre provavelmente limita o investimento financeiro de atores locais (poder público e privado) para assegurar a sustentabilidade gerencial do atrativo natural. O reconhecimento do bem-estar proporcionado pela Gruta do Salitre poderia contribuir como importante subsídio para sensibilização da sociedade e, conseqüentemente, para a captação de recursos financeiros de terceiros para sua conservação.

Diante disso, este trabalho, procurou identificar e estimar o valor econômico dos serviços ambientais providos por essa cavidade. No Brasil, os estudos de valoração econômica dos serviços ambientais providos por cavidades naturais ainda são incipientes (Paula et al., 2008; Silva e Camargo, 2008), tal como internacionalmente, exemplificados por poucos trabalhos realizados na Indonésia (Waluyo, 2005) e na Eslovênia (Actum, 2013).

OBJETIVOS

Identificar e estimar o valor econômico dos serviços ambientais oferecidos pela Gruta do Salitre, situada em Diamantina, Minas Gerais, para subsidiar a sustentabilidade do seu uso público.

ÁREA DE ESTUDO

A Gruta do Salitre está localizada no distrito de Extração, a menos de 9 km do perímetro urbano da cidade histórica e Patrimônio da Humanidade, Diamantina, Minas Gerais, sudeste do Brasil (18°16'35"S; 43°32'12"O; Figura 1). Situada em um afloramento rochoso de quartzito em meio à vegetação de cerrado e campos rupes- tres, a gruta integra a Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço.

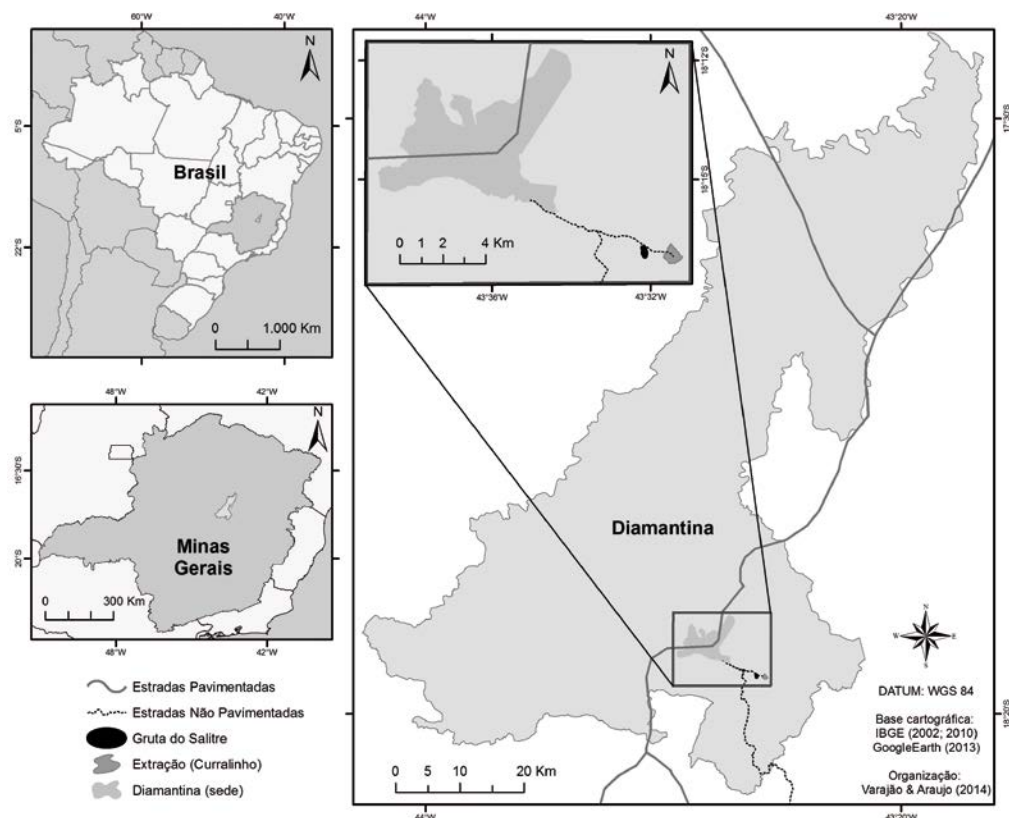


Figura 1. Localização da Gruta do Salitre próximo ao distrito de Extração, no município de Diamantina, Estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil.

Com relevo escarpado, em forma de ruínas, proporciona uma belíssima paisagem que se assemelha a um castelo medieval ou a uma igreja construída no estilo gótico (Azevedo e Araujo, 2011). O sistema cárstico abriga uma cavidade subterrânea com vários condutos, um cânion com aproximadamente 125 metros de extensão e uma dolina circundada por paredões de 80 metros de altura (Baggio *et al.*, 2012). A facilidade de acesso feito por estrada não pavimentada, relativamente conservada, somada a beleza cênica, fazem da gruta um dos principais atrativos turísticos da cidade e região (Figura 2).

METODOLOGIA

O valor econômico dos serviços ambientais oferecidos pela Gruta do Salitre foi calculado utilizando o Método de Valoração Contingente (MVC) com base na disposição a pagar (DAP) dos visitantes, de livre e espontânea vontade, uma quantia anual hipotética para conservação da cavidade.

A escolha desse método se justifica pelo fato do objeto de estudo possuir características de bem público, logo, o seu uso não adquire valor de mercado (Motta, 1998). Segundo Young e Fausto (1997), o MVC pode ser aplicado para elementos da natureza, tal como a biodiversidade, patrimônio paisagístico, áreas de proteção ambiental, áreas de lazer, ou qualquer outra situação na qual não existam valores de mercado. Nesse caso, o objetivo da valoração contingente é tornar perceptíveis as preferências dos consumidores através de pesquisa de campo, com questionários que indagam a sua disposição a pagar (DAP) pela conservação de um bem natural (Benakouche e Cruz, 1994).



Figura 2. Vista aérea e detalhes dos ambientes internos do afloramento rochoso de quartzo da Gruta do Salitre (Diamantina, Minas Gerais, Brasil).

Assim sendo, foram realizadas entrevistas pessoais com os usuários da Gruta do Salitre utilizando questionário semiestruturado, constituído por uma série ordenada de perguntas abertas, semiabertas e fechadas, sendo essas últimas em sua maioria de múltipla escolha. A pesquisa foi realizada in loco de agosto a outubro de 2013, exclusivamente aos sábados e domingos, dias em que a gruta encontrava-se aberta à visitação. Ao longo dos três meses de vigência da pesquisa foram aplicados 126 questionários. Foram convidados a participar das entrevistas somente visitantes com idade mínima de 18 anos, pois pessoas com idade inferior geralmente não possuem renda e incluí-los na pesquisa poderia comprometer os resultados. As entrevistas foram feitas em sua maior parte pelo próprio autor com o auxílio de uma equipe devidamente treinada para este fim.

O questionário dividiu-se em duas etapas principais: a primeira etapa visou caracterizar o perfil socioeconômico dos visitantes por meio de perguntas relativas ao estado civil, sexo, renda mensal, grau de escolaridade, local de residência, além de obter informações sobre o objetivo da visita à gruta, frequência da visita, meio de transporte utilizado, despesas com a viagem, dentre outras. A segunda etapa, por sua vez, buscou estimar a disposição a pagar (DAP) dos visitantes pela conservação da cavidade natural. Segundo Motta (1998), a DAP fornece resultados mais confiáveis para valores intangíveis, por isso é mais indicada para os casos de preservação e/ou conservação de bens ambientais. Assim sendo, o entrevistado era indagado com a seguinte pergunta: "Para assegurar a conservação da Gruta do Salitre, você estaria disposto a contribuir com um valor anual/hipotético?". Foi esclarecido para o entrevistado de que não se tratava de concordar com uma taxa de visitação da gruta e, sim, contribuir com um valor destinado anualmente para conservação do atrativo independente do uso direto/indireto dos serviços ambientais por ele providos. Quando o entrevistado respondia "sim" era solicitado especificar seu nível de concordância com essa afirmação indagando até quanto ele estaria disposto a contribuir anualmente, hipoteticamente, para preservação dos serviços ambientais provenientes da gruta. Foram apresentadas dez opções de valores, que variavam de R\$1,00 a R\$10,00.

Para o cálculo da valoração dos serviços ambientais prestados pela Gruta do Salitre, primeiramente, estimou-se a disposição a pagar média (DAPmédica) que é resultado da somatória de todos os valores da DAP dividido pelo número total de entrevistados dispostos a pagar.

O cálculo da valoração econômica da Gruta do Salitre foi obtido por meio da seguinte modelo econométrico:

$$VA = \left[\left(\frac{DAP}{nDAP} \times 100 \right) \times n^{\circ} \text{ visitantes ano} \times DAP \text{ média} \right] \times \text{área da gruta}$$

Sendo:

DAP = número de visitantes dispostos a pagar para a conservação da gruta;

nDAP = número de visitantes que não estão dispostos a pagar;

Nº de visitantes/ano = 1.558 (estimativa dos gestores referente ao ano de 2012);

Área da gruta = 5 hectares (área de influência da cavidade natural).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais motivações e usos que levam as pessoas a visitarem a gruta referem-se aos serviços ambientais prestados pela Gruta do Salitre. Sendo assim, foram identificados os seguintes serviços: contemplação da paisagem e recreação em contato com natureza; prática de atividades esportivas (rapel e escalada); realização de eventos musicais, gravação de documentários, filmes e minisséries de televisão; visitas técnicas organizadas por instituições de ensino fundamental, médio e superior; e pesquisas científicas em todas as áreas do conhecimento: biótico, abiótico e social. Segundo relatos dos moradores locais, a gruta também foi utilizada para celebrações de missas no passado.

De acordo com a classificação proposta pela Avaliação Ecosistêmica do Milênio, os serviços ambientais prestados pela Gruta do Salitre se agrupam à categoria “Culturais” que correspondem aos benefícios intangíveis obtidos dos ecossistemas, incluindo serviços de educação, recreação, lazer e entretenimento, apreciação da beleza cênica e inspiração para a cultura, arte e design, assim como experiências espirituais (MA, 2005).

A disposição para pagar quantia anual para manutenção dos serviços ambientais da Gruta do Salitre foi manifestada por 47% dos entrevistados, enquanto metade deles declarou indisposição a pagar, restando poucos que não quiseram responder a pergunta (3%). Logo, com base nos dados obtidos através das entrevistas a DAPmédica resultou em R\$ 6,48. Todavia, considerando o total dos visitantes disposto e não disposto a pagar, a DAPmédica passa a ser R\$ 3,16. Ao substituir os valores no modelo econométrico supramencionado pelos dados obtidos das entrevistas com os visitantes encontrou-se o valor R\$ 4.807.542,85/ano. Porém, considerando a DAPmédica (R\$ 3,16) calculada com base no total dos entrevistados, dispostos e não dispostos a pagar pela conservação da gruta, o valor passa a ser R\$2.344.419,04/ano.

Contudo, é importante frisar que os resultados obtidos não são inquestionáveis ou absolutos, mas refletem a situação socioeconômica e o grau de conscientização da população em determinado momento. Situações idênticas, avaliadas em locais com distintas características culturais, econômicas e sociais podem levar a resultados bastante diferentes. Assim como, a aplicação da mesma metodologia no mesmo local, mas em épocas diferentes poderão apresentar outros resultados.

CONCLUSÃO

A identificação e a valoração dos serviços ambientais prestados pela Gruta do Salitre podem representar uma importante ferramenta para sensibilizar a sociedade quanto a importância da conservação da gruta e quanto

a necessidade da contribuição financeira para a sustentabilidade gerencial do atrativo turístico. Vale destacar aqui, que além do público visitante e dos moradores do entorno, é fundamental o envolvimento do poder público e privado, sobretudo das empresas ligadas ao turismo.

Os valores estimados para os serviços ambientais é uma forma de subsidiar os órgãos competentes e os tomadores de decisão na implantação de políticas de conservação/preservação da cavidade. Além disso, servem como parâmetro para a determinação do valor de taxas de ingressos e/ou multas por danos ambientais causados ao meio ambiente, bem como na avaliação da viabilidade de projetos empresariais destinados à utilização das suas potencialidades turísticas e recreativas.

O banco de dados completo com informações sobre o perfil socioeconômico dos visitantes da gruta poderá subsidiar planejamentos futuros para os gestores da gruta e agências de passeios da cidade que poderão desenvolver produtos e serviços adequados aos diversos perfis de públicos que, atualmente, visitam a cavidade e, com isso, incentivar a taxa de retorno dos visitantes que é muito pequena.

Espera-se que os resultados alcançados colaborem com a estruturação do uso público da gruta, proporcionando maiores benefícios aos envolvidos. No Brasil, de um modo geral, ainda há muito que se discutir sobre os parâmetros de avaliação do grau de relevância das cavidades naturais. Assim sendo, o método de valoração ambiental aqui apresentado poderá servir de referência na tentativa de ampliar os indicadores de proteção do patrimônio espeleológico no país.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Biotrópicos pelo apoio no planejamento e execução da pesquisa. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos financiados para divulgação dos resultados da pesquisa. Aos voluntários que auxiliaram a aplicação dos questionários e a coleta de informações para a condução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Actum. Ecosystem services evaluation in the Škocjan Caves Regional Park. Disponível em: <<http://www.park-skocjanske-jame.si/cgi-bin/newseng.cgi?action=detailid=19>>. Acesso em 22/12/2013.
- Azevedo, A. A. y Araujo, H. R. 2011. Processo de estruturação da gestão do uso público da Gruta do Salitre, Diamantina, Minas Gerais. *Congresso Brasileiro de Espeleologia*, Ponta Grossa, 31, 201-208.
- Baggio, H., Souza, F. C. R. y Trindade, W.M. 2012. Morfologia Cárstica do Maciço Quartzítico da Gruta do Salitre, Diamantina – MG. *Revista Vozes dos Vales da UFVJM*: Publicações Acadêmicas, 1 (1), 1-20.
- Benakouche, R. y Cruz, R. S. 1994. Avaliação monetária do meio ambiente. *Makron Books*, São Paulo, 198p.
- Constanza, R., D’arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg K., Naeem, S., O’Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. y Belt, M. Van Den. 1997. The Value of the World’s Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 387, 253-260.
- De Groot, R.S., Wilson, M. A. y Boumans, R. M. J. 2002. A typology for the classification, description, and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41, 393-408.
- Guedes, F. B. y Seehusen, S. E. 2011. Pagamento por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios. *Ministério do Meio Ambiente*, Brasília, 272 pp.
- MA - Millenium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: *Synthesis.Is-land Press*, Washington, 137 pp.
- Motta, R. S. 1998. Manual para valoração de recursos ambientais. *Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal*, Brasília, 242 pp.
- Paula, Z. R., Gomes, M. F. M., Lima, J. E., Coelho, A. B. y Quintela, M. C. A. 2010. Valoração Econômica da Gruta do Maquiné em Cordisburgo – MG. *Revista de Economia e Agronegócio*, 8 (3), 421-443.

- Silva, L. F. y Camargo, R. R. 2008. Valoração econômica das cavernas da microbacia do Rio Salobra, Bodoque-na-MS como subsídio ao planejamento ecoturístico. *Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas, Campinas*, 1 (2), 121-129.
- Waluyo, H, Sadikin, S. R., Gustami y Whiting, P. 2005. An economic valuation of biodiversity in the karst area of Maros, south Sulawesi, *Indonesia. Biodiversity*, 6 (2), 24-26.
- Young, C. E. F. y Fausto, J. R. B. 1997. Valoração de Recursos Naturais como Instrumento de Análise da Expansão da Fronteira Agrícola na Amazônia. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Rio de Janeiro*, 27 pp.

Escaneado 3D de la Geoda Gigante de Pulpí y galerías principales de acceso: utilidad para su futura adecuación turística

Lorenzo Jiménez-Cabrera⁽¹⁾, José López-Mena⁽¹⁾ y José María Calaforra⁽²⁾

(1) Nerol Stone Studio, Calle Mesón, 3, 04650, Zurgena (Almería) (lorenzo@nerolst.com, info@nerolst.com)

(2) Departamento de Biología y Geología. Universidad de Almería (jmcalaforra@ual.es)

RESUMEN

Un escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma y su color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. En el caso de la Geoda Gigante de Pulpí, se escanearon las galerías principales de acceso desde el exterior hasta la ubicación de la Geoda. Con la información obtenida, se ha realizado un mapa topográfico tridimensional de todo el conjunto, pudiendo ser completado en una segunda fase, con toda la zona exterior. El modelo tridimensional resultante, es de gran utilidad a la hora de hacer un estudio de la futura adecuación para su uso turístico. Ya que nos permite realizar un completo análisis de todas las infraestructuras necesarias para su uso turístico tanto de la Geoda como de las galerías de acceso. En este caso en concreto se podrían analizar todo el conjunto de escaleras, plataformas y rampas necesarias para poder garantizar un acceso seguro y adecuado hasta el lugar donde se encuentra la Geoda. Por otro lado, dado que gracias al escaneado 3D sabemos la posición exacta de la Geoda, se podría estudiar la posibilidad de habilitar un pasadizo adyacente desde el cual se pueda contemplar la Geoda sin necesidad de entrar físicamente en ella. Esta opción es de gran importancia a la hora de garantizar la correcta conservación de la misma y evitar posibles daños que puedan surgir como resultado de las visitas. Otro aspecto a destacar es la posible realización de un tour virtual tridimensional que puede ser usado como una poderosa herramienta de promoción, dando la posibilidad al espectador de realizar un viaje desde el exterior hasta el mismo corazón de la Geoda sin necesidad de moverse de la silla.

Palabras clave: Escáner 3D, geoda, minas, tour virtual.

3D Scanning of the Giant Geode of Pulpí and its main access galleries: a useful tool for future tourist adaptation

ABSTRACT

A 3D scanner is a device that analyzes an object or scene to collect data on its shape and color. The information obtained can be used to build three-dimensional digital models which are used in a wide variety of applications. In the case of "Geoda Gigante de Pulpí", were scanned the main galleries from the outside to the location of the geode. With the information obtained, we have obtained a three-dimensional topographic map of the whole and can be completed in a second phase, with all the outside area. The resulting three-dimensional model is very useful in making a study of the future adequacy for tourist use. Allowing us to perform a complete analysis of the infrastructure needed for tourist use both the geode as the access galleries. In this particular case we could analyze the entire set of stairs, platforms and ramps needed to ensure safe and adequate access to the place where the geode is located. On the other hand, the 3D scan gives us the exact position of the Geode, we could consider enabling adjacent a passageway from which to contemplate the geode without physically entering. This option

is very important to ensuring the correct preservation of it and to avoid any damagers that could be caused as a result of the visits. Another aspect is the possible realization of a three-dimensional virtual tour that can be used as a powerful promotional too, giving to the viewer the possibility of travelling from the outside to the heart of the Geode without leaving your chair.

Keywords: 3D scanning, giant Geode, mine, virtual tour.

INTRODUCCIÓN

El entorno minero de Pilar de Jaravías, en el cual se ubica la Geoda Gigante de Pulpí, es un tesoro único que lamentablemente todavía permanece inaccesible al gran público de manera incomprensible a pesar de que todos los informes científicos y técnicos aportan soluciones para su visualización directa (La Geoda) y del recorrido minero hasta la misma (La Mina Quien Tal Pensara). Quince años de divagaciones políticas solo han hecho que, hasta el momento, la Geoda Gigante de Pulpí sea posiblemente el monumento geológico más singular de Europa y a la vez el más olvidado por la administración responsable de su conservación y puesta en valor.

Desde su descubrimiento a finales de 1999 y la difusión inicial en numerosos medios de comunicación científica y divulgativa (Calaforra y García-Guinea 2000 y García-Guinea y Calaforra, 2001) han sido numerosos los artículos aparecidos sobre su importancia como Patrimonio Geológico de indudable valor (Calaforra et al. 2001, Fernández-Cortés et al., 2005a y b) así como sobre su origen y espeleogénesis (García-Guinea et al., 2002) y las vías, recomendaciones y problemática de este entorno tan singular (Fernández-Cortés et al., 2003 y 2006).

Como respuesta a la necesidad de mostrar esta maravilla natural, se decidió estudiar si realmente era factible su adecuación para uso turístico con las dificultades que entrañaban su localización. Por este motivo se tomó la decisión de realizar un escaneo en 3D tanto de la geoda como de las galerías principales de acceso a la misma. Una vez obtenido dicho modelo tridimensional todo el conjunto podría ser estudiado con total precisión y útil para cualquier proyecto de adecuación turística, de forma que podrían ser analizadas tantas propuestas como se quisiera sobre planos tridimensionales de máximo detalle.

METODOLOGÍA

Para la realización del modelo tridimensional del conjunto de la Geoda de Pulpí se contó con un escáner laser de última generación, marca Faro modelo Focus 3D.

Un escáner láser es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de su forma y su color. Una de sus ventajas es que no es necesario el contacto físico con el objeto o escena, con lo que se evita cualquier tipo de deterioro.

Su funcionamiento consiste en la emisión de “haces de luz” los cuales al encontrar cualquier objeto, registran su posición. Mediante la repetición de este proceso millones de veces por segundo, se crea una imagen tridimensional de 360° alrededor del escáner.

Posteriormente el mismo dispositivo realiza una fotografía envolvente de 360° asignando a cada punto del escaneo un pixel de la fotografía. Con este procedimiento, se obtiene un modelo tridimensional con los colores reales.

RESULTADOS

Debido al tamaño y complejidad tanto de la propia geoda como de las galerías de acceso a la misma, se debieron realizar una totalidad de 48 escaneos para poder conseguir un modelo tridimensional de todo el conjunto desde la boca de entrada a las galerías mineras (Figura 1) hasta la sala de acceso a la Geoda (Figura 2) y el escaneo en el interior de la misma (Figura 3).



Figura 1. Proceso de escaneado – Exterior de la galería que conduce a la Geoda.



Figura 2. Proceso de escaneado – Entrada a la Geoda.



Figura 3. Proceso de escaneado – Interior de la Geoda.

La técnica para conseguir enlazar los distintos escaneos, consiste en situar referencias comunes entre los mismos, de forma que se puedan enlazar posteriormente en la fase de montaje con una precisión de ± 1 mm.

Como resultado del proceso de escaneado 3D se obtiene una nube de puntos en color real de la geoda y las galerías de acceso a la misma.

Esta nube de puntos puede ser exportada directamente a cualquier programa de arquitectura para poder trabajar tomándola como referencia.

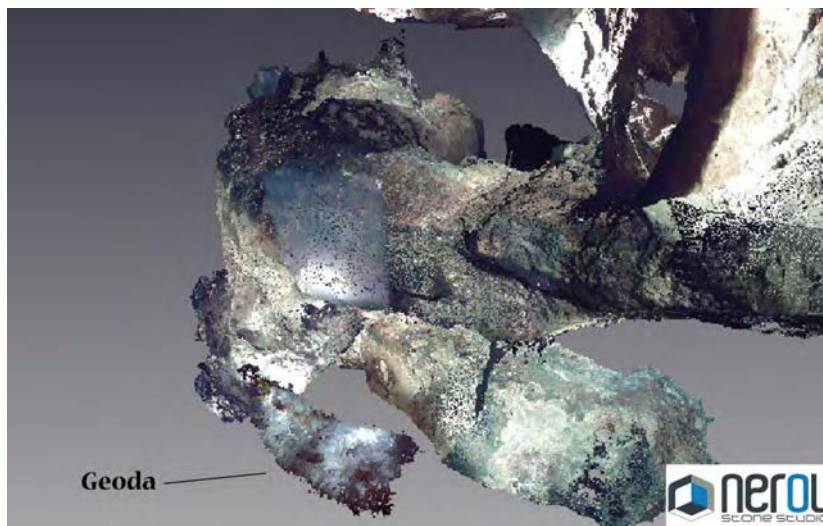


Figura 4. Detalle de la nube de puntos resultado del escaneo – Situación de la Geoda.



Figura 5. Nube de puntos resultado del escaneo – Galerías de acceso a la Geoda.



Figura 6. Nube de puntos resultado del escaneo – Interior de la Geoda.

Otra opción es la de generar un modelo sólido 3D de todo el conjunto (a modo de esquema) con el que poder realizar cualquier tipo de medición o replanteo. Los modelos 3D así obtenidos son muy útiles para ubicar con gran precisión al posición del Geoda con respecto a los límites (paredes) de la galería (Figura 4).

De igual manera, en la galería de acceso, en el modelo tridimensional generado quedan perfectamente recogidos y georreferenciados todas las características del recorrido tales como tipos de entibado, dimensiones de las galerías, estado de las mismas, derrumbes, salas de explotación y rampas (Figura 5). Este aspecto es muy útil a la hora de replantear las actuaciones a realizar sobre las galerías de acceso, necesarias para su adecuación turística o para reconstrucciones posteriores de las mismas que sean lo más fidedignas posibles con el original.

En el caso específico del escaneado 3D de la propia geoda (Figura 6) el modelo obtenido puede tener variadas aplicaciones:

- Ingeniería: Ubicación exacta del hueco de la Geoda con respecto al entorno, útil para determinar los espesores de roca caja existentes hasta la geoda.
- Científicas: Cálculo de la forma y dimensiones de los cristales con gran precisión (pro ejemplo, orientaciones cristalinas, posición de caras cristalográficas)
- Adecuación turística: ubicación de elementos de control telemático e iluminación.
- Réplicas: posibilidad de realizar réplicas a distintas escalas de la Geoda.

La unión entre la Geoda y la galería principal de acceso en el modelo 3D también permite conocer con gran precisión los planos generales (Figura 7) en distintas configuraciones como planta, distancia hasta la entrada original (Figura 8); perfil, profundidad y posibilidad de salida mediante ascensor a superficie (Figura 9).

Cada uno de estos planos presenta la posibilidad de ampliación hasta la escala de trabajo que sea necesaria o su diferenciación por tramos (entrada, galería de acceso, rampa, sala de explotación y Geoda) tal y como se observa en las Figuras anteriormente citadas.

Por último, una utilidad muy interesante derivada del proceso de escaneado 3D es la posibilidad de elaborar recorridos virtuales por el interior (o exterior) de la malla de puntos. Un ejemplo de este tipo de reconstrucción, cuyo producto final es similar a un video de tipo volante, se realizó para el recorrido desde la entrada a la mina hasta la Geoda. Esta reconstrucción puede visualizarse en las direcciones:

<https://www.youtube.com/watch?v=5KuSyR4rEtE>

<https://www.youtube.com/watch?v=Qh6ZPoMcbnY>

<https://www.youtube.com/watch?v=IXY03gOtVVc>



Figura 7. Modelo 3D de la Geoda – Posición con respecto al exterior.

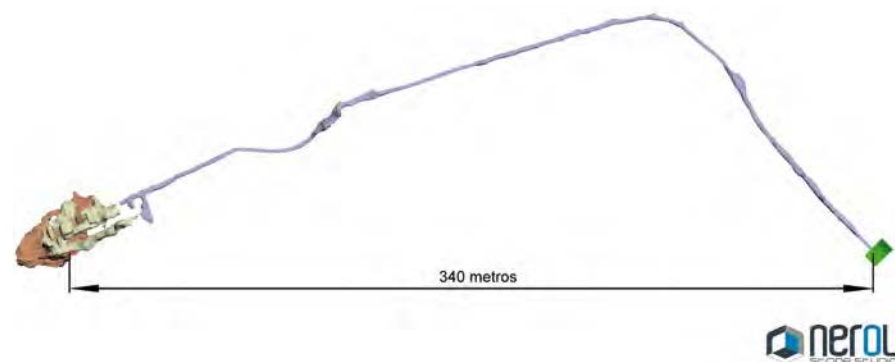


Figura 8. Vista en planta de todo el conjunto escaneado – Distancia hasta la entrada de la Geoda en línea recta.

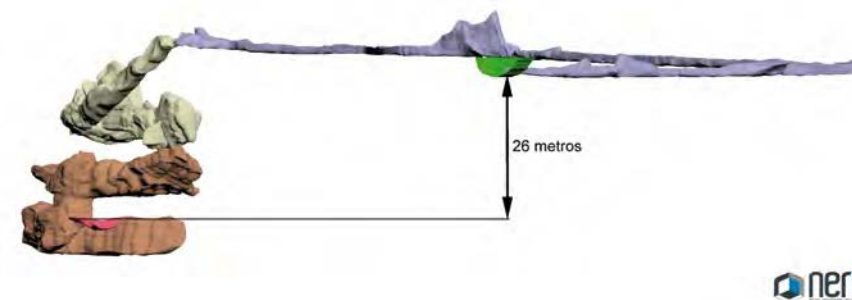


Figura 9. Vista frontal de todo el conjunto escaneado – Profundidad de la Geoda en relación a la entrada.

CONCLUSIONES

Toda esta información recopilada con el proceso de escaneo puede ser utilizada para una gran cantidad de propósitos distintos. En el caso singular de la Geoda Gigante de Pulpí, una de las aplicaciones directas es la de realizar un estudio detallado tanto en costes como en diseño de las infraestructuras que habría que realizar para poder darle un uso turístico a la Geoda. Por ejemplo, con esta herramienta podríamos analizar cómo adaptar a las galerías existentes las escaleras y plataformas necesarias para el futuro acceso de turistas, así como las tareas de desmonte o reconstrucción en caso de fueran necesarias.

Dado que gracias al escaneo tenemos perfectamente ubicada la Geoda dentro del complejo de galerías de acceso, podríamos hacer el estudio de dónde hacer un posible pasadizo junto a la Geoda de forma que el público pudiese mediante algún tipo de ventanal poder contemplar el interior de la Geoda sin necesidad de acceder a la misma. Con las ventajas de conservación que ello conlleva.

Otro posible uso sería la realización de una réplica exacta de la Geoda bien para situarla en el exterior, con lo que evitaríamos al público el tener que acceder hasta el lugar dónde se encuentra la Geoda original. O bien, poder hacer una réplica a escala con propósitos didácticos o científicos.

Por último, pero no menos importante, se podría continuar escaneando los alrededores a la entrada superior de la Geoda. Con esto se podría ubicar la Geoda con respecto a la superficie y hacer posible la colocación de algún tipo de ascensor o escalera minera que permitiese el acceso o salida hasta la superficie realizando de este modo un recorrido circular interior-exterior.

REFERENCIAS

- Calaforra, J. M., Moreno-Fernández, R., García-Guinea, J., Guerrero, M. y Romero A. 2001. La Geoda Gigante de Pulpí: Patrimonio geológico y minero. *Medio Ambiente*, 37, pp. 42 - 43. Junta de Andalucía (ed.). Sevilla. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/revistama/revista_ma37/ma37_7.html>.
- Calaforra, J. M. y García-Guinea, J. 2000. La Geoda Gigante de Pulpí (Almería). *Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst*, 1: 52-53. <<http://www.sedeck.org/revista/n1-1.pdf>>.
- Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M., García-Guinea, J. y Guerrero, M. 2005a. Geoda de Pulpí. *Diamante Geológico. UA siglo XXI*, 6: 12-17.
- Fernández-Cortés A., Calaforra J. M., García-Guinea J., Guerrero M. y Grima J. 2005b. La Geoda de Pulpí (Almería). *Axarquía*. 10: 225-240.

Fernández-Cortés A., Calaforra, J. M. y García-Guinea, J. 2003. Estudio microclimático para la valoración de la proyección turística de la Geoda Gigante de Pulpí (Almería). *Patrimonio Geológico y Minero y Desarrollo Regional*, 531-537. 3. ISBN 84-7840-49. Madrid.

Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M. y García-Guinea, J. 2006. The Pulpí Gigantic Geode (Almeria, Spain): Geology, metal pollution, microclimatology, and conservation. *Environmental Geology*. 50-5: 707-716.

DOI <<http://dx.doi.org/10.1007/s00254-006-0243-z>>.

Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M., Sánchez-Martos, F. y Gisbert, J. 2006. Microclimate processes characterization of the Giant Geode of Pulpí (Almeria, Spain): Technical criteria for conservation. *International Journal of Climatology*. 26-5: 691-706.

DOI <<http://dx.doi.org/10.1002/joc.1269>>.

García-Guinea, J. y Calaforra, J. M. 2001. La geoda de cristales de yeso de Jaravías (Almería). *Tierra y Tecnología*, 22: 15-20.

García-Guinea, J. Delgado-Huertas, A., Morales-Ruano, S., Recio-Hernández, C. y Calaforra, J. M. 2002. Formation of Gigantic Gypsum Crystals. *Journal of the Geological Society*, 159: 347-350. London.

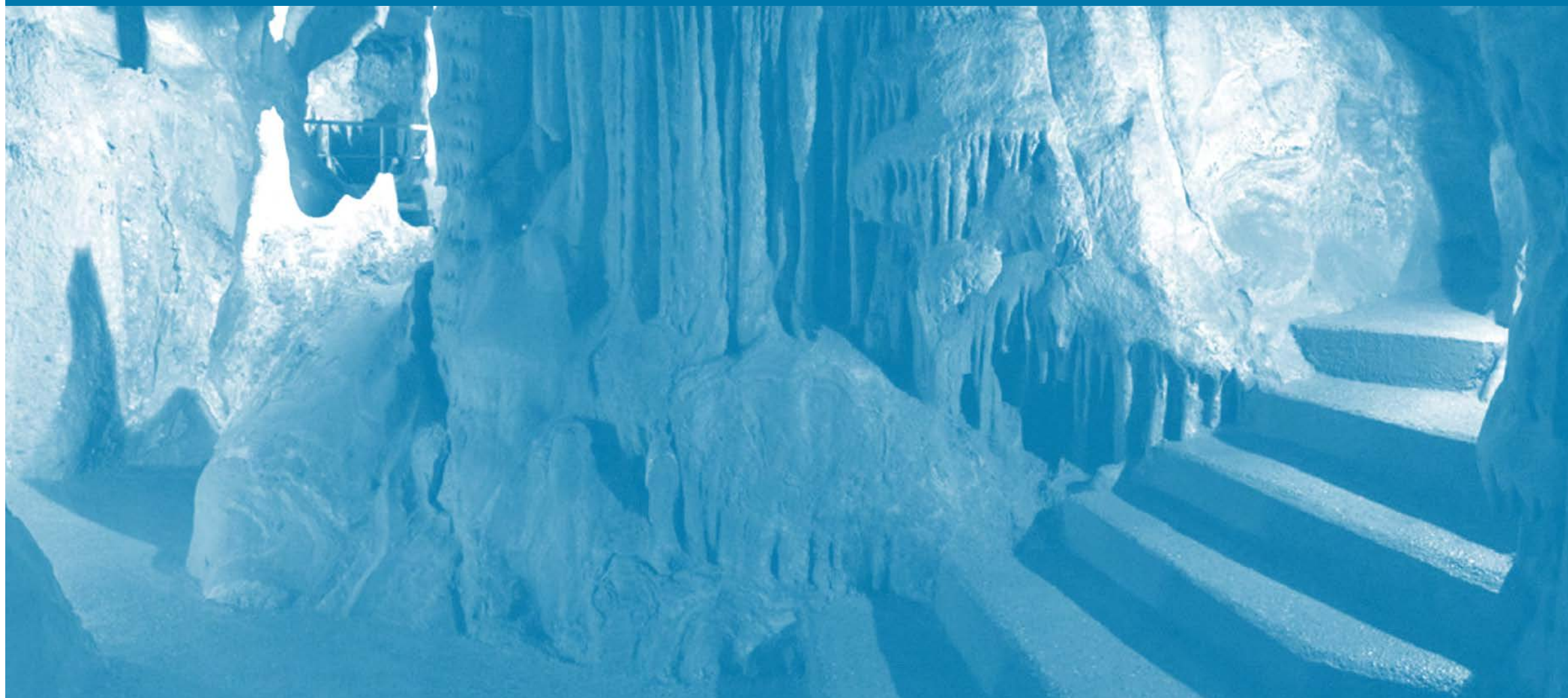
Videos sobre el escaneado 3D de la Geoda de Pulpí:

Nerol Stone (2012). Geoda Pulpí. <<https://www.youtube.com/watch?v=5KuSyR4rEtE>>

Canal Sur Noticias (2012). Geoda Gigante de Pulpí [Geoda-General Geology]

<<https://www.youtube.com/watch?v=IXY03g0tVVc>>

3 CONTROL AMBIENTAL



Cálculo de la visitabilidad máxima en cavidades turísticas mediante el método Cavix: El Soplao (Cantabria)

Emilio Guirado⁽¹⁾, Fernando Gázquez⁽²⁾, Ángel Fernández-Cortés⁽³⁾, Alfredo Argumosa⁽⁴⁾, y José María Calaforra⁽¹⁾

(1) Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, Crta. Sacramento s/n, 04120 Almería (geesecillo@gmail.com; jmcalaforra@ual.es)

(2) Department of Earth Sciences. Cambridge University. Downing Street, Cambridge, Cambridgeshire, CB2 3EQ, U. K. (fg331@cam.ac.uk)

(3) Museo de Ciencias Naturales (CSIC), José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid (acortes@mncn.csic.es)

(4) El Soplao S.L. Consejería de Innovación, Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de Cantabria. C/ Prao El Collao, s/n 39553 Celis-Rionansa, Cantabria (argumosa_a@elsoplao.es)

RESUMEN

La importante infraestructura de control de parámetros ambientales existente en la cueva de El Soplao ha permitido realizar un estudio de la visitabilidad máxima con la herramienta de cálculo simplificado CaViX (Cave-Visitors-X). El control de visitantes, CO₂, humedad relativa y temperatura, entre otras variables, medidas desde hace años, nos proporcionan los datos ideales para generar eventos que pueden ser estudiados con Cavix (web-cloud). El procesado de datos incluye la adquisición preliminar y elección de los eventos a estudiar. Posteriormente los datos se archivan en multieventos de ficheros simples, incluyendo en ellos los visitantes diarios y las distintas variables a tener en cuenta. En El Soplao hay varias estaciones de control repartidas por las distintas salas que ayudan a reconocer la evolución y recuperación de la cavidad en distintos puntos. El objetivo es conocer el número de visitantes que puede soportar la cavidad para que se mantenga un equilibrio que permita la recuperación diaria de variables como CO₂, T o HR para que los microecosistemas dentro de la cavidad se vean afectados lo menos posible por el régimen de visitas. El cálculo se ha simplificado al máximo para que el uso de la herramienta Cavix sea de utilidad en la gestión de cuevas turísticas por lo que únicamente requiere conocimientos estadísticos muy básicos para su uso. Para el cálculo del ejemplo recogido en la presente comunicación se ha elegido el periodo del 1 al 30 de agosto del año 2013, que corresponde a un mes con máxima afluencia de visitantes. Durante este periodo El Soplao experimentó incrementos diarios de concentraciones de CO₂ y temperatura del aire del orden de 471 ppm y 0,3 °C, respectivamente. El número de visitas durante este mes fue de 50.437, solo ligeramente superior a la capacidad máxima de visitantes estimada en 49.350 visitantes a nivel mensual. Sin embargo, con cálculos a nivel diario sí que se observan más problemas en cuanto a los límites de visitabilidad. Aunque la recuperación por fenómenos de ventilación natural de la cueva a favor de galerías y bocas mineras es bastante satisfactoria, durante determinados días del mes de agosto se sobrepasan los límites de visitantes sugeridos por Cavix (1.900 visitantes diarios) observándose una inercia no deseable en los valores de temperatura y de contenido en CO₂ que debiera evitarse regulando las visitas máximas diarias a las recomendadas por el programa.

Palabras clave: Capacidad máxima de visitantes, El Soplao, Cavix, CO₂, Temperatura, herramienta web.

Calculating the maximum visitability in show cave by the Cavix method: El Soplao (Cantabria)

ABSTRACT

The important infrastructure of environmental control parameters existing in the cave of El Soplao enabled a study of the maximum visitability with the simplified calculation tool CaViX (Cave-Visitors-X). The visitor control,

CO₂, relative humidity and temperature, among other variables, measured for years, has been provided the ideal database to generate events that can be studied with Cavix. The preliminary data processing includes the choice of events to study. Subsequently the data are stored in single file multiple events, including daily visitors and the different variables to consider. In El Soplao there are several monitoring stations distributed through the various chambers, which help to recognize the evolution and recovery of the cavity at different points. The objective is to know the number of visitors that can support the cave for a balance that allows to restart the daily variability of values as CO₂, T or HR and to keep the microecosystems within the cavity affected as little as possible by the visits. The calculation has been simplified to ensure that Cavix tool is easy to use by the cave managers and only requires very basic statistical knowledge. For the example we have chosen the period 1 to 30 August 2013, which corresponds to a month with a high influx of visitors. During this period El Soplao experienced daily increments of CO₂ concentrations by 471 ppm and air temperature by 0.3 °C. The number of visits during the august month was 50,437, only slightly higher than the maximum visitor capacity estimated at 49,350 visitors. However, within daily calculations further problems exist regarding visitability limits. Recovery phenomena by natural ventilation of the El Soplao cave through mining galleries and natural entrances is quite satisfactory, but an undesirable inertia of the CO₂ content and T excess has been observed when the visitor limits suggested by Cavix are surpassed (1,900 visitors daily). This fact indicates that the maximum number of visitors should be adjusted using the recommended values calculated by the program.

Keywords: Maximum capacity visitors, El Soplao, Cavix, CO₂, temperature, web tool.

INTRODUCCIÓN

Se ha utilizado la importante base de datos climáticos existente en la cavidad de El Soplao con el fin de obtener datos de eventos diarios de variación de CO₂ para utilizarlos en las predicciones de capacidad máxima de visitantes aconsejable para cuevas turísticas por medio de la aplicación web Cavix (Guirado et al., 2014 – en estas mismas actas). Se tomaron gracias a la infraestructura preexistente de sensores montados desde el año 2007 por los Grupos de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería y por Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Almería en las diferentes salas de la cueva (Calaforra et al. 2011). Se escogió el periodo de máxima afluencia de visitantes desde el 1 de Agosto al 30 de Agosto del año 2013 contabilizando 50.437 visitas en este intervalo de tiempo. Las galerías modelo fueron la galería de los Fantasmas y la galería del Obispo (Figura 1) donde hay estaciones microclimáticas midiendo variables como CO₂, temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, goteo y control de flujo de entrada y salida de visitantes. El objetivo del estudio fue conocer la relación entre el número de visitantes y variables como CO₂, temperatura, humedad relativa para el cálculo de potenciales máximos de visitas y así obtener con la ayuda de la herramienta online Cavix el número de visitantes recomendado para no sobrepasar los límites marcados establecidos por el gestor en la herramienta online Cavix.

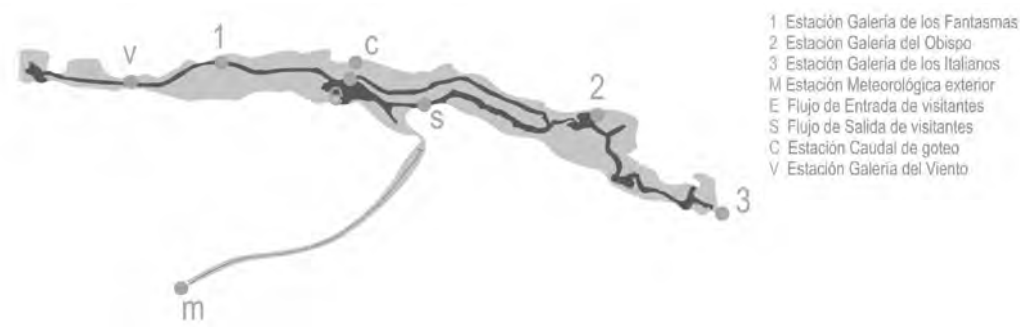


Figura 1. Topografía de la cueva de El Soplao, distribución de las diferentes Galerías (Galería de los Fantasmas con número 1, Galería del Obispo con número 2, Galería de los Italianos con número 3) y estaciones de medida (M marcada como Estación Meteorológica, la letra E para detección de flujo de entrada de visitantes, letra S para Flujo de salida de visitantes, letra C para Estación de Caudal de goteo, y letra V para medición de viento).

El estudio de capacidad máxima en la cavidad de El Soplao se ha realizado tomando los datos de eventos con picos máximos de CO₂ en relación a visitantes (Figura 2). Este estudio se basa en la influencia que tienen las visitas en las cavidades turísticas ya definida por autores como (Pulido-Bosch et al., 1997, Calaforra et al., 2003, Fernández-Cortés 2005, Cuezva, 2008; Lobo et al., 2013 y Cuevas, 2013) con distintas metodologías.

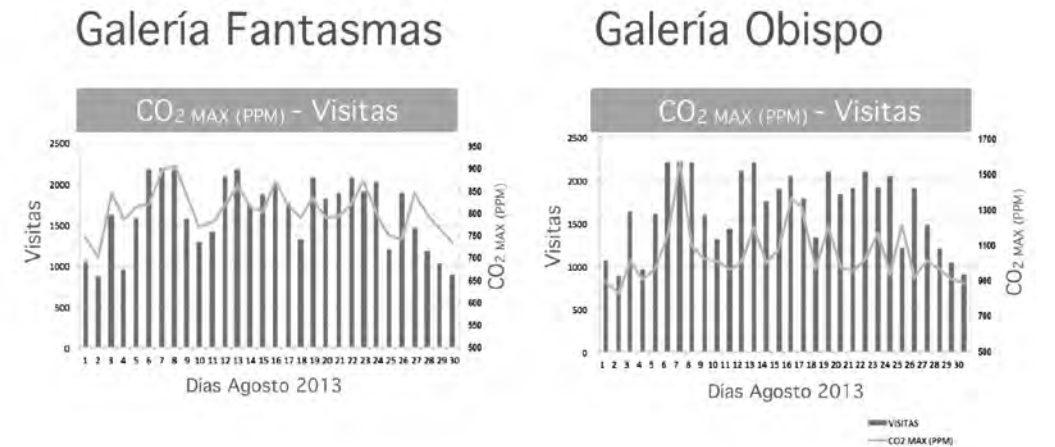


Figura 2. Relación de visitantes con el CO₂ máximo en las galerías de Fantasmas y Obispo para el mes de agosto de 2013.

METODOLOGÍA

El sistema de control ambiental de la Cueva de El Soplao cuenta actualmente con un total de 26 sensores en 8 estaciones de medida repartidas a lo largo de la cavidad, tratando de cubrir toda la extensión de la zona visitable. Las variables que se miden son temperatura (T), humedad relativa (HR), concentración de CO₂, dirección y velocidad del aire dentro de la cavidad, caudal en zona de goteo interior, estimación del flujo de visitantes en las zonas próximas a las estaciones de medida y pasillos de entrada y salida y presión barométrica dentro de la cavidad. Además una estación meteorológica exterior registra además la lluvia, permitiendo la comparación del interior con el clima exterior (Gázquez et al. 2014, en estas mismas actas).

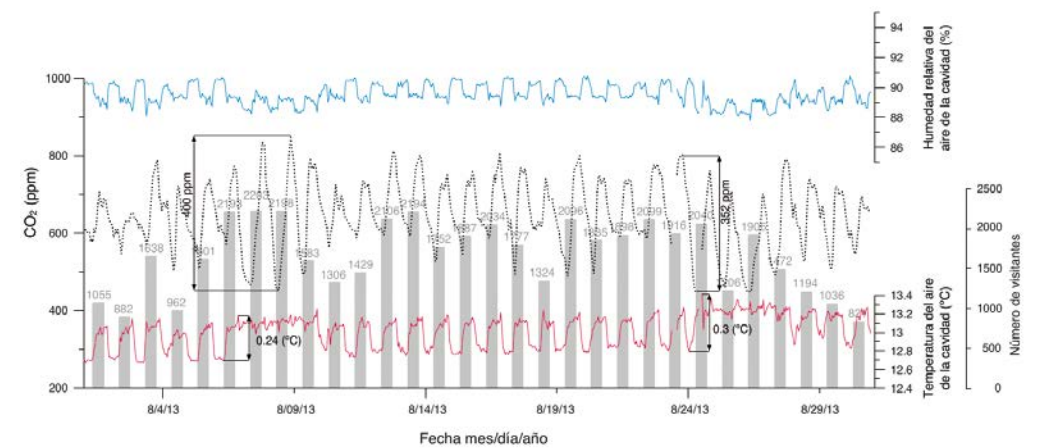


Figura 3. Relación entre las variables CO₂, temperatura y humedad relativa con el número de visitantes en el mes de agosto en eventos diarios. Selección de los eventos para el método Cavix.

Para la clasificación de eventos se tomó en cuenta el CO₂ máximo, el CO₂ mínimo y el CO₂ remanente ya que esta variable es altamente influenciada por la presencia de visitantes. Así como la temperatura que también se ve afectada por las visitas. Los visitantes se compararon con las variables CO₂, temperatura y humedad relativa (Figura 3) para determinar la influencia que tienen en el microclima de la cavidad y así poder desarrollar la herramienta Cavix para determinar el número máximo de visitantes recomendados para una cavidad en un determinado evento.

Para obtener el valor de equilibrio de la variable CO₂, se comparó el CO₂ máximo y el CO₂ remanente (diferencias de CO₂ diarias) determinando por medio de la línea de tendencia, el valor estable de CO₂ que no sería aconsejable sobrepasar (Guirado et al., 2014).

Finalmente se elabora un archivo "csv" separado por comas visitantes en primer lugar y las variables CO₂, temperatura y humedad relativa a continuación de los eventos a estudiar. En este caso el mes de agosto de 2013. Una vez generado el "csv" de multieventos (las visitas diarias hacen que los eventos sean cada día) podemos cargarlo en la aplicación web Cavix, le introducimos los valores que hemos calculado para cada variable (ejemplo Figura 4 para variable CO₂) y le asignamos un peso en porcentaje a cada variable. Cavix nos devuelve un número máximo de visitantes recomendado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos de CO₂ máximo, remanente o la variación diaria obtenemos distintas gráficas (Figura 4) que nos ayudan a la valoración de cada variable. Inicialmente, métodos simples de correlación lineal nos informan de que los datos pueden ser tratados por la aplicación Cavix valorándolos adecuadamente de acuerdo con el ajuste que presentan con la variable "visitantes".

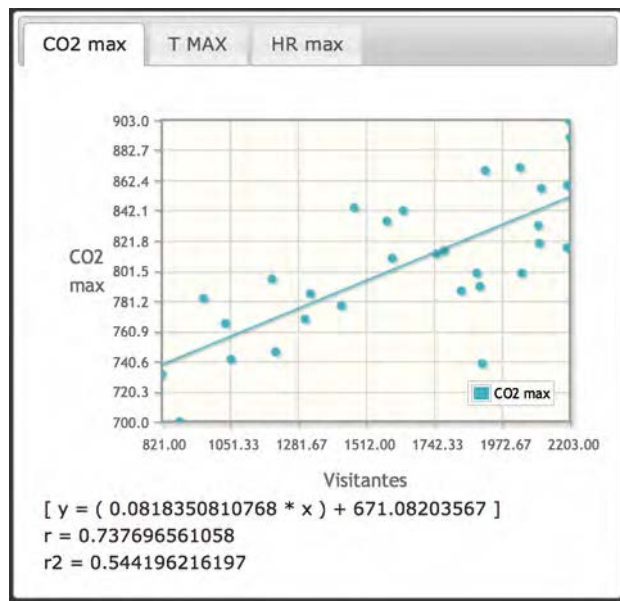


Figura 4. Correlación entre la concentración de CO₂ máximo y el número de visitantes en el periodo 1 de agosto hasta 30 de agosto de 2013 para la galería Fantasmas de la cavidad El Soplao, Cantabria España.

Los resultados obtenidos al ponderar cada uno de las variables CO₂ (max, var y rem) para la capacidad de visitantes en la cavidad de El Soplao es de unos 1900 visitantes como máximo con ponderaciones de 0.8 par aun valor máximo deseable de CO₂ de 800 ppm, 0.1 para una variación máxima diaria de 200 ppm y un CO₂ remanente tras el cierre de la cavidad de 100 ppm.

Este resultado recomendado obtenido de 1.900 visitantes como máximo sólo se supera en ciertas ocasiones de máxima visitabilidad (Tabla 1), lo cual no es deseable y debiera ser tenido en cuenta por los gestores de la cavidad, ya que sobrepasar estos límites puede suponer a la vez que se superarán a su vez los valores máximos considerados en la ponderación.

01-ago-13	02-ago-13	03-ago-13	04-ago-13	05-ago-13	06-ago-13	07-ago-13	08-ago-13	09-ago-13	10-ago-13
1055	882	1638	962	1601	2193	2203	2198	1583	1306
11-ago-13	12-ago-13	13-ago-13	14-ago-13	15-ago-13	16-ago-13	17-ago-13	18-ago-13	19-ago-13	20-ago-13
1429	2106	2194	1752	1887	2034	1777	1324	2096	1835
21-ago-13	22-ago-13	23-ago-13	24-ago-13	25-ago-13	26-ago-13	27-ago-13	28-ago-13	29-ago-13	30-ago-13
1898	2099	1916	2040	1206	1906	1472	1194	1036	821

Tabla 1. Visitantes del periodo de testeo del 1 de agosto al 30 de agosto de 2013 para la herramienta web Cavix de la cavidad El Soplao.

También es necesario destacar que esta recomendación varía según los eventos a valorar, el régimen de visitas en época estival (49.643 visitantes en el mes de agosto de 2013) es muy superior a periodos invernales (2.236 mes de febrero de 2013). Por lo tanto la herramienta Cavix debe estar activa y adecuarse a cada una de las situaciones estacionales o de gestión que influyan en la cavidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a las instalaciones de El Soplao y al Gobierno de Cantabria por el acceso a la base de datos de la información de las diferentes variables ambientales de la cavidad. Al Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental RNM189 de la Universidad de Almería por los materiales necesarios para la elaboración de este estudio. El desarrollo de la herramienta informática específica Cavix para El Soplao ha sido realizado en el marco del Proyecto Estudio Ambiental de la Cueva de El Soplao, subvencionado por el Gobierno de Cantabria.

REFERENCIAS

Calaforra, J. M., Fernández-Cortés, A., Sanchez-Martos, F., Gisbert, J., Pulido-Bosch, A., 2003. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, 30 (2), 160–167.

Calaforra, J. M. Fernández-Cortés, Á., Gázquez, J. A., Novas, N. 2011. Conservando la cueva del El Soplao para el futuro: control de parámetros ambientales. *En: El Soplao: una ventana a la ciencia subterránea*, pp. 52-57.

Cuevas-González, J., 2013. Caracterización microclimática e hidrogeoquímica de la Cueva del Canelobre (Busot, Alicante). *Tesis Doctoral, Universidad de Alicante*.

Cuezva, S., 2008. Dinámica microambiental de un medio kárstico somero (Cueva de Altamira, Cantabria): microclima, geomicrobiología y mecanismos de interacción cavidad-exterior. *Tesis Doctoral Universidad Complutense de Madrid*.

- Fernández-Cortés, A., 2005. Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico. *Tesis Doctoral Universidad de Almería*.
- Gázquez, J. A., Novas, N., MacLennan, J., García, R. y Ros, M. 2014. Telecontrol ambiental en tiempo real de la cueva de El Soplo. *1er Congreso Ibero-Americano 5º Congreso Español sobre Cavernas Turísticas "Ibero-América subterránea", CuevaTur 2014*. Aracena.
- Guirado, E., Gázquez, F., Fernández-Cortés, Á., Calaforra, J.M. 2014. Cavix: Método simplificado de cálculo de la visitabilidad máxima en cavidades turísticas (aplicación web-cloud). *1er Congreso Ibero-Americano 5º Congreso Español sobre Cavernas Turísticas "Ibero-América subterránea", CuevaTur 2014*. Aracena.
- Lobo, H. A. S., Trajano, E., Marinho, M. de A., Bichuette, M. E., Scaleante, J. A. B., Scaleante, O. A. F., Rocha, B. N. y Laterza, F. V., 2013. Projection of tourist scenarios onto fragility maps: Framework for determination of provisional tourist carrying capacity in a Brazilian show cave. *Tourism Management*, 35: 234-243.
- Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C. M., y Vallejos, A. (1997). Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31(3-4), 142-149.

Caracterización microclimática de las "Cuevas del Salnitre" (Montserrat, Catalunya). Primeros resultados.

Núria Monés-Cera, Montserrat Salvà-Catarineu, Ferran Salvador-Franch

Departamento de Geografía Física y A.G.R., Universidad de Barcelona, c/ Montalegre, 6-8 08001 Barcelona (nuriamonés@gmail.com)

RESUMEN

Las Cuevas del Salnitre, ubicadas en Montserrat (provincia de Barcelona), son un magnífico ejemplo de karst en conglomerados calcáreos, y una de las pocas cavidades turísticas en este medio de la península Ibérica. Explotada como mina de salitre en los inicios de la edad moderna, un goteo de visitantes ilustres tales como F. de Zamora, Santiago Rusiñol o E. A. Martel la dieron a conocer al mundo en la segunda mitad del siglo XIX, iniciando así su explotación turística. Iluminada y reacondicionada en 1985, la gestión actual está a cargo del Ayuntamiento de Collbató. Además del efecto ya conocido de la iluminación, la preocupación por el deterioro de los espeleotemas, por contaminación biológica y corrosión, determinó la necesidad de iniciar el control permanente de los parámetros ambientales para conocer el posible impacto de los grupos de visitantes en la alteración de la dinámica microclimática natural de la cavidad. En febrero de 2013 se inició una primera etapa de seguimiento de parámetros climáticos, acorde con el presupuesto disponible, con la monitorización de la temperatura del aire (Ta), de la roca (Tr) y de la humedad relativa (HR), mediante la instalación de 6 puntos de muestreo distribuidos a lo largo de la cavidad. Al tratarse todavía de una serie muy corta, y con algunos vacíos temporales, no es posible aún presentar resultados concluyentes, pero sí se pueden avanzar algunos preliminares que aquí se exponen.

Palabras clave: Control microclimático, Cuevas del Salnitre, Montserrat, parámetros ambientales.

Microclimatic characterization of the "Salnitre" Caves (Montserrat, Catalunya). First results.

ABSTRACT

The "Salnitre" Caves, located in Montserrat (province of Barcelona), are a magnificent example for karst in calcareous conglomerates, and one of the few touristic cavities on this environment of the Iberian peninsular. Exploited as a salpetre mine in the early modern age and thanks to the visits of a few distinguished personalities like F. de Zamora, Santiago Rusiñol or E. A. Martel the cave became known to the world during the second half of the XIX century, starting a touristic exploitation. Illuminated and reconditioned in 1985, the caves are currently managed by the Town hall of Collbató. Apart from the already known effect the lighting has on the cave walls, worries due to the deterioration of the speleothems by biological contamination and corrosion identified the need to start a permanent control of the environmental parameters as to know the possible impact the visitor groups have on the cavities natural microclimatic dynamics. In February 2013 a first stage was started with a follow-up of the climatic parameters, all within the available budget, monitoring the air temperature (Ta), rock temperature (Tr) and the relative humidity (HR) via 6 sampling points installed along the length of the cavity. As this is still a very short series that also includes some temporary gaps, it is still not possible to present conclusive results, but we can advance a few preliminary results that we set forth here.

Keywords: Environmental parameters, microclimatic control, Montserrat, Salnitre Caves.

INTRODUCCIÓN

La montaña de Montserrat, singular por su morfología -con sus monolitos característicos, pozos y simas-, forma parte de los relieves de la Cordillera Prelitoral Catalana, dispuestos paralelamente a las otras unidades mayores del Sistema Costero Catalán y a la línea de costa. El macizo montserratino ocupa unos 8 km de largo por 5 km de ancho, culminando a 1.236 m en la cima de Sant Jeroni.

Parque natural desde 1987, es el enclave histórico de la Abadía de la Virgen de Montserrat desde el año 1025, que vivirá épocas de esplendor, destrucción, abandono y reforma hasta la actualidad, en que la atención al turista convive con la peregrinación y la vida monástica.

El relieve de la montaña de Montserrat es el resultado de un sistema relictivo de abanicos costeros formados durante el Paleógeno (Eoceno), que pertenece a la orla discontinua de macizos conglomeráticos alineados al pie de la vertiente sur de los Pirineos, al noroeste del Sistema Mediterráneo y del extremo sureste de la Cordillera Ibérica, todos ellos formados también por sedimentación de abanicos aluviales en cuencas de antepaís (Martínez-Rius, 2008).

Por encima de un zócalo paleozoico (constituido por granitoides y pizarras) y una cobertura mesozoica (formada por dos tramos de areniscas rojas y lutitas alternando con dos tramos de calizas y dolomías), se encuentra la sucesión paleógena de Montserrat, formada por brechas, areniscas y conglomerados en el área más prominente del macizo (ICC, 2002).

Los conglomerados de Montserrat tienen un comportamiento kárstico debido a la litología carbonatada de parte de sus cantos rodados y sobre todo, del cemento calcáreo predominante. Así, la escorrentía superficial es de tipo torrencial pero escasa y de régimen irregular, mientras que la subterránea es la que predomina (Mor, 1973). Sin embargo, sólo unas pocas cavidades son funcionales en la actualidad, la mayoría situadas en la vertiente norte, el resto son testigo de antiguas fases espeleogenéticas truncadas por la evolución morfológica de la montaña (Llopis, 1954).



Figura 1. Localización de las Cuevas del Salnitre.

LAS CUEVAS DEL SALNITRE

Las Cuevas del Salnitre forman parte, pues, de un sistema de paleokarst de la vertiente meridional de Montserrat, hidrológicamente activo durante el Plioceno (Cardona, 1990). Están situadas a 505 metros sobre el nivel del mar, en la vertiente sur de la sierra de las Garrigoses, antiguo nivel de base de finales del Terciario (Cervelló, 2008).

Con 958 metros de galerías, regidas todas ellas por la estructura dominante de diaclasas, se distinguen tres sectores principales: a) cavidades superiores, que incluyen el nivel de las bocas de acceso y la gran *sala de la Catedral*; b) cavidades inferiores, de morfología meandriforme, entre 15 y 25 metros por debajo de las primeras; y c) *pou del Diabla* (pozo del Diablo), gran diaclasa subvertical que interconecta ambos niveles. El 60% de las salas y galerías están actualmente habilitadas al turismo, con suelos pavimentados, escaleras e iluminación eléctrica.

Así pues, a través de la entrada artificial actual, dos metros por debajo de la boca natural y principal de la cavidad, se accede a un vestíbulo de planta triangular que da paso a la *sala de la Catedral*, de 65 metros de ancho, techos de hasta 35 metros y el suelo cubierto de bloques de dimensiones considerables. Adyacente a *la Catedral* se encuentra la galería larga y estrecha de *Papallones*, el único gran espacio no turístico de la cavidad,

El *pou del Diabla*, de 16 metros de desnivel, da paso a las cavidades inferiores mediante un extenso caos de bloques y depósitos estalagmíticos erosionados.



Figura 2. Galerías inferiores. Foto de archivo Oficina de Turismo.

El resto de galerías, hasta llegar al *pavelló de la Verge*, punto final y sin salida de las Cuevas del Salnitre, es una sucesión de conductos que van dibujando meandros, con abundancia de formaciones litogénicas, la mayor parte de ellas en fase fósil, diseminadas entre bloques caídos.

EXPLOTACIÓN TURÍSTICA

Aunque la primera topografía de las Cuevas del Salnitre data del año 1790, encargo de Francisco de Zamora a Francisco Remart y Pedro Pablo Montaña, no es hasta mediados del siglo XIX que se inicia la explotación turística como tal. Del año 1985 es el acondicionamiento actual y el régimen de visitas mantenido hasta la fecha.

El público es fundamentalmente escolar (40% del total, distribuido en máximo tres grupos matinales, de martes a viernes) y familiar (60% del total, en tres grupos matinales y dos vespertinos, los fines de semana y festivos). La procedencia es mayoritaria de la provincia de Barcelona.

El número de visitantes registra un ligero descenso desde el año 2008. En 2013 se recibieron un total de 20.029 visitas, distribuidas a lo largo del año con picos en primavera, otoño y el mes de agosto.

La visita, siempre guiada, recorre 360 metros de las galerías principales hasta finalizar, actualmente, en *la Campana*, deshaciéndose seguidamente el camino hasta el punto de inicio. El tiempo de permanencia dentro de la cavidad es, aproximadamente, de una hora y cuarto por grupo, que puede ser de hasta 60 personas cada uno. Desde septiembre de 2010, los últimos 140 metros de las galerías inferiores, aunque habilitados, están actualmente cerrados al público por causas de gestión (Figura. 3).

SISTEMA DE CONTROL MICROCLIMÁTICO

Con el objetivo de obtener una primera aproximación a las características microclimáticas de la cavidad y establecer la idoneidad de la instrumentación y puntos de muestreo seleccionados, una primera fase de toma de datos se inició a principios del mes de febrero de 2013, con la instalación de 6 puntos de control, 5 en el interior de la cavidad y otro en el exterior inmediato, como serie de referencia, junto con los datos procedentes de la estación meteorológica automática más cercana, Sant Dimes, del *Servei de Meteorologia de Catalunya*, situada en las inmediaciones del monasterio de Montserrat. A mediados de septiembre de 2013 se incorporaron 3 sensores de CO₂ en tres de los puntos preexistentes (resultados no presentados aquí), se incluyó un séptimo punto de muestreo en las galerías inferiores y se modificó la localización de otro dentro de la misma sala para posibilitar la conexión a la red eléctrica del nuevo sensor de CO₂.

La localización de los puntos de muestreo y los parámetros monitorizados se puede ver en el esquema topográfico adjunto (Figura 3), donde se observa, en sombreado, la zona turística actual de la cavidad.

Para la toma de datos se usaron sensores-registradores HOBO U12-012 (Onset), para temperatura del aire (Ta), temperatura de la roca (Tr) y humedad relativa (HR), con rango de medida de -20 a 70°C y precisión de ±0,35°C para T, y rango de 5 a 95% y precisión de ±2,5% para HR. Para CO₂ se usaron sensores TELAIRE-7001 conectados al canal externo de los HOBO. La frecuencia de medición fue de 10 minutos para todos los parámetros.

A causa de la incorporación más tardía del punto de muestreo de *Meandre* y del control de HR en *Papallones*, además de la desestimación de las series de Ta y HR para el *pavelló* de la *Verge* y parte de *Columnes*, por condensación, en la actualidad únicamente se dispone de cuatro series completas, para un mismo punto, con un mínimo de un año de duración. Para los cálculos anuales se han utilizado las series con un mínimo de ocho meses de datos. Del resto de los puntos se muestran las medianas mensuales.

CARACTERÍSTICAS MICROCLIMÁTICAS DEL INTERIOR

Las Cuevas del Salnitre presentan una temperatura mediana del aire de 14,75°C, con una oscilación térmica de solamente 2,21°C a lo largo de sus galerías más internas, incrementándose a 6,25°C si se incluyen los datos de *la sala de la Catedral*, muy influenciada por las temperaturas exteriores por su proximidad con la boca de la cavidad. La amplitud térmica es todavía menor al analizar los puntos por separado, con una mínima de 0,73°C en *Papallones* y una máxima de 1,27°C en *Monjos* (Figura 4).

Con una mediana general alrededor del 97,7% y máximas del 100% de humedad relativa en la totalidad de los puntos internos de la cavidad, las medias se incrementan del 85,6% en *la Catedral*, hasta el 99,91% de *Columnes*, o sea, de galerías altas a inferiores. Con un rango mayor que el observado en las temperaturas, la variabilidad decrece (de 56 a 2,9 puntos porcentuales) de la misma forma que la media aumenta (Figura 4).

Ta (°C) Comparativa ANUAL	S1 Exterior	S2 Catedral A/B	S3 Papallones	S4 Monjos	S5 Columnes	S6 Meandre	Gral. Interior
Mediana	16,23	14,55	15,66	14,05	14,77	14,67	14,75 ⁽¹⁾ / 14,75 ⁽²⁾
Promedio	16,76	14,56	15,55	14,20	14,78	14,70	14,74 / 14,79
Máxima	37,07	17,84	15,86	14,91	15,39	15,10	17,84 / 15,86
Mínima	6,64	11,59	15,13	13,64	14,34	14,29	11,59 / 13,64
Rango	30,43	6,25	0,73	1,27	1,05	0,81	6,25 / 2,21
Desv. Est.	4,94	1,25	0,21	0,36	0,19	0,26	0,80 / 0,58

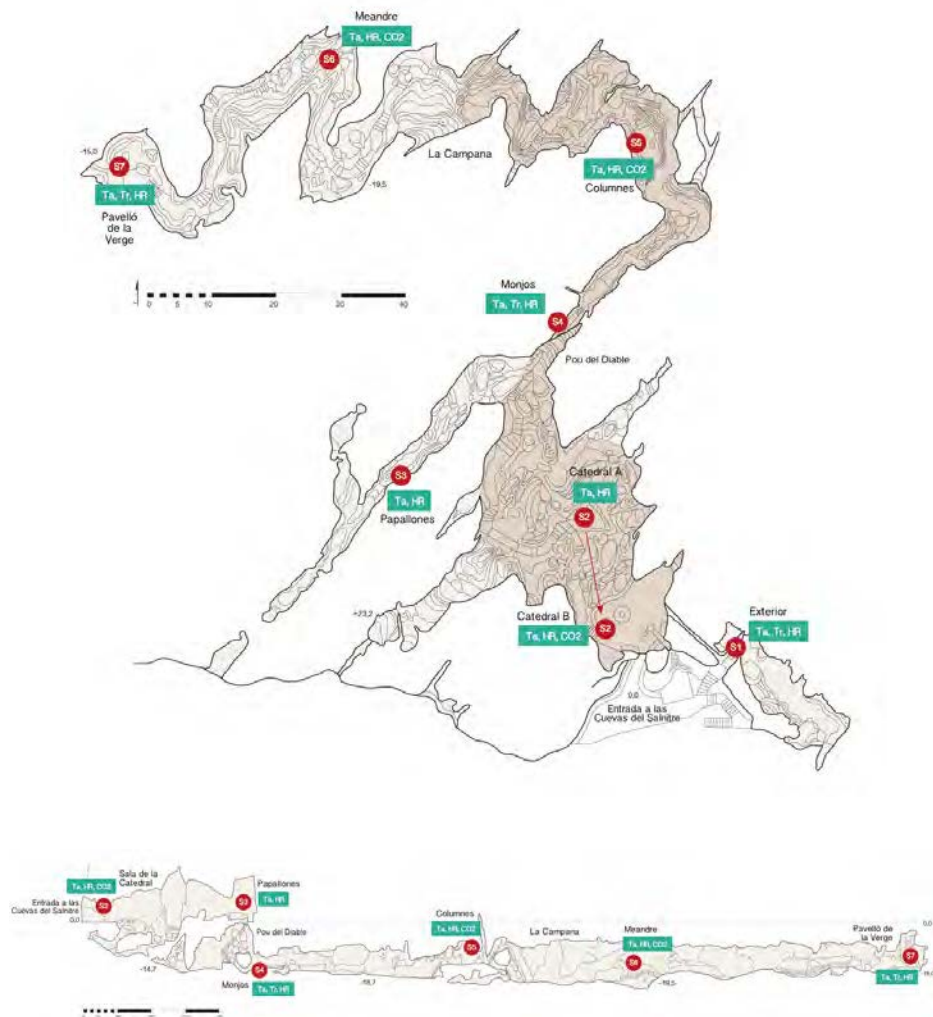


Figura 3. Planta y perfil de las Cuevas del Salnitre a partir de la topografía de Bosch e Inglès (1988). Localización de los puntos de control y parámetros monitorizados.

HR (%) Comparativa ANUAL	S1 Exterior	S2 Catedral A/B	S3 Papallones	S4 Monjos	S5 Columnes	S6 Meandre	Gral. Interior
Mediana	63,15	85,61	88,01	89,68	99,91	98,19	97,69 ⁽¹⁾ / 98,04 ⁽²⁾
Promedio	62,87	85,43	88,12	89,23	99,76	98,67	91,65 / 93,90
Máxima	92,34	100,00	98,70	100,00	100,00	100,00	100 / 100
Mínima	16,33	43,55	71,12	67,73	97,11	96,87	43,55 / 67,73
Rango	76,01	56,46	27,58	32,27	2,89	3,13	56,46 / 32,27
Desv. Est.	12,94	12,58	8,77	9,63	0,46	1,01	10,46 / 8,53

Figura 4. Datos del 1 de mayo del 2013 al 30 de abril del 2014 para las series anuales completas de Ta y HR. Estadísticas generales del interior de la cavidad teniendo⁽¹⁾ y no teniendo⁽²⁾ en cuenta la Catedral.

Tr (°C) Comparativa ANUAL	S1 Exterior	S4 Monjos	S7 Verge	Gral. Interior
Mediana	15,84	14,03	14,94	14,63
Promedio	16,67	14,18	14,84	14,47
Máxima	29,19	14,86	15,13	15,13
Mínima	8,82	13,57	14,17	13,59
Amplitud	20,37	1,27	0,96	1,53
Desv. Estándar	4,24	0,39	0,21	0,46

Figura 5. Datos del 1 de mayo del 2013 al 30 de abril del 2014 para las series anuales completas de Tr.

La temperatura de la roca se mantiene muy similar a la del aire en el interior de la cavidad, con una ligera disminución de décimas de grado y una amplitud térmica general claramente inferior, de 1,53°C (Figura 5).

Existe una clara relación entre las temperaturas exteriores y las de la totalidad de los puntos interiores aunque con grados de influencia decrecientes y rangos minimizados a medida que nos adentramos a las zonas más internas. A su vez, mientras que las temperaturas medias más altas exteriores se observan entre los meses estivales, con máxima en agosto, en el interior de la cavidad se observa un claro desfase temporal hacia los meses de agosto, septiembre y octubre en las galerías superiores, atrasándose hasta septiembre, octubre y noviembre en las galerías inferiores, con máxima en octubre (Figura 6).

Ta (°C) Comparativa MENSUAL	Ref. Sant Dimes	Exterior	Catedral A/B	Papallones	Monjos	Columnes	Meandre
Febrero'13	2,75	10,12	12,73	15,28	13,59	-	-
Marzo'13	7,71	11,78	13,21	15,28	13,62	-	-
Abril'13	9,47	13,95	13,91	15,38	13,79	-	-
Mayo'13	10,43	13,95	14,10	15,47	14,03	-	-
Junio'13	15,96	18,25	14,65	15,57	14,19	-	-
Julio'13	21,93	22,59	15,13	15,66	14,43	-	-
Agosto'13	20,13	22,78	15,61	15,76	14,60	-	-
Septiembre'13	17,33	21,10	16,37	15,72	14,70	14,94	14,96
Octubre'13	15,53	20,10	16,46	15,77	14,75	15,01	15,01
Noviembre'13	8,07	14,65	15,32	15,65	14,65	15,01	15,01
Diciembre'13	6,86	11,86	13,33	15,29	13,98	14,77	14,86
Enero'14	6,66	11,57	13,14	15,22	13,91	14,63	14,63
Febrero'14	5,55	11,35	12,94	15,15	13,74	14,48	14,43
Marzo'14	7,50	13,16	13,52	-	13,74	14,72	14,34
Abril'14	12,52	15,41	14,70	-	14,00	14,84	14,48

Figura 6. Ta media mensual de febrero del 2013 a abril del 2014. La línea roja divide dos períodos, marca el cambio de posición del sensor de la Catedral (se observa un incremento en la Ta) y el inicio del registro en Columnes y Meandre. La línea discontinua roja señala los meses más calurosos en el exterior. En sombreado rojo y azul, los tres meses más cálidos y los cuatro más fríos respectivamente. En negrita, las medias mínimas y máximas de las series/períodos completos. En caso de duda, se ha utilizado el promedio.

HR (%) Comparativa MENSUAL	Ref. Pluviometría Sant Dimes (mm)	Ref. Sant Dimes	Exterior	Catedral A/B	Papallones	Monjos	Columnes	Meandre
Febrero'13	15,20	68,33	55,55	59,14	-	61,74	-	-
Marzo'13	99,50	71,29	69,04	74,21	-	75,79	-	-
Abril'13	108,00	66,15	58,81	74,94	-	80,37	-	-
Mayo'13	90,30	73,75	77,16	87,64	-	89,31	-	-
Junio'13	12,70	69,42	67,96	98,20	-	92,95	-	-
Julio'13	34,60	54,50	62,84	99,80	-	97,04	-	-
Agosto'13	21,20	70,63	65,79	100,00	-	100,00	-	-
Septiembre'13	22,20	68,00	66,53	98,08	96,47	100,00	97,38	99,91
Octubre'13	7,10	73,00	67,16	96,87	97,53	100,00	99,30	99,91
Noviembre'13	125,10	56,44	55,50	76,07	95,61	97,54	99,86	99,91
Diciembre'13	13,60	57,58	56,41	75,15	84,53	82,14	99,90	99,91
Enero'14	38,50	72,88	64,70	76,04	79,88	80,15	99,90	97,97
Febrero'14	31,50	65,42	58,93	69,93	73,41	74,55	99,89	97,91
Marzo'14	18,30	64,33	52,70	68,08	-	74,03	99,91	97,55
Abril'14	74,00	65,35	67,61	83,18	-	87,96	99,91	97,97

Figura 7. HR media mensual de febrero del 2013 a abril del 2014. La línea horizontal azul divide dos períodos, marca el cambio de posición del sensor de la Catedral y el inicio del registro en Columnes, Meandre y HR en Papallones. La línea discontinua roja señala los meses más calurosos en el exterior. En sombreado rojo y azul, los meses más secos y más húmedos respectivamente. A falta de datos, en sombreado claro, los meses que se intuyen. En negrita, las medias mínimas y máximas de las series/períodos completos.

En relación a las temperaturas medianas mensuales más bajas, coinciden la totalidad de los puntos entre los meses de enero, febrero y marzo, erigiéndose el mes de febrero como el mes más frío de los dos períodos invernales registrados, con un ligero desfase temporal en Meandre, el punto más alejado de la boca de la cavidad (Figura 6).

De la misma forma que las temperaturas, existe una concordancia entre las humedades relativas interiores y exteriores a finales de invierno y principios de primavera, con mínimas durante estos meses más fríos. Durante el resto del año, la humedad de la cavidad se rige por una correlación positiva con las temperaturas internas, con el mismo desfase temporal antes descrito, con máximas entre los meses de verano y otoño (hasta diciembre en el Meandre), mientras que en el exterior se encuentran durante la primavera. En Columnes se observa, pero, una inversión del comportamiento de los parámetros que se tendrá que analizar cuando se obtenga una serie anual completa (Figura 7). No se observa una correlación entre los meses más lluviosos (serie Sant Dimes) y el incremento de la humedad relativa en el interior de la cavidad a resolución mensual.

RANGO Ta (°C) DIARIO	visitantes					Catedral Coef. Cor.
	0	1-49	50-100	100-150	>150	
Mediana	0,29	0,38	0,50	0,55	0,90	0,46
Mínimo	0,02	0,02	0,12	0,17	0,21	
Máximo	1,16	1,39	1,50	1,81	1,93	
Mediana	0,02	0,07	0,12	0,17	0,19	0,86
Mínimo	0,00	0,02	0,05	0,10	0,12	
Máximo	0,05	0,22	0,26	0,29	0,45	

Figura 8a. Variabilidad de la Ta a nivel diario dependiendo del número de visitantes entrantes para Catedral y Columnes.

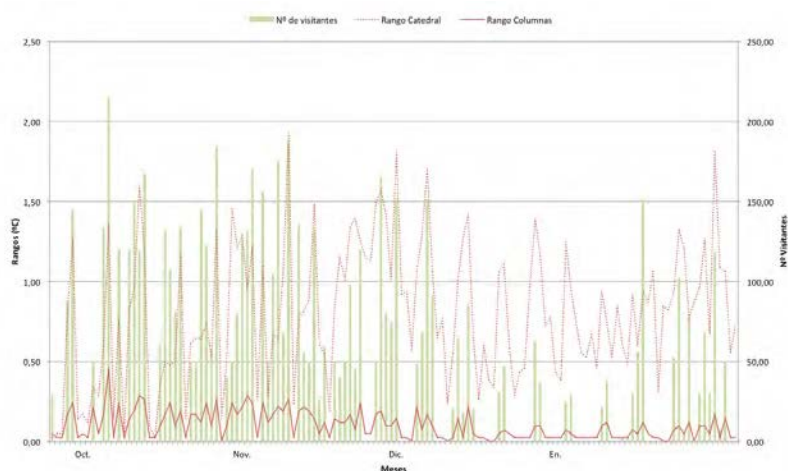


Figura 8b. Comparativa entre el número de visitantes entre octubre del 2013 y enero del 2014 y rangos de Ta en Columnes y Catedral.

IMPACTO DEL VISITANTE

Para el análisis del posible impacto de los grupos de visitantes en los parámetros de Ta y HR se ha trabajado con la variabilidad diaria de éstos en cada uno de los puntos de muestreo, encontrando una clara relación positiva entre la amplitud de sus rangos con el incremento del número de visitantes diarios en la sala de la Catedral y en Columnes (Figura 8a), observada, también, en el resto de puntos próximos a las galerías turísticas pero que al no superar las máximas fluctuaciones naturales diarias, se ha desestimado.

La variabilidad diaria de la Ta en la Catedral es ya, de forma natural, bastante mayor que en el resto de las salas y galerías, pasando de una mediana de 0,29 °C a 0,90 °C con entradas de más de 150 visitantes (3 grupos completos diarios o más), viéndose superado el rango máximo diario natural solamente de forma puntual. En Columnes, la sala más húmeda y más estrecha donde se realiza parada explicativa durante la visita turística, mucho más estable que la anterior (0,02 °C de mediana con 0 visitantes), es a partir de 50 personas cuando se observa un rango superior a la variabilidad natural diaria, siendo ésta la sala donde se observa un mayor impacto ambiental causado por el tránsito de turistas (Figura 8a y 8b).

RANGO HR (puntos %) DIARIO	RANGO HR					
	0 visitantes	1-49 visitantes	50-100 visitantes	100-150 visitantes	>150 visitantes	
Mediana	4,98	4,47	6,12	5,68	7,82	Catedral
Mínimo	0,15	0,20	0,28	0,19	0,27	Coef. Cor.
Máximo	23,95	25,84	23,73	21,44	26,15	0,13
Mediana	0,24	0,56	0,91	1,55	1,55	Columnes
Mínimo	0,00	0,15	0,40	0,71	0,86	Coef. Cor.
Máximo	1,22	1,79	2,61	2,63	2,69	0,78

Figura 9a. Variabilidad de la HR a nivel diario dependiendo del número de visitantes entrantes para Catedral y Columnes.

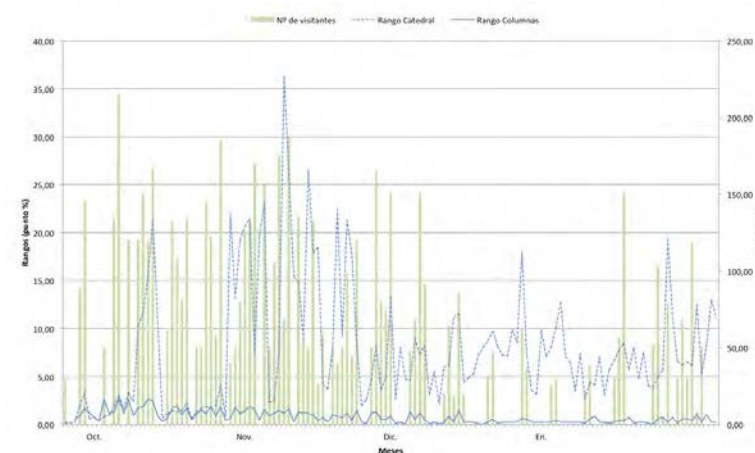


Figura 9b. Comparativa entre el número de visitantes entre octubre del 2013 y enero del 2014 y rangos de HR en Catedral y Columnes.

Para la humedad relativa, aunque se intuye mínimamente la influencia de los grupos en la Catedral, la elevada variabilidad diaria natural enmascara el posible impacto, mientras que en Columnes es más evidente, incrementando la mediana de 0,24 puntos porcentuales con 0 visitantes a 1,55 a partir de 100 personas (Figura 9a y 9b).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Aunque el microclima de la totalidad de la cavidad esté influido por las fluctuaciones meteorológicas exteriores, en las Cuevas del Salnitre se pueden diferenciar tres grandes zonas microclimáticas determinadas por la configuración estructural de la cavidad y la forma y grado de ventilación que ello conlleva: la Catedral, Papallones y galerías inferiores.

La Catedral, por su proximidad con la entrada de la cavidad permanentemente conectada con el ambiente exterior, se caracteriza por una importante, aunque atenuada, influencia externa (fluctuación anual de 6,26 °C en Ta y de 56,5 puntos porcentuales en HR) registrándose las mínimas y las máximas Ta del sistema (11,6 y 17,8 °C respectivamente) y las mínimas HR (43,6 %). Ésta será considerada la zona de transición entre el exterior y el ambiente interior.

La galería Papallones, aunque adyacente a la Catedral, por su orientación lateral respecto a la corriente de aire principal que se adentra por el pou del Diable hacia las galerías inferiores, es la galería con la Ta más estable (rango de 0,73 °C), la más seca (mediana de 88 % HR) y la más cálida (mediana de 15,7 °C) de las propiamente interiores.

Las galerías inferiores se caracterizan por una elevada HR, con medianas superiores al 90 %, una oscilación térmica anual de 1,5 °C y erigiéndose Columnes como la sala más húmeda (99,9 % de mediana) y más cálida (14,8 °C) de éstas. La mayor oscilación la encontramos en Monjos (1,3 °C y 32,3 puntos porcentuales) adyacente al pou del Diable, por lo tanto, la zona más ventilada.

Mientras que se observa una concordancia en la cronología de los meses más fríos interiores y exteriores, hay un desfase temporal entre los meses más cálidos exteriores (verano) y los interiores (otoño). Esto puede ser debido a la desactivación del sistema de ventilación natural de la cavidad durante los meses más cálidos provo-

cando un progresivo estancamiento del aire hasta la reactivación del sistema durante los meses más fríos. Éste sistema de ventilación es dependiente de la diferencia de T_a interior y exterior.

Se detecta una clara incidencia en los parámetros de T_a y HR causada por el tránsito de visitantes en las galerías turísticas, superando la variabilidad anual natural con grupos a partir de 50 personas en *Columnes*, sala en que, una correlación de 0,87 entre la T_a y el número de visitantes pone de manifiesto la gran influencia que tiene el paso de turistas en las fluctuaciones del parámetro (de solamente 0,46 en *la Catedral*).

A pesar de la brevedad de las series hasta ahora registradas ha resultado posible obtener una primera aproximación a la dinámica microclimática de las Cuevas del Salnitre y detectar con nitidez la incidencia del tránsito de visitantes a través de las galerías turísticas. Resulta de vital importancia, pero, la mejora de la instrumentación en las galerías inferiores, donde la condensación afecta de forma negativa la perdurabilidad de los sensores y el rango de medida de HR es insuficiente, para poder ampliar el registro de forma correcta y poder llegar a resultados más concluyentes. Con este fin, está proyectada la adquisición de nuevo material.

AGRADECIMIENTOS

Al Ayuntamiento de Collbató y, especialmente, a los responsables y técnicos del área de turismo por su interés y apoyo decisivo. Al *Patronat de la Muntanya de Montserrat* por la financiación de la instrumentación del proyecto.

REFERENCIAS

- Bosch, M. y Inglès, T. 1988. Topografía de les Coves del Salnitre. *Equip de Recerques Espeleològiques del Centre Excursionista de Catalunya*. Barcelona.
- Cardona-Oliván, F. 1990. Montserrat. En: Grans Cavitats de Catalunya, Vol. II: El Sistema Mediterrani i la Depressió Central, *Espeleo Club de Gràcia*, Barcelona, 397-414.
- Cervelló, J. M. 2008. Les Coves del Salnitre. *Espeleòleg*, 45, 8-18.
- Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). 2002. *Mapa Geològic de Catalunya. Olesa de Montserrat 392-1-2-(71-30)*. 1:25.000. Barcelona.
- Llopis, N. y Thomas, J. M. 1954. Las Cuevas de Collbató. Montserrat-Barcelona. (Estudio hidrogeológico de la vertiente meridional de Montserrat). *Monografías Geológicas*. Instituto de Geología de la Universidad de Oviedo, Oviedo, vol. I.
- Martínez Rius, A. 2008. Aproximació a la geologia de Montserrat. *Espeleòleg*, 45, 19-21.
- Miret Pérez, F. 1996. Topografías de la Cova del Salnitre, 1790/1988. *Bol. Museo Andaluz de la Espeleología*, 10, 7-13.
- Mor Benedito, J. 1973. Estudio hidrogeológico de Montserrat. *Comunicacions del III Simposium d'Espeleologia*, Barcelona.

Telecontrol ambiental en tiempo real de la cueva de El Soplao

José-Antonio Gázquez⁽¹⁾, Núria Novas⁽¹⁾, Jaime MacLennan⁽²⁾, Rosa García⁽¹⁾ y Manuel F. Ros⁽¹⁾

(1) Dpto. Ingeniería, Universidad de Almería, Almería, España (jgazquez@ual.es, nnovas@ual.es, rgs768@ual.es, mrf460@ual.es)
(2) Turismo del Nansa S.L., Cantabria, España (direccion@turnansa.com)

RESUMEN

En este trabajo se presenta un sistema de vigilancia en tiempo real de los parámetros medioambientales en cavidades turísticas diseñado por investigadores de la Universidad de Almería. El sistema que permite el registro de una gran cantidad de datos como la temperatura, HR, CO₂, etc., permitiendo su consulta en tiempo real desde cualquier lugar a través de Internet, tanto de datos actuales como los de otras fechas registrados y almacenados en una base de datos. En la Cueva de El Soplao, se instaló este sistema de forma personalizada para esta cavidad y se encuentra en funcionamiento interrumpido desde 2006, permitiendo un alto nivel de control y seguridad tanto de la influencia de las visitas en el día a día como de la evolución temporal a medio y largo plazo.

Palabras clave: Visitantes, cavidades, medidas ambientales, telecontrol, tiempo real.

Real-time environmental monitoring system of El Soplao cave

ABSTRACT

In this paper, a real-time monitoring system is presented to use in environmental parameters measurement in show caves. Researchers at the University of Almería have designed the system that allows the recording of a large amount of data such as temperature, RH, CO₂, etc..., permitting inquiries in real time from anywhere via Internet, both real time data and data recorded and stored in a database. In the cave of Soplao, this system was installed in a customised form for this cave and is in operation since 2006 uninterrupted that lets a high level of control and security of the influence of visitors day by day and the time evolution in long-term periods.

Keywords: Cave visitors, environment measures, real time telecontrol.

INTRODUCCIÓN

En el estudio de cavidades tanto para fines científicos como en el control de cavidades turísticas, se han venido empleando ampliamente unidades de registro llamadas dataloggers, que permiten la medida y almacenamiento de los valores medidos hasta su posterior descarga *in situ* y análisis de los datos. Estas operaciones de descarga de datos y análisis en tiempo diferido se hacen con una determinada frecuencia en función de la duración de la batería del datalogger, que puede ser superior a un mes. Este método permite conocer lo que sucede a tiempo diferido, además es necesario acudir periódicamente a descargar datos. Estos sistemas presentan el inconveniente de que si por cualquier causa no se efectúa la descarga en plazo máximo estipulado se pueden perder los datos medidos, tanto por agotamiento de baterías o por sobrepasar la capacidad de almacenamiento. En algunos proyectos como el de la Cueva de Lechuguilla (México) (Land and Burger, 2008) se mide la evolución de los niveles de agua en acuíferos y pozas interiores para estudiar la evolución hídrica, en otros proyectos se estudia la presencia de fauna como los murciélagos mediante registradores que graban los ultra-

sonidos en las cuevas de Cheddar (Suroeste de Inglaterra) (Park and *et al.*, 1999). Sistemas similares se han utilizado para estudiar el impacto de las visitas en las cuevas, un ejemplo de ello es el estudio de (Sanderson and Bourne, 2002) donde durante un periodo de 2 años se estudió las temperaturas y la humedad relativa en cuatro cuevas diferentes en Parque Nacional de las Cuevas de Naracoorte en Australia, dos de las cuevas cerca de una zona visitables y dos profundas y lejanas de zonas visitables. Otro ejemplo es el estudio del CO₂ en las numerosas cavidades que alberga el Peñón de Gibraltar es el artículo (Mattey, 2012), donde se registran mensualmente a lo largo de 250 metros de cueva en un datalogger variables como temperatura, humedad y goteo.

En cavidades turísticas españolas como la Cueva de Nerja se estudia la evolución del CO₂ entre otras muchas variables (Benvente and *et al.*, 2007). En 2008 se publica otro trabajo mediante dataloggers de la Cueva del Agua (Granada) que recoge un interesante estudio del balance hídrico realizado mediante estaciones meteorológicas externas e internas de la galería (Fernández-Cortés *et al.*, 2006). En todos estos estudios descritos se conoce lo que ocurre una vez recogidos los datos y analizados los mismos, lo cual puede demorarse varios meses hasta poder interpretar lo que ocurre en la cavidad.

En 2000, gracias a un proyecto de investigación concedido a la Universidad de Almería, y con la participación de miembros de los Departamentos de Hidrogeología y de Tecnología Electrónica se instaló en el Karst en Yeso de Sorbas (Almería) un sistema innovador (Gázquez and *et al.*, 2003) que permitía recibir en tiempo real en dependencias de la Universidad de Almería, los datos medioambientales (CO₂, HR, Temperatura y presencia de visitantes) de 2 de las galerías visitables en el Paraje Natural del Karst en Yeso de Sorbas, un sistema inteligente de 28 sensores conectados por cable dentro de la galería y vía radio con la Universidad de Almería hicieron factible este proyecto. El sistema estuvo operativo durante 6 años y permitió a los propios visitantes observar los efectos de sus entradas a las galerías, como el ciclo de CO₂ de los lugares visitados.

La Cueva-Mina de El Soplao es una maravilla de la naturaleza que esta situada en la provincia de Cantabria, tiene una longitud visitable de unos 1800 metros y ofrece una visión sin igual de muchos procesos geológicos de millones de años de duración. La Figura 1, ofrece una vista interior de una de las galerías centrales.

La Cueva de El Soplao en Cantabria tiene instalado un novedoso sistema de telemetría y control de parámetros ambientales que permite en tiempo real el acceso a todas las variables desde cualquier ubicación. Este sistema supone una gran ventaja y novedad sobre los sistemas clásicos basados de dataloggers.

El sistema de telemetría de El Soplao fue diseñado e instalado por el grupo de investigación de Electrónica Comunicaciones y Telemedicina "ECT" de la Universidad de Almería en colaboración del grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental también de la Universidad de Almería, que ya realizaron conjuntamente otros proyectos con este tipo de tecnología como el del Karst en Yeso de Sorbas ya mencionado.

Este sistema lleva en funcionamiento desde el año 2006 (apertura de El Soplao al público) y actualmente son ingenieros de ECT los encargados del seguimiento técnico del sistema en colaboración con Turismo del Nansa. Los datos están también disponibles para que especialistas en geología (grupo de Geología Ambiental de la Universidad de Almería) junto con la dirección de El Soplao, analicen su evolución y les suministre una herramienta para garantizar la conservación óptima de la cavidad.

Los datos son medidos y registrados cada minuto, aunque este tiempo es configurable, con ellos se crea una base de datos en un computador central. Los datos son accesibles vía internet en tiempo real, tanto los actuales como los históricos, mediante una aplicación interactiva que permite la consulta de su evolución mediante gráficos y la descarga numérica en diferentes formatos para su tratamiento con otras aplicaciones.



Figura 1. Vista interior de la Cueva del El Soplao.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Estructura General

El sistema de configuración dinámica y expandible, cuenta actualmente con un total de 26 sensores en 8 estaciones de medida repartidas a lo largo de la cavidad, tratando de cubrir toda la extensión de la zona visitable. Las variables que se miden son temperatura (T), humedad relativa (HR), concentración de CO₂, dirección y velocidad del aire dentro de la cavidad, caudal en zona de goteo interior, estimación del flujo de visitantes en las zonas próximas a las estaciones de medida y pasillos de entrada y salida y presión barométrica dentro de la cavidad. Además una estación meteorológica exterior registra además la lluvia, permitiendo la comparación del interior con el clima exterior. En Figura 2 se muestra un mapa de la zona visitable de la cavidad y la distribución de estaciones de medida con sensores en su interior y exterior. Un cable especial de comunicaciones y de provisión de energía eléctrica recorre de forma oculta a la vista del visitante toda la galería y conecta todas las estaciones entre si y con el centro de control.

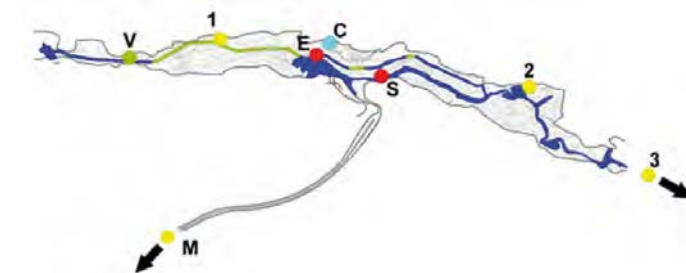


Figura 2. Mapa de la Cueva del El Soplao.

Las variables que se miden en cada estación se seleccionan en función de las necesidades específicas de la situación del lugar y en la tabla 1 se muestra el repertorio de sensores que están conectados en cada estación de medida.

	Nombre de la Galería	CO2	Temp	HR	Presencia	Velocidad aire	Dirección aire	Lluvia goteo	Presión atmosférica	Cuenta personas
1	Fantasmas	•	•	•	•					
2	Obispo	•	•	•	•					
3	Italianos	•	•	•	•					
M	Meteo Exterior	•	•	•		•	•	•	•	
E	Entra-visitas									•
S	Salida-visitas									•
C	Goteo							•		
V	Viento				•	•	•		•	

Tabla 1. Distribución de sensores en las estaciones de medida de El Soplao.

Las estaciones están ubicadas en zonas que no estorben al paso de los visitantes, pero que a su vez los visitantes puedan observar las lecturas de los parámetros que se están midiendo en ese momento. La Figura 3 muestra una vista de la situación de la estación de Obispo.

En la Figura 3 se puede apreciar como la estación se encuentra situada al filo de la zona transitable y está soportada por un mástil metálico en cuyo interior esta el cable comunicaciones y energía, que entra y sale de la estación, el cable queda totalmente camuflado dentro de las estructuras de la cueva o enterrada en el barro.

Un diagrama de bloques que contiene la distribución de estaciones, la conexión de sensores y la función de la estación central de control se muestra en la Figura 4. En este diagrama puede apreciarse la estructura distribuida del sistema, donde un conjunto de sensores son conectados a una estación autónoma de medida, gobernada por un microcontrolador y con información en tiempo real a partir de un reloj interno que no pierde la hora ni cuando se queda sin alimentación. Las estaciones son conectadas entre si mediante un cable especial de estructura mixta, es decir que contiene dentro de la misma cubierta una cable de pares tipo categoría 6 y un cable paralelo de 2,5 mm² de sección apto para la alimentación eléctrica de las estaciones. También dicho cable conecta las estaciones de medida con la estación central de control y la base de datos que gestiona todos los datos registrados. Mediante un interface de datos para adaptar las comunicaciones entre las estaciones mediante la norma RS485, se adaptan los datos para que bidireccionalmente puedan ser accedidos por la estación central. La norma RS485, es muy usada en comunicaciones digitales por cable, permite la comunicación mediante un bus serie de dos hilos, de hasta 256 nodos a distancias superiores a un kilómetro.



Figura 3. Estación de Obispo (izquierda de la imagen).

ESTACIÓN CENTRAL

La estación central se comunica con las estaciones remotas mediante un protocolo *polling*, consistente en el interrogatorio secuencial de todas las estaciones y transmitiendo éstas como respuesta, paquetes de información con los datos de todos los sensores de cada estación y una marca de tiempo en que fueron adquiridos

La estación central realiza una triple función:

- a) Suministra datos en tiempo real mediante un servidor Web a demanda de los usuarios, tanto en forma curvas gráficas como en formato numérico.
- b) Graba los datos obtenidos en una base de datos interactiva para su almacenamiento.
- c) Permite la consulta a través de servidor Web, de cualquier dato o grupo de datos entre dos fechas cualesquiera registrados en la base de datos.

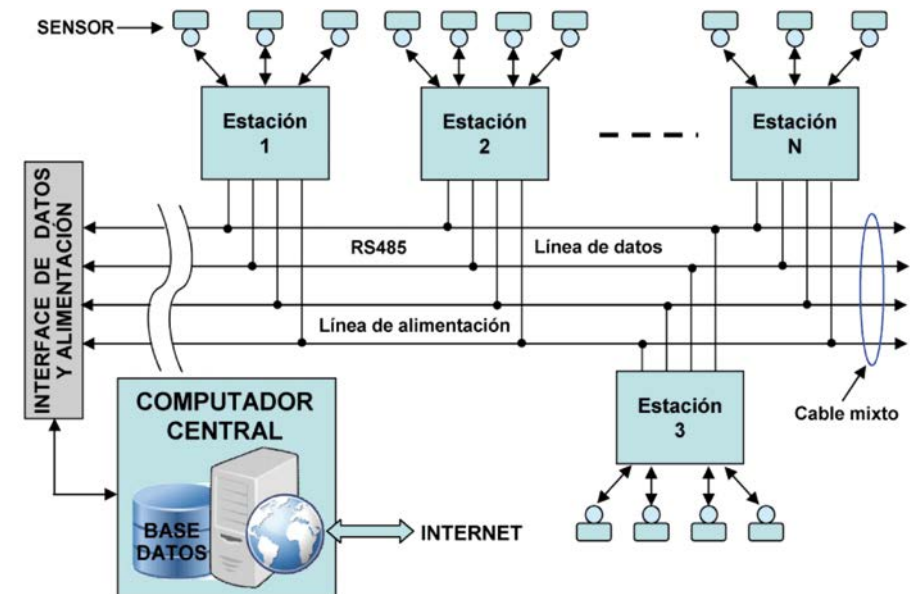


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de estaciones.

Físicamente la estación central se implementa en un computador con tecnología de servidor en el que se ha optado por el sistema operativo Linux, por considerarlo como una opción de estabilidad. La base de datos se implementa a partir del estándar MySQL, donde se ha desarrollado una aplicación de *minería de datos* y de presentación gráfica interactiva en clientes remotos, esta configuración ofrece una elevada calidad de presentación junto con una alta fiabilidad.

La realización del *polling* o interrogatorio de las estaciones y la inserción en la base de datos de las medidas obtenidas realiza un servicio residente o *daemon*. El servicio se ha programado en lenguaje C y ofrece altos niveles de seguridad, mediante el acceso a la base de datos de forma *logeada*, para grabar los datos de los sensores, cada ronda del *polling*, evitando el acceso no deseado a la base de datos.

También la unidad de almacenamiento mediante *Raid* en espejo minimiza el riesgo de pérdida de información frente a averías de los discos duros. Un factor importante en este tipo de sistemas es el tiempo de respuesta a la petición de datos, que va en aumento en función de la cantidad de datos almacenados, en este aspecto se ha mejorado el tiempo respuesta, mediante procesos que optimizan la indexación de los datos.

El tiempo de respuesta oscila entre la contestación instantánea si se trata de datos del día o de unos pocos segundos al tratarse de datos numerosos (varios días) de varias fechas.

La Figura 5, muestra una vista del armario que alberga la Estación Central de Control. En la parte superior se aprecia el módulo de energía, en el estante intermedio se encuentra la unidad de comunicaciones y la consola. Y en la parte inferior está situado el computador. Se utilizan dos unidades o computadores, uno de operación y otro en reserva. Este armario se sitúa en un edificio anejo a la galería donde se ubican las oficinas y otras dependencias de la administración de la Cueva de El Soplao.



Figura 5. Armario de la Estación Central de control.

ESTACIONES REMOTAS

Las estaciones remotas se encuentran distribuidas dentro de la galería excepto la estación meteorológica exterior. La estructura de las mismas esta basada en un sistema autónomo de medida de datos, y para optimizar mejor su funcionamiento se desarrolló un sistema empotrado de propósito específico, para la adquisición de datos, la calibración y las comunicaciones locales.

La Figura 6 muestra un diagrama de bloques, que define la estructura de estas estaciones, basado en un microcontrolador con el programa embebido. Este sistema básicamente se encarga de obtener los datos de

los sensores y comunicarse con la estación central para entregar dichos datos. Específicamente las unidades remotas realizan otras tareas transparentes a la estación central, como el preprocesado de los datos, donde la aplicación del microcontrolador filtra, escala y formatea debidamente los datos digitalizados de los sensores. De esta forma se suministra a la estación central la información directamente en las unidades de salida, grados centígrados, partes por millón, etc. Además como sistema de seguridad y supervisión se inserta en la trama de comunicaciones una marca de tiempo en el momento de la adquisición, lo cual permite indexar los datos según instante exacto que se midió el dato.

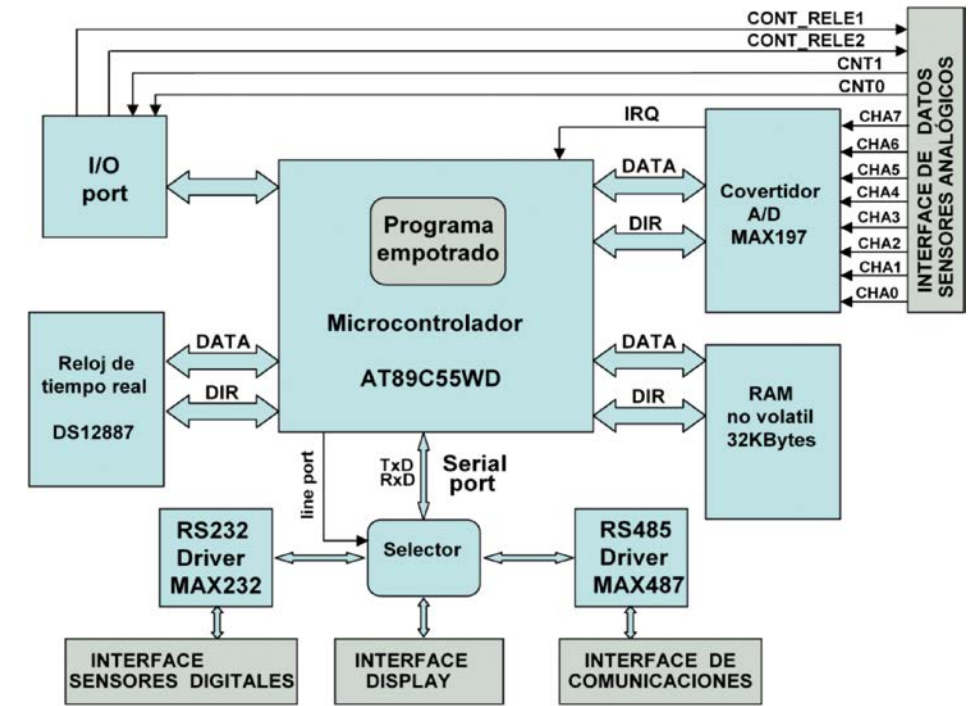


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema de adquisición remota.

Otras funcionalidades del sistema son la conectividad de un *display*/teclado que permite visionar en la misma estación remota los valores de las variables medidas y un teclado para cambiar la funcionalidad del *display*: variable fija, rotación entre variables etc. Todo ello aumenta en gran medida el nivel de distribución de tareas, algunas supervisadas por la estación central como la de sincronización horaria periódica, para evitar desajustes a largo plazo entre los relojes de las distintas unidades remotas.

La Figura 7, muestra una imagen del modulo remoto de adquisición de datos desarrollado en la Universidad de Almería, que también incluye una unidad de alimentación conmutada para suministrar todas las tensiones internas y algunas externas para determinados sensores, que funcionan a tensiones distintas a 24 voltios (tensión suministrada por el cable de comunicaciones mixto).

En el mercado hay una gran variedad de dispositivos comerciales de adquisición de datos, aunque los sistemas de propósito específico como el desarrollado, permite la optimización de las estaciones remotas y aumentar el grado de autonomía de las mismas; lo que redundará en un sistema más fiable y más fácilmente reconfigurable. Es decir, se dispone de un sistema abierto que permite un control absoluto sobre todo el sistema de control y de las comunicaciones configuradas según necesidades, y no cerrado donde sólo permite configurar las entradas y salida.

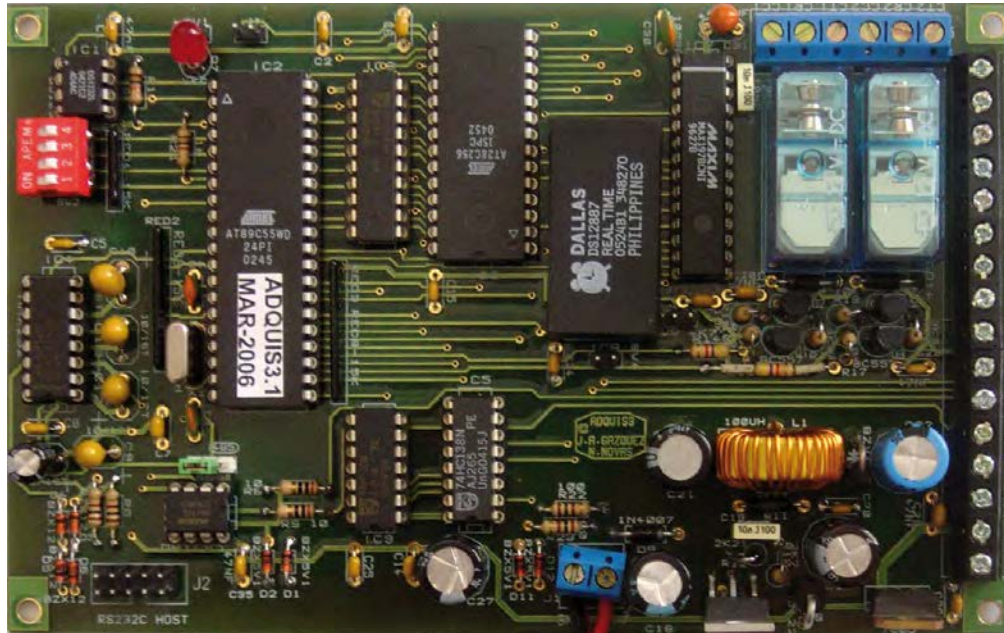


Figura 7. Vista del módulo microcontrolador remoto.

Otra funcionalidad disponible en el módulo de adquisición, y que no podría existir en sistemas comerciales estándar es la posibilidad de conexión de sensores con salida digital a través del interface de sensores digitales, seleccionable mediante *multiplexación* en el tiempo. La información de los sensores digitales es incorporada a los datos analógicos convertidos y por tanto escalada, marcada y tratada de igual forma que los sensores analógicos, homogeneizando toda la información sensorial.

Hay varios tipos de estaciones remotas, en función del conjunto de sensores que tengan conectados (tabla 1). Las estaciones 1-Fantasmas, 2-Obispo y 3-Italianos, tiene los mismos sensores: CO₂, humedad relativa, temperatura y presencia, la Figura 8 muestra una vista de este tipo de estación.

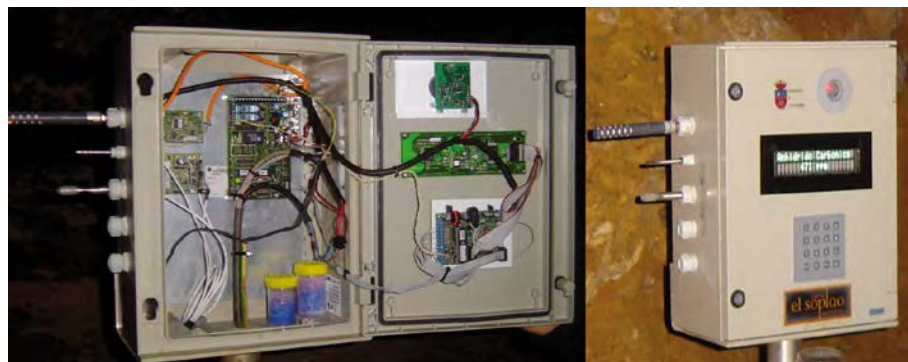


Figura 8. Vista interior y exterior de una estación remota CO₂, HR, T y presencia.

En el costado izquierdo de la estación de la Figura 8 se aprecian de arriba abajo los sensores de CO₂, temperatura y humedad relativa. El sensor de CO₂ es del tipo de absorción infrarroja, muy utilizado en estas aplicaciones, el sensor de temperatura es de tipo Pt100, de alta precisión y el de humedad relativa de tecnología capacitiva. En el interior, zona central, se puede observar el módulo de adquisición de datos. En la vista exterior de la derecha, se muestra el sensor de presencia iluminado en rojo. También se aprecia el *display* con la lectura de CO₂ y debajo el teclado. Estas estaciones registran los parámetros básicos de la cavidad que deben medirse en varios lugares para el estudio de la evolución a medio y largo plazo de los efectos de las visitas en las distintas cavidades.

Otro tipo de estación está destinado a medir parámetros que tienen escasa variación a lo largo de la cavidad, como es la presión atmosférica y el moviendo del aire, que al ser la cavidad a grandes rasgos en forma de tubo, basta con medir el moviendo del aire en cualquier punto central, para tener la información necesaria. La estación del viento, mide velocidad y dirección del aire, presión atmosférica y presencia de personas cercanas. La Figura 9 muestra una imagen de esta estación.



Figura 9. Vista interior de la estación remota del Viento.

En la parte superior de la Figura 9 se puede apreciar el sensor ultrasónico para medir la velocidad y dirección del aire, constituido por tres transductores en triángulo que emiten pulsos ultrasónicos y miden los tiempo de llegada a los transductores colindantes; este sensor tiene salida digital y permite determinar velocidad y dirección del aire sin elementos mecánicos. Este sistema obtiene precisión aceptable en cavidades y permite apreciar 1 cm/s. El sensor de presión atmosférica, tiene la toma de aire situada en el costado izquierdo de la caja, con un amortiguador de transitorios en fluidos, para evitar que los movimientos de aire afecten a la medida.

Otro tipo de estación remota es de meteorología externa, destinada a medir los parámetros ambientales exteriores, que ayuden a correlacionar lo que ocurre dentro de la cavidad con lo que ocurre en el exterior. Por ejemplo cuando y cuanto se producen goteos dentro de la cavidad a partir de la cantidad de lluvia en el exterior.

La Figura 10, muestra una imagen de la estación meteorológica exterior. En la parte superior, se aprecia la caja ventilada que alberga los sensores de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica. La parte superior

está coronada con una placa contadora piezoeléctrica de gotas de lluvia y un sensor con distribución en triángulo que mide la velocidad y dirección del aire. Todos estos sensores son una estación compacta con salida digital. A la derecha en el lateral se encuentra el sensor de CO₂, de salida analógica.



Figura 10. Vista de la estación meteorológica exterior.

Todos los sensores, la estación compacta y sensor de CO₂, se integran en el módulo de adquisición de la Estación Meteorológica para su transmisión a la Estación Central de Control.

Esta estación es la que más sensores alberga, ya que al ser la única exterior debe proporcionar suficiente información para correlacionar la influencia externa de todos los parámetros medidos a lo largo del interior de la cueva.

Hay otras estaciones remotas de menor complejidad, como las de contadores de visitantes de entrada y salida, que permite mediante unos haces infrarrojos hacer una estimación en tiempo real del número de personas que acceden. Este dato se correlaciona con la alteración de parámetros internos como el CO₂. Otra estación de poca complejidad es el contador de goteo interior. Mediante un embudo situado en la zona de mayor goteo un contador de cuchara, mide el flujo de agua que se filtra.

Obtención de datos medioambientales

El servidor de datos, permite la obtención de los datos medioambientales medidos por las estaciones remotas de forma ubicua, a través de Internet. La Figura 11 muestra una imagen del portal de la aplicación, que aparece una vez ingresado en el sistema.



Figura 11. Vista del portal de la aplicación WEB interactiva de consulta de datos.

Mediante la vista del mapa de la cueva con la situación de las estaciones, en los menús de la izquierda se puede seleccionar entre medidas actuales orientadas a estaciones o variables, 1ª y 2ª pestaña; o medidas de días anteriores, opción base de datos con salida gráfica u opción numérica, opción gestión BBDD. Además el portal permite otras funciones específicas de supervisión y mantenimiento del sistema, permiten efectuar actuaciones a distancia, y evitan desplazamientos innecesarios de personal técnico.

La Figura 12, muestra la pantalla obtenida mediante la consulta actual de variables, en este caso de la temperatura, se pueden obtener las gráficas independientes, o combinadas distintas curvas en una misma gráfica. Concretamente se muestra en una misma gráfica las temperaturas interiores, que se mueven en un rango de variación muy pequeño y por tanto se aprecia en la curva mayor ruido. En gráfica aparte se muestra la temperatura exterior que no se podría mostrar a la misma escala que la interior por su mayor variación diaria. La galería de Italianos es la más profunda y visitable sólo como "espeleo aventura", es la que presenta la temperatura mas baja.

Todas las gráficas son influenciadas en cualquier momento por movimientos de aire de distinta temperatura.

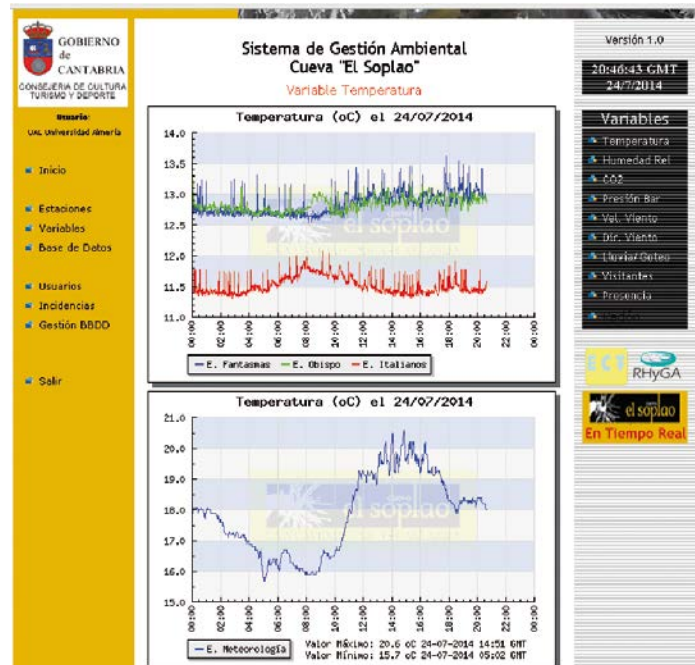


Figura 12. Evolución de la temperatura diaria.

También es posible la consulta en formato numérico. La Figura 13 muestra un fragmento de los datos numéricos de la estación meteorológica medidos minuto a minuto.

Estación Meteorológica
para el día 02/07/2014

Fecha	Hora	Lluvia	Humedad Relativa	Temperatura	Presión Barométrica	Velocidad del Viento	Dirección del Viento	CO2
02-07-2014	00:00:00							
02-07-2014	00:01:00	0	85.5	12.4	953	0.9	211	377
02-07-2014	00:02:00	0	85.3	12.3	953	0.9	185	368
02-07-2014	00:03:00	0	85.3	12.3	953	1	241	383
02-07-2014	00:04:00	0	85.4	12.4	953	1.4	231	391
02-07-2014	00:05:00	0	85.4	12.4	953	1.6	247	389
02-07-2014	00:06:00	0	85.7	12.4	953	1.6	231	386
02-07-2014	00:07:00	0	85.9	12.4	953	2	231	377
02-07-2014	00:08:00	0	86.1	12.3	953	0.9	241	380
02-07-2014	00:09:00	0	86.4	12.3	953	0.6	206	371
02-07-2014	00:10:00	0	86.6	12.3	953	0.6	227	363
02-07-2014	00:11:00	0	86.7	12.3	953	0.6	229	371
02-07-2014	00:12:00	0	86.8	12.3	953	0.7	232	374
02-07-2014	00:13:00	0	87	12.3	953	1.1	232	371
02-07-2014	00:14:00	0	87.1	12.3	953	1	219	383
02-07-2014	00:15:00	0	87.2	12.3	953	0.6	182	380
02-07-2014	00:16:00	0	87.4	12.2	953	0.5	195	371
02-07-2014	00:17:00	0	87.6	12.2	953	0.6	204	371
02-07-2014	00:18:00	0	87.7	12.2	953	0.9	199	363
02-07-2014	00:19:00	0	87.7	12.2	953	0.6	237	368

Figura 13. Datos de la estación meteorológica en formato numérico.

Los datos disponibles de esta estación (tabla 1), de forma numérica en formato ASCII, pueden ser tratados por otras aplicaciones como Matlab para poder efectuar estudios de series temporales u otros más específicos de forma directa sobre los ficheros descargados.

Por último se muestra en la Figura 14 otra gráfica descargada de la evolución de un parámetro en varios días.

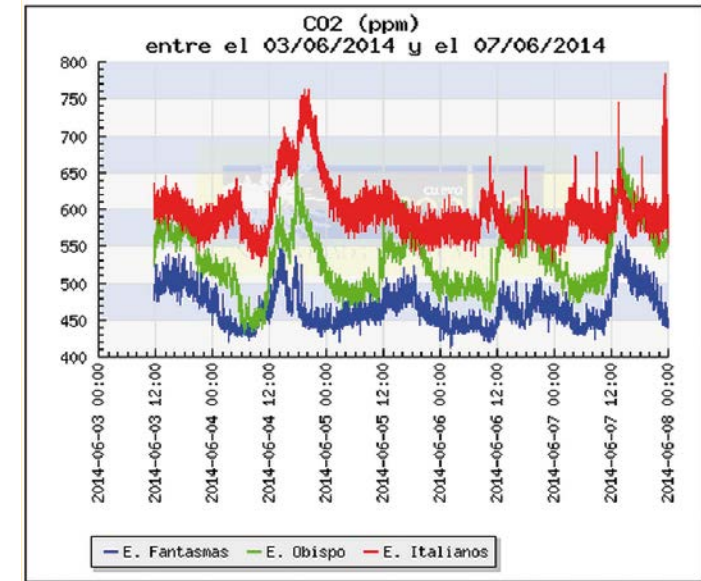


Figura 14. Evolución comparada del CO2 durante 5 días.

Se pueden apreciar los ciclos diarios de visitas, donde a las horas punta se produce un notorio de aumento de la concentración de CO₂. Se aprecia como la concentración de la galería de Italianos es claramente superior a las demás, la explicación debe a que Italianos es la zona más profunda, y actúa de sumidero de CO₂ que es más denso que el aire.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, desde el punto de vista de ingeniería, muestran la eficacia de este tipo de sistema de teledirigido y control inteligente está demostrada, ya que permite el acceso a los datos en tiempo real y desde cualquier lugar y además facilita el mantenimiento del sistema, lo que repercute en un ahorro y un mejor y más directo control del funcionamiento de todos los elementos instalados. Por el contrario este tipo de proyectos suponen una mayor inversión económica en la instalación, además es necesario un estudio y diseño personalizado, que necesariamente necesita más tiempo de ejecución que otro tipo de sistemas.

Desde el punto de vista de la explotación comercial, se podría afirmar que el coste de explotación a largo plazo puede resultar más económico, ya que reduce gastos de desplazamiento y permite una actuación inmediata en caso de la alteración de algún parámetro que así lo requiera, evitando males mayores y propiciando una más rápida recuperación del entorno. Poder actuar de forma inmediata para la recuperación de la cavidad es muy importante para la explotación comercial de cavidades turísticas, donde el número de visitantes y la continuidad pueden modificar el microclima de la cueva y por tanto las formaciones únicas propias de estas condiciones. Con estos sistemas de telemetría se permite poder gestionar el número y duración de las visitas sin interferir en el cambio de las condiciones propias de la cavidad.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Consejería de Turismo de Cantabria por haber confiado en investigadores de la Universidad de Almería, la realización de este proyecto, también a la empresa Turismo del Nansa y Dirección del El Soplao que también año a año siguen contando con la Universidad de Almería para la conservación de este sistema de medida. En último lugar agradecemos a la Junta de Andalucía que a través de las ayudas a los grupos de Investigación TIC019 y RNM189 permite dedicar más medios en la Universidad de Almería para investigar en la mejora de los sistemas de medida y en la interpretación de los informes medioambientales.

REFERENCIAS

- Benavente, J., El Mabrouki, K., Molina, J. L., Liñan, C., Simón, M. y Carrasco, F., 2007. Variaciones especiales y temporales en la concentración de CO₂ en el interior de una cavidad turística (Cueva de Nerja, Málaga, España). *Congreso Español sobre Cuevas Turísticas. Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, J. J. Durán-Valsero, P. A. Robledo Ardila y J. Vázquez (Editores), ISBN 978-84-7840-722-4, pp. 137-145.
- Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M. y Sánchez-Martos, F., 2006. Spatiotemporal analysis of air conditions as a tool for the environmental management of a show cave. *Cueva del Agua, Spain. Atmospheric Environment*, 40 (38), pp. 7378-7394.
- Gázquez, J. A., Calaforra, J. M., Novas, N. y Fernández-Cortés, A., 2003. Intelligent telemetry watches cave visitors. *IEE Electronics Systems and Software*, 1 (3), pp. 24-27.
- Land, L. y Burger, P., 2008. Rapid recharge events in a Karstic aquifer: An example from lake of the white roses, Lechuguilla cave, New Mexico. *Geotechnical Special Publication*, 183, pp. 396-403.
- Mattey, D., 2012. Continuous multichannel monitoring of cave air carbon dioxide using a pumped non-dispersive infrared analyser. *Abstract from EGU*, Vienna, Austria.
- Park, K. J., Jones, G. y Ransome, R. D., 1999. Winter activity of a population of greater horseshoe bats (*Rhinolophus ferrumequinum*). *Journal of Zoology*, 248 (4), pp. 419-427.
- Sanderson, K. y Bourne, S., 2002. Cave Temperatures at Naracoorte Caves. *Helictite*, 38 (1), pp. 7-10.

Control de parámetros ambientales en el sector no habilitado de una cueva turística: la Cueva de Nerja (Málaga, España)

Cristina Liñán-Baena^(1,2), Yolanda del Rosal-Padial⁽¹⁾ y Francisco Carrasco-Cantos⁽²⁾

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

(2) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos s/n, 29071- Málaga. fcarrasco@uma.es

RESUMEN

La Cueva de Nerja es, por su Patrimonio Cultural y Natural y por el número de visitantes que recibe, una de las principales cavidades kársticas turísticas del territorio español. Aproximadamente un tercio de su volumen, las denominadas Galerías Turísticas, se encuentra acondicionado para la visita desde 1960, un año después de su descubrimiento, y recibe una media de unos 480.000 visitantes anuales. El resto de la cavidad, las Galerías Altas y Nuevas, cuenta con instalación espeleológica, lo que permite su visita, desde el año 2000, a grupos reducidos de turistas, con un límite máximo de 210 visitantes anuales. Una completa red de sensores registra los parámetros ambientales de las Galerías Turísticas desde 1993, por lo que se dispone de un amplio conocimiento sobre las variaciones naturales de los principales parámetros micro-climáticos a lo largo del año, así como de la influencia antrópica sobre los mismos en este sector de la cavidad. A partir de 2006 se instalaron nuevos sensores de temperatura, humedad relativa, radón y CO₂ del aire en las Galerías Altas y Nuevas, que han proporcionado una serie de datos ambientales de gran interés, que complementan la información obtenida en el sector turístico. El análisis de dichos datos ha permitido constatar la existencia de un gradiente higrotérmico en la cavidad, de un patrón estacional en la circulación del aire interior y de una nueva vía de entrada de aire a la red kárstica de la Cueva de Nerja, hasta ahora desconocida.

Palabras clave: Cueva de Nerja, impacto antrópico, parámetros ambientales, ventilación natural.

Control of environmental parameters in the no-tourism sector of Nerja Cave (Málaga, Spain)

ABSTRACT

The Nerja Cave is one of the main karstic tourists cave of Spain because of its Cultural and Natural Heritage and its number of visitors. About one third of its volume, the Tourist Galleries, is opened to tourists since 1960, a year after its discovery and receives an average of 480,000 visitors annually. The rest of the cave, the High and New Galleries, has got speleological installation, allowing the visit since 2000 at a few number of tourists, with a maximum of 210 visitors per year. A microclimatic net recorded environmental parameters of the Tourist Galleries since 1993, which has report a wide knowledge the main micro-climatic parameters throughout the year, as well as the anthropogenic impact on themselves in this part of the cave. Since 2006, new sensors of temperature, relative humidity, radon and CO₂ were installed in the High and New Galleries, which have provided environmental data which complement the environmental information of the Tourist Galleries. Analysis of these data has revealed the existence of an hygrothermal gradient in the cave, a seasonal pattern in the air circulation and a new pathway input to the Nerja Cave karstic network.

Keywords: anthropogenic impact, environmental parameters, natural airflow, Nerja Cave.

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 kársticas turísticas más importantes de España. La cavidad, de desarrollo horizontal y un volumen aproximado de 300.000 m³ (S.E.M. 1985) tiene tres entradas naturales ubicadas a cota similar, entre 158 y 162 m s.n.m. Aproximadamente un tercio de la cueva, las Galerías Turísticas (Figura 1), está habilitado para el turismo desde 1960 mientras que el resto, las denominadas Galerías Altas y Nuevas, sólo recibe la visita ocasional de investigadores y, desde el año 2000, de grupos reducidos de espeleoturistas. El espesor de mármoles sobre la cueva es variable, de 4 a 50 metros en el sector turístico y superior a 90 metros en las Galerías Altas y Nuevas.

En el entorno de la cavidad se ubica una estación meteorológica que registra los principales parámetros climáticos en el exterior (Liñán *et al.*, 2007). En el interior de la cueva, existe una red de control ambiental integrada por diversos sensores que actualmente miden, con periodicidad horaria, la temperatura, la humedad relativa y la concentración de ²²²Rn y CO₂ del aire, entre otros parámetros (Carrasco *et al.*, 2002; Liñán *et al.*, 2009). Los sensores se distribuyen a lo largo de toda la cavidad, tanto en las Galerías Turísticas como en el sector no habilitado, si bien la mayoría de los equipos de medida se ha ubicado tradicionalmente en las Galerías Turísticas, por ser éstas las que reciben el mayor número de visitantes. El control ambiental de las Galerías Altas y Nuevas se inició en 1999 (Liñán *et al.*, 2008) pero hasta 2006 no se dispuso de una red de sensores capaz de proporcionar series de datos que permitieran interpretar adecuadamente los resultados obtenidos.

En la presente publicación se analizan los principales parámetros medidos por la red de control durante el período 2008-2013, así como los resultados de las medidas puntuales de los flujos de aire que se realizan periódicamente en la cavidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Flujos de aire

En la Cueva de Nerja existe una circulación convectiva del aire, resultado de la diferencia de densidades entre el aire exterior y el aire interior de la cavidad (Cañete, 1997). El índice de ventilación de la cueva es máximo en invierno, 3,21 m³/s y mínimo en verano, 0,04 m³/s (Dueñas *et al.*, 1999).

En determinados sectores de la cavidad es posible determinar el sentido de las corrientes de aire de modo rudimentario, a partir del movimiento de material limoso o similar espolvoreado en el aire. Desde 2008 a 2013 se ha realizado un total de 338 medidas de flujos de aire en la cueva, las cuales indican que, por lo general, durante los meses de octubre a junio, el aire que circula por la cavidad se dirige, predominantemente, desde las Galerías Turísticas hacia las salas más internas (Figura 1). Por el contrario, en julio, agosto y septiembre, las corrientes de aire se dirigen, principalmente, desde las salas más internas de la cueva hacia las Galerías Turísticas y desde esta zona hacia el exterior.

Este patrón de circulación del aire es similar al de cavidades que se caracterizan por tener, al menos, dos o más entradas situadas a diferente cota topográfica (Choppy, 1982; Buecher, 1999). Durante el invierno, el aire exterior más frío y más denso entra en la cavidad por la entrada a menor cota, aumenta progresivamente su temperatura y disminuye su densidad y sale de la cavidad a través de la boca situada a mayor altitud. En verano, el aire interior es más frío y denso que el aire exterior, por lo que es desalojado por la entrada ubicada a cota inferior al tiempo que es sustituido por el aire exterior, más cálido, que accede a la cueva a través de la entrada situada a mayor cota. En la Cueva de Nerja, sin embargo, las entradas conocidas (Torcas y Entrada turística) se ubican a cota similar.

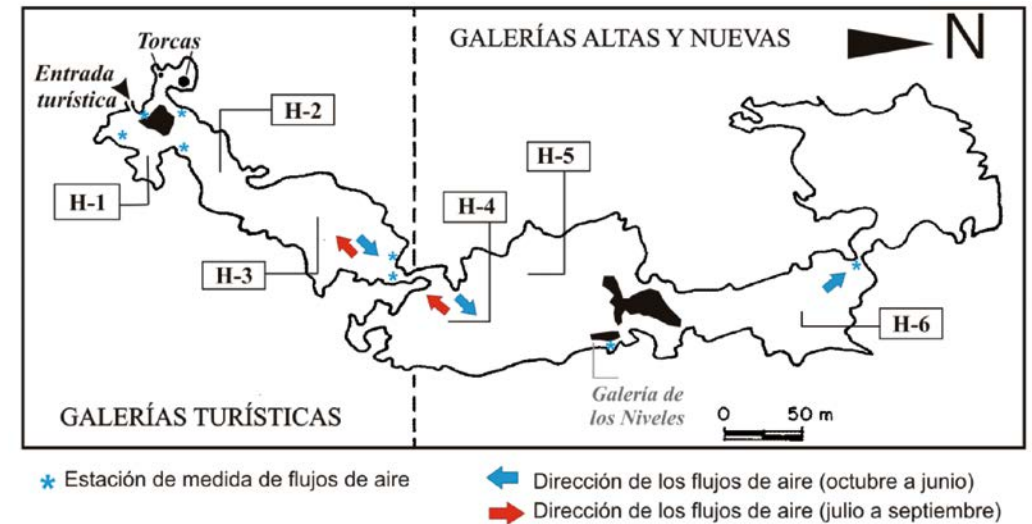


Figura 1. Esquema de la Cueva de Nerja y ubicación de los sectores en los que se han realizado medidas puntuales de flujos de aire.

TEMPERATURA DEL AIRE

La temperatura del aire interior muestra, durante el período analizado, valores comprendidos entre 15,64 °C y 19,91 °C (tabla 1). La temperatura media interior se incrementa desde las Galerías Turísticas hacia las Galerías Altas y Nuevas (Figura 2, tabla 1), si bien este gradiente general de temperatura del aire se distorsiona ligeramente en las Galerías Altas, ya que la temperatura del aire medida en la sala H-5 (19,76 °C) es superior a la de la sala H-6, más interna (19,37 °C) (Figuras 1 y 2, tabla 1). En todas las salas del sector no habilitado, los coeficientes de variación de la temperatura del aire son muy bajos, menores al 1%, y notablemente inferiores a los de las Galerías Turísticas. Los valores de temperatura del aire más bajos se registran en la sala más próxima a las entradas de la cavidad, H-1, que también muestra los coeficientes de variación más elevados (tabla 1).

El aire de las Galerías Altas y Nuevas es más cálido que el de las Galerías Turísticas durante todo el año, incluida la época estival. El valor medio de la temperatura del aire en las Galerías Altas y Nuevas (19,48 °C) supera en más de un grado centígrado el valor medio de temperatura del aire del sector turístico (18,20 °C). Durante los meses de noviembre a abril, la temperatura del aire de la cueva es mayor que la temperatura exterior.

A escala plurianual, la evolución de la temperatura del aire de la cueva sigue un patrón similar al descrito por la temperatura del aire exterior, si bien dentro de la cueva las variaciones están mucho más amortiguadas, especialmente en el sector no habilitado (Figura 2). Además, existe un desfase entre los máximos y mínimos de las curvas de temperatura interior y exterior, de distinta magnitud según la sala considerada (Figuras 2 y 3).

En las Galerías Turísticas, la evolución anual de la temperatura del aire es similar a la del aire exterior durante los meses de octubre a mayo, con una alta correlación no sólo en la evolución general de ambas curvas sino también entre los ascensos y descensos puntuales de la temperatura exterior y los registrados en el interior de la cueva (flechas en Figura 3). Durante los meses de junio y julio, la temperatura del aire aumenta progresivamente, tanto en el exterior como en el interior de la cavidad, pero los pequeños picos observados en la temperatura exterior no se reflejan dentro de la cueva (Figura 3).

		Exterior	Galerías Turísticas			Galerías Altas y Nuevas		
			Belén	Cascada	Cataclismo	Hércules	Inmensidad	Lanza
			H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6
T ^a (°C)	n	2050	1006	1923	1791	846	438	260
	Max	29,87	19,91	19,67	19,73	19,59	19,87	19,49
	Min	6,52	15,64	16,15	15,89	18,97	19,67	19,27
	Med	18,38	17,76	18,09	18,76	19,31	19,76	19,37
	V (%)	26,87	6,78	4,60	2,98	0,87	0,26	0,30
H.R. (%)	n	1708	970	401	1870	592	415	-
	Max	98	78	100	100	100	>100	-
	Min	30	46	53	67	73	>100	-
	Med	67	64	90	92	92	>100	-
	V (%)	18	10	11	8	9	-	-
CO ₂ (ppm)	n	-	439	1369	615	538	353	88
	Max	-	1401	1185	1423	1181	1946	1239
	Min	-	456	357	400	400	350	350
	Med	-	682	563	756	607	516	540
	V (%)	-	33	24	29	25	30	40
Radón (Bq/m ³)	n	-	-	1217	-	-	-	321
	Max	-	-	719	-	-	-	526
	Min	-	-	80	-	-	-	90
	Med	-	-	201	-	-	-	241
	V (%)	-	-	79	-	-	-	47

Tabla 1. Valores medios de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ y ²²²Rn del aire en el exterior y en el interior de la Cueva de Nerja, calculados a partir de datos horarios correspondientes al período 2008-2013.

Desde el final de agosto/principio de septiembre, la temperatura del aire exterior comienza a descender progresivamente hasta finales del año. Sin embargo, la temperatura del aire de las salas H-2 y H-3 no desciende, sino que se mantiene, por lo general, en valores elevados y aproximadamente constantes (en torno a 19,0 °C y 19,6 °C, respectivamente) hasta el mes de octubre. Esta persistencia de las altas temperaturas en las salas del sector turístico, especialmente notable en la sala H-2, estaría relacionada con el elevado número de visitantes que la cueva recibe durante el verano, pero también con la llegada al sector turístico de un aire más cálido procedente del sector no habilitado, en función de la circulación del aire descrita en el apartado previo.

En las Galerías Altas (H-4, H-5) y Nuevas (H-6), la evolución de la temperatura del aire también dibuja una curva ondulada, similar a la que describe la temperatura exterior, pero con un desfase del orden de tres y cuatro meses, respectivamente (Figura 3). Debido a este desfase, las mayores temperaturas en el exterior de la cueva y en las Galerías Turísticas coinciden, aproximadamente, con los mínimos de temperatura del aire en la sala H-5.

Por otro lado, el hecho de que la temperatura media del aire de la sala H-6 sea del orden de 0,4 °C inferior a la registrada en H-5 parece estar relacionado con la ubicación topográfica de los sensores de medida. El sensor de la sala H-6 se ubica a una cota 20 metros por debajo de la cota donde se ubica el sensor de la sala H-5. Por tanto, el sensor de H-6 mediría los flujos de aire más fríos, que son los que circulan a cotas más bajas según el modelo de circulación convectiva descrito para la Cueva de Nerja (Cañete, 1997; Dueñas et al., 1999).

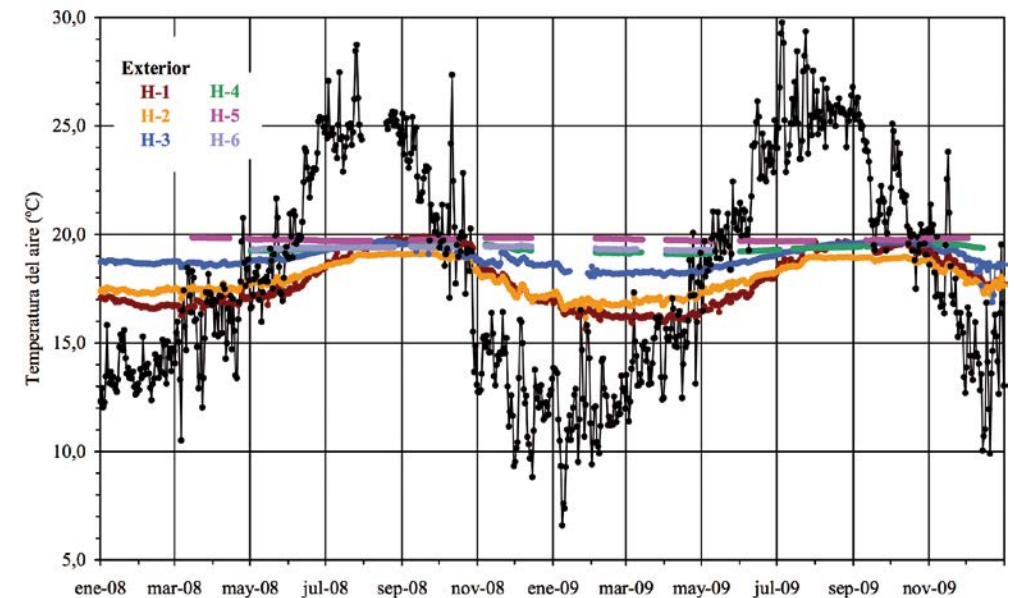


Figura 2. Evolución temporal de la temperatura del aire en el exterior y en diferentes salas de la cueva (período 2008-2009).

HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE

Durante el período analizado, se han registrado valores de humedad relativa del aire interior comprendidos entre el 46 y el 100 % (tabla 1), aumentando la humedad relativa del aire desde las salas del sector turístico (64-92 %) hacia las más internas de la cueva. La sala H-1 es la que muestra las mayores variaciones de humedad del aire, entre el 46 y el 78 %, con un coeficiente de variación del 10 %. En las Galerías Altas (sala H-4), los valores medios de humedad relativa son superiores al 90 %; en la sala H-5 los sensores han registrado valores de humedad relativa siempre superiores al 100 %, debido a la condensación de agua sobre la sonda de medida, indicativa de un ambiente saturado en vapor de agua.

La evolución temporal de la humedad relativa del aire en las Galerías Turísticas (H-3) y en la sala de las Galerías Altas más próxima al sector turístico (H-4) es similar y muestra una forma ondulada que alcanza los valores máximos durante los meses de julio a octubre, en el sector habilitado, y de julio a noviembre en el no habilitado (Figura 4). En ambas salas, la evolución de la humedad interior es similar a la de la humedad relativa del aire exterior todo el año salvo durante los meses de junio a octubre. Hasta la fecha, los valores de humedad máximos obtenidos en verano se atribuían al incremento del caudal de goteo durante esta época del año (Carrasco et al., 2002; Liñán et al., 2008) y al menor grado de ventilación natural de la cueva. Los nuevos datos obtenidos en las Galerías Altas y Nuevas indican que los máximos de humedad estivales medidos en las Galerías Turísticas también estarían relacionados con la llegada, en esta época del año, de masas de aire más húmedo procedente de las salas más internas de la cueva. En los meses invernales, el aire de H-3 es más húmedo que el de H-5 (Figura 4), debido a la mayor influencia del aire exterior, que entra en la cueva, atraviesa el sector turístico y después se dirige hacia el sector no habilitado.

Concentración de CO₂ en el aire

La concentración de CO₂ en el aire de la cueva muestra valores comprendidos entre 350 y 1946 ppm (tabla 1) durante los años de control. En las Galerías Turísticas, los valores medios de concentración de CO₂ en el aire están comprendidos entre 563 y 756 ppm; en las Galerías Altas y Nuevas, los valores medios de este parámetro varían entre 516 y 607 ppm. El contenido medio de CO₂ del aire en el conjunto del sector no habilitado de la cueva es de 554 ppm, frente al medido en las Galerías Turísticas, que es de 667 ppm (tabla 1).

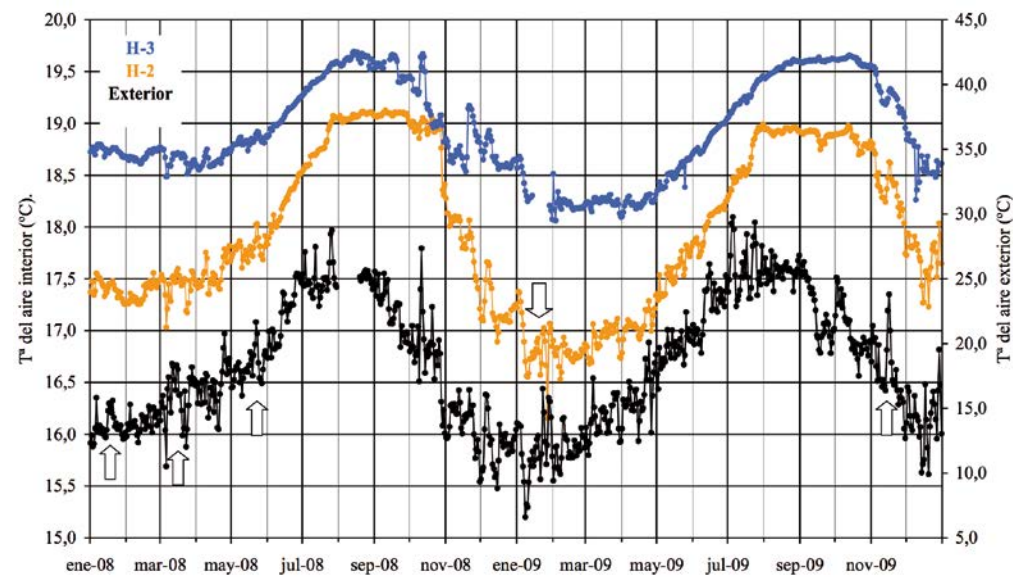
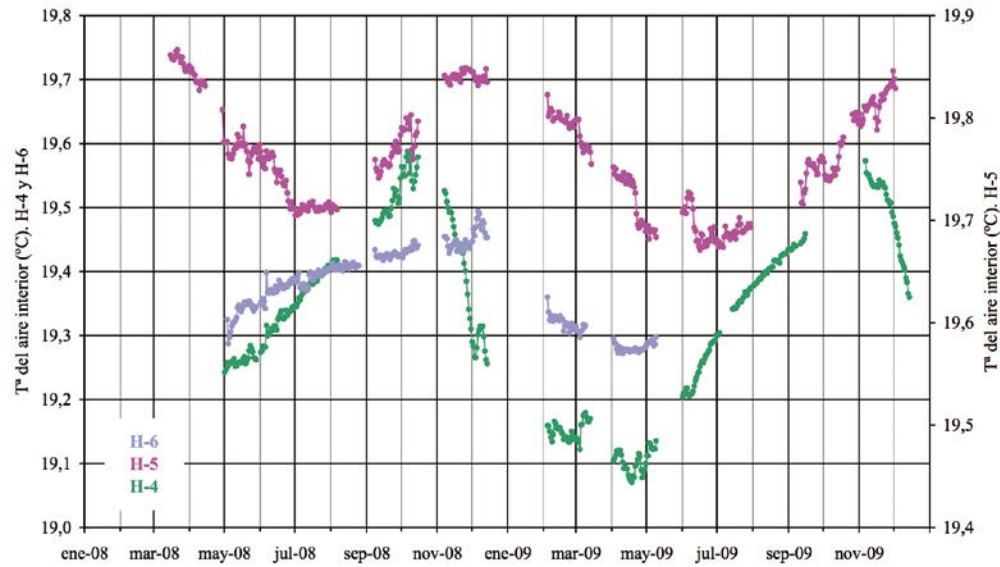


Figura 3. Evolución temporal de la temperatura del aire en el exterior e interior de la Cueva de Nerja (años 2008 y 2009).

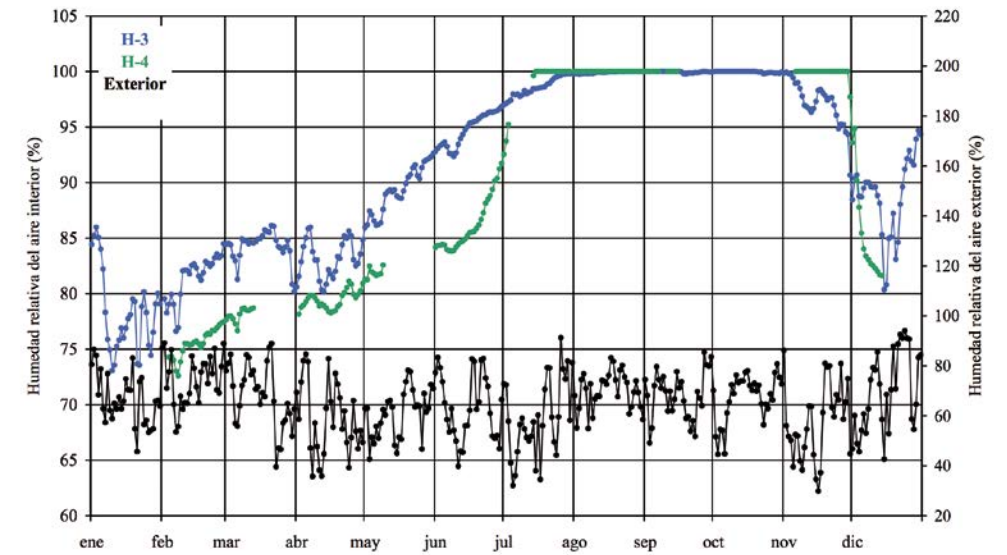


Figura 4. Evolución anual de la humedad relativa del aire en el exterior e interior de la Cueva de Nerja (Galerías Turísticas: H-3; Galerías Altas: H-4).

En las galerías no habilitadas, la concentración de CO₂ del aire disminuye desde la sala H-4 hacia las salas más internas, H-5 y H-6. Los coeficientes de variación del CO₂ en las galerías no habilitadas son elevados (del 25 al 40 %) y similares a los del sector turístico.

La Figura 5 muestra la evolución temporal de la concentración de CO₂ del aire en dos de las salas investigadas, una del sector turístico (H-2) y otra del sector no habilitado (H-4). La variación temporal del CO₂ en el sector no habilitado es similar a la del sector turístico todo el año salvo durante los meses de junio a septiembre. Durante estos meses no se registran incrementos de CO₂ de origen antrópico en la sala de las Galerías Altas más próxima al sector turístico (H-4) sino que, por el contrario, a partir de junio el contenido en el CO₂ del aire de esta sala muestra un descenso progresivo hasta valores próximos a 480-500 ppm, que se mantienen durante julio y agosto. Por tanto, durante los meses del año en los que la visitabilidad de la cueva es máxima (como media, 160.000 personas visitan la cueva en julio y agosto) no se detectan en las Galerías Altas y Nuevas concentraciones de CO₂ de origen antrópico. Esta particular evolución del CO₂ confirma el patrón estacional en la ventilación natural de la cueva deducido de las medidas puntuales de los flujos de aire.

Concentración de Radón (²²²Rn) en el aire

La concentración de radón en el aire de la Cueva de Nerja (Cañete, 1997; Dueñas *et al.*, 1999; Rosal *et al.*, 2010) está comprendida entre 80 y 719 Bq/m³, con un valor medio de 201 Bq/m³, para la sala del sector turístico H-2 (período 2008-2013) y de 241 Bq/m³, para la sala del sector no habilitado H-6 (período 2009-2010). Se han considerado iguales a 80 Bq/m³ todas aquellas concentraciones de radón registradas inferiores a este valor, por ser el límite de detección fiable del equipo de medida utilizado (RADIM SWP).

A escala anual, las menores concentraciones de radón en la cavidad se registran durante los meses de noviembre hasta abril (Figura 5), alcanzando valores medios del orden de 80 Bq/m³ en las Galerías Turísticas y de unos 160 Bq/m³ en las Galerías Nuevas. Estos valores reflejan el alto grado de ventilación natural de la cavidad durante esta época *invernal*. Durante los meses de julio a septiembre, la concentración de ²²²Rn del aire es del orden de 420 Bq/m³ en el sector turístico y de 370 Bq/m³ en las Galerías Nuevas (H-6). Por tanto, en esta época

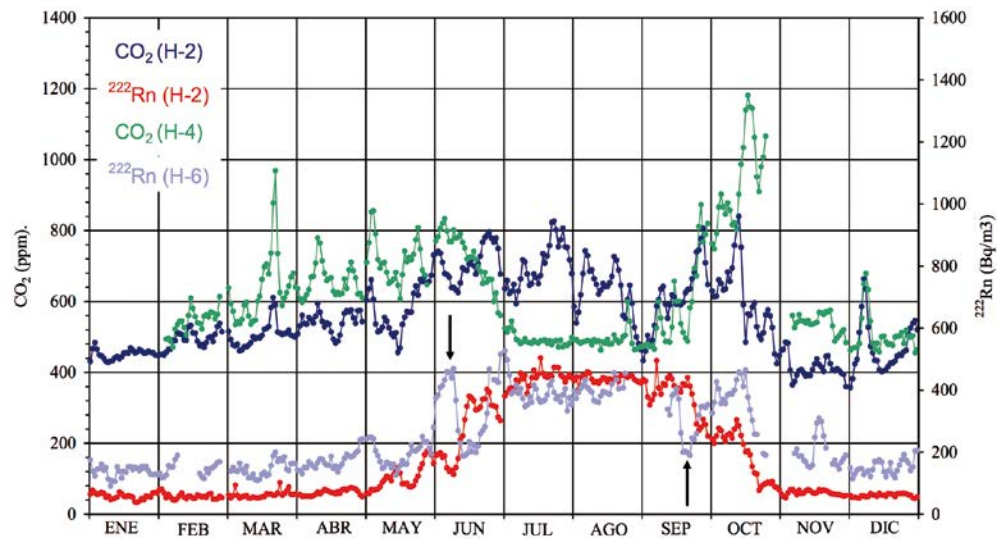


Figura 5. Evolución a lo largo de un ciclo anual de la concentración de CO₂ y de ²²²Rn del aire en el sector turístico (H-2) y no habilitado (H-4, H-6). Datos medios del período 2008-2013.

del año, la sala H-6 estaría ligeramente mejor ventilada que la sala H-2. En la sala H-6 se observan, en junio y septiembre, un ascenso y una disminución puntual de la concentración de radón en el aire muy evidentes (señaladas con flechas en la Figura 5), que coinciden con los dos momentos en los que se produce el descenso y ascenso progresivo, respectivamente, de la concentración de CO₂ en el aire de las Galerías Altas.

El patrón de circulación del aire interior, y las evoluciones temporales de las concentraciones de CO₂ y ²²²Rn del aire de la cueva reflejan la existencia de una nueva entrada a la red kárstica de la Cueva de Nerja, inicialmente no practicable, situada a una cota mayor que las entradas conocidas hasta la fecha. Durante los meses de octubre a junio, el aire exterior, más frío, entra en las Galerías Turísticas de la Cueva de Nerja (a través de las torcas y de la entrada turística), donde se enriquece en CO₂ debido al aporte de las visitas. Este aire, enriquecido en CO₂ de origen antrópico, se desplaza hacia las Galerías Altas y Nuevas de Cueva de Nerja y, finalmente, sale al exterior a través de la entrada situada a mayor cota. En esta época del año, el grado de ventilación natural de las Galerías Altas y Nuevas es inferior al de las Galerías Turísticas, al estar más alejadas de las entradas de aire desde el exterior.

Durante los meses de julio a septiembre, el sentido de circulación del aire se invierte: el aire exterior, más cálido que el de la cavidad y con valores de CO₂ atmosférico, accede por la entrada a mayor cota, atraviesa las Galerías Altas y Nuevas de la Cueva de Nerja, llega a las Galerías Turísticas (donde se enriquece en CO₂ como consecuencia del aporte antrópico) y sale al exterior por las entradas conocidas. En esta época del año, las salas más internas de la cueva están ligeramente mejor ventiladas, dado que se encuentran más próximas a la entrada de aire desde el exterior, desconocida hasta el año 2013 (Liñán y Rosal, 2014).

CONCLUSIONES

La monitorización ambiental realizada en el conjunto de la Cueva de Nerja (Galerías Turísticas, Altas y Nuevas), junto con las medidas puntuales de los flujos de aire en el interior, muestran la existencia de un gradiente higrotérmico en la cavidad y de un patrón estacional en la circulación del aire interior.

Las variaciones de temperatura del aire registradas en el interior de la cueva son un reflejo de las variaciones de la temperatura del aire exterior, más o menos amortiguadas y desfasadas en el tiempo, en función de su

distancia a la superficie y a las entradas de la cueva. La distorsión del gradiente de temperatura observada en las Galerías Altas (salas H-5 y H-6) se relaciona con la diferente cota a la que se ubican los sensores de medida y la consecuente medida de flujos de aire más fríos o más cálidos, que circulan convectivamente, si bien este aspecto deberá ser comprobado en el futuro, tras reubicar los sensores de medida. Durante el período estival, la temperatura del aire de las Galerías Turísticas permanece en valores altos y aproximadamente constantes debido a la influencia antrópica y a la llegada de aire más cálido procedente del sector no habilitado.

Las variaciones de humedad relativa del aire de las Galerías Turísticas también reflejan las variaciones de la humedad del aire exterior durante el período invernal y la influencia de las Galerías Altas y Nuevas durante los meses estivales. Así, la humedad relativa es máxima en el sector turístico durante el verano debido a un aumento del caudal de goteo, a una disminución del grado de ventilación natural de la cueva (menor evaporación del aire) y a la llegada de aire más húmedo procedente de las Galerías Altas y Nuevas.

Las medidas puntuales de los flujos de aire interior y las evoluciones temporales de las concentraciones de CO₂ y ²²²Rn del aire de la cueva muestran: (1) la existencia de un patrón estacional en la circulación del aire interior que favorece, durante la época de mayor visitabilidad, la eliminación del impacto antrópico en la Cueva de Nerja y limita el efecto de las visitas al sector turístico y (2) la existencia de una nueva vía de entrada a la red kárstica de la Cueva de Nerja, aspecto que necesariamente debe ser tenido en cuenta para su adecuada gestión y conservación.

REFERENCIAS

- Buecher, R. 1999. Microclimate Study of Kartchner Caverns, Arizona. *Journal of Cave Karst Studies*, 61 (2), 108-120.
- 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. 2002. Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja Cave (Malaga, Spain). *Acta Carsológica*, 31 (1), 105-122.
- Choppy, J. 1982. Dynamique de l'air. Phenomenes karstiques, 1. *Spéléo Club de Paris y Club Alpin Français*. Paris, France.
- Dueñas, C., Fernández, M. C., Cañete, S., Carretero, J. y Liger, E. 1999. ²²²Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave. *Atmospheric Environment*, 33, 501-510.
- Liñán, C. y Rosal, Y. del. 2014. Ventilación natural de cuevas kársticas: nuevos datos sobre la Cueva de Nerja (Málaga, S de España). En: Springer (ed.), *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*, vol. 1. *In press*.
- 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, nº 24, 159-167.
- Liñán, C., Carrasco, F., Vadillo, I. y Garrido, A. 2008. Estudios hidrogeológicos en la Cueva de Nerja. En: López-Geta, Rubio y Martín-Machuca (eds.), *Agua y Cultura*, VII Simposio del Agua en Andalucía, Madrid, 673-683.
- 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, nº 24, 159-167.
- Liñán, C., Carrasco, F., Calaforra, J. M., Rosal, Y. del, Garrido, A. y Vadillo, I. 2009. Control de parámetros ambientales en las Galerías Altas y Nuevas de la Cueva de Nerja (Málaga). Resultados preliminares. En: Durán, J. J. y López-Martínez, J. (eds.), *Cuevas Turísticas, cuevas vivas*, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 131-144.

Rosal, Y. del, Garrido, A., Montesino, A. y Liñán, C. 2010. Estudios del radón en la Cueva de Nerja (Málaga). En: Durán, J.J. y Carrasco, F. (eds.), Cuevas: *Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 183-192.

S.E.M. 1985. La Cueva de Nerja. *Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga*, Málaga, 87 pp.

Monitorización de las condiciones microambientales, hidrogeoquímicas y de conservación del sistema kárstico subterráneo de Ojo Guareña (Burgos)

Ángel Fernández-Cortés^(1,2), Soledad Cuezva^(1,2), Elena García-Antón⁽¹⁾, Miriam Álvarez-Gallego⁽¹⁾, Beatriz Cabeza⁽³⁾, Consuelo Temiño⁽³⁾, José-María Calaforra⁽⁴⁾, Sergio Sánchez-Moral⁽¹⁾

(1) Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC). José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid (acortés@mncn.csic.es, scuezva@mncn.csic.es, elena.garcia@mncn.csic.es, mag@mncn.csic.es, ssmilk@mncn.csic.es)

(2) Geomina Natural Resources SLNE. C/ Cea Bermúdez 14^º 5-3. 28003 Madrid.

(3) Servicio Territorial de Medio Ambiente de Burgos. Junta de Castilla y León. C/ Juan de Padilla, s/n. 09006 Burgos (cabsanbe@jcy.es, temferco@jcy.es)

(4) Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Dpto. Biología y Geología, Universidad de Almería. Ctra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano. 04120 Almería (jmcalaforra@ual.es)

RESUMEN

Dentro del proyecto de adecuación y uso turístico del sistema kárstico subterráneo de Ojo Guareña (Burgos), en concreto su sector noreste: Palomera, Dolencias, Cacique y Museo de Cera, se inició en 2013 un programa de control ambiental a través de un convenio de investigación entre el Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC) y la Fundación Patrimonio Natural (Junta de Castilla y León). El objetivo principal de la investigación es determinar la dinámica ambiental natural de este sector del sistema kárstico subterráneo, así como establecer la infraestructura de control ambiental básica para evaluar la influencia de las visitas turísticas. Los primeros resultados indican la existencia de grandes oscilaciones de carácter natural de los principales parámetros de control: temperatura, humedad relativa del aire y contenido en gases (CO₂ y radón). Estas fuertes oscilaciones afectan a buena parte de la zona visitable monitorizada, tanto a escala diaria como estacional, especialmente en las zonas próximas a las áreas de conexión directa con el exterior (sima Dolencias y dolina Palomera) y están controladas por las condiciones meteorológicas externas, principalmente las diferencias de temperatura entre la atmósfera subterránea y el exterior. Los niveles de CO₂ en el aire de la cueva se encuentran generalmente próximos a la media atmosférica (400-450 ppm), si bien se han llegado a registrar importantes oscilaciones diarias de su concentración (desde 680 hasta 1900 ppm/día, en promedio). Estas variaciones diarias en el contenido en CO₂ del aire de la cueva desaparecen una vez que la temperatura del aire exterior es netamente inferior a la temperatura del aire de la cueva, momento en el que predomina una circulación de aire por advección que favorece la renovación de la atmósfera subterránea. La amplitud de ciclos circadianos de CO₂ y otros gases trazadores como el radón (²²²Rn) se reduce en las galerías de la cueva más alejadas de las entradas principales (Museo de Cera). En estas zonas las variaciones de concentración de ambos gases se correlacionan con las variaciones de la presión barométrica, convirtiéndose en zonas de especial interés a la hora de evaluar el impacto ambiental de las visitas.

Palabras clave: Ojo Guareña, seguimiento ambiental, cuevas turísticas, CO₂, ²²²Rn.

Monitoring microenvironmental, hydrogeochemical and conservation conditions in the underground karst system of Ojo Guareña (Burgos)

ABSTRACT

As part of the project for adapting and tourist use of Ojo Guareña subterranean system (Burgos), in particular the northeast sector: Palomera, Dolencia, Cacique and Museo de Cera, an environmental monitoring program began in 2013 through a research collaboration between the National Museum of Natural Sciences (CSIC) and the Natural Heritage Foundation (regional government of Castilla y León). This research aims to determine the natural environmental dynamic of this subterranean karst system, as well as to establish the basic monitoring infrastructure to assess the environmental impact of visitors groups. The first results reveal the strong natural variations of the main control parameters of cave air: temperature, relative humidity and gas concentration (CO₂ and radon). These variations affect to a wide proportion of the tourist route under environmental monitoring, both on a daily scale as seasonal, especially in those areas close with direct connection to the exterior (Sima Dolencias sinkhole and Palomera doline) and they are controlled by external weather conditions, mainly the temperature difference between cave air and the atmosphere. The CO₂ contents of cave air are approximately near to the atmospheric background (400-450 ppm), however some significant daily oscillations have been registered, ranging from 680 to 1900 ppm/day on average. Daily oscillations of CO₂ concentration of cave air disappear once exterior air temperature is clearly lower than cave air temperature and the air flow by advection favors the cave air renewal. The amplitude of circadian cycles of CO₂ and other trace gases such as radon (²²²Rn) is reduced in the most remote galleries cave far from main entrances (Museo de Cera). In these areas, the variations in concentration of both gases are correlated with changes in barometric pressure, becoming areas of particular interest when assessing the environmental impact of visitors.

Keywords: Ojo Guareña, environmental monitoring, show caves, CO₂, ²²²Rn.

INTRODUCCIÓN

La dinámica ambiental natural de una cavidad está determinada por la interacción de diversos factores y puede verse alterada por la actividad antrópica en su interior o en su exterior más inmediato. Para realizar interpretaciones correctas y distinguir los procesos naturales de la posible influencia de las actividades humanas es necesario disponer de datos que permitan obtener una comprensión detallada del funcionamiento de estos sistemas kársticos. El estudio de este tipo de ambientes requiere el diseño de una metodología de análisis específica en cada caso que permita alcanzar un conocimiento detallado de los procesos y factores que determinan las condiciones y dinámica microambiental de la cavidad a estudiar.

El conocimiento de las características físico-químicas y biológicas de un medio subterráneo derivado de los estudios científicos debe reinvertir en la creación de pautas y herramientas de gestión sostenible de estos enclaves naturales que aseguren su conservación a largo plazo. Este enfoque es aún más relevante y necesario en cavidades que presentan valores añadidos de interés cultural, geoambiental y/o biológico extraordinario, como es el caso del sistema kárstico de Ojo Guareña (Burgos).

Desde esta perspectiva, se ha implementado un programa de seguimiento ambiental durante un ciclo anual en el sector Cueva Palomera-Museo de Cera-Sala del Cacique, perteneciente a Ojo Guareña. En este trabajo se presenta un avance de resultados que describe la dinámica ambiental de este sistema subterráneo, estableciendo los diferentes ciclos estacionales en las variaciones termo-higrométricas y de contenido en CO₂ y radón del aire en el interior de la cavidad y en la atmósfera exterior. Conociendo estos ciclos naturales de los parámetros críticos se está realizando una evaluación periódica de influencia en el ambiente subterráneo del régimen actual de

visitas preestablecido. De forma paralela se está realizando un seguimiento de las propiedades físico-químicas del agua de infiltración en aquellas zonas con especial interés biológico (Camacho et al., 2006), mediante muestreos y análisis mensual de elementos mayores, metales, compuestos nitrogenados, tanto en aguas de goteo como en masas de agua de carácter permanente y estacional (lagos y gours).

SECTOR CUEVA PALOMERA-MUSEO DE CERA-SALA DEL CACIQUE (SISTEMA KÁRSTICO SUBTERRÁNEO DE OJO GUAREÑA)

El espacio natural de Ojo Guareña alberga un sistema kárstico de relevancia internacional localizado al norte de la provincia de Burgos, en la Comarca de las Merindades. Con más de 100 km de recorrido subterráneo, es la mayor cavidad de España y una de las de mayor desarrollo del mundo. El complejo kárstico de Ojo Guareña se desarrolla en un conjunto calizo-dolomítico masivo del Cretácico Superior que da lugar a una morfología muy característica de relieve en cuesta. Este paquete carbonatado tiene una potencia de aproximadamente 160 metros y las galerías subterráneas se distribuyen en 5 niveles con dimensiones de hasta 10 m de alto y 20 de ancho, con tres entradas principales (Grupo Espeleológico Edelweiss, 1986; Puch, 1998).

El conjunto de galerías y salas subterráneas del sistema kárstico de Ojo Guareña, fue declarado Monumento Natural en 1996 (Decreto 61/1996, de 14 de marzo, de declaración del Monumento Natural de Ojo Guareña, Burgos). Esta Figura de protección conlleva, como objetivo prioritario, la conservación de la integridad estructural, hidrológica, biológica y cultural del sistema kárstico de Ojo Guareña. Igualmente la Figura de Monumento Natural pretende proporcionar nuevas formas de uso y disfrute de este singular espacio natural subterráneo, favoreciendo el impulso de actividades de información, interpretación y educación ambiental y, por extensión, el auge de actividades socioeconómicas compatibles con la protección del espacio.

La reciente puesta en valor del sistema kárstico subterráneo de Ojo Guareña (Burgos), en concreto su sector noreste: Palomera, Dolencias, Cacique y Museo de Cera, se ha orientado a un turismo de naturaleza y cultural con mínimas intervenciones en la adecuación de los recorridos y con visitas reducidas (en número de personas y frecuencia), con el objetivo de garantizar su conservación de acuerdo a su Figura legal de protección ambiental. Los recorridos en el interior de la cavidad atienden a la variedad de elementos de interés y tienen un recorrido total de 2.5 km, aproximadamente, incluyendo la Rampa de Palomera, Sala Edelweiss, Galería Principal, Sima Dolencias, Sala del Cacique y Museo de Cera (Figura 1).

INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL AMBIENTAL Y METODOLOGÍA ANALÍTICA

En el diseño de la distribución espacial de los equipos control ambiental se priorizó aquellas estaciones situadas en las galerías más representativas del recorrido turístico y en zonas de mayor concentración de puntos de interés biológico (Figura 1). En el exterior se instaló una estación meteorológica ubicada junto a la Sima Dolencias, que registra la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y tasa de precipitaciones. Las tres estaciones de control ambiental en el interior de la cavidad (Sala Edelweiss, Gour de las Hojas y Museo de Cera) cuentan con sondas para el registro en continuo de temperatura, humedad relativa, presión barométrica, contenido en CO₂ y concentración de radón en el aire. Las estaciones de Gour de las Hojas y de Museo de Cera están equipadas además con un pluviómetro para medir la tasa de goteo en continuo, parámetro que es indicativo del proceso de infiltración en comparación con el registro pluviométrico en el exterior. Las masas de agua perennes ubicadas en la Sala Edelweiss y en el inicio de la galería de los Italianos (Figura 1) cuentan con registradores autónomos de temperatura y conductividad eléctrica del agua, así como de las variaciones de nivel en función de diferencias de presión por cambio de espesor de la lámina de agua.

En cada campaña de campo bimestral se toman 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 16 puntos que incluye las localizaciones donde están instaladas las tres estaciones interiores de control ambiental en continuo. Para el muestreo discreto aire se utiliza instrumental específico consistente en bombas con un caudal a presión atmosférica de 3.1 l·min⁻¹ que succionan el aire y lo hace pasar por un filtro desecante hasta un sistema de almacenaje hermético.



Figura 1. Distribución de las estaciones de control ambiental y de la red de puntos de muestreo de aire y de agua de infiltración (goteos y gour/lagos).

tico de aire (Tedlar), exclusivo para muestreo de gases trazadores. El muestreo del aire edáfico se lleva cabo en una red predefinida de varios puntos en el área de recarga hídrica directa a la cavidad (*impluvium*). En estos puntos se instalan en cada campaña varios tubos de pequeño diámetro, a varias profundidades, para la succión y muestreo de aire edáfico.

El análisis de la concentración de CO₂ del aire y de la señal isotópica del carbono contenido en el CO₂, así como de otros gases trazadores como el metano (CH₄), 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 CO₂ (¹³C/¹²C). El espectrómetro de alta resolución (Picarro G2101-i) está basado en la tecnología Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy (WS-CRDS), permitiendo mediciones precisas de la concentración de CO₂ en el aire y de su señal isotópica del carbono (precisión menor de 200 ppbv para ¹²CO₂, menor de 10 ppbv para ¹³CO₂ y menor de 0.3 ‰ para la razón isotópica ¹³C/¹²C).

El control hidroquímico del agua de infiltración se lleva a cabo en una red de 6 puntos que incluye goteos en espeleotemas y masas de agua, permanentes o estacionales, asociadas a puntos de interés biológico por presencia de fauna acuática (gours y lagos, Figura 1). El seguimiento en continuo del nivel, conductividad eléctrica y temperatura de estas masas de agua, en la actualidad en fase de análisis de datos, permitirá caracterizar los procesos de evaporación y recarga hídrica de los puntos interés biológico, así como la detección de posibles cambios de salinidad o contaminación.

Los análisis químicos completos de las aguas kársticas se están realizando en los laboratorios del MNCN-CSIC mediante métodos de titración estándar (contenidos en CO₂, HCO₃⁻ y CO₃²⁻) y mediante espectrometría de absorción atómica (metales) y electroforesis iónica capilar (resto de elementos mayores y compuestos nitrogenados), con un analizador QUANTA 4000. Los cálculos geoquímicos y de especiación necesarios para conocer el estado de saturación del agua respecto a los principales minerales carbonatados (fases cálcicas y magnésicas) y el contenido en CO₂ disuelto, se realizan mediante el código informático PHREEQC-I desarrollado por el USGS (Parkhurst y Appelo, 2013).

AVANCE DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO AMBIENTAL

Evolución de las condiciones ambientales de la atmósfera subterránea en relación a la meteorología exterior

Hasta la fecha se ha completado el 70% del registro ambiental necesario para determinar adecuadamente los rangos naturales de variación de las condiciones ambientales y el seguimiento, control y evaluación del actual régimen de visitas a la cavidad. La Figura 2 sintetiza la evolución de los principales parámetros ambientales en el exterior y la Figura 3 muestran un ejemplo de las series temporales de datos obtenidas en el interior de la cavidad, concretamente en la Sala Edelweiss.

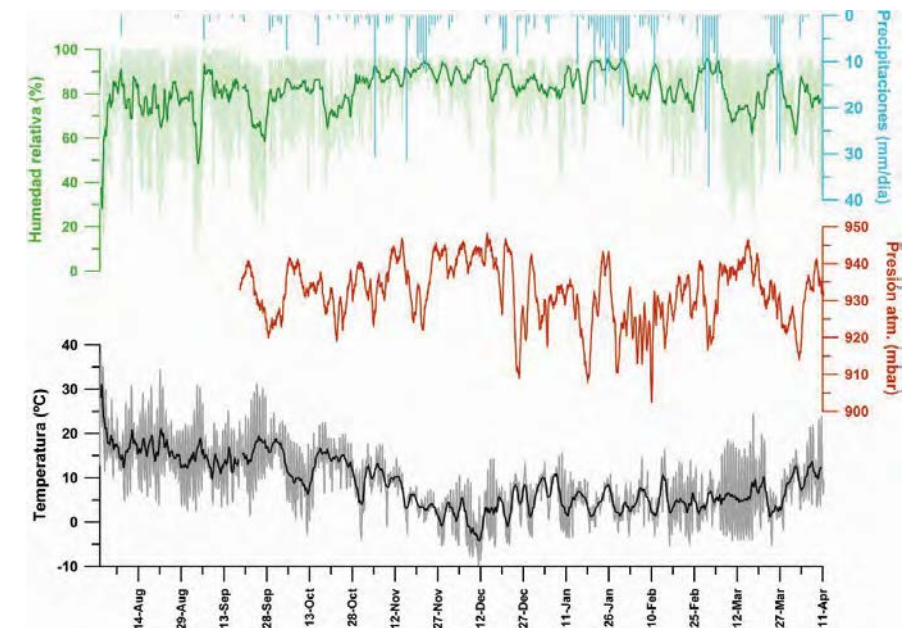


Figura 2. Evolución de las condiciones meteorológicas en el exterior (Dolina Dolencias) durante el periodo Agosto 2013 – Abril 2014. Las series temporales de temperatura y humedad relativa del aire han sido suavizadas mediante la aplicación de una media móvil con un rango de cálculo diario.

En la Sala Edelweiss y en el Gour de las Hojas, zonas más cercanas a las entradas al sistema subterráneo (dolina Palomera y Sima Dolencias), se han registrado importantes descensos de temperatura y humedad relativa del aire durante el invierno, como consecuencia de la renovación de aire en estas zonas asociada a la entrada de aire exterior más frío y seco que la masa de aire preexistente durante el periodo estival. La intensa ventilación invernal se inició a finales de octubre, una vez que la temperatura media diaria del exterior fue constantemente inferior a la temperatura del aire en ambas zonas. En ambos casos, el periodo invernal de renovación de aire estuvo precedido por un periodo estival de gran estabilidad en la temperatura y bajo condiciones de saturación en vapor de agua (humedad relativa del 100%). En el caso de la Sala Edelweiss, la temperatura del aire experimentó un fuerte descenso de casi 5 °C y la humedad relativa del aire bajó un 12%. En el Gour de las Hojas la temperatura del aire descendió 2.5 °C y la humedad relativa por debajo del 90%. En ambos casos los valores mínimos de temperatura y humedad relativa del aire se alcanzaron a mediados de diciembre, coincidiendo con los mínimos térmicos en el exterior.

La estabilidad en las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire del Museo de Cera es muy diferente a la descrita para las otras dos localizaciones. La temperatura media del aire en el Museo de Cera fue 10.82 °C desde agosto/2013 hasta enero/2014, con mínimas variaciones siempre inferiores a 0.05 ° en valores absolutos y con una humedad constante del 100%. Estos datos indican que, durante este periodo, la atmósfera de Museo de Cera estuvo afectada en menor grado por el proceso de renovación de aire por ventilación invernal descrita para las otras zonas de la cavidad y, consecuentemente, no experimentó descensos térmicos significativos.

Variación espaciotemporal del contenido en CO₂ de la atmósferasubterránea en relación a otros parámetros

El contenido medio en CO₂ del aire en las tres localizaciones se vio afectado por el mencionado mecanismo de ventilación estacional con mayor rapidez e intensidad que en el caso de los otros parámetros de control: temperatura y humedad relativa del aire. Así, mientras la temperatura y humedad relativa del aire inician un descenso en sus valores a partir de finales de octubre, la concentración de CO₂, en cambio, baja drásticamente un mes

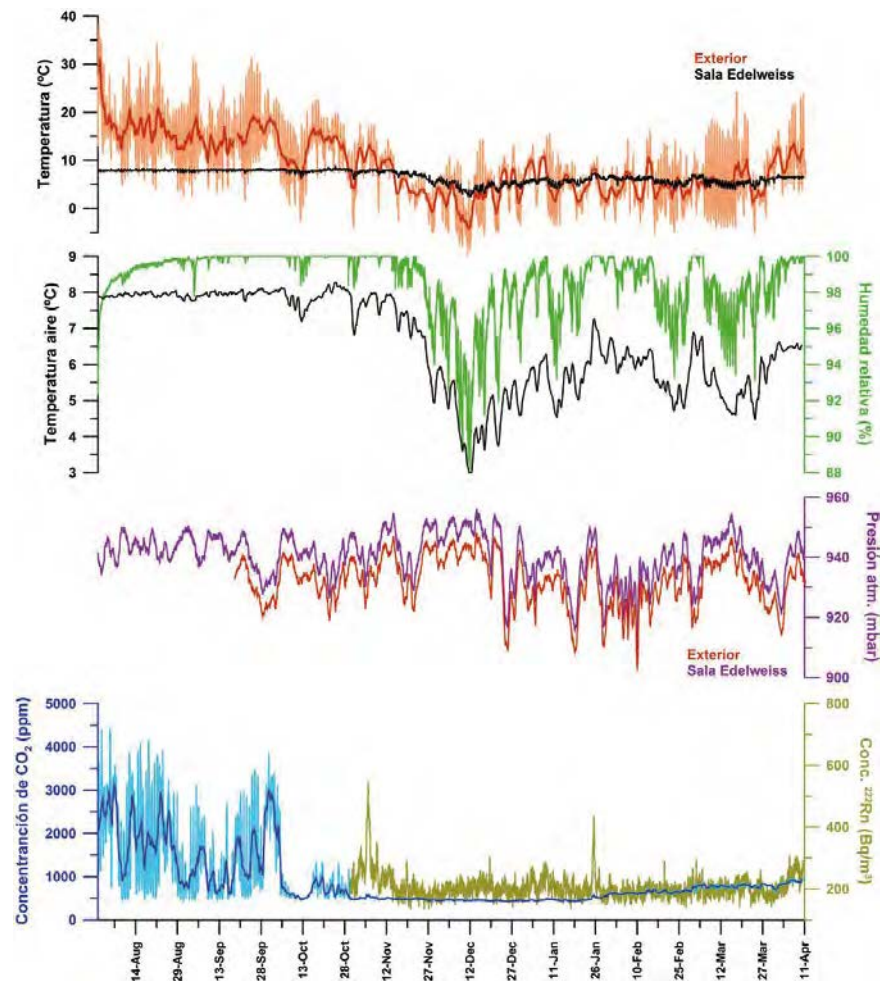


Figura 3. Evolución de los principales parámetros ambientales en la Sala Edelweiss durante el periodo Agosto 2013 – Abril 2014. Las series temporales de temperatura y concentración en CO₂ del aire han sido suavizadas mediante la aplicación de una media móvil con un rango de cálculo diario.

antes en las tres zonas de la cavidad como consecuencia de los primeros eventos de ventilación (Figura 3, como ejemplo para la Sala Edelweiss). Esta ventilación inicial se activa cuando la temperatura media diaria del exterior es inferior, por primera vez, a la temperatura del aire en cada zona de la cavidad. Tras esta ventilación, los niveles de CO₂ alcanzan valores mínimos estables a partir de noviembre hasta finales de enero (465 ppm en Sala Edelweiss, 480 en el Gour de las Hojas y 725 ppm en el Museo de Cera) que son indicativos del elevado grado de renovación del aire si se tiene en cuenta la concentración media de la atmósfera exterior (en torno a 400 ppm).

Durante el periodo de verano, previo a la ventilación estacional por inversión del gradiente térmico del aire exterior-cavidad, se registraron amplias oscilaciones diarias en los niveles de CO₂. Estas oscilaciones diarias son de mayor intensidad en las zonas con mayor intercambio aerodinámico con el exterior, con un rango medio entre 680 ppm/día en el Gour de las Hojas y de 1900 ppm/día en la Sala Edelweiss, y han sido objeto de un estudio específico (Fernández-Cortés et al., 2014).

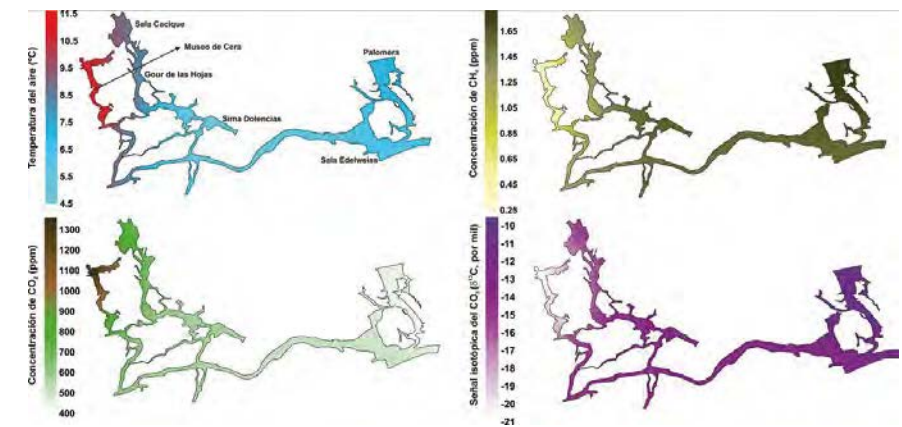


Figura 4. Distribución espacial del contenido medio en gases (CO₂ y CH₄), de la señal isotópica del CO₂ (δ¹³C) y de la temperatura del aire en el sistema kárstico subterráneo de Ojo Guareña. Ver Figura 1 con los detalles de la topografía del sector estudiado (Cueva Palomera-Museo de Cera-Sala del Cacique).

La Figura 4 sintetiza la distribución espacial del contenido medio en gases (CO₂ y CH₄), de la señal isotópica del carbono del CO₂ (δ¹³C) y de la temperatura del aire, durante todo el periodo de seguimiento ambiental que ha abarcado hasta la fecha 5 muestreos bimestrales de aire. Es de destacar la singularidad de la galería del Museo de Cera respecto al resto de zonas de la cavidad, por presentar las siguientes características diferenciadoras:

- Mayor concentración de CO₂ con una señal isotópica δ¹³C más negativa, que indica un menor intercambio de aire con el exterior y mayor aporte de este gas por difusión desde el suelo exterior y por desgasificación del CO₂ disuelto en el agua de goteo.
- Acumulación de aire a mayor temperatura y menos denso respecto al de zonas adyacentes, lo que dificulta el intercambio aerodinámico y la renovación del aire en esta galería.
- Menor concentración de gas metano (CH₄) con valores casi nulos, lo que confirma el mínimo ingreso de aire exterior (cuya concentración media es constante en torno a 1.8 ppm) y la mayor oxidación de este gas en esta galería.

Análisis preliminar de la influencia en el ambiente subterráneo del régimen de visitas preestablecido

Desde la apertura del sector Cueva Palomera-Museo de Cera-Sala del Cacique a las visitas turísticas a principios de noviembre de 2013 hasta abril de 2014, han visitado la cavidad un total de 425 personas. En esta cantidad se incluye algunas visitas de los guías para el mantenimiento de las instalaciones. El número medio de personas por grupo fue de 9, incluyendo a los guías, y el tamaño máximo de grupo nunca superó las 25 personas. Los tiempos de permanencia en cada una de las zonas bajo control ambiental han sido: 10 minutos (Sala Edelweiss), 20-30 minutos (Gour de las Hojas) y 15-25 minutos (Museo de Cera).

Las variaciones térmicas y de concentración de CO₂ inducidas por la presencia de personas en la Sala Edelweiss y el Gour de las Hojas quedan enmascaradas por las mayores fluctuaciones diarias de ambos parámetros debidas a la ventilación (Figura 5, para el caso de la temperatura). Por lo tanto, la temperatura y el contenido en CO₂ del aire en estas zonas no se ven influenciadas por las visitas, recuperándose al final de cada ciclo diario. En el caso del Museo de Cera, se han detectado impactos muy puntuales sobre la temperatura del aire debido a la presencia de grupos de visitantes. Estos impactos térmicos puntuales coincidentes con las visitas turísticas raramente suponen un incremento de la temperatura superior a 0.05 °C y, en cualquier caso, no cambian la tendencia general del registro de este parámetro ni se detecta un efecto térmico acumulativo entre vistas sucesivas.

A partir del 22 de enero de 2014 se registró un ligero incremento de una décima de grado en la temperatura en el Museo de Cera, alcanzando un valor medio de 10.90 °C (Figura 5). Este leve incremento de temperatura coincide con el inicio de una intensa recarga hídrica de la cavidad asociada las frecuentes precipitaciones registradas en enero de 2014 (144 litros/m²). El agua de infiltración, en contacto con el suelo y la roca encajante, supuso un aporte calorífico para la masa de aire del Museo de Cera a menor temperatura.

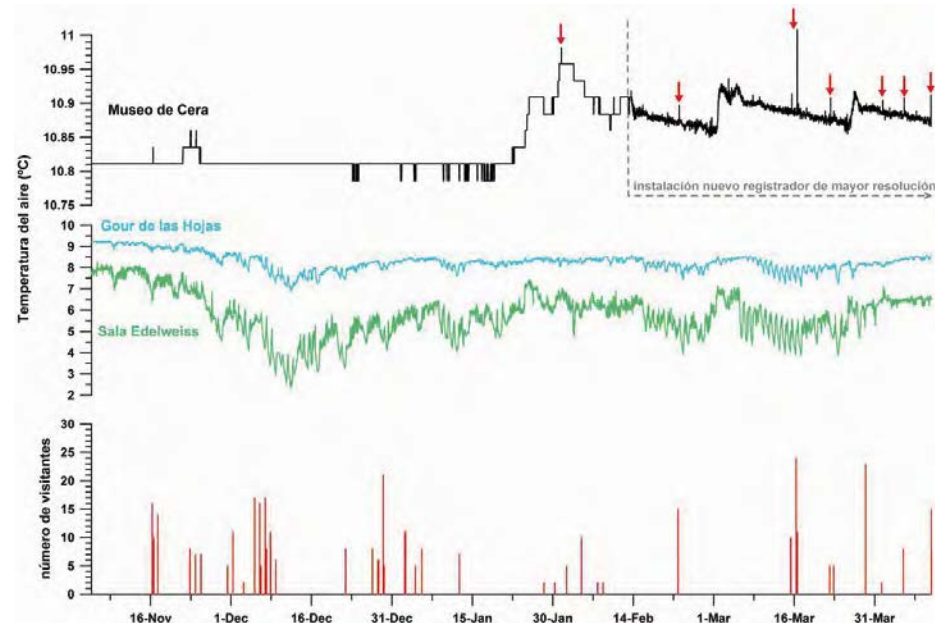


Figura 5. Evolución de la temperatura del aire cada una de las estaciones de control ambiental (Sala Edelweiss, Gour de las Hojas y Museo de Cera) comparada con la distribución temporal de las visitas turísticas a la cavidad (expresadas en número de personas por visita). Las flechas rojas verticales indican los impactos térmicos puntuales identificados en el registro del Museo de Cera y debidos a la presencia de grupos de visitantes. En Febrero se reforzó el equipamiento de control ambiental con un nuevo registrador autónomo con sensores de temperatura y humedad relativa de mayor resolución y precisión.

Seguimiento hidroquímico del agua de infiltración

En conjunto, durante el período de estudio el agua de infiltración, las aguas kársticas analizadas presentan una composición química claramente bicarbonatada cálcica (Figura 6), relativamente estable. Las principales variaciones observadas en el grado de mineralización de las aguas analizadas están relacionadas con su localización, el tipo de agua muestreada (goteo o permanente) y las condiciones meteorológicas externas. Se observa un mayor grado de mineralización en las aguas correspondientes a goteos, destacando el goteo asociado a la estación de control ambiental del Museo de Cera por sus altos y anómalos contenidos en nitratos (NO₃) y cloruros (Cl⁻); esta anomalía probablemente está relacionada con la presencia de acumulaciones de materia orgánica (excrementos, guano) en alguna galería superior situada en su ruta de infiltración.

Las aguas permanentes (gour y lagos) presentan menor concentración en especies disueltas y menor presión parcial de CO₂ en respuesta al alto grado de ventilación de la cavidad que favorece la desgasificación de las aguas de goteo y la precipitación de minerales carbonatados cálcicos a lo largo de toda la zona muestreada. Los puntos con mayor variabilidad en el grado de mineralización y menores contenidos en CO₂ disuelto, son precisamente los situados más próximos a la entrada (OG-9, OG-14) por estar más afectados por las condiciones meteorológicas externas.

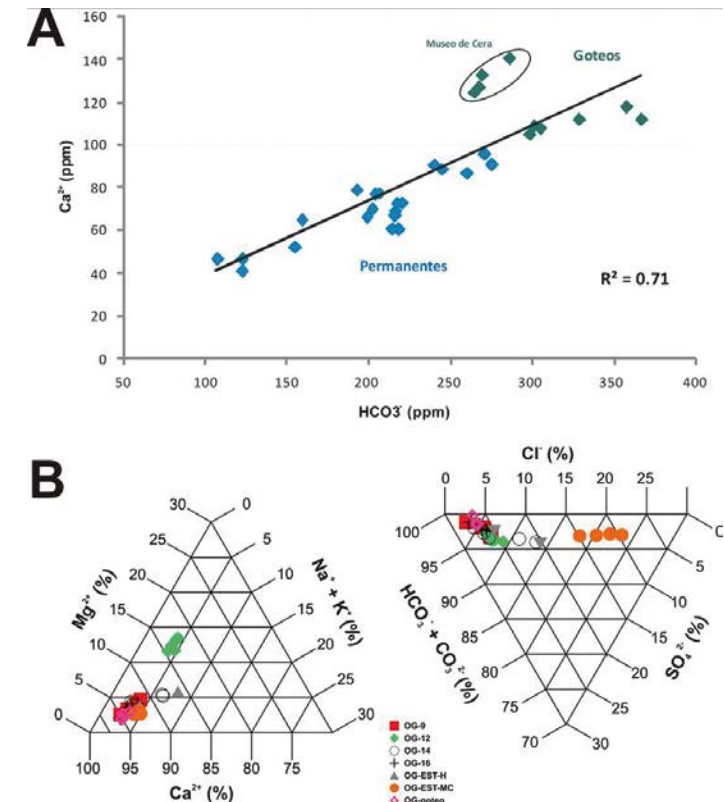


Figura 6. A: Comparativa de la relación entre el contenido en calcio y en bicarbonatos para los dos tipos de agua de infiltración analizadas: masas de agua permanentes (gours y lagos) y aguas de goteo. B: Diagramas terciarios que indican la proporción relativa de los iones mayoritarios analizados presentes en el agua de infiltración. (Ver Figura 1 para la localización de los puntos de muestreo).

CONCLUSIONES

Las variaciones estacionales de los principales parámetros climáticos (temperatura, humedad relativa y contenido en CO₂) en el sector Cueva Palomera-Museo de Cera-Sala del Cacique están fuertemente controladas por las condiciones meteorológicas en el exterior, fundamentalmente por la diferencia de temperatura entre el aire de la cavidad y la atmósfera externa y por las oscilaciones barométricas.

En conjunto, las aguas de goteo presentan valores de CO₂ disuelto significativamente mayores a los de las aguas de lagos y *gours*; este hecho parece confirmar, al menos estacionalmente, el importante papel que juega el agua de infiltración en el transporte del CO₂ al medio subterráneo.

El análisis e interpretación del patrón espacio-temporal de las condiciones termo-higrométricas del aire, de su contenido en CO₂ y de su señal isotópica δ¹³C, así como otros gases trazadores (CH₄ y ²²²Rn), ha permitido identificar periodos y zonas de la cavidad con mayor o menor conexión aerodinámica con el exterior. La desconexión del Museo de Cera con el resto de la cavidad hace que esta zona opere como una “trampa de aire” a mayor temperatura y menor densidad, que no se moviliza por medio de una circulación convectiva. El Museo de Cera es una zona de especial interés a la hora de evaluar el impacto ambiental de las visitas por su estabilidad ambiental y por no participar en el régimen estacional y diario de intensa ventilación del aire subterráneo. No obstante, en el análisis inicial de la influencia del régimen actual de visitas sobre los principales parámetros ambientales no se han detectado impactos significativos o perdurables.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado a través del convenio de colaboración entre la Fundación Patrimonio Natural de la Junta de Castilla y el Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC).

REFERENCIAS

- Camacho, A. I., Valdecasas, A. G., Rodríguez, J., Cuezva, S., Lario, J. y Sánchez-Moral, S. 2006. Habitat constraints in epikarstic waters of an Iberian Peninsula cave system. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 42 (2), 127-140.
- Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., García-Anton, E., Álvarez-Gallego, M., Benavente, D., Calaforra, J. M. y Sánchez-Moral, S. 2014. Climate-driven changes on storage and sink of carbon dioxide in subsurface atmosphere of karst terrains. En: Andreo, B. (ed.), *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Environmental Earth Sciences 1. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-17435-3_59.
- Grupo Espeleológico Edelweiss. 1986. Complejo kárstico de Ojo Guareña. En: Diputación Provincial de Burgos (ed). *Kaite*, vol 4–5. Diputación Provincial de Burgos, Burgos, Spain.
- Parkhurst, D. L. y Appelo, C. A. J. 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, book 6, chap. A43, 497 p.
- Puch, C. 1998. Grandes Cuevas y Simas de España. *Espeleo Club de Gracia*, Barcelona, 794 pp.

CaViX: Método simplificado de cálculo de la visitabilidad máxima en cavidades turísticas (aplicación web-cloud)

Emilio Guirado⁽¹⁾, Fernando Gázquez⁽²⁾, Ángel Fernández-Cortés⁽³⁾ y José-María Calaforra⁽¹⁾

(1) Departamento de Biología y Geología, Universidad de Almería, Crta. Sacramento s/n, 04120 Almería (geesecillo@gmail.com, jmcalforra@ual.es)

(2) Department of Earth Sciences. Cambridge University. Downing Street, Cambridge, Cambridgeshire, CB2 3EQ, U. K. (f.gazquez@ual.es)

(3) Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN-CSIC), José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid (acortes@mncn.csic.es)

RESUMEN

Las cavidades son espacios generalmente muy estables y fácilmente alterables desde el punto de vista ambiental. En particular, el elevado número de visitantes en cuevas turísticas puede ocasionar daños irreparables en formaciones, pinturas y ecosistemas subterráneos debido al aumento o variaciones bruscas de parámetros como la temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂. En el presente trabajo se propone una nueva herramienta informática ideada para calcular la capacidad de visitabilidad máxima de una cavidad turística. Los cálculos se realizan a partir de variables ya mencionadas como CO₂, T, HR cuya variación está relacionada frecuentemente con el número de visitantes. Para ello se ha creado la herramienta CaViX, por sus siglas en inglés (“Cave-Visitors-X”), para simplificar los cálculos a los gestores de cavidades turísticas, implementada en la nube (*cloud*), para facilitar el acceso. La aplicación aporta recomendaciones sobre la capacidad máxima de visitantes que puede soportar una cavidad determinada. Al ser una aplicación *online*, el acceso a los datos y a las herramientas de cálculo puede hacerse a cualquier hora y desde cualquier lugar del mundo. El método de cálculo lo componen dos fases. La primera determina para cada variable cuál es el umbral máximo en el que el equilibrio del ecosistema no se ve afectado negativamente y la segunda pondera el peso que tendrá cada variable en el total a computar. Los cálculos se deben hacer con eventos diarios válidos de incremento/descenso de la variable estudiada para que los resultados no se vean influenciados o falseados. Durante el cálculo el número de variables puede ser tan complejo como se desee pues pueden tenerse en cuenta valores máximos diarios permitidos (X max), variaciones diarias máximas permitidas (X var) o valores residuales diarios máximos (X rem) para cada una de las variables consideradas. La herramienta CaViX puede ser una herramienta útil para la estimación sostenible de visitantes a cavidades turísticas y contribuir a la conservación de sus ecosistemas.

Palabras clave: Capacidad máxima de visitantes, cuevas turísticas, CaViX, CO₂, Temperatura, herramienta web.

CaViX: Simplified calculation method of the maximum visitability in show caves (web cloud app)

ABSTRACT

Caves are a highly susceptible environment and tourist caves particularly have an added difficulty: an elevated number of visitors could cause irreparable damage to speleothems, paintings and cave ecosystems due to the increase or abrupt changes in temperature, relative humidity and/or CO₂. In this paper a simple method for calculating the maximum capacity of tourist visitability in caves is proposed. Calculations are performed using variables such as CO₂, T, HR related to the number of visitors. The “CaViX” tool, for its acronym in English (Cave-Visitors-X) aims to simplify the work and decision making of the show caves managers. The tool is implemented in the cloud and gives the recommendations on the maximum capacity of visitors in real time and it is possible to check the

results anywhere at any time. The calculation method is implemented in two phases. The first determines for each variable what is the maximum threshold at which the balance of the ecosystem is not adversely affected. The second phase weights the influence that each variable has in the total computing. The calculations must be made with valid events of a daily elemental increase/decrease of the selected variable. The number of variables and the thresholds that can be considered could be as complex as desired: maximum permitted daily values (X_{max}), maximum daily variations allowed (X_{var}) or maximum daily remnants (X_{rem}) can be pondered for each variable. The CaViX software can be a useful tool for estimating sustainable tourism in show caves and to contribute to the conservation of the cave ecosystem.

Keywords: visitor carrying capacity, show caves, CaViX, CO₂, temperature, web application.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, una gran cantidad de trabajos científicos han puesto de manifiesto el impacto humano en cavidades turísticas (Pulido *et al.*, 1997; Calaforra *et al.*, 2003; Fernández-Cortés 2005; Baldini *et al.*, 2006; Cuezva 2008; Cuevas 2013, entre otros). Las variables climáticas más utilizadas en estos trabajos han sido el CO₂, la temperatura y la humedad relativa, por ser las más útiles –y medibles con instrumental relativamente económico– en estudios microclimáticos e interpretaciones para el cálculo de visitabilidad (Calaforra *et al.*, 2003). Estos datos, son almacenados en servidores, y posteriormente tratados para su mejor interpretación y valoración. El uso del *world wide web* y el aumento de ancho de banda en los últimos años han permitido alojar grandes cantidades de datos en la *nube*, haciéndolos accesibles para los gestores de cavidades en todo momento prácticamente desde cualquier lugar donde se disponga de conexión a Internet.

La herramienta *online* CaViX “Cave Visitors Capacity X” ha sido desarrollada para ofrecer ayuda a los gestores de cavidades turísticas con recomendaciones sobre el número máximo de visitantes en diferentes eventos (diarios, mensuales, anuales...) con el objetivo de ayudar a mantener la sostenibilidad ambiental de la cavidad objeto de estudio. Se ha tenido en cuenta la facilidad de uso para que sin necesidad de una formación previa se pueda empezar a utilizar desde el primer momento.

Aunque la herramienta pueda utilizarse para periodos cortos de tiempo, hay que tener en cuenta los diferentes regímenes de ventilación a lo largo del ciclo anual (Luetscher y Jeannin 2004; García-Antón *et al.*, 2012). CaViX permite el cambio de escala temporal en el estudio y, por tanto, la observación de las diferentes respuestas microclimáticas directas de un corto periodo que, en su defecto, quedarían amortiguadas o poco visibles a mayor escala. Las interpretaciones de la herramienta *online* CaViX ganan en fiabilidad si se cuenta con un conocimiento previo de la dinámica ambiental de la cavidad a lo largo de al menos un año hidrológico y disponiendo de una amplia base de datos del efecto de visitas de diferente tipología (en términos de número de personas y tiempo de permanencia) sobre cada parámetro de control (temperatura, humedad relativa o contenido en CO₂ del aire).

Como ejemplo práctico de la aplicación de la herramienta CaViX a un caso real, se estudiaron distintas variables en la cavidad El Soplao Cantabria, España (Guirado *et al.*, 2014) en estas mismas actas.

METODOLOGÍA

En este trabajo se presenta una herramienta basada en el estándar web para analizar la capacidad máxima de visitantes que puede soportar una cavidad explotada desde el punto de vista turístico.

La herramienta se ofrece *online* para uso libre desde la dirección web (<http://www.cavix.net>), alojada en un servidor con sistema operativo Debian GNU Linux (<http://www.debian.org>) y Apache® versión 2.2 (<http://httpd.apache.org>) con interprete para PHP versión 5.3 (<http://www.php.net>). En la visualización de las gráficas se ha usado la librería javascript Jqplot® con licencia libre MIT (<http://www.jqplot.com>). La ejecución de estas librerías vienen activadas por defecto en cualquier navegador web como Google Chrome®, Mozilla Firefox®,

Internet Explorer® versión 7 y 8 o Safari®. Se aconseja el uso de Google Chrome® o Mozilla Firefox® para una mejor experiencia.

PROCESO DE CÁLCULO

En primer lugar, los datos tomados de variables como CO₂, temperatura o humedad relativa, son tratados y clasificados en eventos diarios para una mejor interpretación en la herramienta CaViX. Para una correcta interpretación final, se requiere de un cribado previo de eventos, que permitirá seleccionar solo los eventos válidos, entendidos éstos como ascensos y descensos logarítmicos o lineales de la variable, nítidos y desprovistos de influencias que enmascaren la configuración aproximadamente gaussiana de la curva. En todos los casos se enfrenta a la variable con el número de visitantes.

Las variables dependientes que podemos deducir para CO₂, temperatura o humedad relativa (Figura 1) son:

- X máximo. (X_{max}). Ejemplo CO₂ máximo.
- X mínimo. (X_{min}).
- X inicial. Valor de la variable a la hora de la apertura al público de la cavidad. (X_{ini}).
- X variación. Diferencia entre el valor máximo y valor mínimo de la variable. (X_{var}).
- X remanente. Diferencia entre mínimos X_{min} y X_{min} del día siguiente de la variable. (X_{rem}).
- X 24h. Diferencia entre apertura X_{ini} y X_{ini} del día siguiente de la variable. (X_{24h}).
- Visitantes. Número de visitantes en el transcurso del evento.

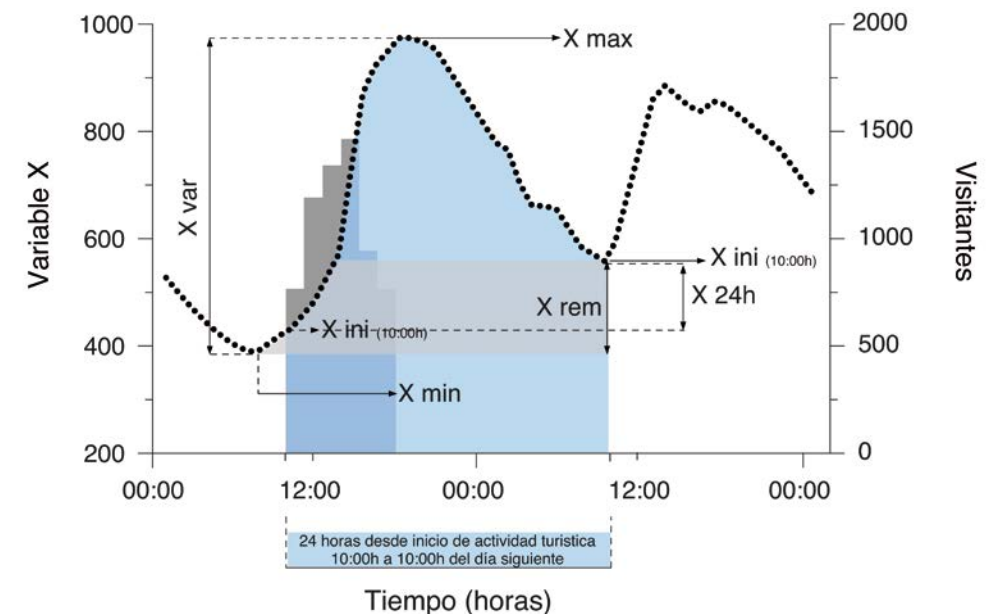


Figura 1. Gráfica modelo donde se puede ver las variables dependientes X máximo (X_{max}); X mínimo (X_{min}); X inicial, que es el valor de la variable a la hora de la apertura al público de la cavidad representada con (X_{ini}); X variación, que apunta a la diferencia entre el valor máximo y valor mínimo de la variable (X_{var}); X remanente como la diferencia entre X_{min} y X_{min} del día siguiente de la variable (X_{rem}).

Para introducir los datos en la herramienta web CaViX, se debe elaborar una base de datos en formato "csv" (del inglés *comma-separated values*), documento en formato abierto para representar datos en forma de tabla separado por comas. En nuestro caso, la columna de visitantes en primer lugar y después las variables a estudiar (X max, X rem, etc). CaViX tiene capacidad para infinitas variables, pero se recomienda no usar un número elevado de las mismas, debido a la complejidad que puede desarrollar la estimación del peso y valor de cada variable y la dificultad de su interpretación final. Por otro lado, CaViX también puede ser útil para el cálculo multivariable en modo "experto" y aclarar incertidumbres concretas referentes al estudio microclimático de una cavidad.

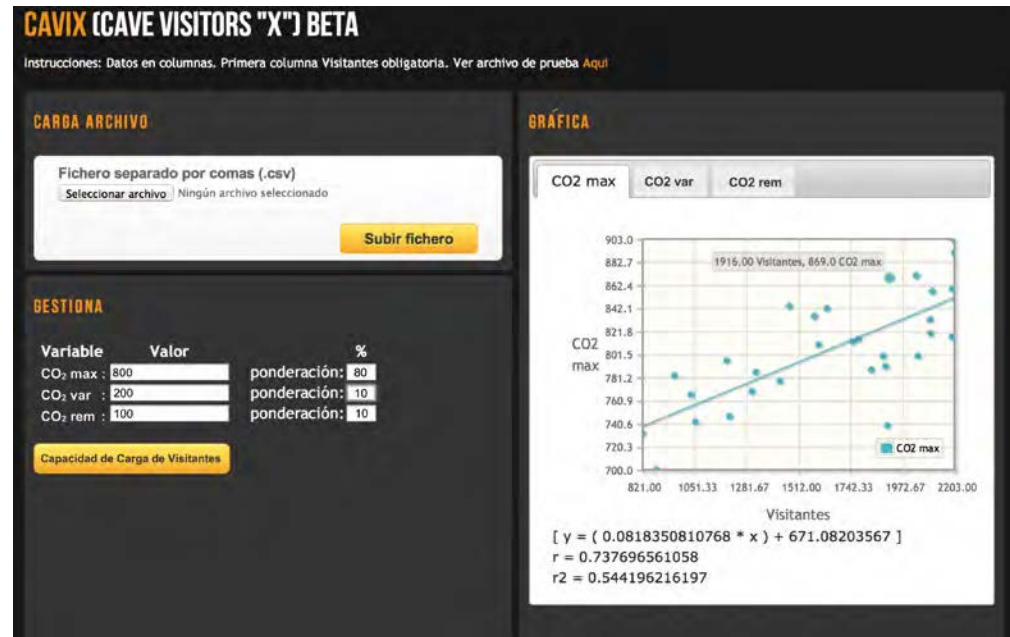


Figura 2. Vista de la herramienta CaViX tras haber cargado el fichero con los visitantes y las variables CO₂ máximo, temperatura máxima y humedad relativa.

Al cargar el fichero en formato "csv" separado por comas, se genera una gráfica para cada variable relacionada (Figura 2) con el número de visitantes organizadas por pestañas seleccionables que nos ayudará a completar el formulario donde se debe introducir el valor de la variable que se quiere incluir y el peso en porcentaje que se desea para esa variable (Figura 3).



Figura 3. Variables y valores asignados junto con el peso en porcentaje para un caso experimental. El mayor peso (80%) se le otorga a la concentración máxima de CO₂ con un valor hasta 800 ppm. La variación de CO₂ desde que se abre la cavidad al público hasta que se cierra, también es una variable a la que se le da un peso considerable (20%) en este caso.

Para calcular valores limitantes y su ponderación se debe prestar especial atención a la relación entre distintas variables cruzadas. Por ejemplo, la selección del valor de la variable CO₂ máximo, puede venir condicionada por la relación entre la variable CO₂ máximo y el CO₂ remanente (diferencias de CO₂ diarias) que persisten en la cavidad y cuya acumulación debería evitarse. Por ello se calcula teniendo en cuenta el valor en el cual la línea de tendencia corta al eje X para un valor igual a cero de la variable CO₂ remanente. En este caso concreto, indica un valor de la variable CO₂ máximo de unos 800 ppm como valor estable que sería preferible no sobrepasar (Figura 4).

De igual forma también pueden utilizarse otros criterios medio ambientales como la variación anual natural del CO₂ en el exterior o en galerías no visitadas de la cavidad.

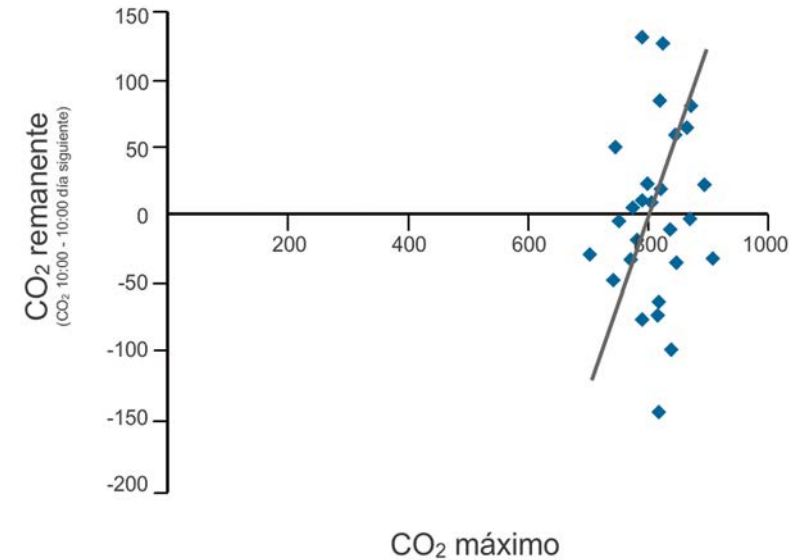


Figura 4. Relación entre las variables CO₂ máximo para eje X y CO₂ remanente (diferencias de CO₂ diarias solo para el mes de agosto de 2013) para el eje Y.

Finalmente la herramienta muestra unas recomendaciones referidas al número máximo de visitantes total (diarios, mensuales o anuales, dependiendo de la escala de la entrada de datos) según los criterios de valor y peso introducidos. Además en un gráfico de sectores se visualizan desglosados los visitantes "asignados" a cada variable de acuerdo con la ponderación (Figura 5).

CaViX calcula el número de visitantes máximo mediante regresiones múltiples ponderadas. En primer lugar, se generan todas las regresiones lineales a partir de la nube de puntos obtenidos de CO₂, temperatura o humedad relativa (o cualquier otra variable) con respecto al número de visitantes. Al generar la regresión, la herramienta muestra el grado de correlación de las variables (r y r^2) que valoraremos para asignar el peso adecuado a la variable. El dato final – Capacidad de Carga de Visitantes o VCC (*Visitor Carrying Capacity*)- indica el número de visitantes recomendado para la situación establecida.

De forma añadida, el análisis CaViX se puede realizar para periodos de tiempo concretos. Por ejemplo, periodos de máxima afluencia de visitantes, periodos invernales, días de lluvia... lo cual permite obtener distintos valores de VCC en distintas situaciones ambientales. Actualmente se está trabajando en implementar herramientas de cálculo más potentes que permitan la utilización de regresiones no lineales a los datos de CaViX.

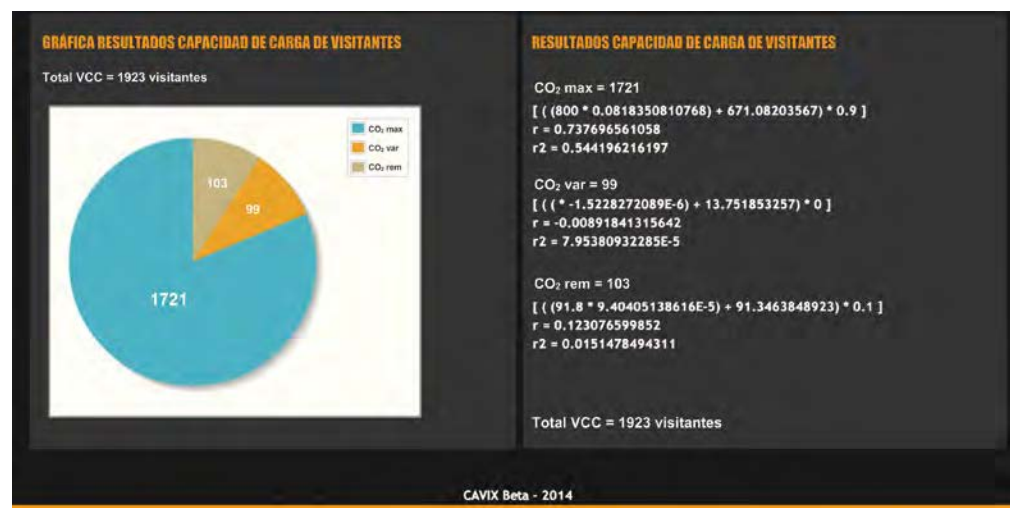


Figura 5. Resultados obtenidos a partir de los valores y peso de cada variable proporcionados por el gestor. 1900 visitantes como máximo para este evento.

CONCLUSIONES

CaViX es una herramienta de ayuda para la gestión en cavidades turísticas, que mediante datos de variables como CO₂, temperatura, humedad relativa... proporciona un valor recomendando de número máximo de visitantes para una cavidad, dadas unas condiciones ambientales concretas.

Con ayuda de la herramienta *online* CaViX (<http://www.cavix.net>) se ha podido definir de manera sencilla e intuitiva la planificación de la capacidad máxima de visitantes para un evento determinado. Al ser una herramienta *online*, el gestor puede utilizarla en cualquier momento y lugar para obtener un valor aproximado de la visitabilidad máxima de su cavidad. La herramienta está en fase beta y se están desarrollando diferentes análisis y correlaciones para un mejor ajuste a la hora de interpretar nubes de puntos más dispersas y mejorar la interface de contacto con el usuario.

CaViX puede implementarse de forma específica para cualquier cavidad turística que haya mantenido o quiera mantener un control de sus variables ambientales principales como fuente para conocer en todo momento la capacidad de carga de la cueva y así obtener ayuda para proteger el ecosistema subterráneo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a las instalaciones de El Soplao y al Gobierno de Cantabria por el acceso a la base de datos de la información de las diferentes variables ambientales de la cavidad. Al Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental RNM189 de la Universidad de Almería por los materiales necesarios para la elaboración de este estudio. El desarrollo de la herramienta informática CaViX ha sido realizado en el marco del Proyecto GLOCHARID (*Global Change in Arid Zones - 852/2009/M/00*) subvencionado por la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS

Baldini, J. U., Baldini, L. M., McDermott, F. y Clipson, N. 2006. Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: evidence from Ballynamindra Cave, Ireland. *Journal of Cave and Karst Studies*, 68 (1), 4-11.

Calaforra, J. M., Fernández-Cortés, A., Sánchez-Martos, F., Gisbert, J. y Pulido-Bosch, A. 2003. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, 30 (02), 160-167.

Cuevas-González, J. 2013. Caracterización microclimática e hidrogeoquímica de la Cueva del Canelobre (Busot, Alicante), (*Tesis doctoral, Universidad de Alicante*) p. 208-209.

Cuezva, S. 2008. Dinámica microambiental de un medio kárstico somero (Cueva de Altamira, Cantabria): microclima, geomicrobiología y mecanismos de interacción cavidad-exterior (*Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid*).

Debian.org *Operating system Project*. (2014) <http://www.debian.org>.

Fernández-Cortés, A. 2005. Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico, (*Tesis doctoral, Universidad de Almería*) p. 277-280.

García Antón, E., Cuezva, S., Fernández-Cortés, A., Sánchez-Moral, S. y Benavente, D. 2012. Daily variations of CO₂, δ¹³CO₂ and CH₄ of cave air controlled by external weather conditions: example of rapid survey in Altamira cave (north of Spain). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 14, p. 4859).

Guirado E., Gázquez F., Fernández-Cortés Á., Argumosa A. y Calaforra J.M. 2014. Cálculo de la visitabilidad máxima en cavidades turísticas mediante el método CaViX: El Soplao (Cantabria). (in press) *En estas mismas actas*.

Luetscher, M., y Jeannin, P. Y. 2004. *Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes*. *Terra Nova*, 16 (6), 344-350.

PHP.net *Popular general-purpose scripting language*. (2014) <http://www.php.net>.

Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C. M. y Vallejos, A. 1997. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 31 (3-4), 142-149.

Metodología aplicada en la cueva El Soplao para la medición de radón con detectores de cámara iónica de electretes

Sonia Santiago-Álvarez

*Servicio de Prevención Ajeno Spril Norte S.L.
C/ Andrés Del Río Nº 7 / Bajo. 39004, Santander.
(tecnicocantabria2@sprilnorte.com)*

RESUMEN

Tal y como se establece en el artículo 14 de la Ley 31/1995 sobre Prevención de Riesgos Laborales, Turismo del Nansa S.L. garantiza la seguridad y salud de sus trabajadores en todos los aspectos relaciones con el trabajo. De acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 783/2001, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes y las modificaciones al mismo establecidas en el R.D. 1439/2010, se realizan las mediciones del gas radón dentro de la cueva El Soplao. Teniendo en cuenta los distintos tipos de detectores de gas radón existentes, desde Turismo del Nansa S.L. se ha optado por los detectores integradores y dentro de estos, por los detectores de cámara iónica de electretes, empleando electretes de larga exposición. La medición de la concentración de radón se realiza en las rutas de pasarela y turismo aventura guiadas por personal de la cueva. Siguiendo las indicaciones del Consejo de Seguridad Nuclear, se ha elaborado una red de medición con dos detectores en cada punto de medición. Uno de ellos permanece fijo durante un período de un año y en el otro se realizan lecturas mensuales. Los emplazamientos de los puntos de medición se han elegido de acuerdo con las paradas efectuadas por los guías y teniendo en cuenta el tiempo que permanecen en los mismos para dar las explicaciones oportunas. Debido a las condiciones de temperatura y humedad de la cueva, los detectores se colocan dentro de bolsas Tyvek, cuyo material permite el paso del gas radón pero evita el paso del agua. Una vez recopilados los resultados, se plasman en un informe donde Figuran las fechas de colocación y retirada de cada medidor, así como los datos obtenidos de concentración de radón. Estos resultados, junto con el número de visitas efectuadas anualmente ponderadas con el tiempo que cada guía permanece en cada punto de medición, permiten estimar la dosis recibida por cada trabajador de forma individual. Por último para establecer las acciones a tomar, se comparan los niveles de concentración de radón obtenidos con los niveles de actuación establecidos en la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear.

Palabras clave: Consejo de Seguridad Nuclear, El Soplao, guía, radón, riesgos laborales.

Methodology applied in the Soplao cave for radon measurements with electret ion chambers

ABSTRACT

As established in article 14 of the Law of 31/1995 regarding the Prevention of Occupational Hazards Act, "Turismo del Nansa S.L." guarantees the protection Health y Safety of all its employees in every aspect related to their respective jobs. In accordance with what is required by law in the R.D. 783/2001 in which health protection is carried out against ionizing radiation and modified by law in the R.D. 1439/2010 and the measuring of radon gas within the Soplao cave. Taking into account the different types of existing radon gas detectors, "Turismo del Nansa S.L." has chosen integrated detectors and within said detectors, ionizing chambers that employ electrets for extended expo-

sure. The measurement of the concentration of radon is carried out in the walkways and adventure tourism routes guided by trained personnel of the cave. Following the guidelines of the Nuclear Safety Council, a measuring network with two detectors in each measuring point, was placed. One of them remains turned on for a year and the other is checked on a monthly basis. The location for each measuring point has been chosen in accordance with the stops regularly made by the guides and taking into account the time they remain in each given point to give any required explanation to visitors. Because of the temperature and humidity levels in the cave, the detectors are placed inside Tyvek bags, which allow for the filtering of radon gas but not water. Once the data is collected, the results are reflected in a report where all the dates of placement and removal of each indicator, as well as the radon gas data obtained are indicated. These results, together with the number of annual visits, averaged with the time each guide remains in each measuring point, allows for an estimation of the dose received by each individual employee. Finally, to establish the actions that have to be taken, the levels of radon concentration are compared to the levels of actions established in the IS-33 instruction of the Nuclear Safety Council.

Keywords: Nuclear Safety Council, El Soplao, guide, radon, occupational hazards.

INTRODUCCIÓN

Tal y como establece el artículo 14 de la Ley 31/1995 sobre Prevención de Riesgos Laborales, modificada por la Ley 554/2003, en cumplimiento del deber de protección, Turismo del Nansa S.L. garantiza la seguridad y salud de los trabajadores a su servicio en todos los aspectos relacionados con el trabajo. Por otro lado en el Reglamento de los Servicios de Prevención y concretamente en su artículo 5, se establece que la evaluación de riesgos de los puestos de trabajo deberá incluir la realización de las mediciones, análisis o ensayos que se consideren necesarios, con el objeto de determinar si se superan los límites o niveles fijados en las normas específicas de aplicación.

En el Título VII "Fuentes naturales de radiación" del R.D. 783/2001 por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes junto a las modificaciones realizadas en los artículos 62 y 63 del mismo por el R.D. 1439/2010, se hace referencia a la exposición de trabajadores y miembros del público a fuentes de radiación natural. En los casos que se relacionan se indica la necesidad de llevar a cabo estudios de evaluación para determinar si existe exposición. En función del resultado de dichos estudios el Consejo de Seguridad Nuclear identificará aquellas actividades laborales que deban ser objeto de especial atención y estar sujetos a control y si es necesario establecerá la aplicación de medidas correctoras y de protección radiológica, exigiendo su aplicación por los titulares.

Las fuentes de radiación natural a considerar son las siguientes:

- Los procesos industriales de materiales que contengan radionucleidos naturales.
- Aquellas en las que los trabajadores o los miembros del público, estén expuestos a la inhalación de los descendientes de torón o de radón o a la radiación gamma o cualquier otra exposición en lugares de trabajo como establecimientos termales, cuevas, minas, lugares de trabajo subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas.
- Las actividades donde se manipulen o almacenen materiales radiactivos o que generen residuos radiactivos que contengan radionucleidos naturales que provoquen un incremento de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público.
- También las actividades laborales que impliquen exposición a la radiación cósmica durante las operaciones con aeronaves.

Los lugares de trabajo que habría que estudiar respecto a la exposición a radón, torón y radiación serían los siguientes:

- Minas subterráneas y cuevas turísticas.
- Balnearios y piscinas cubiertas de aguas subterráneas.
- Túneles y galerías de diferentes tipos.
- Instalaciones donde se almacenen y traten aguas de origen subterráneo.
- Redes de metro de diferentes ciudades.
- Cualquier lugar subterráneo de trabajo localizado en las distintas ciudades.
- Lugares de trabajo no subterráneos localizados en zonas con elevados niveles de radón en viviendas.

Según todo lo anteriormente expuesto, Turismo del Nansa S.L. como gestora de la cueva turística El Soplao, realiza las mediciones del gas radón existente en el interior de la misma. Para ello cuenta con su Servicio de Prevención Ajeno: Spril S.L., para determinar desde el punto de vista de la Higiene industrial, si se superan los límites o niveles fijados en la legislación de aplicación, teniendo en cuenta las directrices establecidas por el Consejo de Seguridad Nuclear en su Guía de Seguridad 11.01. Además el servicio de Prevención Ajeno Unipresalud realiza la vigilancia sanitaria de los trabajadores.

EL RADÓN

El radón es un gas noble inerte y radiactivo de origen natural cuyo impacto radiológico en el hombre es el más importante dentro del conjunto de fuentes de radiación natural. Existen tres isótopos principales de radón procedentes de tres grandes cadenas radiactivas de origen natural:

La del uranio-238 (^{238}U) en la que se forma radio-226 (^{226}Ra) que se transforma en radón-222 (^{222}Rn) o Radón.

La del uranio 235 (^{235}U) da origen al radio-223 (^{223}Ra) que se desintegra en radón 219 (^{219}Rn) o Actinón.

La del torio 232 (^{232}Th) que produce radio-224 (^{224}Ra) que pasa a ser radón 220 (^{220}Rn) o Torón.

De las tres formas químicas, la que se encuentra en mayor proporción en la naturaleza es la primera de ellas, denominada Radón (^{222}Rn), teniendo importante trascendencia para la salud puesto que aporta alrededor del 50% de toda la dosis de radiación natural que recibe el ser humano.

El Radón se encuentra en casi todos los tipos de suelos o aguas. Tiene un período de semidesintegración de 3,8 días y en su proceso de semidesintegración desde los elementos inestables hasta el isótopo estable Pb-206, el gas radón produce unos descendientes sólidos con vidas medias inferiores a 30 minutos que son el Po-218, Pb-214, el Bi-214 y el Po-214.

Estos descendientes se pueden fijar a partículas del aire, especialmente a aquellas de tamaños de 0.1 micras y junto a ellas continúan desintegrándose.

Cuando metemos radón en los pulmones, este gas entra y sale y no da prácticamente radiación a nuestros pulmones, pero al respirar introducimos también partículas que llevan fijados los descendientes del radón que se depositan en nuestro sistema respiratorio según su tamaño y allí siguen su desintegración, básicamente por emisión de partículas alfa, con lo que el daño biológico es importante y por ello la probabilidad de generar una enfermedad es muy alta.

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE RADÓN Y SUS DESCENDIENTES

Para realizar las mediciones de concentración de gas radón y sus descendientes existen varios métodos que están basados en la detección de la radiación ionizante emitida durante la desintegración radiactiva del radón. Según lo recogido en la Guía de Seguridad Nuclear 11.01 "Directrices sobre la competencia de los laboratorios y

servicios de medida de radón en aire” del Consejo de Seguridad Nuclear, en función del tiempo de exposición necesario para obtener medidas fiables, los equipos de medida de radón pueden dividirse en dos categorías:

Sistemas de medida en continuo, con tiempos de integración cortos, que van desde algunos minutos a varias horas. Estos sistemas son útiles, por ejemplo, para estudiar las fluctuaciones temporales a corto plazo de la concentración de radón o para localizar focos de exhalación de radón con el fin de planificar acciones de mitigación.

Sistemas que realizan medidas en periodos largos de exposición que varían entre unos cuantos días y algunos meses. Las medidas de varios días de duración son de utilidad cuando hay que llevar a cabo una evaluación urgente de la situación, o en campañas de medida de radón de carácter exploratorio con el fin de realizar un cribado preliminar. Para la determinación de concentraciones promedio de radón anuales o estacionales en viviendas y lugares de trabajo se recomienda hacer uso de sistemas con tiempos de exposición de varios meses.

Los equipos del primer grupo suelen disponer de un sistema de lectura directa mediante pantalla o almacenamiento en soporte electrónico, mientras que los sistemas del segundo grupo son de lectura indirecta, es decir, se requiere el uso de instrumentación adicional para poder estimar la concentración de radón.

Los sistemas de medición en continuo son, en general, activos, es decir emplean aire forzado para la captación de la muestra y entre ellos están: los detectores de silicio, la cámara de ionización y la célula de centelleo. Los sistemas integradores y con tiempos largos de exposición son de tipo pasivo y entre ellos se encuentran los detectores de trazas y la cámara iónica de electrete.

MÉTODO EMPLEADO EN LA CUEVA EL SOPLAO

Turismo del Nansa S.L. utiliza para realizar las mediciones dentro de la cueva El Soplao el sistema E-Perm.

Este sistema emplea dispositivos pasivos integradores reutilizables, conocidos como cámaras iónicas de electretes, los cuales son emplazados en el lugar de medición durante un período de tiempo específico.

Este método consta de tres componentes: un disco de teflón cargado electrostáticamente llamado electrete que recoge los iones; una cámara de iones de plástico conductor en el que se coloca el electrete y un lector para leer el voltaje del mismo (Figura 1).



Figura 1. Sistema E-Perm. Arriba, de izquierda a derecha: cámara de iones para mediciones de corto plazo, cámara de iones para mediciones de largo plazo, lector de voltaje. Abajo, de izquierda a derecha: electrete de corto plazo y electrete de largo plazo.

El electrete

El electrete es un disco de teflón que se ha cargado eléctricamente mediante un proceso especial de manera que conserva la carga de forma permanente. Este disco está fijado en un soporte de plástico conductor de la electricidad que se acopla en la cámara iónica mediante un sistema de rosca.

El sistema E-Perm cuenta con diferentes tipos de electretes identificados con etiquetas de colores pegadas a los soportes de plástico. Los electretes utilizados para mediciones de corto plazo poseen una alta sensibilidad y están identificados por una etiqueta de color azul y el disco cargado eléctricamente suele ser de color blanco. Los electretes menos sensibles que se utilizan para mediciones a largo plazo, tienen la etiqueta de color rojo y el disco es de color negro. Además de todo lo anterior, cada electrete lleva fijado en su soporte de plástico un código de barras que identifica cada electrete con un número de serie único.

La cámara de iones

La radiación emitida por el radón y sus descendientes produce una ionización asociada en el aire. De esta forma, el aire contiene iones negativos y positivos. Cuando esto ocurre en el interior de una cámara iónica, los iones son atraídos hacia la superficie del electrete cargado eléctricamente. El electrete lleva carga positiva y por lo tanto en él se acumulan iones negativos del aire y los iones positivos van a la pared de la cámara. El electrete sirve tanto como una fuente de campo eléctrico que ayuda a recoger los iones y como un sensor. Tras la recogida de los iones, el voltaje de la superficie del electrete disminuye proporcionalmente a la concentración de radón y al tiempo de exposición.

El lector de electrete

El lector de electrete es un instrumento electrónico utilizado para medir el voltaje de la superficie de un electrete.

El sistema E-Perm incluye un patrón de MS Excel para calcular la concentración de radón desde las lecturas obtenidas en el lector. El cambio en la tensión de superficie de un electrete durante un período de exposición es una medida de la concentración integrada en el tiempo de radón en la cámara E-Perm durante ese período.

SITUACIÓN DE LAS CÁMARAS EN LAS DOS RUTAS GUIADAS

La ubicación de las cámaras iónicas de electretes a lo largo de las rutas realizadas por los guías se ha elegido teniendo en cuenta exclusivamente criterios de riesgo laboral (Figura 2).

De esta forma, las cámaras se sitúan en aquellos puntos en los cuales los guías realizan paradas significativas y por lo tanto están sometidos a un mayor tiempo de exposición. Estas paradas pueden deberse a explicaciones dadas por el guía en los puntos singulares de la ruta o, como sucede en la ruta denominada Turismo Aventura a paradas ocasionadas al tener que velar y asegurarse de que todos los visitantes han superado con éxito un obstáculo de acceso relativamente difícil.

En cada punto de medición, siguiendo las indicaciones del Consejo de Seguridad Nuclear se colocan dos detectores. Este organismo establece que uno de estos detectores debe permanecer fijo durante un período de un año y que sobre el otro se deben realizar lecturas trimestrales. En concreto en la cueva El Soplao, actualmente se realiza un control quincenal sobre cada uno de los detectores colocados. De esta forma se pretende conseguir una medición de la emisión de radón lo mas ajustada posible y se permite la detección de anomalías en los electretes (descargas repentinas) sin perder muchos días de medición.

Asimismo, las cámaras se sitúan, siempre que es posible a una altura de 1 o 1,5 metros del suelo ya que se considera que ésta es la altura media de respiración de una persona.

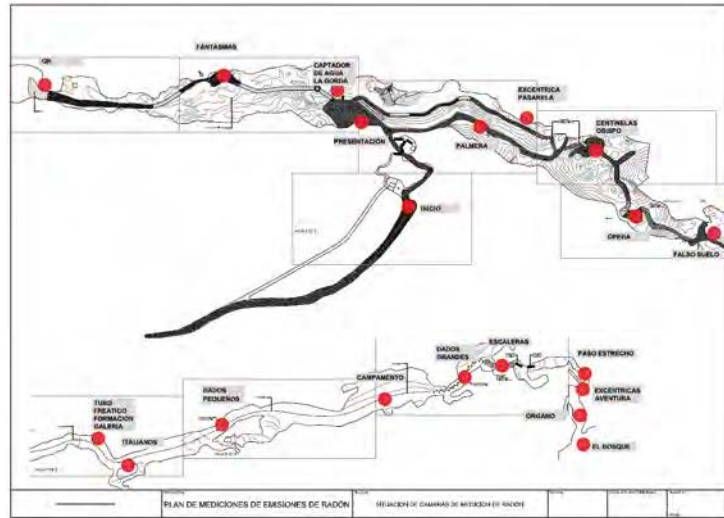


Figura 2. La imagen superior representa el trazado de la ruta denominada Pasarela y la inferior traza la ruta llamada Turismo Aventura. Los puntos rojos señalan los puntos significativos del recorrido.

Una de las peculiaridades de esta cueva son las condiciones de temperatura y humedad existentes en la misma, reflejadas en la Figura 3, así como la presencia constante de agua que junto a otros componentes dan lugar a las formaciones típicas de este emplazamiento. Teniendo en cuenta lo anterior, para minimizar la influencia de las condiciones ambientales en las mediciones, las cámaras iónicas de electretes se colocan dentro de bolsas confeccionadas con Tyvek.

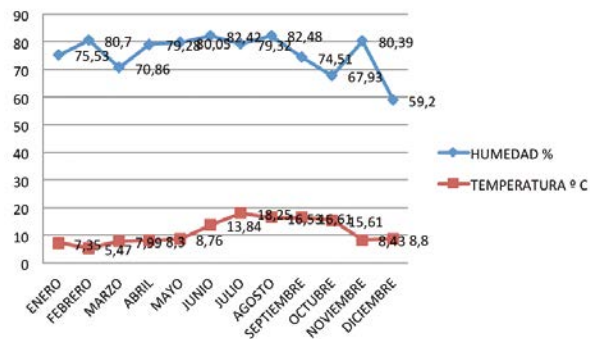


Figura 3. Valores medios de temperatura y humedad en la cueva el Soplao en cada uno de los meses del año 2013. Los datos se obtuvieron directamente de las estaciones telemétricas colocadas en dicha cueva.

El Tyvek es un material formado por fibras de polietileno de alta densidad que no permite el paso del agua pero si deja circular libremente el aire y por lo tanto el gas radón. Según lo referido en el "Estudio de la instrumentación de medida de radón en condiciones ambientales extremas", realizado por Moreno et al. (2011) donde se indica que el Tyvek no influye sobre la respuesta de los detectores y no se requiere modificación del factor

de calibración de los mismos de acuerdo con los resultados obtenidos en las cámaras de ensayo entre 45-85% de humedad relativa y 10-30 °C de temperatura. Actualmente se sigue trabajando para igualar todavía más los ensayos a las condiciones de las cavidades en general, cercanas al 100% de humedad.

OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y ACCIONES A TOMAR

Como se citaba anteriormente, cada quince días, se anota la lectura del voltaje de los electretes colocados en los puntos de medida. Esta lectura se realiza llevando el lector de voltaje al punto en el que se encuentran situadas las cámaras.

Una vez recopilados los resultados, estos se plasman en un informe donde Figuran las fechas de lectura por quincena de cada electrete, los valores iniciales y finales de voltaje de los mismos y la concentración de radón relacionada con la variación de dicho voltaje obtenida al introducir todos estos datos en el patrón de cálculo aportado por el sistema E-Perm.

Estos valores de la concentración de radón, junto con el número de visitas efectuadas anualmente ponderadas con el tiempo que cada guía permanece en cada punto de medición, permiten estimar la dosis recibida por cada trabajador de forma individual.

Para establecer las acciones a tomar, se comparan las dosis recibidas por los trabajadores con los niveles de actuación establecidos en la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear.

Asimismo, Turismo del Nansa S.L., cumpliendo con su obligación de velar por la salud de sus trabajadores, tiene contratado con el servicio de prevención ajeno Unipresalud la especialidad de vigilancia de la salud de sus trabajadores.


La vigilancia de la salud, es una actividad propia de la Medicina del Trabajo y debe existir una relación de interacción y complementariedad multidisciplinar con el resto de integrantes del Servicio de Prevención de la empresa. Siguiendo esta premisa, los reconocimientos médicos a los que están sometidos los trabajadores de Turismo del Nansa S.L., que realizan su trabajo dentro de la cueva El Soplao, son específicos frente a los riesgos derivados de su trabajo.

El protocolo seguido para la realización de los reconocimientos médicos es el de vigilancia sanitaria específica para trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes, editado por el Ministerio de Sanidad y Consumo. Este protocolo distingue entre trabajadores de "Categoría A" y trabajadores de "Categoría B".

En Turismo del Nansa S.L., a través del servicio de prevención Unipresalud el protocolo se aplica de inicio a todos los trabajadores y se repite con una periodicidad de 12 meses e incluso se adelanta si procede a criterio médico. Se les realiza además un control biológico y estudios complementarios que están directamente relacionados con los efectos de la exposición a radiaciones ionizantes.

La Figura 4 refleja el modelo de certificado de aptitud emitido por el servicio de prevención de Unipresalud, en el cual, tal y como establece la ley se reflejan los protocolos aplicados teniendo en cuenta los riesgos a los que están expuestos los trabajadores.

Los reales en amarillo son análisis de laboratorio directamente relacionados con las radiaciones ionizantes.



TURISMO DEL NANSA, S.L.

LG PRAO EL COLLAO, S/N
39553 CELIS
ATT. RECURSOS HUMANOS

TORRELAVEGA, a...., de.... de 2014

Muy Sr Nuestro:

Según la Ley de Prevención de Riesgos Laborales y demás normas concordantes, y el concierto de servicios de prevención N° XXXXX suscrito por Uds. en su día con UNIVERSAL PREVENCIÓN Y SALUD, SOCIEDAD DE PREVENCIÓN, S.L.U., hemos de manifestarle que en relación a la aptitud del trabajador de su empresa:

D.N.I. – APELLIDOS, NOMBRE

Que desarrolla su actividad en los siguientes puestos de trabajo:
GUÍA DE PASARELA

y como conclusión al tipo de examen de **salud Inicial/periódico específico** efectuado el día .. de .. de 2014, con aplicación de los protocolos de vigilancia de la salud en base a los riesgos inherentes a su puesto de trabajo:

Protocolos en base a riesgo aplicados	
ALBUMINA SUERO	EXPLORACION FISICA
ANALITICA PERFIL UPYS (SANGRE)	FOSFATASA ALCALINA
ANAMNESIS	INMUNOGLOBULINAS SUERO(A.G.M)
ESPIROMETRIA	OTOSCOPIA
E.C.G.	POSTURAS FORZADAS
CONTROL VISION	PROTEINAS TOT-SUERO
COMPLEMENTO BASICO (Ácido úrico + sedimento ORINA)	PROTEINOGRAMA SUERO
COLESTEROL-HDL	RAD. IONIZANTES
COEFICIENTE ALBUMINA/GLOBULINA	TRANSAMINASA GOT
BILIRRUBINA T Y D	TRIGLICERIDOS
AUDIOMETRIA	UREA SUERO

Reúne las condiciones de aptitud especificadas : **Apto**

Y se recomienda el próximo examen de salud: **En un año**

Sin otro particular, aprovechamos la ocasión para saludarle atentamente.

Dra. Myriam Mallavia Alcalde
Nº Colegiado: 39/03/09171
Dirección de Salud Laboral
UNIVERSAL DE PREVENCIÓN Y SALUD,
SOCIEDAD DE PREVENCIÓN, S.L.U.

Figura 4. Modelo de certificado de aptitud.

REFERENCIAS

- Boletín Oficial del Estado. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. N° 269 10-11-1995.
- Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. N° 178 26-07-2001
- Boletín Oficial del Estado. Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales. N° 298 13/12/2003.
- Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado el 6 de julio.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. NTP 728: Exposición laboral a radiación natural.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo NTP 614: Radiaciones ionizantes: normas de protección. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Consejo de Seguridad Nuclear. Instrucción IS-33 : criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural. Publicada el 26 de enero de 2012.
- Consejo de Seguridad Nuclear. Guía de Seguridad 11.01: Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Madrid, 27 de enero de 2010
- Ministerio de Sanidad y Consumo. «Libro Blanco de la Vigilancia de la Salud para la prevención de riesgos laborales» aprobado el 10 de diciembre de 2003 por La Comisión de Salud Pública del Consejo Interterritorial del Sistema Nacional de Salud.
- Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. Protocolos de vigilancia sanitaria específica. Radiaciones ionizantes.
- Moreno, V., Baixeras, C., Amgarou, K., Font, Ll., Grossi, C. y Vargas, A. 2011. *Estudio de la instrumentación de medida de radón en condiciones ambientales extremas*. 10-13 de mayo de 2011, Sevilla. 74-81.

Experiencia de dosimetría personal de radón en la Cueva del Viento

Alfredo Láinez⁽¹⁾, Ismael Fuente⁽²⁾, Luis Quindós-López⁽²⁾, José Luis Arteché⁽²⁾, Carlos Sainz-Fernández⁽²⁾, José Luis Gutiérrez-Villanueva⁽²⁾, Luis S. Quindós-Poncela⁽²⁾

(1) Centro de Visitantes Cueva del Viento, Carretera de los Piquetes, 51. 38480 Icod de los Vinos. Tenerife, Islas Canarias (alfre-lainez@hotmail.com)

(2) Universidad de Cantabria. Grupo RADON, Cátedra de Física Médica. Facultad de Medicina. C/Cardenal Herrera Oria s/n, 39011 Santander, Cantabria (ismael.fuente@unican.es; luis.quindos@unican.es)

RESUMEN

El gas radón en interiores representa un riesgo para la salud confirmado por varios organismos internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA). Tanto los investigadores como los guías de las cuevas turísticas o los aficionados a la espeleología, se ven potencialmente afectados por la exposición a este gas, recibiendo en algunos casos dosis que superan los límites establecidos. Para cuantificar la peligrosidad en el interior de aquellas cuevas donde la concentración sea más elevada, es imprescindible conocer los niveles existentes. Esta experiencia piloto se ha llevado a cabo en la zona norte de la isla de Tenerife, en el municipio de Icod de los Vinos, donde se encuentra la Cueva del Viento. Dicha cueva tiene 18.5 Km. topografiados y es en la actualidad la quinta cavidad volcánica mayor del mundo, únicamente superada por otras 4 cavidades situadas en Hawai. Se presentan los resultados obtenidos de concentración de radón evaluada a nivel personal, para un guía-espeleólogo, portador de un detector de radón durante su jornada laboral en el interior de la cavidad. El resto del tiempo, el detector permanece junto a otro en una localización fija, dentro del Centro de visitantes de la Cueva del Viento. Se pone de manifiesto la necesidad de utilizar una dosimetría personal cuando se trata de evaluar la concentración de radón a la que está expuesto un trabajador cuyo recorrido y permanencia dentro de la cavidad es muy variable a lo largo del año y por tanto difícil de caracterizar con detectores fijos instalados en el interior de la misma, como ocurre en otras cuevas turísticas.

Palabras clave: cavidades subterráneas, Cueva del Viento, dosis, protección radiológica, radón.

Experience on personal radon dosimetry at the so-called Cueva del Viento

ABSTRACT

Radon gas represents a health risk confirmed by several international studies such as indicated by WHO (World Health Organization), ICRP (International Commission on Radiological Protection) and IAEA (International Atomic Energy Agency). Exposure to radon gas potentially affects researchers, touristic guides and caving enthusiasts, who may receive in some cases doses exceeding the limits. Thus, it is essential to know the existing radon levels in order to quantify the risk inside those caves with high radon concentrations. We have developed this project in the northern part of the island of Tenerife at the town Icod de los Vinos, where Cueva del Viento is located. The cave has 18.5 km mapped length and is currently the fifth largest volcanic cavity in the world (only four cavities located in Hawaii have longer length). We have performed personal evaluation of the results of radon concentration in guides or explorers carrying a radon detector during working hours inside the cave. The rest of the time, they placed the detector in a fixed location within the visiting center. The itinerary and visiting time are highly variable throughout the year, which is a different situation as we can find in other touristic caves. This characteristic makes

it difficult to evaluate the radon exposure of the worker by means of fixed detectors. Thus, we need a personal dosimetry to assess the worker's radon concentration.

Keywords: Cueva del Viento, dose, radiological protection, radon, underground cavities.

INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años ya se considera una evidencia que el gas radón (Rn^{222}) es un agente cancerígeno que produce cáncer de pulmón (WHO, 2009). Varios estudios epidemiológicos han demostrado esta asociación y han revisado análisis en todo el mundo (Darby *et al.*, 2006, Krewski *et al.*, 2005). Organismos internacionales como OMS (Organización Mundial de la Salud), ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica) y OIEA (Organización Internacional de la Energía Atómica) han incluido la protección contra el gas radón en sus publicaciones y recomendaciones.

Desde esta perspectiva, la Unión Europea aprobó en diciembre del 2013 las nuevas Normas Básicas de Seguridad (BSS) para la protección contra los peligros derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (2013/59/EURATOM). En particular, la Directiva se aplica a las situaciones de exposición existentes, incluyendo las exposiciones de los miembros del público al radón. El Anexo XVIII del documento incluye una lista de aspectos a considerar para incluir en el Plan de Acción Nacional destinado a hacer frente a los riesgos a largo plazo de las exposiciones al radón.

Sin embargo, el camino seguido por los diferentes Estados miembros de la Unión Europea para enfrentarse hasta ahora con el problema del radón no ha sido el mismo. Desde 2001 la legislación española incorporó la Directiva (96/29/EURATOM) por la que se establecían las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos de la radiaciones ionizantes, que incluía una petición a los Estados miembros para determinar los lugares de trabajo en los que la exposición a la radiación natural es significativa.

La transposición de esta Directiva a la legislación nacional originó la publicación del Real Decreto 1439/2010 (BOE 279/2010), aprobando la Regulación sobre la protección contra la radiación de ionización, que actualizó el Real Decreto 783/2001 (BOE 178/2001). El Consejo de Seguridad Nuclear publicó la Instrucción IS-33 el 21 de diciembre de 2011, que entró en vigor el 26 de enero de 2012 (BOE 22/2012).

Esta instrucción proporciona criterios radiológicos para proteger a las personas contra la exposición a la radiación natural en lugares de trabajo. Esta declaración supone un primer paso hacia la regulación normativa de la exposición a este gas, con medidas correctivas o protectoras, que sirven de referencia para las autoridades competentes y titulares de las actividades de trabajo afectadas. Esta instrucción establece criterios radiológicos sobre los siguientes aspectos relacionados con la exposición a la radiación natural en lugares de trabajo:

a) Los valores de dosis efectiva para los trabajadores que requerirían acciones de remedio o sistemas de vigilancia.

b) Las concentraciones de radón en los puestos de trabajo que requerirían acciones de remedio o sistemas de inspección. Esto fija los niveles de concentración de radón en lugares de trabajo por encima de los cuales es necesario poner en práctica medidas correctivas o de supervisión en 600 Bq m^{-3} como promedio anual. Por debajo de este nivel, se aplica el principio ALARA y por encima de este valor, si no es posible reducir la concentración de radón, debemos aplicar medidas de protección radiológicas. Adicionalmente, en el caso de los lugares de trabajo con elevada permanencia de miembros del público, el nivel anterior se reduce a 300 Bq m^{-3} , como puede ser el caso de hospitales, prisiones y escuelas.

c) Además, puede haber lugares de trabajo no incluidos en las situaciones a) y b). Si los resultados de estudios sobre las actividades realizadas en esos lugares de trabajo muestran que los niveles establecidos para la dosis efectiva o las concentraciones de radón exceden valores de referencia, podría haber un aumento significativo de la exposición para los trabajadores o para los miembros del público. Por lo tanto sería de aplicación el Real Decreto sobre la Protección contra la radiación de ionización.

Así, uno de los problemas derivados de la nueva legislación está relacionado con la correcta evaluación de la exposición al radón. Tanto los investigadores como los guías de las cuevas turísticas o los aficionados a la espeleología, se ven potencialmente afectados por la exposición a este gas, recibiendo en algunos casos dosis que superan los límites establecidos. Para cuantificar la peligrosidad en el interior de aquellas cuevas donde la concentración sea más elevada, es imprescindible conocer los niveles existentes.

Se presenta en esta comunicación una experiencia que determina la exposición al radón en las cuevas y su problemática. Las cuevas son un buen ejemplo para mostrar las diferencias que pueden existir entre la concentración de radón en un área determinada, y la exposición real recibida por los trabajadores que pasan períodos de tiempo variables en esas áreas (Sainz *et al.*, 2006). En tales lugares de trabajo, existen variaciones de la concentración de radón diariamente, mensualmente y durante períodos estacionales, que requieren una evaluación detallada de la exposición real del trabajador, para evitar tanto sobreestimar como subestimar la dosis recibida.

MATERIAL Y MÉTODOS

Esta experiencia se ha realizado en la Cueva del Viento, situada en el municipio de Icod de los Vinos, en la zona norte de la isla de Tenerife. Dicha cueva tiene más de 18 kilómetros topografiados y es en la actualidad la quinta cavidad volcánica más grande del mundo. Se formó hace unos 27.000 años por lavas basálticas procedentes de la primera fase eruptiva del volcán Pico Viejo y constituye una enorme red laberíntica de pasajes subterráneos, siendo innumerables las ramificaciones aún sin explorar, con la peculiaridad de que sus galerías están dispuestas en tres niveles superpuestos (INVOLCAN, 2013). Su nombre se debe a las importantes corrientes de aire que se producen en su interior. El 20 de junio del 2008 se consiguió abrir al público un tramo de la Cueva del Viento por parte del Cabildo de Tenerife, a través del Organismo Autónomo de Museos y Centros del Cabildo de Tenerife, y gestionado por la empresa IDECO S.A. en colaboración con el Ayuntamiento de Icod de los Vinos.

Las medidas integradas se han llevado a cabo utilizando detectores de trazas CR-39 como el que se aprecia en la Figura 1. Cada detector se ubica bajo la tapa de un contenedor cerrado de polipropileno negro, de 20 mm de alto y 58 mm de diámetro, que impide la entrada de productos de desintegración del radón y también del torón (Rn^{220}). Por lo tanto, solamente las partículas alfa procedentes del radón que difunde al interior del contenedor y del polonio producido dentro del mismo, podrán impactar en el detector. Tras el periodo de exposición se lleva a cabo un proceso de revelado químico, y la concentración de radón puede determinarse por el contaje de trazas del detector.



Figura 1. Contenedor del detector de radón CR-39 cerrado (izquierda) y abierto (derecha).

Para la realización de esta experiencia se ha contado con la colaboración de los Guías Intérpretes de la Cueva del Viento, así como espeleólogos del Grupo de Espeleología de Tenerife Benisahare.

Las dosis efectivas anuales procedentes de la inhalación de radón fueron estimadas usando la metodología de la (ICRP-65, 1993). El factor de conversión a dosis utilizado para la exposición al radón fue de 5 mSv por WLM en puestos de trabajo y 4 mSv por WLM para el público en general. Las peculiares condiciones atmosféricas caracterizadas por una elevada humedad relativa y una concentración de partículas muy baja, hacen que resulte más apropiado el uso de un factor de equilibrio de 0.6 (Porstendorfer and Reineking, 1999).

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos de concentración de radón evaluada a nivel personal, para un guía-espeleólogo, portador de un detector de radón durante su jornada laboral en el interior de la cavidad. El resto del tiempo, el detector permanece junto a otro detector en una localización fija, dentro del centro de visitantes de la Cueva del Viento. Las Figuras 2 y 3 son dos fotografías donde se observa al guía con el detector de radón colgado del cuello. De este modo, en cada periodo evaluado disponemos de la exposición que recibe el detector que actúa como dosímetro personal y de la que recibe el detector cuando se encuentra en el centro de visitantes.



Figura 2. Alfredo Láinez llevando el detector de radón junto a un panel explicativo de la Cueva del Viento.



Figura 3. Alfredo Láinez en el interior de la Cueva del Viento portando su detector personal.

En la Tabla 1 se puede ver, para cada trimestre evaluado del 2013, la exposición debida al radón acumulada por el detector fijo en el centro de visitantes y por el detector personal. Este último presenta la exposición de radón debida a las horas de trabajo en el interior de la cueva más la acumulada el resto del tiempo en el centro de visitantes.

Periodo 2013	Exposición Radón (kBqm ⁻³ h)	
	Detector Fijo	Detector Personal
1º Trimestre	372	572
2º Trimestre	1135	1709
3º Trimestre	1338	1852

Tabla 1. Exposición de radón para cada pareja de detectores trimestrales.

Para la estimación de la dosis efectiva se ha tenido en cuenta la información recopilada por el guía sobre el tiempo que realmente ha permanecido en el interior de la cavidad, mientras portaba el dosímetro de radón. Este dato se muestra en la Tabla 2 para cada trimestre, así como la dosis correspondiente estimada que ha recibido el guía durante ese periodo de permanencia en la cueva.

Periodo 2013	Tiempo Exposición (horas)	Dosis (mSv)
1º Trimestre	152	0.95
2º Trimestre	105	2.74
3º Trimestre	168	2.45

Tabla 2. Dosis recibida debida al radón y tiempos de exposición considerados.

Como puede apreciarse, el trabajador recibió una dosis de 6.14 mSv durante los tres primeros trimestres del año, que extrapolando podrían alcanzar los 8 mSv anuales. Esto se encuentra muy por encima del límite para el público en general de 1 mSv/año, y en el marco de la IS-33, por encima incluso de 6 mSv anuales, por lo que se debe aplicar un nivel alto de control regulador.

Por otro lado, se ha determinado la dosis recibida por inhalación de radón por el público durante una visita típica a la cueva de una hora de duración. Dependiendo del trimestre del año en que se realice la visita, la tasa de dosis variará entre los valores promedio de 0.005, 0.021 y 0.012 mSv/h. En el caso más desfavorable, el visitante podría permanecer 48 horas al año en el interior de la cavidad volcánica sin superar el valor de referencia para el público en general. Estos valores obtenidos son coherentes con un estudio previo (Alcaide et al., 1997), y evidencia que no plantea ningún problema para el público visitante y sí para los guías.

CONCLUSIONES

Se pone de manifiesto la necesidad de utilizar una dosimetría personal cuando se trata de evaluar la concentración de radón a la que está expuesto un trabajador cuyo recorrido y permanencia dentro de la cavidad es muy variable a lo largo del año y por tanto difícil de caracterizar con detectores fijos instalados en el interior de la misma, como ocurre en otras cuevas turísticas.

Los Guías Intérpretes de la Cueva del Viento pueden llevar un dosímetro, colgado del cuello durante el tiempo que estén realizando su trabajo en el interior de la cavidad, así como cuando hacen las rutas de espeleoturismo y practican espeleología en las cavidades volcánicas.

Para evitar que el trabajador tenga que llevar el control manual de las horas de permanencia en la cueva, dato fundamental a la hora de estimar la dosis recibida, una solución es la que se muestra en la *Figura 4*. El dispositivo consiste en una plataforma electrónica para dos o más detectores de radón. Dicha plataforma se colocaría en este caso en el centro de visitantes. Un detector permanecería fijo en la base, recogiendo el valor de la exposición correspondiente a la ubicación permanente de los detectores (fondo), mientras que el segundo o sucesivos detectores son retirados de la plataforma cuando el trabajador va a acceder a la cavidad subterránea. Automáticamente se activa un contador de tiempo acumulativo hasta que el trabajador vuelve a depositar el detector sobre la base, una vez terminado el trabajo en el interior de la cueva. De este modo se dispondría del periodo de exposición real en el puesto de trabajo de interés a la vez que se garantiza la exposición de radón que acumula el detector personal durante el resto del tiempo.

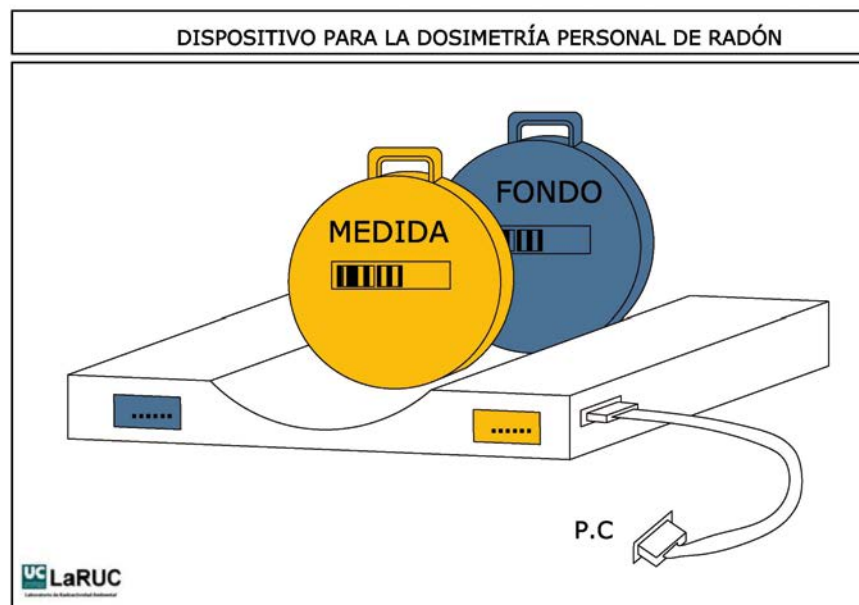


Figura 4. Prototipo para la determinación de la dosis efectiva debida al radón en puestos de trabajo.

Finalmente, señalar que las estimaciones de dosis presentadas en esta comunicación están basadas en modelos epidemiológicos basados en condiciones estándar, similares a las aplicables a una vivienda. Sin embargo, existen modelos dosimétricos que tienen en cuenta otras características de la exposición al gas radón y sus descendientes, específicas de ambientes diferentes (Sainz *et al.*, 2012). La aplicación de estos modelos en atmósferas con muy baja concentración de aerosoles, como es el caso de las cuevas turísticas, da lugar a valores estimados de dosis significativamente superiores a las recibidas en otros lugares de trabajo con similares niveles de radón.

REFERENCIAS

- Alcaide, J. M., Rodríguez, R., Hernández, J. y Pinza, C. 1997. Radón en cavidades volcánicas de Tenerife. *VII Congreso español de espeleología*, Barcelona, 331-342
- B.O.E. nº 178, 2001. Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.
- B.O.E. 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.
- B.O.E. nº 279, 2010. Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio.
- D.O.C.E. nº L 13. Diario Oficial de la Unión Europea. Directiva 2013/59/EURATOM, del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.
- D.O.C.E. nº L 159. Diario Oficial de la Unión Europea. Directiva 96/29/EURATOM, del Consejo, de 13 de mayo de 1996, por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes.
- Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J. M. y Baysson H. 2006. Residential radon and lung cancer-details 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 and Health*, 32, 1-84.
- ICRP-65. 1993. International Commission on Radiological Protection. *Protection against radon-222 at home and at work*. Oxford: Pergamon Press. Annals of ICRP 23 (2).
- INVOLCAN (Instituto Volcanológico de Canarias). 2013. Seguimiento y medida de la actividad del gas Radón en el interior de la Cueva del Sobrado (*Icod de Los Vinos*, Tenerife). Informe Técnico.
- Krewski, D., Lubin, J. H., Zielinski, J.M., Alavanja, M., Catalan, V. S., Field, R. W., Klotz, J. B., Letourneau, E. G., Lynch, C. F., Lyon, J. I., Sandler, D. P., Schoenberg, J. B., Steck, D. J., Stolwijk, J. A., Weinberg, C. y Wilcox, H. B., 2005. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*, 16, 137-145.
- Porstendorfer, J. y Reineking, A. 1999. Radon: characteristics in air and dose conversion factors. *Health Physics*, 76, 300-305.
- Sainz, C., Fuente, I., Quindós-López, L., Ontañón, R., Gutiérrez, R., Gutiérrez, J. L., Arteché, J. L. y Quindós, L. S. 2012. Dosis ocupacional debida al radón en cuevas de la Comunidad de Cantabria. *IV Congreso español sobre cuevas turísticas (Cuevatur-2012)*, Madrid, 349-357.
- Sainz, C., Quindós, L. S., Fuente, I., Nicolás, J. y Quindós, L. 2006. Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: The case of tourist caves. *Journal of Hazardous Materials*, 145(3), 368-371.
- WHO, 2009. World Health Organization Handbook on indoor radon: a public health perspective. Ed. Hajo Zeeb, Ferid Shannoun. Geneva.

El radón, un gas radiactivo de origen natural incluido como riesgo laboral: El caso de las cavidades subterráneas

Carlos Sainz-Fernández⁽¹⁾, Ismael Fuente-Merino⁽¹⁾, Luis Quindós-López⁽¹⁾, Roberto Ontañón⁽²⁾, R. Gutiérrez Rodríguez⁽²⁾, José Luis Gutiérrez-Villanueva⁽¹⁾, José Luis Arteché⁽¹⁾, Luis S. Quindós-Poncela⁽¹⁾

(1) Universidad de Cantabria. Grupo RADON, Cátedra de Física Médica. Facultad de Medicina. C/Cardenal Herrera Oria s/n, 39011 Santander, Cantabria (carlos.sainz@unican.es, fuentei@unican.es, luis.quindos@unican.es)

(2) Cuevas Prehistóricas de Cantabria. Gobierno de Cantabria. Consejería de Educación, Cultura y Deporte. Crta. de las cuevas. 39670 Puente Viesgo. Cantabria (ontanon_r@gobcantabria.es)

RESUMEN

El gas radón en interiores fue clasificado por la IARC (Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer) como elemento cancerígeno, Grupo 1, en 1988. Representa un riesgo para la salud confirmado por varios estudios internacionales, tal y como indica la WHO (Organización Mundial de la Salud) en su última publicación "WHO Handbook on indoor radon" (2009). La nueva Directiva Europea (2013/59/EURATOM) que establece las Normas de Seguridad Básicas (BSS), recoge como principal novedad con relación a la anterior (96/29/EURATOM), la necesidad del control de gas radón en viviendas y puestos de trabajo. En este sentido, y de acuerdo con el nuevo borrador de la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica), el Consejo de Seguridad Nuclear tendrá que actualizar su instrucción IS-33 (BOE 22/2012) para reducir los valores de referencia. El radón se ha utilizado, desde hace mucho tiempo, como trazador en estudios de conservación de manifestaciones artísticas prehistóricas dentro de cuevas. Además, muchas de ellas presentan niveles de ventilación bajos, lo cual provoca que las concentraciones de radón puedan ser en algunos casos muy elevadas. En estos casos, los investigadores, y especialmente los guías de las cuevas turísticas, que pueden pasar periodos prolongados de tiempo en su interior, se ven potencialmente afectados por la exposición a este gas, pudiendo recibir dosis que superan los límites establecidos, incluso para la industria nuclear. Al no ser posible la reducción de la concentración de radón con ventilación forzada, dadas las peculiaridades del entorno de trabajo y el riesgo que supondría para la conservación de las pinturas rupestres, para proteger a los trabajadores la opción más viable es limitar el tiempo de exposición en el interior de aquellas cuevas donde la concentración sea más elevada, pero para ello es absolutamente necesario conocer los niveles existentes. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos por nuestro Grupo en distintas cuevas de la Comunidad de Cantabria, hasta el momento presente, y se muestran alternativas para minimizar los costes derivados de la realización de las medidas necesarias.

Palabras clave: cavidades subterráneas, cuevas turísticas, dosis, protección radiológica, radón.

Radon, a radioactive gas from natural source included as labor risk: the case of underground cavities

ABSTRACT

IARC (International Agency for Research on Cancer) classified radon gas as carcinogenic element, Group 1, in 1988. From that moment, the risk for the health has been confirmed by several international studies. The most relevant conclusions of them have been established by the WHO (World Health Organization) in its last publication "WHO

Handbook on indoor radon" (2009). The new European Basic Safety Standards (BSS) (EU Directive 2013/59/ EURATOM), stands out from EURATOM 96 on the need of implementing National Radon Plans in order to control the radon exposure both in houses and workplaces. In this respect, according to the draft under preparation by ICRP (International Commission of Radiological Protection), the Spanish Nuclear Safety Council will have to update its instruction IS-33 (BOE 22/2012) aiming to reduce the reference values. During long time, the studies of conservation of prehistoric paintings in caves were using radon as a tracer. Besides, many of them present low levels of ventilation which causes radon concentrations can be very high in some cases. In these cases, investigators and especially the guides of the touristic caves, who can spend long periods of time inside, are potentially affected by exposure to this gas, and can receive doses exceeding the limits, even for the nuclear industry. Usually the reduction of the concentration of radon with forced ventilation is not possible, given the peculiarities of the environment of work and the risk that would suppose for the conservation of the cave paintings. For this reason, in order to protect the workers, the most viable option is to limit the exposure time inside those caves where the concentration is higher. Hence, it is necessary to know the existing levels. In this communication, we present the results obtained so far by our Group in different caves located in Cantabria (Spain). We also show an alternative leading to minimize those costs due to the accomplishment of the necessary measurements.

Keywords: dose, radiological protection, radon, touristic caves, underground cavities.

ORIGEN Y EFECTOS DEL RADÓN SOBRE LA SALUD

El gas radón, referido al isótopo Rn²²², es un elemento radiactivo que se genera prácticamente en todos los suelos, ya que procede de la desintegración del elemento radiactivo natural Ra²²⁶, presente en concentraciones variables en toda la corteza terrestre. Su carácter de gas noble le confiere una movilidad elevada, lo cual permite su entrada y acumulación en recintos cerrados. En el caso de edificios, viviendas y cavidades subterráneas, el gas puede entrar con relativa facilidad y acumularse en su interior hasta alcanzar concentraciones elevadas, en función de la porosidad, fisuras, grietas y juntas de unión, según corresponda, entre el recinto cerrado y el terreno.

La inhalación continuada de aire con radón en viviendas y puestos de trabajo supone un riesgo para la salud científicamente contrastado, que depende principalmente de los niveles a los que se está expuesto y de la duración del periodo de exposición. Esta inhalación de gas radón y sus descendientes da lugar a una irradiación de los pulmones de aproximadamente la mitad de la dosis efectiva media anual recibida por los seres humanos debido a fuentes naturales de radiación (UNSCEAR, 2000). En 1988, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), incluyó al radón en la categoría principal de agentes cancerígenos. La clasificación de la IARC se basa en la evaluación de las evidencias científicas disponibles que asocian la exposición a determinados agentes físicos y químicos con el cáncer en seres humanos. El Grupo 1 al que pertenece el gas radón se denomina "Cancerígenos para los seres humanos" e incluye aquellos agentes para los que existe suficiente evidencia de carcinogenicidad en personas.

Más recientemente, la Organización Mundial de la Salud (WHO), con la colaboración de más de 100 científicos y expertos en radón, desarrolló un proyecto internacional que culminó en una publicación que recoge los principales aspectos de la problemática del radón a nivel mundial (WHO, 2009). En el apartado referido a los efectos sobre la salud, se establece que la exposición a radón es la segunda causa de contracción de cáncer de pulmón, por detrás del hábito de fumar en los países más desarrollados. Se indica igualmente que, un porcentaje entre el 3% y el 14% de todos los cánceres de pulmón está asociado a la exposición al radón.

MARCO LEGISLATIVO SOBRE EL RADÓN

Todas las evidencias mencionadas han conducido desde hace años a los principales organismos y comités internacionales relacionados con la presencia y exposición humana a radiaciones nucleares (ICRP, IAEA, UNSCEAR) a emitir informes y recomendaciones específicas referidas a la detección, medida, prevención y mitigación de radón en viviendas y lugares de trabajo. En Europa, todas estas recomendaciones cristalizaron en la Directiva

96/29/EURATOM de 1996 que, en su Título VII incluyó por primera vez la necesidad de control de la exposición de trabajadores a fuentes naturales de radiación, entre las cuales el radón es el de mayor contribución a la dosis total.

La transposición de esta directiva a la legislación española se ha traducido en la publicación del Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modificaba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio.

Para conseguir que esta normativa de seguridad equipare sus criterios a las de los países más avanzados en la materia, se publicó en el B.O.E., con fecha 26 de enero de 2012, la 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. En esta instrucción se precisan las concentraciones de radón de referencia para el establecimiento de medidas correctoras. Adicionalmente, el Consejo de Seguridad Nuclear publicó en 2012 la Guía de Seguridad 11.4 "Metodología para la evaluación de la exposición al radón en lugares de trabajo", que complementa los criterios presentados en la IS-33 con una descripción detallada de los estudios que deben llevarse a cabo para evaluar la exposición al radón en el ámbito laboral.

La nueva Directiva 2013/59/EURATOM publicada el 17 de enero de 2014, establece las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. El gobierno de España debe transponer esta Directiva a la legislación nacional antes del 6 de febrero de 2018, fecha a partir de la cual quedarán derogadas entre otras, la Directiva EURATOM de 1996.

En la mencionada directiva se tiene en consideración los descubrimientos epidemiológicos recientes de los estudios residenciales, que demuestran que existe un mayor riesgo estadísticamente significativo de padecer cáncer de pulmón derivado de la exposición prolongada al radón en recintos cerrados a niveles del orden de 100 Bq m⁻³. Esto marca un importante cambio, porque muestra la necesidad de controlar el gas radón también en las viviendas, no solo en puestos de trabajo. La otra novedad respecto al radón en los lugares de trabajo es que los Estados miembros deberán establecer niveles nacionales de referencia para el promedio anual de la concentración de radón en el aire no superior a 300 Bq m⁻³, frente a los 600 Bq m⁻³ que indica actualmente la IS-33.

También se determina que los Estados miembros establecerán un plan de acción a nivel nacional para hacer frente a los riesgos a largo plazo debidos a las exposiciones al radón en viviendas, edificios de acceso público y lugares de trabajo, para cualquier vía de entrada del radón, ya sea el suelo, los materiales de construcción o el agua. En su anexo XVIII se detalla una lista de aspectos a considerar para la elaboración de dicho plan de acción.

EL RADÓN EN LAS CUEVAS

El radón ha sido utilizado en el pasado (Fernández *et al.*, 1983) como trazador en estudios de conservación de manifestaciones artísticas prehistóricas dentro de cuevas (Villar *et al.*, 1985). Este tipo de medidas proporcionaron el grado de ventilación y renovación de aire dentro de las cuevas y parcialmente, su dinámica. Por otro lado, desde el año 2001 en que la legislación española incorporó las normas básicas de protección radiológica EURATOM, los Estados miembros de la Unión Europea tienen que identificar aquellos lugares de trabajo en los cuales la exposición a la radiación de origen natural puede ser significativa. En el Título VII (BOE 178/2001) la radiación procedente de fuentes naturales toma el mismo papel que anteriormente tenían aquellas de origen artificial. Dado que la ventilación en cuevas turísticas puede ser, en ocasiones, muy baja, las concentraciones de radón en su interior pueden ser muy elevadas.

Debido a las particulares condiciones ambientales que se encuentran en el interior de las cuevas turísticas, su atmósfera puede verse afectada por concentraciones de radón elevadas (Quindós *et al.*, 2004), (IAEA, 2003), (Sainz *et al.*, 2006). En estos lugares en los cuales los trabajadores guían las visitas del público, la aplicación de acciones encaminadas a reducir la concentración de radón habitualmente empleadas en viviendas, tales como

ventilación forzada, sellado o reducción de la presión, no es posible por razones de conservación. Por eso en la mayoría de los casos, la única manera de reducir la exposición al radón de los guías y otros trabajadores consiste en aplicar un sistema de protección radiológica basado en restricciones o reorganizaciones de los horarios de trabajo dentro de la cueva.

Por otro lado, la actuación con respecto a la exposición de los trabajadores a este elemento radiactivo en los centros de trabajo, es una actuación más que se ha de encuadrar dentro del ámbito de la Prevención de Riesgos Laborales (PRL), cuyo objetivo fundamental, como prescribe la legislación vigente, es preservar el bienestar y la salud de sus trabajadores.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se han realizado medidas de la concentración de radón en varias cuevas de Cantabria. Los detectores de radón fueron expuestos dentro de cada cueva en periodos mensuales, trimestrales o semestrales, entre los años 2012 y 2013, de acuerdo con criterios derivados de medidas previas. Estos criterios se basaron en el límite genérico de 600 Bq m^{-3} de promedio anual establecido por la IS-33 y la ubicación de los detectores a lo largo de la cueva se basó en las particularidades de cada una, teniendo en cuenta el tiempo empleado por los trabajadores en las explicaciones al público a lo largo de las cavidades.

Las medidas integradas se llevaron a cabo usando detectores de trazas CR-39. Cada detector es colocado bajo la tapa de un contenedor cerrado cilíndrico de polipropileno de 55 mm de alto y 35 mm de diámetro, lo cual evita la entrada de productos de desintegración del radón y también del torón (Rn^{220}). Por lo tanto, solamente las partículas alfa procedentes del radón que ha difundido al interior del contenedor y del polonio producido dentro del mismo, podrán impactar en el detector. Tras el periodo de exposición se lleva a cabo un proceso de revelado químico, y la concentración de radón puede determinarse por el contaje de trazas por superficie (mm^2) del detector.

Tanto la exactitud como la precisión de este método han sido comprobadas en diferentes campañas de intercomparación nacional e internacional y son periódicamente verificadas dentro del sistema de garantía de calidad del laboratorio.

RESULTADOS

Se presentan, a modo de ejemplo, resultados de medidas de radón llevadas a cabo entre el año 2012 y 2013, en algunas cuevas de Cantabria abiertas al público.

Es conocido que la concentración de radón muestra variaciones mensuales en cuevas (Fernández *et al.*, 1986), (Fontana *et al.*, 2006). Estas variaciones dan lugar a cambios estacionales que en cada cueva ocurren en periodos distintos dependiendo de sus características geológicas, grado de conexión con la atmósfera exterior, etc. Un ejemplo de dichas variaciones puede apreciarse en la Figura 1 donde se muestran los cambios de los niveles de radón en diferentes sectores de la cueva Hornos de la Peña. En esta cueva hay dos periodos bien diferenciados, de aproximadamente 6 meses cada uno. Un periodo de con concentraciones muy elevadas, con un máximo que ronda los 6000 Bq m^{-3} y el resto de meses del año con concentraciones casi siempre inferiores a 600 Bq m^{-3} .

En la Figura 2 se presentan los resultados de la concentración de radón promedio evaluada trimestralmente en la cueva de El Pendo. De manera similar, en la Figura 3 se observa la concentración evaluada semestralmente en la cueva de Covalanas. En El Pendo todos los sectores de la cueva tienen un comportamiento similar en cada trimestre analizado. Solo un trimestre al año se superan los 1000 Bq m^{-3} , mientras que el resto del año apenas llega a 600 Bq m^{-3} en el peor caso. En Covalanas, todos los sectores rondan los 600 Bq/m^{-3} de media anual. El sector 2 no presenta variación anual mientras que los otros dos sectores evaluados son claramente diferenciables entre el primer y segundo semestre del año.

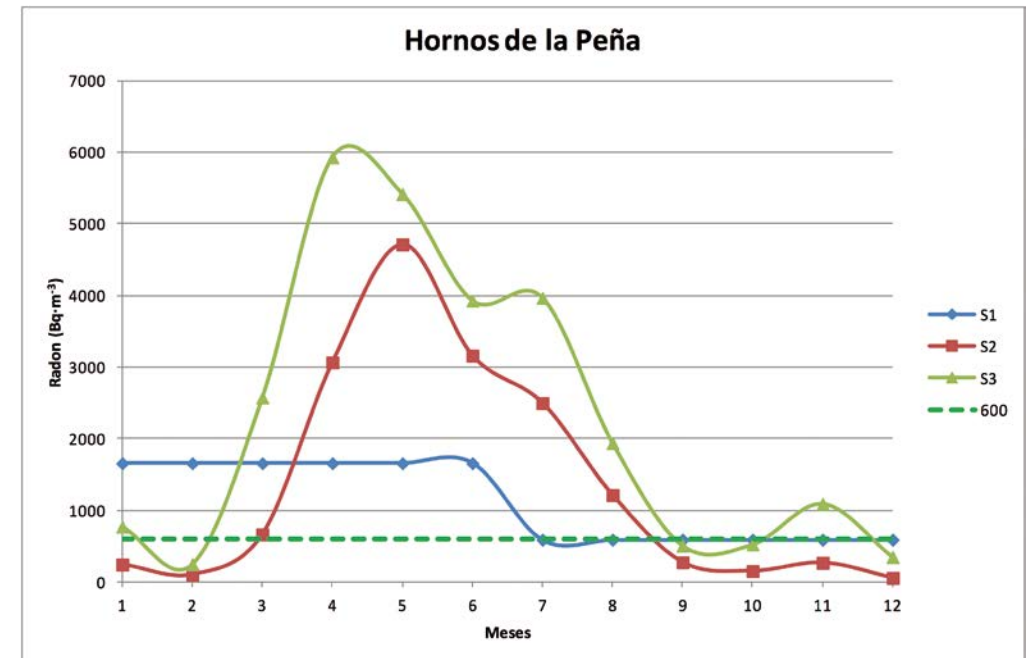


Figura 1. Variación mensual de la concentración de radón en varias localizaciones de la cueva de Hornos de la Peña (San Felices de Buelna, Cantabria).

La Tabla 1 muestra el número de localizaciones evaluadas en cada cueva así como los valores promedio y el rango de las concentraciones de radón encontradas. El periodo seleccionado para cada sector de las cuevas es de uno, tres o seis meses, en función del promedio de concentración de radón determinada en un estudio anterior.

Estas diferencias en la concentración de radón encontradas en las cuevas, pueden estar relacionadas con una gran variedad de factores, como pueden ser, el grado de aislamiento o intercambio de las zonas de muestreo, la conexión entre las diferentes estancias de las cuevas, así como las diferentes tasas de producción de radón.

Conocida la evolución mensual de la concentración de radón en cada cueva a lo largo de un año, y tomando de referencia la IS-33, se decide exponer los detectores de radón mensualmente en aquellos sectores con una concentración promedio superior a 600 Bq m^{-3} , y semestralmente en los que dicha concentración promedio de radón sea inferior. En el caso particular de la cueva de El Pendo, cuyo valor de concentración promedio en todos los sectores ronda el nivel de referencia, pero con máximos superiores a 1000 Bq m^{-3} en un periodo muy concreto, se opta por una exposición intermedia, con detectores trimestrales.

Otra sistemática de medida apropiada en las cuevas cuya concentración de radón es desconocida, basándonos en experiencias previas, es colocar 1 detector mensual en cada sector, y evaluar su concentración de radón. En función de este primer resultado, decidir si el segundo detector ya colocado al sustituir el primero, debe ser retirado al mes, o dejarlo expuesto durante tres o seis meses. Este periodo puede ir variando a lo largo del año con el consiguiente ahorro en número de detectores necesarios y sin pérdida relevante de información para estimar la dosis adecuadamente, llevando un control del personal y número de horas trabajadas en cada cueva o sector durante cada periodo.

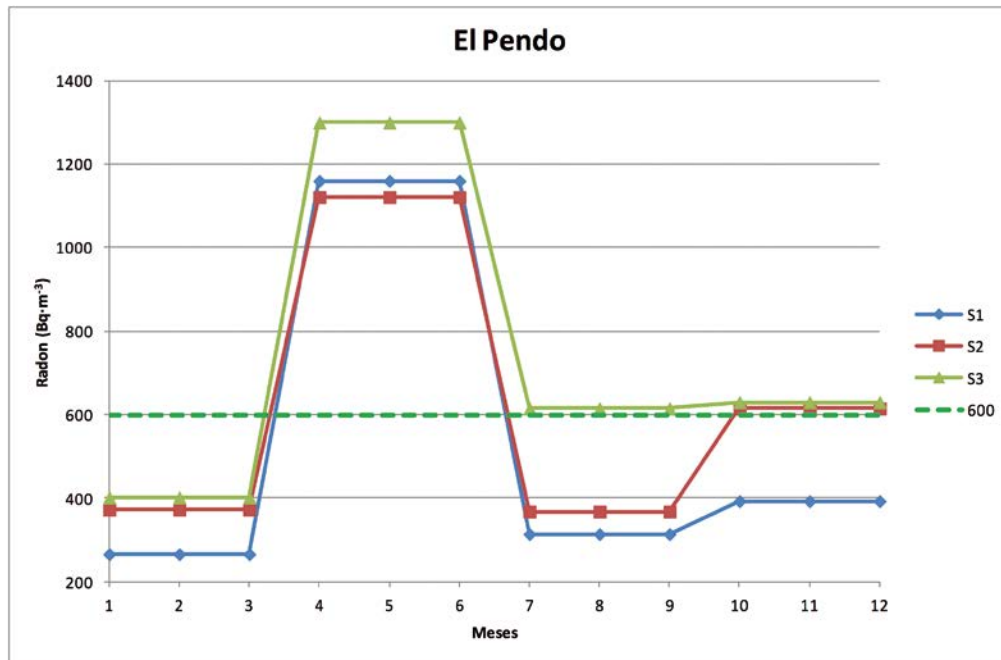


Figura 2. Variación trimestral de la concentración de radón en 3 localizaciones de la cueva de El Pendo (Camargo, Cantabria).

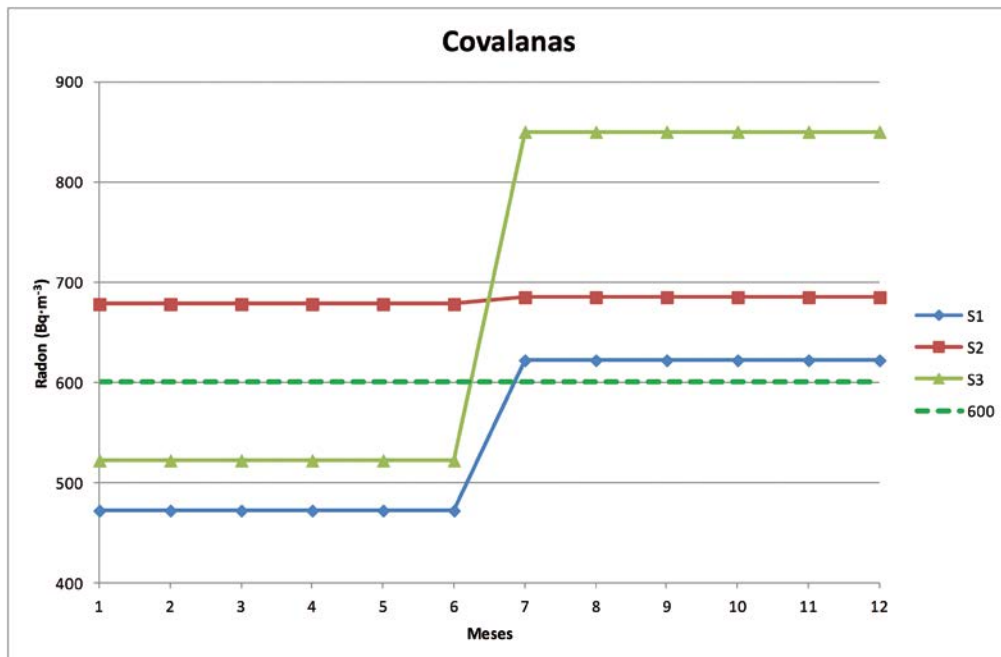


Figura 3. Variación semestral de la concentración de radón en 3 localizaciones de la cueva de Covalanas (Ramales de la Victoria, Cantabria).

Cueva	Sector	Concentración de RADON (Bq m ⁻³)	
		Promedio anual	Rango (Mínimo - Máximo)
El Castillo	1	647	536 - 758
	2	924	621 - 1205
	3	971	658 - 1341
	4	962	407 - 1426
	5	969	552 - 1330
	6	1087	693 - 1374
	7	1068	900 - 1236
Las Monedas	1	868	191 - 1563
	2	991	523 - 1607
	3	806	391 - 1399
	4	968	593 - 1593
	5	819	481 - 1451
Hornos de la Peña	1	1121	587 - 1655
	2	1365	52 - 4713
	3	2269	247 - 5930
El Pendo	1	533	266 - 1160
	2	619	368 - 1121
	3	737	402 - 1300
Covalanas	1	547	472 - 622
	2	682	678 - 685
	3	686	522 - 850
Cullalvera	1	590	364 - 816
	2	225	224 - 226
	3	270	180 - 359

Tabla 1. Concentraciones medias de radón en cada localización de las cuevas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han mostrado algunos resultados de las medidas de radón en cuevas que el Grupo Radón de la Universidad de Cantabria viene realizando desde hace varios años. Estas medidas indican aspectos relevantes a tener en cuenta desde el punto de vista de protección radiológica de los trabajadores que desarrollan su actividad en el interior de las cuevas. Por un lado, se observan marcadas tendencias estacionales en la concentración de radón en el interior de las mismas, pudiendo observarse variaciones de hasta un orden de magnitud entre los valores mínimo y máximo anuales. Este hecho condiciona las estrategias de protección de los trabajadores ya que, dependiendo del periodo del año en el que su actividad sea más intensa, las dosis recibidas pueden ser significativas. Por eso, es necesario un seguimiento continuado en las medidas de radón que permitan conocer su dinámica en las diferentes cuevas y así, plantear las medidas de protección de trabajadores más eficaces en cada caso.

REFERENCIAS

- B.O.E. nº 178, 2001. Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.
- B.O.E. 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.
- B.O.E. nº 279, 2010. Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio.
- CSN, 2012. Guía de Seguridad 11.4 "Metodología para la evaluación de la exposición al radón en lugares de trabajo". Consejo de Seguridad Nuclear.
- D.O.C.E. nº L 13. Diario Oficial de la Unión Europea. Directiva 2013/59/EURATOM, del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.
- D.O.C.E. nº L 159. Diario Oficial de la Unión Europea. Directiva 96/29/EURATOM, del Consejo, de 13 de mayo de 1996, por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes.
- Fernández, P. L., Gutiérrez I., Quindós, L. y Soto, J. 1986. Natural ventilation of the paintings room in the Altamira cave. *Nature*, 321, 586-588.
- Fernández, P. L., Quindós, L. S., Villar, E. y Soto, J. 1983. Radiation exposure levels in Altamira Cave. *Health Physics*, 46, 445-447.
- Fontana, C., Trevisi, R., Tonnarini, S., Vecchiarello, S. y Angeloni, U. 2006. Evaluation of radon occupational exposure in underground workplaces: tunnels used for mushroom cultivation in Italy. *Abstracts Second European IRPA Congress on Radiation Protection*, Paris, 152.
- IAEA. 2003. Radiation Protection against radon in workplaces other than mines. *Safety Reports Series*, 33. Vienna.
- Quindós, L. S., Fernández, P., Sainz, C. y Gómez, J. 2004. Radon exposure in uranium mining industry vs. exposure in tourist caves. *Radiation Protection Dosimetry*, 111, 1-4.
- Sainz, C., Quindós, L. S., Fuente, I., Nicolás, J. y Quindós, L. 2006. Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: The case of tourist caves. *Journal of Hazardous Materials*, 145(3), 368-371.
- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - Report to the General Assembly with Annexes. New York, Vol. I: Sources, United Nations Publication, Sales No. E.00.IX.4.
- Villar, E., Fernández, P.L., Quindós, L. S. y Soto, J. 1985. Natural temporal evolution of the CO₂ content in the air of the paintings chamber at Altamira cave. *National Speleological Society*, 47, 12-16.
- WHO, 2009. World Health Organization Handbook on indoor radon: a public health perspective. Ed. Hajo Zeeb, Ferid Shannoun. Geneva.

Contenido de radón en aire en la Gruta de las Maravillas (Aracena). Primeros resultados

Luis Quindós⁽¹⁾, Luis Santiago Quindós⁽¹⁾, Ismael Fuente⁽¹⁾, Wenceslao Martín-Rosales⁽²⁾, Manuel López-Chicano⁽²⁾ y José Benavente-Herrera⁽²⁾

(1) Grupo Radon, Universidad de Cantabria, Cardenal Herrera Oria, 39011, Santander (luis.quindos@unican.es, ismael.fuente@unican.es)

(2) Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18071 Granada (wmartin@ugr.es, mlopezc@ugr.es, jbnaven@ugr.es)

RESUMEN

En las cavidades se suelen encontrar elevadas concentraciones de gas Radón, debido fundamentalmente a la baja tasa de ventilación que suele darse en este tipo de ambientes. Durante el periodo 2011-2013 se ha llevado a cabo un seguimiento del contenido de Radón en aire en diversos sectores de la Gruta de las Maravillas, con el objeto de cumplir con la reciente normativa relacionada con radiaciones ionizantes, que exige la caracterización de este tipo de gas en las cuevas turísticas, entre otros tipos de actividades. Los valores corresponden a concentraciones en aire (Bq/m³), y no se ha tenido en cuenta la fracción libre de Rn relacionada con las partículas o aerosoles. En concreto se ha llevado a cabo el seguimiento mensual en 10 sectores considerados como zonas homogéneas mediante la utilización de detectores pasivos suministrados y analizados en el laboratorio acreditado del Grupo de Investigación de Radón de la Universidad de Cantabria. En función de los resultados obtenidos y a partir del análisis estadístico de los datos, se considera como valor medio de concentración (y por tanto como valor de referencia) de gas Radón en la Gruta de las Maravillas, 1349 Bq/m³, con una variabilidad temporal muy elevada. La evolución mensual observada es muy similar a la tendencia estacional del contenido en anhídrido carbónico del aire de la cavidad, de forma que los máximos ocurren durante el periodo estival, mientras que los mínimos tienen lugar durante los meses de diciembre y enero. Teniendo en cuenta el tiempo de permanencia en el interior de la cavidad de los trabajadores adscritos a la Gruta (guías), y aplicando los criterios epidemiológicos del ICRP65, la dosis anual máxima recibida por los mismos es 4,112 mSv, en ningún caso superior a los 6 mSv recogidos en la Instrucción IS-33.

Palabras Clave: Aracena, Gruta de las Maravillas, gas radón, dosis efectiva, anhídrido carbónico.

Radon gas content in the Gruta de las Maravillas (Aracena). First results

ABSTRACT

The cavities typically have high concentrations of radon gas, mainly due to the low ventilation rate that usually occurs in such environments. During the period 2011-2013 has been carried out the monitoring of the content of radon in air in various sectors of the Gruta de las Maravillas, in order to comply with recent regulations related to ionizing radiation, which requires the characterization of this type gas in tourist caves, among other activities. The values correspond to concentrations in air (Bq/m³), and was not taken into account the free fraction of Rn related with aerosols. Specifically we monitored the concentration of radon in 10 sectors considered as homogeneous zones using passive detectors supplied and analyzed in the laboratory of the Radon Research Group (University of Cantabria). The average value of radon gas concentration calculated in the Cave of Marvels is 1349 Bq/m³, with a very high temporal variability. The monthly pattern observed is very similar to the seasonal trend of the carbon dioxide content of the air in the cavity, so that the maximum occurs during the summer, while minimum

occurring during the months of December and January. Considering the time spent within the cavity of the guides, and applying epidemiologic criteria (ICRP-65), the maximum annual dose received by them is 4,112 mSv (below the level established by Instruction I-33).

Keywords: Aracena, Cave of Marvels, Radon gas, effective dose, carbonic anhydride.

INTRODUCCIÓN

El radón es un gas, incoloro, inodoro e insípido, que forma parte en una pequeña proporción de la composición del aire atmosférico. Aislado por primera vez en 1908, es un elemento gaseoso procedente de la desintegración del radio que, a su vez, es un producto de desintegración de la cadena del uranio presente en la corteza terrestre. Se identifica concretamente como radón al isótopo ^{222}Rn que forma parte de la cadena radiactiva de origen natural del ^{238}U uranio, aunque también se encuentran isótopos de Rn en la del ^{232}Th torio y del ^{235}U uranio (^{220}Rn o torón y el ^{219}Rn o actinón, respectivamente). La toxicidad del radón se debe a su radiactividad. Al ser un emisor de radiación alfa, el riesgo potencial surge cuando penetra en el organismo, ya sea por inhalación y pudiendo instalarse en las paredes del tracto respiratorio, o por ingestión, adhiriéndose a las paredes del tracto digestivo. El radón es 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 en un área concreta está condicionada íntimamente con la cantidad de dicho elemento presente en la corteza, que a su vez depende del tipo de roca que aflora en dicha región. Así, en suelos (no son más que materiales procedentes de la meteorización de rocas) y rocas basálticas es frecuente encontrar concentraciones del orden de 1 ppm en ^{238}U uranio; en areniscas y rocas carbonatadas son normales valores del orden de 0.5 ppm; las arcillosas y graníticas poseen valores próximos a 3.5 ppm, mostrando estas últimas un mayor potencial emisor de radón. Los lugares poco ventilados suelen presentar elevadas concentraciones de Rn en aire, especialmente en minas y cuevas. En general, el contenido en radón en el aire de las cavidades suele ser muy elevado en relación con el aire exterior

La dinámica del Rn y las transferencias 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 (se incluye aquí el grado de fracturación y karstificación) y el contenido en Ra de los sedimentos y la roca (Kies *et al.*, 1997, ISRN, 2009). En las cavidades de origen kárstico, los sedimentos arcillosos que recubren el suelo (frecuentemente residuos insolubles contenidos originariamente en la roca caliza), constituyen en general una fuente potencial de radón, ya que la roca caliza no suele presentar en general valores importantes de Rn. El agua puede no obstante ser un vector importante de transferencia del Rn, bien a partir de la percolación del agua de lluvia a través del suelo y las discontinuidades del macizo, lo que permite el transporte del Rn hacia zonas profundas, o bien a partir de procesos de desgasificación.

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 (Dueñas *et al.*, 1998; Galán-López *et al.*, 2004; Quindós *et al.*, 2004; Field, 2007; Sainz *et al.*, 2007), 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 y Quindós *et al.*, 2013).

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos a partir del seguimiento del contenido de Radón en aire en diversos sectores de la Gruta de las Maravillas, durante el periodo 2011-2013, con el objeto de cumplir con la reciente normativa relacionada con radiaciones ionizantes, que exige la caracterización de este tipo de gas en las cuevas turísticas, entre otros tipos de actividades.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las medidas se realizaron en la Gruta de las Maravillas, una de las cuevas turísticas más visitadas de España. Se trata de una cavidad desarrollada en mármoles de edad precámbrica con un recorrido predominantemente horizontal (2.150 m. de galerías conocidas), aunque existen al menos tres niveles de galerías superpuestos (Martín-Rosales *et al.*, 1995).

La temperatura del aire de la Gruta oscila entre 15 °C y 19 °C, dependiendo del sector considerado. Los mayores valores se registran en las zonas más alejadas de la entrada, coincidiendo además con los valores más elevados de concentración en aire de anhídrido carbónico. Los impactos ambientales producidos por la acción antrópica han sido descritos y analizados en diversos trabajos (Pulido-Bosch *et al.*, 1997). En general se trata de afecciones en el agua (descenso del nivel de los lagos por extracciones en sondeos próximos), el aire (incremento de la temperatura del aire y de la concentración de CO₂ y descenso de la humedad relativa del aire) y la roca. A partir de los estudios realizados se propusieron diversas medidas correctoras que han surtido efectos positivos en el microclima de la cavidad (Martín-Rosales *et al.*, 2007)

La medida de la concentración de Rn en aire se llevó a cabo mediante la utilización de detectores pasivos, dispositivos que permiten obtener información sobre concentraciones promedio durante un tiempo que puede llegar a días, semanas o meses. Son los métodos menos caros y los más utilizados ya que son los más adecuados para estudios de inspección y reconocimiento y los que permiten, en muchos casos, decidir sobre la conveniencia de tomar acciones correctoras tras efectuar medidas de, por lo menos, tres meses de duración. Los periodos de registro de los detectores instalados han variado desde 1 mes hasta más de tres meses en algunos casos. En la Figura 1 se recogen algunas fotografías de diversos detectores instalados en la Gruta.

Se estableció un protocolo de medida y toma de datos, que fue suministrado al personal adscrito a la Gruta de las Maravillas. El protocolo, muy simple establecía las siguientes indicaciones:

- a. Definición y ubicación de los puntos de muestreo
- b. Fecha de inicio de medidas
- c. Instalación de detectores
- d. Recogida de datos
- e. Envío de detectores

Para llevar un control adecuado de la toma de datos, el responsable de la retirada de los detectores rellenaba una ficha en donde se indicaba toda la información requerida. En concreto se indica el código de detector, día de instalación, día de retirada, identificación del punto de muestreo e incluso la fecha de envío al laboratorio acreditado de la Universidad de Cantabria. Finalmente, desde el laboratorio donde se realizaron las determinaciones de Radón en los detectores, se suministraron los resultados en formato digital, mediante ficheros excell. Junto a las determinaciones se adjuntaba, en cada medida, el valor de la incertidumbre experimental, así como el límite de detección de cada detector.



Figura 1. Fotografías de algunos de los detectores pasivos de Radón instalados en la Gruta de las Maravillas, facilitados por la Universidad de Cantabria.

La red de detectores se estableció en 10 sectores de la Gruta en las que las características térmicas eran más o menos homogéneas, y que aparecen recogidas en la Figura 2.

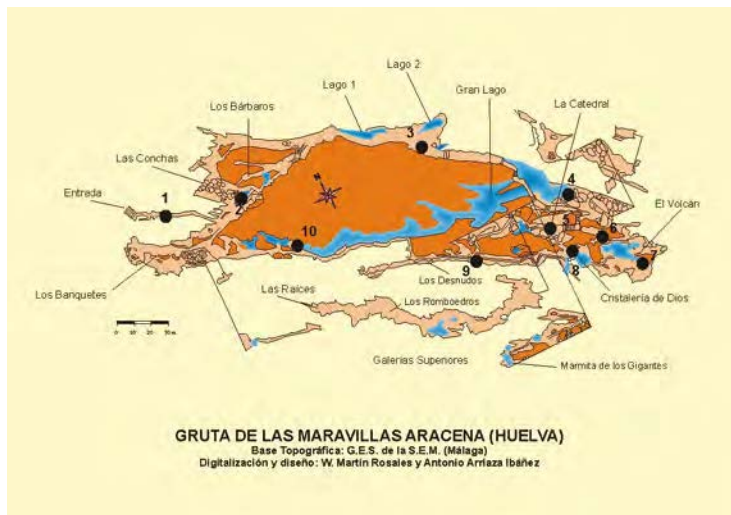


Figura 2. Localización de los detectores de Radón instalados en la Gruta de las Maravillas.

Finalmente, la estimación de la dosis efectiva proveniente de la inhalación de radón se utilizó la metodología recomendada por el ICRP65. El procedimiento de cálculo utilizado para la estimación de la dosis efectiva en la Gruta de las Maravillas se resume en la expresión:

$$E = f(C_{Rn}, O, F, DCF)$$

donde E es la dosis efectiva, C_{Rn} es la concentración de Radón, O es función del tiempo de exposición del trabajador/a frente al Rn, F es el factor de equilibrio y DCF es el factor de conversión a dosis antes definido. Analíticamente la expresión es

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

donde

- C_{Rn} es la concentración de Rn en Bq/m³
- F es el Factor de equilibrio, con un valor adoptado de 0,5
- T tiempo de permanencia del trabajador en esas condiciones
- DCF es el Factor de Conversión de Dosis, con un valor adoptado de 5 mSv/WLM

En la Figura 3 se representa gráficamente la secuencia de trabajo, que comienza con la lógica determinación de la concentración de Rn en aire, tras la cual se ha procedido a la estimación de las horas de trabajo de los guías adscritos a la Gruta, para finalmente calcular la correspondiente dosis efectiva recibida a escala anual.

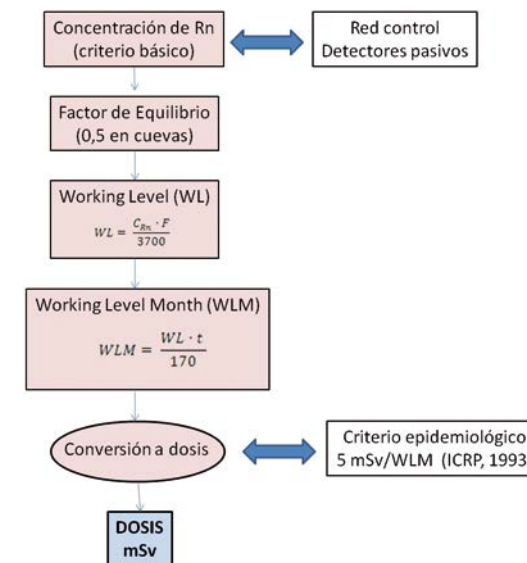


Figura 3. Resumen esquemático del procedimiento de estimación de dosis recibidas por los trabajadores de la Gruta de las Maravillas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de Rn

Hay que indicar que la fracción libre relacionada con el número de partículas en aire no se ha considerado. Se realizó un análisis mensual, para tratar después de analizar los valores promedio a nivel anual. Hay que indicar que existen lagunas de datos, especialmente en el año 2012. En el año 2011 faltan datos correspondientes a dos meses (abril y junio), si bien y como se podrá comprobar, la tendencia, muy regular a nivel mensual, permite realizar un completado de la serie mensual con un elevado margen de seguridad (desde una perspectiva estadística). Durante 2012 se disponen de medidas muy escasas y dispersas. Además, se trata de medidas efectua-

das durante periodos superiores al mes. En concreto, se instalaron detectores pasivos que permanecieron de forma ininterrumpida durante los periodos agosto-octubre y noviembre-diciembre de ese año. Los resultados son sensiblemente inferiores a los registrados durante el año 2011.

Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad espacial y temporal de la concentración de gas radón en el aire de la cavidad.

Utilizando toda la serie de datos disponibles (periodo 2011 a 2013), se han podido calcular valores promedio para cada uno de los meses. A efectos comparativos, se han estimado los parámetros estadísticos de dos series mensuales de concentración de radón en aire alternativas. Se trata, por un lado, del análisis estadístico de toda la serie de datos disponible, así como de la serie correspondiente al año 2011. En ésta última, dada la marcada tendencia de la serie, ha sido relativamente fácil proceder al completado de los datos ausentes, a través del promedio de los datos anterior y posterior. En la tabla 1 adjunta se muestran los datos correspondientes a la serie de 2011, incluyendo en color rojo los datos completados.

ZONA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Galería de Entrada	105,3	146,6	286,4	1279,7	2272,9	2478,6
Las Conchas	211,6	423,2	705,9	1390,7	2075,4	2427,8
Estalactita/ La Codorniz	322,0	323,6	555,9	1392,0	2228,0	2403,6
Gran Lago	428,8	321,2	579,5	1406,2	2232,9	2616,6
La Catedral	391,4	319,3	445,8	1352,3	2258,8	2471,8
La Sultana	260,2	328,5	610,5	1326,2	2041,9	2477,1
La Esmeralda	289,9	311,9	616,4	1706,6	2796,7	2905,7
Cristalería de Dios	196,1	359,3	596,8	1369,1	2141,4	2530,0
Los Desnudos	338,0	353,1	611,5	1177,1	1742,6	2392,9
Galería de los Lagos	139,1	477,3	595,3	1593,7	2592,2	2628,4

ZONA	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Galería de Entrada	2684,2	2638,7	1992,5	820,8	822,5	1242,0
Las Conchas	2780,2	3440,4	2867,0	1077,9	343,6	623,0
Estalactita/ La Codorniz	2579,2	2964,4	2667,5	829,5	298,7	513,0
Gran Lago	3000,3	2543,4	2900,0	879,3	228,3	438,0
La Catedral	2684,7	2979,1	2685,8	882,5	250,5	430,0
La Sultana	2912,4	1919,7	3011,5	849,0	180,7	133,0
La Esmeralda	3014,6	3035,6	3142,4	942,1	258,6	153,0
Cristalería de Dios	2918,6	2628,7	2596,3	905,3	215,3	76,0
Los Desnudos	3043,3	2772,7	2941,4	628,7	310,6	186,0
Galería de los Lagos	2664,6	2958,1	3162,3	758,6	184,5	220,0

Tabla 1. Serie completada correspondiente al año 2011 (en rojo, valores completados).

En la Tabla 2 se muestran, junto a los valores promedio calculados, los correspondientes intervalos de confianza al 95 %. Los coeficientes de variación calculados son elevados en la serie completa (2011 a 2013), oscilando entre el 20 % y el 70 %, mientras que en el caso de la serie de 2011 estos valores se reducen sensiblemente.

MES	PERIODO 2011/2013			PERIODO 2011		
	Media	Límite Inferior	Límite superior	Media	Límite Inferior	Límite superior
ENERO	251,7	204,8	298,6	268,2	192,5	344,0
FEBRERO	278,5	229,2	327,8	336,4	275,3	397,5
MARZO	390,5	295,9	485,1	560,4	477,6	643,2
ABRIL	220,6	153,8	287,4	1399,3	1291,5	1507,2
MAYO	3205,8	2628,1	3783,5	2238,3	2030,5	2446,0
JUNIO	1445,1	1262,3	1627,9	2533,2	2423,4	2643,1
JULIO	3429,8	3106,9	3752,8	2828,2	2707,0	2949,4
AGOSTO	2724,7	2357,9	3091,5	2788,1	2501,4	3074,7
SEPTIEMBRE	2460,5	2199,1	2721,8	2796,7	2552,1	3041,2
OCTUBRE	1198,5	1048,8	1348,1	857,4	773,6	941,1
NOVIEMBRE	276,6	222,4	330,9	309,3	174,8	443,8
DICIEMBRE	308,4	221,6	395,1	401,4	152,5	650,3
PROMEDIO	1349,2	615,1	2083,4	1443,1	739,7	2146,4

Tabla 2. Tabla resumen de los valores promedio, con sus respectivos intervalos de confianza al 95 % (valores expresados en Bq/m³).

Otro aspecto interesante es la variación intra-anual de la concentración en aire del gas radón. Así, en la Figura 4 se muestran sendos diagramas de cajas (box-plot) correspondientes a cada una de las series analizadas. Aunque ambas presentan la misma tendencia general, en la gráfica correspondiente al periodo 2011-2013 se observa, a parte de una mayor variabilidad antes comentada, un cierto desvío de la tendencia durante el mes de mayo. En la serie correspondiente a 2011, sin embargo, la concentración registrada durante el mes de septiembre parece desviarse de la tendencia general. De cualquier modo, parece clara la evolución estacional de la concentración de radón a lo largo del año, con valores máximos durante el periodo estival, mientras que los mínimos se registran durante el invierno.

Los valores máximos se registran en el sector más alejado de la entrada (Sala de la Esmeralda o del Volcán), si bien también el promedio registrado en las Conchas (muy próxima a la entrada) registra sistemáticamente valores muy elevados en comparación con el resto de los sectores analizados.

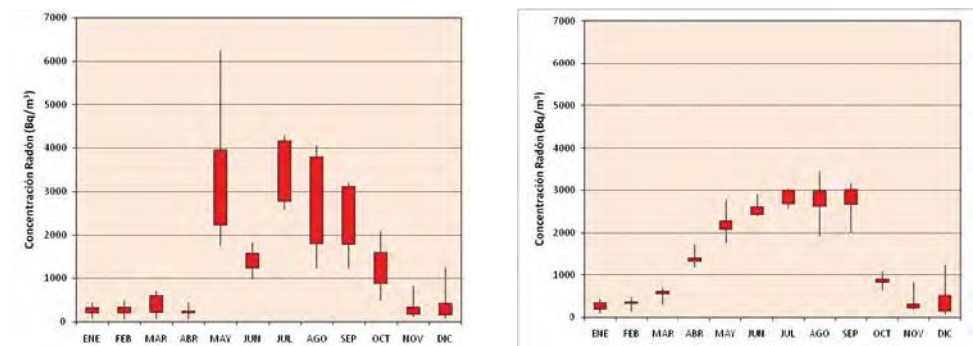


Figura 4. Gráficos box plot (cajas) de las series de concentración de gas radón en aire correspondientes al periodo 2011-2013 (izquierda) y al periodo 2011 (derecha).

CONCENTRACIÓN DE Rn VS CONCENTRACIÓN DE CO₂

La evolución mensual observada es en cierta medida bastante similar a la tendencia estacional del contenido en anhídrido carbónico del aire de la cavidad, tal y como sugiere la Figura 5, que corresponde a los valores medios, máximos y mínimos de este gas (en ppm) registrados durante el año 2010 en la Cristalería de Dios (no existen datos correspondientes a 2011). Se aprecia, al igual que ocurre con el radón, una tendencia ascendente a medida que avanza el año, de forma que los máximos ocurren durante el periodo estival (no existen registros correspondientes al mes de agosto), mientras que los mínimos tienen lugar durante los meses de diciembre y enero. No obstante, hay que indicar que en este caso esta variable está muy condicionada por la afluencia de visitantes.

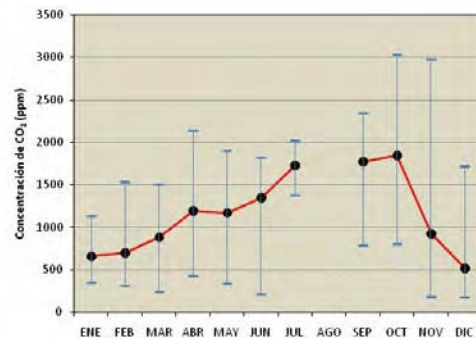


Figura 5.- Valores medios, máximos y mínimos de concentración de anhídrido carbónico registrados en la Cristalería de Dios durante el año 2010. No existen registros durante el mes de agosto.

La correlación es relativamente significativa entre las concentraciones mensuales medias de radón y anhídrido carbónico, incluso a pesar de corresponder a registros de años diferentes, tal y como se puede observar en la Figura 6. Dicha correlación es muy elevada si se prescinde del dato correspondiente al mes de octubre, mes por otro lado caracterizado por una elevada afluencia de visitantes, que provoca concentraciones de anhídrido carbónico anómalamente elevadas.

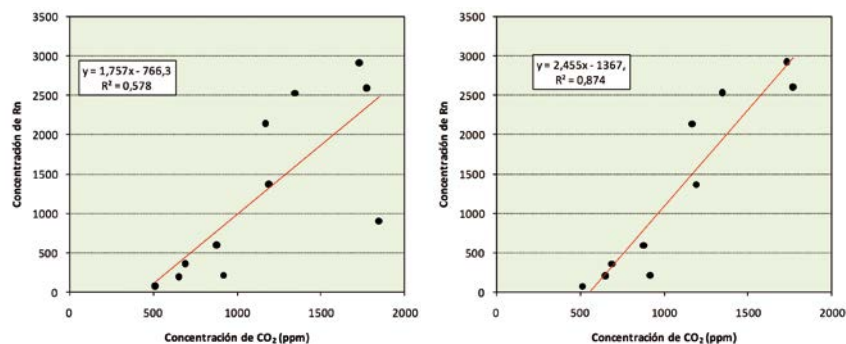


Figura 6. Gráficos de correlación entre el contenido en Rn registrado en la Cristalería de Dios durante 2011 y el contenido medio en anhídrido carbónico registrado durante 2010.

La explicación de esta tendencia del contenido en radón puede ser la misma que justifica la evolución de la concentración de anhídrido carbónico (Martín-Rosales *et al.*, 2010). Los valores mínimos se registran durante el invierno, precisamente en el periodo durante el cual las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior son máximas. La temperatura del exterior es mucho más baja que en el interior de la cavidad, y ello podría provocar la entrada del aire denso y frío en la cueva desplazando el aire del interior. Durante la primavera, y concretamente a finales de mayo, se produce un fenómeno de inversión térmica, de modo que la temperatura exterior llega a superar a la del interior. En este periodo, durante el cual el CO₂ se ha mantenido relativamente constante y con valores inferiores a 1.500 ppm, comienza a aumentar de forma prácticamente constante hasta alcanzar sus máximos en el mes de agosto. Esta tendencia ascendente podría explicarse por las elevadas temperaturas del exterior (y superiores a la temperatura de la cueva), que impedirían la entrada de aire del exterior menos denso y por tanto provocarían un progresivo aumento de la concentración de CO₂ y acumulación de gas Rn.

ESTIMACIÓN DE LAS DOSIS EFECTIVAS

En lo referente a las dosis efectivas, y a falta de cualquier criterio que permita seleccionar una serie de las analizadas, se ha optado por considerar como serie tipo para las estimaciones dosimétricas la correspondiente a todo el conjunto de observaciones realizadas, es decir, la serie constituida por el periodo comprendido entre 2011 y 2013. Por lo tanto el valor de referencia adoptado ha sido 1349 Bq/m³.

En la tabla 3 se muestra el resultado de la estimación de las dosis recibidas cada mes, así como del total recibida por año, tanto para los trabajadores fijos como para los eventuales, estimadas según el procedimiento descrito en párrafos precedentes. Como puede deducirse de la tabla, en las que las estimaciones dosimétricas están referidas a los valores promedio, en el caso de la dosis recibida por los trabajadores fijos, el valor obtenido es 4,112 mSv, inferior por tanto a los 6 mSv a los que hace referencia la Instrucción I-33. En el caso de los trabajadores eventuales, lógicamente es mucho menor (1,860 mSv).

En lo referente a trabajadores fijos, destacan por su valor relativamente elevado (aunque siempre inferior a 0,9 mSv) los meses de mayo, julio, agosto y septiembre, si bien durante los 8 meses restantes, la dosis recibida es muy baja, casi nunca superior a 0,1 mSv. En el caso de los trabajadores eventuales, la mitad del año la dosis mensual es inferior a 0,1 mSv, y nunca se superan los 0,4 mSv.

Teniendo en cuenta el criterio de concentración de gas radón adoptado (1349 Bq/m³), el número máximo de horas que podrían permanecer en el interior de la cavidad los trabajadores (con el protocolo de entradas vigente), sin que se superaran los 6 mSv por año de dosis recibida sería de 1.119 horas, o lo que es igual, un promedio de 93,3 horas por mes.

CONCLUSIONES

Se ha registrado durante el periodo 2011-2013 el contenido de Radón en aire en diversos sectores de la Gruta de las Maravillas, con el objeto de cumplir con la reciente normativa relacionada con radiaciones ionizantes. Se trata de los primeras medidas de concentración de este gas realizadas en la Gruta de las Maravillas. Los valores corresponden a concentraciones en aire (Bq/m³), y no se ha tenido en cuenta la fracción libre de Rn relacionada con las partículas o aerosoles. En concreto se ha llevado a cabo el seguimiento mensual en 10 sectores considerados como zonas homogéneas mediante la utilización de detectores pasivos suministrados y analizados en el laboratorio acreditado del Grupo de Investigación de Radón de la Universidad de Cantabria.

En función de los resultados obtenidos y a partir del análisis estadístico de los datos, se considera como valor medio de concentración (y por tanto como valor de referencia) de gas Radón en la Gruta de las Maravillas, 1349 Bq/m³, con una variabilidad temporal muy elevada.

Teniendo en cuenta el tiempo de permanencia en el interior de la cavidad de los trabajadores adscritos a la Gruta (guías), y aplicando los criterios epidemiológicos del ICRP65, la dosis anual máxima recibida por los mismos

2011-2013	CONCENTRACIÓN RADÓN			DOSIS RECIBIDA (mSv)			
MES	Media	Límite Inferior	Límite superior	FIJOS		EVENTUALES	
	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	HORAS	DOSIS	HORAS	DOSIS
ENERO	251,7	204,8	298,6	63,9	0,064	28,9	0,029
FEBRERO	278,5	229,2	327,8	63,9	0,071	28,9	0,032
MARZO	390,5	295,9	485,1	63,9	0,099	28,9	0,045
ABRIL	220,6	153,8	287,4	63,9	0,056	28,9	0,025
MAYO	3205,8	2628,1	3783,5	63,9	0,814	28,9	0,368
JUNIO	1445,1	1262,3	1627,9	63,9	0,367	28,9	0,166
JULIO	3429,8	3106,9	3752,8	63,9	0,871	28,9	0,394
AGOSTO	2724,7	2357,9	3091,5	63,9	0,692	28,9	0,313
SEPTIEMBRE	2460,5	2199,1	2721,8	63,9	0,625	28,9	0,283
OCTUBRE	1198,5	1048,8	1348,1	63,9	0,304	28,9	0,138
NOVIEMBRE	276,6	222,4	330,9	63,9	0,070	28,9	0,032
DICIEMBRE	308,4	221,6	395,1	63,9	0,078	28,9	0,035
PROMEDIO	1349,2	615,1	2083,4	767	4,112	347	1,860

Tabla 3. Estimaciones de dosis mensuales (mSv) con indicación de los valores anuales.

es 4,112 mSv, en ningún caso superior a los 6 mSv recogidos en la Instrucción IS-33. No obstante, los valores de concentración, que superan los recogidos en dicha normativa (1000 Bq/m³), obligan a establecer medidas de control y seguimiento de las dosis recibidas por los trabajadores, por otro lado informados ya en varias reuniones sobre esta problemática. Lógicamente, una posibilidad sería la adopción de medidas de tipo estructural o constructiva, encaminadas a reducir la concentración de gas radón; ello se conseguiría de forma relativamente fácil mediante un sistema de ventilación forzada en la cavidad. Sin embargo, cualquier sistema de este tipo alteraría notablemente las condiciones climáticas de la cavidad, afectando con toda seguridad el estado de conservación de los diferentes y frágiles espeleotemas de la cavidad, que constituyen el principal atractivo de la Gruta. Por tanto, esta medida no es viable, pues a medio plazo provocaría la pérdida de los valores estéticos de la Gruta, y probablemente el deterioro irreversible de la misma.

Por todo cuanto antecede, la única solución o medida de control plausible es la adopción de controles de tipo administrativo, consistentes en controlar el tiempo de permanencia de todos y cada uno de los trabajadores de la Gruta. Dicho control se establecerá a nivel diario, de forma que cada mes se podrá establecer la dosis recibida por cada uno de los trabajadores (a través del tiempo de permanencia y de la concentración de gas radón medida en la Gruta).

Por otra parte, y con el objeto de determinar con precisión el contenido en Radón, se considera importante la instalación de dos equipos de registro continuo de concentración de gas radón en la cavidad, concretamente en los sectores más distanciados entre sí (Sala de Las Conchas y Cristalería de Dios), lo que permitirá cuantificar la gran variabilidad temporal de la concentración de Rn en el aire, así como determinar la tasa de ventilación de la cavidad.

Estas medidas serán complementarias de las que provengan de los detectores pasivos que se mantendrán en las distintas zonas consideradas en el presente estudio. De este modo queda garantizado el seguimiento y cuantificación de la variabilidad espacial (red de control de detectores) y temporal (equipos de registro continuo) de la concentración de gas radón en el aire de la Gruta.

REFERENCIAS

- Dueñas, C., Fernández, M. C., Canñete, S., Carretero, J., y Liger, E., 1998. ²²²Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave. *Atmospheric Environment*, v. 33, p. 501–510.
- Galán-López, M., Martín-Sánchez, A., y Gómez Escobar, V., 2004. Estimates of the dose due to ²²²Rn dissolved in water. *Radiation Protection Dosimetry*, 111: 3-7.
- International Commission on Radiological Protection, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work, *Pergamon Press*, ICRP Publication 65, Oxford, 1993, Ann. ICRP 23 (2) 1993.
- ISRN, 2009. Guide méthodologique de mesure de l'activité volumique du radon dans les cavités et ouvrages souterrains. Rapport DEI/SARG/2009-020. *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire*, France, 19 p.
- 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.
- 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.
- Kies, A., Massen, F. y Feider, M., 1997. Measuring radon in underground locations. In: Virk, H.S. (Ed.): *Rare Gas Geochemistry*. Guru Nanak Dev University, Amritsar, pp. 1–8
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez, C. M. y Pulido-Bosch, A. 1995. Morfología, espeleotemas y climatología de la Gruta de las Maravillas, Aracena (Huelva). *Espeleotemas*, 5:1-12.
- Martín-Rosales, W., 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). In: J.J. Durán, P. A. Robledo y J. Vázquez (Eds.) *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, Madrid, 169-180.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M. y Caballero, V. 2010. Variación temporal de la concentración de anhídrido carbónico en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: J. J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, pp. 159-168. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- 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*, 31, 142-149.
- 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. *J. Hazard Mater*, 16;145(3):368-71.
- Quindós, L., Fernández, P., Sainz, C., Gómez-Arozamena, J. y 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. y González-Diez, A. 2013. The use of radon as tracer in environmental sciences. *Acta Geophysica*, 61 (4): 848-858.

The image shows a microscopic view of a mineral surface, likely a rock sample, with a blue overlay. The surface is characterized by a complex, irregular pattern of small, angular, and somewhat rounded fragments. These fragments are arranged in a way that suggests a fractured or crystalline structure. The blue overlay is semi-transparent, allowing the underlying texture to be visible while adding a uniform color to the entire scene. The overall appearance is that of a highly textured, possibly fractured, mineral surface.

4 GEOESPELEOLOGÍA

Análisis no destructivo e *in situ* de minerales y pigmentos en cuevas mediante espectroscopia Raman

Fernando Gázquez⁽¹⁾, Fernando Rull⁽²⁾, José-María Calaforra⁽³⁾, Emilio Guirado⁽³⁾, Aurelio Sanz⁽²⁾, Jesús Medina⁽²⁾, Carmen de las Heras⁽⁴⁾, Alfredo Prada⁽⁴⁾ y José Antonio Lasheras⁽⁴⁾

(1) Department of Earth Sciences. Cambridge University. Downing Street, Cambridge, Cambridgeshire, CB2 3EQ, United Kingdom (fg331@cam.ac.uk)

(2) Unidad Asociada UVA-CSIC (ERICA) al Centro de Astrobiología, Universidad de Valladolid, Parque Tecnológico Boecillo, 47151, Valladolid (rull@fmc.uva.es; jausanz@gmail.com; medina@fmc.uva.es)

(3) Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Universidad de Almería Crta.Sacramento s/n, 04120 La Cañada de San Urbano, Almería, Spain (jmcalforra@ual.es)

(4) Museo de Altamira, Ministerio de Educación, Cultura y Deportes. 39330, Santillana del Mar, Cantabria (carmen.delasheras@mecc.es; alfredo.prada@mecc.es; joseantonio.lasheras@mecc.es)

RESUMEN

Los estudios mineralógicos en cavidades han requerido tradicionalmente de una fase de toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio. La recolección de materiales puede dar lugar en muchos casos a impactos irreversibles e incompatibles con la conservación del patrimonio subterráneo, tanto geológico como arqueológico. Los daños provocados por los muestreos son incluso mayores a la hora de estudiar pinturas rupestres que presentan valores culturales e históricos añadidos. En el presente trabajo se exploran las capacidades técnicas de la espectroscopia Raman portátil para el estudio de minerales y pigmentos en dos cavidades españolas emblemáticas como son las cuevas de El Soplao y Altamira. Esta técnica ha permitido estudiar *in situ* y de forma no destructiva la mineralogía de algunos espeleotemas peculiares de la Cueva de El Soplao. Se han detectado principalmente minerales carbonáticos, entre los que destaca por su abundancia el aragonito. También se han identificado otros minerales menos comunes, como es el caso de la hidromagnesita, y se han estudiado las características mineralógicas de los depósitos ferromangánicos recientemente descubiertos en esta cavidad. En el caso de la Cueva de Altamira, se presentan algunos resultados preliminares de los análisis Raman llevados a cabo sobre varios de los elementos pictóricos más relevantes de la Sala de los Polícromos. Estos resultados revelan principalmente la presencia de hematites, responsable de la coloración rojiza de las pinturas. El potencial de la espectroscopia Raman como una técnica compatible con la conservación es especialmente significativo en este caso, ya que los análisis no requirieron de contacto físico con las pinturas. La espectroscopia Raman se perfila como una alternativa al muestreo y recogida de materiales en cuevas en el ámbito del estudio de minerales y pigmentos.

Palabras clave: espectroscopia Raman, Raman portátil, minerales de cuevas, El Soplao, Altamira, arte rupestre.

In situ non-destructive analysis on paintings and cave minerals using Raman spectroscopy

ABSTRACT

Mineralogical studies in caves have usually required a first stage of sampling before analysis in laboratory. In fact, mineral gathering in caves can provoke irreparable damages. In the case of cave paintings, the threat of deterioration due to sampling is even more evident, given their cultural and historical value. Here, we explore the capability of portable Raman spectroscopy for the analysis of cave minerals and pigments in two emblematic Spanish caves, such as El Soplao Cave and Altamira Cave. This technique had enabled *in situ* and non-destructive

analysis of peculiar speleothems in El Soplao Cave. Carbonate is the first mineral group in abundance, where calcite and aragonite are the most common minerals. In addition, other unusual minerals have been detected, such as hydromagnesite, as well as ferromanganese oxides in the black biogenic deposits recently discovered in this cave. Regarding Altamira Cave, we present here some preliminary results of the in situ Raman analyses performed on several pictorial features in the renowned "Painting Hall". Hematite is the most abundant mineral, providing their characteristic ochre-reddish to the Altamira's bison and deers. The potential of Raman spectroscopy as an analytical technique compatible with cave preservations is particular remarkable in this case, since the analysis did not require of physical contact between the Raman head and the paintings. In summary, Raman spectroscopy emerges as an alternative methodology to the traditional sampling and gathering of material in caves.

Keywords: Raman spectroscopy, portable Raman, cave mineral, El Soplao Cave, Altamira Cave, rock art.

INTRODUCCIÓN

El muestreo de espeleotemas con fines científicos puede generar graves problemas de conservación en cuevas. La recolección de espeleotemas para estudios mineralógicos y paleoclimáticos implica en muchas ocasiones la toma de muestras físicas que resta valor natural y estético a las cavidades (Forti, 2007). En el mejor de los casos, las piezas extraídas para su posterior análisis en laboratorio proceden de zonas poco visibles para el visitante, sin embargo, esto no disminuye el impacto sobre el medio subterráneo. En algunos casos puntuales, se han utilizado técnicas mecánicas para la extracción de testigos de espeleotemas con el fin de estudiar sus características mineralógicas y geoquímicas (Pagliara et al., 2010; Spötl and Matthey, 2012).

Los análisis no destructivos e *in situ* representan una alternativa a la toma de muestras en cuevas, especialmente en el caso de cavidades turísticas o con especial valor estético o patrimonial. Sin embargo, los análisis desarrollados en el interior de cavidades han sido muy escasos hasta la fecha, debido principalmente a que la mayoría de los equipos analíticos son pesados, muy delicados y difíciles de introducir en cuevas. Recientemente, se han realizado varios estudios centrados en el análisis *in situ* de pigmentos en pinturas rupestres de cuevas mediante el uso de micro-fluorescencia de rayos X (Roldan et al., 2010; Beck et al., 2013; entre otros). Esta técnica permite conocer la composición elemental de materiales, sin embargo, no aporta información sobre la mineralogía de los compuestos. Las técnicas mineralógicas portátiles también han empezado a ser utilizadas recientemente en el marco de campañas de muestreo geológico (Rull et al., 2009) y en estudios de obras de arte (Medina et al., 2013), aunque su aplicación al análisis de minerales o pigmentos en cavidades ha sido muy limitada (Lahlil et al., 2012; Beck et al., 2013; Gázquez et al., 2014a). De las técnicas utilizadas hasta la fecha para este fin, la espectroscopia Raman es la que mejores resultados ha proporcionado debido a su gran versatilidad para la identificación de compuestos orgánicos e inorgánicos, su carácter no destructivo y su gran portabilidad.

Esta técnica espectroscópica está basada en la interacción de un haz de luz con la nube de electrones de los átomos de una molécula. Por lo general, la muestra se ilumina con un rayo láser, la luz emitida por este punto se recoge con una lente y es enviada a través de un monocromador. Las longitudes de onda cercanas a la línea láser debidas a la dispersión elástica de Rayleigh son filtradas, mientras que el resto de la luz recogida se dispersa en un detector o CCD. De este modo se obtiene información vibracional que es característica de cada enlace químico, y por consiguiente de cada compuesto (Skoog et al., 2008). Aunque como se ha comentado anteriormente, su aplicación en cuevas ha sido bastante limitada hasta la fecha, la espectroscopia Raman sí ha sido utilizada con éxito en laboratorio para la identificación de minerales de cuevas (Gázquez et al., 2012a; 2013, 2014b, entre otros). Al tratarse de una técnica que no produce daños sobre los materiales analizados, su aplicación al estudio de elementos con alto valor geológico o patrimonial está especialmente indicada.

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio mineralógico *in situ* mediante espectroscopia Raman en dos cavidades españolas emblemáticas como son la cueva de El Soplao y Altamira. En el caso de la Cueva de El Soplao, su principal atractivo radica en la gran variedad de espeleotemas y caprichosas formas subterráneas

que alberga, cuya mineralogía no había sido estudiada en detalle hasta la fecha. En cuanto a la Cueva de Altamira, las pinturas rupestres que aparecen especialmente en el techo de la Sala de los Polícromos presentan además el valor adicional de ser consideradas la principal manifestación pictórica del Paleolítico Superior en España.

DESCRIPCIÓN DE LAS CUEVAS

Cueva de El Soplao

La Cueva de El Soplao se ubica a 540 m s.n.m. en la Sierra de Arnero que a su vez se encuentra enmarcada en la Sierra del Escudo de Cabuérniga (Cantabria, Norte de España). La cavidad se desarrolla en una unidad de carbonatos marinos de plataforma continental somera (Unidad de La Florida), de edad Aptiense. Además, la región tiene un tradicional interés metalogenético, puesto que las unidades carbonatadas que se estudian presentan grandes parches de dolomitización en los que se alojan importantes yacimientos minerales de plomo y zinc en la mina de La Florida y la propia cueva (Quesada et al., 2005). En el entorno de esta cavidad se ha descubierto recientemente un yacimiento de ámbar cretácico que presenta abundantes bioinclusiones (Najarro et al., 2009).

La Cueva de El Soplao, está abierta al público desde 2005 y es una de las cavidades turísticas españolas más estudiadas desde el punto de vista científico. Espectaculares conjuntos de excéntricas y antoditas, así como estalagmitas y estalactitas de enormes dimensiones son los elementos estéticos más relevantes de esta cavidad que recibe más de 200.000 visitantes anualmente. Estudios recientes sugieren que la cueva estuvo afectada por inundaciones periódicas en el pasado que introdujeron sedimentos detríticos (Gázquez et al., 2014c) y que algunas de estas etapas estuvieron ligadas a la génesis de los depósitos ferromanganesicos de origen bacteriano descubiertos recientemente en su interior (Rossi et al., 2010; Gázquez et al., 2011). Los espeleotemas ambarinos (Gázquez et al., 2012a) y los depósitos de *moonmilk* de la Galería de El Bosque (Gázquez et al., 2012b; 2014b) también han sido estudiados en varios trabajos científicos recientes.

Cueva de Altamira

La Cueva de Altamira se encuentra en la localidad de Santillana del Mar (Cantabria, Norte de España). Esta cavidad permaneció ocupada por el hombre del Paleolítico superior durante un periodo de más de 22.000 años (Lasheras et al. 2012) y que podría extenderse hasta 36.500 años antes del presente (Pike et al., 2012), dejando un rico legado de pinturas rupestres, grabados y piezas arqueológicas, que incluyen útiles de caza y de cocina, además de restos de pigmentos y otros utensilios pictóricos. El hallazgo de pigmentos en el yacimiento arqueológico fue uno de los argumentos esgrimidos por Marcelino Sanz de Sautuola en 1880 para relacionar las pinturas con la ocupación prehistórica de la cueva. El arte rupestre se distribuye por la práctica totalidad del espacio subterráneo, especialmente en la Sala de los Polícromos, considerada la "Capilla Sixtina" del arte Paleolítico. En esta sala destacan las representaciones de bisontes de trazado naturalista, grabados y signos claviformes, combinando distintas tonalidades de rojos, amarillos, marrones, negro, y en algunos casos colores violáceos (Cabrera, 1980), que se han relacionado con los pigmentos encontrados en el yacimiento arqueológico de la cueva (Rull et al., 2002; 2014).

METODOLOGÍA RAMAN

Los análisis mineralógicos mediante espectroscopia Raman *in situ* se llevaron a cabo con un láser BWTEK BRM-OEM-785 (785 nm) acoplado a un espectrómetro BWTEK Prime T BTC661E-785CUST, adaptado para trabajar en condiciones de campo (Figura 1). El cabezal Raman BWTEK BAC100-785E estuvo conectado al espectrómetro mediante una fibra óptica de 200 μm de diámetro, y al láser con una de 105 μm . Todas las piezas de este ensamblaje se transportan en el interior de una maleta, incluido las baterías que alimentan al sistema y que le proporcionan una autonomía de hasta 5 horas de trabajo.

El cabezal Raman se sujetó sobre un trípode para dotar al instrumento de mayor estabilidad, permitiendo analizar puntos situados en el techo, hasta a 2,5 m de altura. El tamaño de los puntos analizados fue aproxima-

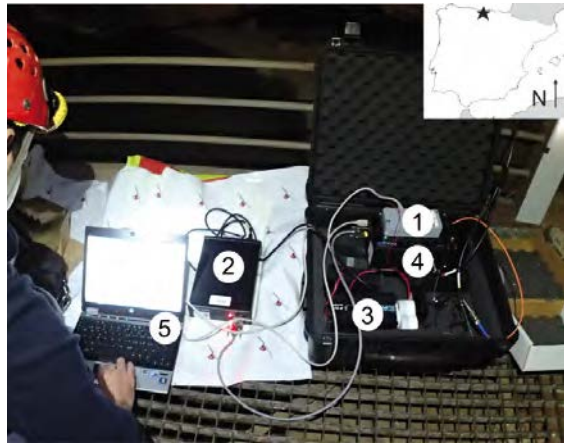


Figura 1. Equipo Raman utilizado para el análisis in situ de minerales y pigmentos en las cuevas de El Soplao y Altamira (Cantabria, norte de España). El montaje estuvo constituido por un láser (785 nm) (1), el controlador de la CCD (charge-coupled device) (2), un sistema de alimentación que utiliza baterías de litio (3), el espectrómetro (4) y un ordenador portátil (5) con el software BWTEK que permitió controlar el sistema. El láser y el espectrómetro estuvieron conectados mediante fibra óptica al cabezal Raman con el que se realizaron los análisis.

damente de $85\ \mu\text{m}$ y la focalización del haz se hizo manualmente mediante tornillos micrométricos que permitieron mover el cabezal Raman en todas las direcciones y sin peligro de colisionar con las pinturas y minerales delicados. En el caso de muestras minerales menos frágiles, como es el caso de muchos espeleotemas que se pueden encontrar en El Soplao, la focalización del haz se hizo mediante un capuchón de plástico que permite mantener el cabezal a una distancia constante de la superficie analizada, permitiendo contactar con ésta y sin necesidad de utilizar trípode. Este montaje fue diseñado y ensamblado en la Unidad Asociada al Centro de Astrobiología CSIC-UVA (ERICA) de la Universidad de Valladolid.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de espeleotemas en la Cueva de El Soplao

Los análisis Raman en la Cueva de El Soplao se llevaron a cabo sobre espeleotemas con diversas morfologías y coloraciones intentando abarcar el mayor rango mineralógico posible (Figura 2). Esta técnica permitió identificar *in situ*, de forma no destructiva y sin la necesidad de tomar muestras, hasta cuatro minerales carbonáticos diferentes, así como óxidos metálicos, atendiendo a los espectros Raman obtenidos (Figura 3).

Se analizaron antoditas y excéntricas de carbonato, probablemente el elemento estético más característico de esta cavidad (Figura 2A). La mayoría de estos espeleotemas están constituidos por aragonito (CaCO_3), mientras que la calcita (CaCO_3) es menos abundante. La presencia de aragonito es común en cavidades en las que la roca caja está constituida principalmente por dolomías, como es el caso de El Soplao. La relación Mg/Ca relativamente elevada en el agua de goteo favorece la precipitación de aragonito, mientras que inhibe la formación de calcita (Frisia *et al.*, 2002). De hecho, los análisis Raman de las paredes de la cueva que constituyen la roca de caja han confirmado la presencia de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), que en muchas ocasiones aparece formando costras de alteración de aspecto microcristalino (Figura 2D), probablemente generadas por procesos de condensación-corrosión.

Sobre muchas de estas costras, y directamente sobre la roca de caja se pueden observar espeleotemas tipo *moonmilk*, de aspecto globular y esponjoso (Figura 2B), en los que los análisis Raman han revelado la presencia de hidromagnesita ($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

La hidromagnesita en El Soplao aparece formando parte de depósitos de *moonmilk* sobre otros espeleotemas, así como sobre paredes en diversos puntos de la cavidad. En particular, se han observado importantes depósitos de hidromagnesita sobre estalagmitas de la Galería de El Bosque. La disposición de los depósitos de *moonmilk* no es aleatoria sino que se localizan en un lateral de las estalagmitas sobre las que se desarrollan, claramente controlado por la dirección predominante del aire en la galería. Este hecho apunta a que los flujos de aire jue-

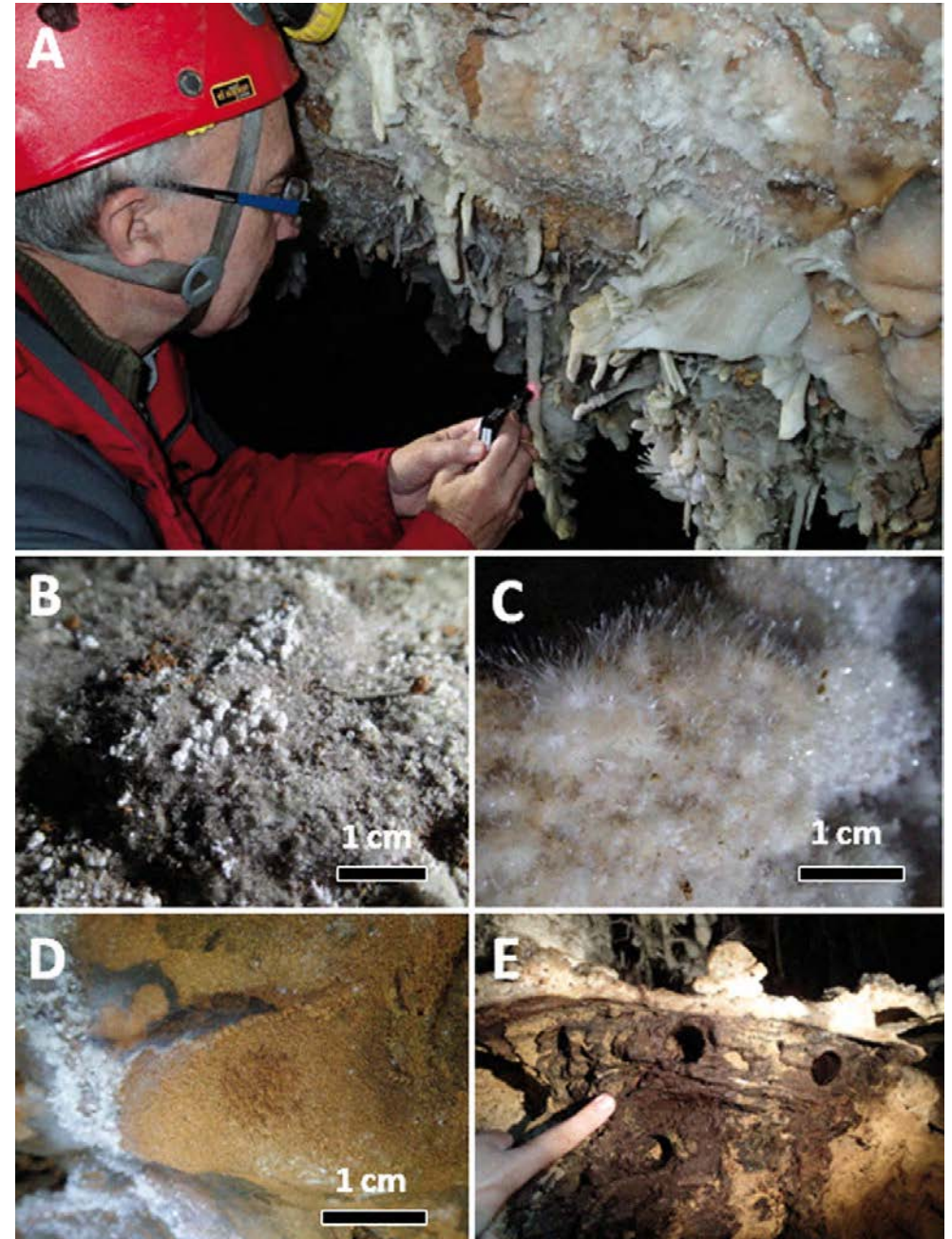


Figura 2. Análisis Raman *in situ* de espeleotemas en la Cueva de El Soplao. Se analizaron estalactitas y excéntricas carbonáticas (A), espeleotemas tipo *moonmilk* (B) y acículas de aragonito tipo *frostwork* (C) en la Galería Gorda y en la Sala de la Ópera. Además se llevaron a cabo análisis Raman sobre costras carbonáticas y materiales de alteración de la roca de caja original (D), así como sobre los depósitos ferromangánicos (E) estudiados previamente por Rossi *et al.* (2010) y Gázquez *et al.* (2011) en las Galerías del Campamento y de los Italianos.

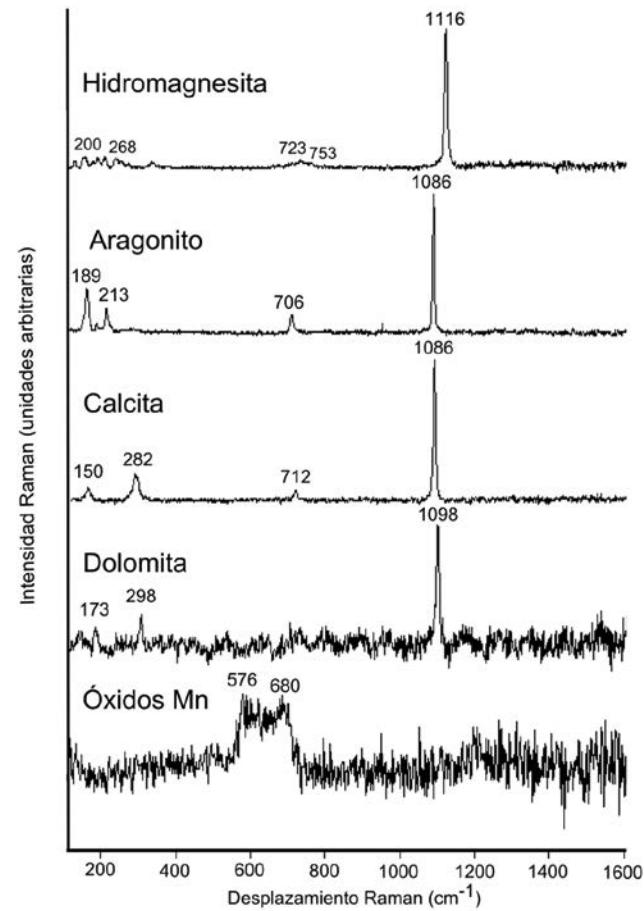


Figura 3. Resultados mineralógicos de los espeleotemas analizados mediante espectroscopia Raman en la Cueva de El Soplao. Se detectaron carbonatos de calcio (aragonito y calcita) en excéntricas, estalactitas (Figura 2A) y frostwork (Figura 2C) y carbonatos de magnesio hidratados (hidromagnesita) en depósitos de moonmilk (Figura 2B), además de dolomita, que forma parte de la roca de caja (Figura 2D). Los óxidos de manganeso aparecen en los depósitos negros de la Galería de los Italianos (Figura 2E). Por otro lado, delicadas costras constituidas por acículas de tamaño milimétrico, también denominadas frostwork, resultaron estar compuestas por aragonito (Figura 2C), cuya génesis también está ligada a los procesos de capilaridad y evaporación de agua rica en Ca y Mg que llega a la cavidad.

gan un papel fundamental durante su desarrollo y sugiere que la precipitación directa a partir de una disolución rica en Mg es la explicación plausible para la génesis de estos depósitos, especialmente cuando no se han detectado evidencias de actividad biológica en estos espeleotemas (Gázquez *et al.*, 2012b), a diferencia de otros agregados de hidromagnesita encontrados en otras cavidades, entre ellas Altamira (Cañaveras *et al.*, 1999).

Los famosos depósitos ferromanganesicos de El Soplao (Figura 2E) también han sido estudiados mediante espectroscopia Raman, que ha detectado la presencia de birnesita ($[A_yMnO_{2-y} \cdot z(H_2O)]$), donde A representa un catión interlamilar), como revelan las señales Raman en torno a 560 y 680 cm^{-1} típicas de este mineral (Miller *et al.*, 2012), y coincidiendo con análisis mineralógicos previos de estos depósitos (Gázquez *et al.*, 2011). En concreto se estudiaron los depósitos negros de aspecto biogénico de la zona denominada el "Falso Suelo", junto a la Galería de los Italianos. La presencia de costras y depósitos ferromanganesicos en la Cueva de El Soplao se observa en diversas localizaciones. Las costras se ubican sobre suelos, paredes y techos (Gázquez *et al.*, 2011) (Figura 2A).

También se han identificado depósitos de manganeso que posteriormente a su precipitación fueron cubiertos por excéntricas (de aragonito y/o calcita) mientras que otros quedaron laminados en el interior de coladas de aragonito, como las observadas en el Pasillo de los Cubos (Gázquez *et al.*, 2014c).

Análisis de pigmentos en la Cueva de Altamira

Los análisis Raman preliminares llevados a cabo en la Sala de los Polícromos de Altamira estuvieron centrados principalmente en el estudio de los trazados con tonos rojizos y ocre (Figura 4). Tres tipos de elementos con coloración rojiza fueron analizados: los bisontes de la zona cercana a la entrada de la sala, los símbolos claviformes que aparecen en la zona central, y la gran cierva que aparece en el fondo de la sala. Estos análisis han permitido identificar hematites (Fe_2O_3) como compuesto principal.

Los espectros Raman presentan señales a 228, 298 y 413 cm^{-1} , típica de la hematites (Figura 5). En la mayoría de los espectros también aparecen señales intensas y finas a 1087 y 150 cm^{-1} , que indican la presencia de calcita, así como en algunos casos, bandas menos intensas a 713 cm^{-1} y 282 cm^{-1} , también típicas de este mineral. La calcita que aparece en las pinturas podría deberse a la precipitación de concreciones carbonáticas más recientes que las pinturas (Pike *et al.*, 2012), cuya formación pudo estar mediada en muchos casos por microorganismos como sugieren trabajos previos sobre biomineralizaciones en esta cavidad (Cuezva *et al.*, 2009), o simplemente a señales Raman procedentes de la roca de caja de la cueva que sirve de soporte a las pinturas. La presencia de agua sobre las pinturas pudo reducir la señal Raman recogida en muchos casos, haciendo difícil o imposible la identificación de pigmentos en algunos de los puntos analizados. Esto se debió principalmente al uso del láser de 785 nm, y a que el agua absorbe parte de la energía del láser en esta longitud de onda. El uso de láseres con longitud de onda diferente podría disminuir estas interferencias y producir espectros Raman de mayor calidad.

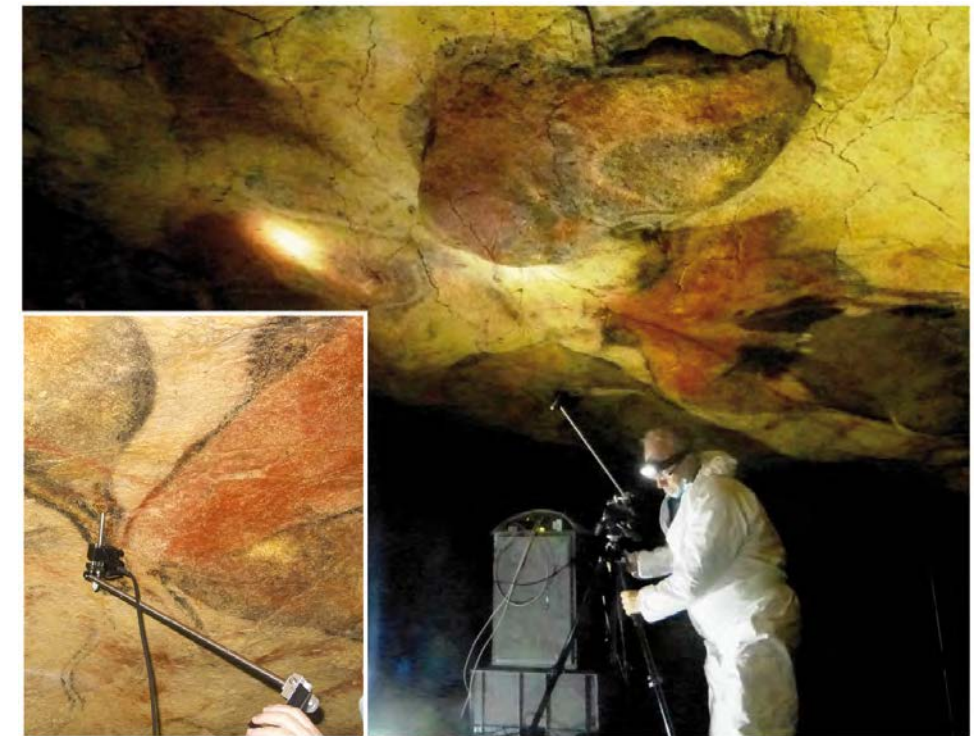


Figura 4. Análisis Raman in situ de pigmentos en la Sala de los Polícromos de la Cueva de Altamira. Se analizaron trazados de distintas tonalidades, entre los que destacan las coloraciones rojizas en los bisontes y ciervos, así como en símbolos claviformes.

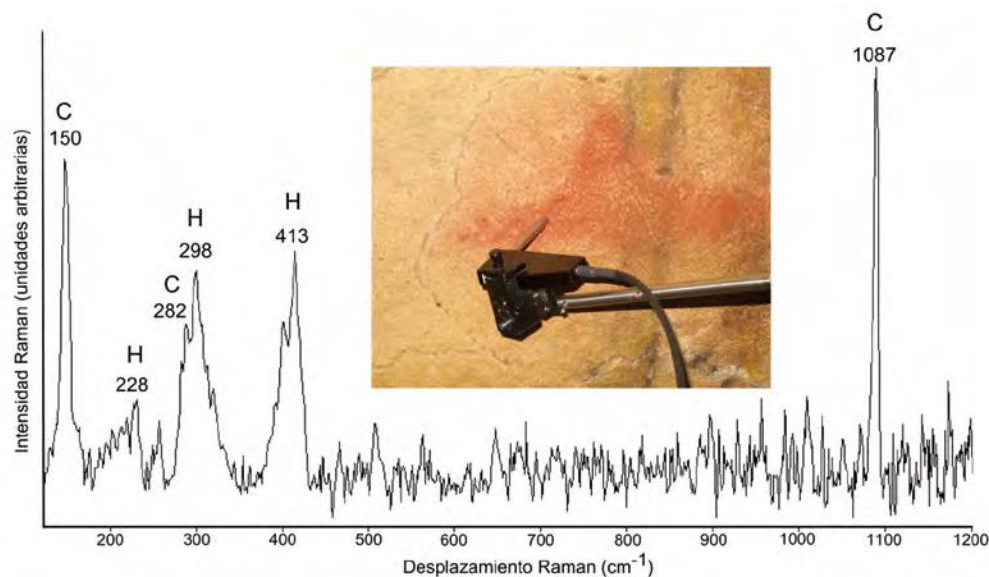


Figura 5. Resultados preliminares de los pigmentos analizados en el techo de la Sala de los Polícromos de la Cueva de Altamira. Se ha detectado hematitas (H), y calcita (C) que podría proceder de concreciones carbonáticas superpuestas más recientes o más probablemente del propio substrato que constituye el soporte de las pinturas. La presencia de hematitas como mineral principal en los trazos de coloración rojiza que forman los bisontes, la gran cierva y los símbolos claviformes de la Sala de los Polícromos coincide con los análisis previos de catas tomadas del techo por Cabrera (1980), así como con los resultados obtenidos de los pigmentos y piezas arqueológicas encontrados en el yacimiento de la cueva (Rull et al., 2014).

CONCLUSIONES

Los análisis de espectroscopia Raman llevados a cabo en las cuevas de El Soplao y Altamira han permitido detectar diversos minerales, de forma no destructiva y sin necesidad de tomar muestras para su posterior estudio en laboratorio. En el caso de El Soplao, algunos de sus espeleotemas con mayor valor estético y científico han sido estudiados. Los análisis sugieren que el aragonito y la calcita son los minerales más abundantes en esta cavidad, formando parte de las excéntricas que cubren sus techos y paredes. La roca de caja de la cueva está constituida por dolomita, también detectada mediante Raman. Además, se ha identificado hidromagnesita formando parte de los depósitos de *moonmilk* que se pueden encontrar en diversas zonas de la cavidad. Finalmente, se han detectado óxidos de manganeso (birnesita) en los depósitos negros biogénicos de la Galería de los Italianos.

En cuanto a los análisis preliminares de los pigmentos que forman parte de las pinturas de la Sala de los Polícromos de la Cueva de Altamira, la espectroscopia Raman ha detectado principalmente óxidos de hierro (hematitas). Nuevos análisis permitirán caracterizar el resto de pigmentos que constituyen las policromías que cubren el techo de la sala. En este caso, las ventajas del análisis *in situ* y no destructivo son aún más evidentes al tratarse de un bien cultural Patrimonio de la Humanidad. La espectroscopia Raman hace compatibles los estudios arqueológicos sobre los pigmentos utilizados en el arte rupestre de Altamira y la conservación de este vestigio arqueológico único.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto VA373A12-1 de la Junta de Castilla y León y los fondos del Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería. Los autores agradecen las facilidades ofrecidas por los gestores de El Soplao S.L para realizar este estudio.

REFERENCIAS

- Beck, L., Genty, D., Lahlil, S., Lebon, M., Tereygeol, F., Vignaud, C., Reiche, I., Lambert, E., Vallada, H., Kaltnecher, E., Plassard, F., Menu, M. y Paillet, P. 2013. Non-destructive portable analytical techniques for carbon *in situ* screening before sampling for dating prehistoric rock paintings. *Radiocarbon*, 55(2-3), 436-444.
- Cabrera, J. M. 1980. La conservación de la cueva de Altamira: sugerencias para un programa de trabajo. En *Altamira Symposium*, Madrid, Ministerio de Cultura. pp. 621-641.
- Cañaveras, J. C., Hoyos, M., Sánchez-Moral, S., Sanz-Rubio, E., Bedoya, J., Soler, V., Groth, I., Schumann, P., Laiz, L., Gonzalez, I. y Saiz-Jiménez, C. 1999. Microbial communities associated with hydromagnesite and needle-fiber aragonite deposits in a karstic cave (Altamira, northern Spain). *Geomicrobiology Journal*, 16, 9-25.
- Cuezva, S., Sánchez-Moral, S., Saiz-Jiménez, C. y Cañaveras, J. C. 2009. Microbial communities and associated mineral fabrics in Altamira Cave, Spain. *International Journal of Speleology*, 38, 83-92.
- Forti, P. 2007. Sampling or not? What kind of data can be extracted from a cave? Some easy rules to conduct science in-caves with minimal impact. *Focus (Universidad Inter-americana de Puerto Rico)*, VI(1-2), 45-56.
- Frisia S., Borsato A., Fairchild I.J., McDermott F. y Selmo E. M. 2002. Aragonite-calcite relationships in speleothems (Grotte de Clamouse, France): environment, fabrics and carbonate geochemistry. *Journal of Sedimentary Research*, 72, 687-699.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M. y Forti, P. 2011. Black Mn-Fe Crusts as Markers of Abrupt Palaeoenvironmental Changes in El Soplao Cave (Cantabria, Spain). *International Journal of Speleology*, 40(2), 163-169.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Rull, F., Forti, P. y García-Casco, A. 2012a. Organic matter of fossil origin in the amberine speleothems from El Soplao Cave (Cantabria, Northern Spain). *International Journal of Speleology*, 41(1), 113-123.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M. y Sanna, L. 2012b. Precipitación de *moonmilk*, un proceso natural en cavidades: revisión y nuevos casos de estudio. In: *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*, Asociación Española de Cuevas Turísticas (J.J. Durán y, P.A. Robledo, Eds.), 47-60 pp.
- Gázquez, F., Rull, F., Medina, J., Calaforra, J. M., Forti, P., De Waele, J., Venegas, G. y Sanz, A. 2013. Glaucocerinite forming *gours* in Su Zurfuru Mine (Sardinia, Italy). *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, Macla*, 17, 53-54.
- Gázquez, F., Rull, F., Calaforra, J. M., Sanz, A. y Medina, J., 2014a. *in situ* Raman spectroscopy of cave minerals: an analytical tool compatible with the conservation of subterranean heritage. *11th GeoRaman International Conference, St. Louis*. #5038.
- Gázquez, F., Rull, F., Calaforra, J. M., Venegas, G., Manrique, J. A., Sanz, A., Medina, J., Catalá-Espí, A., Sansano, A., Navarro, R., Forti, P., De Waele, J. y Martínez-Frías, J. 2014b. Caracterización mineralógica y geoquímica de minerales hidratados de ambientes subterráneos: implicaciones para la exploración planetaria. *Estudios Geológicos*, 70(2) (e009).
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Forti, P., Stoll, H., Ghaleb, B. y Delgado-Huertas, A. 2014c. Paleoflood events recorded by speleothems in caves. *Earth Surface Process and Landforms*, 39(10), 1345-1353.
- Lasheras, J.A., Fernández-Valdés, J. M., Montes, R., Rasines, P., Blasco, E., Soutullo, B., Heras, C. y Fatás, P. 2012. La cueva de Altamira: nuevos datos sobre su yacimiento arqueológico (sedimentología y cronología). En: *Actas de la 1ª Mesa Redonda sobre Paleolítico Superior Cantábrico*. San Román de Candamo (Asturias), *Monografías del Instituto Internacional de Investigaciones Prehistóricas de la Universidad de Cantabria*.
- Lahlil, S., Lebon, M., Beck, L., Rousselière, H., Vignaud, C., Reiche, I., Menu, M., Paillet, P. y Plassard, F. 2012. The first *in situ* micro-Raman spectroscopy analysis of prehistoric cave art of Rouffignac St-Cernin, France. *Journal of Raman Spectroscopy*, 43, 1637-1643
- Medina, J., Rull, F., Sanz, A., Sanz, C. y Gázquez, F. 2013. Estudio mineralógico del deterioro del Trasaltar de la Catedral de Burgos. *Revista de la Sociedad española de mineralogía (Macla)*, 17, 73-74.

- Miller, A. Z., Dionísio, A., Sequeira-Braga, M. A., Hernández-Mariné, M., Afonso, M. J., Muralha, V. S. F., Herrera, L. K., Raabe, J., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Hermosin, B., Sanchez-Moral, S., Chaminé, H. y Saiz-Jiménez, C. 2012. Biogenic Mn oxide minerals coating in a subsurface granite environment. *Chemical Geology*, 222-223, 181-191.
- Najarro, M., Peñalver, E., Rosales, I., Pérez-De la fuente, R. y Daviedo-Gómez, V. 2009. Unusual concentration of Early Albian arthropod-bearing amber in the Basque-Cantabrian Basin (El Soplao, Cantabria, Northern Spain): Palaeoenvironmental and palaeobiological implications. *Geological Acta*, 7 (3), 363-387.
- Pagliara, A., De Waele, J., Forti, P., Galli, E. y Rossi, A. 2010. Speleothems and speleogenesis of the hypogenic Santa Barbara cave system (South-West Sardinia, Italy). *Acta Carsologica*, 39(3), 551-564.
- Pike, A. W. G., Hoffmann, D. L., García-Idez, M., Pettitt, P. B., Alcolea, J., Balbín, R.D., González-Saiz, C., De las Heras, C., Lasheras, J. A., Montes, R. y Zilhao, J. 2012 U-Series Dating of Paleolithic Art in 11 Caves in Spain. *Science*, 336 (6087), 1409-1413.
- Quesada, S., Robles, S. y Rosales, I. 2005. Depositional architecture and transgressive-regressive cycles within Liassic backstepping carbonates ramps in the Basque-Cantabrian Basin, N Spain. *Journal of the Geological Society of London*, 162, 531-548.
- Roldán, C., Murcia-Mascarós, S., Ferrero, J., Villaverde, V., López, E., Domingo, I., Martínez, R. y Guillem, P. M. 2010. Application of field portable EDXRF spectrometry to analysis of pigments of Levantine rock art. *X-Ray Spectrometry*. 39 (3), 243-250.
- Rossi, C., Lozano, R. P., Isanta, N. y Hellstrom, J. 2010. Manganese stromatolites in caves: El Soplao (Cantabria). *Geology*, 38(12), 1119-1122.
- Rull, F., Medina, J., Sansano, A., Lhomme, Th., Edwards, H. G. M. y Soler, V. 2002.: A preliminary study of archaeological materials in Altamira (Spain) cave using XRD, IR and Raman techniques. En: *5th GeoRaman, Acta Universitatis Carolinae – Geologica*, 46(1), p. 79.
- Rull, F., Klingelhöfer, G., Sansano, A., Fleischer, I., Sobrón, P., Blumers, M., Lafuente, A., Schmanke, D. y Maul, J. 2009. In-situ micro-Raman and Mössbauer spectroscopic study of evaporate minerals in Rio Tinto (Spain): applications for planetary exploration. *Conference of Micro-Raman Spectroscopy and Luminescence Studies in Earth and Planetary Sciences*, 1473, 68–69.
- Rull, F., Gázquez, F., Medina, J., Sanz, A., De las Heras, C., Prada, A., Lasheras, J. A. y Calaforra, J. M. 2014. Caracterización de pigmentos utilizados en el arte rupestre de la Cueva de Altamira. *Macla. Revista Sociedad Española de Mineralogía*, 19 (en prensa).
- Skoog, D. A., Holler, F. J., Crouch, S.R. 2008. Espectroscopía Raman. En: *Principios de análisis instrumental (Cengage learning, México D.F.)* pp. 481-495.
- Spötl, C. y Matthey, D. 2012. Scientific drilling of speleothems – a technical note. *International Journal of Speleology*, 41, 29-34.

Estrategias de conservación de los cristales de yeso gigantes

Fernando Gázquez^(1,2), Giovanni Badino^(3,4), José-María Calaforra^(2,4) y Paolo Forti^(4,5)

(1) Department of Earth Sciences, Cambridge University, Downing Street, Cambridge, CB2 3EQ, United Kingdom (fg331@cam.ac.uk)

(2) Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Universidad de Almería. Crta.Sacramento s/n, 04120, La Cañada de San Urbano, Almería, Spain (jmcalforra@ual.es)

(3) Department of Physics, University of Torino, Via Pietro Giuria 1, 10125 Torino, Italy (badino@to.infn.it)

(4) La Venta Esplorazioni Geografiche, Via Priamo Tron 35/F, 31100 Treviso (Italy)

(5) Italian Institute of Speleology, Dept of Biological, Geological and Environmental Sciences, University of Bologna. Via Zamboni, 67, 40126. Bologna, Italy (paolo.forti@unibo.it)

RESUMEN

Las investigaciones que han abordado el estudio de cristales de yeso gigantes descubiertos en algunas cavidades se han centrado principalmente en los mecanismos genéticos que dieron lugar a estas anomalías mineralógicas. Sin embargo, poco se sabe acerca de los problemas de conservación que podría conllevar la habilitación de estas cuevas como recursos turísticos. En este trabajo se discuten algunos aspectos sobre su protección y puesta en valor, a través del estudio de dos casos particulares, la geoda gigante de Pulpí (Almería, España) y las cuevas de Naica (Chihuahua, México). Poco después de su descubrimiento, el expolio de cristales con fines comerciales y museísticos supuso una de las principales amenazas para la conservación de estas cuevas. Por otro lado, la monitorización microclimática llevada a cabo durante visitas experimentales ha permitido predecir fenómenos de condensación y disolución de yeso debido a cambios en la temperatura y humedad relativa del aire, que podrían producirse como resultado de su apertura al público. Este mecanismo reduce la transparencia de los cristales, y en muchas ocasiones se ve agravado por la posterior precipitación de costras carbonáticas, resultado de la difusión de CO₂ en el agua de condensación y la consiguiente re-disolución del yeso. Además, la abrasión mecánica producida por las pisadas de visitantes sobre los cristales da lugar al deterioro irreversible de la superficie. En el caso de la Geoda de Pulpí las estrategias de conservación pasa por establecer normativas estrictas y un decálogo de buenas prácticas, destinadas tanto a visitas de carácter científico como a su puesta en valor como recurso turístico. En cuanto a los cristales gigantes de Naica, su conservación en el estado actual conllevaría mantener el nivel freático del acuífero a más de 300 m de profundidad. Esto es posible actualmente gracias al costoso drenaje de la mina, que bombea constantemente más de 1 m³/s. Con el cese de estos bombeos, los cristales gigantes de Naica volverán a yacer bajo el agua del acuífero en un corto espacio de tiempo.

Palabras clave: conservación de cuevas, cristales de yeso, espeleotemas de yeso, Naica, selenita.

Conservation strategies of the giant gypsum crystals

ABSTRACT

To date, investigations focused on the giant gypsum crystals in cavities have been mainly addressed to the mechanisms involved in the genesis of these rare mineralogical features. Nevertheless, the studies about potential impacts derived from the exploitation of these caves as a touristic resource should be mandatory before the opening of these fragile environments to the public. Here, we discuss the most relevant aspects on protecting and potential opening as a touristic resource of the two most prominent examples of caves housing massive gypsum crystals worldwide: The Giant geode of Pulpí (Almería, Spain) and the caves of the Naica mine (Chihuahua, Mexico). In both cases, pillaging was the first threat for the conservations of these speleothems that, on occasions, were

extracted to be sold and exhibited in private collections and museums. Regarding affections to the microclimate of these caves, monitoring climatic parameters during experimental visits have enabled to predict condensation mechanisms and dissolution of the crystal's surfaces due to slight changes in cave air temperature and humidity. This process leads to the loss of transparency of the crystals, and usually this problem is aggravated by the precipitation of carbonate crusts as a result of CO₂ diffusion into condensation water. Also, mechanic abrasion produced by visitors stepping the crystals gives rise to their irreversible deterioration. In the case of the Giant geode of Pulpí, the conservation strategies should be centered in regulating the access to the cave and developing a Decalogue of good practices for both, touristic and scientific visits. In the case of the huge gypsum crystals of the Naica caves, their preservation entails to keep the water table level underneath 300 m deep. Currently, this is possible thanks to the costly water pumping of the mine drainages, which extract over 1 m³/s. Otherwise, the spectacular crystals of Naica will come back to lie again under the aquifer water within a short term.

Keywords: caves preservation, gypsum crystals, gypsum speleothems, Naica, selenite.

INTRODUCCIÓN

La puesta en valor de cuevas como recursos económicos sostenibles implica identificar y minimizar los posibles impactos sobre el patrimonio geológico subterráneo derivados de la actividad turística. Las perturbaciones microclimáticas generadas por la entrada de visitantes y otros impactos derivados de esta actividad se deben estudiar de forma exhaustiva con anterioridad a la apertura al público de la cueva. La temperatura y la humedad relativa del aire, así como la concentración de CO₂ son las principales variables que pueden verse afectadas por la entrada masiva de visitantes (Gillieson, 2009). Estos cambios ambientales pueden dar lugar al deterioro de espeleotemas debido al proceso de corrosión ácida desencadenado por la difusión de CO₂ en el agua de condensación sobre las formaciones subterráneas (Dublyansky and Dublyansky, 1998). Por otro lado, las labores de habilitación y acondicionamiento de cavidades para el uso turístico deben respetar la naturalidad de estos entornos extremadamente frágiles (Cigna y Burri, 2000; Gillieson, 2009).

La degradación artificial de espeleotemas ha sido extensamente estudiada en el ámbito de las cuevas desarrolladas en carbonatos, que representan la gran mayoría de cavidades turísticas (Baker y Genty, 1998). Sin embargo, poco se sabe acerca de los efectos derivados de la explotación turística de cuevas que albergan grandes cristales de yeso. En el presente trabajo se discuten algunos aspectos sobre la protección y puesta en valor de las dos cavidades más relevantes a escala mundial en esta categoría, la geoda gigante de Pulpí (Almería, España) y las cuevas de Naica (Chihuahua, México). En ambos casos, se describen las alteraciones que han sufrido sus cristales desde que fueron descubiertos, los estudios microclimáticos llevados a cabo previos a su hipotética puesta en valor y el impacto sobre el estado de conservación de los cristales de yeso que podría tener su apertura al público. Finalmente, se aportan algunas pautas que se deberían seguir en cuanto a la potencial puesta en valor de estas cavidades.

CRISTALES DE YESO GIGANTES EN EL MUNDO

La presencia de espeleotemas yesíferos en cavidades es muy reducida si se compara con la gran abundancia de concreciones carbonáticas que aparecen en la mayoría de ambientes subterráneos. De forma general, se puede hacer una primera clasificación de los espeleotemas yesíferos atendiendo a su origen, subaéreo o subacuático, que condicionan tanto su morfología como la cristalinidad y transparencia del yeso (Gázquez et al., 2011). En el caso de los espeleotemas de yeso subaéreos, la evaporación de una solución rica en sulfato calcio da lugar a la precipitación de yeso que puede adoptar diversas morfologías en el interior de las cuevas (Hill y Forti, 1997). En cuanto a los espeleotemas de yeso de génesis subacuática, la precipitación se produce bajo el agua y en condiciones hidrotermales. La concentración de sulfato cálcico de la disolución cercana al equilibrio de saturación del yeso da lugar a un proceso de precipitación extremadamente lento (García-Ruiz et al., 2007; Forti, 2010; Sanna et al., 2010, 2011). Como resultado de este mecanismo ordenado de cristalización, la morfología de los espeleotemas generados es la de cristales de gran pureza y transparencia que recibe el nombre de selenita. El

tamaño de los cristales que en muchas ocasiones alcanzan los 11,5 m de longitud, como en el caso de la Cueva de los Cristales de Naica (Chihuahua, México) (Figura 1A; Badino et al., 2009), depende de parámetros tales como la temperatura y el grado de saturación en yeso de la solución, así como del periodo de tiempo durante el cual se produce la cristalización (Forti, 2010).



Figura 1. Cristales gigantes de yeso en la Cueva de los Cristales (A) y la Cueva de las Espadas de Naica (Chihuahua, México) y en la geoda gigante de Pulpí (Almería, España). Fotos A y B: Speleoresearch and Films y La Venta Team; C: Jabier Les.

Sin duda, los espeleotemas de yeso de la Cueva de los Cristales son los que mayor atención mediática han recibido desde su descubrimiento en el año 2000. Sin embargo, éstos no son los únicos cristales de grandes dimensiones que alberga la mina de Naica. De hecho, los primeros documentos escritos que hace referencia a la presencia de grandes cristales de selenita en una cavidad se remonta a los inicios del siglo XX (Degoutin, 1912; Foshag, 1927), momento en el que se descubrió la Cueva de las Espadas, a 120 m de profundidad en esta mina (Figura 1B). Esta cavidad de 80 m de longitud y apenas 15 m de desnivel, alberga cristales de yeso de hasta 2 m de longitud. Cabe destacar, que las paredes y el suelo de la parte más profunda de esta cueva están cubiertas por cristales de selenita ("espadas") recubiertos de capas concéntricas de aragonito, calcita y yeso, cuya formación estuvo relacionada con cambios en la composición química del agua y el nivel freático del acuífero de Naica durante los últimos 60.000 años (Gázquez et al., 2012; 2013).

Aunque la mina de Naica alberga los cristales de yeso selenítico de mayor tamaño descubiertos hasta la fecha, la geoda gigante de Pulpí (Almería, España) es el único ejemplo descrito de una cavidad cuyas paredes, techo y suelo están totalmente cubiertos por cristales pinacoidales de yeso selenítico, lo que la convierten en un elemento geológico único (Figura 1C; García-Guinea et al., 2002). La geoda se encuentra en la Mina Rica del

Pilar de Jaravía y fue descubierta en Diciembre de 1999 por un grupo de coleccionistas de minerales. Otras localizaciones en la que se han encontrado cristales gigantes de yeso son la mina de Debar (Macedonia) donde el tamaño de los cristales alcanza los 7 m de longitud (Stefov *et al.*, 2000), o la mina romana de Lapis Specularis de Segóbriga (Cuenca, España) (García-Ruiz *et al.*, 2008). De igual modo, en la mina de El Teniente (Rancagua, Chile) también aparecen cristales seleníticos de hasta 7 m de longitud en cavidades naturales interceptadas por las galerías mineras (García-Ruiz *et al.*, 2008).

EL EXPOLIO Y LA AMENAZA DEL COLECCIONISMO

Debido a su espectacularidad y rareza, los cristales de yeso gigantes de Naica y Pulpí han sido objeto de comercialización y coleccionismo desde el momento en el que fueron descubiertos. Un importante número de cristales de yeso fueron extraídos de la Cueva de las Espadas de Naica durante la primera mitad de siglo XX. Algunos de estos ejemplares están expuestos en las vitrinas de importantes museos, como el *Smithsonian Museum* de Washington. Por otro lado, coleccionistas privados podrían haber pagado importantes cantidades de dinero por algunas de los espeleotemas de esta cavidad. En la mayor parte de los casos, la extracción de los cristales fue llevada a cabo por los trabajadores de la mina, que vieron en esta actividad una fuente de ingresos alternativa. De un modo similar, la geoda de Pulpí fue objeto de expolio durante el periodo previo a su declaración como "Monumento Natural" por parte de la administración en 2001. De hecho, se extrajeron dos grandes cristales y un importante museo inglés mostró su interés por comprar la totalidad de los cristales de la geoda por una importante suma de dinero. Afortunadamente, estas negociaciones no llegaron a buen puerto y la geoda fue protegida por la administración antes de que se produjera el expolio de más cristales. La extracción de los cristales, generó una enorme cantidad de polvo que posteriormente fue retirado minuciosamente para devolver a los cristales de la geoda su transparencia original (Figura 2A).

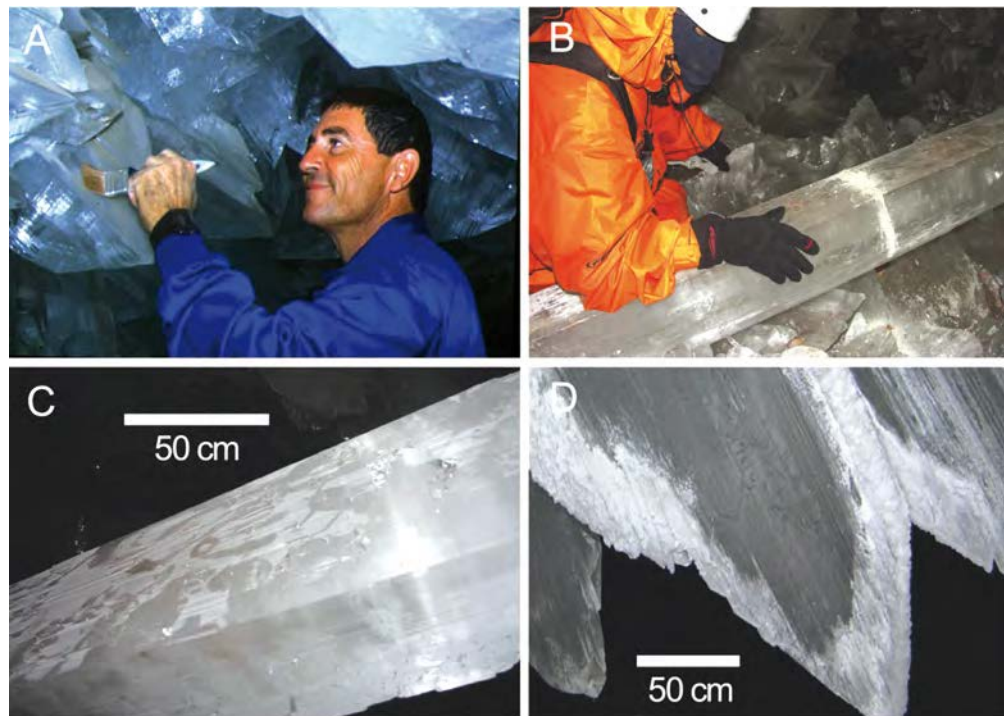


Figura 2. A. Labores de limpieza de la Geoda gigante de Pulpí poco después de su descubrimiento en 1999; B. Marcas de sierra en un cristal de la Cueva de los Cristales de Naica; C. Evidencias de condensación sobre los espeleotemas de la Cueva de los Cristales; D. Costras de minerales hidratados sobre los cristales de Ojo de la Reina de Naica; E. Fragmentos de cristales de yeso que evidencian el expolio de espeleotemas sufrido por la Cueva de los Cristales; F y G (detalle). Marcas sobre un cristal de la Cueva de los Cristales después de un muestreo. (Foto A: Geoda de Pulpí, José María Calaforra; Fotos B a F: José María Calaforra y Paolo Forti).

Evitar este tipo de expolios requiere de la puesta en marcha de un sistema de vigilancia sobre los accesos a la mina, así como una protección jurídica más estricta por parte de la administración (Calaforra *et al.*, 2001). En el caso de las cuevas de Naica, la responsabilidad sobre su conservación y el acceso de visitantes recae sobre la compañía propietaria de la mina. Afortunadamente, esta empresa ha adoptado algunas de las recomendaciones sugeridas por los científicos que investigan estas cavidades sobre la accesibilidad a la Cueva de los Cristales, lo que ha reducido considerablemente el riesgo de expolio. No obstante, esta cavidad sufrió importantes desperfectos poco después de su descubrimiento, y algunos de sus cristales fueron extraídos de forma clandestina. En ocasiones el intento de expolio fue abandonado, como evidencia las marcas dejadas por sierras sobre los cristales (Figura 2B y E). Además, en este caso también el polvo de yeso generado se depositó sobre otros cristales, ensuciándolos y restándole transparencia. Debido a la elevada humedad del aire en esta cueva la deposición húmeda del polvo hace muy difícil su eliminación.

MUESTREOS CIENTÍFICOS

El muestreo de espeleotemas con fines científicos puede generar graves problemas de conservación en cuevas. La recolección de espeleotemas para estudios mineralógicos y paleoclimáticos implica la toma de muestras físicas que restan valor natural y estético a las cavidades (Forti, 2007). En otros casos, los estudios se llevan a cabo sobre espeleotemas desprendidos de forma natural, lo que evita daños mayores. Las cuevas que albergan cristales de yeso gigante no quedan exentas de la amenaza de los muestreos destructivos. En el caso de la geoda gigante de Pulpí, el deterioro producido por los muestreos destructivos ha sido muy limitado hasta la fecha. En la mayoría de casos, los análisis se han llevado a cabo utilizando fragmentos de yeso procedentes de los cristales que bloqueaban la entrada antes de su desobstrucción o de geodas de menor tamaño ubicadas al mismo nivel y parcialmente destruidas por la antigua actividad minera (Gázquez, 2012).

Las labores de muestreo en las cuevas de Naica han sido mucho más intensas durante la última década (Forti y Sanna, 2010; Gázquez *et al.*, 2014). De hecho, más de 15 grupos de investigación de 6 países distintos han estado implicados en investigaciones de diversa índole, muchos de ellos en el marco del Proyecto Naica promovido por el equipo de espeleoaventura La Venta (Bernabei *et al.*, 2009; Forti y Sanna, 2010). En muchos casos estos trabajos de investigación han requerido recogidas de materiales. En la mayor parte de los estudios las muestras fueron de fragmentos de yeso desprendidos o derivados de los cristales expoliados (Figura 2E). En otros pocos casos, el muestreo se realizó con taladros que permitieron extraer testigos de yeso para su posterior análisis (Figura 2F y G).

CAMBIOS AMBIENTALES INDUCIDOS POR LA ACTIVIDAD HUMANA

Al igual que en el caso de los espeleotemas carbonáticos, los espeleotemas de yeso pueden sufrir importantes daños irreversibles derivados de las actividades antrópicas en cuevas. En el caso de los cristales de yeso, los efectos derivados de los procesos de condensación-disolución (corrosión) pueden tener mayores consecuencias como resultado de la elevada solubilidad del yeso, en torno a 10 veces superior a la de la calcita (Ford y Williams, 1989).

Los cambios ambientales de origen antrópico en las cuevas con cristales de yeso pueden dar lugar a un aumento de los fenómenos de condensación. En el caso concreto de las cuevas de Naica, los procesos de condensación vienen derivados del cambio brusco en las condiciones ambientales que experimentó la cueva en las últimas décadas del siglo XX. El bombeo de agua de más de 1 m³/s necesario para drenar la mina dio lugar a que las cuevas al nivel -290 m fueran interceptadas por el nivel freático del acuífero. En consecuencia, las condiciones ambientales en las que se encontraban los cristales de yeso cambiaron de subacuáticas (muy estables y a 55 °C de temperatura) a subaéreas con una temperatura diez grados más baja y un aire saturado en vapor de agua, lo que dio lugar a que las superficies de los cristales se vieran expuestas a mecanismos de condensación. Este proceso es evidente en muchos de los espeleotemas, que presentan pátinas blancas que disminuyen considerablemente su transparencia (Figura 2C).

Por otro lado, la aparición de minerales neoformados sobre la superficie de los cristales se ha hecho patente tanto en la Cueva de los Cristales, como en otras cavidades al nivel -290 m, como es el caso de Ojo de la Reina. En esta cueva se han observado eflorescencias y costras de minerales hidratados, principalmente sulfatos de sodio y magnesio con diferentes grados de hidratación que surgen principalmente a partir de los planos de exfoliación de los cristales y coincidiendo con la cara 010 del yeso (Figura 2D; Badino et al., 2011). Este mecanismo se ha relacionado con la apertura de inclusiones fluidas atrapadas en los espeleotemas y la salida de esta disolución altamente salina hacia el interior de la cavidad. Los procesos de evaporación producidos por pequeñas diferencias microclimáticas entre la temperatura de los cristales y la del aire de la cueva dieron lugar a la aparición de estas eflorescencias salinas (Badino et al., 2011). Tanto en Ojo de la Reina como en la Cueva de los Cristales, la difusión de dióxido de carbono en el agua de condensación sobre los cristales permite la aparición de costras carbonáticas, principalmente de calcita con trazas de aragonito e hidromagnesita, que en muchos casos tienden a sustituir al yeso, provocando el deterioro de los cristales (Badino et al., 2011).

En el caso de la Cueva de los Cristales, la temperatura del aire experimentó una disminución drástica desde su descubrimiento en el año 2000 hasta 2007 (Figura 3). Este hecho se debió al escaso control que hubo inicialmente sobre la puerta de acceso a la cueva y a la intensa circulación de aire en las galerías mineras adyacentes, en las cuales la temperatura del aire es mucho más baja (Figura 3). A partir del año 2007 y siguiendo las recomendaciones científicas, el control sobre la apertura de la puerta fue exhaustivo, con lo que se ha conseguido un aumento considerable de la temperatura del aire en el interior de la cueva, lo que disminuye la posibilidad de que el vapor de agua condense sobre los cristales.

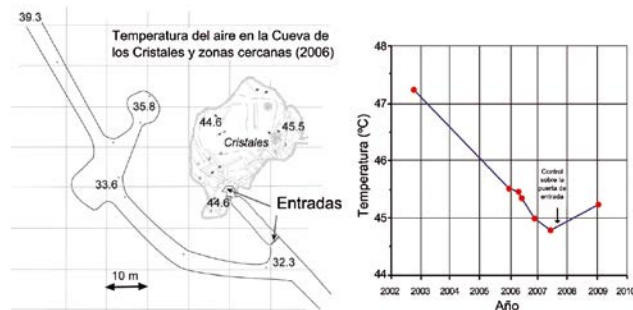


Figura 3. Temperatura del aire en la Cueva de los Cristales y zonas adyacentes (-290 m) y evolución de la temperatura del aire en la cueva (-290 m) desde su descubrimiento (modificado de Badino et al., 2009).

En el caso de la Geoda gigante de Pulpí, los estudios de los parámetros microambientales también revelaron que la condensación es el principal factor a tener en cuenta en cuanto a su conservación, y que ésta representa el factor limitante para su puesta en valor como recurso turístico, entre otros factores. En este caso, la temperatura de la superficie de los cristales de yeso es de en torno a 19,4 °C, mientras que la del aire en el interior en las galerías mineras es de 19,2 °C. La humedad relativa en condiciones naturales es aproximadamente del 65 % (Figura 4; Fernández-Cortés et al., 2006a,b).

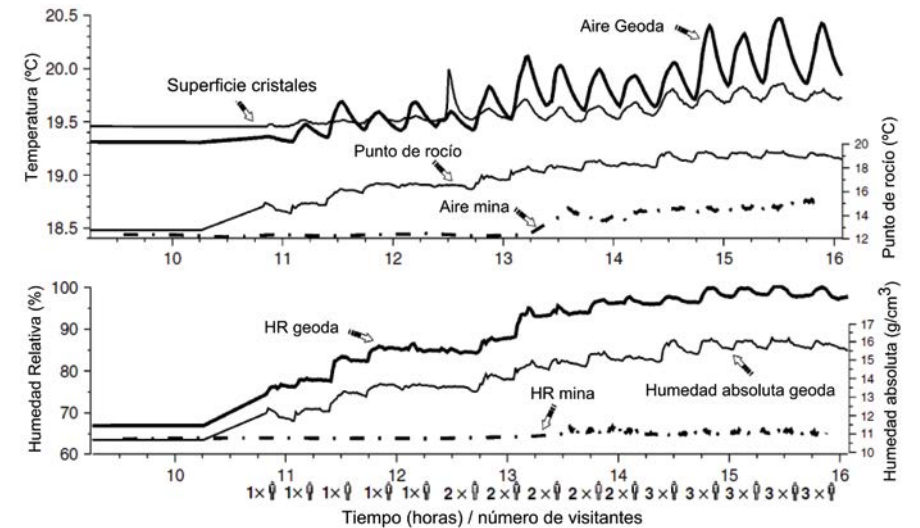


Figura 4. Monitorización de variables microclimáticas (humedad y temperatura del aire y temperatura de la superficie del yeso) en la geoda gigante de Pulpí durante experiencias de visitas controladas (modificado de Fernández-Cortés et al., 2006a).

Las experiencias de entrada de visitantes pusieron de manifiesto que las visitas continuadas de grupos de dos o tres personas durante más de 10 minutos desencadenan fenómenos de condensación/evaporación, con el consecuente deterioro de los espeleotemas de yeso. Tras la entrada de 30 personas a lo largo de un periodo de 16 horas, la temperatura del aire aumentó en más de 1 °C, mientras que la de la superficie de los cristales aumentó 0,3 °C. Por su parte, la humedad relativa del aire aumentó hasta el 100 % en 14 horas (Figura 4). El tiempo de recuperación de estos parámetros microambientales a valores anteriores a los de las experiencias es de más de 1 día. Estos estudios concluyeron que la puesta en valor de la geoda de Pulpí como cavidad turística “tradicional”, con contacto directo entre los visitantes y los cristales es inviable por el alto riesgo de deterioro de los cristales (Fernández-Cortés et al., 2006b).

EL FUTURO DE LOS CRISTALES GIGANTES Y PROPUESTAS DE CONSERVACIÓN

A priori, se podría pensar que los cambios ambientales provocados por el descenso brusco del nivel freático en el acuífero de Naica representan la principal amenaza para la conservación de los grandes cristales tal y como los conocemos en la actualidad, principalmente debido a los procesos de condensación y disolución del yeso. Sin embargo, el principal riesgo al que están sometidas las cuevas al nivel -290 m de la mina de Naica es el restablecimiento de las condiciones freáticas que se producirá en pocos años, cuando la actividad minera deje de ser rentable y cese la extracción de agua necesaria para mantener el nivel del agua por debajo del frente minero, que en la actualidad se encuentra en torno a 900 m de profundidad. El coste económico que supone la extracción de 1 m³/s de agua de esta profundidad es tal, que mantener el nivel freático en su posición actual será inviable en el momento en el que cese la extracción de mineral. En consecuencia, en pocos años el nivel del acuífero volverá a su cota natural, en torno a 120 m de profundidad, coincidiendo con la parte más profunda de la Cueva de las Espadas (Figura 5). De hecho, este es el nivel al que se encontraba a principios del siglo XX cuando comenzó la explotación de la mina de Naica (Gázquez et al., 2012; 2013). De este modo se abre un de-

bate acerca de la posibilidad de extraer los cristales de la cueva para su exposición *ex situ* antes de que la cueva quede anegada para siempre. Sin embargo, y como es lógico, esta opción no estaría exenta de polémica y daría lugar a una gran controversia ética sobre cuál sería la opción más adecuada, la extracción de los cristales o su permanencia en la cueva, donde quedarían inaccesibles y bajo el agua del acuífero en pocos años.

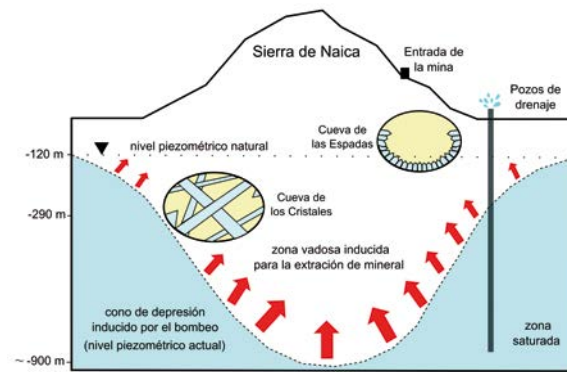


Figura 5. Situación actual del nivel piezométrico en la mina de Naica. Los pozos de drenaje de la mina mantienen el nivel en torno a 900 m de profundidad en la actualidad mediante el bombeo de más de 1 m³/s. Las cavidades al nivel -290 m, entre las que se encuentra la Cueva de los Cristales, fueron descubiertas gracias a esta bajada inducida del nivel freático. Tras el cese de las actividades mineras, que está previsto que ocurra en menos de 5 años, el nivel del acuífero se situará en torno a -120 m, coincidiendo con la parte profunda de la Cueva de las Espadas y donde se situaba antes del inicio de las actividades mineras.

Un caso muy distinto, y probablemente más interesante desde el punto de vista de su potencial puesta en valor como recurso turístico es el de la geoda gigante de Pulpí. Como se ha comentado anteriormente, los estudios microclimáticos concluyeron que la entrada periódica de visitantes a esta cavidad daría lugar a un deterioro irreversible de los cristales de yeso, principalmente debido a los procesos de condensación y disolución. Además se suman otros inconvenientes como la abrasión que sufren los cristales cuando los visitantes caminan y se deslizan sobre ellos y la posibilidad de contaminación microbiológica que podrían conllevar la entrada masiva de personas a un habitáculo tan reducido con una ventilación natural prácticamente nula. Esto no solo podría suponer un perjuicio para los cristales de yeso por la posible proliferación de microorganismos, sino para la salud de los visitantes (Jurado *et al.*, 2010), que sumados al aumento de la concentración de CO₂ y la disminución de la concentración de O₂ harían inviable su habilitación como cueva turística. No se deberían descartar los posibles problemas por alta concentración de radón, cuya concentración en el aire de la geoda no ha sido determinada hasta el momento.

Descartada la posibilidad de una apertura de la Geoda de Pulpí como una cueva turística “tradicional”, la cual implicaría el contacto directo entre el visitante y los cristales, se plantea acciones mínimamente invasivas y que pudieran llevar a la apertura de la geoda como recurso turístico. La alternativa más realista propuesta hasta la fecha sería la apertura de una claraboya transparente a través de la cual el visitante pudiera contemplar los cristales iluminados mediante luces frías, sin contacto directo con la atmósfera interior. Esta actuación debería ir acompañada de otras como son el acondicionamiento de la mina para recibir visitantes, así como la construcción de un centro de interpretación en superficie que podrían incluso albergar una réplica de la geoda gigante que sí pudiera ser accesible para los visitantes.

A parte de estas acciones futuras que dependerán en mayor parte de voluntades políticas e intereses empresariales, se deben establecer una serie de medidas y normas que se deberían cumplir para evitar el deterioro de la Geoda de Pulpí antes de que esta sea habilitada finalmente. Actualmente, el acceso a la misma está restringido a grupos reducidos con fines científicos. Aunque en 2001 la geoda fue declarada “Monumento Natural” por la Junta de Andalucía, no existe una normativa específica sobre el acceso y las precauciones y normas de seguridad

que se deberían cumplir durante estas visitas excepcionales. Uno de los principales perjuicios producidos por la entrada de visitantes en la geoda, además de los problemas microclimáticos, es la abrasión mecánica de los cristales al caminar y deslizarse sobre ellos. Para evitar este inconveniente los visitantes deberían acceder descalzados a la geoda. De igual modo, los golpes accidentales a cristales en el techo pueden producir desperfectos irreparables, especialmente cuando los visitantes van provistos de casco. Por ello, para el acceso a la geoda (que no a la mina) se desaconseja el uso del casco, lo que hace que los visitantes estén más atentos y eviten los golpes con los cristales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

Las características excepcionales de los cristales de yeso gigantes descubiertos en las cuevas de Naica y en la geoda de Pulpí requieren de unas medidas de conservación especiales y que difieren sustancialmente de las que se suelen adoptar para la puesta en valor de cuevas en materiales carbonáticos. La gran solubilidad del yeso comparada con la de la calcita hace que la condensación sea el factor principal a tener en cuenta para la conservación de los espeleotemas constituidos por este mineral. De hecho, los estudios microclimáticos previos tanto en la Cueva de los Cristales de Naica como en la geoda de Pulpí han revelado que pequeños cambios en la temperatura y humedad del aire dan lugar a problemas de condensación que implican la disolución parcial del yeso y su pérdida de transparencia. En cuanto a los problemas de abrasión mecánica, el establecimiento de una normativa estricta sobre la indumentaria de los visitantes podría ayudar a mantener un estado óptimo de conservación de los cristales. Por otro lado, las normativas también deberían ir dirigidas a regular los trabajos científicos desarrollados en estas cuevas, de forma que no se permita la toma de muestras físicas salvo que estas sean fragmentos desprendidos naturalmente o derivados de daños previos.

La Cueva de los Cristales y las demás cavidades al nivel -290 m de la mina de Naica se harán inaccesibles en un plazo de tiempo probablemente no superior a 5 años y que dependerá del cese de las actividades mineras, cuando la explotación de la mina no sea rentable. Debido al elevado coste que supone mantener el nivel freático a una profundidad superior a 300 m de profundidad, estas cuevas quedaran anegadas poco después de que los bombeos que drenan la mina sean abandonados. En consecuencia, los grandes cristales volverán a yacer bajo el agua del acuífero. Un futuro distinto a este para los cristales de Naica parece poco probable. En el caso de la geoda de Pulpí, la habilitación turística podría ser viable, siempre que ésta no implique el contacto directo entre los visitantes y la cavidad, así como de que las actuaciones de acondicionamiento acometidas fueran de carácter mínimamente invasivo. Para ello se propone generar una claraboya que permita a los visitantes asomarse para observar los cristales sin perturbar el ambiente de la geoda. Probablemente, el escoyo más importante que habrá que salvar para su puesta en valor será que la administración pública y las empresas privadas interesadas firmen un acuerdo para la realización de este proyecto, cuya ejecución se lleva retrasando durante más de una década.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los fondos del Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la UAL y la beca predoctoral AP-2007-02799 del MICINN. Se agradece a D. Manuel Guerrero la ayuda prestada durante las visitas a la mina de Pulpí, a la compañía Peñoles, propietaria de la mina de Naica y al equipo de Exploraciones Geográficas “La Venta” que facilitaron el acceso a la mina de Naica.

REFERENCIAS

- Badino, G., Ferreira, A., Forti, P., Giovine, G., Giulivo, I., Infante, G., Lo Mastro, F., Sanna, L. y Tedeschi, R. 2009. The Naica caves survey. En: White, W.B. (ed.): *Proceedings of 15th International Congress of Speleology*, Kerrville, Texas-USA, 3, 1764-1769.
- Badino, G., Calaforra, J.M., Forti, P., Garofalo, P. y Sanna, L. 2011. The present day genesis and evolution of cave minerals inside the Ojo de la Reina cave (Naica Mine, Mexico). *International Journal of Speleology*, 40(2), 125-131.

- Baker, A y Genty, D. 1998. Environmental pressures on conserving cave speleothems: effects of changing surface land use and increased cave tourism. *Journal of Environmental Management*, 53, 165-175.
- Bernabei, T., Casagrande, G., Davila, A., De Vivo, A., Ferreira, A., Giovine, G., Infante, G. y Lo Mastro, F. 2009. The Naica Project: En White W.B., ed., *Proceedings 15th International Congress of Speleology*, Kerrville, Texas, 1, 283-288.
- Calaforra, J. M. Moreno, R. García-Guinea, J. Guerrero, M. y Romero, A., 2001. La geoda gigante de Pulpí (The giant Geode of Pulpí): Patrimonio geológico y minero. *Medio Ambiente*. 37, 42-43.
- Cigna, A. y Burri, E. 2000. Development, management and economy of show caves. *International Journal of Speleology*, 29, 1-27.
- Degoutin, N. 1912. Les grottes a cristaux de gypse de Naica. *Societat Científica Antonio Alzate*, 32, 35-38.
- Dublyansky, V.N. y Dublyansky, Y.V. 1998. The problem of condensation in karst studies. *Journal of Caves and Karst Studies*, 60(1), 3-17.
- Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M., Sánchez-Martos, F. y Gisbert, J. 2006a. Microclimate processes characterization of the giant Geode of Pulpí (Almería, Spain): technical criteria for conservation. *International Journal of Climatology*, 26, 691-706.
- Fernández-Cortés, A., Calaforra, J. M. y García-Guinea, J. 2006b. The Pulpí gigantic geode (Almería, Spain): geology, metal pollution, microclimatology and conservation. *Environmental Geology*, 50(5), 707-716.
- Ford, D. C. y Williams, P. W. 1989. Karst geomorphology and hydrology. *London Unwin Hyman*, 601 pp.
- Forti, P. 2007. Sampling or not? What kind of data can be extracted from a cave? Some easy rules to conduct science in-caves with minimal impact. *Focus (Universidad Inter-americana de Puerto Rico) VI(1-2)*, 45-56.
- Forti, P. 2010. Genesis and evolution of the caves in the Naica mine (Chihuahua, Mexico). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 54(2), 115-135.
- Forti, P. y Sanna, L. 2010. The Naica project. A multidisciplinary study of the largest gypsum crystal of the world. *Episodes*, 33(1), 23-32.
- Foshag, W. 1927. The selenite caves of Naica, Mexico. *American Mineralogist*, 12, 252-256.
- 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.
- García-Ruiz, J. M., Villasuso, R., Ayora, C., Canals, A. y Otálora, F. 2007. Formation of Natural Gypsum Megacrystals in Naica, Mexico. *Geology*, 35(4), 327-330.
- García-Ruiz J. M., Canals, A. y Ayora, C. 2008. Gypsum Megacrystals. *McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology (McGraw-Hill, New York)*, pp 154–156.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Sanna, L. y Forti, P. 2011. Espeleotemas de yeso: ¿Un nuevo proxy paleoclimático? *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, 105 (1-4), 15-24.
- Gázquez, F. 2012. Registros paleoambientales a partir de espeleotemas yesíferos y carbonáticos. *Tesis Doctoral. Universidad de Almería*. España. 381 pp.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Forti, P., Rull, F. y Martínez-Frías, J. 2012. Gypsum-carbonate speleothems from Cueva de las Espadas (Naica mine, Mexico): mineralogy and palaeohydrogeological implications. *International Journal of Speleology*, 41 (2), 211-220.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Stoll, H., Sanna, L., Forti, P., Lauritzen S-E., Delgado, A. y Martínez-Frías, J. 2013. Isotope and trace element evolution of the Naica aquifer (Chihuahua, Mexico) over the past 60,000 yr revealed by speleothems. *Quaternary Research*. 80, 510–521.
- Gázquez, F., Calaforra, J. M., Forti, P. y Badino, G. 2014. The Caves of Naica: A decade of Research. *Boletín Geológico y Minero* (aceptado).
- Guillieson, D., 2009. Cave management. En: *Processes, Development and Management* (Eds. Guillieson, D). Wiley. 237-267.
- Hill, C. A. y Forti, P. 1997. Cave minerals of the World 2. *National Speleological Society, Huntsville*. 461 pp.
- Jurado, V., Laiz, L., Rodríguez-Nava, V., Boiron, P., Hermosin, B., Sánchez-Moral, S. y Saiz-Jiménez, C. 2010. Pathogenic and opportunistic microorganisms in caves. *International Journal of Speleology*, 39, 15-21.
- Sanna, L., Saez, F., Simonsen, S., Constantin, S., Calaforra, J.M., Forti, P. y Lauritzen, S.E. 2010. Uranium-series dating of gypsum speleothems: methodology and examples. *International Journal of Speleology*, 39(1), 35-46.
- Sanna, L., Forti, P. y Lauritzen, S. E., 2011. Preliminary U/Th dating and the evolution of gypsum crystals in Naica caves (Mexico). *Acta Carsologica*, 40 (1), 17–28.
- Stefov, V., Jovanovski, G., Soptrajanov, B., Minceva-Sukarova, B., Dimitrovska, S. y Boev, B. 2000. Minerals from Macedonia. *Geologica Macedonica*, 14, 61-66.

La cueva de Luchena, un ejemplo de cavidad hipogénica relacionada con descargas de aguas subterráneas en el acuífero Pericay-Luchena (Lorca, Murcia)

Antonio González-Ramón^(1,2), Andrés Segura-Herrera⁽²⁾, Tomás J. Sánchez-Díaz⁽²⁾, Alex Ignatenko⁽²⁾, Raúl D. Gea-López⁽²⁾, Pedro Pérez-Martínez⁽²⁾, Gonzalo Belmonte-Jiménez⁽²⁾ y Rubén Carra-Vélez⁽²⁾

(1) Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. Unidad del IGME en Granada (antonio.gonzalez@igme.es)

(2) Asociación de Espeleólogos Velezanos (espeleovelez@gmail.com)

RESUMEN

El cañón del río Luchena es una incisión en la Sierra del Pericay (O de Murcia) que la parte del NO al SE. A su salida se localiza el manantial de los Ojos de Luchena, el más caudaloso del entorno, con una descarga media de unos 210 l/s y aguas ligeramente termales. Cerca del punto de surgencia hay una cavidad de marcados rasgos hipogénicos, con formas de disolución muy bien definidas pues apenas existen recubrimientos litoquímicos que las enmascaren. Su plano topográfico ha sido levantado entre 2011 y 2013 por la Asociación de Espeleólogos Velezanos (AEV). El desarrollo medido fue de 561 m con un desnivel de 41 m, lo que la convierte en la principal cueva del término de Lorca, en el que se encuentra, y entre las 10 cavidades más extensas de la provincia de Murcia, según el catálogo que la Federación Murciana de Espeleología mantiene en su web. La génesis de la cavidad aparece íntimamente relacionada con la evolución durante el Cuaternario del cañón del río Luchena, y con el manantial que se localiza a su salida, único punto de descarga del extenso acuífero carbonatado y kárstico de Pericay-Luchena. La presencia de una falla de borde que superpone margas y margocalizas sobre carbonatos jurásicos que constituyen el acuífero, provoca el flujo de agua de circulación profunda hacia el manantial. La evolución del cañón ha ocasionado que el punto de surgencia vaya variando su cota conforme éste se encaja. La cueva puede interpretarse como una cavidad relacionada con la paleosurgencia del manantial en un momento de estabilidad en el encajamiento del cauce, a unos 100 m por encima de la cota actual. En la cueva se reconocen rasgos característicos de cavidades hipogénicas tales como *feeders*, *outlets*, *mega-scallops*, cúpulas, y canales de convección en paredes y techos, que aparecen especialmente bien expuestos. Las galerías se adaptan a los planos de estratificación inclinados unos 70° al SE y a fracturas más o menos verticales. Esto provoca la presencia de galerías laberínticas en planos verticalizados, con dos niveles de galerías horizontales, que podrían indicar un desarrollo de la cavidad en dos fases. Los espeleotemas son escasos y se limitan a zonas muy concretas, lo que puede interpretarse como un signo de juventud de la cavidad.

Palabras clave: Cañón fluviokárstico, flujos regionales, karstificación hipogénica, Ojos de Luchena, termalismo.

Luchena cave, an example of hypogenic cave related to the discharge of the Pericay-Luchena aquifer (Lorca, Murcia)

ABSTRACT

The Luchena river canyon is an incision in the Pericay range (O of Murcia) which cuts the range from NW to SE. The Ojos de Luchena spring is located at the end of the canyon, and is the most copious spring on the area, with a flow

around 210 l/s in average, and slightly thermal waters. Near to the spring there is a cave with evident hypogenic features, with very well exposed dissolution features because there are scarce speleothems which can hide them. The topographic map was made by the Asociación de Espeleólogos Velezanos (AEV) in 2011-2013. The cave has 561 m in length and 41 m in depth. Actually, the cave is the largest in the municipality of Lorca, and it is one of 10 most important ones in the Murcia province because of its dimensions. The genesis of the cave is closely related to the evolution of the Luchena river canyon during the Quaternary age and with the Ojos de Luchena spring. The spring is the only discharge-point of the vast karstic carbonate aquifer of Pericay-Luchena. Due to a boundary fault, marls and marly limestone overlie the Jurassic limestone that formed the aquifer, and cause the existence of deep water with upflow to the spring. The evolution of the canyon morphology determines that the spring changed his location due the river incision in the canyon. The cave is the consequence of this, because is related to former position of the spring during a stage of stability in the canyon evolution, around 100 m over the current channel. In the cave it is easy to recognize characteristic features of the hypogenic caves such as feeders, outlets, megascallops, cupolas, rising chains of cupolas and rising wall channels. Passages are related to bedding planes, dipping 70° to the SE, and with almost vertical fractures. For this reason, there is a verticalized labyrinth of passages, with two main horizontal levels of galleries, which may indicate the development of the cave in two stages. Speleothems are scarce and only they are in very specific places, which could be interpreted as a sign of youthfulness in the genesis of the cave.

Keywords: fluviokarstic canyon, hypogenic karstification, Ojos de Luchena, regional flows, thermal springs.

INTRODUCCIÓN

Las cuevas hipogénicas responden por lo general a cavidades generadas en condiciones en las que el flujo de agua subterránea se encuentra confinado, con circulación vertical ascendente y a velocidades lentas. Este tipo de flujo aparece frecuentemente en relación con circulación regional en bordes de acuíferos extensos y en zonas de descarga, donde materiales de baja permeabilidad se superponen a la formación permeable (Klimchouk, 2007). El desarrollo kárstico de oquedades puede generarse por varios mecanismos, uno de ellos es el enfriamiento del agua conforme asciende hacia los puntos de salida, que modifica su estado de saturación en calcita y dolomita (espeleogénesis hidrotermal) (Ford y Williams, 1989). También la mezcla de agua de circulación profunda de elevada salinidad con agua de infiltración superficial y salinidad más baja puede producir karstificación (Palmer, 1991). Por otra parte, si en el agua de circulación profunda existe H₂S en disolución, su oxidación por mezcla con aguas superficiales bien oxigenadas produce espeleogénesis hipogénica, lo que no parece ser el caso de la cueva de Luchena. Estos procesos dan lugar a unas morfologías características que quedan esculpidas en las paredes y techos de las cavidades (Forti et al., 2002; Klimchouk, 2007). La disolución puede producirse a favor de superficies de estratificación buzantes o de zonas fracturadas más o menos verticales, en cuyo caso la cavidad suele presentar un desarrollo en planta fuertemente inclinado. Frecuentemente el agua es termal o ligeramente termal, pero esta no es una condición indispensable (Klimchouk et al., 2000).

Los vacíos generados por la karstificación hipogénica, por lo general, no están abiertos al exterior hasta que la acción erosiva en laderas y valles los corta. A veces las cavidades aparecen en las laderas de cañones kársticos íntimamente relacionadas con la propia evolución del cañón, como ocurre en la cueva francesa de la Adouste (Audra et al., 2002), donde estos autores han podido reconocer, dentro de la cavidad, rasgos asociados a la evolución del cañón desde el Mioceno superior hasta el Cuaternario, que habían sido descritos previamente por otros autores (Clauzon, 1979, 1988; Delange, 1997, entre otros). La cueva de Luchena aparece igualmente asociada a un cañón encajado en calizas jurásicas, y en ella pueden reconocerse algunos rasgos similares a la cueva francesa, cuya morfología en su parte más profunda, se adapta a la inclinación de las capas jurásicas, que presentan fuertes buzamientos, algo que también ocurre en la cueva de Luchena.

El objetivo del trabajo que se expone aquí es la descripción de la cavidad, donde se reconocen muy bien morfologías hipogénicas de disolución en las paredes y techos de las galerías, así como la interpretación de los rasgos estructurales que han favorecido su génesis y su relación con la evolución del cañón del río Luchena.

CONTEXTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La Sierra del Pericay, donde se ubica la cueva, se encuentra en la zona occidental de la provincia de Murcia, cerca del límite con la de Almería y en el término municipal de Lorca (Figura 1). Está formada por una serie mesozoica incluida en el Subbético Interno, y es la continuación hacia oriente de las sierras de María, Muela y Gigante. La sierra está constituida por afloramientos de calizas y dolomías del Lías-Dogger (formaciones Gavilán y Camarena según Rey, 1993) con potencias del orden de 700 m. Tiene una orientación cercana a N-S, con los carbonatos estructurados en un pliegue sinclinal seguido de un anticlinal y el borde E definido por una falla (Figuras 2 y 3) que separa los carbonatos jurásicos de las margas y margocalizas cretácicas de la Formación Capas Rojas (Cretácico superior-Paleógeno).

El río Luchena nace en la confluencia de los ríos Caramel o Alcaide y la Rambla Mayor, discurre hacia el SE hasta su encuentro con el promontorio jurásico, al que corta de parte a parte generando un espectacular cañón fluviokárstico. En la entrada del cañón se encuentra la cerrada del embalse de Valdeinfierno, actualmente colmatado y sólo utilizado para prevención de avenidas. En su salida se localiza el caudaloso manantial de los Ojos de Luchena, que en realidad es una galería de varios cientos de metros de longitud que sigue el cauce del río y cuya salida se encuentra a 575 m s.n.m.

La cueva de Luchena se sitúa también en esta zona a una cota de 666 metros. La entrada a la cueva se abre a 86 metros por encima del cauce del río. Se trata de una boca redondeada que ha sido abierta por retroceso erosivo de las laderas (Figuras 4 y 5). Este hecho es evidente, pues ni siquiera constituye el punto más elevado de la cueva, ya que una parte de sus galerías se desarrollan a cotas superiores. El entorno geológico en el que se ubica, está caracterizado por la existencia de una falla que separa los carbonatos jurásicos de margas y margocalizas cretácicas y terciarias que forman una barrera de baja permeabilidad (Figuras 2 y 3).

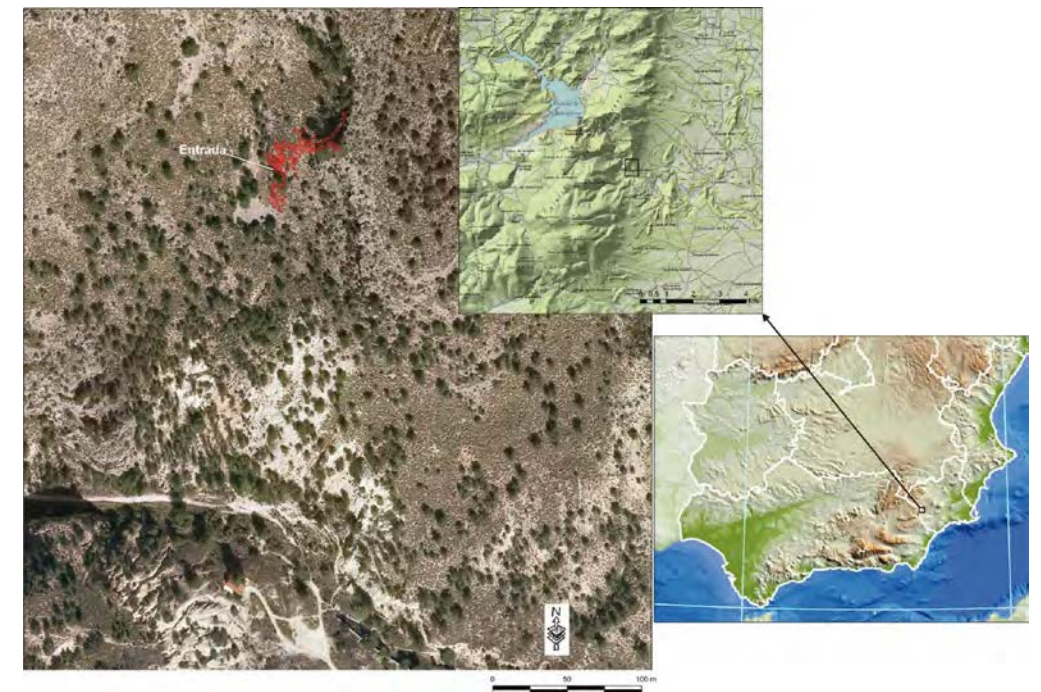


Figura 1. Situación geográfica de la Cueva de Luchena, en color rojo aparece la planta de la cavidad proyectada sobre la ortofoto del IGN. Los mapas de situación han sido tomados de IBERPIX.

El manantial de los Ojos de Luchena es el principal punto de descarga de un extenso acuífero que comprende los afloramientos carbonatados de las Sierras de Pericay, Larga y el Gabar incluidos a efectos de gestión en la Masa de Agua Subterránea nº 071.043 (Valdeinfierno). La superficie de afloramientos es del orden de 100 km² (Rodríguez Estrella, 1995). El manantial está dentro de las redes de control que mantiene la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), por esta razón su caudal y su quimismo son actualmente controlados mensualmente. Esta información puede consultarse en su página web (www.chsegura.es). Su caudal medio fue de 212 l/s en el periodo 2008/09-2011/12; el agua es ligeramente termal, con una temperatura variable entre 21 y 24 °C, lo que indica que ha circulado a profundidades altas y su surgencia está asociada a flujos verticales ascendentes. Además, tiene una elevada salinidad, con una conductividad eléctrica superior a 3100 µS/cm y altos valores en Cl⁻ (entre 375 y 410 mg/l) y SO₄²⁻ (>900 mg/l), que pone de manifiesto una posible relación con un sustrato evaporítico, posiblemente triásico. Según la información aportada por la CHS, el agua tiene un potencial redox alto (Eh ≈ 200 mV), que indica condiciones oxidantes, lo que excluye la presencia de gases como el H₂S y sugiere cierto grado de mezcla con aguas de infiltración reciente bien oxigenadas. Por otra parte, no se han reconocido travertinos asociados al manantial o al cauce en ningún punto, lo que indica que no existen condiciones incrustantes y el agua debe estar en equilibrio o subsaturada con respecto a la calcita y dolomita. El valor del nitrato es muy bajo (1-2 mg/l) y el amonio y el nitrito están ausentes, lo que es nuevamente un indicio de aguas oxidantes y antiguas, con circulación profunda.

ESPELEOGÉNESIS

La cueva se localiza cerca de la zona de contacto entre los carbonatos jurásicos y la barrera impermeable formada por las margas y margocalizas del Cretácico-Terciario que limitan el acuífero por el E (Figuras 2 y 3). Las galerías se adaptan, a grandes rasgos, a las superficies de estratificación, inclinadas hacia el E del orden de 60-70° si bien se pueden observar dos niveles con desarrollo de galerías horizontales situados a cotas en torno a 650 m el nivel superior y a 635 m el inferior (Figura 4).



Figuras 2. Interpretación geológica de la salida del Cañón del Río Luchena, en la zona donde se localiza la cueva. La fotografía está orientada del SO (izquierda) al NE (derecha).

En la Figura 3 se muestra un esquema interpretativo sobre las condiciones hidrogeológicas que favorecieron la formación de la cavidad. Según Baena et al. (1977), la formación jurásica estaría cabalgando a la formación Capas Rojas en esta zona, con una estructura en la que apenas habría enraizamiento del acuífero en profundidad, lo que contrasta con la presencia de una importante zona saturada puesta de manifiesto por la existencia de flujos profundos que explican el termalismo. Por otra parte, tampoco el quimismo del agua encaja con esta disposición geológica, pues muestra relación con materiales evaporíticos que no existen en la Formación Capas Rojas. Otros autores (Fernández-Fernández, 2003; Jabaloy et al., 2007) interpretan el contacto entre las formaciones jurásicas que conforman la Sierra de Pericay y la Formación Capas Rojas como una falla normal que tendría una edad prerogénica, es decir, anterior al orógeno bético que deformó la plataforma mesozoica durante el Mioceno. La existencia de un contacto por falla normal encaja con las observaciones de campo, donde las margas y margocalizas cretácico-terciarias están superpuestas a los carbonatos jurásicos en el punto de surgencia del manantial de Luchena. Por otra parte, esta estructura es coherente con la información hidro-

geológica estudiada, si bien, sería necesaria la presencia de un sustrato impermeable triásico, que por ahora no ha sido reconocido en ninguno de los trabajos geológicos o estructurales realizados en la zona.

Los flujos regionales que circulan por el acuífero adquieren componentes verticales al alcanzar la barrera de baja permeabilidad provocada por la presencia de las margas y margocalizas de la Formación Capas Rojas, que constituye el límite lateral del acuífero. Al iniciar su ascenso hacia la superficie el agua, cargada en CO₂ disuelto, se enfría lo que incrementa su agresividad y favorece la disolución de la roca al penetrar por las fisuras y superficies de estratificación. Las diferencias de densidad provocadas por variables geoquímicas o por contrastes térmicos generan corrientes convectivas (Klimchouk, 1997) que dan lugar a características morfológicas de disolución en las paredes, a la génesis de galerías coalescentes y a la presencia de morfológicas de techo por acumulación de burbujas de gas o por flujos agresivos ascendentes. La agresividad del agua también ha podido estar favorecida por mezclas, cerca del punto de surgencia, con agua de infiltración meteórica, más fría y oxigenada.

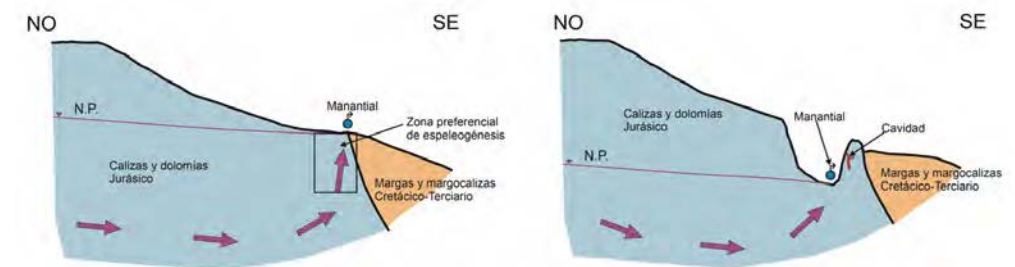


Figura 3. A la izquierda se esquematiza el contexto geológico e hidrogeológico en el que podría haberse generado la cueva de Luchena. El esquema de la derecha muestra la situación actual. Las flechas moradas indican las líneas de flujo regionales asociadas al acuífero Pericay-Luchena.

Según Klimchouk (2007) el conjunto de morfológicas que identifican una cueva hipogénica consiste en: canales de alimentación (*feeders*), formas de transición en paredes y techo, y canales de salida (*outlets*). Estos tres rasgos pueden reconocerse en la cavidad estudiada (Figuras 4 y 5).

Durante las labores de topografía de la cavidad se han podido localizar dos canales de alimentación situados a diferentes cotas, el inferior alcanza la zona más profunda de la cavidad, se trata de una sima estrecha pero penetrable de unos 5 m de profundidad que se encuentra a -29 m desde la boca de entrada. El segundo *feeder* tiene una profundidad similar pero su base se localiza unos 15 m más elevada, en la *Galería de la Cortina*. Por otra parte se han reconocido al menos 3 chimeneas (*outlets*), también a distintas cotas, la inferior da nombre a la *Sala de la Chimenea*, tiene 6 m de longitud y está parcialmente recubierta de espeleotemas. En el *Sector Zarpazos* se localiza otra chimenea de gran longitud y paredes lisas que hasta la fecha no ha podido ser explorada. En las galerías que conectan los *feeders* con los *outlets* se reconocen muchas de las morfológicas de disolución características de cuevas hipogénicas en techos y paredes, tales como cadenas de cúpulas ascendentes (*rising chain of cupolas*), cúpulas de techo (*ceiling cupolas*), canales de convección, conductos coalescentes conectados o no (*rising wall channels*), tabiques (*partitions*) y terminaciones ciegas de pasajes laterales que indican patrones de flujos cerrados ascendentes. En resumen, en la cavidad se reconoce todo el conjunto de formas que Klimchouk (2007) ha denominado como *morphologic suite of rising flow* (MSRF).

La presencia de canales de alimentación a distintas cotas sugiere la posibilidad de que la cavidad se generase en dos fases, lo que explicaría el nivel de galerías horizontales superiores, denominadas como *Sector Zarpazos* por la presencia de numerosas marcas de zarpas de mamíferos carnívoros que utilizan la cavidad. Por otra parte, no se han reconocido espeleotemas que suelen asociarse a cavidades hipogénicas, tales como nubes de cuevas, rafts o spar (Forti et al., 2002; Gázquez et al., 2012), lo que parece indicar que no ha habido niveles estables de

la superficie freática bajo el techo de la cavidad y de que el agua no alcanza fácilmente el estado de saturación en calcita. En las zonas más profundas se reconocen *popcorn*, cuya génesis debe estar relacionada con rezumes en las paredes una vez que el nivel freático descendió bajo la base de la cavidad. Tampoco se reconocen depósitos de yeso, lo que descarta una génesis por mezclas de aguas oxidantes y reductoras con presencia de H₂S.

La escasez de espeleotemas comunes tales como estalactitas, estalagmitas, coladas... sugiere que la cobertera de baja permeabilidad que recubría el techo de los carbonatos ha desaparecido en tiempos geológicos relativamente recientes. Sólo se reconocen espeleotemas de importancia de este tipo en la denominada *Galería de la Cortina*, que debieron comenzar a formarse una vez erosionadas las margas y margocalizas suprayacentes de la Formación Capas Rojas, lo que permitió la entrada de agua de infiltración reciente a la cavidad.

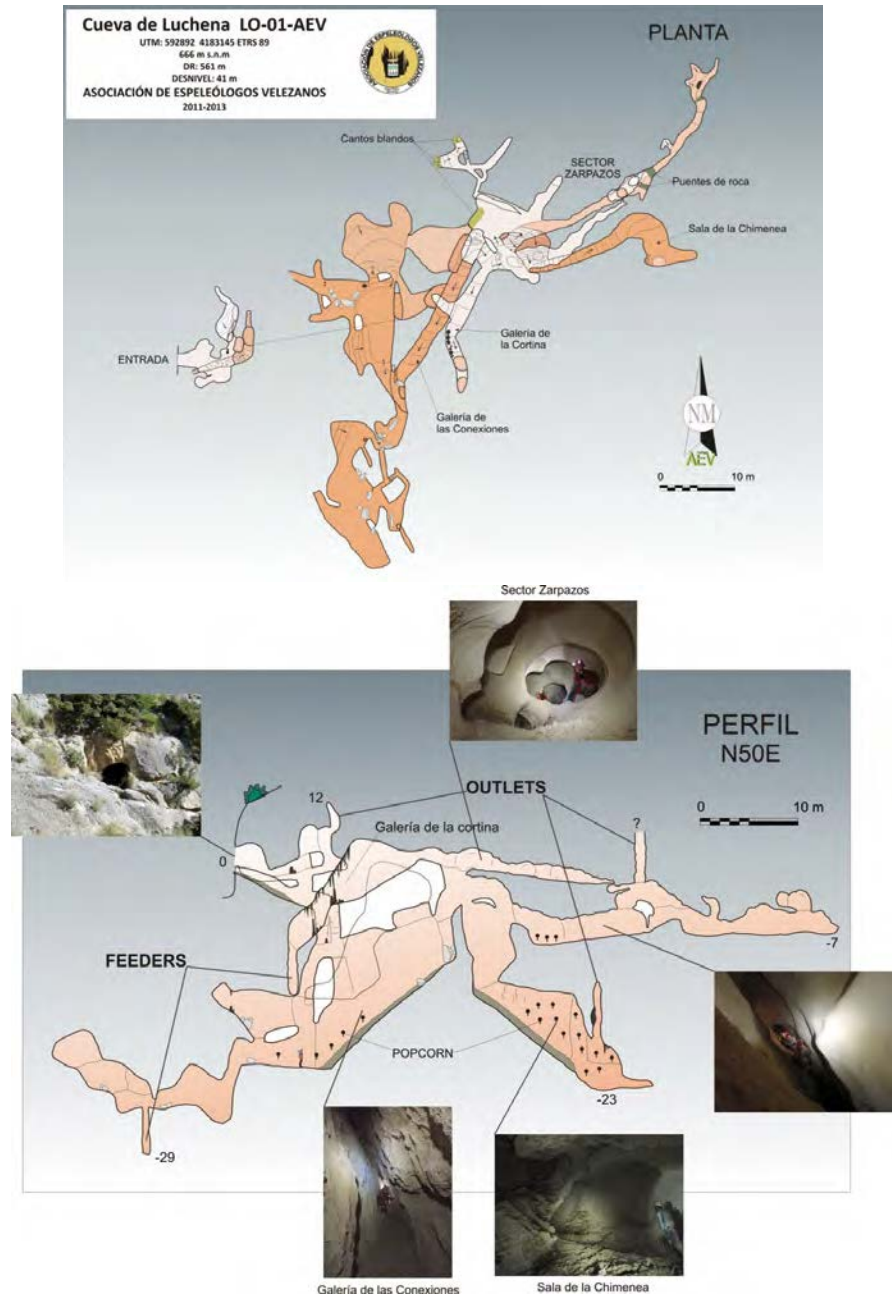


Figura 4. Planta (superior) y perfil (inferior) de la Cueva de Luchena en la dirección N50E que incluye fotos de algunas zonas representativas.



Figura 5. (A) Conducto de entrada a la cavidad. (B) Conducto kárstico de origen hipogénico dismantelado en las paredes del cañón de Luchena. (C) Canal de convección. (D) Cadena de cúpulas ascendentes (rising chain of cupolas). (E) Conductos colalescentes conectados (rising wall channel) y tabiques (partitions) (F) Mega-scallops con paredes recubiertas de popcorn en las galerías inferiores.

RELACIÓN ENTRE LA CAVIDAD Y EL CAÑÓN

En las paredes del cañón del río Luchena es posible reconocer periodos de estabilidad del cauce junto a otros en los que éste ha sufrido encajamientos rápidos. Estas marcas quedan expuestas en cauces colgados de arroyos tributarios o del propio cauce principal (Figura 6).

En la Figura 7 se muestra un corte de las paredes del cañón perpendicular a la dirección del cauce, con la situación a escala del perfil de la cavidad. Se reconocen al menos 5 niveles de estabilidad en el proceso de encajamiento del cauce. El nivel 4 está definido por una amplia zona aplanada que aparece bien expuesta en la margen derecha; este nivel se correlaciona bien con la cota a la que se localiza la entrada a la cavidad y con las galerías horizontales superiores. Un segundo escalón aparece en los perfiles de ambas márgenes, el denominado nivel 3, que parece relacionarse con la parte inferior de la cavidad, por debajo del *feeder* superior.



Figura 6. Cauces colgados relacionados con la evolución del cañón del río Luchena.

La morfología de los cañones fluvio-kársticos es consecuencia de la combinación de la acción erosiva de los ríos, junto con el avance de la disolución kárstica de los carbonatos. El avance más o menos rápido del encajamiento está condicionado por la climatología, el levantamiento tectónico de la sierra y los cambios en el nivel de base que se relacionan con cambios climáticos globales a los que se asocian los cambios en el nivel del mar. Según Baena *et al.* (1977), los sedimentos continentales más antiguos que se encuentran en el entorno de la Sierra del Pericay son pliocenos. Los afloramientos se localizan al E de la sierra, en parte relacionados con el cauce del río Luchena. Esto permite situar el inicio de la incisión del cañón en esa edad, y debió coincidir con el momento en que surgen los manantiales que drenan el acuífero, lo que supone el comienzo de la karstificación generalizada de las formaciones jurásicas. Así pues se puede considerar que el río Luchena comenzó a encajarse en la sierra del Pericay hace aproximadamente unos 5 m.a. y que su encajamiento ha evolucionado en función de las pulsaciones tectónicas y de los cambios climáticos globales. Diversos trabajos realizados en la zona oriental de la Cordillera Bética (Braga *et al.*, 2003; Soler *et al.*, 2003; Sanz de Galdeano y Alfaro, 2004) estiman la velocidad de levantamiento tectónico de la zona en torno a 0,2 mm/año, lo que supone un levantamiento de unos 200 m en el último millón de años. Si se supone que esta tasa de elevación ha sido más o menos uniforme durante el Cuaternario, puede concluirse que los escalones en los perfiles del cañón están condicionados fundamentalmente por los momentos en que el nivel del mar se encuentra más elevado, en los periodos más cálidos.

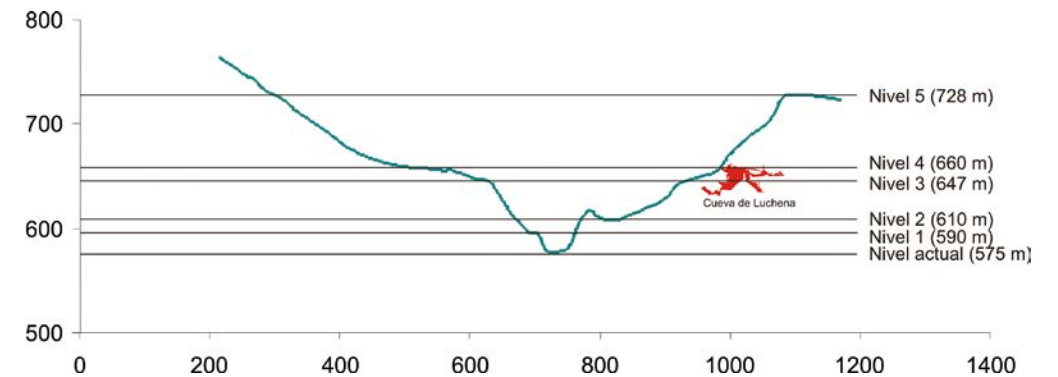


Figura 7. Corte perpendicular al cauce del río Luchena en la zona donde se localiza la Cueva de Luchena con la situación del perfil de la cavidad

Con una tasa de elevación como la expuesta, la ubicación de la entrada de la cavidad a unos 100 m por encima del cauce actual implicaría que se habría formado durante el Cuaternario, y más probablemente entorno al límite Pleistoceno inferior-medio. La existencia del nivel 3 que parece correlacionarse con el nivel del *feeder* inferior sugiere la posibilidad de una génesis de la cavidad en dos fases.

El nivel 4 podría estar mostrando la cota de ubicación del paleo-manantial de los Ojos de Luchena en el momento en que la cueva estaba formándose. El agua, probablemente termal, ascendería por el acuífero condicionada por el recubrimiento de margas y margocalizas cretácicas y terciarias que provoca su confinamiento parcial en el borde del acuífero. En su ascenso se enfría, esto provoca un descenso en el pH, lo que convierte el agua en agresiva con respecto a la caliza iniciando su disolución. El ensanche de la cavidad se produce a favor de las superficies de estratificación, fuertemente inclinadas hacia el E, lo que condiciona la morfología de la cueva. Posteriormente el río vuelve a encajarse, el nivel saturado de agua en el acuífero desciende al bajar la cota de los manantiales, y deja en seco la cueva. Finalmente, el avance de la erosión superficial en la ladera del cañón alcanza el hueco formado por la cueva y abre una entrada que permite el acceso al espeleólogo.

CONCLUSIONES

La génesis de la cueva de Luchena aparece íntimamente ligada a la formación del cañón del río Luchena durante el Cuaternario y a la presencia del manantial de los Ojos de Luchena. El agua de flujo regional que circula por el acuífero del Pericay-Luchena toma componentes ascendentes a la salida del cañón a consecuencia de la existencia de una barrera de baja permeabilidad que recubre parcialmente el acuífero. Esto provoca que adquiera condiciones agresivas con respecto a los carbonatos. La agresividad podría ser provocada por una combinación de las siguientes causas, sin que ninguna excluya a las demás: 1) enfriamiento al ascender (espeleogénesis hidrotermal), 2) alto contenido en CO₂ de origen profundo, 3) mezclas con aguas de diferente temperatura y naturaleza (alimentación basal e infiltración meteórica reciente). La posibilidad de la presencia de otros gases que hayan aportado agresividad al agua como el H₂S parece descartada, pese a que el agua contiene cantidades elevadas de SO₄²⁻, ya que el agua actual que surge por el manantial tiene condiciones oxidantes y no hay indicios de depósitos de yeso en el interior de la cavidad.

Los condicionantes geológicos que han dado lugar a la cavidad, implican la existencia de un espesor saturado importante en el acuífero y de un límite impermeable que recubre las formaciones jurásicas. Estos condicionantes contrastan con la interpretación geológica dada por Baena *et al.* (1977) si bien están de acuerdo con la estructura sugerida por Fernández-Fernández (2003). Por otra parte, las características químicas actuales del agua subterránea sugieren la presencia de un sustrato evaporítico, probablemente triásico, que no ha sido reconocido hasta ahora en ninguno de los trabajos geológicos realizados en la zona.

En la cavidad se reconocen todo el cortejo de morfologías descritas por Klimchouk (2007) para cavidades de origen hipogénico, tales como canales de alimentación (*feeders*), formas de transición en paredes y techo (*rising channels*) y canales de salida (*outlets*). La presencia de conductos de alimentación a dos cotas diferentes sugiere que la cueva ha podido generarse en dos fases en relación con la evolución del cañón. Por otra parte la escasez de espeleotemas comunes es un indicio de juventud de la cueva, pues su génesis debió haber estado impedida por el recubrimiento de margas y margocalizas de baja permeabilidad, y comenzó en el momento en que éste desaparece. El estudio de la morfología del cañón en relación con la cavidad sugiere que ésta se formó durante el Cuaternario, y más probablemente cerca del límite entre el Pleistoceno inferior y medio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Jorge Hornero la información aportada sobre el manantial Ojos de Luchena y a Rosa M. Mateos la revisión de la traducción al inglés del resumen.

REFERENCIAS

- Audra, P., Bigot, J.Y. y Mocochain, L. 2002. Hypogenic caves in Provence (France). Specific Features and sediments. *Acta Carstologica*, 31(3), 33-50.
- Baena, J., de Torres, T., Geel, R. y Roep, Th. B. 1976. Memoria y mapa geológico de España E. 1:50.000. Hoja 952 (Vélez Blanco). *IGME*.
- Braga, J. C., Martín, J.M. y Quesada, C. 2003. Patterns and average rates of late Neogene-Recent uplift of the Betic Cordillera, SE Spain. *Geomorphology*, 50, 3-26.
- Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) 27/05/2014. <http://www.chsegura.es>.
- Clauzon, G. 1979. Le canyon messinien de la Durance (Provence, Fr.): Une preuve paléogéographique du bassin profond de dessiccation. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 29, 15-40.
- Clauzon G. 1988. Evolution géodynamique pliocène du bassin de Cucuron / Basse Durance (Provence, France): une mégaséquence régressive de comblement d'une ria méditerranéenne consécutive à la crise de salinité messinienne. *Geologie alpine, Mémoire hors-série*, 14, 215-226.
- Delange, P. 1997. L'étude des tracés sismotectoniques dans les cavités karstiques de la Moyenne Durance et de la Trévaresse. *Rapport de contrat CEA-IPSN. URA 903*, Université de Provence. 88 pp.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN) 27/05/2014. <http://www2.ign.es/iberpix/visoriberpix/visorign.html>.
- Fernández-Fernández, E. M. 2003. Estructura del contacto entre las zonas Externas e Internas en el área de Sierra de María y los Vélez (sector oriental de las Cordilleras Béticas). *Tesis doctoral. Univ. Granada*. 147 pp.
- Ford, D. C. y Williams, P. W., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Unwin Hyman, 601 pp. London.
- 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.
- Gázquez Sánchez, F. y Calaforra-Chordi, J. M., Rull, F. y Martínez-Frías, J. 2012. Espeleotemas y evidencias de cavernamiento hipogénico en la Sima de la Higuera (Pliego, Murcia). En: Duran y Robledo (Eds.) *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*. 21-23. IV Congreso sobre cuevas turísticas. Aguilar del Campoo (Palencia).
- Jabaloy-Sánchez, A., Fernández-Fernández, E.M. y González-Lodeiro, F. 2007. A cross section of the Eastern Betic Cordillera (SE Spain) according field data and a seismic reflection profile. *Tectonophysics*, 433, 97-126.
- Klimchouk, A. B. 2007. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. *Special Paper n° 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM*, 106 pp. Second edition 2011.
- Klimchouk, A. B., Ford, D.C., Palmer, A.N. y Dreybrodt, W. 2000. *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama. 527 pp. Rey, 1993.
- Palmer, A. N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1-21.

Rodríguez-Estrella, T. 1995. El "Pericay-Luchena": Un acuífero kárstico de montaña que puede paliar los problemas de la sequía al regadío de Lorca (Murcia). Evaluación de las reservas y recursos hídricos y normas de explotación. *VI Simposio de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos* Vol. XXI, 263-279. Asociación Española de Hidrología Subterránea. Sevilla.

Sanz de Galdeano, C. y Alfaro, P. 2004. Tectonic significance of the present relief of the Betic Cordillera. *Geomorphology*, 63, 175-190.

Soler, R., Masana, E. y Santanach, P. 2003. Evidencias geomorfológicas y estructurales del levantamiento tectónico reciente debido al movimiento inverso de la terminación sudoccidental de la falla de Alhama de Murcia (Cordillera Bética Oriental). *Rev. Soc. Geol. España*, 16 (3-4), 123-134.

Espeleotemas en la cueva del Rull (Vall d'Ebo, Alicante)

Concepción Pla^(1,2), María-Concepción Muñoz-Cervera^(1,2), Miguel-Ángel Rodríguez-García^(1,2), Jaime Cuevas-González⁽¹⁾, José-Miguel Andreu⁽¹⁾, María-Ángeles García-del-Cura⁽²⁾, Soledad Cuezva⁽¹⁾, Juan-Carlos Cañaveras^(1,2) y David Benavente^(1,2)

(1) Dpto. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Campus San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig (Alicante) (c.pla@ua.es; mc.munoz@ua.es; ma.rodriguez@ua.es; jaime.cuevas@ua.es; andreu.rodas@ua.es; angegcura@ua.es; scuezva@ua.es; jc.canaveras@ua.es; david.benavente@ua.es)

(2) Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada CSIC-Universidad de Alicante. Campus San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig (Alicante)

RESUMEN

La cueva del Rull se encuentra en el municipio de la Vall d'Ebo, al norte de la provincia de Alicante. Es una pequeña cavidad somera desarrollada en una compleja unidad de conglomerados calcáreos de edad Mioceno superior que forman parte del relleno terminal de la depresión de la Vall d'Ebo (Prebético Externo). La cueva consiste en una gran sala con forma cómica asimétrica y planta estrellada que alcanza una profundidad máxima desde la entrada de unos 30 m. En su interior se encuentra una amplia colección de espeleotemas carbonáticos entre los que predominan estalactitas, estalagmitas, coladas, coraloides, cortinas y helictitas. Destacan las grandes columnas y coladas espeleotémicas, algunas de tipo dosel, sobre las que se desarrollan otros tipos de espeleotemas de menor tamaño. El registro espeleotémico más reciente reconocido en la cueva corresponde a: (i) estalactitas tipo 'macarrón' o 'soda-straw', con más de 1 m de longitud en algunos casos; (ii) helictitas y espeleotemas tipo 'frostwork' (0,5-5 cm) que tapizan irregularmente otros tipos de espeleotemas (cortinas, estalactitas, etc.); y (iii) estalagmitas y coladas estalagmíticas. Los espeleotemas de tipo coraloides, los más extensamente distribuidos por la cavidad, presentan una amplia variedad textural que abarca: (i) superficies botroidales que tapizan coladas estalagmíticas o fondos de *gours*; (ii) globulitos de diverso diámetro que tapizan espeleotemas cenitales y parietales; (iii) espeleotemas ramificados desarrollados sobre columnas y coladas estalagmíticas. Los espeleotemas de origen vadoso son predominantes; su formación responde a diversos mecanismos (goteos, capilaridad, flujo, etc.). Todos ellos presentan una composición calcítica (LMC) y una notable variedad textural. La coloración varía de blanco a rojizo en función de su situación en la cueva y su relación con la roca encajante. La naturaleza y distribución de los espeleotemas en la cueva del Rull están fuertemente influenciadas por la disponibilidad y composición de las aguas kársticas y por el microclima, parámetros controlados por otros como la estructura y naturaleza de la roca encajante, el clima exterior o la distancia a la superficie.

Palabras clave: aguas kársticas, Cueva del Rull, espeleotema, roca encajante.

Speleothems in the cave of Rull (Vall d'Ebo, Alicante)

ABSTRACT

Rull cave is placed in Vall d'Ebo (Alicante, SE Spain). It is a shallow karstic cavity which host rock is constituted by a Miocene limestone conglomerate unit, related to the Vall d'Ebo basin. The central room of the cavity is defined by a star-shaped dome and reaches nearly 30 m from the entrance door. The cave presents different kinds of carbonated speleothems: stalactites, stalagmites, flowstones, coralloidal speleothems, curtains and helictites. The most recent speleothems are related to: (i) "soda-straw" stalactites with more than 1m length; (ii) helictites

and 'frostwork' speleothems with small size (0.5-5 cm) which cover irregularly other kind of speleothems, including curtains, stalactites, etc; and (iii) stalagmites and stalagmitic flowstones. Coralloidal are the most extended speleothems inside the cavity. They present a wide textural variability as: (i) botryoidal forms, covering stalagmitic flowstones or the gours bottom; (ii) globulites with different diameter, which cover zenital and parietal speleothems; (iii) branched speleothems developed over columns and stalagmitic flowstones. Predominant speleothems inside the cavity have a vadose origin. Their formation was driven by different mechanisms as drip water, capillarity, water flux, etc. All of the studied speleothems are calcitic (LMC) and they present textural variability. They change from white to almost red depending on their situation inside the cave as well as the host rock properties. Speleothems' distribution and kind are totally influenced by the presence of karstic waters, their mineral composition and microclimatic conditions. These parameters are controlled by the host rock type and structure, external climate conditions and the distance to the surface.

Keywords: host rock, karstic water, Rull cave, speleothem.

INTRODUCCIÓN

Los espeleotemas son depósitos minerales desarrollados dentro de las cavidades kársticas y que registran los cambios climáticos y la evolución ambiental producidos en el lugar. La formación de espeleotemas a partir de las aguas de goteo en la cueva está determinada por los equilibrios agua-roca-aire. Las aguas kársticas adquieren importantes concentraciones de CO₂ disuelto durante el proceso de percolación a través del suelo. Como resultado, el agua disuelve la roca carbonatada por la que circula hacia el interior de macizo rocoso. Por el contrario, la precipitación de carbonato, responsable de la formación de los espeleotemas, ocurre por la desgasificación del agua cuando esta alcanza una cavidad. Se produce una disminución de su concentración en CO₂ cuando la pCO₂ en el interior de la cavidad es menor que la del agua de infiltración.

Las condiciones óptimas que regulan la formación de los espeleotemas dependen del grado de saturación mineral de las aguas de infiltración, la concentración de CO₂ en el suelo (en función de la actividad orgánica), la naturaleza de la roca encajante y las condiciones microclimáticas predominantes en la cavidad y su relación con las condiciones climáticas exteriores, entre otros factores. Dependiendo de cuáles sean las condiciones existentes en un determinado momento existirá o no formación de espeleotemas.

La presencia de espeleotemas dentro de la cueva del Rull es abundante y está asociada a diversos mecanismos y ambientes de formación. El principal objetivo de este trabajo es realizar una primera descripción detallada de los tipos de espeleotemas presentes en la cueva del Rull.

DESCRIPCIÓN DE LA CAVIDAD

La cueva del Rull (38° 48' 40"N; 0° 10' 38"W) se ubica en el noreste de la provincia de Alicante, a 30 km aproximadamente de la costa mediterránea. La depresión de Vall d'Ebo, donde queda localizada la cueva, se originó debido a la dinámica compresiva desarrollada durante el Mioceno medio y superior y que afectó a los materiales calizos existentes de edad Cretácico superior. Esta fosa tectónica, cuyos bordes norte y sur quedan delimitados por fallas normales con dirección aproximada E-O, está rellena por materiales rudíticos de edad Mioceno superior, predominantemente conglomeráticos, de espesor variable (decenas a más de 100 m), localmente plegados y depositados sobre margas de facies "tap" (margas mal estratificadas de carácter arcillo-limoso, desagregadas y de color blanquecino en superficie, cuya edad se atribuye al Mioceno medio). Estos paquetes de conglomerados, con gran variabilidad textural, incluyendo texturas cataclásticas, y sin apenas estructuras internas, forman la roca encajante de la cueva del Rull (De Carvalho *et al.*, 2013) cuyo espesor varía desde 9 hasta 22 m. Se trata de una cavidad visitable que recibe una media de 40 visitas por día. Su dinámica natural queda controlada por su régimen microclimático, máximo responsable del intercambio gaseoso entre el interior y el exterior, y que se ve afectado, en cierta medida, por la presencia de las visitas en el interior de la cavidad. Dentro de ella existen numerosos puntos de goteo, cuyo funcionamiento queda restringido principalmente a la

existencia de precipitaciones. La cavidad consta de una sala en forma dómica asimétrica con planta estrellada (Figura 1) cuya superficie es de, aproximadamente, 1535 m² y con distintos niveles de altura.

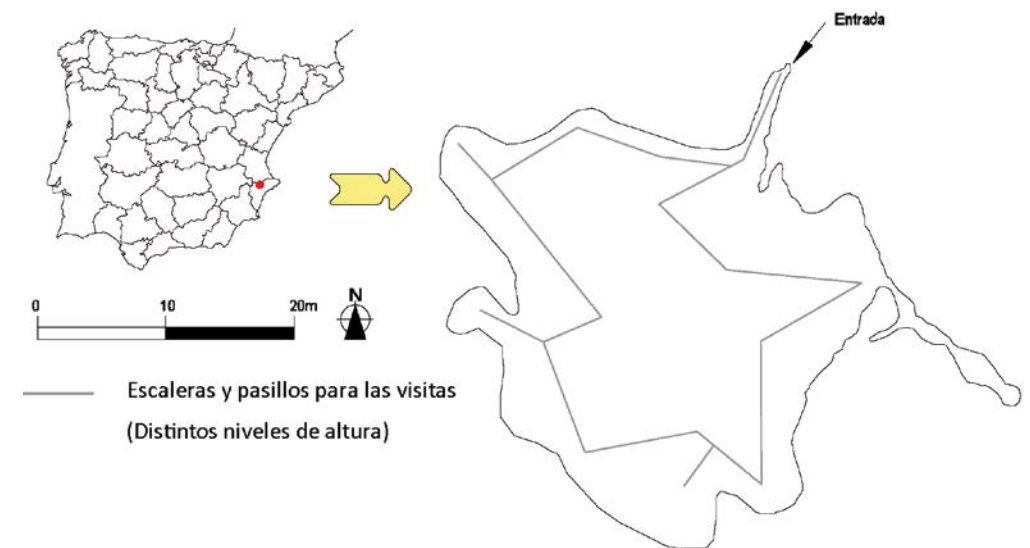


Figura 1. Localización y planta de la cueva del Rull.

METODOLOGÍA

Se realizó un muestreo de campo en el que se recogieron muestras de diversos espeleotemas distribuidos a lo largo de toda la cavidad. Para su análisis se emplearon tanto la microscopía óptica de baja resolución (microscopio de polarización de luz transmitida, Zeiss Axioskop) como la microscopía electrónica de barrido, MEB (microscopio electrónico de barrido marca Hitachi modelo S3000N). La caracterización mineralógica con difracción de rayos X (DRX) se ha realizado con un difractómetro (Bruker D8 Advance), con lámpara de cobre.

ESPELEOTEMAS: COMPOSICIÓN Y TEXTURA

Espeleotemas de goteo

El techo de la cueva del Rull (Figura 2) está tapizado por espeleotemas cenitales de goteo de aguas de infiltración de diverso tipo. Dominan las estalactitas cónicas y las banderas que llegan a alcanzar dimensiones de orden métrico. El registro espeleotémico más reciente reconocido en la cueva corresponde a espeleotemas de tipo 'soda-straw' o 'macarrón', helictitas y alguna estalagmita activa. Los 'macarrones' son translúcidos, con un conducto interior característico y ocasionalmente con un bandeado detectable a simple vista. Estas bandas de crecimiento, de 0,05 a 0,5 mm de espesor suelen corresponder a ciclos anuales y se deben a la alternancia de bandas más o menos ricas en inclusiones e impurezas (Fairchild *et al.*, 2007). Tienen una composición calcítica (LMC) y presentan una superficie exterior lisa característica y una interior rugosa donde se reconocen escalones de crecimiento formados por la prominencia de terminaciones cristalinas. Hay ejemplares que superan 2 m de longitud.

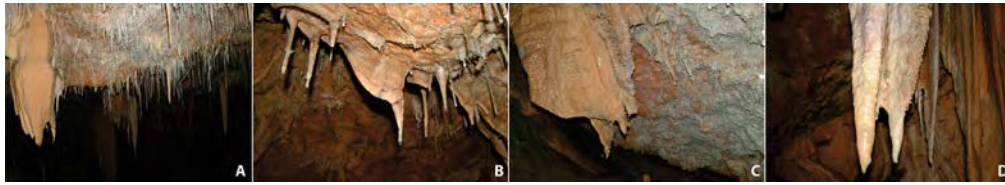


Figura 2. A. Vista parcial del techo de la cueva del Rull donde se observan diversos tipos de espeleotemas de goteo, desde estalactitas cónicas de grosor centimétrico a "macarrones" o "soda straw". B. Detalle de banderines y estalactitas asociadas. C. Cortina o banderín con crecimiento de espeleotemas tipo coraloide o globulítico en su superficie. D. Detalle de estalactitas recrecidas y soldadas. Crecimiento de agregados globulíticos en superficie.

Dejando al lado los espeleotemas recientes tipo 'macarrón', las texturas reconocidas en este tipo de espeleotemas esparíticos cenitales es bastante variable. Se han distinguido texturas columnares, fibrosas, microcristalinas y macrocristalinas (Figura 3). Las texturas columnares y fibrosas consisten en la disposición paralela a radial de cristales de calcita con límites rectos, extinción generalmente uniforme y una relación altura-anchura <math><6:1</math> (columnares) o $>6:1$ (fibrosas). La alineación de impurezas o inclusiones generalmente marca líneas de crecimiento, aunque las terminaciones de los cristales columnares raramente coinciden con éstas. La textura microcristalina muestra una laminación claro-oscuro alternante marcada por el tamaño de los cristales (<math><10\ \mu\text{m}</math>) y por el alto grado de impurezas (arcillas, óxidos de hierro). La textura macrocristalina se caracteriza por cristales grandes (>200 μm), idiotópicos a subidiotópicos y limpios.

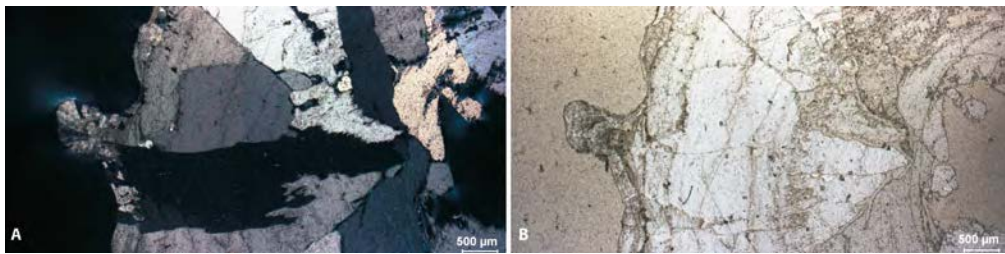


Figura 3. Estalactita. Se reconoce la fábrica de cristales columnares dispuestos perpendicularmente a las superficies de crecimiento delimitadas por acumulación de impurezas o inclusiones. Los cristales columnares tienen bordes irregulares, interdigitados, con extinción irregular (dominios ópticos) en nícoles cruzados. A. Nícoles cruzados. B. Nícoles paralelos.

Espeleotemas de flujo

Estos espeleotemas se forman a partir del flujo superficial de aguas de infiltración en el interior de la cueva y se conocen como coladas o 'flowstone'. En la cueva del Rull este tipo de espeleotemas es abundante, generando superficies lisas en paredes o superficies subverticales asociadas a fracturas o discontinuidades desde donde se permite una entrada de aguas de infiltración en el interior de la cavidad. Las coladas espeleotémicas presentan una laminación marcada; los conjuntos de láminas (submilimétricos a centimétricos) varían desde color blanco a naranja y marrón claro.

Coraloideas

Los espeleotemas de morfología coraloide constituyen uno de los tipos más comunes en la cavidad. El término 'coraloide' es genérico y abarca una amplia variedad de espeleotemas nodulares, globulares y botroidales. Los glóbulos o protuberancias que constituyen el elemento básico de este tipo de espeleotemas pueden presentar diversos tamaños, morfologías y organizarse en distintos tipos de agregados (Figura 4).

Estos espeleotemas se distribuyen por todos los niveles de la cavidad, disponiéndose tanto sobre el sustrato como sobre otros depósitos, tanto espeleotémicos (estalactitas, coladas, estalagmitas,...) como clásticos (bloques caídos). Es común su presencia tapizando estalactitas, estalagmitas y coladas.

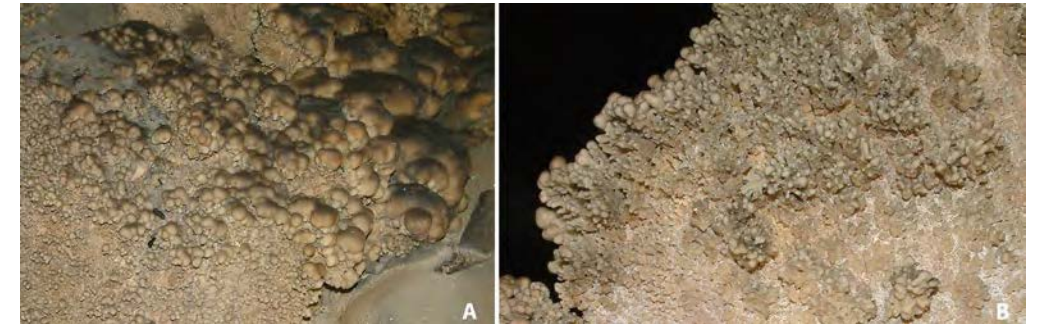


Figura 4. A. Detalle de espeleotema globulítico. Transición desde pequeños globulitos individuales (2-10mm de diámetro) en la parte inferior izquierda de la fotografía, a globulitos de mayor tamaño y coalescentes que forman superficies mamelonares lisas incipientes. B. Detalle de espeleotema globulítico ramificado.

Los tapices globulares constituyen cortezas con un espesor que oscila entre unos pocos milímetros a 1-2 cm. Por otro lado, las estructuras ramificadas (coraloideas a arborescentes) pueden alcanzar varios centímetros de altura. Los glóbulos individuales presentan una estructura concéntrica regular y unos tamaños variables: 0,5-4 cm en los tapices globulíticos, 1-10 cm en los agregados botroidales y 5-15 mm en los ramificados.

En algunas tipologías se distingue un núcleo cristalino de forma esferulítica a esferoidal compuesto por subcristales (subindividuos o dominios) alargados que crecen a partir de un centro (Figura 5).

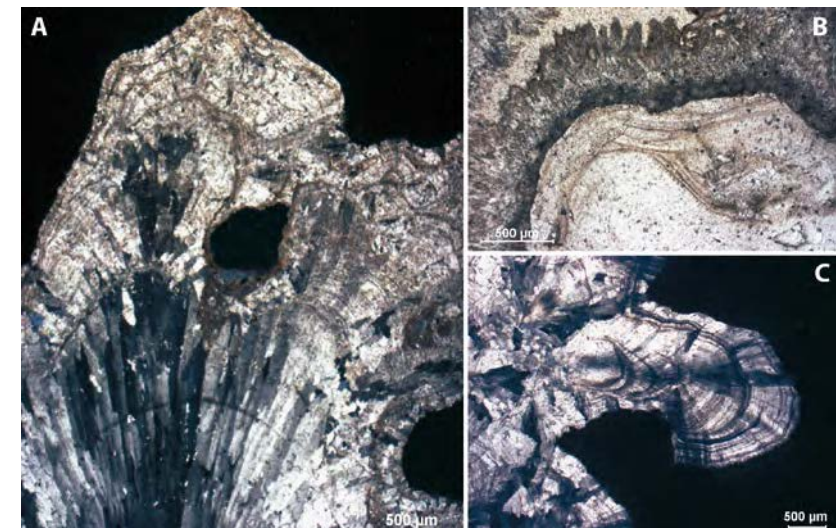


Figura 5. A. Fábrica columnar compacta radial con aumento de la densidad de bandeado en las etapas finales. Los bandeados delimitan localmente interrupciones en el crecimiento; las empalizadas de cristales columnares generan nuevos núcleos a partir de ellos. B. Detalle de discontinuidad erosiva sobre cristales columnares y crecimiento de cristales fibrosos en empalizada con abundantes impurezas. C. Crecimiento esferulítico en globulito individual.

Este núcleo puede llegar a superar los 5 mm de diámetro máximo (perpendicular a la dirección de crecimiento). Creciendo encima de este núcleo o constituyendo el glóbulo en su conjunto, se disponen bandas alternantes con fábricas columnares, fibrosas o dendríticas. La alternancia viene marcada por discontinuidades erosivas, bandas microesparfíticas o acumulaciones de terrígenos (arcillas, granos de cuarzo, etc.), especialmente en las últimas etapas de crecimiento. El espesor de estas bandas es muy variable (10 μm -1 mm). El espesor de las capas externas de los glóbulos también es variable (100 μm -5 mm).

La fábrica columnar consiste en la disposición paralela de cristales de calcita con límites rectos, extinción uniforme y una relación altura-anchura <6:1. Localmente se trata de una textura columnar abierta (porosa), donde los cristales no son coalescentes totalmente. Se reconoce una transición de texturas: columnar compacta – columnar abierta – dendrítica compacta (esquelética) – dendrítica abierta. Esta última constituida por policristalinas (generalmente ramificados) formados por el apilamiento de cristales romboédricos (Figura 6).

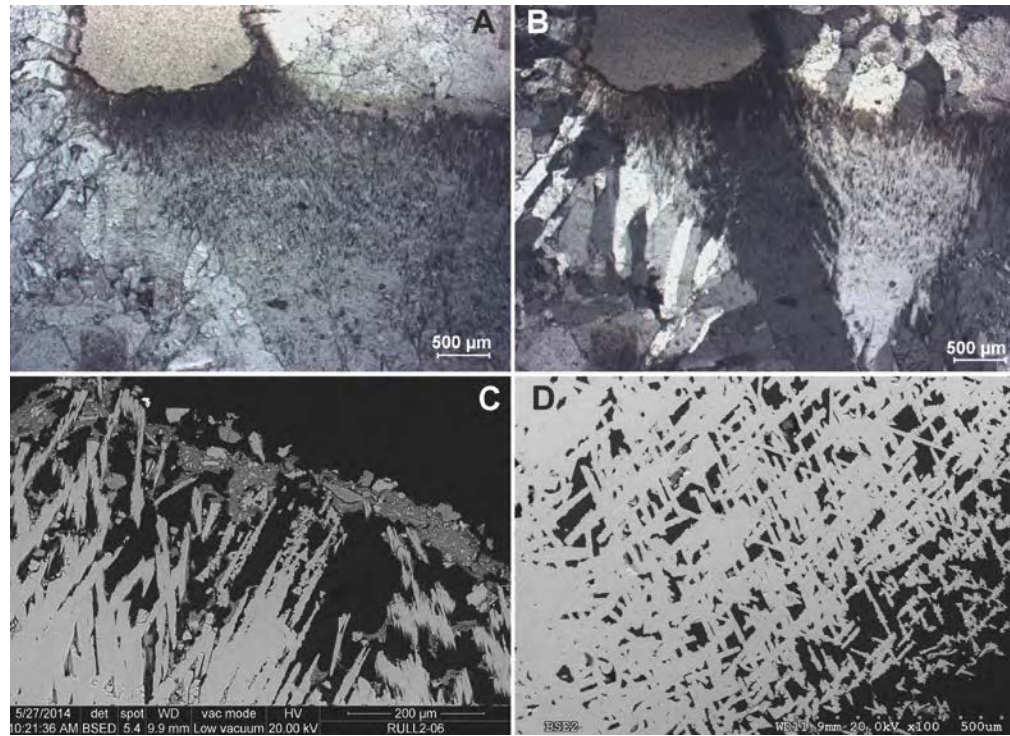


Figura 6. A y B. Transición de fábrica columnar compacta a columnar abierta y dendrítica compacta. (A. Nicóles paralelos. B. Nicóles cruzados). C. Detalle en MEB de terminaciones cristalinas esqueléticas y acumulación de terrígenos (arcillas, granos de cuarzo, calcita, etc.). D. Detalle de fábrica dendrítica abierta en el que se observa su alta porosidad intercrystalina.

La fábrica fibrosa presenta cristales con una relación altura-anchura >6:1. La composición mineralogía obtenida con DRX muestra que es calcita (LMC). Se reconocen indicios de recristalización. La fábrica microcristalina muestra laminación claro-oscuro alternante marcada por el tamaño de los cristales y el grado de impurezas (arcillas, óxidos de hierro).

Helictitas y frostwork

Hay abundantes espeleotemas de morfología irregular (excéntrica); crecen en techos, paredes y otros espeleotemas. Las helictitas vermiformes y los cristales aciculares tipo 'frostwork' son los más comunes. Raramente

superan 2-3 cm de longitud. Las helictitas se generan cuando los flujos capilares superan las fuerzas hidrostáticas controladas por la gravedad (Hill y Forti, 1997). En su formación participan diversos factores (defectos cristalográficos, concentración de impurezas o elementos trazas en las aguas de formación), pero siempre reflejando flujos de agua escasos, que no generan goteos gravitacionales. En la génesis de espeleotemas tipo 'frostwork' los procesos de evaporación parecen ser determinantes (Hill y Forti, 1997). En la Figura 7 se muestra una helictita formada por un apilamiento de cristales de calcita con aristas y caras curvadas (tipo arco gótico). Estas morfologías se forman por el reemplazamiento de iones carbonato por iones sulfato en la red de la calcita (Folk et al., 1985).

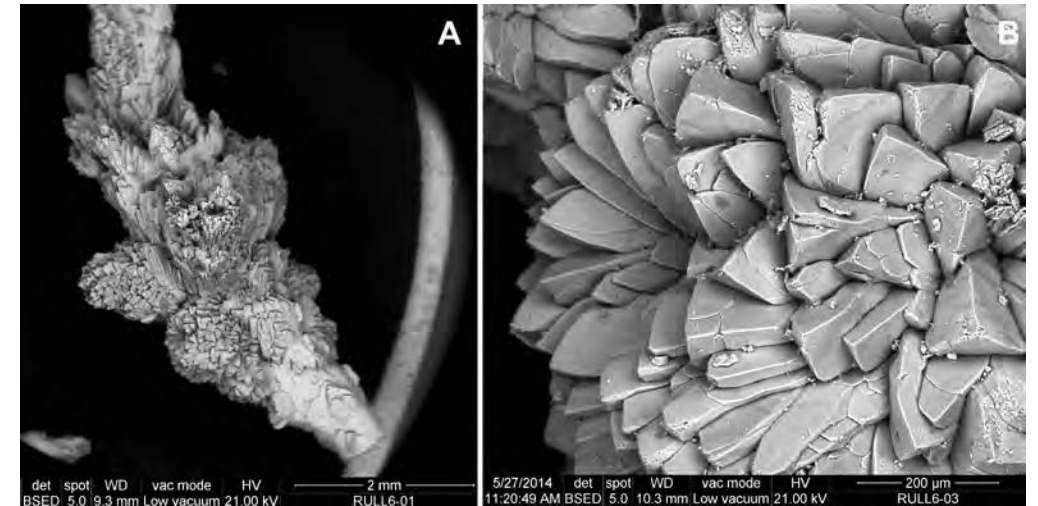


Figura 7. A. Vista al MEB de una helictita consistente en el crecimiento ramificado de agregados cristalinos microcolumnares a partir de un punto central basal. B. Terminaciones cristalinas de calcita con caras y aristas curvadas ("en arco gótico").

Moonmilk

Se han reconocido depósitos tipo *Moonmilk* de poco desarrollo sobre techos y otros espeleotemas cenitales. Presentan tonalidades blanquecinas y una textura desde blanda pulverulenta a fuertemente encostrada. Al microscopio electrónico se reconoce que estos depósitos están fundamentalmente constituidos por cristales aciculares calcíticos (NFC, Needle Fiber Calcite) de diversas morfologías, orientados aleatoriamente (Figura 8). En los agregados más débiles predominan las variedades monocristalinas lisas, generalmente múltiples (tipo MA según Verrecchia y Verrecchia, 1994), con unos grosores entre 0,75-2 μm , alcanzando 500 μm de longitud. Los agregados más encostrados están fundamentalmente compuestos de policristalinas aciculares o cadenas policristalinas formadas por el apilamiento y recrecimiento de cristales romboédricos de calcita (equivalentes a las cadenas policristalinas descritas por Verrecchia y Verrecchia, 1994; o a las cadenas de rombos descritas por Jones y Kahle, 1993). Presentan anchuras de 2-20 μm y longitudes de 10-100 μm . Las similitudes morfológicas y morfométricas de estos cristales aciculares, y su estrecha relación espacial con microorganismos (bacterias, hongos, algas), han llevado a diversos autores a considerar un origen orgánico (directa o indirectamente bioinducido) para los cristales mencionados, concretamente, las varillas monocristalinas (Phillips y Self, 1987; Verrecchia y Verrecchia, 1994; Cañaveras et al., 2006; Blyth y Frisia, 2008). La precipitación de los carbonatos podría generarse por un mecanismo de nucleación heterogénea sobre substratos biológicos que actuarían como centros de nucleación para la calcita (Cañaveras et al., 2006). Las fibras policristalinas pueden tener un origen inorgánico (Jones y Kahle, 1993) probablemente por crecimiento epitaxial continuado sobre las varillas preexistentes (Cañaveras et al., 2006).

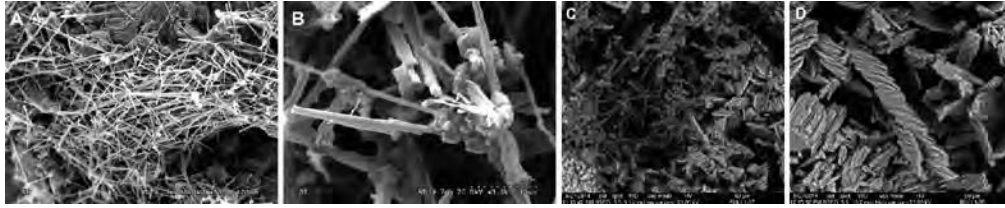


Figura 8. A. Conjunto desordenado de fibras monocristalinas lisas. B. Detalle de varillas lisas. C. Vista general de moonmilk encrostrado formado predominantemente por varillas tipo policristalino. D. Detalle de fibras policristalinas formadas por el apilamiento de cristales romboédricos de calcita.

CONCLUSIONES

Se reconocen diversos mecanismos y ambientes de formación de espeleotemas en la cueva del Rull. Los espeleotemas vadados prevalecen claramente sobre los freáticos. Se reconocen varios ciclos de formación de espeleotemas carbonatados, desde formas gravitacionales (estalactitas, estalagmitas, cortinas, etc.) a formas concrecionales nodulares (coraloides) y erráticas (excéntricas y *frostwork*). El desarrollo de las diferentes texturas de los espeleotemas recientes está relacionado con los mecanismos de crecimiento y con la cantidad y la composición de las aguas kársticas. Este hecho es especialmente destacado en el caso de los espeleotemas formados a partir de goteo o flujo de agua. Las texturas elongadas (columnares y fibrosas) reconocidas en estos espeleotemas se generan a partir de las aguas en flujo continuo, relativamente rápido. Como consecuencia, contribuye a la formación de numerosos núcleos y aporta, de forma casi continua, reactivos a los puntos de nucleación. Las fábricas dendríticas, que se desarrollan en condiciones de desequilibrio termodinámico y morfológico (Frisia *et al.*, 2005), son relativamente abundantes, lo que es característico de cavidades someras en zonas cálidas con balances hidrológicos negativos, como es el caso de la cueva del Rull. Los coraloides subaéreos, abundantemente distribuidos en la cueva formando conjuntos propios o tapizando parcialmente otros espeleotemas, crecen a partir de finas láminas de agua de infiltración (también el *'splash'* de los goteos puede participar) que es controlada por fuerzas capilares dentro del entramado poroso de la roca encajante. Estas fuerzas capilares, enfrentadas a las gravitacionales (de flujo o de goteo), también pueden participar en los mecanismos de crecimiento de espeleotemas tipo errático, como son las helictitas (Self y Hill, 2003). Las diferencias entre las distintas variedades de espeleotemas globulíticos reconocidos dependerán de los mecanismos de formación, especialmente en lo referido a las velocidades de crecimiento, correspondiendo los tipos esferulíticos y ramiformes a las mayores tasas de crecimiento (Cuevas-González *et al.*, 2006). La formación de espeleotemas, su tipología y situación en una cavidad somera en un contexto climático mediterráneo como la cueva del Rull, está controlada, principalmente, por la distribución, cantidad y composición de las aguas de infiltración y por las características microclimáticas. Otros factores como la geometría de la cavidad, la morfología exokárstica superior y el clima externo también ejercen influencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2011-25162 del Ministerio de Ciencia e Innovación. C. Pla cuenta con una beca predoctoral correspondiente a dicho Proyecto.

REFERENCIAS

- Blyth, A. J. y Frisia, S. 2008. Molecular evidence for bacterial mediation of calcite formation in cold high-altitude caves. *Geomicrobiology Journal*, 25, 101-111.
- Cañaveras, J. C., Cuezva, S., Sánchez-Moral, S., Lario, J., Laiz, L., González, J. M. y Saiz-Jiménez, C. 2006. On the origin of fiber calcite in moonmilk deposits. *Naturwissenschaften*, 93, 27-32.
- Cuevas-González, J., García-Del-Cura, M. A., Muñoz Cervera, M. C., Andreu, J. M. y Cañaveras, J. C. 2006. Espeleotemas tipo coraloides en la cueva de Canelobre (Alicante). *Macla*, 6, 147-150.

- De Carvalho, L., Pla, C., Galvañ, S., Cuevas-González, J., Andreu, J.M., Cañaveras y J.C., Benavente, D. 2013. Caracterización Petrográfica y Petrofísica de la Roca Encajante de la Cueva del Rull (Vall d'Ebo, Alicante). *Macla* 17, 39-40.
- Fairchild, I. J., Frisia, S., Borsato, A. y Tooth, A. 2007. Speleothems. In: *Geochemical Sediments and Landscapes*. Blackwell Publishing, Oxford, 200-245.
- Folk, R. L., Chafetz y H.S. Tiezzi, P. 1985. Bizarre forms of depositional and diagenetic calcite in hot-spring travertines, central Italy. *Carbonate Cements*. *SEPM Special Publications*, 36, 349-369.
- Frisia, S., Borsato, A. y Spötl, C. 2005. Non-equilibrium fabrics in speleothems: implications for paleoenvironmental reconstructions. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 02667.
- Hill, C. A. y Forti, P. 1997. *Cave Minerals of the World*. National Speleological Society, Huntsville, 238 pp.
- Jones, B. y Kahle, C. F. 1993. Morphology, relationship, and origin of fiber and dendrite calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63, 1018-1031.
- Phillips, S. E. y Self, P. G. 1987. Morphology, crystallography and origin of needle-fibre calcite in Quaternary pedogenic calcretes of South Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 25, 429-444.
- Self, C. A. y Hill, C. A. 2003. How speleothems grow: An introduction to the ontogeny of cave minerals. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(2), 130-151.
- Verrecchia, E. P. y Verrecchia, K. E. 1994. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. *Journal of Sedimentary Research*, 64, 650-664.

Análisis de espeleotemas mixtos y su relación con paleoniveles eustáticos en la Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca, España

Pedro A. Robledo⁽¹⁾, Juan José Durán⁽²⁾ y Alba Tienda⁽³⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. (IGME), C/Ciudad de Queretaro s/n, 07007. Mallorca, Baleares, España (pa.robledo@igme.es)

(2) Instituto Geológico y Minero de España. (IGME), C/Ríos Rosa nº 23, 28003, Madrid, España (jj.duran@igme.es)

(3) Universidad de las Islas Baleares, Carretera de Valldemossa s/n, 07021. Palma de Mallorca, Baleares, España (a.tienda@hotmail.com)

RESUMEN

El karst litoral en el Mediterráneo occidental se relaciona con procesos asociados a las variaciones climáticas y las fluctuaciones eustáticas que tuvieron lugar durante el Cuaternario. Los sistemas endokársticos en estos ambientes son complejos con cuevas polifásicas y multiniveles. En este tipo de cavidades el eustatismo controló el desarrollo de algunas de las formas y depósitos típicos en sistemas de cavidades litorales, como los espeleotemas. Habitualmente, los espeleotemas de cuevas litorales se han clasificado en vadosos y freáticos dependiendo de su ambiente de formación y de sus características petrográficas. No obstante, con frecuencia existen formas mixtas al producirse alternancia entre ambientes subaéreos y subacuáticos. Estos espeleotemas son particularmente interesantes ya que permiten obtener registros relativamente continuos de las oscilaciones eustáticas. En este trabajo se presentan los resultados preliminares del análisis morfológico, genético y evolutivo de cuatro espeleotemas de la Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca, España): una estalagmita (SMV-1), una estalactita (STV-1), un espeleotema poliédrico (SPV-1) y un espeleotema globular (SCV-1). Todos estos espeleotemas presentan una secuencia de precipitación química mixta debido a la exposición polifásica entre condiciones vadosas y freáticas.

Palabras clave: cueva litoral, espeleotema mixto, freático, paleoniveles, vadoso.

Analysis of mixed speleothem and the relation to eustatic paleolevels in the Vallgornera Cave, Mallorca, Spain

ABSTRACT

The littoral karst in the Occidental Mediterranean Sea is related to climatic variations and eustatic fluctuations during the Quaternary. Endokarstic systems in these environments are complex with polyphasic and multilevel caves. In these types of caves the eustatic events play a control in the development of some typical shapes and deposit such as speleothems. Generally, the speleothems have been classified in vadose and phreatic type depending on the environment of growth and their petrographic characteristics. However, there are mixed sedimentary sequences that develop between subaerial and phreatic environments. These speleothems are particularly interesting because they allow us to obtain relatively continuous records of the sea level oscillations and can be used as a proxy record of past climates. In this paper we present the preliminary results of morphometric and sedimentological analysis of four speleothems recollected in the Vallgornera Cave (Mallorca, Spain): one stalagmite (SMV-1), one stalactite (STV-1), one polyhedral speleothem (SPV-1) and one globular speleothem (SGV-1). These speleothems show a mixed sequence of chemical precipitation due to exposure to vadose and phreatic conditions.

Keywords: littoral cave, mixed speleothem, paleolevels, phreatic, vadose.

INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones en el nivel del mar en el Mediterráneo Occidental están ligadas en términos globales a los ciclos glaciares-interglaciares, aunque todavía se discute el rango de magnitudes que tuvieron en cada evento. En este sentido, algunos espeleotemas relacionados con estas oscilaciones podrían ser excelentes registros de los cambios del nivel del mar en el Mediterráneo durante el Plioceno y el Cuaternario (Fornós et al., 2002; Onac et al., 2006; Tuccimei et al., 2006, 2010; Dorale et al., 2010). En la costa sur y este de la isla de Mallorca hay numerosas cuevas litorales inundadas o parcialmente inundadas por agua salobre donde estos tipos de depósitos de precipitación química son comunes.

Generalmente, los espeleotemas presentan características sedimentarias relacionadas con medios subaéreos en cuevas. Sin embargo, en los últimos años han sido descritos ampliamente espeleotemas que se han desarrollado por debajo del nivel freático o en el límite de la lámina de agua freática con la zona subaérea (Vesica et al. 2000, Fornós et al., 2002; Suric et al., 2007; Tuccimei et al., 2006; Ginés et al., 2012). Este tipo de depósitos endokársticos está ligado generalmente a cuevas litorales, aunque algunos estudios han descrito depósitos similares en cuevas continentales relacionadas con las fluctuaciones del nivel freático de acuíferos locales o en gours (Durán, 1996). Sin embargo, es importante distinguir qué espeleotemas se encuentran en lagos endokársticos aislados o gours y cuáles se han desarrollado en salas o conductos contactados con el mar, ya que el registro paleoestático de estos medios podría dar lugar a errores sobre las oscilaciones marinas globales. En Mallorca se han documentado un gran número de espeleotemas en diversas cuevas entre -23 y +46 m por debajo o sobre el nivel del mar actual (Ginés et al., 2012; Merino et al., 2014) durante el Pleistoceno, lo que indica un amplio rango de oscilación del nivel del mar. Generalmente, se ha considerado que los depósitos endokársticos, freáticos o epiacuáticos, son indicadores eustáticos más precisos que los espeleotemas vadosos, como estalactitas o estalagmitas. Ginés y Ginés (1974) y Pomar et al., (1979) documentaron el desarrollo de espeleotemas freáticos sobre depósitos vadosos que actuaban como soporte físico. Sin embargo, el estudio detallado de algunos espeleotemas concretos ha puesto de manifiesto que se trata de depósitos mixtos con secuencias relativamente continuas, lo que los convierte a priori, en espeleotemas con mejor y mayor registro paleoestático, paleoclimático y paleoambiental. Por tanto, estos depósitos se relacionan con diferentes órdenes de secuencia estratigráfica como una resultante de las fluctuaciones del nivel del mar ligadas a las variaciones climáticas.

Para este trabajo, se han analizado cuatro ejemplos diferentes de espeleotemas mixtos de la Cueva des Pas de Vallgornera, que permiten analizar la resolución estratigráfica con detalle y el relativo registro entre fases vadosas y freáticas.

ÁREA DE ESTUDIO

Las Islas Baleares se encuentran en la zona occidental del mar Mediterráneo. Mallorca es la isla más grande y central del Archipiélago Balear situada entre Ibiza y Menorca. Los materiales geológicos han sido intensamente afectados por diferentes fases tectónicas que han actuado desde el Paleógeno al Cuaternario (Pomar et al., 1991), dando lugar a los actuales dominios morfoestructurales con dos importantes relieves; la Serra de Tramuntana y Las Serres de Llevant, ambas alienadas NE-SO. En la costa sur y este de Mallorca afloran dos plataformas carbonatadas del Mioceno superior; las plataformas carbonatadas de Lluçmajor y de Santanyí (Figura 1). Ambas están compuestas por cuatro cinturones de facies principales; facies de frente arrecifal, facies de lagoon (externo, medio e interno) facies de talud y facies de plataforma abierta o cuenca (Pomar y Ward, 1996), recubiertas en la plataforma más oriental por la Unidad Calizas de Santanyí, el último ciclo sedimentario al final del Messiniense. En la Unidad Arrecifal han sido exploradas un gran número de cuevas, que forman un tipo característico de cavidad debido a que la red de conductos y pasajes se han desarrollado en diferentes ambientes hidrogeológicos; por la disolución de la roca por agua de lluvia que se filtra a través de fisuras o fracturas, o debido a la disolución de la roca en la zona de interfase entre el agua dulce y salada (cuevas epigénicas). Sin embargo, han sido documentadas cuevas hipogénicas desarrolladas por aguas termales procedentes de acuíferos profundos (Ginés et al., 2009; Robledo et al., 2009; Merino et al., 2011).

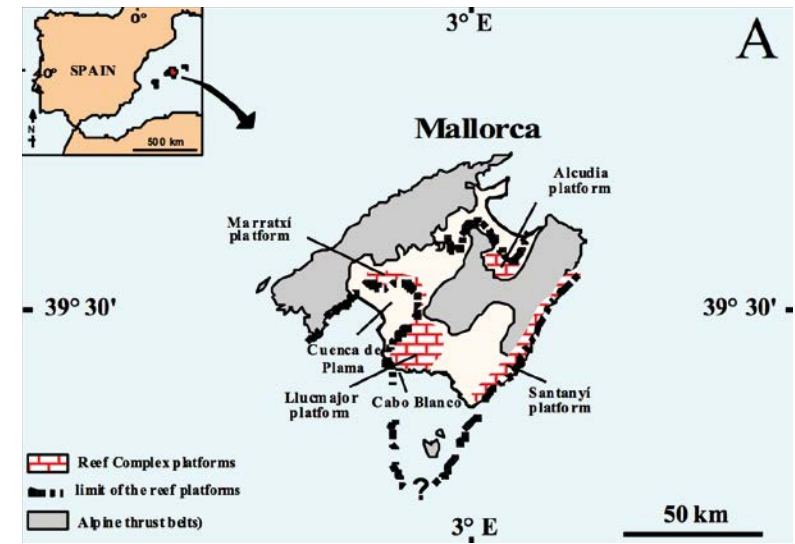


Figura 1. Marco geológico en el que se observa la disposición del Complejo Arrecifal mioceno de Mallorca.

Figure 1. Geological Setting showing the disposition of the Miocene Reef Complex in Mallorca.

ESPELEOTEMAS MIXTOS Y FLUCTUACIONES DEL NIVEL DEL MAR. MODELO GENÉTICO

En las cavidades litorales del Mar Mediterráneo los procesos eustáticos juegan un control dominante en el desarrollo de algunos tipos de depósitos sedimentarios de precipitación química como los espeleotemas. La Cova des Pas de Vallgornera es uno de los mayores sistemas endokársticos de España y Europa, ubicada geológicamente en la plataforma Carbonatada de Lluçmajor. La cueva tiene más de 74 km de conductos explorados (Merino et al., 2014) y topografiados en tres niveles; uno subaéreo, otro semisumergido y uno sumergido, estos últimos inundados por aguas de mezcla en la zona de interfase. En el nivel superior, subaéreo, los conductos generalmente son de gran desarrollo longitudinal, rectos y con formas particulares de erosión y disolución (Merino, 2006; Merino et al., 2006, 2014; Merino et al., 2014). Los niveles sumergidos y semisumergidos presentan un desarrollo complejo y laberíntico, con formas más típicas de ambientes de disolución de mezcla de aguas dulces y saladas (Gracia et al., 2006).

Los espeleotemas en cuevas litorales pueden ser clasificados en dos grandes tipos; vadosos o freáticos (incluyendo en este último grupo los denominados epiacuáticos) (Pomar et al., 1979), dependiendo de su ambiente de formación que infiere características morfométricas y petrográficas distintivas. Sin embargo, existe otro tipo de espeleotemas de acuerdo con su desarrollo genético, como son los depósitos mixtos. Se trata de secuencias sedimentarias desarrolladas en ambos ambientes, vadosos y freáticos, y representados en un solo depósito. Estos espeleotemas son particularmente interesantes puesto que permiten obtener un registro relativamente continuo de las oscilaciones eustáticas, los tránsitos entre períodos fríos y cálidos (glaciares e interglaciares) y húmedos y secos, por lo que pueden ser usados como un proxy del pasado climático y ambiental. En este trabajo se presentan los resultados preliminares del análisis morfométrico y sedimentológico de cuatro espeleotemas mixtos estudiados en la Cueva des Pas de Vallgornera; una estalagmita (SMV-1), una estalactita (STV-1), un depósito poliédrico (SPV-1) y un depósito globular (SGV-1) (Figura 2). Estos espeleotemas muestran una secuencia mixta debido a la alternancia en la exposición de ambos ambientes en función de las oscilaciones del freático local, en este caso, coincidente con el nivel del mar. La sucesión sedimentaria en estos depósitos presenta generalmente una tendencia similar: la fase inicial de precipitación química se produce en condiciones vadosas, coincidiendo con un nivel del mar bajo o una bajada del nivel del mar. En una fase subsiguiente el espeleotema es capturado por una subida del nivel del mar que interrumpe el flujo de agua a partir del cual se

desarrolla el espeleotema, iniciando una nueva secuencia de precipitación química en condiciones freáticas y/o epiacuáticas. El eje de crecimiento de las capas entre los sedimentos vadosos y freáticos es perpendicular entre sí, pasando de ser paralelo al suelo de la cueva en los vadosos, a ser perpendicular en los freáticos, por lo que el cambio lateral de facies suele ser muy nítido entre ambas fases. No obstante, las condiciones ambientales, esto es, las oscilaciones del nivel del mar, pueden cambiar de forma abrupta o regular, lo que imprime en el propio espeleotema un cambio lateral de facies distinto.

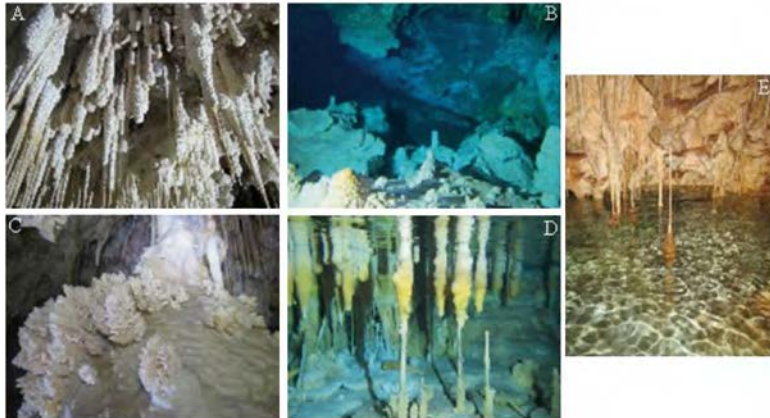


Figura 2. Ejemplos de espeleotemas similares a los estudiados en la Cova des Pas de Vallgornera. A: estalactita. B: estalagmita. C: espeleotema poliédrico. D y E: espeleotema globular.
Figura 2. Examples of speleothem similar to studied in Vallgornera cave. A: stalactite. B: stalagmite. C: polyhedral deposit. D and E: globular deposit.

METODOLOGÍA

Las muestras obtenidas de secuencias de precipitación mixtas se han tomado en la Cova des Pas de Vallgornera. Se han realizado levantamientos de las secciones de los espeleotemas para determinar la ciclicidad de las fases sedimentarias y la secuencia estratigráfica, con diagramas correspondientes de cada espeleotema. Se han realizado láminas delgadas de cada depósito objeto de estudio que han sido analizadas mediante microscopía óptica con un equipo Olympus Z61 y una lupa binocular SZ61 para la descripción mineralógica y textural. También se han realizado análisis por difracción de Rayos X de diferentes muestras en cada espeleotema para determinar las especies minerales dominantes. También, se han determinado las cotas de los ciclos identificados con respecto al nivel del mar para determinar los rangos de fluctuación del nivel del mar global del conjunto de los espeleotemas estudiados así como los rangos relativos, de acuerdo con los ciclos vadosos y los freáticos registrados en cada espeleotema.

SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA, ANÁLISIS MORFOMÉTRICO Y PETROGRÁFICO

Estalagmita (SMV-1)

Estos espeleotemas se ubican a 1,65 m por debajo del nivel del mar actual, teniendo en cuenta la base de la estalagmita que, en este caso, es el suelo de la cavidad (Figura 2 y 3). La estalagmita muestra una geometría cilíndrica de 65 cm de longitud y 4,5 de ancho, en la que se observa una secuencia mixta de precipitación química entre facies vadosas y freáticas. Han sido reconocidos al menos 11 ciclos de desarrollo en condiciones vadosas y 3 en condiciones freáticas (Figura 3), de acuerdo con las discontinuidades identificadas, el hábito cristalino, la textura, el color, la relación diámetro-alura y el eje de crecimiento de las capas. El ambiente sedimentario más antiguo es de tipo vadoso, solapado posteriormente por una secuencia freática durante una subida del nivel del mar o cuando el nivel del mar estaba alto. Lateralmente, se aprecia un sobrecrecimiento freático que ocupa

mayor superficie en el margen izquierdo del espeleotema, probablemente debido a que este último flanco era el opuesto a la dirección del flujo del agua subterránea que, en cualquier caso, era poco energético. Las capas vadosas muestran diferentes texturas y colores que las freáticas. La presencia de superficies de erosión o discontinuidades sedimentarias indica que hubo períodos secos asociados a eventos fríos o cálidos.

La secuencia estratigráfica de la estalagmita SMV-1 presenta una sucesión arrítmica en su ciclicidad (Figura 3). De acuerdo con el espesor de las capas y el ratio, diámetro-longitud, la sedimentación experimentó un progresivo descenso de base a techo de cada ciclo, lo que indica un descenso del aporte hídrico al final de cada uno de los ciclos. El color presenta tonos marrones oscuros, marrones opacos junto con bandas de color marrón claro. Por lo general, las bandas más claras están relacionadas con una rápida precipitación del carbonato y las más oscuras con un escaso desarrollo o interrupciones sedimentarias (Fairchild y Baker, 2012). La geometría de este depósito es compleja debido a la propia disposición sedimentaria de las capas de los diferentes ciclos y ambientes de sedimentación, con cambios verticales y laterales de espesor de las capas (variables en cada ciclo) y por tanto, cambios en la relación longitud-anchura hacia techo de cada evento identificado. Lateralmente, las facies de la estalagmita cambian la dirección del crecimiento pasando en su parte interna y central de facies vadosas paralelas al suelo de la cueva, a facies freáticas en sus márgenes externos, perpendiculares al eje de crecimiento de la estalagmita (cambio lateral de facies) (Figuras 3 y 5). Las capas vadosas muestran un hábito isométrico con fábrica isotrópica y cristales micrométricos. Las capas freáticas muestran un hábito acicular y una fábrica radial con cristales de tamaño micrométrico y milimétrico (con forma externa globular). La calcita es la especie mineral dominante en las capas vadosas y en las capas freáticas (con presencia de algunas bandas de calcita con alto contenido en magnesio). Sin embargo, se ha observado en el microscopio que se conserva la estructura cristalina de una fase aragonítica temprana que se transformó en un momento ulterior a calcita.
Estalactita (STV-1)

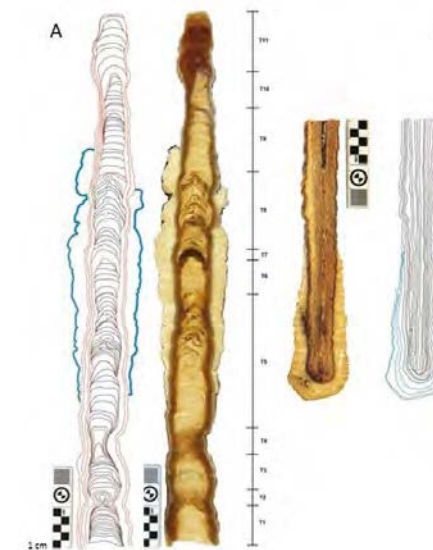


Figura 3. Diagrama de la estalagmita (A-SMV-1) y la estalactita (B-STV-1) capturados por la subida del nivel del mar. La sucesión de las capas se puede observar en ambos márgenes de la Figura A. El ciclo más antiguo está identificado como T1 y el más reciente como T11 en la SMV-1. Las capas negras y rojas son vadosas y las capas azules son freáticas.
Figure 3. Diagram of stalagmite (A-SMV-1) and the stalactite (B-STV-1) captured by the rise of the sea level. The succession of layers and cycles is drawn in the right margin of the A figure. The oldest cycle is identified as T1 and the most recent as T11. Black and red layers are vadose and blue are phreatic.

El conjunto de estalactitas de esta familia se ubica a una cota entre 1 m y 1,5 m s.n.m, teniendo en cuenta la intersección con el techo de la cueva. Presenta una forma cónica de 32,5 cm de longitud y 3,5 cm de anchura. Se trata de una secuencia mixta en la cual se pueden apreciar un cambio lateral de facies muy nítido entre las capas vadosas y las capas freáticas. Se han identificado 5 ciclos en la secuencia estratigráfica; 2 desarrollados en condiciones vadosas y 3 en condiciones freáticas. Este espeleotema es particularmente interesante puesto que en su vértice inferior presenta un sobrecrecimiento epiacuático relacionado con una subida del nivel del mar o un momento del nivel de mar alto. Las capas freáticas en dicho ápice alcanzan los 2 cm de espesor. Las características morfométricas de este ejemplar permiten dividirla en dos partes; una zona interior (Figura 3) de geometría cilíndrica y elongada; y una zona externa abombada desde la mitad del espeleotema hasta el vértice inferior, que se forma cuando esa parte de la estalactita es capturada por una subida del nivel del mar o cuando el nivel del mar estaba alto. La estalactita tiene una sucesión de capas vadosas formadas por el crecimiento de cristales paralelos al canal central. Cabe señalar que las capas a ambos lados del canal tienen una clara asimetría. Los colores de las capas alternan tonos marrones oscuros y claros en la secuencia vadosa y, colores de tonos blancos en los sedimentos freáticos. Las capas vadosas muestran un hábito isométrico y fábrica isotrópica con cristales micrométricos. Las capas freáticas muestran un hábito acicular y fábrica radial con cristales de tamaño micrométrico y milimétrico. Al igual que en el caso anterior la calcita es la especie mineral dominante en capas vadosas y freáticas junto a la calcita con alto contenido en magnesio. También, se ha observado en el microscopio que se conserva la estructura cristalina de una fase aragonítica temprana transformándose en un momento ulterior en calcita (Figura 4).

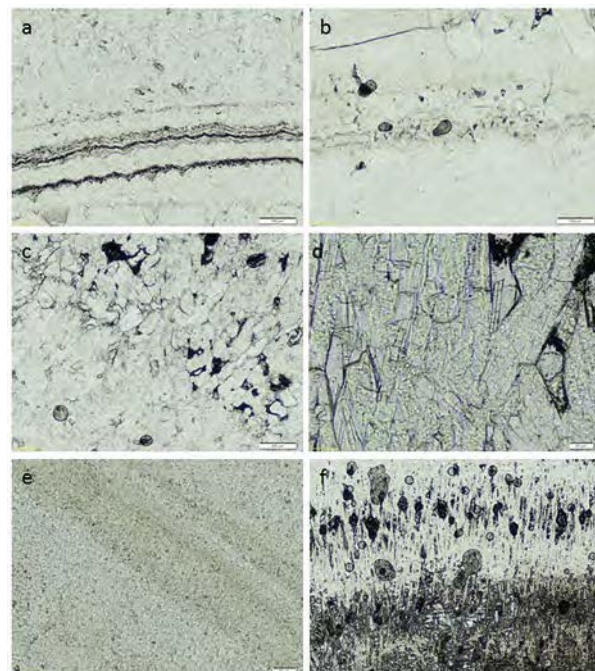


Figura 4. Láminas delgadas realizadas en las muestras SMV-1 y STV-1; a) superficie de erosión entre dos ciclos freáticos. B) superficies de erosión entre dos ciclos vadosos; c) cristales de calcita de hábito isométrico y fábrica isotrópica; d) recristalización de estructuras aragoníticas fibrosas en calcita; e) recristalización de estructuras aragoníticas con más aumento óptico. F) Tránsito entre un ciclo sedimentario vadoso y otro freático.

Figure 4. Thin films are performing over the samples SMV-1 and STV-1; (a) erosion surface between two phreatic cycles. (B) erosion surface between two vadose cycles; (c) calcite crystals of isometric habit and isotropic factory; (d) recrystallization of aragonitic fibrous structures by crystals of calcite; (e) recrystallization of aragonitic structures with further optical increase; f) transit between vadose and phreatic sedimentary cycles.

Espeleotema poliédrico (SPV-1) and espeleotema globular (SGV-1)

Estos tipos de espeleotemas son ejemplos de los más singulares observados en la cueva (Figuras 2 y 5). El depósito poliédrico estudiado se desarrolla a partir de una fistulosa aunque otros ejemplos lo hacen desde delgadas estalagmitas incipientes dispuestas sobre una colada. Tiene una longitud 18 cm de longitud por 9,5 cm de diámetro en la zona más abombada. Cuenta con un canal central desde el cual se desarrollan formas arborescentes de grandes cristales coraloides y piramidales. Este ejemplar ha sido obtenido de un conjunto que se había desprendido, pero se han observado otros ejemplo análogos entre 2 m por encima de la lámina de agua y 0,5 m metros por debajo de la misma. El tamaño de los cristales es centimétrico y presenta un hábito elongado, una fábrica microcristalina y una forma externa poliédrica. Esta cristalización se desarrolla en ambientes freáticos con aguas en baja energía (flujos laminares poco energéticos). En este caso el aragonito y la calcita con alto contenido de magnesio son los minerales dominantes.

El depósito globular tiene una génesis similar al poliédrico puesto que se ha desarrollado a partir de una fistulosa a unos pocos centímetros por debajo del nivel freático (Figuras 2 y 5). Presenta una geometría elíptica (como se observa en algunos ejemplares que todavía se están desarrollando) de 29 cm de longitud y 7 cm en la zona más abombada. Estos depósitos se encuentran en muchos casos semisumergidos, totalmente sumergidos o en condiciones subaéreas a pocos centímetros por encima de la lámina de agua. Las bandas de crecimiento presentan un tono blanco, con un hábito de cristal elongado, fábrica radial y una estructura globular y/o botroidal. También se observa un cambio lateral de facies entre la fistulosa y el sobrecrecimiento freático. Como el espeleotema poliédrico, su desarrollo está ligado a las aguas con muy baja energía, con aragonito y calcita como especies minerales dominantes.



Figura 5. Muestras y diagrama de un espeleotema globular (Figura A, SGV-1) y de un espeleotema poliédrico (Figura B, SPV-1) en la Cova des Pas de Vallgornera.

Figure 5. Samples and diagram of lobular and polyhedral speleothem recollected in Vallgornera Cave.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En Cova des Pas de Vallgornera los espeleotemas con secuencias mixtas son relativamente comunes y de diversa tipología. Su desarrollo está directamente relacionado con las fluctuaciones del nivel freático del acuífero (coincidentes en este caso con las oscilaciones del nivel del mar), así como por las condiciones hidrogeológicas y geoquímicas del agua de la cueva.

En este trabajo se han documentado cuatro grupos distintos de secuencias sedimentarias mixtas en espeleotemas; estalagmitas, estalactitas, espeleotemas poliédricos y espeleotemas globulares, todos ligados a una captura del nivel freático. El rango global de variación del nivel del freático en el conjunto de los espeleotemas estudiados es de 3,65 m. Sin embargo, la secuencia estratigráfica de cada espeleotema muestra ciclos de alta

frecuencia con rangos centimétricos aunque no es posible establecer una correlación entre estos. No obstante, se observan dos ciclos de orden mayor, relacionados posiblemente con periodos glaciares e interglaciares, todos ellos teniendo como referencia el nivel del mar actual. La fase vadosa de la estalagmita se desarrolló a 1,65 m por debajo del nivel actual y la variación del nivel de la mar deducida por el sobrecrecimiento freático es de un ascenso relativo de 45 cm (Figura 5). La secuencia freática a mayor cota es de 2 m por encima del nivel actual, de acuerdo con la posición del depósito poliédrico. En cualquier caso, estos datos son relativos e indicadores indirectos del paleoeustatismo en la isla de Mallorca.

La sucesión sedimentaria de las formas analizadas sigue un patrón análogo en todas las muestras: en primer lugar se inicia el desarrollo del espeleotema en condiciones vadosas por un flujo intermitente de agua (goteo) y, posteriormente tiene lugar la captura de los espeleotemas por una subida del nivel freático que interrumpe el goteo e inicia una nueva secuencia de precipitación química en la zona epiacuática o freática, donde la ausencia de la gravedad, la mayor desgasificación de CO₂ cerca de la superficie de la lámina de agua y las condiciones fisicoquímicas son los factores clave en su desarrollo, geometría y secuencia estratigráfica. Este cambio en el ambiente de precipitación química del carbonato es relativamente abrupto en los ejemplos estudiados y se observa en los espeleotemas con un cambio lateral de facies muy nítido donde el eje crecimiento de los espeleotemas pasa a ser perpendicular al suelo de la cavidad entre facies vadosas y freáticas. Durante las bajadas del nivel del mar o los niveles del mar bajo se desarrolla la fase sedimentaria vadosa y, comúnmente, estos ciclos están ligados a periodos más fríos (posiblemente periodos glaciares). Las facies vadosas actúan como elementos de nucleación favoreciendo la precipitación posterior del carbonato en condiciones freáticas. Por el contrario, el desarrollo de fases sedimentarias freáticas se asocia a subidas del nivel del mar o nivel del mar alto y están ligadas a periodos más cálidos (interglaciares), aunque el aporte hídrico en la cueva puede ser variable. La presencia de superficies de erosión o hiatos en las secuencias vadosas de los espeleotemas pone de manifiesto cambios en el sistema hidrogeológico de alimentación, con un menor aporte de agua al sistema. Sin embargo, en las facies freáticas puede implicar un cambio en la fisicoquímica del agua.

La estratigrafía de la secuencia mixta de SMV-1 y STV-1 es más continua y precisa para analizar las oscilaciones del nivel del mar puesto que los cambios verticales de facies vadosas y laterales entre vadosas y freáticas son más nítidos y extensos, así como los ciclos sedimentarios de orden menor observados. Sin embargo, los depósitos poliédricos y globulares se desarrollan casi en su totalidad en condiciones freáticas y su secuencia estratigráfica no muestra una clara ciclicidad.

Por todo ello, los espeleotemas mixtos pueden ser excelentes indicadores paleoeustáticos, paleoclimáticos y paleoambientales del Mediterráneo Occidental, infiriendo también información hidrogeológica y geoquímica del ambiente de precipitación en el que se desarrollaron. Sin embargo, es necesario atender a la influencia de la tectónica durante el Cuaternario que ha podido modificar la cota actual de los depósitos. Y, realizar estudios de correlación sedimentaria con otros ambientes sedimentarios litorales, como paleodunas o paleoplayas, junto con el estudio en detalle de la secuencia estratigráfica de cada depósito para obtener datos precisos de las fluctuaciones marinas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por el Instituto Geológico y Minero de España (Unidad de las Islas Baleares), Ministerio de Economía y Competitividad de España. Agradecer el apoyo sobre el terreno de la Federación Balear de Espeleología, especialmente a su Presidente, Guiem Mulet.

REFERENCIAS

- Dorale, J., Onac, B., Fornós, J., Ginés, J., Ginés, A., Tuccimei, P. y Peate, D. 2010. Sea-Level Highstand 81,000 years ago in Mallorca. *Science*, 327, 860 pp
- Durán, J. J. 1996. Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo occidental. *Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid*. 408 p.

- Fairchild, I. J. y Baker, A. 2012. *Speleothem Science: From Process to Past Environments*. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, 450 pp.
- Fornós, J. J., Gelabert, B., Ginés, A., Ginés, J., Tuccimei, P. y Vesica, P. 2002: Phreatic overgrowths on speleothems: a useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of eastern Mallorca (Balearic Islands). *Geodinamica Acta*, 15, 113-125.
- Gràcia, F., Fornós, J.J., Gamundí, P., Clamor, B., Pocoví, J. y Perelló, M.A. 2009. Les descobertes subaquàtiques a la Cova des Pas de Vallgornera (Ilucmajor, Mallorca): Història i descripció dels descobriments, hidrologia, espeleotemes, sediments, paleontologia i fauna. *Endins*, 33: 35-72.
- Ginés, J., Ginés, A., Fornós, J., Merino, A. y Gracia, F. 2009. On the role of hypogene speleogenesis in shaping the coastal endokarst of southern Mallorca (Western Mediterranean). Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins. *Ukr. Inst. Spel. Kars. Special Paper* 1.
- Ginés, J., Ginés, A., Fornós, J. J., Tuccimei, P., Onac, B. y Gràcia, F. 2012. Phreatic overgrowths on speleothems (POS) from Mallorca: updating forty years of research. In: Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies (Ginés et al., eds.), *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 18: 111-146
- Merino A., 2006 Espeleotemas poco frecuentes y morfologías de corrosión hallados en la Cova des Pas de Vallgornera. *Endins*, 30: 49-70.
- Merino A., Mulet A. y Mulet G., 2006. La Cova des Pas de Vallgornera: 23 kilómetros de desarrollo topografiado (Ilucmajor, Mallorca). *Endins*, 30: 29-48.
- Merino A., Fornós, J. J. y Ginés, A., 2011. Espeleotemas minerales de les coves de les Illes Balears. In: Gràcia F., Ginés J., Pons G.X., Ginard A. y Vicens, D. (Eds.), El carst: patrimoni natural de les Illes Balears. *Endins*, 35 / *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears* 17: 183-198.
- Merino A., Mulet A., Mulet G., Croix J. A., Kristofersson A., Gràcia F. y Perelló M. A., 2014. Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca, Spain): History of exploration and cave description. *International Journal of Speleology*, 43 (2): 95-104.
- Onac, B., Fornós, J. J., Ginés, J., Ginés, A., Tuccimei, P., Peate, D. y Björck, S. 2006. Sea-level position at ~80 ka based on phreatic overgrowths on speleothems from Mallorca. In: Onac, B., Tămaș, T., Constantin S., Perșoiu, A. (Eds.): *Archives of Climate Change in Karst, Proceedings of the symposium Climate Change: The Karst Record (IV)*, 26-29 May 2006, Băile Herculane, Romania, Karst Water Institute, 189-191.
- Pomar, L., y Ward, W. C., 1999: Reservoir-Scale Heterogeneity in Depositional Packages and Diagenetic Patterns on a Reef-Rimmed Platform, Upper Miocene, Mallorca, Spain, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*; 83: 1759-1773.
- Pomar, L., Ginés, A. y Ginés, A. 1979. Morfología estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. *Endins*. 5-6, 3-17 pp.
- Robledo, P. A. Mateos, R. y López, J. M. 2009. Thermal anomalies and cave structures: possible thermal origin of the Vallgornera Cave (Mallorca, Spain.). *27th IAS Meeting of Sedimentologist. Medimond International Proceedings*. Alghero, Italia, 147-151.
- Surić, M., Jalžić, B. y Petricoli D. 2007. Submerged speleothems – expect the unexpected. Examples from the eastern Adriatic coast (Croatia). *Acta Carsologica*, 36 (3), 389-396.
- Tuccimei P., Ginés J., Delitala C., Ginés A., Gràcia F., Fornós J. J. y Taddeucci A., 2006. Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1): 1-21.
- Tuccimei P., Soligo M., Ginés J., Ginés A., Fornós J. J., Kramers J. y Villa I. M., 2010. Constraining Holocene sea levels using U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (7): 782-790.

Vesica P. L., Tuccimei P., Turi B., Fornós J. J., Ginés A. y Ginés J., 2000. Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-Series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca (Spain). *Quaternary Sciences Reviews*, 19 (9): 865-879.

Heterogeneidades hidrogeológicas en el entorno de la cueva de Nerja (Málaga). Consideraciones sobre la evolución karstogénica

José Benavente⁽¹⁾, Iñaki Vadillo⁽²⁾, Cristina Liñán^(2,3), Francisco Carrasco⁽²⁾, Albert Soler⁽⁴⁾ y Carmen Almécija⁽¹⁾

(1) Instituto de Investigación del Agua, Universidad de Granada, c/ Ramón y Cajal, nº 4. 18071 Granada (jbenaven@ugr.es)

(2) Grupo de Hidrogeología, facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. 29071 Málaga. (vadillo@uma.es, fcarrasco@uma.es)

(3) Fundación Cueva de Nerja. Carretera de Maro s/n. 29787. Nerja, Málaga. (cbaena@cuevanerja.com)

(4) Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Yacimientos Minerales, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, Martí i Franqués, 08028 Barcelona. (albertsolergil@ub.edu)

RESUMEN

En el entorno inmediato de la Cueva de Nerja (Málaga) existen perforaciones de diferente naturaleza que permiten identificar niveles de agua subterránea entre aproximadamente 50 m y 130 m s.n.m. Todos ellos corresponden a la misma formación acuífera: mármoles calizos y dolomíticos fracturados y karstificados de edad triásica. El fondo de la cueva se localiza actualmente unos pocos metros por encima del nivel freático correspondiente a un sistema de flujo kárstico activo que drena por el cercano manantial de Maro (120 m). En el presente trabajo se presentan datos relativos a los niveles de agua subterránea en el entorno de la cueva y a los resultados de dos ensayos hidráulicos en sendas perforaciones. Las características hidrodinámicas e hidroquímicas del manantial de Maro indican un elevado grado de karstificación funcional. Por el contrario, los datos hidrodinámicos en las perforaciones ensayadas indican una permeabilidad baja. Ello refleja una marcada heterogeneidad del acuífero que también se manifiesta por la existencia de niveles colgados sobre el nivel freático. Estas y otras observaciones permiten plantear una hipótesis general sobre la karstificación en el macizo montañoso que forman las sierras Tejeda y Almijara, en cuyo extremo SE se localiza la Cueva de Nerja.

Palabras clave: nivel piezométrico, heterogeneidad, karstificación, Cueva de Nerja.

Hydrogeological heterogeneities in the vicinity of the Nerja Cave (Málaga). Considerations on the karstogenesis evolution

ABSTRACT

A number of boreholes drilled with different purposes in the surroundings of the Nerja Cave (Málaga) show water levels between 50 m and 130 m a.s.l. approximately. All of them correspond to the same aquifer formation: fissured and karstified calcite and dolomite marbles of Triassic age. The Nerja Cave floor is at present perched a few metres above the phreatic level of an active karstic flow system which drains by the nearby Maro spring (120 m). The hydrodynamical and hydrochemical characteristics of this spring indicate a high degree of functional karstification. However, the hydrodynamical data of the two tested boreholes suggest a low permeability. This indicates a marked heterogeneity of the aquifer, which also shows perched water levels. Based on these observations and other facts, we present a general hypothesis on the karstogenic evolution of the Sierra Almijara massif, in which the Nerja cave is located.

Keywords: piezometric level, heterogeneity, karstification, Nerja Cave.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista geográfico, la Cueva de Nerja se localiza a unos 800 m del mar mediterráneo (Figura 1), en el borde sur del macizo montañoso que forman las sierras Tejeda (al NW) y Almijara (al N), cuyos picos culminantes superan ligeramente los 2000 m de altitud. La mayor parte de este macizo está integrado por mármoles triásicos, 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 a lo largo del macizo, aunque en el entorno de la cueva la estructura de los mármoles es muy simple, pues aparecen con morfología casi tabular y buzamientos suaves hacia el mar.

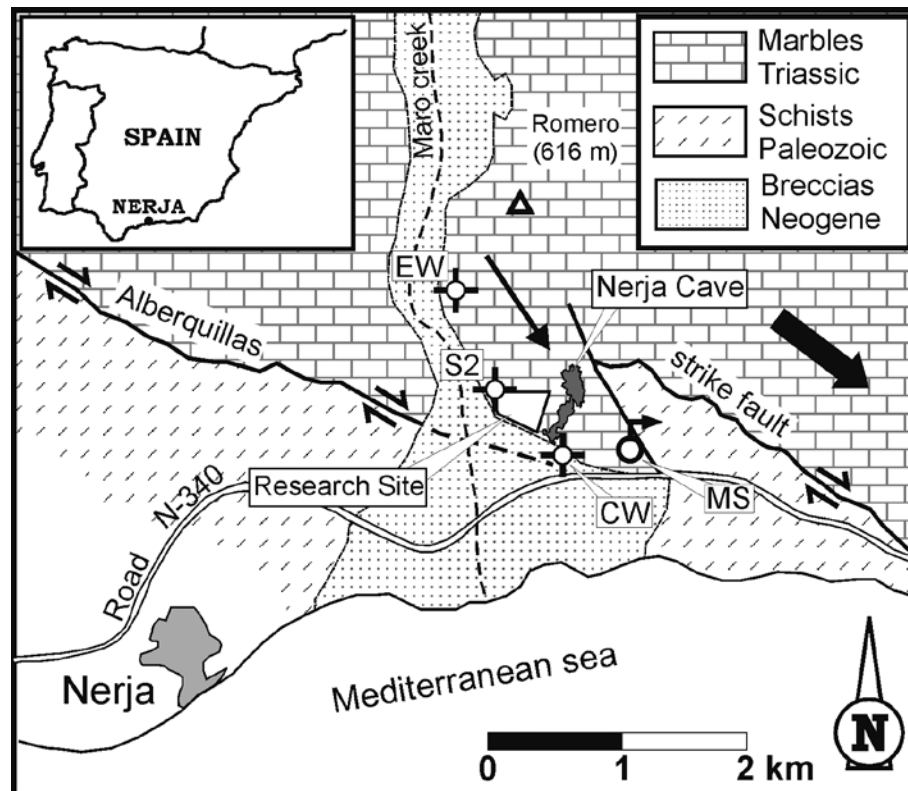


Figura 1. Situación general del área de estudio y esquema geológico de la misma, con indicación de la localización de la Cueva de Nerja (en planta) y la de los puntos considerados en el trabajo.

En discordancia sobre los materiales anteriores aparecen una serie de depósitos neógenos y cuaternarios que jalonan la franja costera. Existen materiales pliocenos conglomeráticos y arenosos, marinos y continentales. A techo de los materiales pliocenos aparecen unas brechas continentales del Pleistoceno, muy cementadas, cuya potencia es de 50 m en las áreas más próximas a la sierra y 10-15 m en los puntos más cercanos a la costa. Estos depósitos, relativamente resistentes a la erosión, originan unas plataformas características, ligeramente inclinadas hacia el mar, que en el Barranco de Maro (Figura 1) se encuentran claramente afectados por la incisión fluvial. Otro ejemplo de estas plataformas que forman acantilados en la costa del núcleo urbano de Nerja es el conocido "Balcón de Europa". Otro testimonio significativo de encostramiento, no representado en la Figura 1 por su reducida extensión cartográfica, se localiza al sur de la cueva de Nerja, justo en el borde del mar, donde se encuentra un afloramiento de travertinos depositado a partir de las aguas del manantial de Maro, del que luego se harán comentarios.

Al sur de la Cueva de Nerja, los afloramientos de los materiales metapelíticos se ponen en contacto con los materiales carbonáticos acuíferos por medio de una importante falla normal y de desgarre, plurikilométrica, de dirección aproximada WNW-ESE ("Alberquillas strike fault": Figura 1), activa en tiempos geológicos recientes. El resultado neto de la actividad de esta falla, también denominada de Frigiliana-Nerja o del Río de La Miel, desde el Mioceno superior ha sido la elevación relativa del bloque norte, en el cual se desarrolla la cueva (Guerra et al. 2004).

En relación con la hidrogeología de la Cueva de Nerja y su entorno, el antecedente a destacar es el trabajo de Andreo y Carrasco (1983), en el que, entre otros, se incluyen resultados correspondientes a estudios regionales llevados a cabo anteriormente por el ITGE y el SGOP. Con posterioridad se han llevado a cabo estudios de carácter más específico, alguno de los cuales se citarán más adelante, aunque merece ser destacada la reciente revisión de la hidrogeología del área efectuada por Pérez-Ramos y Andreo (2007).

Desde el punto de vista de la gestión hidrológica, el macizo montañoso de las sierras de Tejeda y Almijara comprende actualmente tres Masas de Agua Subterránea (MAS) escalonadas de NW a SE: Tejeda, Almijara y (Las) Alberquillas. La primera está bien individualizada hidrogeológicamente. Desde la segunda a la tercera parece existir flujo subterráneo (Pérez-Ramos y Andreo, 2007). En el borde meridional de la MAS Alberquillas, cuya extensión superficial es de unos 70 km², es donde se ubica la cueva de Nerja; esta MAS contacta con el mar algo más al E.

La cueva de Nerja -abierto a las visitas en aproximadamente un tercio de su volumen- se localiza en la zona vadosa de la MAS, entre las cotas 127 m y 195 m. Es el principal testimonio de endokarst que se conoce en el área, aunque también se han identificado -mediante exploración convencional o espeleológica, reconocimiento en sondeos o por métodos geofísicos- otras cavidades de menor entidad localizadas igualmente en la zona vadosa a cotas superiores e inferiores a las de la Cueva de Nerja. En este sentido, recientemente está siendo objeto de estudio la influencia de una cavidad próxima situada a mayor cota (Cueva Pintada) en el régimen de ventilación de la Cueva de Nerja, dado que entre ambas se favoreció la comunicación por medios antrópicos (Liñán et al., en prep.).

En el entorno de la cueva de Nerja existe una importante surgencia -el manantial de Maro (Figura 1: MS), a 120 m de cota- cuyo régimen de descarga (caudales de estiaje de < 0,1 m³/s y puntas de caudal de > 1 m³/s) implica un grado relativamente importante de karstificación funcional. Por otro lado, las características físico-químicas de sus aguas hacen sospechar procesos de desgasificación de CO₂ que corroboran dicha circunstancia en tanto que sugieren la existencia de una cavidad asociada espacialmente a su punto de surgencia. De hecho, esto parece haberse detectado en un sondeo realizado en su inmediata proximidad, aunque otra captación muy cercana resultó improductiva (Andreo y Carrasco, 1993; Liñán et al., 2000; Pérez-Ramos y Andreo, 2007; Moral y Benavente, 2010)

Cerca de la entrada a la Cueva de Nerja, a una cota de aproximadamente 140 m, hay un sondeo de captación (Figura 1: CW) de 150 m de profundidad usado para el suministro de las instalaciones de la cueva. Fue construido en 1998 para sustituir uno adyacente (1 m de separación) de 165 m, construido en 1984, que actualmente está sin instalar y es usado para fines de control hidrogeológico.

Otro punto considerado en el presente estudio es un sondeo sin instalar situado en la margen izquierda del barranco de Maro (Figura 1: EW). Está a una cota aproximada de 240 m y su profundidad es de unos 200 m. A 1 km aproximadamente al sur de este punto, aproximadamente a 160 m de cota, se localiza un sondeo de investigación de 380 m de profundidad (Figura 1: S2). Junto a este punto y a una cota similar existen una serie de sondeos de investigación de profundidades entre 15 m y 30 m, todos ellos en la zona vadosa del acuífero. Pertenecen a una red de control ("Research Site": Figura 1) del contenido en CO₂ del aire de esa zona (Benavente et al., 2010).

En el presente trabajo se presentan datos relativos a los niveles de agua subterránea en el entorno de la Cueva de Nerja y a los resultados de dos ensayos hidráulicos realizados en los puntos CW y S2. Estas y otras observaciones permiten plantear una hipótesis general sobre la karstificación en el macizo montañoso que forman las sierras Tejeda y Almijara, en cuyo extremo SE se localiza la cavidad.

RESULTADOS

El nivel de agua en el sondeo sin instalar CW presenta variaciones importantes que están asociadas al régimen de bombeo en el sondeo instalado adyacente, el cual dispone de un sistema de accionamiento automático en función del estado de llenado del depósito al que se conduce el agua bombeada (caudal aproximado: 1 L/s). En este punto se va a instalar en breve un dispositivo de registro programable para controlar con precisión esas variaciones, pero con objeto de tener una primera idea de las mismas se hizo un seguimiento a lo largo de una serie de horas el 4 de abril de 2014. Se comprobó que el nivel variaba entre aproximadamente 40m y 73 m de profundidad, la primera cifra asignable al nivel estático, cuya cota resulta estar, por tanto, próxima a los 100 m.

Los descensos medidos en las fases de bombeo y los ascensos registrados en las fases de recuperación han sido interpretados por el método de Jacob. En ambos casos se obtiene un valor de transmisividad similar, del orden de $T = 1 \text{ m}^2/\text{d}$. La conductividad hidráulica que resulta es de aproximadamente $K = 0,01 \text{ m/d}$. La gráfica de descensos ha permitido también estimar un valor aproximado del coeficiente de almacenamiento: $S = 0,1 \%$. La gráfica del ensayo de recuperación presenta una anomalía interpretable como resultado del vaciado del acuífero a lo largo del bombeo.

En el punto S2 el nivel estático se ha medido en diferentes ocasiones, con valores bastante similares en todas ellas, del orden de los 100 m de profundidad. Esto conduce a una cota piezométrica próxima a los 60 m, sin muchas variaciones. El 12 de septiembre de 2013 se realizó un ensayo de inyección de agua (tipo "slug test"). Su interpretación por el método de Hvorslev (1951) ha conducido a un valor de conductividad hidráulica del orden de 10^{-4} m/d .

En los sondeos de investigación de la zona vadosa existe uno (S6) en el que sistemáticamente viene siendo posible registrar nivel de agua a una profundidad de 27-28 m, es decir, 1-2 m sobre su fondo. Se trata, pues, de un nivel colgado dentro del acuífero carbonático. La composición química del agua de este nivel ha permitido corroborar medidas de PCO_2 en la zona vadosa (Benavente *et al.*, 2010).

DISCUSIÓN

En el entorno de la Cueva de Nerja existe un sistema de flujo subterráneo cuyo nivel piezométrico se localiza alrededor de los 130 m-120 m de cota (puntos EW y MS), lo cual representa un nivel a unos 10 m por debajo del fondo de la cavidad. Esta es la situación actual, pero la existencia de espeleotemas freáticos en algunas salas de la cavidad traduce la elevación relativa de la misma respecto del límite superior de la zona saturada del acuífero en que se ubica, en lo que puede ser una consecuencia de la actividad neotectónica de la importante falla que limita meridionalmente el acuífero.

La surgencia MS (manantial de Maro) presenta una descarga con rasgos de comportamiento kárstico y parece estar relacionada con un conducto de cierta importancia. Aparece condicionada por una falla transversal, satélite de la principal, y por la incisión que produce un pequeño barranco. El manantial lleva situado en este punto, al menos, desde el Pleistoceno superior (Pérez-Ramos y Andreo, 2007). Al igual que MS, otras surgencias significativas del macizo montañoso presentan depósitos travertínicos asociados, como por ejemplo las del Barranco del Alcázar, en Sierra Tejeda, entre los 600 m y 800 m de cota, los cuales se encuentran actualmente en posición colgada respecto a dicho cauce debido a la intensa incisión fluvial que es consecuencia del levantamiento topográfico reciente del macizo.

En el macizo montañoso que integran las MAS Tejeda-Almijara-Alberquillas vertiente al mediterráneo existe otro manantial, al igual que el de Maro (MS), de comportamiento típicamente kárstico: La Fájara, a unos 440 m de cota, asociado al drenaje de Sierra Tejeda, el cual se localiza unos pocos metros por debajo de la entrada a la cueva del mismo nombre. Esta cavidad, en periodos de precipitaciones intensas, llega a evacuar agua en un funcionamiento de tipo "trop-plein". Existe otro ejemplo de "trop-plein" en la vertiente N de Sierra Tejeda, a una cota cercana a los 1000 m: el sistema cueva de Linarejo-manantiales de Játar.

Esas manifestaciones típicamente kársticas son, según Pérez-Ramos y Andreo (2007), bastante excepcionales, pues el drenaje kárstico en el conjunto del macizo ha de considerarse poco desarrollado y el flujo subterráneo predominante es de tipo difuso y se produce a diferentes intervalos altitudinales. La descarga de MS, a unos 120 m de cota, sería, como se ha dicho, una excepción, en tanto que se vincula a un drenaje kárstico. Dentro del mencionado intervalo de diferentes niveles piezométricos en el macizo, las referencias más próximas al sector de la Cueva de Nerja indican valores de 40 m (sector del Río de la Miel, al este) y de menos de 85 m (sector del Río Chillar, al oeste). Este último caso corresponde a datos de 1992 que indican una evolución decreciente por bombeos acompañada del agotamiento de manantiales próximos (Andreo y Carrasco, 1993).

En estudios previos (Andreo y Carrasco, 1993, y otros anteriores recogidos en dicho trabajo) se admite la existencia en el entorno de la Cueva de Nerja de un flujo "regional" en dirección WNW-ESE que motivaría el drenaje subterráneo hacia el mar de parte de los recursos de la MAS de Alberquillas en las inmediaciones del sector de Cerro Gordo. Ello implicaría la existencia de un nivel piezométrico a cotas ligeramente por encima de la del mar. Sin embargo, estudios recientes apuntan a que esta descarga debe ser en la actualidad muy poco significativa como consecuencia del incremento en las extracciones (Pérez-Ramos y Andreo, 2007).

El nivel estático en el punto CW indica una cota de aproximadamente 100 m, que descendería hasta casi 60 m en condiciones dinámicas. Son valores, pues, inferiores a los del sistema de flujo antes citado. Ello podría traducir la existencia de un bloque menos transmisor bajo el mencionado conducto kárstico, de manera que el bombeo dentro del bloque indujera la desconexión entre ambos niveles. Las características físico-químicas e isotópicas (^2H y ^{18}O) de las aguas de CW muestran semejanza con las de MS, aunque indican mayor contribución de flujos relativamente más profundos y recarga a menor cota (Andreo y Carrasco, 1993; Liñán *et al.*, 2000; Benavente *et al.*, en prensa).

Los ensayos hidráulicos en el sondeo CW apuntan a un escaso grado de karstificación. Sin embargo, a unos pocos km al este de la Cueva de Nerja existen captaciones cuyas características hidrodinámicas indican una karstificación significativa del acuífero triásico a cotas por debajo del mar (Castillo *et al.* 1986; Ollero *et al.*, 1988).

Tanto las aguas del manantial de Maro como las del sondeo CW muestran contenidos anómalamente altos de sulfatos y de calcio, lo cual, aunque no es excepcional en el drenaje de este tipo de materiales en el ámbito de la cordillera, si constituye una singularidad en el contexto del macizo montañoso de Sierra Tejeda-Almijara. El origen de estos iones y su posible relación con la génesis de la Cueva de Nerja es un aspecto que requiere estudios adicionales.

El valor extremadamente bajo de K encontrado en el punto S2 puede estar relacionado con las circunstancias de su entubación, lo que también explicaría su composición química anómala. Estos aspectos se detallan en otro trabajo (Benavente *et al.*, en prensa). Aunque, por tanto, es aconsejable no considerar como representativo el valor de su cota piezométrica (unos 60 m snm), ésta podría explicarse de manera similar a lo propuesto en el caso del punto CW: que se trate de otro bloque poco transmisor afectado por un bombeo continuo (en este caso el del sondeo de abastecimiento a una urbanización de chalets que allí existe), de manera que exista un nivel local que se encuentre "descolgado" del sistema principal de flujo kárstico del sector, que es el que drena por MS.

Las circunstancias expuestas responden a que, desde el punto de vista hidrogeológico, el karst es un medio típicamente heterogéneo, lo cual tiene que ver con su génesis y evolución particulares. Las características indicadas en Pérez-Ramos y Andreo (2007) respecto a la productividad tan distinta de dos sondeos junto al manantial de Maro son prueba de ello. La existencia del nivel colgado en el S6 es también indicio de heterogeneidad.

Los aspectos comentados son coherentes con una fase de karstificación generalizada, seguramente durante el Plioceno, en un periodo con clima favorable para dicho proceso, relacionada espacialmente con el nivel del mar Mediterráneo. La Cueva de Nerja, de hecho, ha sido interpretada como de tipo litoral y su origen vinculado con la capacidad de disolución de carbonatos que se produce en la zona de transición agua dulce-agua salada (Durán y Vázquez, 2008)). Las cavidades generadas presentan desarrollo principalmente en la horizontal y han experimentado más tarde los efectos de la neotectónica, que ha tenido como consecuencia su elevación en diferente grado respecto del nivel del mar.

A lo largo del Pleistoceno y hasta la actualidad continúa la elevación relativa neta del macizo respecto del mar, favorecida por la acción de fracturas normales y de salto en dirección (como la falla de Alberquillas). El clima adquiere condiciones cada vez más mediterráneas. La elevación del macizo favorece el desarrollo de formaciones detríticas en sus bordes, las cuales, en condiciones climáticas favorables, pueden encostrarse de manera muy intensa. En estas condiciones se favorece también el depósito de travertinos y el relleno de las cavidades por espeleotemas, como demuestran las dataciones de estos elementos en la cueva de Nerja y su entorno (Durán et al., 1983). La actividad neotectónica favorece la incisión fluvial, la cual genera travertinos “colgados” sobre los cauces y puede exponer antiguas cavidades en las laderas. También, como consecuencia de los cambios climáticos cuaternarios, las redes kársticas “colgadas” han podido volver a ser activas en determinados periodos, de manera semejante a lo que actualmente sucede esporádicamente en los “trop-pleins”.

Esta evolución presenta similitudes con la que se interpreta inmediatamente al norte del macizo de Sierra Tejada-Almijara (López Chicano, 1992), aunque allí la menor intensidad de la erosión fluvial, seguramente como consecuencia de la menor proximidad del nivel de base, ha permitido la conservación de otros elementos morfológicos de la evolución karstogénica, como las superficies de aplanamiento asociadas a poljes, que no se identifican en el borde sur, las cuales más adelante han evolucionado en alguno de estos sectores (Sierra Gorda, por ejemplo) a espectaculares campos de dolinas. El endokarst en esta zona norte es mayoritariamente “fósil” y se asocia a cotas elevadas. Todo ello, al igual que en la zona sur del macizo, debido a la elevación importante del relieve. En cuanto a otras circunstancias comunes, el carácter montañoso de ambas vertientes hace suponer una incidencia similar de procesos periglaciales en las cotas más altas; también facilita la posible erosión de formaciones edáficas asociadas al exokarst, con la consecuencia general de la disminución de la cobertera vegetal y, junto con el efecto de la tendencia semiárida del clima actual, de la “ralentización” de los procesos actuales de karstificación. En ese sentido, es posible que los escasos suelos actuales sobre los mármoles del entorno de la Cueva de Nerja conserven herencias de otros generados en climas más cálidos y húmedos, como podría ser el caso de los contenidos relativamente elevados en materia orgánica (Benavente et al., 2010).

Hidrogeológicamente, a nivel del macizo esta evolución karstogénica produce una serie de diferentes niveles piezométricos, asociados a surgencias próximas a los cauces de los principales cursos de agua. En unos pocos casos (como el del manantial de Maro) con vinculación espacial al endokarst, aunque mayoritariamente con drenaje de tipo difuso, lo que es igualmente un testimonio de heterogeneidad hidrogeológica.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo aporta datos hidráulicos obtenidos en perforaciones que apuntan a la escasa karstificación funcional bajo una importante manifestación endokárstica en mármoles triásicos, la Cueva de Nerja. Entre la cueva y el elemento poco transmisor subyacente se localiza una red activa de drenaje kárstico (manantial del Maro, a unos 120 m de cota).

Actualmente el endokarst, funcional o no, se identifica a cotas muy diferentes dentro del macizo montañoso de Sierra Tejada-Almijara, con cumbres de hasta 2000 m, en cuyo borde meridional se ubica la Cueva de Nerja. Las observaciones son coherentes con una fase importante de karstificación en torno al Plioceno en estrecha relación espacial con el mar y un posterior levantamiento del relieve con efectos diferentes según los sectores debido a la neotectónica. Durante el Cuaternario se han sucedido diferentes episodios de encostramiento, tanto en las cavidades como en forma de travertinos o cementando formaciones aluviales. La elevación neta del relieve unida a la proximidad del nivel del mar ha condicionado una intensa erosión fluvial y el que cavidades como la de Nerja pasen de condiciones freáticas a vadosas. Esta evolución general es a grandes rasgos similar a la que se interpreta en el borde norte del macizo montañoso, aunque allí la menor erosión ha permitido la conservación de otros elementos morfológicos de la karstogénesis.

Las ideas anteriores son compatibles con que en ámbitos semejantes dentro del macizo montañoso puedan existir otras manifestaciones endokársticas más o menos parecidas a la Cueva de Nerja. Por otro lado, en lo relativo a las condiciones actuales del drenaje subterráneo del acuífero carbonático, en la vertiente mediterránea del macizo de Sierra Tejada-Almijara existen numerosos manantiales, pero no parecen mostrar funcionamiento kárstico, salvo dos casos a cotas muy diferentes. Uno de ellos es el manantial de Maro, cuya estrecha relación con la Cueva de Nerja ya se ha citado. El que este último caso corresponda a un drenaje con características hidroquímicas singulares en el contexto del macizo, por la evidencia de disolución de SO_4Ca que presentan sus aguas, merecería estudios específicos. En definitiva, se trataría de precisar si la cueva de Nerja es un ejemplo con características singulares dentro del modelo de evolución planteado o, por el contrario, es un caso más entre otros muchos posibles, aunque con la afortunada circunstancia de su descubrimiento.

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.

REFERENCIAS

- Andreo, B. y Carrasco, F. 1993. Estudio hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja. *Trabajos Cueva Nerja* 3: 163–187.
- Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, A., Liñán, C. y Moral, F. 2010. Air CO₂ contents in the vadose zone of a Mediterranean karst. *Vadose Zone Journal*, 29:647-659.
- Benavente J., Vadillo, I., Liñán, C., Carrasco, F. y Soler, A. En prensa. A field analog of CO₂-closed conditions in a karstified carbonate aquifer (Nerja Cave experimental site, South Spain). *Int. Symp. Karst Aquifers* (ISKA 2014). Ed. Springer.
- Castillo, E., Gollonet, F. J. y Delgado, J. 1986. Características hidrodinámicas de materiales carbonáticos alpujarrides en el sector Nerja-La Herradura (Granada). *SIAGA*, 2: 267-286.
- Durán, J. J., Grün, R. y Ford D. C. 1983. Dataciones geocronológicas absolutas (métodos E.S.R. y Series de Uranio) en la Cueva de Nerja y su entorno. Implicaciones evolutivas, paleoclimáticas y neosismotectónicas. *Trabajos Cueva Nerja* 3: 233-248.
- Durán, J. J. y Vázquez, J. 2008. El endokarst en Andalucía. En: El karst en Andalucía (Coords. De ed. J. M. Calaforra y J. A. Berrocal), 33-40. *CMA-Junta de Andalucía*.
- Guerra, A., Serrano, F. y Ramallo, D. 2004. Geomorphic and sedimentary Plio-Pleistocene evolution of the Nerja area (northern Alboran basin, Spain). *Geomorphology* 60: 89–105.
- Hvorslev, M. J., 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observations. *US Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station Bulletin* 36.
- Liñán, C., Andreo, B. y Carrasco, F. 2000. Caracterización hidrodinámica e hidroquímica del manantial de Maro (Sierra Almijara, provincia de Málaga). *Geogaceta*, 27: 95-98.

- López Chicano, M. 1992. Hidrogeología del acuífero kárstico de Sierra Gorda. *Tesis doctoral Univ. Granada*. 429 p.
- Moral, F. y Benavente, J. 2010. Importancia del transporte de CO₂ a través del aire de la zona saturada de los sistemas kársticos. Algunos ejemplos de la Cordillera Bética. En: J.J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*: 169-182. Madrid. Asociación española de Cuevas Turísticas.
- Ollero, E., García-García, J. L. y Alcaín, G. 1988. Características hidrogeológicas del acuífero carbonatado costero de Las Alberquillas. *TIAC'88*, 3: 439-453.
- Pérez-Ramos, I y Andreo, B. 2007. MAS Alberquillas y Sierra Almijara. En: *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*, t. 2. J. J. Durán-Valsero, coord.gral. Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Málaga.
- Sanz de Galdeano, C. 1993. La fracturación en el entorno de la Cueva de Nerja. *Trabajos Cueva Nerja* 3: 95-114.

Integración de métodos geofísicos para el estudio de cavidades en el sistema kárstico de la Gruta de las Maravillas (Aracena)

Francisco José Martínez-Moreno⁽¹⁾, Jesús Galindo-Zaldívar^(1,2), Antonio Pedrera⁽²⁾, Teresa Teixido⁽³⁾, José Antonio Peña⁽³⁾, Lourdes González-Castillo⁽¹⁾, Patricia Ruano^(1,2), Ana Ruiz-Constán⁽⁴⁾, Manuel López-Chicano⁽¹⁾, Wenceslao Martín-Rosales⁽¹⁾ y Antonio Azor⁽¹⁾

(1) Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071-Granada, Spain (franmartinez@ugr.es, lgcastillo@ugr.es, mlopezc@ugr.es, wmartin@ugr.es, azor@ugr.es)

(2) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, 18071-Granada, Spain (pedrera@ugr.es, jgalindo@ugr.es, pruano@ugr.es)

(3) Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, Universidad de Granada, 18001-Granada, Spain (tteixido@ugr.es, peruano@ugr.es)

(4) Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003-Madrid, Spain (aconstan@ugr.es)

RESUMEN

El sistema kárstico donde se emplaza la Gruta de las Maravillas ha sido estudiado mediante la combinación de metodologías geofísicas. La cueva, localizada en el Cerro del Castillo, se ha desarrollado en mármoles con intercalaciones de cuarcitas, granodioritas y gneises de la banda metamórfica de Aracena, situada a lo largo del contacto entre las zonas de Ossa Morena y Sudportuguesa, dentro del Macizo Ibérico. La formación de la cueva está controlada por la presencia de una banda mineralizada de pirita y óxidos de hierro que atraviesa los mármoles en dirección N110°E, cerca del contacto con granodioritas. Esta capa confiere a la cavidad condiciones especiales de mineralización, con las paredes cubiertas de óxidos de hierro. Con el objetivo de estudiar la posible continuidad de la Gruta de las Maravillas se han aplicado diferentes metodologías geofísicas en todo el cerro. Como primera aproximación, se ha realizado un estudio regional con microgravimetría y microtopografía en una malla regular de 10 x 10 m. Las medidas de microgravimetría han permitido obtener el mapa de anomalía residual, el cual define valores negativos asociados a contraste de densidad negativa que, posiblemente, están debidos a la presencia de otras cavidades desconocidas. Para confirmar la presencia o no de estas cavidades, se han aplicado otras metodologías geofísicas sobre las zonas de interés: magnetometría, tomografía eléctrica de resistividad y polarización inducida, perfil de velocidades y cobertura de rayos en sísmica de refracción, offset común en sísmica de reflexión y Georradar. La integración de estas técnicas se ha realizado en perfiles coincidentes en el espacio y con distintas longitudes, de forma que se alcanzan distintas profundidades y resolución. Estas metodologías han permitido, por un lado, definir las anomalías que permiten detectar las cavidades en cada uno de los métodos aplicados y, por otro lado, confirmar si las anomalías gravimétricas observadas se deben a cavidades o cambios litológicos. En este trabajo se propone la posible continuidad de la Gruta de las Maravillas en otras zonas del cerro.

Palabras clave: continuidad de la Gruta de las Maravillas, métodos geofísicos, microgravimetría, prospección sísmica, tomografía eléctrica.

RESUMO

O sistema onde a Gruta das Maravilhas está alojado, tem sido estudado através da combinação de metodologias geofísicas. A caverna, localizada no Cerro do Castelo, desenvolveu-se em mármore com quartzitos intercalados, gnaisses e granodioritos, ao longo do contato entre as zonas de Ossa Morena e Sudportuguesa dentro do Maciço Ibérico. A sua formação é controlada pela presença de uma banda mineralizada de pirita e óxidos de ferro que atravessa o mármore em direção N110°E, perto da zona de contato com granodioritos. Esta camada confere à cavidade condições especiais de mineralização, cujas paredes estão cobertas com óxidos de ferro. A fim de estudar a possível continuidade da Gruta das Maravilhas, tem-se aplicado diferentes métodos geofísicos em todo o

colina. Como primeira aproximação, realizamos um estudo microgravimétrico e microtopografia a nível regional. Este estudo foi realizado numa grade regular de 10 x 10 m. A partir das medições microgravimétricas, obteve-se o mapa de anomalia residual, o qual define valores negativos associados ao contraste da densidade negativa, possivelmente devido à presença de outras cavidades desconhecidas. Para confirmar a presença ou ausência destas cavidades, foram aplicados outros métodos geofísicos às áreas de interesse: magnetometria, tomografia de resistividade elétrica e polarização induzida, perfil de velocidade e cobertura raios em refração sísmica, offset comun em reflexão sísmica e GPR. A integração destas técnicas tem sido feita nos perfis correspondentes ao espaço e com diferentes comprimentos, de modo a que diferentes profundidades e resoluções sejam alcançadas. Estas metodologias têm permitido definir a forma como são detetadas as cavidades em cada um dos métodos de aplicação. Além disso, permite também confirmar se as anomalias gravimétricas se devem a cavidades ou alterações litológicas. Este artigo propõe e explora a possível existência da continuidade da Gruta das Maravilhas que estaria presente em outras áreas do Cerro do Castelo.

Palavras-chave: continuidade da Gruta das Maravilhas, métodos geofísicos, microgravimetria, prospecção sísmica, tomografia elétrica.

ABSTRACT

The karst system where is emplaced the Gruta de las Maravillas has been studied by the combination of geophysical methods. The cave, located in Cerro del Castillo hill, has been developed in marbles with intercalations of quartzites, granodiorites and gneiss, of the metamorphic Aracena band located along the contact between Ossa Morena Zone and South Portuguese Zone, in the Iberian Massif. The cave development is controlled by the presence of a mineralized band of pyrite and iron oxides that cross the marbles in N110°E direction, near the contact with granodiorites. This band provides to the cavity special conditions of mineralization, with walls covered by iron oxides. In order to study the possible continuity of the Gruta de las Maravillas, different geophysical methods have been applied throughout the hill. As first approximation, it has performed a regional study with microgravity and microtopography in regular grid of 10 x 10 m. These measures have provided a residual anomaly map, which highlight negative values associated to negative density contrast probably due to the presence of unknown cavities. To confirm the existence of these cavities, it has been applied other geophysical methods on areas of interest: magnetic, electrical resistivity tomography, induced polarization, velocity and ray tracing profiles in seismic refraction, common offset in seismic reflection, and ground penetrating radar. The integration of these techniques has been carried out in profiles matching in the space with different lengths, reaching diverse depth and resolution. These methods have allowed, in one hand, define the anomalies related to cave detection on each applied methods and, in the other hand, confirm if the gravity anomalies are due to cavities or lithological changes. In this work it is proposed the possible continuity of the Gruta de las Maravillas toward other zones of the Cerro del Castillo.

Keywords: Gruta de las Maravillas continuity, geophysical methods, microgravity, seismic prospection, electrical tomography.

INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos son comúnmente utilizados para la detección de cavidades debido al alto contraste en propiedades físicas tales como la densidad, resistividad eléctrica o propiedades sísmicas entre cueva y roca encajante. La utilización de un solo método geofísico, como gravimetría (Chico, 1964) o tomografía eléctrica (Martínez-Pagán et al., 2013), aporta información parcial debido a que solo se centra en una propiedad física, la cual puede quedar enmascarada por las condiciones de contorno. La combinación o integración de métodos geofísicos permite, por un lado, resolver las incertidumbres en la detección de cavidades y, por otro lado, poder definir morfologías y volúmenes de una forma mucho más precisa (Martínez-Moreno et al., 2013). La selección del método geofísico apropiado depende de varios factores como (i) tamaño, profundidad y morfología de la cavidad; (ii) litología en la que se encuentra emplazada (roca, heterogeneidades, isotropía, fracturas, etc); (iii) contenido en agua de la roca matriz y la presencia de aire, agua o ambos en la cavidad; (iv) salinidad del agua y naturaleza de los precipitados (i.e. arcillas de descalcificación, contenidos metálicos, etc.).

El objetivo de este trabajo es probar los resultados obtenidos mediante diferentes metodologías geofísicas y su combinación en la detección de cavidades en condiciones de mineralización. Se ha llevado a cabo un estudio regional de microgravimetría, perfiles magnéticos, tomografía eléctrica de resistividad y polarización inducida, prospección sísmica de refracción y reflexión, y georadar. Estas metodologías se han utilizado en el sistema kárstico donde se emplaza la Gruta de las Maravillas con el objetivo de estudiar su posible continuidad hacia otras partes colindantes.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La Gruta de las Maravillas se localiza en el Cerro del Castillo, en la localidad de Aracena (Huelva, SO de la Península Ibérica). La cueva se ha desarrollado en mármoles incluidos en la Banda Metamórfica de Aracena (Crespo-Blanc y Orozco, 1988). Esta banda, junto con las Ofiolitas de Beja-Acebucho, forma el Macizo de Aracena (Bard y Moine, 1979) localizado entre la Zona de Ossa Morena y Zona Sudportuguesa, dos unidades tectonoestratigráficas del Macizo Ibérico (Figura 1a).

El estudio se centra en el cerro, formado por mármoles y cuarcitas deformados en condiciones dúctiles, además de granodioritas y gneises (Figura 1b). El mármol donde se aloja la cavidad muestra un bandeo composicional que buza 70°-80° NE con una dirección N110°E. La cueva se extiende 300 m en la dirección ONO-ESE (Martín-Rosales et al., 1999) y está controlada por una banda de pirita que atraviesa el cerro, cerca del contacto entre mármoles y granodioritas en la dirección de la foliación principal. Esta banda de pirita aporta óxidos de hierro que son observados recubriendo las paredes de la cavidad. La cueva está dividida en 3 niveles principales y tiene su nivel más bajo con una capa de agua de hasta 10 m de profundidad aproximada.

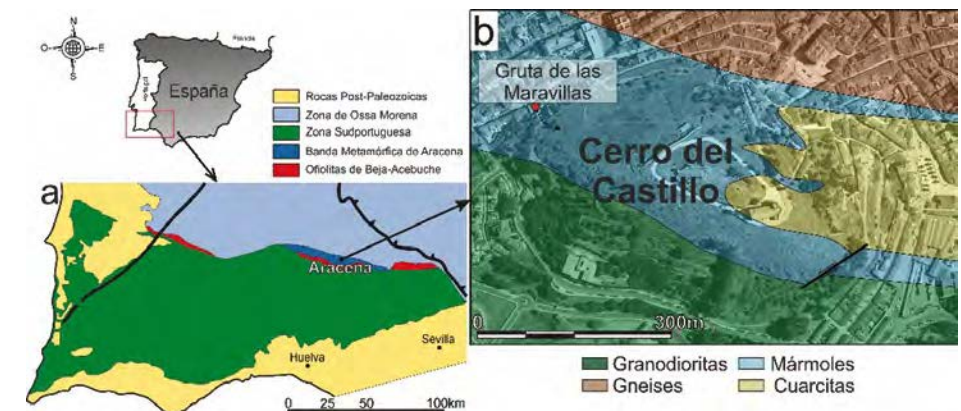


Figura 1. Localización del área de estudio al SO de España. (a) Esquema geológico simplificado. (b) Mapa geológico del área de estudio.

METODOLOGÍA GEOFÍSICA Y GEODÉSICA

Para este trabajo se han utilizado tanto métodos geodésicos de posicionamiento de alta precisión, como equipos de geofísica superficial de alta resolución y detalle.

Cartografía de la cavidad y GPS diferencial

La cartografía de la cavidad se ha realizado con métodos geodésicos clásicos. En primer lugar, se ha posicionado con GPS las estaciones de inicio en la entrada de la cavidad. A partir de ese punto, se han realizado medidas de longitud, dirección e inclinación mediante el equipo Leica Disto A3 sobre trípode y diana. Las medidas se han realizado mediante estaciones consecutivas, tanto en el recorrido de la Gruta como en sus ramales, de forma

que se empieza y acaba en la misma estación. Este bucle permite corregir los errores acumulados a lo largo de todas las medidas (Montoriol-Pous, 1973).

Para el posicionamiento de las medidas con equipos geofísicos a lo largo de la superficie del cerro se han utilizado los equipos Leica 1200 (estación de referencia) y Leica 1200+ (medidas en tiempo real). La estación de referencia se conecta mediante internet a la Red Andaluza de Posicionamiento y envía las correcciones mediante radio al equipo de medidas en tiempo real. Esto permite tener una medida de posición con un error de ± 5 cm. El programa Replanteo, incorporado en el equipo, permite realizar una malla de puntos equidistante entre sí, además de localizar posiciones ya medidas, de forma que se puede medir con distintas metodologías sobre la misma posición en épocas diferentes.

Microgravimetría

Los cambios de densidad del subsuelo causan micro cambios en el valor de la aceleración de la gravedad en distintos puntos. Estos cambios han sido medidos con el equipo Scintrex Autograv CG-5 sobre trípode, con una resolución de ± 0.001 mGal. Se han obtenido un total de 1798 medidas en malla regular de 10 x 10 m a lo largo de todo el cerro y alrededores. Después de realizar las correcciones gravimétricas, se ha obtenido el mapa de anomalía de Bouguer, al cual se le ha calculado la anomalía regional mediante regresión polinomial. Finalmente, la resta de ambos mapas ha permitido obtener el mapa de anomalía residual, el cual detecta cambios de densidad debidos a cuerpos superficiales.

Perfiles Magnéticos

El objetivo de las medidas magnéticas es detectar la banda de pirita que cruza el cerro y está relacionada con la Gruta, la cual deja restos de óxidos de hierro en las paredes de la cavidad. Los perfiles se han realizado N-S, con un espaciado de 10 m y el equipo empleado ha sido un magnetómetro GSM-8 de precisión de protones.

Prospección eléctrica

Los cambios de resistividad eléctrica y polarización inducida de las rocas del subsuelo han sido medidos con el resistivímetro Terrameter SAS 4000 (ABEM, Inc.), con 4 canales y una resolución de $\pm 1 \mu V$. Este equipo introduce corriente por un par de electrodos entre los que se determina la intensidad, y mide la diferencia de potencial entre otro par de electrodos. Las medidas, programadas con protocolos, han sido tomadas con el dispositivo gradiente (Dahlin y Zhou, 2006). Las medidas se han realizado a lo largo de 4 perfiles en las zonas de interés detectadas con microgravimetría, con diferentes espaciados entre electrodos, lo cual implica una penetración y resolución diferente para cada perfil. La inversión de los datos fue realizada con el programa RES2DINV (Loke, 2014), con los parámetros óptimos para este tipo de estudios.

Prospección sísmica

Las ondas sísmicas se comportan de forma diferente en función del medio que atraviesen. Esas diferencias han sido medidas mediante sísmica de martillo (refracción y reflexión) a lo largo de 4 perfiles coincidentes con los perfiles eléctricos. Se ha utilizado el equipo Stratavisor-NZ con 24 canales de medida, una basada de acero y un martillo de 8 kg. Para el procesado de los datos se ha utilizado el programa RayFract TM (refracción) y VSUNT-Pro21 (reflexión en offset común).

Georradar

El equipo utilizado es GSSI con antenas de 80 y 40 Mhz. Este equipo emite y recibe ondas electromagnéticas al subsuelo a lo largo de perfiles, en intervalos de 0.1 m, con 1024 muestras en una ventana de tiempo de 400 ns. El procesado de los datos se ha realizado con el programa comercial RADAN v.6.5.

RESULTADOS

Anomalías gravimétricas

El mapa de anomalía de Bouguer muestra valores que van desde 36.1 a 39 mGal con morfología elongada en dirección ONO-ESE, decreciente hacia el NE (Figura 2a). Extraída la anomalía regional, se obtiene el mapa de anomalía residual con tres zonas claramente diferenciadas (Figura 2b). El borde noreste y suroeste muestran valores de anomalía positiva de 0.15 a 0.45 mGal. En la zona central del cerro se detectan anomalías negativas asociadas a déficit de densidad.

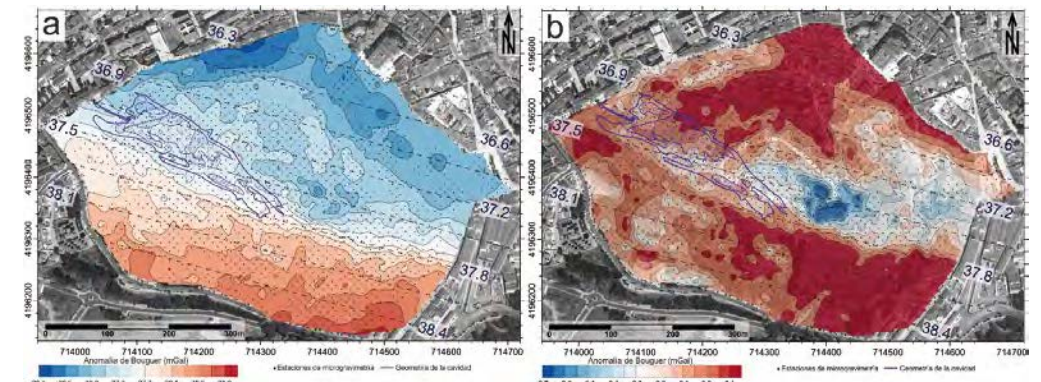


Figura 2. Mapas de anomalía gravimétrica. (a) Mapa de anomalía regional (línea discontinua) sobre anomalía de Bouguer. (b) Mapa de anomalía residual. Posición de las medidas y contorno de la cavidad indicadas.

La anomalía residual asociada a las mayores salas de la cavidad es de -0.3 mGal. Sin embargo, se han observado anomalías más pronunciadas hacia el SE, en dirección de la orientación de la cavidad. Por un lado, anomalías pronunciadas y poco extendidas de -0.7 a -0.9 mGal, y por otro lado, anomalías suavizadas y más extendidas de -0.3 a -0.4 mGal.

Anomalías magnéticas

Los perfiles magnéticos muestran un prominente mínimo magnético que está relacionado con la banda superficial de pirita que atraviesa el cerro (Figura 3). El perfil O presenta un mínimo de -1300 nT, y el perfil E registra un mínimo magnético de -1000 nT. Ambos mínimos están alineados en la dirección N110°E, en concordancia con la estructura geológica del cerro.

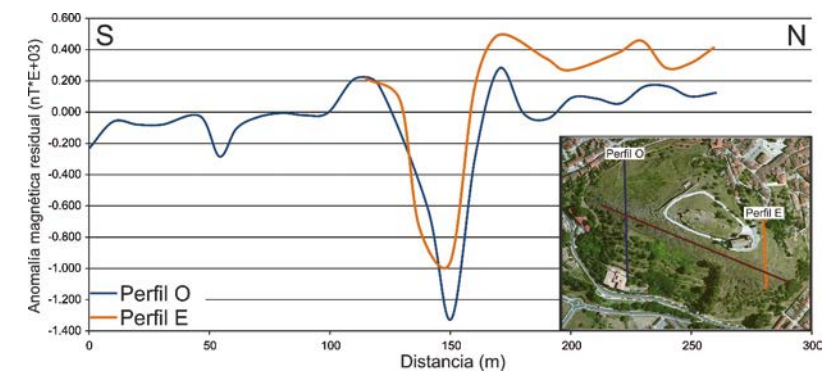


Figura 3. Perfiles magnéticos realizados en dirección N-S, en el lado este (E) y oeste (O) del cerro. La línea roja del mapa une los puntos donde se han registrado los mínimos magnéticos.

COMBINACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS Y MODELOS DE INVERSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos tanto en el mapa de anomalía residual como en los perfiles magnéticos, se han definido perfiles en cuatro zonas de interés del cerro (Figura 4). Estos perfiles se han realizado combinando varias metodologías geofísicas coincidentes en el espacio.

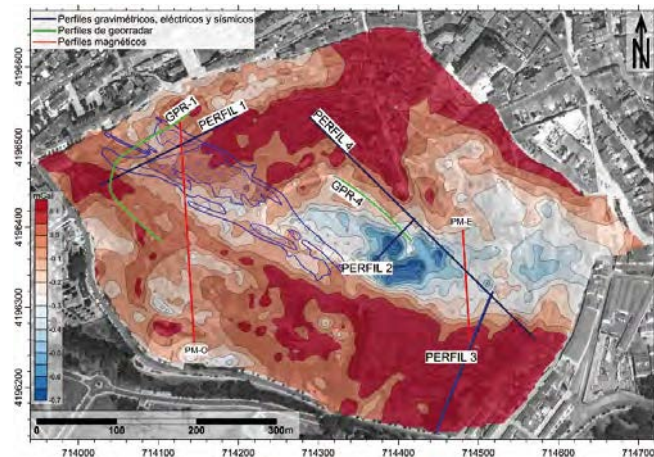


Figura 4. Posición de los perfiles medidos con las distintas metodologías geofísicas sobre mapa de anomalía residual.

Perfil 1: Gruta de las Maravillas

Este perfil se ha utilizado para comprobar la respuesta que tiene la cavidad estudiada en los distintos métodos geofísicos aplicados, de forma que después se puede comparar con los realizados en otras partes del área de estudio (Figura 5). Se posiciona sobre la sala de Los Banquetes, Las Conchas y Los Brillantes. La cavidad se detecta con mínimos gravimétricos (a) coincidentes con la posición de las mayores salas (b). Además se han detectado pequeñas nuevas cavidades aisladas correspondientes al nivel 2, en función de los resultados obtenidos en el resto de metodologías. El perfil eléctrico de resistividad (c) detecta las cavidades con valores intermedios de resistividad adoptando morfologías muy aproximadas a la realidad. El perfil de polarización inducida (d) registra valores altos de cargabilidad asociados tanto a la banda de pirita como a los óxidos de hierro de las paredes de la cavidad. En sísmica de refracción, el perfil de velocidades (e) registra la cavidad con valores de velocidad baja, mientras que en el perfil de cobertura de rayos (f) la zona de cavidad se detecta con una absorción significativa en el número de rayos. El perfil de offset común de sísmica de reflexión (g) detecta la cavidad como zonas de absorción de frecuencias. Se ha realizado un modelo híbrido de sísmica de refracción y reflexión (h) donde se observa la relación entre bajas velocidades y absorción de rayos. Por último, el radargrama (i), que se encuentra desplazado lateralmente respecto al resto de perfiles por razones topográficas, detecta el techo de la cavidad con reflectores hiperbólicos y, bajo estos, absorción de señal. Además, las zonas con pirita se detectan con una fuerte reflexión de las ondas electromagnéticas.

Perfil 2: Mínimo gravimétrico más pronunciado

Los perfiles se han realizado sobre el mínimo gravimétrico más acusado detectado en la parte central de cerro. Tiene una longitud menor, con menor penetración y mayor resolución (Figura 6). En función de los parámetros físicos asociados a la Gruta de las Maravillas en los distintos métodos geofísicos del perfil 1, se han interpretado estos perfiles. Se ha descubierto un nuevo nivel de karstificación (nivel 4) que se localiza por encima de los niveles conocidos de la cavidad (~720 m.s.n.m.). Este perfil registra dos cavidades mayores (1 y 2) hacia el SO

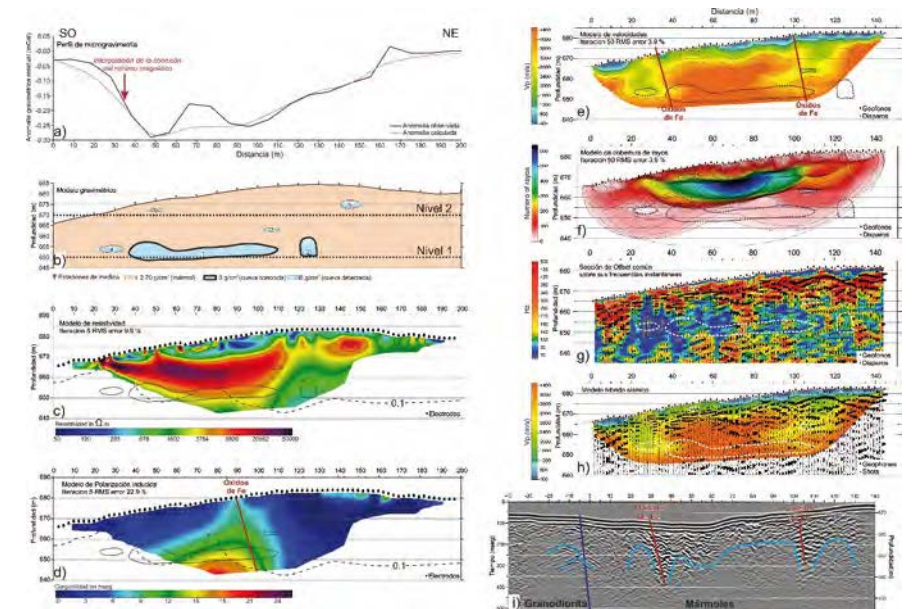


Figura 5. Perfiles geofísicos realizados sobre la Gruta de las Maravillas (Perfil 1).

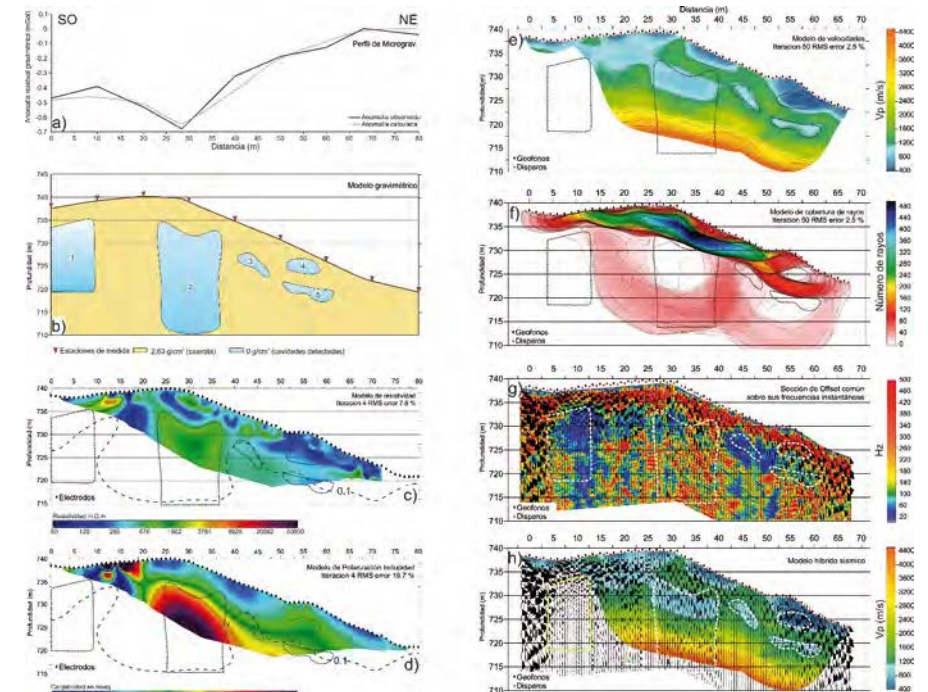


Figura 6. Perfiles geofísicos realizados sobre el mínimo gravimétrico más pronunciado (Perfil 2).

del perfil, con unas dimensiones de 10 m en la dirección del perfil, y 20 a 40 m perpendicular a él. La cavidad mayor (2) alcanza una altura de 25 m, mientras que la cavidad menor (1) tiene una altura de 15 m. Además, se han detectado otras cavidades de menor entidad (3, 4 y 5) hacia el NE del perfil.

Perfil 3: Posible continuidad de la Gruta

Este perfil se ha realizado en dirección perpendicular a la zona donde, probablemente, se extiende la cavidad. Al igual que en el perfil 3, la interpretación de estos perfiles se realiza según se registra la cueva en el perfil 1. Este perfil atraviesa tres de las litologías presentes en el cerro: granodioritas, mármoles y cuarcitas (Figura 7). Se han registrado los tres niveles de karstificación reconocidos en la Gruta. Las cavidades modeladas tienen una longitud paralela al perfil de 40 m (1) y 20 m (2, 3 y 4), y alturas variables de 10 a 20 m. Su extensión perpendicular al perfil es de 20-40 m. Además, estos perfiles detectan la banda de piritita que atraviesa el cerro, y se encuentra en relación directa con la posición ocupada por las nuevas cavidades detectadas.

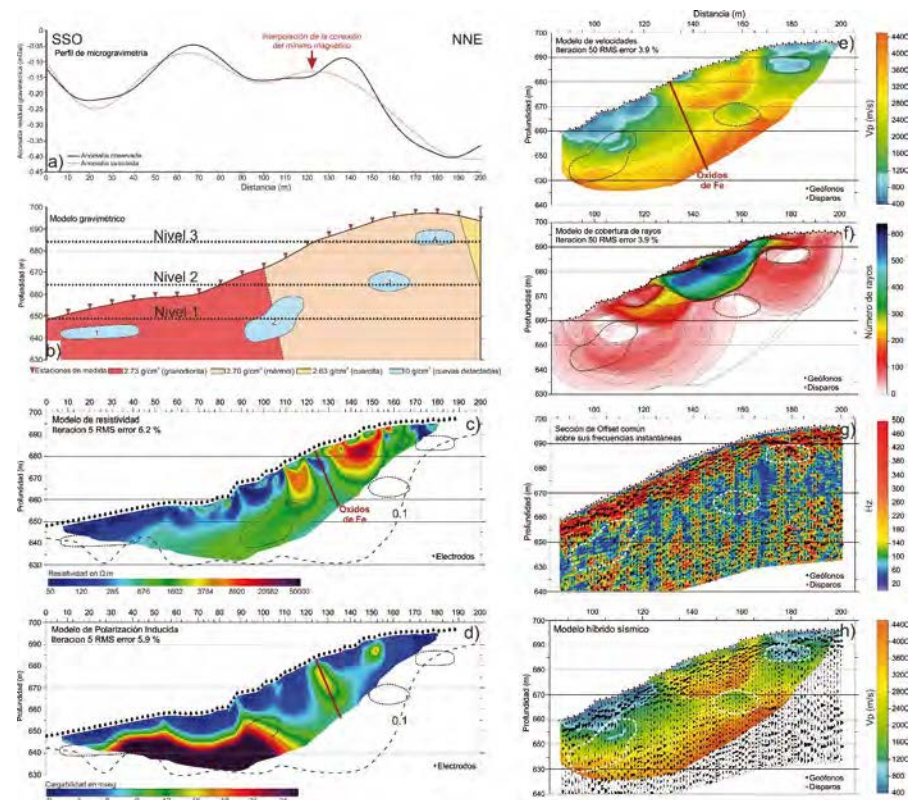


Figura 7: perfiles geofísicos realizados en la zona de posible continuidad de la Gruta (Perfil 3).

Perfil 4: Cavidades profundas

Es el perfil de mayor longitud y, por tanto, alcanza mayores profundidades (Figura 8). Se ha realizado perpendicular a la anomalía gravimétrica más extendida localizada en el centro del Cerro del Castillo. Este perfil ha detectado cavidades localizadas en los niveles 2, 3 y 4 de karstificación del cerro. La cavidad de mayor entidad (1) se localiza a la base del nivel 2 con una longitud de más de 100 m en la dirección del perfil, con una altura máxima de 30 m y una extensión perpendicular al perfil de 60 m. El resto de cavidades detectadas tienen un tamaño menor (~50 m) y una extensión perpendicular de 10-20 m. Estas cavidades menores se localizan en los niveles 3 y 4 de karstificación.

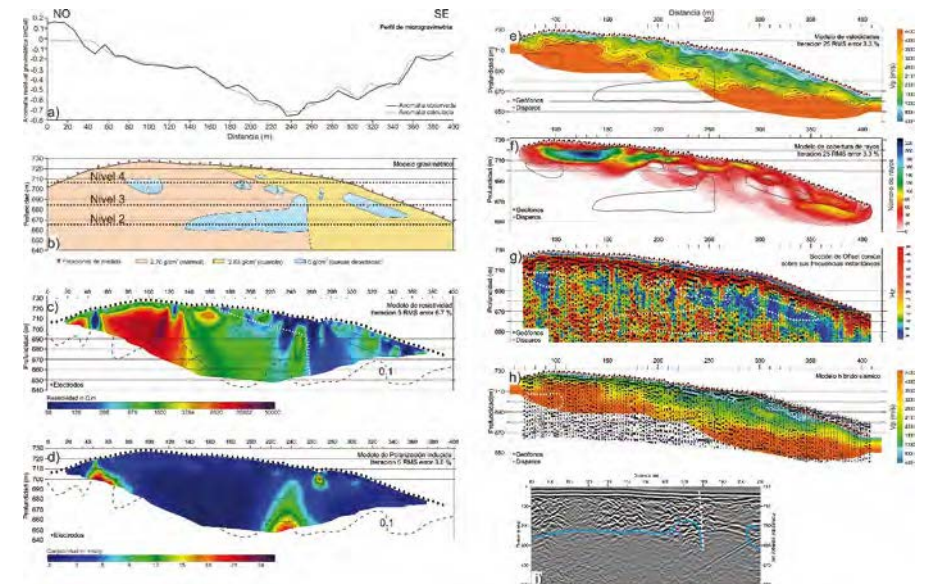


Figura 8. Perfiles geofísicos realizados sobre el mínimo gravimétrico más extendido (Perfil 4).

DISCUSIÓN

La presencia de la Gruta de las Maravillas en la parte NO del Cerro del Castillo hace sospechar la presencia de otras cavidades emplazadas en el sistema kárstico y no descubiertas hasta ahora. Además, la parte final de la cavidad, situada en la parte central del cerro e interrumpida con un gran colapso de caos de bloques de los niveles 2 y 3, sugiere que la cavidad tiene continuidad tras las rocas caídas en la dirección en la que se ha desarrollado la cavidad. La dificultad de explorar nuevas salas desde el interior de la cueva obliga a realizar estudios de continuidad de la cavidad desde la superficie del cerro a través de métodos geofísicos.

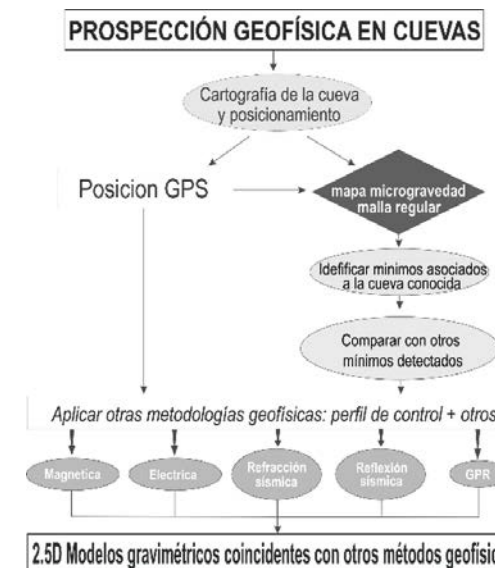


Figura 9. Diagrama de flujo.

Diagrama de flujo metodológico en el estudio de cavidades con prospección geofísica

Los pasos seguidos en este estudio para la localización de nuevas cavidades a partir de una cavidad conocida han conseguido una eficacia máxima en localización de cavidades desarrolladas en mármoles con piritita. Por ello se propone seguir la metodología propuesta en este trabajo (Figura 9). En primer lugar, posicionamiento de la cueva respecto al cerro, seguido de un minucioso estudio microgravimétrico de la zona de estudio en malla regular. Se identifican los mínimos asociados a la cavidad conocida y se comparan con otros mínimos detectados. Finalmente se realizan perfiles con otras metodologías geofísicas y se realizan modelos gravimétricos 2.5D.

Respuesta de los métodos geofísicos a la presencia de cavidades

Identificar la respuesta de cada una de las metodologías aplicadas a la presencia de cavidades conocidas es muy importante para poder extrapolar los resultados a otras partes del área de estudio donde no se tiene tanta información. Los métodos microgravimétricos han detectado las cavidades como mínimos gravimétricos residuales de distinta magnitud. Por un lado, mínimos pronunciados y poco extendidos correspondientes a cavidades pequeñas y superficiales, y por otro lado, mínimos menos acusados y más extendidos, correspondientes a cavidades más grandes y profundas. Los métodos magnéticos han detectado mínimos asociados a la banda de piritita y óxidos de hierro que recubren las paredes de la cavidad. Los métodos eléctricos de resistividad no detectan la cavidad con resistividad elevada, sino intermedia debido a los óxidos presentes en las paredes, mientras que los métodos eléctricos de polarización inducida detectan alta cargabilidad, de nuevo asociada a la banda de piritita y óxidos de hierro. Los métodos sísmicos de refracción, detectan las cavidades con velocidades bajas y baja cobertura de rayos. Este último solo se produce en el vacío, por tanto, es uno de los métodos que revelan con mayor claridad la presencia de cavidades o no. Los métodos de offset común en sísmica de reflexión detectan las cavidades con absorción de frecuencias, aunque no son tan precisos como el resto de métodos. Por último, el georradar ha detectado las cavidades con reflectores hiperbólicos sobre absorción de señal. Es otro método esencial, aunque no aporta información de morfologías o tamaños.

Sistema kárstico del entorno de la Gruta de las Maravillas

La combinación de métodos geofísicos junto con la detallada información geológica obtenida en el cerro y la cueva, han permitido describir el sistema kárstico que rodea a la Gruta de las Maravillas. Las nuevas cavidades detectadas pueden agruparse en cuatro niveles de disolución predominantes. Tres de ellos se han confirmado por cartografía directa de la cavidad (~650, ~665 y ~685 m.s.n.m.), mientras que el nuevo nivel descubierto en la parte superior (~710 m.s.n.m.) ha sido detectado con métodos geofísicos.

El mapa de anomalía residual sugiere que el sistema kárstico se ha desarrollado principalmente en la dirección N110°E, en concordancia con la información geológica y cartográfica observada en el cerro. Las nuevas cavidades y galerías descubiertas tienen la misma orientación que los niveles karstificados de la Gruta. El mapa de la Figura 10 muestra áreas con probabilidad de contener cavidades, aunque es difícil realizar una delimitación exacta. La conexión entre la cueva conocida y la descubierta se produce en la parte central del cerro, donde se registran los mínimos gravimétricos más acusados. Probablemente se encuentre tras el caos de bloques presente en la parte final de la Gruta de las Maravillas.

CONCLUSIONES

Los métodos geofísicos superficiales son una herramienta muy útil para el estudio de sistema kársticos. Un conjunto completo de diferentes técnicas ha sido aplicado con éxito en el sistema kárstico que aloja la Gruta de las Maravillas. Según los resultados obtenidos en cada una de las metodologías aplicadas en la detección de cavidades, podemos afirmar que los métodos geofísicos más eficaces para este fin son microgravimetría en malla regular y posicionamiento con alta precisión, en combinación con métodos eléctricos de resistividad o sísmicos de cobertura de rayos.

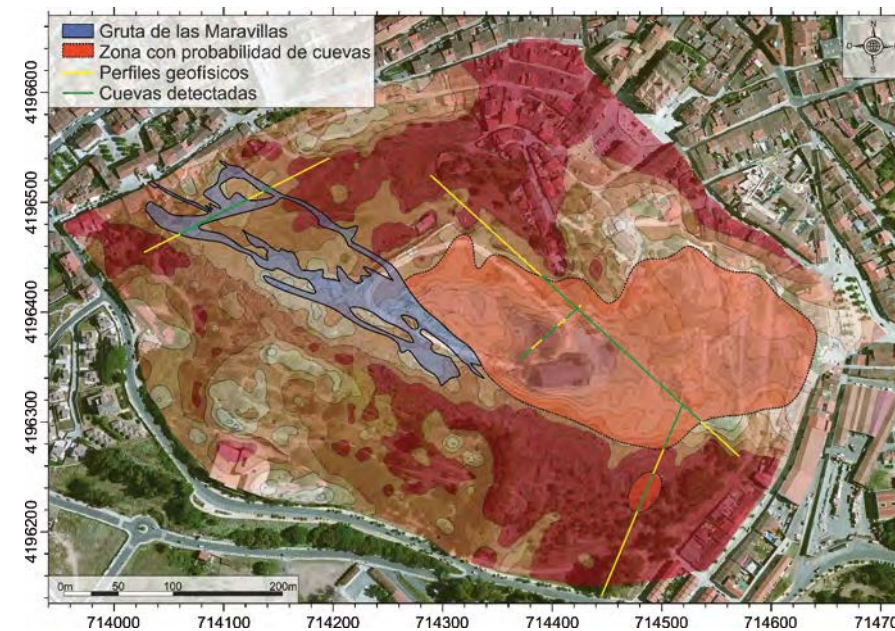


Figura 10. Interpretación del sistema kárstico del entorno de la Gruta de las Maravillas sobre mapa de anomalía residual. Se han delimitado las zonas que presentan alta probabilidad de contener nuevas cavidades.

El mapa de anomalía residual ha puesto al descubierto zonas con mínimos gravimétricos asociados a cavidades. El resto de metodologías geofísicas han confirmado que esos mínimos se deben a cavidades no descubiertas hasta el momento. Además, el sistema kárstico está dividido en 4 niveles, tres de los cuales están presentes en la Gruta, mientras que el cuarto y más superior, ha sido localizado en las cotas más altas del Cerro del Castillo. La conexión entre la cueva conocida y las nuevas galerías descubiertas se encuentra en la parte central del cerro, donde se localizan los mínimos más acusados. Sin embargo, la imposibilidad de cruzar el caos de bloques presentes en esa zona, obliga a la realización de entradas a las cavidades en la parte SE del cerro, en la dirección principal de desarrollo de la cavidad.

REFERENCIAS

- Bard, J. P. y Moine, B., 1979. Acebuches amphibolites in the Aracena hercynian metamorphic belt (southwest Spain): Geochemical variations and basaltic affinities. *Lithos*, 12(4), 271-282.
- Chico, R. J., 1964. Detection of caves by gravimetry. *International Journal of Speleology*, 1, 101-108.
- Crespo-Blanc, A. y Orozco, M., 1988. The southern Iberian shear zone: a major boundary in the Hercynian folded belt. *Tectonophysics*, 148(3-4), 221-227.
- Dahlin, T. y Zhou, B., 2006. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4(2), 113-123.
- Loke, M. H., 2014. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. *Geotomo Software Company*.
- Martínez-Moreno, F. J., Pedrera, A., Ruano, P., Galindo-Zaldívar, J., Martos-Rosillo, S., González-Castillo, L., Sánchez-Úbeda, J. P. y Marín-Lechado, C., 2013. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology*, 162, 67-78.

Martínez-Pagán, P., Gómez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Manteca, J. I. y Rosique, M., 2013. The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena (SE Spain). *Engineering Geology*, 156, 1-10.

Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., Calaforra, J. M., Gómez Jiménez, I. y Rodríguez Navarro, C. M., 1999. Explotación turística y conservación de la Gruta de las Maravillas. Aracena (Huelva). *XII Jornadas del Patrimonio de la Comarca de la Sierra. Aracena (Huelva)*, Diputación Provincial. 645-662.

Montoriol-Pous, J., 1973. Sobre la tipología vulcanoespeleológica. *Act. III Simp. Epeleol. Mataró*, 268-273.

Espeleomergulho nas Grutas de Mira de Aire: importância para o conhecimento da rede espeleológica, a captação de água subterrânea e a divulgação das grutas turísticas

José António Crispim⁽¹⁾, Ricardo Constantino⁽²⁾ y João Duarte⁽³⁾

(1) Sociedade Portuguesa de Espeleologia e Centro de Geologia da Universidade de Lisboa (jacrispim@fc.ul.pt)

(2) Sociedade Portuguesa de Espeleologia (ricardo@entrada.tv)

(3) Sociedade Portuguesa de Espeleologia (joão.duarte@hidrografico.pt)

RESUMO

As Grutas de Mira de Aire mostram ao público um importante segmento de uma galeria fóssil da Gruta dos Moinhos Velhos. Esta gruta tem sido explorada pela Sociedade Portuguesa de Espeleologia desde finais da década de 40 do século passado e integra no mesmo sistema espeleológico a Gruta da Pena e a Gruta da Contenda. Estas duas grutas conduzem até à superfície as águas que circulam no nível inferior, inundado, da Gruta dos Moinhos Velhos o que pôde ser comprovado por traçagem com fluoresceína. Em 1991 foram efectuados os primeiros mergulhos nas galerias inundadas, com o objectivo de obter um ponto de captação de água alternativo ao Olho de Mira, efectuando um furo para interceptar a zona montante do colector activo. Já na segunda década deste milénio a exploração subaquática das galerias inferiores prosseguiu com o objectivo de identificar as galerias que fazem a ligação entre a Gruta dos Moinhos Velhos e a Gruta da Contenda. O primeiro resultado destas explorações foi a ligação entre dois sectores inundados da Gruta dos Moinhos Velhos, o Labirinto e o Rio Negro. Em simultâneo, verificou-se que a ligação não se faz por uma galeria única, seguindo o padrão da ligação fóssil entre a Gruta dos Moinhos Velhos e a Gruta da Pena, mas sim por várias ramificações. Enquanto algumas se ligam a andares superiores ainda não conhecidos, outras aprofundam-se parecendo manter um declive que as levaria a cotas inferiores às da Gruta da Contenda. Estas campanhas de espeleomergulho constituíram motivos de divulgação das Grutas de Mira de Aire. A actuação dos espeleólogos e a movimentação dos equipamentos em parte do circuito turístico e nas zonas anexas causam uma apreciação positiva nos grupos de turistas. As actividades são motivo para imprensa local e regional chamar a atenção para as grutas turísticas e as notícias mais sensacionais ou de síntese têm sempre reflexo a nível nacional.

Palavras-chave: Espeleomergulho, Grutas de Mira de Aire, Grutas turísticas, Captação de água subterrânea.

Cave diving in Mira de Aire caves: importance to speleological knowledge, groundwater exploitation and show caves advertising

ABSTRACT

Mira de Aire show caves let the public access an important reach of a fossil gallery of Moinhos Velhos cave. This cave has been investigated by the Portuguese Speleological Society since the end of the 1940 decade. It embraces in the same underground system the caves of Pena and Contenda. These two caves carry outside the water flowing inside Moinhos Velhos lower flooded level, what has been proved by fluorescein tracing tests. First cave dives in these flooded galleries took place in 1991. The goal was then to find a point intercepting the upstream active trunk gallery to drill a waterhole which could be an alternative to Olho de Mira current origin of water for Mira de Aire

supply. In the second decade of this millennium underwater exploration of lower galleries went on with the purpose of identifying passages linking Moinhos Velhos cave to Contenda cave. The first result of these explorations was connecting Labirinto to Rio Negro, two flooded sectors of Moinhos Velhos cave. Simultaneously, it was verified that this connection involves not only one main gallery, following the pattern of the fossil link between Moinhos Velhos and Pena caves, but rather employs several ramifications. While some of them rise towards currently unknown upper levels, a few get deeper and appear to keep a gradient which should take them to levels lower than those known in Contenda cave. These cave diving campaigns stand for periods of Mira de Aire caves advertising. Movement of cave divers and equipments manoeuvring through part of the tourist circuit and adjoining zones causes a positive appraisal among visitants. Additionally, these activities provide an opportunity for local and regional press drawing attention to show caves. Furthermore, synthesis reports or exciting stories have in general reflex at a national level.

Keywords: Cave diving, Mira de Aire caves, Show caves, Groundwater exploitation.

INTRODUÇÃO

As Grutas de Mira de Aire, situadas cerca de 110 km a norte de Lisboa, perto de Fátima, são as maiores grutas turísticas das regiões calcárias de Portugal (Crispim, 2010). A parte visitável inclui um troço com mais de meio quilómetro de extensão e cerca de 100 metros de desnível. Este troço pertence a uma galeria fóssil da Gruta dos Moinhos Velhos e esta gruta liga-se a outras duas situadas na proximidade, a Gruta da Pena e a Gruta da Contenda, formando o sistema Moinhos Velhos – Pena – Contenda. A ligação com a Gruta da Pena foi efectuada com recurso ao esvaziamento dos sífões suspensos acima do nível freático que se interpõem entre esta gruta e a dos Moinhos Velhos. A exploração espeleológica a seco deparou-se com a existência de sífões permanentes nas galerias que se dirigem para a Gruta da Contenda. No entanto, a ligação entre a Gruta dos Moinhos Velhos e a Gruta da Contenda foi comprovada com a realização de um teste de traçagem (Crispim, 1995).

O interesse pela exploração espeleológica da Gruta dos Moinhos Velhos data do final da década de 1940 quando os habitantes de Mira de Aire descobriram um pequeno algar que levava a uma grande sala. Esta descoberta e a subsequente exploração da gruta são contemporâneas da fundação da Sociedade Portuguesa de Espeleologia que a partir de então se dedica em particular ao estudo das grutas da região (Ferreira y Ferreira, 1964). A exploração turística da Gruta dos Moinhos Velhos, com a designação comercial de Grutas de Mira de Aire, teve vários episódios que decorreram entre a década de 1960, data da construção dos primeiros acessos em madeira, e a actualidade, com a introdução de constantes melhoramentos e infra-estruturas turísticas complementares.

Mira de Aire é abastecida de água potável pela nascente do Olho de Mira (Paradela, 1971). Problemas de escassez e contaminação nos períodos de seca levaram a que em 1991 se tivesse em conta a possibilidade de captar água na Gruta dos Moinhos Velhos. Na sequência do desenvolvimento desta possibilidade foram efectuados os primeiros mergulhos nas galerias inundadas da gruta. Estes mergulhos tinham como prioridade a exploração para montante já que a qualidade da água se agravava perto da área urbana.

Abandonada aquela finalidade, actualmente a exploração em espeleomergulho tem-se dedicado às galerias situadas a jusante e portanto mais próximas da Gruta da Contenda, sendo a ligação das duas grutas um objectivo prático.

As campanhas de exploração subaquática são todos os anos precedidas por um longo período de preparação em pleno verão durante o qual se efectua o bombeamento da água dos sífões, se equipam os poços para descida dos espeleólogos, se montam os sistemas de tração do equipamento, se faz o transporte deste e se monitoriza a descida do nível da água. Estas actividades juntam muitos participantes que intervêm também no troço final do circuito turístico e os trabalhos são sempre motivo de grande interesse e curiosidade por parte dos

turistas. As notícias das explorações e a expectativa de novas descobertas chamam os órgãos de comunicação social e assim as campanhas acabam por se reflectir num acréscimo de publicidade para as grutas turísticas.

CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA

O sistema Moinhos Velhos – Pena – Contenda (Figura 1) totaliza actualmente cerca de 11 km de galerias topografadas com um desnível superior a 200 m e compreende, como se disse, a Gruta de Moinhos Velhos, a Gruta da Pena e a Gruta da Contenda (Crispim, 1987). A Gruta dos Moinhos Velhos situa-se na vertente nordeste do Polje de Minde a cerca de 300 m de altitude e as grutas da Pena e da Contenda abrem-se no bordo nordeste do fundo do polje, cerca de 100 m abaixo da entrada para a Gruta dos Moinhos Velhos.



Figura 1. Sinopse do sistema espeleológico Moinhos Velhos – Pena – Contenda (Cadastro Espeleológico de Portugal da Sociedade Portuguesa de Espeleologia, simplificado). A vermelho, a parte da Gruta dos Moinhos Velhos com visitação turística. Não estão incluídas as galerias abaixo do nível freático.

A Gruta dos Moinhos Velhos é constituída por uma galeria de grande diâmetro, completamente inactiva na parte montante mas semi-activa na parte jusante, a que se ligam um afluente fóssil (Galerias do Polvo) e dois afluentes semi-activos (Rio Negro e Labirinto). Estes dois afluentes semi-activos recebem águas de um andar inferior activo e têm também alguns ramos fósseis.

A Gruta da Pena inicia-se por um poço com cerca de uma dezena de metros de profundidade que atinge uma galeria semi-activa de grande diâmetro que termina num sífão permanente. A Gruta da Contenda é acessível por duas aberturas. Uma delas dá acesso a uma galeria baixa e sinuosa e a outra é um algar com cerca de uma dezena de metros que intercepta essa galeria. A primeira abertura está situada a apenas uma centena de metros da entrada da Gruta da Pena e constitui também uma nascente temporária, embora com caudal mais reduzido. A galeria sinuosa da entrada ramifica-se em dois sectores: um, descendente, atinge rapidamente o nível freático; o outro é constituído por uma galeria ascendente que termina num conjunto de poços ligando-se a galerias semi-activas e activas de grande diâmetro.

PRIMEIROS TRABALHOS DE LIGAÇÃO DAS TRÊS GRUTAS DO SISTEMA

Inicialmente consideradas em separado, cedo se começou a pensar na ligação destas grutas, dada a sua proximidade. A mais óbvia era a ligação entre a Galeria Grande da Gruta dos Moinhos Velhos e a Gruta da Pena devido às evidências cartográficas e geomorfológicas. Entre elas existe um troço de galeria inundado que, embora suspenso acima do nível freático, se mantém inundado mesmo no fim da estiagem. A junção foi efectuada pela primeira vez durante trabalhos de reabertura das Grutas de Mira de Aire ao turismo. Nessa altura os sifões existentes na parte terminal da Galeria Grande da Gruta dos Moinhos Velhos foram esvaziados e foi então possível percorrer em contínuo o trajecto até à Gruta da Pena.

O objectivo destes trabalhos era retirar os sedimentos que se acumulam naturalmente nos sifões e facilitar o escoamento das águas que durante o Inverno percorrem o troço inferior da Galeria Grande. A existência de um sifão com secção estreita, o Sifão das Areias, e a circunstância de a entrada da Gruta da Pena se encontrar colmatada com um caos de blocos foram responsabilizadas pela dificuldade de abaixamento do nível, pelo que foram efectuados trabalhos de estabilização das areias e desimpedimento e consolidação do caos de blocos com a construção de um poço em betão na entrada da Gruta da Pena. Mais tarde, no ano de 1986, a Sociedade Portuguesa de Espeleologia voltou a efectuar o bombeamento dos sifões (Duarte, 1986) com objectivo de executar a cartografia geomorfológica e estudar a ligação entre as duas grutas.

TRABALHOS DE MERGULHO PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA

Em 1991 a Câmara Municipal de Porto de Mós concertou com a Sociedade Portuguesa de Espeleologia a execução de trabalhos para definir um ponto de captação de água alternativo à captação do Olho de Mira que vinha sofrendo de problemas de contaminação, nomeadamente no pico da estiagem. Efectuadas análises à qualidade das águas circulantes nos níveis activos do sistema Moinhos Velhos – Pena – Contenda e avaliados os caudais e condições de acesso foi decidido realizar uma campanha de exploração em espeleomergulho de dois locais na Gruta dos Moinhos Velhos.

O primeiro ponto a ser estudado foi o Poço Final das galerias do Labirinto que, em termos de acesso do equipamento de mergulho, era mais favorável. Este poço intercepta o nível freático e constitui o término das explorações espeleológicas a seco. A exploração permitiu o acesso a uma galeria na base do poço que se ramifica em outras com secção mais estreita e traçado sinuoso, algumas dando passagem para galerias a seco. Estas características morfológicas desaconselharam a utilização desta zona para execução do furo de captação.

O segundo ponto possível era a Galeria do Rio no sector do Rio Negro. Esta galeria é a que se encontra mais próxima do nível freático e apresenta dois sifões, um a montante e outro a jusante. Todavia a dificuldade de acesso ao equipamento de mergulho, obrigou a trabalhos prévios de alargamento de passagens muito estreitas e à equipagem com material de tracção de vários poços e ressaltos. A exploração em espeleomergulho da Galeria do Rio mostrou que o sifão montante é bastante estreito e está preenchido com areias o que prejudica as condições de mergulho, pelo que foi abandonada a progressão a partir daqui. No sifão jusante descobriu-se a existência de um poço com cerca de 14 metros que intercepta uma galeria larga e com traçado regular pelo que foi decidido situar sobre esta galeria o ponto de implantação do furo de captação (Figura 2). Devido a possíveis imprecisões topográficas e/ou problemas técnicos durante a perfuração e desenvolvimento do furo a captação foi abandonada. No entanto o projecto constituiu um exemplo de metodologia a seguir para encontrar água subterrânea em quantidade e de boa qualidade em região cársica recorrendo ao espeleomergulho (SPE, 1992).

LIGAÇÃO ENTRE AS GRUTAS DE MOINHOS VELHOS E CONTENDA

O interesse científico em determinar como evoluiu a ligação entre a zona de circulação subterrânea organizada na vertente nordeste do Polje de Minde e a zona de emergência situada ao longo do bordo nordeste do polje (Crispim, 1993, 2009) motiva a continuação dos trabalhos de espeleomergulho neste sistema espeleológico.

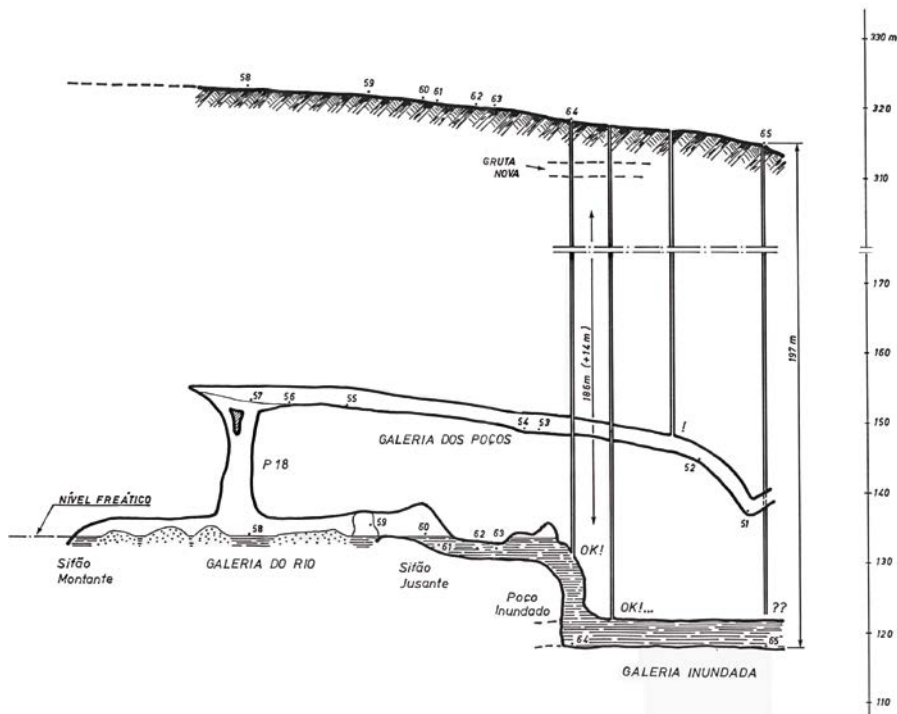


Figura 2. Alternativas de implantação de furo de captação nas galerias descobertas em 1991 a partir de mergulho no sifão jusante da Galeria do Rio (In SPE, 1992).

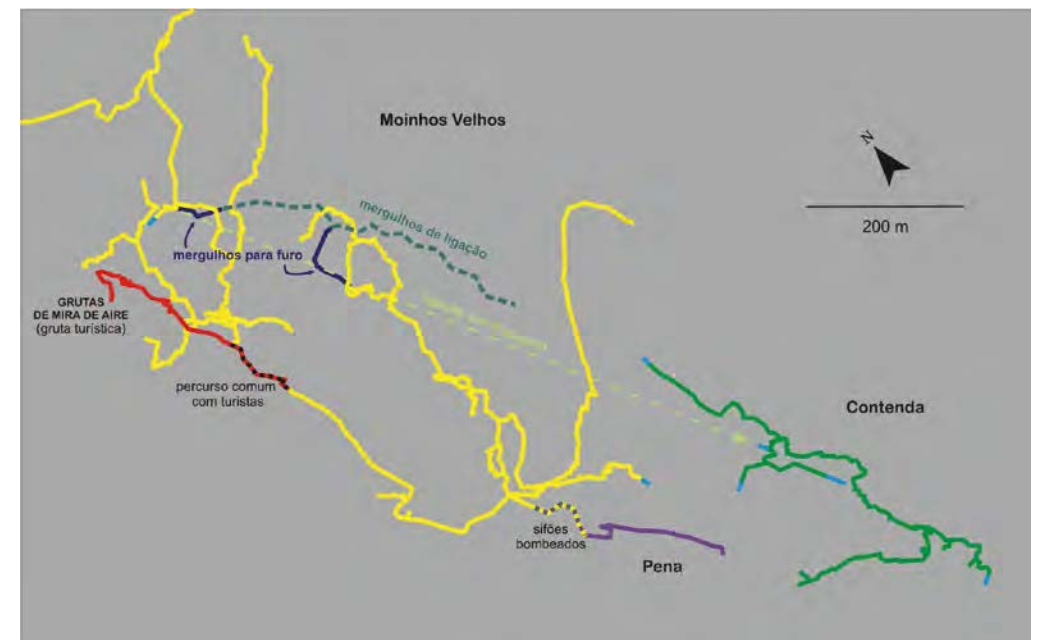


Figura 3. Intervenções espeleológicas para ligação das grutas do sistema espeleológico Moinhos Velhos – Pena – Contenda (topografia de base: simplificada de Cadastro Espeleológico de Portugal da Sociedade Portuguesa de Espeleologia). A vermelho, a parte da Gruta dos Moinhos Velhos com visitação turística. A azul, as terminações inundadas das galerias principais.

Na década de 2010 iniciou-se um novo período de exploração subaquática dos pontos examinados uma vineta de anos antes. Os novos mergulhos a partir do Poço Final do Labirinto permitiram explorar, para jusante, em direcção à Gruta da Contenda, uma galeria sinuosa (Galeria Serpenteante) com secção tubular que, após um troço descendente, dá acesso a uma chaminé estreita. Perto da base do Poço Final e do início da Galeria Serpenteante foram explorados outros inícios de galerias, alguns conduzindo a galerias secas não exploradas. A exploração para montante levou à ligação deste sector com a galeria da base do poço do sifão jusante da Galeria do Rio, no sector do Rio Negro (Figura 3).

Em face desta ligação foi decidido voltar a iniciar os mergulhos a partir do sifão jusante da Galeria do Rio. Os trajectos e as ligações foram restabelecidos e novas galerias entretanto descobertas estão ainda em fase de exploração. Todavia, se em termos da exploração subaquática este acesso facilita a progressão, no que se refere ao período durante o qual se pode aceder à Galeria do Rio, a situação é mais delicada já que a entrada nesta galeria obriga a esperar a descida do nível no sifão situado no seu início. Por outro lado, terá que se efectuar antes da nova subida do nível, o que ocorre sem possibilidade de previsão, no início das chuvas de Outono, o que restringe a actividade a um período muito curto.

INCREMENTO DA DIVULGAÇÃO DAS GRUTAS TURÍSTICAS EM RESULTADO DAS EXPLORAÇÕES SUBAQUÁTICAS

As campanhas de espeleomergulho envolvem muitos espeleólogos e grande quantidade de meios durante grande parte do verão. As operações desenvolvem-se com intervenção na parte final do itinerário turístico o que transforma os espeleólogos em actores obrigatórios. Para os grupos de turistas estas ocorrências constituem um ponto alto da visita e influem de maneira positiva na apreciação da sua passagem pelas grutas.

Cada campanha de espeleomergulho constitui, naturalmente, uma possibilidade de novas descobertas. Por outro lado, a actividade espeleológica e, particularmente, o espeleomergulho, não é isenta de riscos. Sobretudo no período de passagem do final do verão para o início das chuvas, a zona actualmente em exploração na Gruta dos Moinhos Velhos, por se situar perto do nível freático, é fértil em situações pouco controláveis, tão do agrado de certa comunicação social que elege conteúdos mais sensacionalistas. Estes ingredientes ajudam a divulgar a espeleologia, embora nem sempre com a seriedade desejável, e em qualquer dos casos, constituem sempre publicidade acrescida para as grutas turísticas.

CONCLUSÕES

Os continuados trabalhos de espeleologia que a Sociedade Portuguesa de Espeleologia tem vindo a desenvolver há várias décadas nas Grutas de Mira de Aire ajudam a manter um nível constante de publicidade indirecta a este empreendimento turístico. Desta publicidade desfrutam indirectamente as restantes grutas turísticas, nomeadamente as dos arredores, além de beneficiar, de forma directa, a própria actividade espeleológica. Por maioria de razão, o mergulho espeleológico, porque é uma actividade menos vulgarizada e mais exótica e porque é o tipo de exploração com maior potencial de descobertas no sistema Moinhos Velhos – Pena – Contenda, pode constituir nos próximos anos uma fonte de divulgação das grutas turísticas que importa continuar a apoiar. Também a investigação espeleológica está bastante subordinada ao desenvolvimento das actividades de mergulho espeleológico pois para sul e para oeste do sistema subterrâneo as galerias mergulham sob o nível freático.

AGRADECIMENTOS

Os nossos agradecimentos vão em primeiro lugar para as Grutas de Mira de Aire, SA., pelas facilidades concedidas a todo o tempo e ao longo de tantos anos. Merece igualmente o nosso reconhecimento o interesse manifestado no projecto de captação pela Câmara Municipal de Porto de Mós, na pessoa do presidente José Ferreira, que aceitou correr o risco tão elevado próprio das regiões cársicas. Parte dos apoios foram também concedidos pelo Departamento de Geologia da FCUL e Centro de Geologia da Universidade de Lisboa. Muitas das iniciativas relativas aos trabalhos de realização do furo de captação são devidas a António Oliveira. Finalmente exaramos palavras de gratidão aos mergulhadores que com João Francisco Duarte, primeiro, e com

Ricardo Constantino, vários anos depois, participaram na exploração subaquática: Mário Simões e Elisabete Pereira, na década de 1980-90 e Luís Magro, Delfim Machado, Martin Burgui, José Maria Jover Balcazar (Chema), Wladimir Blanco e Zsolt Szilagyi, na década de 2010.

BIBLIOGRAFIA

- Crispim, J. A. 1987. Evolução da hidrologia subterrânea na Gruta de Moinhos Velhos (Mira de Aire). *Algar, Bol. Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 1, 3-8.
- Crispim, J. A. 1993. Algumas considerações sobre a estrutura geológica dos poljes de Alvados e Minde (Estremadura - Portugal). *Algar, Bol. Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 4, 13-26.
- Crispim, J. A. 1995. Dinâmica Cársica e Implicações Ambientais nas Depressões de Alvados e Minde. *Ph. D. Thesis, Univ. Lisboa, GeoFCUL*, 394 p.
- Crispim, J. A. 2009. Evolution of Portuguese karst regions in a basin-inversion setting: importance of faulting and confinement on cave development and spring location. *Proceedings of the 15th International Congress of Speleology*, vol. 2, p. 819-824. Kerrville.
- Crispim, J. A. 2010. Las cuevas turísticas de Portugal. In J. J. Durán y F. Carrasco (eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, pp. 324-334. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Duarte, J. F. 1986. Bombeamentos espeleológicos na Gruta dos Moinhos Velhos. *Relatório Inédito. Sociedade Portuguesa de Espeleologia*, 52 p. Lisboa.
- Ferreira, J. M. y Ferreira O. V. 1964. Nota sobre a Gruta de Moinhos Velhos (Mira d'Aire). *Bol. Soc. Port. Espel.*, 2ª Sér., vol. II (1): 21-29.
- Paradela, P. L. 1971. Ligação de uma galeria em fundo de poço ao algar do Olho de Mira, localizado por geofísica, em Mira de Aire. *I Congr. Hisp.-Luso-Amer. de Geologia Económica*, Secção 3, tomo II, p. 735-761. DGMSG. Lisboa.
- SPE (Sociedade Portuguesa de Espeleologia) 1992. Estudo para Captação de Água no Sistema Subterrâneo das Grutas dos Moinhos Velhos – Pena – Contenda (Mira de Aire, Portugal). *Relatório Inédito*. 3 vols., 33 p., 32 fotos, 6 anexos, 8 mapas. Lisboa.

Estructura geológica del Cerro del Castillo y formación de la Gruta de las Maravillas (Aracena)

Francisco José Martínez-Moreno⁽¹⁾, Antonio Azor⁽¹⁾, Jesús Galindo-Zaldívar^(1,2), Antonio Pedrera⁽²⁾, Patricia Ruano^(1,2), Manuel López-Chicano⁽¹⁾, Wenceslao Martín-Rosales⁽¹⁾

(1) Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071-Granada, Spain (franmartinez@ugr.es, azor@ugr.es, mlopezc@ugr.es, wmartin@ugr.es)

(2) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, 18071-Granada, Spain (jgalindo@ugr.es, pedrera@ugr.es, pruano@ugr.es)

RESUMEN

La Gruta de las Maravillas (Aracena, SO de España) se sitúa dentro de la Banda Metamórfica de Aracena que, junto a las Anfibolitas de Beja-Acebuches, forman el Macizo de Aracena. Este macizo se encuentra en el contacto entre dos de las grandes zonas en que se subdivide el Macizo Ibérico (la Zona de Ossa Morena y la Zona Sudportuguesa). Este estudio se centra en el Cerro del Castillo, compuesto de muro a techo estructural por: granodioritas, mármoles y cuarcitas, y gneises, con una orientación general de N110°E. Dentro de los mármoles y cercano al contacto con las granodioritas se encuentra una estrecha banda compuesta por pirita diseminada y masiva, parcialmente transformada en óxidos de hierro. Los mármoles se encuentran altamente deformados en condiciones dúctiles, observándose pliegues isoclinales de distintas escalas, boudins, porfiroblastos con morfología sigmoidal y estructuras S-C que sugieren una cierta deformación por cizalla sinistral. El análisis de las deformaciones frías indica que el esfuerzo máximo de compresión se produjo en la dirección NE-SO. La Gruta de las Maravillas se divide en tres niveles (a cotas de ~650, ~665 and ~685 m), habiendo progresado la disolución desde el nivel superior hasta el nivel inferior en distintas etapas. Esta disolución, probablemente, se vio favorecida por la presencia de pirita y óxidos de hierro cerca de la cavidad, que acidificarían las aguas en circulación. La morfología y posición de la cavidad está estrechamente ligada a la dirección de la foliación principal y a la posición de la banda con pirita. Actualmente, el nivel de cota ~650 m se encuentra parcialmente sumergido en una lámina de agua de hasta 10 m. El proceso de formación de la Gruta de las Maravillas es excepcional comparado con otras cuevas (e.g. Cuevas de Nerja o El Soplao), debido a la presencia de la banda de pirita que ha acelerado la disolución de la roca carbonática.

Palabras clave: Banda Metamórfica de Aracena, desarrollo de la cavidad, banda de pirita masiva y diseminada, aguas ácidas, niveles de disolución horizontal.

Geological structure of the Cerro del Castillo Hill and formation of the Gruta de las Maravillas (Aracena)

ABSTRACT

The Gruta de las Maravillas (Aracena, SW Spain) is located within the Aracena Metamorphic Belt that, together with the Beja-Acebuches Amphibolites, constitutes the Aracena Massif. This metamorphic belt marks the contact between two major zones of the Iberian Massif (Ossa-Morena Zone and South Portuguese Zone). This study is focused on the Cerro del Castillo hill, made up from structural bottom to top of granodiorites, marbles and quartzites, and gneisses, with a general N110°E orientation. The marbles close to the granodiorite contact include a thin band of disseminated and massive pyrite, partially transformed to Fe oxides. Marbles appear highly deformed in ductile conditions, with isoclinal folds at different scales, boudins, porphyroblasts with sigmoidal morphology and left-lateral S-C shear fabrics. Analysis of the brittle deformations indicates a NE-SW oriented

maximum compression. The Gruta de las Maravillas is divided into 3 levels (located at ~650, ~665 and ~685 m.a.s.l.), the dissolution having progressed from top to bottom in different stages. This dissolution probably was favored by the presence of pyrite and Fe oxides in the host rock, which, in turn, would have provoked the acidification of the circulating water. The morphology and position of the Gruta de las Maravillas cave is controlled by the orientation of the main foliation and the pyrite-bearing band in the host marbles. Nowadays, the lower level in the cave is partially submerged ~ 10 m below the water table. The formation process of the Gruta de las Maravillas is outstanding, compared to other Spanish caves (e.g. Cuevas de Nerja or El Soplao), due to the presence of the pyrite band that accelerated the dissolution of the carbonatic rock.

Keywords: Aracena Metamorphic Belt, cave development, disseminated and massif pyrite band, acidic water, horizontal dissolution levels.

INTRODUCCIÓN

La disolución de rocas carbonatadas por aguas enriquecidas en CO₂ es el proceso más común en espeleogénesis (véase por ejemplo, Palmer, 1991). El circulación de aguas meteóricas cargadas con ácido carbónico disuelve estas rocas (Klimchouk, 2007, 2009; Palmer, 2011, Tisato *et al.*, 2012). Un tipo particular de sistemas kársticos están asociados con la disolución de carbonatos por aguas cargadas en sulfuros. El ácido sulfúrico puede resultar de H₂S asociado en profundidad con reservorios de hidrocarburos, actividad magmática, y reducción de sulfatos. Las aguas enriquecidas con H₂S al mezclarse con aguas ricas de oxígeno meteórico dan lugar a ácido sulfúrico que disuelve las rocas carbonatadas (Egemeier, 1981). La corrosión por ácido sulfúrico da lugar a características morfológicas distintivas y promueve la formación de sulfatos secundarios, principalmente yeso. Las cuevas formadas por este proceso desarrollan salas irregulares y galerías sin salida cerca del nivel freático, dando lugar a morfologías de esponja y redes de laberintos. En una etapa de espeleogénesis madura, la infiltración meteórica y la emaciación de masas podrían convertirse en los procesos dominantes, y los sulfatos podrían ser rediseñados por el agua subsaturada.

Varios ejemplos de cuevas asociadas a este proceso y que muestran estas características han sido descritos alrededor del mundo. La cueva activa de Villa Luz (Méjico), probablemente ligada a la emanación de gases volcánicos de H₂S (Hose y Pisarowicz, 1999), las cuevas de Kane y Guadalupe (EEUU), relacionadas con reservorios de petróleo cercanos (Egemeier, 1971; Hill, 2000; Palmer, 2006), y la cueva activa de Frasassi Gorge (Italia), que está asociada con la reducción de anhídrido y yeso (Galdenzi y Menichetti, 1995), son probablemente los ejemplos mejor conocidos. Depósitos de sulfuros, principalmente pirita (FeS₂), se oxidan cuando son expuestos al agua, y pueden reaccionar para formar ácido sulfúrico (H₂SO₄). Aunque las zonas de oxidación de depósitos de pirita en rocas carbonatadas son sectores favorables para la formación de cuevas, hay pocos ejemplos descritos de cuevas formadas por sulfuros en este contexto.

La Gruta de las Maravillas, localizada al SO de la Península Ibérica, se ha desarrollado en mármoles que contienen pirita. La cueva fue descubierta por exploraciones mineras para extraer hierro a finales del siglo XIX. En 1914 la cavidad fue abierta al público como la primera cueva turística de España. Sucesivas investigaciones espeleológicas han descubierto nuevas galerías y salas que fueron abiertas al turismo. Recientemente, estudios geofísicos realizados en la zona han puesto de manifiesto nuevas cavidades que podrían expandir el tamaño conocido de la Gruta al doble de su capacidad (Martínez-Moreno *et al.*, 2014).

El objetivo de este estudio es discutir los mecanismos de disolución y desarrollo de la Gruta de las Maravillas. Para este fin, se ha caracterizado la estructura tectónica de los mármoles donde se localiza la cueva, se ha cartografiado la banda de pirita en detalle y se ha analizado la morfología de la cueva y los minerales secundarios presentes.

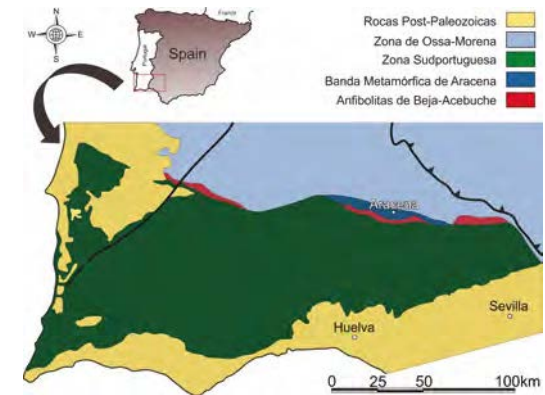


Figura 1: Localización geológica del área de estudio al suroeste de la Península Ibérica.

CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La Gruta de las Maravillas se localiza en el Cerro del Castillo, en la localidad de Aracena, al Norte de la provincia de Huelva (parte occidental de Andalucía, España). La cueva se ha desarrollado por la disolución de mármoles pertenecientes a la Banda Metamórfica de Aracena, dentro del Macizo Ibérico. Esta banda metamórfica se localiza en el contacto entre dos de las zonas mayores del Macizo Ibérico (Figura 1): Zona de Ossa Morena y Zona Sudportuguesa. La Banda Metamórfica de Aracena está compuesta por protolitos Precámbricos-Cámbricos afectados por un metamorfismo de alta temperatura y baja presión. Está en contacto con las Anfibolitas de Beja-Acebucho al sur, y ambas forman el Macizo de Aracena. Esta región se caracteriza por una alta deformación dúctil asociada a un contexto general de transpresión sinistral durante la Orogenia Varisca (véase por ejemplo, Simancas *et al.*, 2006).

El Macizo de Aracena presenta un relieve con relieves montañosos alargados en dirección ESE-WNW. En conjunto, se trata de un paisaje alomado con altitud moderada (160 a 1000 m). El Cerro del Castillo tiene un relieve local de 100 m (desde 650 a 750 m) y una extensión de 24.5 ha.

El acuífero de Aracena tiene una extensión de 58 km² y se localiza en las cuencas de los ríos Guadiana y Guadalquivir. Es un acuífero libre y excedentario, formado principalmente por un sistema de conductos estrechos instalados en karst. En esta región las precipitaciones máximas se concentran entre Noviembre a Enero y las mínimas en verano.

ESTRUCTURA Y DEFORMACIÓN DEL ENTORNO DE LA GRUTA DE LAS MARAVILLAS

La secuencia vulcano-sedimentaria precámbrica-cámbrica perteneciente a la Banda Metamórfica de Aracena incluye niveles carbonatados que afloran en el Cerro del Castillo. La secuencia litológica se compone, de muro a techo, de granodioritas, mármoles y cuarcitas, y gneises (Figura 2c). Los afloramientos de granodiorita se encuentran en la parte meridional del cerro y se trata de rocas isótropas y compactas, con incremento de la meteorización hacia el norte. Las granodioritas están en contacto con mármoles, siendo el contacto paralelo a la foliación principal en los mármoles. Puntualmente se localizan diques graníticos de dimensiones decimétricas a métricas y emplazados en los mármoles; se observan también xenolitos de mármol rodeados por granodioritas. La foliación de los mármoles está definida por un bandeo clarooscuro compuesto por cristales de calcita deformados, y baja proporción de feldespato potásico y cuarzo. La foliación tiene una dirección media de N110°E y un buzamiento de 65° a 85° hacia el NE (Figura 2a). Hacia la parte oriental del cerro afloran cuarcitas, intercaladas entre mármoles y con menor continuidad lateral que éstos. El contacto entre ambas litologías tiene una geometría irregular en detalle, aunque en general es paralelo a la foliación principal. La foliación en las cuarcitas está marcada por un bandeo composicional de cuarzo, que produce cambios de color a escala

milimétrica-centimétrica. El buzamiento de las cuarcitas varía desde 55°NE hasta vertical. Las intercalaciones de cuarcitas entre mármoles tienen morfología tabular, con continuidades laterales de aproximadamente 100, y 2 a 5 m de espesor. La parte alta de la secuencia está formada por gneises (Figura 2b).

Cerca del contacto con las granodioritas, aflora una estrecha banda intercalada entre mármoles, con sulfuros masivos oxidados (Figura 3a), cristales de pirita diseminada (Figura 3b) y transformada en óxidos de hierro (Figura 3c). Esta banda se subdivide a su vez en dos bandas paralelas, con ramificaciones hacia el ONO, con una extensión total de 500 m y una anchura de 1-2 m. La pirita diseminada es el mineral primario y su contacto con el agua de lluvia y aire (20% de oxígeno), habría provocado su transformación en óxidos de hierro, sulfatos e hidróxidos (Descotes *et al.*, 2002). Este es un proceso químico muy lento (Berner, 1964), que daría lugar a aguas ácidas con alto poder de disolución de rocas carbonatadas.

El análisis petrológico realizado sobre cada una de las litologías (Figura 4) muestra alto contenido en carbonato en mármoles (1), además de cuarzo, biotita, feldespatos y pequeños cristales de pirita. La muestra con pirita (2) contiene altas proporciones de óxidos de hierro y pequeños cristales de pirita sin transformar, junto a cuarzo y carbonatos. Las granodioritas (3) presentan altos contenidos en plagioclasa y biotita-clorita, con feldespatos y cuarzo en menores proporciones. Finalmente, las cuarcitas están constituidas principalmente por cuarzo, con pequeñas proporciones de menas opacas.

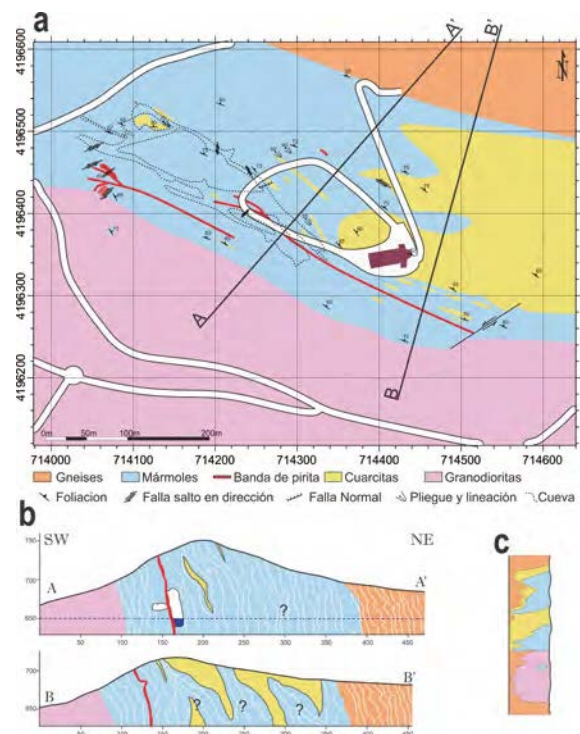


Figura 2. Esquema geológico del Cerro del Castillo. (a) Cartografía del área de estudio. (b) Cortes geológicos marcados en la Figura 2a. (c) Secuencia litológica.



Figura 3. Banda de pirita en mármoles. (a) Sulfuros masivos oxidados. (b) Pirita transformada en óxidos de hierro. (c) Cristales de pirita diseminada.

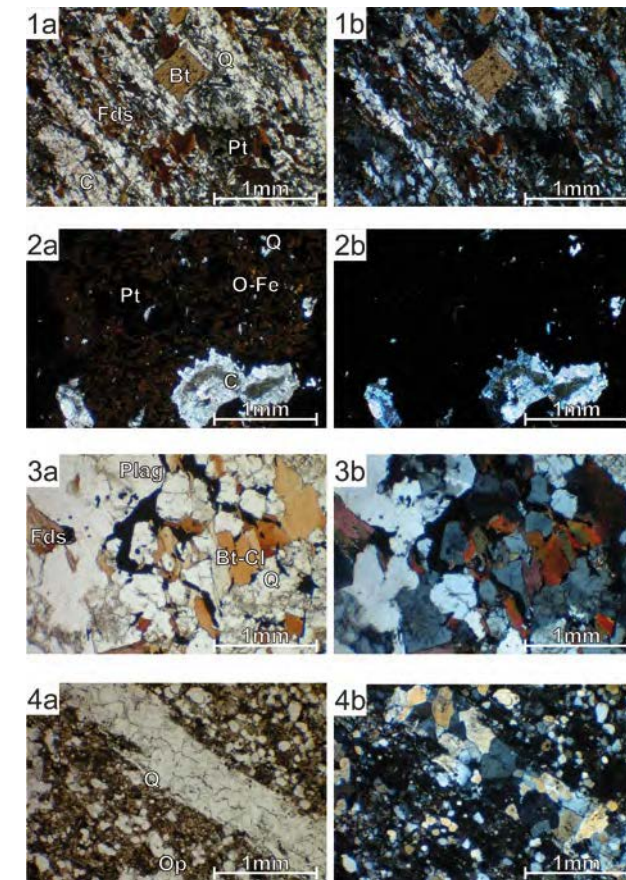


Figura 4. Análisis petrográfico en lámina delgada con luz transmitida (a) y nicóles cruzados (b). Las láminas mostradas corresponden a mármol (1), capa mineralizada de pirita (2), granodiorita (3) y cuarcita (4). Abreviaturas minerales: C: carbonato, Q: cuarzo, Bt: biotita, Cl: clorita, Plag: plagioclasa, Fds: feldespato potásico, Pt: pirita, O-Fe: óxidos de hierro, Op: menas opacas.

En el área del Cerro del Castillo y dentro de la cavidad se han observado estructuras que indican deformación dúctil (Figura 5). A escala mesoscópica, la foliación de los mármoles aparece plegada y afectada por cizallamientos tardíos. Localmente muestra pliegues isoclinales centimétricos a decamétricos, con ejes generalmente en dirección ONO-ESE e inmersiones hacia el ONO (Figura 5a y 5b). Muchos de estos pliegues presentan engrosamiento de charnela, lo que sugiere deformación por cizalla dúctil (Figura 5e). Por otro lado, se han encontrado boudins (Figura 5c), que indican elongación paralela a las capas y/o acortamiento perpendicular. Además, existen porfiroblastos con morfología sigmoidal y estructuras S-C, que sugieren cizalla sinistral (Figura 5d).

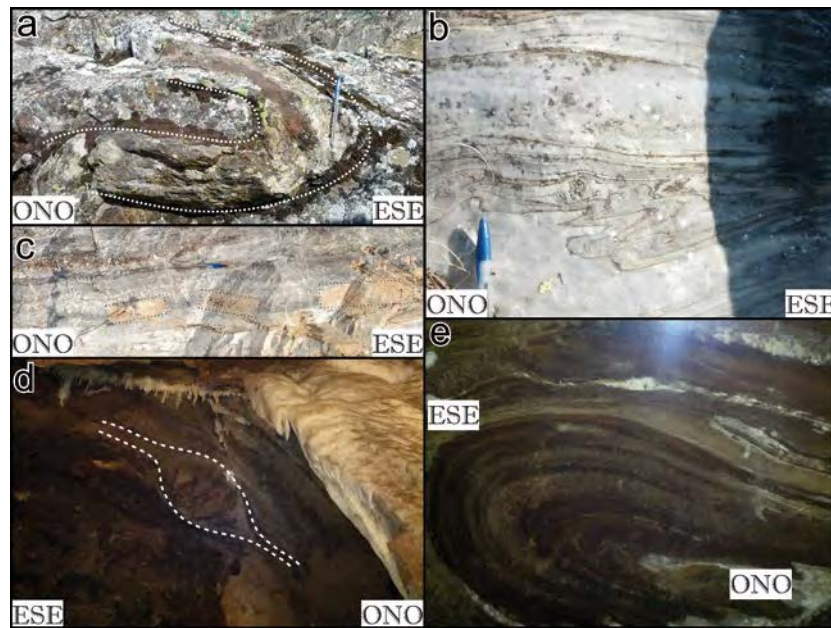


Figura 5. Estructuras de deformación dúctil observadas tanto en la superficie del Cerro del Castillo (a, b, c) como dentro de la Gruta de las Maravillas (d, e).

El sistema principal de diaclasas (Figura 6), medido tanto en la superficie del cerro como dentro de la cueva, es vertical y de orientación NE-SW. No obstante, las estaciones 7, 9 y 12 muestran dos juegos de diaclasas. En la estación 7, los dos juegos de diaclasas forman un ángulo de 60° aproximadamente, lo que sugiere que están asociadas a una deformación con componente de cizalla simple. Los juegos que aparecen en las estaciones 9 y 12 tienen un ángulo menor de 60° , con lo que podrían corresponder a diaclasas híbridas (Hancock, 1985). El conjunto de diaclasas reconocido es compatible con un régimen de tensiones que produciría extensión en dirección NW-SE y compresión ortogonal (NE-SW). Se han observado además varias fallas de pequeña escala tanto dentro como fuera de la cavidad. Aunque la mayoría están estriadas, el régimen ha podido ser determinado solamente en algunas de ellas. La mayoría están orientadas en la dirección NE-SW con cinemática sinistral, lo que sugiere paleotensiones similares a las deducidas de los juegos de diaclasas. En cualquier caso, el número de fallas observado es demasiado pequeño como para aplicar técnicas estadísticas de determinación de paleotensiones.

MORFOLOGÍA DE LA CAVIDAD

La Gruta de las Maravillas forma parte del sistema kárstico del Cerro del Castillo. La cueva no tiene conexión natural con el exterior, y por tanto no sufrió modificaciones antrópicas o animales hasta su descubrimiento. La

cueva presenta un desarrollo predominantemente horizontal, con salas irregulares que acaban abruptamente. Se compone de salas pequeñas y grandes con suelo plano, suelo de roca erosionada y techos en forma de cúpula. Presenta unas dimensiones máximas de 350 m de largo, 80 m de ancho, 2130 m de recorrido, 1065 m de perímetro y 16775 m² de área. Se divide en tres niveles principales (Figura 7) cuyo desarrollo está asociado con la evolución del nivel freático. El nivel 1 (el más bajo) se localiza

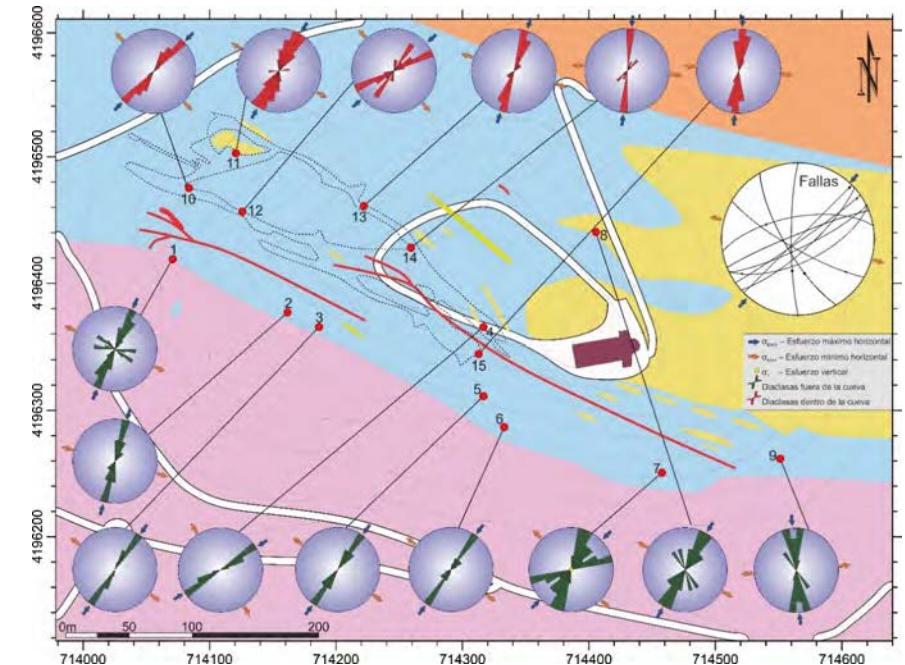


Figura 6. Análisis de paleotensiones mediante diaclasas y fallas. Se han tomado medidas tanto fuera como dentro de la cavidad.

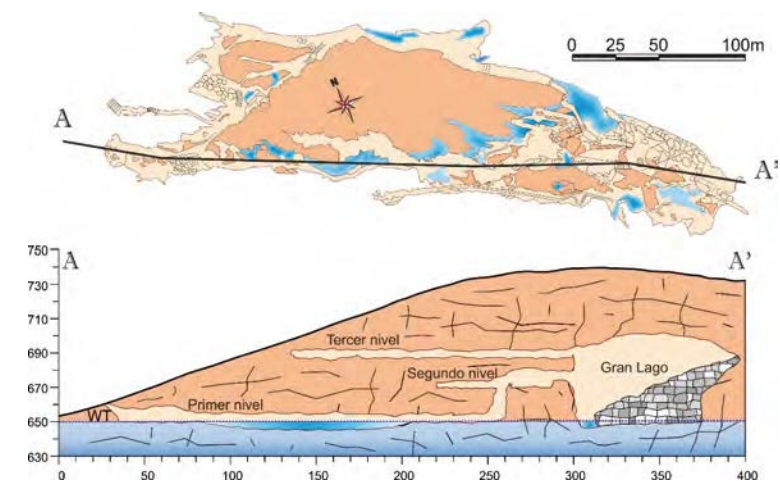


Figura 7. Morfología en planta de la Gruta de las Maravillas y corte representativo de los tres niveles en los que se encuentra dividida la cavidad y su culminación en la sala del Gran Lago.

A 645 m de cota aproximadamente, con una altura de 5-7 m. Actualmente, el nivel freático se encuentra a 650 m (Figura 8a). Sin embargo, a lo largo de la cavidad se encuentran distintos lagos colgados o gours en niveles superiores (Figura 8b). En áreas cercanas de los flancos del Cerro del Castillo, donde la cavidad se encuentra a 3-4 m de la superficie, las raíces de los árboles atraviesan la cavidad. El segundo nivel localizado a 670 m aproximadamente, presenta un desarrollo horizontal menor; tiene una altura de 10 m y una mayor densidad de espeleotemas. El tercer nivel se localiza a 685 m y presenta mayor desarrollo horizontal que el nivel 2, con alturas de 5-10 m. Las galerías pertenecientes a este nivel sólo son accesibles con el uso de cuerdas.

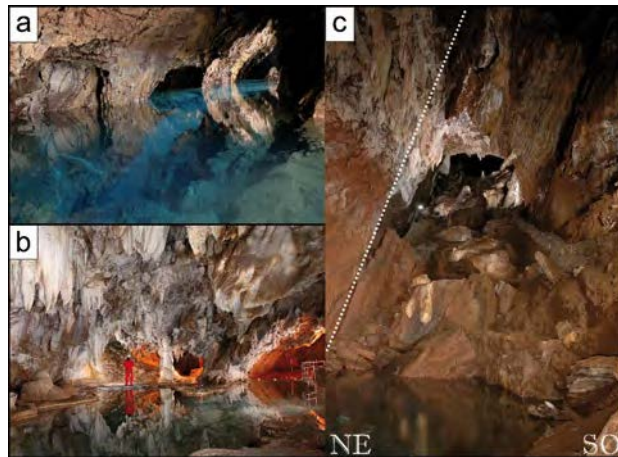


Figura 8. Morfología de la Gruta de las Maravillas. (a) Nivel freático actual. (b) Lagos colgados o gours del segundo nivel. (c) Caos de bloques del Gran Lago con foliación marcada.

Especial atención requiere la mayor sala de la cueva, conocida como El Gran Lago (Figura 8c). Esta sala se encuentra en la parte central del Cerro del Castillo, coincidiendo con las mayores cotas topográficas y en la vertical de la capa de pirita (Figura 2). Tiene unas dimensiones de 25 m de ancho, 100 m de largo y 50 m de alto. Alcanza cotas topográficas de 645 a 700 m, abarcando por tanto todo el intervalo de altitudes que definen los tres niveles en los que se divide la cueva; su base está cubierta por grandes bloques de escala métrica dispuestos de forma caótica y provenientes seguramente del colapso del segundo y tercer nivel.

La orientación de las dimensiones máximas de la cueva coincide con la foliación principal (N110°E, Figura 7, De Val y Hernández, 1989) y las galerías presentan morfologías que coinciden con el buzamiento de las capas (80-85°N, Figura 8c). Por otro lado, presenta un patrón de ramificaciones que consiste en pasajes estrechos y grandes salas. El final de las ramificaciones tiene morfología de red laberíntica. La conexión entre galerías paralelas está relacionada con la dirección del sistema de diaclasas dominante.

ESPELEOTEMAS Y OTROS DEPÓSITOS

Las galerías localizadas al SW presentan un desarrollo de espeleotemas mayor que las galerías localizadas al NE, debido probablemente a que se generaron aisladamente; actualmente están comunicadas mediante túneles artificiales. Las zonas inundadas se caracterizan por ausencia de espeleotemas debido a que son zonas de corrosión. Se observan numerosas muescas de corrosión (corrosion notches) y morfologías de aguas estables (Martín-Rosales *et al.*, 1995).

Existen tanto depósitos alóctonos (arcillas) como autóctonos (bloques caóticos). Además, las galerías del nivel 1 tienen gran variedad de espeleotemas con morfologías mixtas de ambientes freáticos y vadosos. Los niveles superiores (2 y 3) tienen tal cantidad de espeleotemas, que enmascaran la morfología de las paredes. Los espeleotemas del nivel 3 presentan mayor corrosión debido a los óxidos de hierro presentes.

Los óxidos resultantes de la transformación de la pirita cubren las paredes de la cavidad y crean una fina capa que se observa en zonas no cubiertas por espeleotemas (Fig 9). Se componen de goetita, lepidocrita, psilomelana, rutilo, ilmenita y brookita. El yeso remanente no ha sido encontrado en las paredes de la cavidad; sin embargo se han encontrado restos anómalos de sulfatos en el agua de los lagos. Por otro lado, existe gran variedad de espeleotemas: estalactitas, estalacmitas, columnas, coladas, banderolas, precipitados y formas pavimentadas (gours, pisolitos o perlas de las cavernas, etc.), helectitas y coraloideas de calcita. Se componen principalmente por calcita (niveles inferiores) y calcita aragonítica, relacionadas con cambios hidrológicos y/o paleoclimáticos acaecidos en la región.

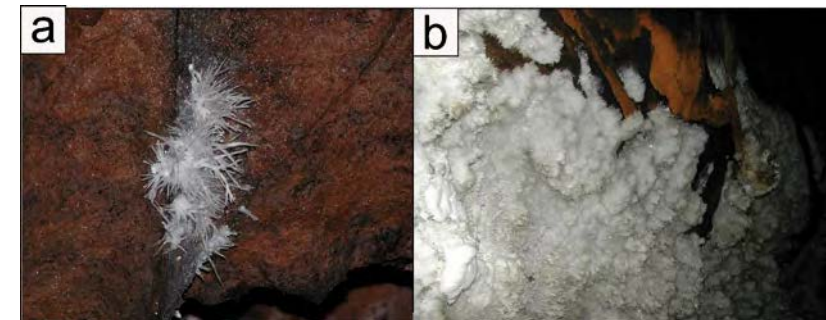


Figura 9. Óxidos de hierro resultantes de la transformación de la pirita. (a) Óxidos de hierro en las paredes de la cavidad y (b) espeleotemas sobre los óxidos.

En el nivel inferior coexisten espeleotemas desarrollados sobre y bajo el nivel freático. En este caso, primero se formaron espeleotemas subacuáticos de grandes dimensiones; sobre ellos aparecen formaciones secundarias de zona vadosa con presencia de aragonito; luego aparecen formaciones de aguas tranquilas y sobresaturadas (gours), y finalmente formaciones de zona vadosa.

HIDROGEOLOGÍA E HIDROQUÍMICA

El agua presente en los lagos de la cueva tiene influencia de aguas freáticas. El análisis realizado corresponde a un agua subsaturada. Sin embargo, las muestras tomadas en los goteos de la cavidad corresponden a aguas saturadas y pH básico, con contenidos anómalos en sulfatos. El flujo del agua se produce hacia el NO donde el agua encuentra su salida hacia el exterior.

DISCUSIÓN

La Gruta de las Maravillas se ha desarrollado a favor de la foliación principal (N110°E) de los mármoles del Cerro del Castillo. El análisis de paleotensiones demuestra que la conexión entre galerías paralelas se ha producido por disolución a lo largo de las diaclasas. Las estructuras de deformación frágiles observadas confirman que la dirección de compresión principal es NE-SO, con extensión perpendicular a ella.

La cavidad ha permanecido desconectada del exterior hasta su descubrimiento durante exploraciones mineras llevadas a cabo en 1850. Sin embargo, desde un punto de vista hidrológico el desarrollo de la cueva ha estado estrechamente ligado a los cambios climáticos ocurridos en esta región a lo largo del Cuaternario. La cavidad se divide en tres niveles con morfología predominantemente horizontal (Figura 7). La formación de la cavidad co-

menzó en el nivel superior 3, cuando el nivel freático se situaba a esa cota (~700 m, Figura 10). Posteriormente, el nivel freático descendió hasta el techo del nivel 2 (~ 675 m), cuando comenzó la disolución a este nivel. Este nivel presenta menor desarrollo horizontal, aunque mayor en la vertical, lo que puede ser explicado como un descenso lento pero continuado del nivel freático. Finalmente, el nivel freático bajó hasta el techo del nivel inferior 1 (~ 660 m), modelando el nivel de mayor extensión horizontal, sobre el que se sitúa la entrada. Hoy en día, el nivel freático se encuentra a 650 m de cota (Figura 8a). A lo largo de la historia evolutiva de la cavidad, los distintos niveles han estado tanto en condiciones vadosas como saturadas en agua (bajo nivel freático o en gours), como lo demuestra la superposición de espeleotemas de distinta naturaleza.

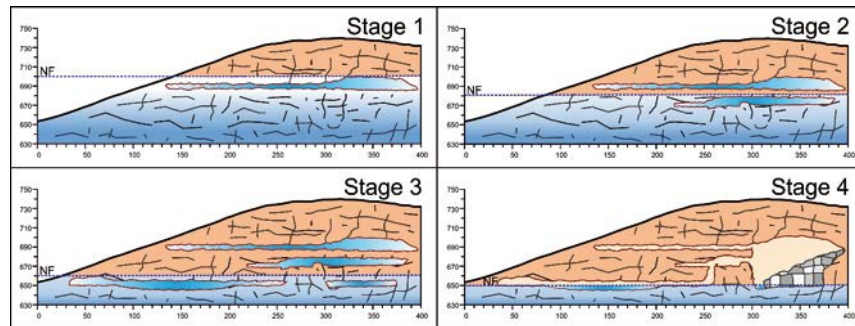


Figura 10. Esquema interpretativo de la evolución de la Gruta de las Maravillas.

La parte más alejada de la entrada la constituye un depósito de bloques en disposición caótica, de escala métrica, resultado probablemente del colapso de los niveles superiores (Figura 8c). Esto se produce por un mayor desarrollo de estos niveles superiores en esa vertical, que coincide con las mayores cotas topográficas del Cerro del Castillo.

El origen de la Gruta de las Maravillas está estrechamente ligado a la presencia de una banda con pirita intercalada entre los mármoles, que coincide en superficie con la posición de la cueva en profundidad. Como muestra el modelo 3D, la banda de pirita se encuentra muy próxima a las galerías del SW y cruza la parte final de la cavidad, donde se produce la mayor disolución dando lugar a las mayores salas. Probablemente, sin la presencia de esta banda la cavidad no hubiera experimentado el mismo desarrollo y sus dimensiones serían menores.

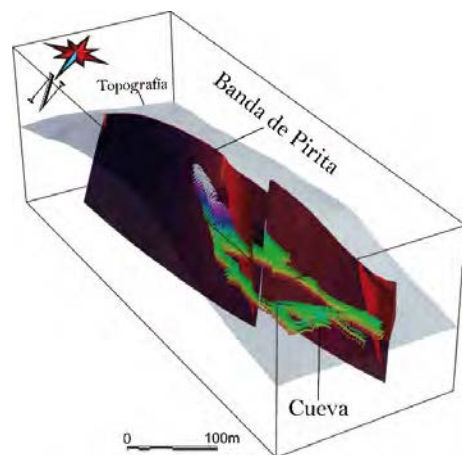


Figura 10. Modelo 3D de la relación entre la Gruta de las Maravillas y la banda de pirita.

El agua de lluvia no solo transforma la pirita, sino que arrastra aguas ácidas y óxidos de hierro hacia el interior del sistema kárstico. Este hecho produce una rápida disolución y aumento del tamaño de las galerías. Posteriormente, se depositan sobre las paredes de la cueva (Figura 9). Superada la etapa de disolución, y con el nivel freático por debajo, comienzan a crearse los depósitos de espeleotemas de naturaleza vadosa y freática.

CONCLUSIONES

El origen de la Gruta de las Maravillas está estrechamente ligado con la presencia de una banda de pirita en los mármoles del Cerro del Castillo. Tanto la posición como la orientación de esta banda con pirita tienen relación directa con la posición y orientación de la cueva. Distintos marcadores asociados a este tipo de cuevas (finales abruptos, notches de corrosión, etc.) han sido observados en la cavidad. La foliación principal define la orientación de las galerías principales, mientras que la orientación de las familias de diaclasas define la conexión entre galerías paralelas. La subdivisión de la cavidad en tres niveles perfectamente diferenciados está condicionada por la evolución que ha sufrido el nivel freático. La superposición de los distintos tipos de espeleotemas presentes sugiere cuatro etapas de formación de la cavidad, tanto en ambientes freáticos como vadosos. El fondo (en la horizontal) de la cavidad, interrumpido por un caos de bloques correspondientes al derrumbe de los niveles superiores, sugiere que la cavidad tiene continuidad hacia sur del Cerro del Castillo.

REFERENCIAS

- Berner, R. A., 1964. Distribution and diagenesis of sulfur in some sediments from the Gulf of California. *Marine Geology*, 1(2): 117-140.
- Descotes, M., Beaucaire, C., Mercier, F., Savoye, S., Sow, J. y Zuddas, P. P., 2002. Effect of carbonate ions on pyrite (FeS₂) dissolution. *Bulletin - Societe Geologique de France*, 3: 265-270.
- Egemeier, S. J., 1971. A comparison of two types of solution caves. *Unpublished report to Carlsbad Caverns National Park*.
- Egemeier, S. J., 1981. Cavern development by thermal waters. *NSS Bull*, 43: 31-51.
- Galdenzi, S. y Menichetti, M., 1995. Occurrence of hypogenic caves in a karst region: Examples from central Italy. *Environmental Geology*, 26(1): 39-47.
- Hancock, P. L., 1985. Brittle microtectonics: principles y practice. *Journal of Structural Geology*, 7(3-4): 437-457.
- Hill, C. A., 2000. Sulfuric acid, hypogene karst in the Guadalupe Mountains of New Mexico y West Texas (U.S.A.). *National Speleological Society*: 309-316.
- Hose, L. D. y Pizarowicz, J. A., 1999. Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico: Reconnaissance study of an active sulfur spring cave y ecosystem. *Journal of Cave y Karst Studies*, 61(1): 13-21.
- Klimchouk, A., 2009. Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106(1-2): 100-117.
- 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.
- Martín-Rosales, W., Lopez Chicano, M., Rodríguez Navarro, C. M. y Pulido-Bosch, A., 1995. Morfología, Espeleotemas y Climatología de la "Gruta de las Maravillas" (Aracena, Huelva). *Espeleotemas*, 5: 51-62.
- Palmer, A. N., 1991. Origin y morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103(1): 1-21.
- Palmer, A. N., 2006. Support for a sulfuric acid origin for caves in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *57th Field Conference, Caves y Karst of Southeastern New Mexico*: 195-202.
- Simancas, J. F., Carbonell, R., González Lodeiro, F., Pérez-Estáun, A., Juhlin, C., Ayarza, P., Kashubin, A., Azor, A., Martínez Poyatos, D., Sáez, R., Almodóvar, G. R., Pascual, E., Flecha, I. y Martí D., 2006. Transpressional collision tectonics and mantle plume dynamics: the Variscides of southwestern Iberia. En: GEE, D. G. y STEPHENSON, R. A. (eds), *European Lithosphere Dynamics, Geological Society, London, Memoirs*, 32, 345-354.

Tisato, N., Sauro, F., Bernasconi, S.M., Bruijn, R. H. C. y De Waele, J., 2012. Hypogenic contribution to speleogenesis in a predominant epigenic karst system: A case study from the Venetian Alps, Italy. *Geomorphology*, 151-152(0): 156-163.

Aportaciones al conocimiento hidrogeológico de la Gruta de las Maravillas (Aracena)

Adela Hódar-Pérez⁽¹⁾, Manuel López-Chicano⁽¹⁾, Francisco José Martínez-Moreno⁽¹⁾, Wenceslao Martín-Rosales⁽¹⁾, Jesús Galindo-Zaldívar^(1,2), Antonio Azor⁽¹⁾, Antonio Pedrera⁽²⁾ y Patricia Ruano^(1,2)

(1) Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, 18071-Granada, España (adelahodar@correo.ugr.es, mlopezc@ugr.es, franmartinez@ugr.es, wmartin@ugr.es, azor@ugr.es)

(2) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada, 18071-Granada, España (jgalindo@ugr.es, pedrera@ugr.es, pruanor@ugr.es)

RESUMEN

Durante el año 2013 se llevaron a cabo diversos estudios para conocer el funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonático en el que se desarrolla la Gruta de las Maravillas y especialmente su relación con el acuífero detrítico adyacente sobre el que se asienta la mayor parte del casco urbano de Aracena. Se ha realizado un inventario de puntos de agua en los que se ha medido el nivel piezométrico, así como algunos parámetros físico-químicos. La mayoría de los puntos inventariados son pozos de captación tradicionales, de gran diámetro y escasa profundidad. Se ha realizado una interpretación de los datos piezométricos como aproximación al funcionamiento hidrogeológico. Los resultados del trabajo sugieren la existencia de dos flujos principales con dirección norte-sur, que rodean el Cerro del Castillo y convergen al sur del mismo. Este trazado parece estar relacionado sobre todo con el acuífero aluvial cuaternario que se encuentra bajo el casco urbano de Aracena. Se ha detectado un alto piezómetro en la zona del Cabildo que, a falta de estudios adicionales, podría estar relacionado con posibles fugas de la antigua red de saneamiento y la afección a la calidad del agua de los lagos de la gruta. La hipótesis propuesta plantea la existencia de una circulación subterránea desde la zona de recarga a través de los materiales carbonatados del Cerro del Castillo. Dicha circulación podría desviarse hacia el oeste y sureste de la localidad al encontrarse con materiales metamórficos menos permeables y continuar a través de los materiales aluviales.

Palabras clave: Aracena, Gruta de las Maravillas, funcionamiento hidrogeológico, análisis piezométrico, recarga subterránea.

Contribution to the hydrogeological knowledge of the Gruta de las Maravillas (Aracena)

ABSTRACT

During 2013 a set of different studies were made at the carbonate aquifer of Gruta de las Maravillas (Aracena) in order to get a better understanding of its hydrogeological functioning and especially on its relation with the adjacent detrital aquifer located beneath the urban area of Aracena. The water table and some physicochemical parameters have been measured using a set of water points, the most part of them being traditional drilled wells of low depth. The recorded data allow us to infer an approximated functioning of the aquifer. The results of this work suggest two main flows, north-south direction, that surround Cerro del Castillo and converge at its southern flank. This outline seems to be related to the quaternary alluvial aquifer which largely lies below the urban area. Though it requires additional studies, we can infer that the high piezometric surface, found at the Cabildo zone, might be related to some leakages produced by a preexisting sewerage network. The proposed hypothesis suggests the existence of an underground flow which extends from the recharge zone through the carbonate mate-

rials of Cerro del Castillo. This flow might be diverted toward the west and southeast, due to the presence of less permeable metamorphic materials, continuing flowing through the alluvial materials.

Keywords: Aracena, Gruta de las Maravillas, hydrogeological functioning, piezometric analysis, groundwater recharge.

Introducción

El objeto del presente estudio es contribuir al esclarecimiento de la hidrogeología del entorno de la Gruta de las Maravillas, un aspecto clave para la conservación de la cavidad, habida cuenta de que en su interior aflora la zona saturada del acuífero carbonático en el que encaja. El estudio realizado se circunscribe casi exclusivamente al casco urbano de la Ciudad de Aracena.

En términos hidrogeológicos generales, la zona de estudio se incluye dentro del conjunto de materiales acuíferos que conforman el acuífero de la Sierra de Aracena, del cual existen diversos estudios previos. Sin embargo, si aumentamos el nivel de detalle y nos centramos en la zona de este estudio en cuestión, que como hemos mencionado anteriormente se ciñe al núcleo urbano de Aracena y su entorno cercano, se puede comprobar que no existen estudios que describan con claridad el funcionamiento del sistema acuífero subterráneo en esta área, debido precisamente a la dificultad que entraña el hecho de que el terreno esté parcialmente urbanizado o con un gran desarrollo de suelos que dificulta las observaciones geológicas.

Para llevar a cabo el estudio hidrogeológico de la zona se ha realizado un inventario de puntos de agua, como primera toma de contacto. En estos puntos se ha medido la profundidad del nivel del agua, así como algunos parámetros físico-químicos. El nivel piezométrico medido en la red de puntos inventariados permitirá, por primera vez, realizar una aproximación al funcionamiento hidrodinámico de los flujos subterráneos y una caracterización de la piezometría en esta zona.

CONTEXTOS GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO GENERALES

Los materiales acuíferos del Cerro del Castillo y sus alrededores forman parte de un conjunto de materiales acuíferos que se han agrupado bajo la denominación de "Acuífero de la Sierra de Aracena", situado en el norte de la provincia de Huelva (IGME, 2006).

La Sierra de Aracena ha sido estudiada por diversos autores y existen publicaciones al respecto en las que se describen sus características geológicas, sin embargo todos estos estudios se hacen a una escala de detalle menor de la requerida en esta investigación, por lo que tanto la geología como la hidrogeología del Cerro del Castillo y alrededores no queda bien definida, sino que se disgrega dentro de un conjunto mayor, quedando englobada y difusa en una visión más generalizada de la zona. Los relieves de la Sierra de Aracena constituyen afloramientos de materiales pertenecientes a la Banda Metamórfica de Aracena, también llamada Cinturón Metamórfico de Aracena (Figura 1). Desde el punto de vista geológico, esta banda se encuentra situada entre la Zona de Ossa-Morena (hacia el norte) y la Zona Subportuguesa (al sur). Es considerada como una sutura tectónica, es decir como el límite entre dos continentes inicialmente separados que llegaron a colisionar. Esta colisión ha dado lugar a estructuras geológicas muy complejas, cuya formación en algunos casos aún se está estudiando o reinterpretando. Este proceso se habría producido a finales del paleozoico durante la orogénea Varisca (Fernández-Rodríguez y Díaz-Azpiroz, 2008).

El cinturón metamórfico consiste en una banda de rocas afectadas por un metamorfismo de alta temperatura y baja presión, que varía desde bajo a alto grado. Internamente, este cinturón se ha dividido en dos grandes unidades: el dominio continental y el dominio oceánico (Figura 1). El dominio continental se divide a su vez en dos subdominios: el dominio continental de Bajo Grado y el dominio continental de Alto Grado. En la zona norte de la banda se encuentra el dominio de Bajo grado, formado por rocas moderadamente deformadas y que han sufrido un metamorfismo también moderado (de grado bajo a medio). En la parte meridional del

cinturón se encuentra el dominio de Alto Grado que, por el contrario, está caracterizado por la presencia de rocas fuertemente deformadas y metamorfizadas; en este dominio se encuentra nuestra área de estudio. El dominio oceánico, por su parte, situado al sur de la banda, está constituido esencialmente por metabasitas, rocas procedentes del metamorfismo de rocas básicas (pobres en sílice) normalmente ígneas (Fernández Rodríguez y Díaz Azpiroz, 2008).

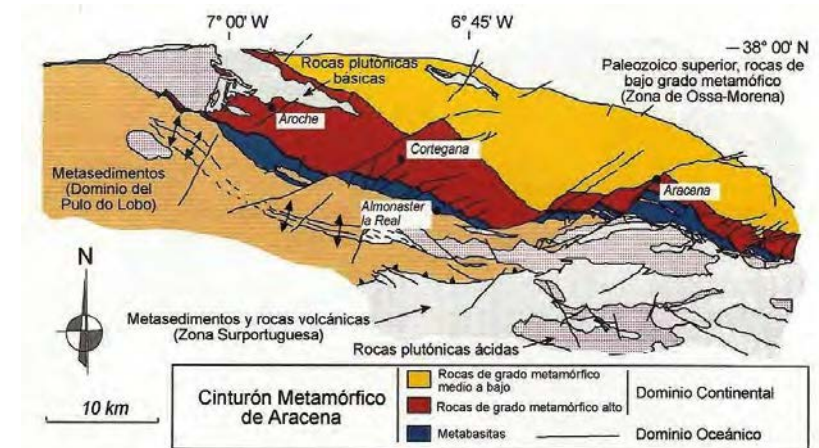


Figura 1. Esquema geológico simplificado del cinturón metamórfico de Aracena (tomado de Fernández Rodríguez y Díaz Azpiroz, 2008).

Los materiales de interés acuífero de la Banda Metamórfica de Aracena consisten en mármoles dolomíticos y calizas dolomíticas de las formaciones Aracena y Volcanosedimentaria del dominio de Bajo Grado. Estos materiales calcáreos están intercalados entre rocas de baja permeabilidad y presentan espesores débiles y poca extensión espacial. El sustrato impermeable de base del acuífero lo constituyen rocas metamórficas a las que se superponen dos niveles acuíferos: directamente sobre los materiales impermeables se encuentra la formación Aracena, constituida por mármoles dolomíticos y calizas marmóreas, permeables por fracturación y karstificación; sobre el anterior nivel acuífero se superpone otro, de tipo multicapa, que consiste en calizas dolomíticas y mármoles intercaladas entre las metavulcanitas de la formación Volcanosedimentaria, estas últimas de comportamiento acuitardo (IGME, 2006).

La Gruta de las Maravillas se desarrolla en un pequeño afloramiento de mármoles de edad Cámbrico inferior alojado entre los materiales que conforman los relieves del Cerro del Castillo. El afloramiento está limitado por gneises, granitos, cuarcitas y metavulcanitas, fundamentalmente. Estos mármoles constituyen un acuífero carbonatado con porosidad debida a procesos de fracturación y karstificación; si bien, esta última ha explotado principalmente las superficies de estratificación (o superficie S_0) más que los planos de fracturación dominantes (Del Val y Hernández, 1989). Los materiales de carácter granítico y las metavulcanitas pueden presentar una cierta permeabilidad por procesos de meteorización y fracturación, como han evidenciado algunos estudios realizados por el IGME en sectores próximos (IGME, 2006).

En la actualidad se desconoce la geometría del sistema, y sobre todo su extensión en profundidad, aunque se sospecha su conexión hidráulica con un afloramiento carbonatado de las mismas características mineralógicas y litológicas que el Cerro del Castillo, situado a 400 m en dirección este, si bien existe un afloramiento de materiales detríticos de edad cuaternaria que impide observar el contacto.

De acuerdo con Martín Rosales *et al.* (1995) el nivel freático de este acuífero carbonatado libre coincide con el nivel de los lagos de las galerías situadas a cota más baja. La alimentación del sistema consiste fundamental-

mente en la infiltración directa del agua de lluvia, estimada en unos 1.000 mm por año, aunque no se descarta la posibilidad de alimentación oculta procedente de otros y afloramientos acuíferos próximos.

En cuanto a los depósitos detríticos más recientes sobre los que se sitúa el casco urbano de Aracena, cabe indicar que la proporción relativa de materiales finos y gruesos es muy variable dependiendo del sector considerado. En algunas zonas se observan gravas, en general muy permeables, y en otras arcillas limosas exentas de granulometrías gruesas, con una permeabilidad consecuentemente menor. Existen numerosas captaciones de agua en estos materiales, se trata en esencia de captaciones para uso doméstico (riego de pequeños huertos, jardines y piscinas).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración de este estudio se ha llevado a cabo una campaña de campo que se ha desarrollado en dos etapas, una primera etapa de un mes de duración comprendida entre el día 06/03/2013 y el 04/04/2013, y una segunda etapa más corta entre los días 15 y 18 de abril cuya finalidad principal era ajustar la posición de los puntos inventariados.

Inicialmente el trabajo de campo consistió en una toma de contacto, que podríamos considerar más burocrática, con el fin de recopilar información existente a través de entrevistas con los lugareños y reuniones con personal del ayuntamiento; y posteriormente se desarrolló un trabajo de investigación sobre el terreno, centrado en la localización de los puntos de agua y la realización de las medidas y otras observaciones pertinentes. La mayor parte de la campaña se centro en localizar un número representativo de pozos y manantiales en las inmediaciones del Cerro del Castillo, con el fin de tener acceso al estudio de las aguas subterráneas que albergan los materiales y rocas que lo conforman.

El estudio se ha tenido que adaptar a al escenario existente y se ha visto condicionado tanto por el medio físico como por el factor humano. El trabajo de recopilación de información planteó algunas dificultades derivadas principalmente de la limitada documentación existente, tanto en el ayuntamiento como en otros organismos, en la que se describiesen las intervenciones y modificaciones realizadas sobre este acuífero, así como en puntos concretos de interés como son la Gruta o en los manantiales de la zona. No disponer de esta información dificulta el estudio de este entorno y añade un problema más al hecho de no poder hacer observaciones directas del terreno, ya que en su mayoría está urbanizado, quedando oculto bajo las calles y edificaciones. Además, algunos de los habitantes a los que se ha entrevistado se han mostrado reticentes a proporcionar la información requerida acerca de la existencia de pozos, por temor a posibles repercusiones económicas posteriores, o simplemente por desconfianza o desconocimiento. Sin embargo, se debe señalar que muchas otras personas han colaborado amablemente con la investigación y le agradecemos enormemente su participación. Por otro lado en la parte alta del pueblo la mayoría de las viviendas no disponen de pozo sino de cisternas que recogen las aguas llovedizas. La inexistencia de captaciones en la parte superior del Cerro del Castillo y en las primeras viviendas que lo rodean ha dado lugar a que en esta zona no se disponga de puntos de muestreo y se produzca un vacío de información en red de muestro asociado a esta zona, a excepción de la observación de niveles en el interior de la gruta.

En cada uno de los puntos inventariados se realizaron las siguientes tareas:

- Posicionamiento de los puntos. En la primera campaña se midieron las coordenadas y la cota, utilizando para ello un GPS de mano (multi navigator Silva). En los pozos, la medida de la cota se ha referido al brocal y en los manantiales y fuentes al punto de salida del agua. Estas medidas se tomaron como primera aproximación y posteriormente, en la segunda campaña, se ajustaron utilizando para ello un GPS de precisión (GPS Diferencial Leica System 1200), con errores finales de localización inferiores a 10 cm en la mayoría de los casos.

- Medida del nivel piezométrico. En los pozos se ha medido la profundidad a la que se encuentra el agua mediante una sonda de nivel eléctrica (01.01 Hy50.D). En fuentes y manantiales se ha tomado como referencia el nivel el punto de salida de agua al exterior.

- Toma de muestras de agua y medida de parámetros físico-químicos. Se han tomado 66 muestras de agua subterránea en las que se midieron cinco parámetros fisicoquímicos básicos del agua, concretamente: la conductividad eléctrica a 25°C, el potencial REDOX, el oxígeno disuelto, el pH y la temperatura. Estas determinaciones fueron realizadas in situ mediante una Sonda multiparamétrica (HI9829 Hanna Multiparameter). No obstante, el análisis de estos datos no se han incluido en esta comunicación.

- Completado de estadillos de campo. Todas las medidas realizadas y la información complementaria recogida en cada punto (tipología del punto, características constructivas de la captación, diámetros, caudales de extracción aproximados, observaciones aportadas por los propietarios, etc.) se anotaron en un estadillo de campo a partir del cual se realizó posteriormente una ficha de cada punto inventariado.

- Por último se ha realizado el procesamiento de la información recogida durante la campaña de campo, el tratamiento de datos, elaboración de mapas de isopiezas mediante la aplicación informática Surfer 10, así como otros estudios pertinentes y con todo ello se ha elaborado una primera hipótesis del funcionamiento hidrogeológico de la zona.

Punto	Coordenadas UTM		Cota(m)	1ª Campaña (06/03/2013 - 04/04/2013)		2ª Campaña (15/04/2013 - 18/04/2013)	
	X (m)	Y (m)		Profundidad nivel Piezométrico (m)	Cota nivel Piezométrico (m)	Profundidad. Nivel Piezométrico (m)	Cota Nivel Piezométrico (m)
1	713232	4196043	648.78	-2.83	645.95	-4.75	644.03
2	713318	4196013	642.48	-1.07	641.41	-1.73	640.75
3	713406	4196455	669.47	-0.82	668.65		
4	713763	4196309	642.99	-2.30	640.69	-2.42	640.57
5	713837	4196346	643.34	-2.09	641.25	-2.59	640.75
6	713830	4196430	647.85	-2.45	645.40	-2.94	644.91
7	713943	4196389	652.46	-5.15	647.31	-5.17	647.29
8	713907	4196481	644.77	0.00	644.77	0.00	644.77
9	714107	4196472	648.77	-0.12	648.65	-0.13	648.64
10	713887	4196532	649.08	-3.32	645.76	-3.44	645.64
11	713884	4196526	648.95	-3.07	645.88	-3.17	645.78
12	713908	4196546	646.38	-0.87	645.51		
13	713978	4196610	650.30	-3.70	646.60	-3.82	646.48
14	714012	4196626	651.60	-3.92	647.68	-3.99	647.61
15	714124	4196681	654.94	-3.63	651.31	-3.70	651.24
16	713743	4196558	657.15	0.00	657.15	0.00	657.15
17	713832	4196686	660.73	0.00	660.73	0.00	660.73
18	713885	4196815	666.31	0.00	666.31	0.00	666.31
19	714196	4196711	656.63	-3.00	653.63	-2.81	653.82
20	714249	4196748	657.34	-3.56	653.78	-3.68	653.66
21	714313	4196763	659.57	-2.80	656.77		
22	714319	4196715	667.49	Pozo seco	¿?		
23	714398	4196719	670.24	-8.30	661.94	-7.76	662.48
24	714390	4196813	661.58	0.00	661.58	0.00	661.58
25	714353	4196849	662.87	-2.29	660.58	-2.80	660.07
26	714288	4196886	667.86	-4.95	662.91		
27	714401	4197017	676.44	-5.53	670.91	-5.99	670.45
28	714380	4197127	684.20	-5.20	679.00		
29	714458	4197041	678.74	-5.53	673.21	-6.33	672.41
30	714496	4197029	678.50	-4.47	674.03	-4.98	673.52
31	714617	4197079	687.55	-1.47	686.08		

32	714672	4197066	694.87	-1.50	693.37		
33	714632	4196984	688.00	-1.37	686.63		
34	714450	4196782	665.52	-2.19	663.33	-2.17	663.35
35	714524	4196740	668.77	-2.69	666.08	-2.95	665.82
36	714597	4196772	675.68	-1.90	673.78	-1.81	673.87
37	714519	4196726	669.81	-3.18	666.63		
38	714507	4196679	679.13	-4.09	675.04	-4.70	674.43
39	714568	4196673	674.45	-3.39	671.06	-3.58	670.87
40	714568	4196652	673.98	-3.39	670.59	-3.67	670.31
41	714567	4196594	684.72	-4.49	680.23	-6.54	678.18
42	714617	4196494	670.61	-3.45	667.16	-6.57	664.04
43	714636	4196485	669.44	-6.06	663.38	-6.98	662.46
44	714663	4196566	676.45	-4.74	671.71	-5.13	671.32
45	714703	4196591	682.40	-2.81	679.59	-3.50	678.90
46	714830	4196511	674.16	-16.59	657.57	-12.04	662.12
47	714861	4196054	657.21	-3.54	653.67	-2.50	654.71
48	714647	4196125	639.14	0.00	639.14	0.00	639.14
49	714585	4196070	639.01	-2.44	636.57	-2.86	636.15
50	714638	4196004	639.34	-3.45	635.89	-2.90	636.44
51	714663	4195864	638.37	-3.73	634.64	-4.63	633.74
52	714372	4195949	626.89	0.00	626.89	0.00	626.89
53	714217	4196036	628.35	-2.60	625.75	-2.85	625.50
54	714197	4196098	632.39	0.00	632.39	0.00	632.39
55	714167	4196106	631.55	-2.75	628.80	-2.88	628.67
56	714073	4196145	633.18	-1.77	631.41	-4.19	628.99
57	714032	4196050	636.86	-2.14	634.72	-3.40	633.46
58	714012	4195896	632.94	-1.49	631.45	-2.10	630.84
59	713884	4196060	640.17	-1.40	638.77	-2.50	637.67
60	713860	4196182	639.79	-4.69	635.10	-4.89	634.90
61	713782	4196152	643.30	-2.91	640.39	-3.93	639.37
62	713776	4196123	643.29	-2.99	640.30		
63	715829	4195840	700.79	-6.10	694.69		
64	715720	4195828	698.88	-9.15	689.73		
65	715808	4195531	659.13	0.00	659.13	0.00	659.13
66	717977	4195545	596.35	0.00	596.35	0.00	596.35

Tabla 1. Medidas de nivel piezómetro en los puntos inventariados.

RESULTADOS

Se inventariaron un total de 66 puntos, la mayoría de ellos se sitúa alrededor del Cerro del Castillo en el casco urbano de Aracena o cerca de él, excepto 4 puntos que se localizan más alejados del núcleo urbano hacia la zona sureste de Aracena, en dirección Sevilla. En general se trata de captaciones no demasiado profundas, con una profundidad media de alrededor de 9 m, siendo la profundidad mínima medida de 3 m y la máxima de 22 m. Si distinguimos los puntos según su tipología, se han inventariado: 54 pozos tradicionales, 1 sondeo de captación, 10 manantiales (la mayoría de ellos modificados para ser usados como fuentes ornamentales de uso público) y un lago de la Gruta. En esta comunicación nos vamos a centrar en la zona de mayor interés situada en las inmediaciones del Cerro del Castillo, en el interior del cual se encuentra la Gruta de las Maravillas, por lo que en la representación espacial no aparecen los 4 puntos más alejados, reduciéndose el número de puntos de estudio a 62 (Figura 2).

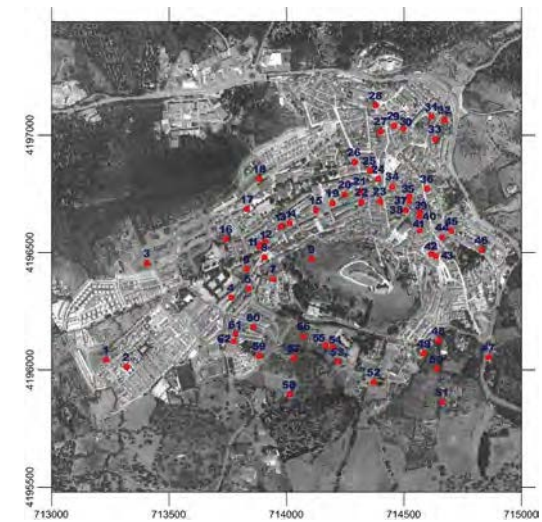


Figura 2. Plano de situación de los puntos inventariados.

En los puntos inventariados se llevó a cabo el control de los niveles piezométricos en dos periodos diferentes: la primera etapa de la campaña de campo, llevada a cabo entre el día 06/03/2013 y el 04/04/2013, en la que se midió el nivel piezométrico en la totalidad de los puntos inventariados (Tabla 1); y la segunda etapa de la campaña de campo, entre los días 15 y 18 de abril, en la que se volvió a medir en nivel en 53 de los puntos inventariados (Tabla 1). Se puede apreciar que, en general, el agua subterránea se encuentra a poca profundidad de la superficie del terreno. La profundidad a la que se encuentra el agua va desde los 0 m, lógicamente en los manantiales, hasta una profundidad máxima de 16,59 m en uno de los pozos medidos. Sin embargo, la profundidad media oscila en torno a 3,5-4 m.

Las Figuras 3 y 4 recogen sendos mapas de isopiezas realizados con los datos de las dos campañas de medición de niveles.

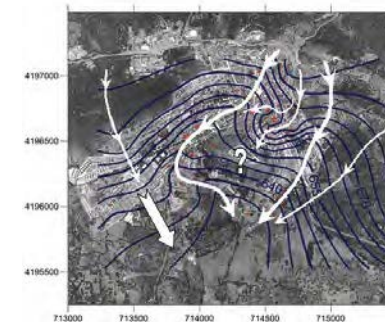


Figura 3. Mapa de isopiezas y flujos de aguas subterráneas (primera campaña de campo).

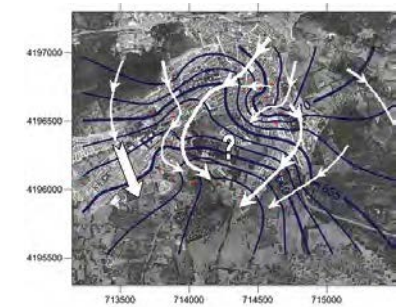


Figura 4. Mapa de isopiezas y flujos de aguas subterráneas (segunda campaña de campo).

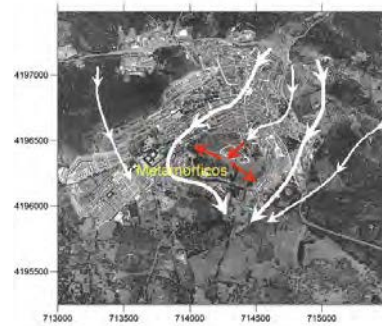


Figura 5. Modelo hipotético más verosímil de flujos de aguas subterráneas.

DISCUSIÓN

A partir de las medidas de nivel piezométrico realizadas en distintos puntos de observación se ha llevado a cabo la primera aproximación de la distribución de los flujos subterráneos en el entorno de la Gruta de las Maravillas y se ha puesto de manifiesto que parece existir una circulación general hacia el sur en la zona, donde se encuentran los manantiales y los arroyos que pueden constituir el nivel de base de drenaje de toda la zona estudiada.

Según la interpretación propuesta en las Figuras 3 y 4, los flujos principales circulan desde el norte al sur de Aracena y parecen converger al sur del Cerro del Castillo. En ambas Figuras los flujos principales son muy parecidos, pese a disponer de un número bastante más reducido de medidas en la segunda etapa de la campaña, lo que probablemente ha distorsionado ligeramente la interpretación. Sin embargo, en el Cerro del Castillo, la información piezométrica es escasa debido a la inexistencia de captaciones en este área, como ya se comentó en la metodología, por lo que las isolíneas que se dibujan son producto de la interpolación que realiza el programa informático utilizado y no se pueden interpretar como un reflejo fiel de la realidad sino como una mera aproximación a la misma, por este motivo se ha señalado con una interrogación en los mapas de las Figuras 3 y 4, ya que no se debe olvidar que se trata de una interpolación aproximada.

Si analizamos con mayor detenimiento el trazado de las líneas de flujo podemos apreciar que existen dos flujos que van de norte a sur rodeando el Cerro del Castillo. Este trazado se puede relacionar con el flujo del agua subterránea en el acuífero aluvial cuaternario que se desarrolla en torno al Cerro del Castillo. Los depósitos aluviales se encuentran en las zonas más deprimidas rellenando la traza de antiguos cauces hoy desaparecidos o alterados por el proceso de urbanización. Estos materiales permanecen ocultos bajo las edificaciones y calzadas del núcleo urbano, por lo que no se conoce con exactitud su disposición. Los flujos de agua subterránea parecen adaptarse bastante bien a la disposición de estos depósitos aluviales, que presumiblemente ocupan los sectores más deprimidos del relieve actual. Se trata de materiales de permeabilidad relativamente alta, por los que el agua circula con facilidad, lo que explicaría que las líneas de flujo parezcan desviarse hacia ellos, rodeando al Cerro del Castillo.

Las cotas de nivel indican la existencia de un alto piezométrico al noreste del casco urbano de Aracena, concretamente bajo la zona del Cabildo (Figuras 3 y 4). Esto indica que en esta zona se está produciendo recarga de las aguas subterráneas, y desde aquí fluyen hacia cotas piezométricas más bajas situadas más al sur. Considerando que la zona del Cabildo es un área urbanizada es improbable que se trate de una recarga natural, sino que más bien podría deberse a pérdidas de la red de abastecimiento y/o saneamiento. Esta posibilidad se ve apoyada por el hecho de encontrarse en el casco histórico donde las conducciones de la red son antiguas y podrían presentar fugas.

Desde la parte central de este alto piezométrico se dibuja una línea de flujo cuya dirección aparentemente indica que se produce una circulación de aguas hacia el suroeste, hacia los materiales del Cerro del Castillo y la Gruta de las Maravillas. Según la disposición de las cotas piezométricas se podría interpretar que esta corriente atraviesa los materiales y drena hacia el sur de los relieves de cerro. Esto sería posible si los flujos subterráneos pudieran atravesar sin dificultad estos materiales. Sin embargo, la existencia de materiales metamórficos poco permeables en la falda sur del Cerro del Castillo probablemente dificulte esta circulación, por lo que resulta poco probable que el flujo de agua subterránea atravesase de forma directa todo el volumen de materiales del cerro, sino que más bien sería lógico pensar que los materiales metamórficos obtaculizan la circulación. Una posible hipótesis que resultaría más coherente con las características geológicas del entorno sería que el flujo subterráneo circulara desde la zona del Cabildo a través de los materiales carbonatados del Cerro del Castillo con dirección suroeste hasta llegar al contacto con los materiales metamórficos, donde es probable que se desvíe hacia ambos lados adoptando direcciones noroeste (hacia el sector de la Fuente del Consejo) y sureste (hacia la Fuente de la Zulema), respectivamente. Estos flujos podrían llegar a unirse a los dos corrientes principales que rodean el cerro (Figura 5). Dicho de otro modo, el flujo subterráneo circularía a través del cerro pero no llegaría a drenar de forma directa hacia el sur, evitando así el drenaje hacia la Fuente de la Albuera. No tenemos datos suficientes en los que apoyar este modelo, salvo la gran diferencia en el quimismo que existe entre las aguas de la gruta y las de la Fuente de la Albuera (López Chicano *et al.*, 2010).

Por otra parte, si consideramos que la zona de recarga señalada en las Figuras 3 y 4 se debe a pérdidas en la red de saneamiento, la hipótesis que propone la existencia de un flujo desde la zona del Cabildo hacia la zona oeste del Cerro del Castillo podría explicar el hecho de que se hayan encontrado niveles significativos de nitratos en la Gruta. Estudios anteriores realizados por la Universidad de Granada (López Chicano *et al.*, 2010) han puesto de manifiesto que en las aguas de la Gruta existen concentraciones de nitratos mayores de las que cabría esperar si se tratara únicamente de aguas de infiltración. Según esta hipótesis los altos niveles detectados serían aportados por el flujo subterráneo que circula desde el Cabildo a través de los materiales acuíferos del Cerro del Castillo.

En la parte oeste de las Figuras 3 y 4 se observan líneas de flujo que parecen indicar que existe una descarga desde los relieves del Cerro de la Cruz, situado al noroeste de Aracena, hacia la zona sur. Esto indicaría que los manantiales de esta zona podrían recibir aportes de aguas subterráneas procedentes tanto del Cerro del Castillo como de los materiales acuíferos del Cerro de la Cruz. Así pues, se cree que la Fuente del Concejo se alimenta del drenaje de ambos relieves, como ya se apuntaba en algunos estudios antiguos de esta zona (González Tello, 1949). De hecho, parece existir una conexión más que probable entre las aguas circulantes desde los afloramientos carbonáticos del Cerro del Castillo hacia los materiales aluviales que se sitúan al oeste del mismo. En el trabajo de Pulido Bosch *et al.* (1997) ya se puso de manifiesto la influencia de las extracciones en un pozo situado en esa área sobre los niveles de los lagos de la Gruta de las Maravillas, lo que vendría a apoyar la hipótesis expuesta en el presente trabajo. Además, recientemente se ha podido comprobar mediante pruebas de trazador realizadas por el personal que trabaja en la gruta, que las aguas de sus lagos drenan en parte hacia el entorno de la Fuente del Concejo, no directamente hacia el caño visible del lavadero, sino hacia una canalización cercana de las aguas de la gruta que se dirige al arroyo del Concejo, al oestesuroeste del Cerro del Castillo.

Por último, si nos fijamos en la parte oriental de las Figuras 3 y 4 podemos apreciar que se dibujan líneas de flujo que podrían indicar la existencia de una descarga de aguas subterráneas con dirección noreste-suroeste, desde los relieves del cerro de La Barquera, situado al este de Aracena, hacia la zona sur del núcleo urbano. Esto apunta a que el manantial de la Fuente de la Zulema puede estar recibiendo alimentación tanto del Cerro del Castillo como de los relieves situados al este de Aracena. En estudios anteriores el caudal de esta fuente se atribuía únicamente al drenaje de la Gruta de las Maravillas (Martos *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

Se ha podido comprobar que en el núcleo urbano de Aracena y alrededores existe un elevado número de captaciones, la mayoría de ellas privadas. En general, se trata de captaciones de escasa profundidad, variando

ésta desde un mínimo 3 m hasta un máximo de 22 m, las profundidades medias están alrededor de 9 m. La inspección del terreno llevada a cabo durante la campaña de campo ha puesto de manifiesto la inexistencia de captaciones en la zona no urbanizada del Cerro del Castillo, así como en las primeras viviendas que lo rodean; la mayoría de ellas no disponen de pozos sino de cisternas que recogen las aguas de lluvia. Esto ha dado lugar a que en el cerro y la parte alta del pueblo no se disponga de puntos de muestreo, salvo la observación del nivel dentro de la gruta, en la Galería de los Lagos.

A partir de los datos piezométricos medidos se han representado mapas de isopiezas de cuya interpretación se deducen los siguientes supuestos:

- Se podría decir que existe un flujo general desde el norte de la localidad de Aracena hacia el sur, que parece converger al sur del Cerro del Castillo.
- Según la piezometría obtenida, parece existir un flujo subterráneo desde la zona del Cabildo hacia el interior del Cerro del Castillo y, teniendo en cuenta el contexto geológico conocido, es probable que este flujo se desvíe hacia el noroeste y el sureste del mismo, al encontrarse con materiales metamórficos de escasa permeabilidad.
- La disposición de las cotas piezométricas indica que existe una zona de recarga preferencial en los alrededores del Cabildo. Es muy probable que esta recarga se deba en parte a la existencia de fugas en la red de saneamiento. Se tienen indicios de la existencia de un flujo desde la zona del Cabildo hacia el oeste del Cerro del Castillo donde se emplaza la Gruta, por lo que las posibles fugas de la red de saneamiento explicarían el hecho de que se hayan encontrado niveles significativos de nitratos en las aguas freáticas de la gruta, mayores de los que cabría esperar si se tratara únicamente de aguas de infiltración de lluvia.
- Se podría considerar la existencia de flujos que indican una descarga desde los relieves del Cerro de la Cruz hacia el suroeste del casco urbano de Aracena, por lo que resulta probable que la Fuente del Concejo se alimente del drenaje tanto de la zona oeste del Cerro del Castillo como del mencionado Cerro de la Cruz.
- De igual forma los relieves situados al este de Aracena, conocidos como Cerro de la Barquera, podrían drenar hacia la zona sur del núcleo urbano. Esto apunta a que la Fuente de la Zulema puede estar recibiendo alimentación tanto del Cerro del Castillo como de dichos relieves.

REFERENCIAS

- Del Val, J. y Hernández, M. 1989. El Karst en el macizo Hespérico. En: Durán-Valsero y López Martínez, (eds.) El Karst en España. *Sociedad Española de Geomorfología*, Monografía nº 4, 231-229.
- Fernández Rodríguez, C. y Díaz Azpiroz, M. 2008. Geología de la Zona de Ossa-Morena (Sierra de Huelva). En: Olías Álvarez, M. et al. (Coords.), *Geología de Huelva. Lugares de interés geológico*. Universidad de Huelva, Huelva, 8-13.
- Gonzalez Tello, V. 1949. Apuntes sobre Aracena y su sierra. *Ayuntamiento de Aracena*. 387 pp.
- IGME, 2006. Proyecto para la aplicación de las aguas subterráneas al abastecimiento mancomunado de los pueblos de la Sierra de Aracena (Huelva). *Instituto Tecnológico Geominero de España*; Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía; Consejería de Medioambiente.
- López Chicano, M., Martín Rosales, W. y Vadillo Pérez, I. 2010. Caracterización hidrogeoquímica de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: Durán, J.J. y Carrasco, F. (eds.) *Cuevas, Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 143-158.
- Martos, S., Fornes, J. M., Jiménez, J., Rubio, J. C., Hueso, L. M. 2011. Informe de caracterización hidrogeológica y propuesta de protección de manantiales y lugares de interés hidrogeológico (Huelva). Fuente Zulema (Drenaje cueva de las Maravillas). *Instituto Geológico y Minero*.

Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez, C. M. y Pulido-Bosch, A. 1995. Morfología, Espeleotemas y Climatología de la "Gruta de las Maravillas" (Aracena, Huelva). *Espeleotemas*, 5, 51-62.

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*, 31, 142-149.

Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España)

Andrés Ros, José-Luís Llamusí y Juan Sánchez

Centro de Estudios de la Naturaleza y el Mar CENM-naturaleza, c/Alcántara 5, 30394 Cartagena (cenm@cuevasdemurcia.com)

RESUMEN

Una gran parte de las cuevas en la región de Murcia destacan por presentar signos evidentes de origen hipogénico, signos que desde hacía años llamaban nuestra atención y que recientes estudios y descubrimientos, como los realizados en Sima de la Higuera (Pliego), Cueva del Agua-TLY (Lorca) han puesto de manifiesto que corresponden a mecanismos de espeleogénesis hipogénica, siendo la Sima de la Higuera el principal referente para este tipo de cavidades en la región de Murcia. A través de una muestra de cavidades murcianas con evidentes signos de espeleogénesis hipogénica y detallando características de los mismos, hemos elaborado una tabla de elementos estructurales, morfológicos y de espeleotemas hipogénicos asociados a las cuevas murcianas. Pretendemos hacer una primera aproximación a las formas identificativas de las redes hipogénicas elaborando la tabla que aquí presentamos, que puede ser modelo para aplicar a otras cavidades, no se trata de una tabla de formas identificativas hipogénicas definitiva si no un comienzo que puede ser ampliable y modificable. Es importante destacar que cada día son más numerosos los ejemplos que se van identificando incluso asociados a otros tipos de karst como ocurre en Baleares, (Merino, *et al*, 2011) y que puede ser aplicable a buena parte de las cavidades mediterráneas. Destacamos que una buena parte de las cavidades de la región de Murcia son de origen hipogénico, prácticamente todas las que presentan desarrollos de redes subterráneas tiene elementos claros y definitorios de estas, encontrándonos ante una de las zonas con mayor número y variedad de este tipo del Mediterráneo, creemos que las formas morfológicas que se encuentran en las cavidades de esta región son lo suficientemente amplias y diversas como para establecer referencias claras y precisas para el conocimiento de las cavidades hipogénicas en general.

Palabras clave: Espeleogénesis hipogénica, hidrotermal, cuevas hipogénicas, espeleotemas hipogénicos.

Hypogenic caves in the Murcia Region (Spain)

ABSTRACT

Many of the caves in the region of Murcia highlighted by presenting clear signs of hypogene origin, such signs called our attention for years since recent studies and discoveries, such as those in Sima de la Higuera (Pliego), Cueva del Agua -TLY (Lorca) have shown that these caves correspond to hypogene speleogenesis mechanisms. Sima de la Higuera could be the main reference for this type of cavities in the region of Murcia. Using some examples of Murcia's caves with obvious signs of hypogene speleogenesis we have detailing their characteristics and compiled a table of hypogenic structural, morphological elements and associated speleothems caves Murcia. We intend to make an initial approach to identifying the hypogene networks that can be a model to apply to other cavities. It is a very provisional table identifying ways hypogenic which can be expandable and modifiable. It is important to highlight that each day more and more examples are identified even associated with other types of karst as in Baleares (Merino, et al, 2011), and may be applicable to many of the Mediterranean cavities. We note that much of the caves in the region of Murcia are of hypogene origin, virtually all developments that have underground networks has clear and defining elements of these, meeting at one of the areas with the greatest number and variety of this type of Mediterranean caves. We believe that the morphological forms found in the cavities of this region are sufficiently broad and diverse to establish clear and precise to the knowledge of the cavities hypogenic references in general.

Keywords: hypogenic speleogenesis, hydrothermal, hypogenic caves, hypogenic speleothems.

EL MODELADO TRADICIONAL: LAS CUEVAS EPIGÉNICAS

La espeleogénesis tradicional se desarrolla a partir de la infiltración de las aguas superficiales que alcanzan el interior del macizo kárstico y, por acción de la gravedad, originan flujos a partir de las formas superficiales, como el lapiaz, dolinas, sumideros, etc. Las cuevas y las redes de conductos subterráneos presentan a menudo, en sus paredes y techos marcas características originadas por los flujos de aguas agresivas que los recorren y amplían. Estas marcas características de la acción del flujo subterráneo (unas veces vadoso y otras freático) pueden ser entre otras las siguientes:

- Marcas en paredes, techos, suelo:
 - Scallops
 - Flutes
 - Acanaladuras
 - Entalladuras de corrosión.
- Otras marcas de disolución coexistentes con depósitos sedimentarios:
 - Pendants
 - Canales de bóveda
- Conductos en carga con aire atrapado contra la bóveda:
 - Cúpulas de disolución

Este modelo de cavidades de origen epigénico es ampliamente conocido, pero desde hace años han sido localizadas en la Región de Murcia cavidades aparentemente freáticas pero que no responden al modelo descrito, si no que se encuentran en zonas donde hay una diferencia notable entre las formas externas y el tipo de cavidad que cabría esperar en un karst epigénico.

CUEVAS HIPOGÉNICAS

La localización de importantes redes subterráneas en paisajes que no se ajustan al modelo del “karst tradicional”, y no presentan formas kársticas e incluso hacen dudar de la existencia de cavidades, motivó que los investigadores se plantearan otras formas de karstificación que evolucionan de forma distinta. Igualmente la existencia de redes subterráneas de cierta importancia pero ligadas a acuíferos poco accesibles (como son los acuíferos confinados) ha llevado a admitir un nuevo modelo de espeleogénesis distinta a la de los acuíferos kársticos convencionales. Así algunos autores plantean que estos modelos tienen una génesis distinta, que evolucionan por acciones de aguas profundas o masas confinadas de movimiento muy lento, ligadas en muchos casos a procesos hidrotermales. Los trabajos de algunos investigadores empiezan a poner orden y a plantear formas de desarrollo que indican con claridad la existencia de un karst de origen hipogénico, principalmente (Klimchouk, 2007), y otros como (Audra, 2003), más cercanos (Merino, et al 2006 y 2010), (Garay, 2013), y los trabajos de (Gázquez y Calaforra, 2013), aclaran y desarrollan modelos de trabajo de un karst de tipo “hipogénico” originado por las aguas confinadas, aguas profundas y las aguas termales, con contenidos importantes en CO₂ u otros agentes corrosivos, aguas muy agresivas que desarrollan formas muy características y que permiten identificar este tipo de procesos hipogénicos, ligados a sistemas de cavidades importantes en todo el mundo, cueva de Lechuguilla (USA), Optymistychna Cave (Ucrania) cuevas hipogénicas de la Provençe (Francia), Cova des Pas de Vallgornera (Baleares) y otras en el Levante español (Garay, 2013), y cada día se amplían en mayor número.

Pero es en la región de Murcia donde planteamos que una buena parte de las cavidades conocidas y entre ellas las de mayor desarrollo presentan morfologías que se son propias de las redes hipogénicas. Durante años se nos han planteado serias dudas ¿cómo se dan estas redes de cierta entidad si aparentemente no están conectadas con un desarrollo notable del exokarst?. Y además, estas redes de galerías no tienen acceso más que por pequeñas entradas con angostas galerías y pozos! Suponíamos que, al menos en el caso de la Cueva del Puerto,

debía tratarse de acuíferos antiguos y abandonados por las aguas. Sin embargo no es hasta el descubrimiento y exploración de la Sima Destapada en Cartagena, (Ros y Llamusi, 1998), donde se llegó al nivel freático después de descender a 220m. de profundidad encontrado una zona de aguas termales 32º, la proximidad de baños termales y otra cavidad inundada termal cueva del Agua (Ros et al, 2011), cuando nos encontramos con aguas a 32º de temperatura, lo cual, unido a la proximidad de los baños termales de la Marrana y la presencia de otra cueva termal próxima, la Cueva del Agua, nos dio la clave de que nos hallábamos ante una espeleogénesis de posible origen hidrotermal, siendo claramente la Cueva del Agua un conducto ascendente del mismo. Con esta idea, la espeleogénesis hidrotermal comenzaba a tomar sentido para entender el origen de otras cavidades, como la Cueva del Puerto (Calasparra), la Cueva del Pozo (Jumilla) y la Sima del Pulpo (Cieza).

Pero lo que dio un paso gigantesco fueron las exploraciones en Sima de la Higuera de Pliego, y su variedad de espeleotemas hipogénicos (Gázquez y Calaforra, 2013).

La pretensión del presente artículo es, precisamente, poner de relieve la notable muestra de cavidades hipogénicas que presenta la región de Murcia. Y para ello hemos sintetizado nuestras observaciones en un atabla final que recoge ciertos rasgos o indicadores de las cavidades hipogénicas.

CARACTERÍSTICAS DE LAS CAVIDADES HIPOGÉNICAS

La tabla que se presenta al final de este trabajo, recoge tres conjuntos de características que son propias de las cuevas hipogénicas y que vamos a describir en los apartados siguientes. Concretamente se trata de la tipología de las cavidades hipogénicas, de las formas de evolución y configuración que se observan en sus paredes. Suelos y techos, y de los espeleotemas asociados a medios hipogénicos.

TIPOS CAVIDADES, ESPELOMETRÍA Y DESARROLLO

(A) *Redes laberínticas (maze caves), reticuladas (network maze caves), irregulares (spongework maze caves) (Figura 1).*

Redes de desarrollo bidimensional o tridimensional, ramificado. Crecimiento hacia arriba (sobrecarga hidráulica y elevada presión confinante). Sima Destapada. Ascenso de gases (se desplazan siguiendo vías ascendentes existentes o de nueva formación). Flujos muy corrosivos.

(B) *Redes de morfología planar o varios planos superpuestos* (geometría paralela a los contactos confinantes hidrogeológicos).

Influencia de gases o fluidos agresivos, genera desarrollo arborescente e irregular. Cueva del Puerto.

(C) *Grandes salas.*

Están o han estado inundadas de aguas muy corrosivas con altas temperaturas (termalismo), se produce una karstificación intensa y concentrada, capaz de consumir un gran volumen continuo de roca en un marco geotérmico evidente (Garay, 2013):ejemplos dados en; Sala Cartagena (sima Destapada), Sala Paraíso, Cuatro Caminos y Sala Pedro (Sima Higuera), Salas en Cueva del Puerto (Clastos, sala de los Bloques), y algunas todavía con dudas como la Sala del lago Cueva Orón-Arco en Cabo Tiñoso o la Cueva de la Moneda en Totana.

(D) *Salas con ramificaciones ascendentes, cuevas de tipo Satorkopuzsta:*

Se trata de una sala basal (límite de la exploración) que puede ser asimilada a una cámara “magmática” a partir de la cual se desarrolla una red ascendente y arborescente de cúpulas; Algunos ejemplos todavía por confirmar podrían ser la Sima Destapada (Fondo – sala Cartagena) (Figura 2) y la Sima de la Higuera (Sala Pedro).

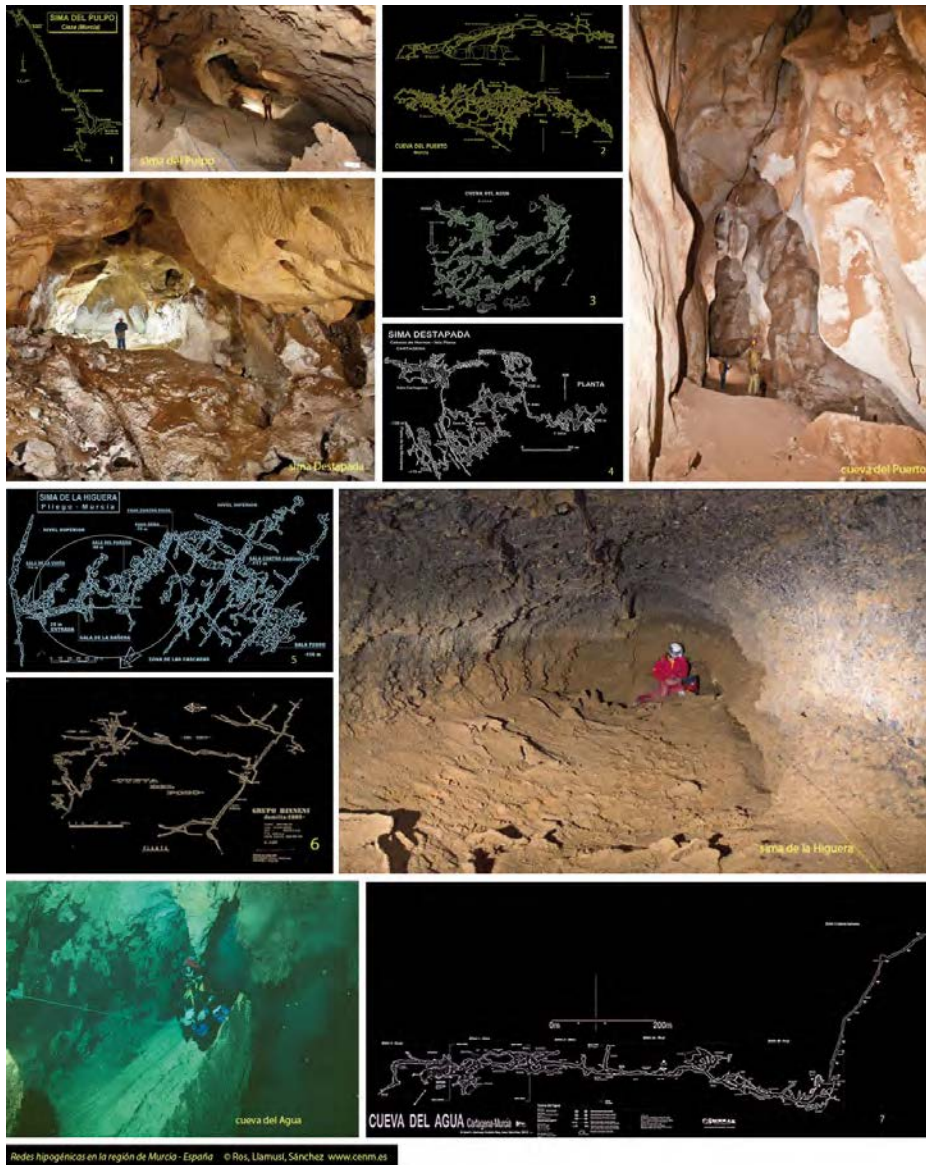
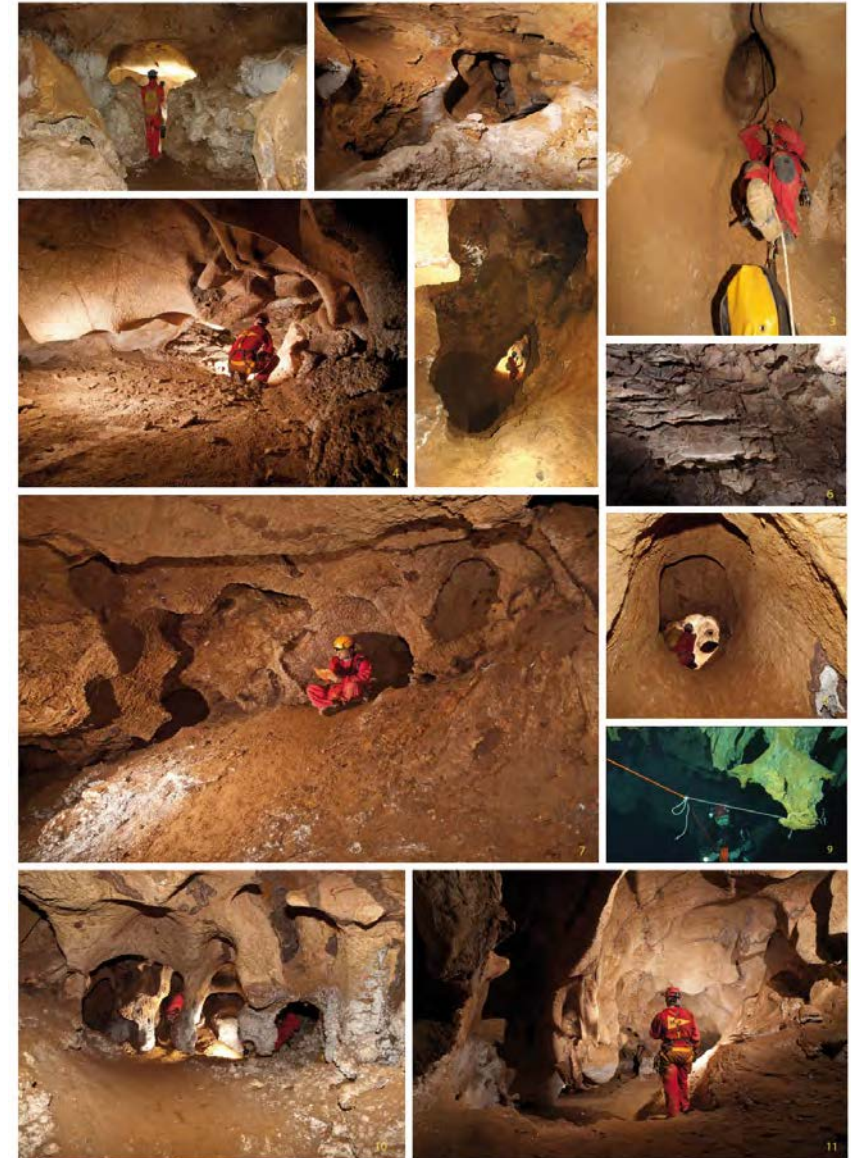


Figura 1. REDES; 1 Sima del Pulpo, (morfología planar, dren fósil (?)). 2 Cueva del Puerto, 4 sima Destapada, 5 Sima de la Higuera, (morfología laberíntica, reticular, irregular grande salas, ramificaciones ascendentes). 3 Cueva del Agua-Lorca, (red laberíntica, reticulada, irregular morfología planar, dren ascendente). 6 Cueva del Pozo (morfología planar, dren surgente?? Fósil). 7 cueva del Agua-Cartagena (red irregular, morfología planar dren surgente (activo)).

(E) Drenes ascendentes y de carácter surgente; pueden estar o han estado inundados por ser un punto de descarga del acuífero, con signos evidentes de una morfología corrosiva, existe un gran conducto ascendente o longitudinal (desde un acuífero confinado y aguas agresivas) amplio y bien definido.

En Cueva del Agua-Cartagena encontramos un significativo ejemplo de *dren* activo hasta épocas muy recientes. Hasta mediados de los años 70 el agua termal salía al exterior a través de las arenas de las playas próximas a la cavidad, actualmente la intensa actividad agrícola con la sobre explotación de los acuíferos está provocando una inversión del *dren* donde el agua del mar se está inundando el acuífero progresivamente salinizando sus aguas.



Sima Destapada, foto 9 Cueva del Agua, foto 6 Sima de la Higuera © Ros, Llamusi, Sánchez www.cerom.es

Figura 2. FORMAS MORFOLÓGICAS, Sima Destapada; 1 rising wall channels above feeders canal aumentado en el techo 2 feeders, formando grietas y scallops en paredes, 3 feeders puntual, 4 wall pockets y scallops, 5 Successful Outlets de gran tamaño conecta la zona profunda con la zona intermedia 6 boxwork (sima Higuera), 7 diversos Outlets de tipos comunicantes Successful Outlets y de galerías ciegas Dead Ends, 8 Outlets comunica varias redes de galerías, 9 Partitions activo con aristas cortantes bajo el agua cueva del Agua, 10-11 Partitions y cúpulas en techo ceiling pockets.

MORFOLOGÍA INTERIOR

- **Feeders**, canales verticales de alimentación, los *feeders* han sido descritos como conductos verticales o subverticales a través de los cuales los fluidos más ligeros y agresivos circulan en sentido ascendente de un nivel basal o inferior a otro situado directamente sobre él. (Klimchouk, 2007). *Feeders puntuales*, *Feeders con aspecto de grieta o fractura*, *Feeders laterales*.
- **Canales de pared ascendentes (rising wall chanel)** Morfologías de techo y pared.
- **Canales de techo (ceiling chanel)**.
- **Cúpulas coalescentes, composed pockets** (Garay, 2013), **subdued pockets, wall pockets, ceiling pockets** (concavidades poco marcadas) (Merino, 2010).
- **Outlets** estructuras de fuga ascendente o puntos de descarga. Están formados por cúpulas y conductos verticales que partiendo desde el techo de una galería de un nivel determinado, conecta con el siguiente situado sobre ella (Klimchouk, 2007).
- **Underdeveloped outles**, Morfologías cerradas sin una continuidad hacia niveles superiores.
- **Successful outles** estructuras que comunican dos niveles de la cavidad.
- **Dead Ends** (galerías ciegas) asociado a las cavidades de origen hipogénico son las galerías ciegas, que acaban en "culo de saco" (Merino, 2010). Nota estas galerías acaban cegándose o no han tenido continuidad pero están abiertas a la recarga mediante *feeders* en la parte más baja y a la descarga mediante los *outlet* del techo (Merino 2010), son topologías que se repiten en cuevas murcianas, sima Destapada, cueva del Puerto, cueva del Pozo.
- **Partitions, (tabique de roca)**, pueden separar galerías adyacentes, mostrando una estructura planar (Merino, 2010), aunque pueden quedar aislados y ser difícil identificar estas galerías al haber desaparecido o integrado en una sola sala o galería por efecto de los procesos erosivos.
- **Bubble trails** canales de disolución desarrollados sobre las paredes, que presentan una determinada inclinación y que han sido provocados por la liberación gaseosa de CO₂ en condiciones evidentemente freática (Chiesa y Forti, 1987).
- **Collapses** colapsos, por procesos clástico remontante.
- **Cúpulas ramificadas** (pseudogalerías/pseudopozos).
- **Boxwork**, corrosión de la roca quedando formas tipo nido de abeja de la roca más dura.
- **Anomalía geotérmica**, variaciones significativas de la temperatura del aire con la media del exterior y de las aguas.
- **Scallops** formas de corrosión/disolución freática de secciones elípticas (Gázquez y Calaforra, 2012) o cóncavas en ocasiones formando costras en paredes y techos, sima Destapada, cueva del Puerto, sima de la Higuera, cueva del Pozo (Figura 3).

ESPELEOTEMAS CLASIFICACIÓN

La pérdida de CO₂ en un fluido ascendente daría lugar a un agua sobresaturada en CaCO₃ lo que provocaría la precipitación de una serie de depósitos y espeleotemas (Audra et al. 2002), estos procesos generan una serie de formas "espeleotemas" de variada diversidad según las condiciones geológicas, físicas, químicas e incluso de temperaturas conFigurando espeleotemas singulares y poco conocidos.

En este punto queremos reseñar el ejemplo de Sima de la Higuera de Murcia, en una zona de la cavidad se han sucedido procesos hidrogeológicos y termales importantes conFigurando una serie de espeleotemas singulares, numerosos y muy variados, destacan los trabajos que sobre estos procesos están llevando a cabo los investigadores (Gázquez y Calaforra, 2012-2013), también es importante destacar las condiciones hidrogeológicas y termales que durante muchos años se dieron en este lugar coincidiendo el trinomio roca-agua-aire (Gázquez) y

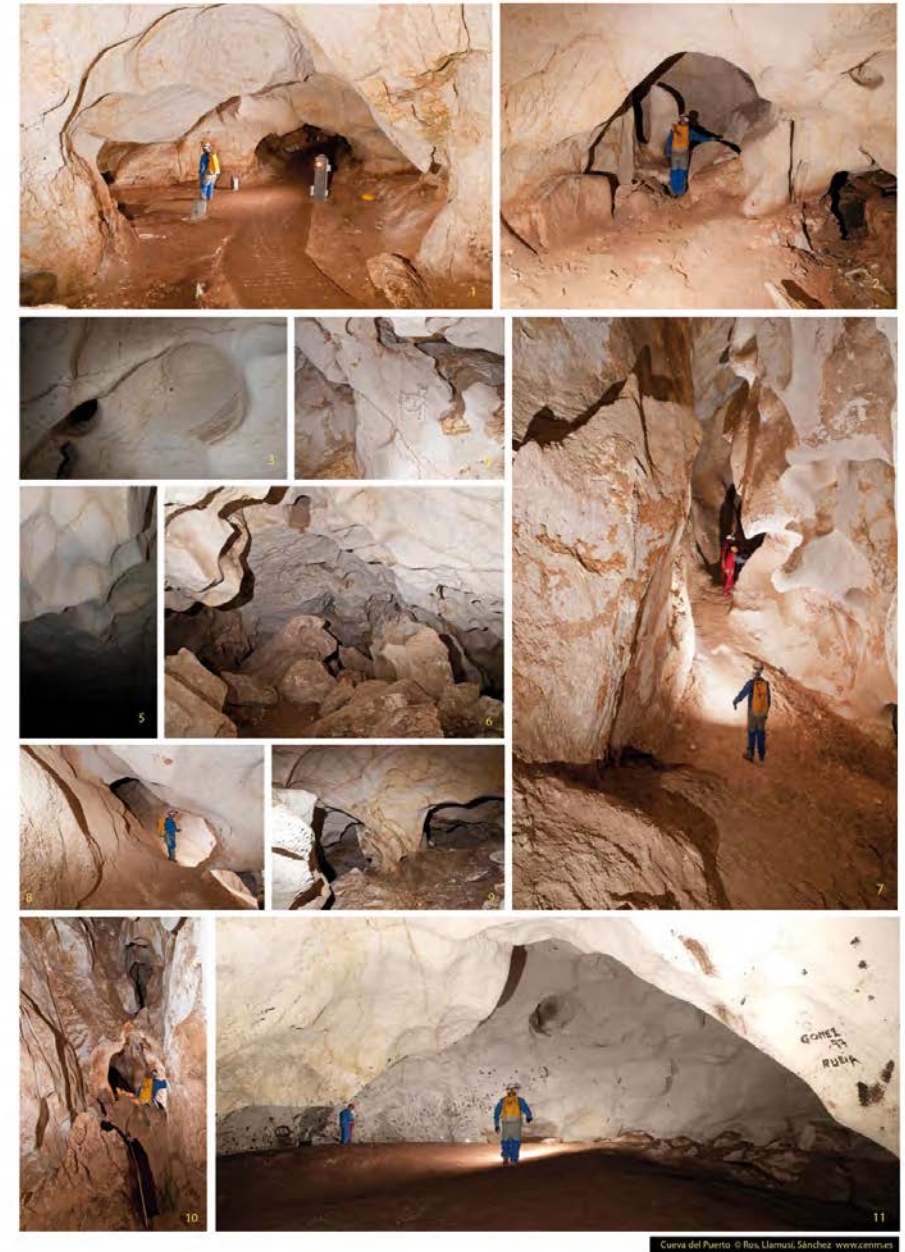


Figura 3. FORMAS MORFOLOGICAS, Cueva del Puerto, 1 wall pockets cúpulas marcadas en techo, 2 Successful Outlets de gran tamaño, próximo a crear una partitions, 3 Dead Ends galerías ciegas, 4 feeders, canales de comunicación 5-6 wall pockets y ceiling pockets conjunto de cúpulas en pared y techo formando un canal colapso evolucionado collapse, 7 feeders de gran tamaño base de la cueva del Puerto (Gran Diaclasa) con abundante "calcita" en los suelos, 8-9 Partitions diversas formas de partición de galerías, 10 Feeders formando grietas, 11 wall pockets cúpulas marcadas en techo y galería ciega en techo Dead Ends.

que de momento no se han vuelto a localizar en cavidades similares, quizás porque los acuíferos evolucionaron de forma distinta a lo sucedido en sima de la Higuera, es una cuestión que el tiempo y las investigaciones irán aclarando.

ESPELEOTEMAS HIPOGÉNICOS

Hemos referido localizaciones de los espeleotemas que se enumeran a continuación de cavidades murcianas exclusivamente sin entrar en otras localidades fuera de esta región, pues es evidente la gran variedad de estas que se localizan en esta, marcándolas como ejemplos y referentes. Las limitaciones de este trabajo no nos permiten documentar gráficamente todas estas que quedan emplazadas para un trabajo exclusivo y amplio que se está realizando y que en breve será publicado. Hay que mencionar los trabajos sobre espeleotemas en sima de la Higuera que han realizado los investigadores (Gázquez y Calaforra, 2012) y que nos han ayudado a identificar más claramente estas formas, con la consideración de que no siempre son exclusivos de cavidades hipogénicas pero si es muy frecuente encontrarlos en ellas (Figura 4).

- **Folias.** Se han localizado folias en paredes verticales, Sima Higuera, Sima del Pulpo, y en otras fuera de esta selección.
- **Pináculos coraloides subacuáticos, Tower coral, "conos coraloides",** en sima de la Higuera y sima Destapada hay claros ejemplos de ellos.
- **Coralloids, "corales"** se han localizado en Sima de la Higuera presenta unos corales muy singulares y numerosos en puntos concretos de la sima, en Cueva del Agua-TLY de Lorca se localizan una especie de ramificaciones similares a los corales pero en donde se aprecian diferencias que ponen en duda estos.
- **Porcon, "palomitas".** Se pueden localizar ejemplares en sima Higuera y sima Destapada en esta última no están aún del todo claros? .
- **Raft cones, "Conos",** localizados en sala Paraíso de sima de la Higuera en importante número y tamaño, se han encontrado en menor número y tamaño en cueva del Agua-TLY de Lorca.
- **Double tower cones,** conos dobles, es una singularidad de estos en sima de la Higuera, (Gázquez y Calaforra, 2013) realizan un impórtate trabajo sobre estos.
- **Micro conos, micro conos,** se localizan en varios lugares de sima de la Higuera (Gázquez y Calaforra, 2012) realizan una aproximación a su génesis.
- **Cave raft, Calcita flotante,** sin lugar a dudas mucho tiene que ver este elemento para la formación de gran número de espeleotemas hipogénicos. Se localizan en sima de la Higuera con zonas de mucha concentración, sima del Pulpo en la sala denominada *el desierto*, cueva del Agua-TLY (Lorca) y otras cueva del Puerto, sima Destapada, etc.) donde se están revisando los depósitos de sedimentos que se encuentra en amplias zonas de estas cavidades . Un ejemplo de la acción de las aguas agresivas y que no podemos afirmar (actualmente en estudio) que sean estrictamente *calcita* se da en cueva del Agua de Cartagena, en esta se encuentra la roca alterada por los efectos de las aguas donde encontramos unos procesos muy agresivos que han generado grandes depósitos de sedimentos e incluso formas muy inestables en paredes y techos similares a *cipreses invertidos*.
- **Moonmilk** se han constatado en sima de la Higuera, sima Destapada, Sima del Pulpo, cueva del Agua TLY-Lorca.
- **Cypress inverted, cipreses invertidos,** es una propuesta de denominación que aplicamos a las formas que se encuentran únicamente en Cueva del Agua Cartagena y que actualmente no tenemos referencias de estudios y ejemplos similares en otros lugares, son formas muy inestables adheridas a paredes y techos en zonas completamente inundadas que se asemejan a pequeños pináculos mas a cipreses colgando de color marrón oscuro y que suelen desprenderse muy fácilmente al menor movimiento de la masa de agua creando nubes que dificultan peligrosamente las inmersiones, estas formas son numerosas por toda la cavidad y se encuentra en estudio y análisis que esperamos nos aporten datos sobre su origen y evolución. Localización única cueva del Agua, Cartagena.

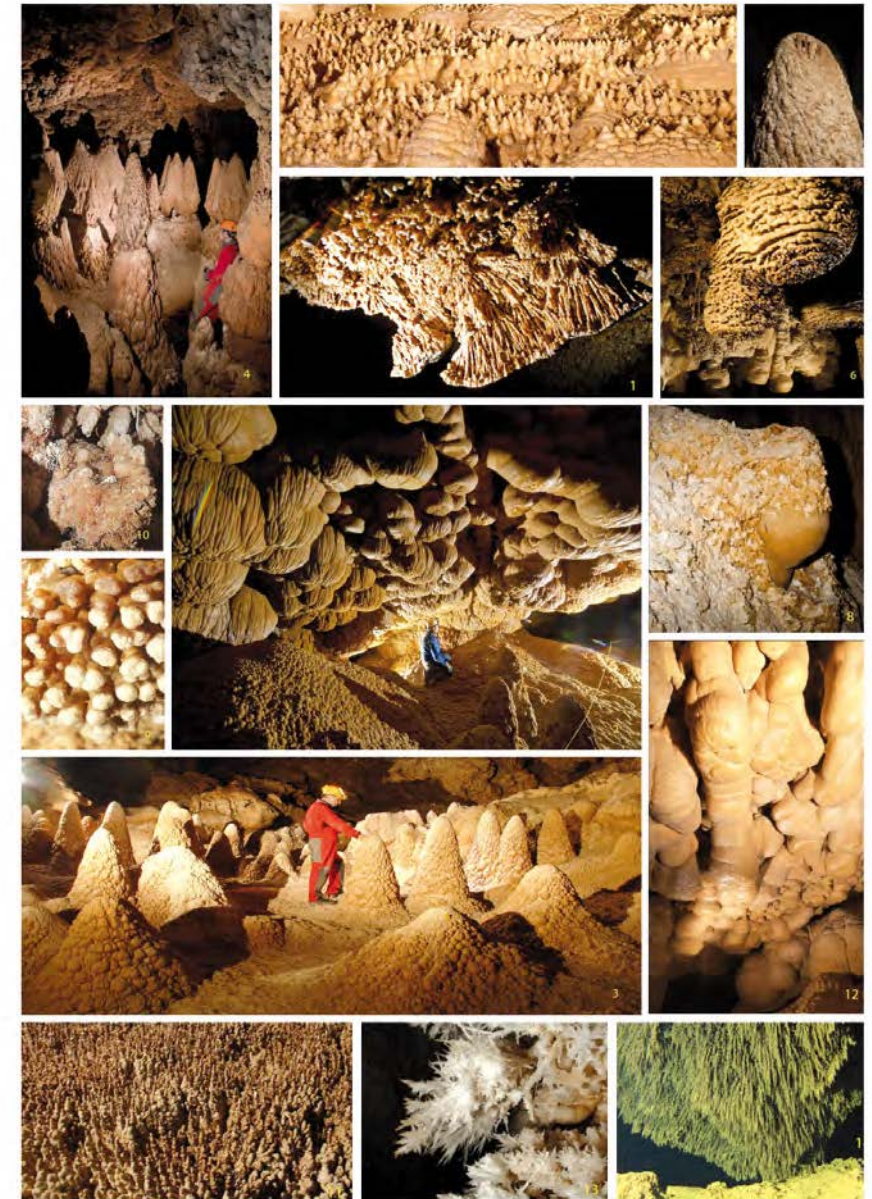


Figura 4. ESPELEOTEMAS HIPOGENICOS; 1 coralloids (corales), 2 clouds (nubes), 3 cones (conos), 4 conos dobles, 5 micro conos, 6 folias, 7 conulites (vasos de chapoteo), 8 cave raft (calcita flotante), 9 porcon (palomitas), 10 spar (cristales), 11 tower coral (pináculos coraloides), 12 líneas de Boxwork recubiertas de calcita (pies de elefante), 13 Aragonito (sima Destapada), 14 cipreses invertidos (cueva del Agua), las imágenes del 1 al 12 son de sima de la Higuera.

- **Clouds, Nubes,** Si son muy evidentes numerosos y de gran tamaño en sima de la Higuera, igualmente se han localizado en sima de la Plata y otras cavidades de la región que no se mencionan.
- **Pool fingers** raras estalactitas que se forman bajo el agua, no tenemos claros ejemplos, se está en estudio varias formas en Sima de la Higuera y Cueva del Agua-TLY (Lorca) que pudieran ser *pool fingers*.

- **Conulites** “vasos de chapoteo”. Son fácilmente visibles en muchos de los conos de Sima Higuera.
- **Micritized rind**, *Calcita micritizada*, se han localizado en Sima de la Higuera y en Cueva del Agua-TLY (Lorca).
- **Spar**, cristales generalmente de calcita “dientes de perro” *dogtooth*. Se han localizado en sima Higuera, sima Destapada, cueva del Agua TLY (Lorca).
- **Aragonito**, *agujas de aragonito*, muy abundantes en Sima Destapada.

		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
Cavidades tipo									
espeleometría-desarrollo	Recorrido desarrollo metros	5500	3400	4389	2560	4780	1254	373	546
Maze caves	Redes laberínticas	X	X	X				X	X
Network maze caves	Redes reticuladas	X	X	X					X
Spongework maza caves	Redes irregulares	X	X	X	X			X	X
	Redes morfología planar	X	X	X	X	X	X	X	X
	Grandes Salas	X	X	X				X	
	Salas con ramificaciones ascendentes	X	X	X				X	
	Drenes ascendentes y surgentes		X		X	X?	X?		X
Anomalia geotérmica	temperatura aire (T. agua en C. Agua)	21º	29º	20º	30º				
Morfología interior									
Feeders	canales verticales de alimentación	X	X	X	X	X	X	X	X
Rising wall chanel	canales de pared ascendentes	X	X	X	X	X	X		X
ceiling chanel	canales de techo	X	X	X	X	X	X	X	X
Composed pockets	cúpulas coalescentes	X	X	X	X		X	X	X
Subdued pockets	pequeñas cúpulas	X	X	X	X		X	X	X
Wall pockets	cúpulas en paredes	X	X	X	X		X	X	X
Ceiling pockets	cúpulas en techo	X	X	X	X		X	X	X
Outles	estructuras de fuga ascendente, descargas	X	X	X	X	X	X	X	X
Underdeveloped outles	morfologías sin desarrollar, cerradas sin continuidad	X	X	X	X		X		
Successful outles	estructuras que comunican dos niveles	X	X	X	X	X	X		X
Dead Ends	galerías ciegas	X	X	X	X		X		X
Partitions	tabiques de roca	X	X	X	X	X	X	X	X
Bubble trails	canales de disolución sobre paredes	X	X	X					
Collapses	Colapsos	X	X	X	X	X		X	X
Cúpulas ramificadas	Pseudogalerías/pseudopozos	X	X	X		X	X		
Boxwork	formas nido de abeja, cajas	X	X	X	X				X
Scallops	formas sección elíptica en paredes y techos, costras	X	X	X					X
Espeleotemas									
Folias	Placas de calcita a modo de gours invertidos	X				X			
Tower coral	pináculos coraloides	X	X						
Coralloids	Corales	X							X?
Porcon	Palomitas	X	X?						
Raft cones	Conos	X							X
Double tower cones	Conos dobles	X							
Micro cones	micro conos 1-10 cm.	X							
Cave raft	Calcita flotante	X	X?	X?	X?	X			X?
Moonmilk		X	X?						X?
Cypress inverted submarinos	cipreses inertidos submarinos (cueva del agua)				X				
Clouds	nubes	X						X	
Pool fingers	Estalactitas submarinas	X?							
Conulites	vasos de chapoteo	X							
Micritized rind	calcita micritizada	X							X
Spar	cristales	X	X						X
Dogtooth calcite	dientes de perro	X							X
Aragonito	agujas de aragonito		X						

© Ros, Llanusa, Sánchez 2014

Tabla 1. Tabla modelos; redes, morfología, espeleotemas hipogénicos en cuevas de la región de Murcia-España.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al equipo de trabajo y colaboradores; Carlos Munuera, Juan Francisco Plazas, Alba Sánchez, Andrés Hurtado, Roberto Trives, Juan Antonio García, Ana Belén Cáceres, Antonio David Granados, José. M. Calaforra, Tomas Rodríguez, José Liza, Enrique Bañón, Antonio Alcalá y su equipo, Rita Martínez, Belén López, José L. Carcelén, Antonio Latorre, Bartolo Ros.

Igualmente todo el equipo quiere mostrar su agradecimiento al Ayuntamiento de Pliego y Comunidad Autónoma de la Región de Murcia por su colaboración y facilidades.

A las colaboraciones especiales de RODCLE y a su equipo de dirección que siempre han estado dispuestos a diseñar o modificar equipos para que las exploraciones fueran más cómodas. Murcia 2014.

Trabajo patrocinado por CENM-naturaleza y la Federación de Espeleología de la Región de Murcia.

REFERENCIAS

Audra Ph., Bigot J. Y. y Mocachain L. 2003. Hypogenic caves in Provence (France): Specific Features and sediments. *Acta Carsologica* vol. 31, n.3, p.33-50.c

Audra Ph., Bigot J. Y., Mocachain, Bigot, J. Y. y Nobercourt, J. C. 2009. The association between bubble trails and folia: a morphological and sedimentary indicator of hypogenic speleogenesis by degassing, example from Adaouste Cave (Provence, France), *International Journal of Speleology* 38 Bologna Italy 38.

Audra P., Mocochain L., Bigot J. y Nobécourt J. C. , 2009. *Hypogene cave patterns Hypogene speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins Proceedings of the conference held May 13 through 17, 2009 in Chernivtsi, Ukraine.*

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.*

Club Cuatro Picos Cartagena y Club Pliego España Pliego 2001. La sima de la Higuera, el mayor complejo subterráneo topografiado de la Región de Murcia. (Madrid) *Revista Subterránea*, 13.

Davis D., 2012. In defense of a fluctuating-interface, particle-accretion origin of folia. *International Journal of Speleology* 41 Tampa FL USA.

Ferrer V. 2010. La sima de la Higuera. *Pliego – Murcia*. Edita V. Ferrer.

Garay P. 2013 Consideraciones sobre el karst y cuevas hipogénicas, con referencias al ámbito valenciano. *Bol. de la SEDECK* núm. 9.

Gázquez Sánchez F., Calaforra Chordi J. M. y Sanna L., 2012. Precipitación de *moonmilk*, un proceso natural en cavidades: revisión y nuevos casos de estudio en cuevas españolas. *Congreso Español Cuevas Turísticas, Palencia.*

Gázquez Sánchez F., Calaforra-Chordi J. M., Rull F y Martínez-Frías J., 2012. Espeleotemas y evidencias de cavernamiento hipogénico de la Sima de la Higuera (Pliego, Murcia). *Congreso Español cuevas Turísticas, Palencia.*

Gázquez F. y Calaforra J.M., 2013. Hypogene speleogenesis and speleothems of sima de la Higuera cave (Murcia, south-eastern Spain) *Karst and Caves in Carbonate Rocks, Salt and Gypsum.*

Ginés J. y Ginés A. 2009. Proposta d’una nova clasificació morfogenética de les cavitats cárstiques de l’illa de Mallorca, *Endins* 33.

Klimchouk A. 2007. Hypogene Speleogenesis: Hidrogeological and morphogenetic perspective. *Special Paper no. 1*, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad.

Klimchouk A. 2009. Morphogenesis of hypogenic caves *Geomorphology* 106 (2009).

- Klimchouk, A. 2009. Principal features of hypogene speleogenesis. Hypogene speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins Proceedings of the conference held May 13 through 17, 2009 in Chernivtsi, Ukraine.
- Martín-García, R., Alonso-Zarza, A. M. y Martín-Pérez, A. 2007. Micritización de espeleotemas en ambiente meteórico vadoso (Cueva de Castañar de Ibor, Cáceres). *Geogaceta* 42.
- Merino, A., Fornos, J. 2010. Los conjuntos morfológicos de flujo ascendente (Morphologic Suite of Rising Flow) en la cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca), *Endins* 34.
- Merino, A., Ginés, J. y Fornos, J. 2011. Evidencias morfológicas de procesos hipogénicos a cavitas de Mallorca, *Endins* 35.
- Rodríguez Estrella, T., Martínez Conesa, A. y Solís García-Barbón, L. 1986. Hidrodinámica del karts de las Anguilas (Murcia), Método de prospección en acuíferos kárstico. *Jornadas sobre el karts en Euskadi*.
- Ros, A. y Llamusí, J. L. 1988. La sima Destapada (Murcia). Revista *Caliza* núm. 0.
- Ros, A., y Llamusí, J. L. 1989. Dos grandes redes subterráneas en la Región de Murcia, sima Destapada y cueva del Puerto, revista *Caliza* núm. 1.
- 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.
- Ros, A., Hurtado, A., Llamusí, J. L. y Sánchez J. 2012. La sima de la Higuera (Pliego-Murcia): un ejemplo de conservación y accesos regulados en la región de Murcia. *Congreso Español sobre Cuevas Turísticas*, Palencia.
- Sendra, A., Garay, P., Ortuño, V., Gilgado, J., Teruel, S. y Reboleira A. 2014. Hypogenic versus epigenic subterranean ecosystem: lessons from eastern Iberian Peninsula, *International Journal of Speleology* 48.

The image shows a microscopic view of biological tissue, likely a cross-section of an epithelial layer. The tissue exhibits a stratified structure with multiple layers of cells. A prominent feature is a dark, wavy band across the middle, which could represent a basement membrane or a specific layer of cells. The overall appearance is that of a complex, layered biological structure. A solid blue horizontal band is superimposed over the middle of the image, containing the text '5 BIOESPELEOLOGÍA' in white, sans-serif capital letters.

5 BIOESPELEOLOGÍA

Protección de la fauna invertebrada cavernícola en Andalucía

Isabel M. Belda-García, Pablo Barranco-Vega y Jaime García-Mayoral

Dpto. Biología y Geología. Cite II-B. Universidad de Almería. 04120 Almería. España. (ibelda@hotmail.es, pbvega@ual.es, jgmayoral@hotmail.com)

RESUMEN

Se ha muestreado la artrópodofauna de 32 cavidades andaluzas desde 2009 a 2013: ocho cuevas en Cádiz, seis en Almería y Málaga, tres en Córdoba, Granada y Jaén, dos en Sevilla y una en la provincia de Huelva. Los muestreos fueron estacionales, mediante trampas de caída cebadas y activas durante un mes. Estos fueron realizados por 7 clubes de espeleología. Además de las cavidades muestreadas, se propuso la actuación inmediata en otras 24 cavidades para las que ya se disponían datos de su fauna y por alojar endemismos con distribución restringida a una única localidad. Se han procesado 187.268 ejemplares asignados a 104 grupos taxonómicos preliminares. El material se distribuyó entre taxónomos especialistas y está en proceso de estudio. Se prevé la descripción de 31 especies nuevas para la Ciencia, de las que ya se han publicado una decena, además de varias redescriptiones. Se ha constatado una gran variación en la abundancia y estructura ecológica entre cavidades y entre ambos proyectos. En la Fase I del proyecto (2009-2010), la provincia de Cádiz ha sido donde se ha obtenido el mayor número de capturas y en la Fase II (2012-2013) ha sido Málaga. Almería es la que menos capturas ha presentado en ambas Fases. El número de ejemplares por trampa oscila desde los 332 en la Cueva de las Motillas (Cádiz) y 321 en la Cueva de Nagüeles (Málaga), hasta los 58 de Sima del Puntal y 19 de la Cueva del Lago (Almería). La relevancia de los resultados taxonómicos y faunísticos obtenidos, ha desembocado en la ejecución de medidas de afectación conducentes a la protección de la fauna. Estas medidas han consistido, según el caso, en el vallado perimetral de la entrada, cerramiento o sustitución de alguno ya existente, limpieza de la cavidad, y señalización mediante paneles del valor entomológico de la cavidad.

Palabras clave: Fauna cavernícola, Andalucía, protección, medidas de afectación.

Protection of the invertebrate cavernicolous fauna in Andalusia

ABSTRACT

Thirty-two caves in Andalusia (Spain) have been sampled from 2009 to 2013 in different provinces: eight in Cádiz, six in Almería and Málaga, three in Córdoba, Granada and Jaén, two in Seville and one in Huelva. Seasonal sampling was carried out using baited pitfall traps that were active during one month. The traps were set up in the caves and collected later by 7 speleology clubs from the different provinces. In addition to these new caves sampled, another 24 caves with native species for each cave were proposed for immediate protection measures. 187.268 specimens were sorted and assigned to 104 taxonomic groups in a preliminary classification. The specimens were sent to taxonomy specialists of each group of invertebrates and they are currently under study. The description of 31 new species is expected and 10 of them were just published; in addition, several re-descriptions are also in their way. Analysis of the data showed a wide variation in the abundance of specimens and ecological structure between caves and also between grants: Phase I (period 2009-2010) and Phase II (2012-2013). The highest number of captures in Phase I of the grant took place in the province of Cadiz, while the same was true for Málaga in Phase II. The province with the lowest number of captures in the entire sampling period (2009-2013)

was Almería. The number of specimens per trap varied from 332-321 in Cueva de las Motillas (Cádiz) and Cueva de Nagüeles (Málaga), respectively, to 58-19 in Sima del Puntal and Cueva del Lago, respectively (both in Almería). The relevance of the results obtained in these taxonomic studies led us to take action inside or outside the cave (or both) in order to protect and guarantee the conservation of the fauna they host. These measurements include one or all of the following actions (depending on the case): i) the installation of a fence around the entrance of the cave, ii) installation of a gate at the entrance of the cave or replace an existing one, iii) removing garbage and waste from the cave, and iii) posting informative boards indicating the relevance and fragility of the entomological fauna it host.

Keywords: Cavern fauna, Andalucía, protection, conservation measures.

INTRODUCCIÓN

Durante los bienios 2009-2010 y 2012-2013 se han desarrollado dos proyectos con el fin de progresar en el conocimiento de la fauna cavernícola andaluza, "Servicio para el estudio de los invertebrados cavernícolas en Andalucía" y "Servicio de Consultoría y asistencia para el estudio de invertebrados cavernícolas mediante prospección de cavidades existentes en la Comunidad Autónoma de Andalucía". Ambos proyectos han sido cofinanciados por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y fondos europeos FEADER.

Este artículo es el resultado de las prospecciones de fauna invertebrada realizada en 32 cavidades de Andalucía, muestreándose 16 de ellas en cada una de las dos fases de ejecución. Los resultados obtenidos en ambas Fases están conectados y relacionados y se han puesto de manifiesto varias conclusiones.

La más importante es el descubrimiento de nuevas especies para la Ciencia. Esta circunstancia confiere al medio subterráneo el carácter de "última frontera", en el doble sentido tanto de la dificultad que entraña su estudio como en la posición que ocupa en nuestro entorno. En realidad no es un medio tan distante, el medio hipogeo y subterráneo es bastante próximo a nuestro medio natural habitual; pero es de muy difícil acceso y metodológicamente complejo de muestrear. Por el contrario, la recompensa suele ser bastante gratificante, no sólo por el hallazgo de nuevos taxones, sino también por su singularidad que es espectacular. Paradójicamente a lo que pudiera parecer a priori, la diversidad zoológica que se halla en las cuevas es enorme (Ortuño, 2011).

Otra segunda conclusión o situación que se desprende de estos estudios, es la abundancia de la fauna cavernícola. Ciertamente el volumen de capturas ha sido muy elevado en determinados grupos que representan la base de la escala trófica (detritívoros) y que se van haciendo bastante escasos proporcionalmente al ascender a los depredadores.

Una tercera conclusión que se puede extraer de estos muestreos de fauna cavernícola, es su variabilidad en las diferentes cavidades. Esta variabilidad se refiere tanto a la composición, como a diferencias en la dinámica poblacional de la fauna en estas cuevas. El aislamiento de los sistemas kársticos posibilita y favorece la endemidad entre la fauna estrictamente troglobia. Por el contrario, las especies troglófilas se repiten casi sistemáticamente en las cavidades que presentan ambientes similares. De hecho, muchas de estas especies constituyen la base de la cadena trófica en gran parte de las cavidades andaluzas, como es el caso de ciertos ácaros y colémbolos.

Los resultados preliminares que se ofrecen en este artículo constituyen un gran avance en el estudio y defensa del medio subterráneo andaluz. De igual modo, se desprende de ellos, que aún queda mucho trabajo "ahí abajo" pendiente de realizar y que seguramente son muchísimas especies las que están por descubrir en tan singular medio. El patrimonio natural de nuestra Comunidad se verá incrementado y enriquecido con fauna endógena endémica como consecuencia de futuras prospecciones del Karst en nuestro territorio.

Precisamente ante esta circunstancia, y a falta de evaluar la singularidad taxonómica de las especies prospectadas, se establece una propuesta preliminar que pretende únicamente contemplar un avance de las actuaciones que se puedan acometer, para la protección de la entomofauna de las cavidades contempladas en este estudio.

MATERIAL Y MÉTODOS

La entomofauna se ha prospectado mediante muestreos estacionales desde agosto de 2009 a mayo de 2010 en la Fase I y desde noviembre de 2012 hasta agosto de 2013 en la Fase II. Se han empleado trampas de caída distribuidas por la cavidad, enterradas a ras en el sustrato y rellenas hasta la mitad de su capacidad con solución de turquin (Fase I) o propilen glicol (Fase II) y cebadas con sobrasada, permaneciendo activas durante un mes. El material extraído de las trampas se ha conservado en alcohol de 70°. Simultáneamente a la retirada de las trampas, se realizó captura directa de todos los artrópodos que se encontraron, conservándose en tubos/botes con alcohol de 70°.

El muestreo de las cavidades fue llevado a cabo por diferentes clubes de Espeleología en cada provincia: Almería, Espeleo Club Almería (ECA); Cádiz, Grupo de Investigaciones Espeleológicas de Jeréz (GIEX); Córdoba, Grupo de Exploraciones subterráneas de Priego de Córdoba (GESP); Granada, Grupo de Espeleólogos Granadinos (GEG); Jaén, Grupo Espeleológico de Villacarrillo (GEV); Málaga, Grupo de Exploraciones Subterráneas de Málaga (GES de la SEM); Huelva- Sevilla, Club Deportivo Plutón (CDP).

Se han muestreado 32 cavidades que se relacionan en la Tabla 1. Además de las cavidades muestreadas, se propusieron 25 cavidades de actuación inmediata por alojar endemismos de distribución con una única localidad. En la Figura 1 se indican el número de cavidades prospectadas por cada club, el primer número corresponde a cavidades prospectadas y el segundo a las propuestas de actuación inmediata.



Figura 1. Número de cavidades prospectadas y propuestas por cada club.

RESULTADOS

Fauna invertebrada cavernícola en las cavidades andaluzas prospectadas

Uno de los aspectos que más llama la atención, es la elevadísima cantidad de ejemplares que se han cuantificado, 185.791 individuos capturados en trampas (Tabla 1). A partir de este material se han generado un total de 8.629 muestras que han sido etiquetadas y separadas por grupos taxonómicos. En la Fase I se recogieron 664 trampas generando 3.302 muestras, mientras que en la Fase II fueron 817 trampas que se generaron 5.428 muestras (Figura 2).

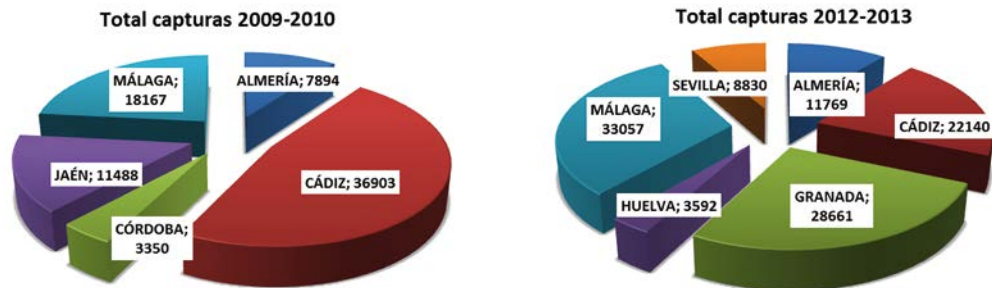


Figura 2. Ejemplares capturados por provincia en cada una de las Fases de muestreo.

Comparando ambos estudios, se constata que se ha incrementado el número de capturas, pasando de los 77.802 ejemplares obtenidos en la fase I a los 108.049 capturados de la II. Ya que aunque se ha incrementado el número de trampas, el ratio de capturas por trampa también se ha incrementado.

Las provincias de Málaga, Cádiz y Almería muestran diferencias en cuanto a resultados según el periodo de estudio. Almería es la que menos capturas presenta tanto en la Fase 1 como en la 2. Málaga es la que agrupa el mayor número de individuos en la Fase II; mientras Cádiz lo fue en la I.

En cuanto al número de ejemplares por trampa existe una gran variación, desde los 332 en la Cueva de las Motillas en Cádiz, a los 19 de la Cueva del Lago (Almería) del primer periodo o los 321 en la Cueva de Nagüeles (Málaga) hasta los 58 de Sima del Puntal (Almería) en el segundo. En ambas fases coincide que las cavidades con menor rendimiento en capturas se ubican en la provincia de Almería. Ello puede deberse a que en esta provincia se encuentran las cavidades más secas.

El material procedente de los muestreos, tanto el capturado mediante trampas, como el recolectado mediante captura directa a mano, ha sido seleccionado y agrupado por taxones (Tabla 2). El inventario al final de ambas fases del proyecto no es completo ni definitivo, pero sí proporciona una visión cualitativa y cuantitativa de la fauna cavernícola. Si conocemos cuántos grupos de taxones han aparecido y cuál es su frecuencia, a grandes rasgos, se tiene una visión de las especies y su importancia en relación a su endemidad y abundancia.

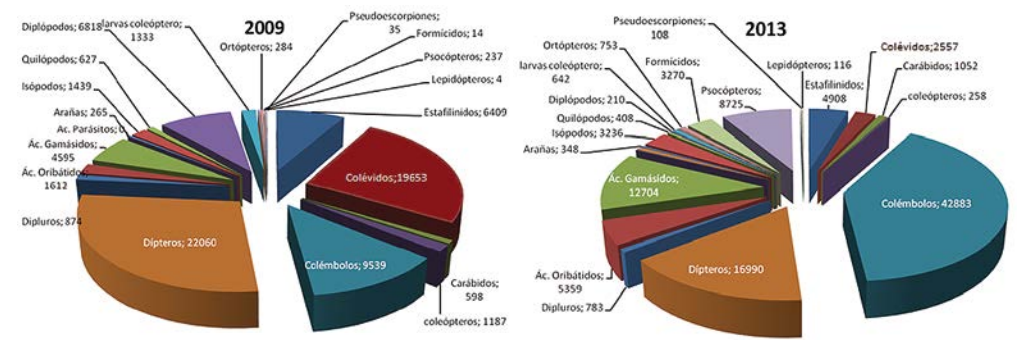


Figura 3. Número de ejemplares de los grupos y taxones identificados en cada una de las Fases de muestreo.

Todo ello va a permitir determinar un patrón de actuaciones y los valores de cada cavidad que han de protegerse. Y nos brinda la posibilidad de comparar las faunas de las cavidades, tanto las derivadas de este estudio como otras ya conocidas, pudiéndose establecer conexiones entre cuevas y entre karst y sus implicaciones biogeográficas. No obstante este nivel de implicación faunística, no será factible hasta que se disponga de la información completa de las especies identificadas. Lo que se puede destacar por ahora es que en la Fase II ha aparecido una mayor diversidad de taxones y un mayor número de individuos en trampas con respecto a los obtenidos durante la Fase I. El que haya mayor diversidad de taxones, se debe en parte también a que en esta segunda Fase la gran mayoría de individuos han sido identificados al menos hasta nivel de Familia, lo que nos permite tener un mayor conocimiento acerca de la fauna invertebrada presente en estas cavidades. En la segunda Fase se han considerado 101 categorías taxonómicas, frente a las 28 que se contemplaron en la Fase I. Este nuevo prisma de aproximación, nos ofrece una visión de conjunto de la fauna cavernícola *sensu lato*. Hay grupos que no han llegado a la decena de ejemplares, mientras que otros están representados por miles de individuos (Figura 3).

INVENTARIO DE ESPECIES

El censo de las especies precedentes en las cavidades estudiadas a partir de las muestras obtenidas tanto mediante trampeo como captura directa no será definitivo hasta que concluya el estudio completo de todas las muestras por parte de los taxónomos. Este proceso puede demorarse mucho en el tiempo, sobre todo en los grupos de artrópodos más pequeños y complejos como son los ácaros y colémbolos. No obstante de algunos grupos ya se han descrito algunos nuevos taxones, como es el caso de los ortópteros (Barranco, 2010), nematodos (Abolafia y Peña-Santiago, 2011) y pseudoscorpiones (Carabajal *et al.*, 2011).

También se han realizado nuevas citas en algunas provincias de artrópodos, como ha sido el caso de algunas pulgas (Gómez *et al.*, 2013) o la especie de ácaro trombidido *Beronium laemostenis* (Mayoral, 2013); o que se conocían de una única localidad (Molero *et al.*, 2013); e incluso se ha realizado la revisión taxonómica (Ortuño y Barranco, 2013). Todos estos resultados son fruto del estudio del material de la primera Fase, pues el proveniente de la segunda aún se haya en un proceso de estudio muy preliminar.

No obstante, a partir del material procesado hasta ahora de ambos periodos de muestreo se prevé la descripción de 31 nuevas especies y 14 nuevas citas (Tabla 3).

		Tramp.	Muest.	Media ej./tr.	Gr. Tax.	Ejemp.
ALMERÍA	Cueva de las Colmenas-II	32	112	120	10	3.829
	Sima de los Salteños	47	183	76	17	3.586
	Cueva del Lago	25	93	19	16	479
	Sima Aire	44	242	108	22	4.769
	Cueva Saliente	45	294	99	27	4.454
	Sima del Puntal	44	232	58	27	2.546
		237	1156			19.663
CÁDIZ	Sima del Peñón del Berrueco	32	137	47	14	1.497
	Cueva de los Bermejales	45	225	145	13	6.512
	Complejo Motilla Parralejo	43	332	285	14	12.238
	Cueva de las Motillas	50	279	332	17	16.596
	Cueva VR-9	44	336	103	35	4.536
	Cueva del Humo	40	262	139	32	5.544
	Cueva del Higueral	56	319	204	28	11.427
Cueva de Pozo Amargo	17	45	37	9	633	
		327	1935			58.983
CÓRDOBA	Sima Fuente Alhama	27	88	24	15	645
	Cueva de la Solana	24	124	49	19	1.167
	Cueva Fuente del Espino I	29	150	53	20	1.538
		80	362			3.350
GRANADA	Sima San Rafael	80	752	132	35	10.555
	Cueva de Pagarrecio	80	576	166	42	13.316
	Sima Montesinos	68	374	70	43	4.790
		228	1702			28.661
HUELVA	Cueva del Guerrero	60	472	60	46	3.592
JAÉN	Cueva del Jabalí	57	279	100	13	5.709
	Cueva Curva del Espino	57	221	44	9	2.481
	Sima de los 30 años	47	265	70	13	3.298
		161	765			11.488
MÁLAGA	Sima Raja Helada	64	287	134	16	8.560
	Cueva de la Fájara	43	197	119	17	5.120
	Cueva de los Higueros	42	229	107	19	4.487
	Cueva Nagüeles	64	303	321	29	20.551
	Cueva del Agua	63	408	114	25	7.174
	Cueva de la Tinaja	60	357	89	41	5.332
		336	1781			51.224
SEVILLA	Sima Paro	44	435	197	48	8.686
	Cueva de las Flores	8	21	18	16	144
		52	456			8.830
TOTAL		1481	8629			185.791

Tabla 1. Tabla general de resultados de trapeo por cueva.

Coleoptera	Siphonaptera	Araneae
Carabidae:	Lepidoptera	Opilionida:
<i>Laemostenus sp.</i>	Trichoptera	<i>Scotolemon sp.</i>
<i>Laemostenus alexandroi</i>	Tisanura	Opilionida
<i>Platyderus sp.</i>	Hymenoptera	Pseudoescorpionida
<i>Trechus fulvus</i>	Parasitica	Chthoniidae:
<i>Trechus diecki</i>	Formicidae:	<i>Chthonius aguileiraorum</i>
<i>Trechus sp. nov.1</i>	<i>Hypoconera ragusai</i>	<i>Chthonius amatei</i>
<i>Trechus sp. nov.2</i>	<i>Aphaenogaster cardenai</i>	<i>Chthonius ambrosiae</i>
Estaphylinoidea:	<i>Stenammas sp.</i>	<i>Chthonius machadoi</i>
Aleocharidae: <i>Atheta sp.</i>	Formicidae	<i>Chthonius sp. nov.1</i>
Tachyporidae: <i>Sepedophilus sp.</i>	Diplura:	<i>Chthonius sp. nov.2</i>
Estaphylinidae: <i>Microsaurus sp.</i>	<i>Plusiocampa gadorensis</i>	<i>Chthonius sp. nov.3</i>
Estaphylinidae:	<i>Japix major</i>	<i>Chthonius sp. nov.4</i>
Omalini	Diplura	<i>Chthonius sp. nov.5</i>
Anthophagini	Diptera	<i>Chthonius sp. nov. aff. 5</i>
Estaphylinidae	Phoridae	Neobisiidae:
Pselaphidae:	Anthomyiidae	<i>Neobisium baenai</i>
<i>Bryaxis sp.</i>	Calliphoridae	<i>Neobisium rodrigo</i>
Pselaphidae	Sphaeroceridae	<i>Neobisium sp. nov.</i>
Cholevidae:	Brachycera	Isopoda
<i>Speonemadus angusticollis</i>	Sciaridae	Amphipoda
<i>Speonemadus bolivari</i>	Tipulidae	
<i>Speonemadus vandallitiae</i>	Cecidomyiidae	Chilopoda
<i>Catops andalusicus</i>	Dixidae	Scolopendromorpha
<i>Catops fuscus fuscoides</i>	Anisopodidae	Lithobiomorpha
<i>Catops coracinus</i>	Psychodidae	Litobiiidae: <i>Lithobius sp.</i>
<i>Catops fuliginosus</i>	Mycetophilidae	Diplopoda
<i>Catopidus depressus</i>	Nematocera	Julida
<i>Choleva jeanneli</i>	Collembola	Glomerida: <i>Glomeris sp.</i>
<i>Nargus algricus</i>	Isotomidae	Polydesmida
Ptininae	Entomobryidae	Gastropoda
Latridiidae: <i>Corticaria sp.</i>	Sminthuridae	Oligochaeta
Cryptophagidae: <i>Cryptophagus sp.</i>	Onychiuridae	Larvas carábidos
Tenebrionidae:	Hypogastruridae	Larva catópido
<i>Blaps sp.</i>	Acari	Larva estafilinido
Curculionidae	Oribatida	Larva ditiscido
Orthoptera	Gamasida	Larva colóptero
Gryllidae:	Trombididae	Larva lepidóptero
<i>Petaloptila barrancoi</i>	Eupodidae	Larva tricóptero
<i>Petaloptila malacitana</i>	Ragididae	
<i>Gryllomorpha sp.</i>	Cunaxidae	
Psocoptera	<i>Labidostomma sp.</i>	
Psyllipsocidae: <i>Psyllipsocus ramburii</i>	<i>Beronium laemostenis</i>	
Dictyopetra	Ác. Parasitos de <i>Laemostenus</i>	
Blattodea	Acari	
	Ixodidae	

Tabla 2. Grupos y taxones identificados para la separación de las muestras.

Taxón	Cavidad	Prov.	Nuevo taxón	Nueva cita
<i>Ablechroiulus spelaeus</i> Abolafia & Peña-Santiago, 2011	Cueva del Jabalí	J	x	
<i>Chthonius aguilaerorum</i> Carabajal, García y Rodríguez, 2000	VR-9	CA		x
<i>Chthonius amatei</i> Carabajal, García y Rodríguez, 2001	Sima del Puntal	AL		x
<i>Chthonius ambrosiae</i> Carabajal, García y Rodríguez, 2012	VR-9	CA		x
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva del Saliente	AL	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva del Berrueco	CA	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva del Humo	CA	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Complejo de Motillas	CA	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Sima Fuente del Espino	CO	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva de la Solana	CO	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Sima de Montesinos	GR	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva del Agua	MA	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva de la Fájara	MA	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva de Nagüeles	MA	x	
<i>Chthonius (Ephippiochthonius) sp. nov</i>	Cueva de la Tinaja	MA	x	
<i>Neobissium baenai</i> Carabajal, García y Rodríguez, 2011	Sima Fuente del Espino	CO	x	
<i>Neobissium baenai</i> Carabajal, García y Rodríguez, 2011	Sima de San Rafael	GR		x
<i>Neobissium espinoli</i> Carabajal, García y Rodríguez, 2011	Sima de los 30 años	J	x	
<i>Neobissium rodrigo</i> Carabajal, García y Rodríguez, 2000	VR-9	CA		x
<i>Neobissium (Ommatoblothrus) sp. nov</i>	Sima de Montesinos	GR	x	
<i>Cybaeodes sp. nov</i>	Cueva del Agua	MA	x	
<i>Dysdera sp. nov.</i>	Cueva del Agua	MA	x	
Linyphiidae	Sima de San Rafael	GR	x	
<i>Dicranolasma soerenseni</i> Thorell, 1876	Sima del Lago	AL		x
<i>Glomeris sp. nov</i>	Sima Salteños	AL	x	
Diplópodo género y especie nueva	Cueva del Jabalí	J	x	
<i>Arhopalites sp. nov.</i>	Cueva de las Colmenas	AL	x	
<i>Deuteraphorura sp. nov</i>	Raja Helada	MA	x	
<i>Onychiurus sp. nov</i>	Raja Helada	MA	x	
<i>Pseudosinella sp. nov.</i>	Sima Salteños	AL	x	
<i>Troglopedetes sp. nov.</i>	Cueva de la Fájara	MA	x	
<i>Coletinia vergitana</i> Molero, Barranco, Bach & Gajú, 2013	Sima del Aire	AL		x
<i>Petaloptila malacitana</i> Barranco, 2010	Cueva de la Fájara	MA	x	
Carábido	Sima del Lago	AL	x	
Curculiónido	Sima Salteños	AL	x	
<i>Laemostenus alejandroi</i> Carabajal, García & Rodríguez, 2002	VR-9	CA		x
<i>Laemostenus alejandroi</i> Carabajal, García & Rodríguez, 2002	Cueva del Humo	CA		x
<i>Laemostenus alejandroi</i> Carabajal, García & Rodríguez, 2002	Cueva del Higueral	CA		x
<i>Laemostenus sp. nov</i>	Sima de Montesinos	GR	x	
<i>Duvalius (Duvalius) lencinai</i> (Mateu & Ortuño, 2006)	Sima de los 30 años	J		x
<i>Duvalius (Duvalius) lencinai</i> (Mateu & Ortuño, 2006)	Cueva del Espino	J		x
<i>Trechus sp. nov.</i>	Cueva del Humo	CA	x	
<i>Trechus sp. nov.</i>	Sima de San Rafael	GR	x	
<i>Typhloceras favosus rolandi</i> Jordan, 1938	Sima del Lago	AL		x
<i>Aphaenogaster cardenai</i> Espadaler, 1981	Cueva del Guerrero	HU		x

Tabla 3. Lista preliminar de las nuevas especies previstas y nuevas citas.

MEDIDAS DE AFECTACIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE LA FAUNA CAVERNÍCOLA

A tenor de los resultados taxonómicos preliminares recogidos en la Tabla 3 y en función de la presencia de especies endémicas, se han realizado una serie de propuestas conducentes a la protección de estos invertebrados. Estas propuestas se han elevado tanto a las cavidades muestreadas como aquellas denominadas “de actuación inmediata” de las que ya se conocía su singularidad por la presencia de invertebrados cavernícolas endémicos. En la Tabla 4, se indican las diferentes medidas propuestas en todas las cavidades y se han marcado con color las medidas ejecutadas o que tiene prevista su ejecución. El número de cavidades sobre las que se han realizado actuaciones han sido muy reducido, debido fundamentalmente a la reticencia que han presentado muchos propietarios a cualquier tipo de actuación. No obstante se han colocado algunos vallados perimetrales (Figura 4), enrejados (Figura 5) y bastantes carteles informativos (Figura 6).



Figuras 4 y 5. Ejemplos de vallado y enrejado.



Figuras 6. Ejemplo de cartel informativo.

Cavidad		Fase	Vallado perimetral	Panel informativo	Puerta enrejada	Limpeza cavidad	Visitas restringidas	Acceso restringido
Sima del Lago	AL	I	X	X				
Cueva de las Colmenas	AL	I		X	X		X	
Sima Salteños	AL	I	X	X				
Simarrón II	AL	I	X	X				
Cueva de La Corraliza	AL	I	X	X				
Cueva Larga	AL	I	X	X				
Cueva Nueva	AL	II			X			
Cueva del Lobo	AL	II	X		X			
Cueva del Llano de la Montés	AL	II	X		X			
Cueva del Saliente	AL	II	X	X	X		X	X
Sima del Aire	AL	II		X			X	
Sima del Puntal	AL	II		X			X	
Cueva de los Bermejales	CA	I		X	X	X		
Complejo de Motillas	CA	I		X	X	X		
Cueva del Berrueco	CA	I		X	X	X		
Cueva de Pozo Amargo	CA	II		X				
VR-9	CA	II		X		X		
Cueva del Humo	CA	II		X				
Cueva del Higueral	CA	II		X				
Sima de Fuente Alhama	CO	I	X	X				
Sima De la Fuente del Espino	CO	I	X	X				
Cueva de La Solana	CO	I	X	X				
Sima de La Vereá	CO	I			X			
Cueva de la Murciélaguina	CO	I			X	X		
Cueva del Yeso	CO	I			X	X		
Cueva del Barranco ñiate	GR	II			X			
Cueva de las Campanas	GR	II			X			
Sima de Montesinos	GR	II	X	X			X	
Sima de San Rafael	GR	II	X	X			X	X
Cueva de Pagarrecio	GR	II	X	X			X	X
Cueva del Guerrero	HU	II		X				
PB4	J	I	X	X				
Sagreó	J	I	X	X				
Sima de los 30 años	J	I					X	
Cueva del Jabali	J	I	X	X				
Cueva del Espino	J	I					X	
Cueva de La Morcuilla	J	I	X	X		X	X	
Raja Helada	MA	I		X		X		
Cueva de la Fájara	MA	I		X			X	
Cueva de Higueros IX	MA	I					X	
Complejo Hundidero-Gato	MA	I		X				
Cueva de la Pileta	MA	I						
Cueva de Los Organos	MA	II					X	
Cueva de Nagüeles	MA	II	X	X				
Cueva del Agua	MA	II		X	X			
Cueva de La Tinaja	MA	II			X			
Cueva de Fuenfría	SE	II			X			
Sima del Paro	SE	II						
Cueva de las Flores	SE	II						

Tabla 4. Relación de actuaciones propuestas en cada cavidad. X: actuaciones propuestas; Amarillo: actuaciones llevadas a cabo; Naranja: actuaciones pendientes de contratación.

REFERENCIAS

Abolafia, J. y Peña-Santiago, R. (2011). *Ablechroiulus spelaeus* sp. n. and *A. dudichi* Andrassy, 1970 from Andalucía Oriental, Spain, with a discussion of the taxonomy of the genus *Ablechroiulus* Andrassy, 1966 (Nematoda, Rhabditida, Rhabditidae). *Zootaxa* 2922, 1–14.

Barranco, P. (2010). Una nueva especie de *Petaloptila* de la provincia de Málaga (España). (Orthoptera, Gryllidae). *Boletín de la Asociación española de Entomología*. 34(1-2), 207-217.

Carabajal Márquez, E., García Carrillo, J. y Rodríguez Fernández, F. (2011). Aportaciones al catálogo de los pseudoscorpiones de Andalucía (España) (I) (Arachnida, Pseudoscorpiones). *Boletín de la SEA*, 48, 115-128.

Gómez, M. S., Barranco, P. y Pérez-Fernández, T. (2013). What can fleas (Insecta, Siphonaptera) tell us about animals inhabiting caves. *Boletín de la Asociación española de Entomología*. 37, 1-2.

Mayoral, J. G., (2013). Notes on the genus *Beronium* (Acari, Eutrombididae) enlightened by new captures of *Beronium laemostenis* in Spain. *Acarologia* 53(4), 425–427.

Molero, R., Bach, C., Sendra, A., Montagud, S., Barranco, P., y Gaju, M. (2013). Revision of the genus *Coletinia* (Zygentoma: Nicoletiidae) in the Iberian Peninsula, with descriptions of nine new species. *Zootaxa* 3615, 1–60.

Ortuño, V. M. (2011). Diversidad de los insectos, y sus afines, en las cuevas: una visión ecológica para la conservación. En: La Ciencia del Arte III. *Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*. Págs. 175-187. ISBN: 551-11-103-6IPO.

Ortuño, V. M. y Barranco, P. (2013). *Duvalius (Duvalius) lencinai* Mateu y Ortuño, 2006 (Coleoptera, Carabidae, Trechini) una especie hipogea del sur de la península ibérica. Morfología, reubicación taxonómica, sistemática y biología. *Animal Biodiversity and Conservation*, 36.2, 141-152.

La Cueva del Tesoro: un paraíso microbiano

Valme Jurado⁽¹⁾, Mariona Hernández-Mariné⁽²⁾, Miguel Ángel Rogerio-Candelera⁽¹⁾, Irene Domínguez-Moñino⁽¹⁾, S. Gutiérrez-Patricio⁽¹⁾ y Cesáreo Saiz-Jiménez⁽¹⁾

(1) Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Avenida Reina Mercedes 10, 41012 Sevilla (vjurado@irnase.csic.es; marogerio@irnase.csic.es; idominguez@irnase.csic.es; saiz@irnase.csic.es)

(2) Facultad de Farmacia, Universidad de Barcelona, Av. Joan XXIII, s/n. 08028 Barcelona (marionahernandez@ub.edu)

RESUMEN

En los últimos años las cuevas se han revelado como una fuente de nuevas especies de microorganismos. La gran adaptación de los microorganismos a todo tipo de hábitats les permite vivir en estos ambientes donde se desarrollan formando diferentes comunidades. La Cueva del Tesoro (Rincón de la Victoria, Málaga) alberga una gran biodiversidad apenas explorada. Recientemente, hemos descrito dos nuevas especies de hongos del género *Aspergillus*, y tres posibles nuevas especies de bacterias de los géneros *Acinetobacter*, *Bacillus* y *Paracoccus* están siendo investigadas. Por otra parte, las colonizaciones de cianobacterias y algas requieren una investigación más detallada. Estos datos demuestran que la diversidad biológica de la Cueva del Tesoro es muy alta, por lo que debería ser preservada, siempre que no represente una amenaza para la conservación del Patrimonio Cultural.

Palabras claves: Cueva del Tesoro, bacterias, hongos, cianobacterias, algas.

Cueva del Tesoro: a microbial paradise

ABSTRACT

*In recent years caves have revealed to be a source of new microbial species. The great adaptability of microorganisms allow them establishing themselves in these subterranean environments where they develop different communities. Cueva del Tesoro (Rincón de la Victoria, Málaga) harbours a great biodiversity barely explored. Recently, we have described two new fungal species of the genus *Aspergillus*. Three novel bacterial species of the genera *Acinetobacter*, *Bacillus* and *Paracoccus* are under research. The colonizations of cyanobacteria and algae do require further investigation. These data support that the high biodiversity of Cueva del Tesoro should be preserved if it does not represent a threat for the conservation of the Cultural Heritage.*

Keywords: Cueva del Tesoro, bacteria, fungi, cyanobacteria, algae.

INTRODUCCIÓN

Las cuevas constituyen ecosistemas naturales que albergan interesantes formaciones geológicas y una gran diversidad de especies que colonizan diferentes nichos (agua, aire, roca y sedimentos).

Esta gran variedad de compartimentos convierte a las cuevas en importantes reservorios de biodiversidad. De hecho, en los últimos quince años se han descrito más de 50 nuevas especies de bacterias de la clase *Actinobacteria* en ambientes subterráneos, incluyendo cuevas, catacumbas, minas, etc. (Cheeptham y Saiz-Jiménez, 2014). Además de la clase *Actinobacteria*, en el subsuelo existe una gran diversidad de bacterias pertenecientes al filo *Cyanobacteria* y de otros microorganismos como las arqueas, las microalgas y los hongos, como lo demuestran los recientes descubrimientos de la arquea *Methanobacterium movilense*, las cianobacterias *Iphi-*

noe spelaeobios, *Loriellopsis cavernicola*, *Toxopsis calypsus* y *Chalicogloea cavernicola*, y los hongos *Ochroconis lascauxensis* y *Ochroconis anomala*. (Schirmack et al., 2014; Lamprinou et al., 2011, 2012; Roldán et al., 2013; Martín-Sánchez et al., 2012a).

El estudio de la diversidad microbiana es importante por muchas razones, pero quizás una de las más importantes es que las cuevas son fuentes potenciales de nuevos microorganismos productores de compuestos de interés médico e industrial (Banat et al., 2010; Chang et al., 2011; Harvey, 2000). Groth y Saiz-Jiménez (1999) señalaron la importancia de las cuevas como un hábitat con abundante población de actinobacterias que pueden producir sustancias bioactivas. Herold et al. (2005) describió la producción de cervimicina por *Streptomyces tendae*, aislada de Grotta dei Cervi, en Porto Badisco, Italia, por Groth et al. (2001). Estos policétidos tienen una elevada actividad frente a enterococos y estafilococos resistentes a los antibióticos.

En los últimos años la Cueva del Tesoro se ha revelado como un importante reservorio de diversidad microbiana por lo que se deberían tomar medidas para conciliar la conservación de las pinturas y la cueva en su conjunto, con su biodiversidad. En este trabajo se presentan datos que apoyan esta propuesta.

ESTUDIOS DE LA CUEVA DEL TESORO

La Cueva del Tesoro está localizada en el extremo occidental del término municipal del Rincón de la Victoria, Málaga.

Según Hoyos et al. (1996) la clasificación climática del área de la cueva corresponde a un clima semiárido, mesotérmico, con pequeño exceso de agua en invierno. El agua que llega a la superficie del karst es escasa. El único suministro hídrico, según estos autores, se reduce al agua de infiltración directa de la lluvia que cae sobre la superficie de éste.

La cueva muestra una escasa ventilación, puesta de manifiesto por las medidas de radón, y el sistema kárstico parece comportarse como un recinto confinado y casi impermeable que presenta una pequeña renovación de aire muy probablemente a través del Pozo del Higuérón situado en las proximidades del punto de medida. Las medidas de CO₂, temperatura y humedad relativa muestran características microambientales particulares. Así, mientras que en la Sala del Lago y en la del Volcán las concentraciones de CO₂ fueron del orden de 200 a 550 ppm, la temperatura de 14.8 a 16.8 °C, y la humedad relativa del 80 al 90%, valores normales para una cavidad kárstica. Las concentraciones de CO₂ aumentaron progresivamente en dirección SE hacia el fondo de la galería hasta alcanzar los 20.000 ppm. La temperatura subió hasta los 22.7 °C y la humedad relativa alcanzó la saturación 100%.

La cueva se caracteriza por las alteraciones antrópicas. En la superficie con la urbanización de la zona y la explotación de canteras y el uso de explosivos, y en el interior de la cueva con las adaptaciones realizadas para facilitar las visitas como la extracción de sedimentos, introducción de materiales de construcción, sistemas de iluminación, instalación de un lago artificial, instalación de un ascensor, etc. El efecto más visible de la iluminación artificial es el desarrollo de manchas verdes que cubren las paredes y espeleotemas. Estas manchas están constituidas principalmente por comunidades fototróficas de cianobacterias, algas verdes y musgos (Figura 1).

Existen pocos estudios publicados sobre la Cueva del Tesoro a pesar del interés que suscita esta cueva. Nuestro equipo de investigación comenzó a estudiar la cueva el 3 de febrero de 2010, en el marco del proyecto financiado por la Junta de Andalucía: *Observatorio Microbiológico de cuevas visitables: evaluación y control de comunidades fúngicas en cuevas sometidas al impacto de actividades turísticas*. El objetivo del proyecto fue determinar los reservorios de hongos en cuevas, incluyendo el aire, los sedimentos y los animales (insectos y roedores) para conocer el riesgo potencial que representa la presencia de hongos en cuevas visitables y proponer métodos efectivos para la evaluación, control y la prevención de su colonización. Para ello, se seleccionaron tres cuevas andaluzas: Gruta de las Maravillas en Aracena, Cueva del Tesoro en el Rincón de la Victoria y Cueva de Ardales



Figura 1. Comunidad fototrófica en A: Sala del Lago, B: Sala del Águila, C: Sala de Marco Craso.

en Ardales. Una comparación de los datos preliminares obtenidos de estas cuevas fue publicado previamente por Domínguez-Moñino et al. (2012).

En el 2012, Nováková et al. aislaron y describieron dos nuevas especies de hongos en la Cueva del Tesoro y la Gruta de las Maravillas (Aracena, España), *Aspergillus thesauricus* y *Aspergillus baeticus*, respectivamente. La especie *Aspergillus thesauricus* fue abundante en el aire de la Cueva del Tesoro. Posteriormente, esta misma especie se encontró en otras cuevas europeas, como las de Limanu y Movile, en Rumanía. La especie *Aspergillus baeticus*, aislada en la Gruta de las Maravillas también se ha encontrado en la Cueva del Tesoro y otras cuevas europeas como Demanovska Peace (Eslovaquia) y Movile (Rumanía).

En general, la Cueva del Tesoro se caracteriza por presentar una elevada concentración de especies del género *Aspergillus* en el aire. Una concentración similar fue detectada en la cueva de Nerja, situada a unos 35 Km de la Cueva del Tesoro, aunque en esta no se han descrito nuevas especies fúngicas hasta la fecha (Docampo et al., 2012).

Con respecto a las bacterias aisladas de la Cueva del Tesoro, tres cepas están siendo estudiadas y próximamente se describirán como nuevas especies. Los nombres propuestos para estas cepas son: *Acinetobacter thesauricus*, *Bacillus thesauricus* y *Paracoccus speluncae*. En un estudio financiado por el Ayuntamiento de Rincón de la Victoria: *Estudio sobre el desarrollo, eliminación y limpieza de organismos fototróficos en la Cueva del Tesoro*, se muestrearon diversas salas de la cueva: Sala de la Virgen, Sala del Lago, Sala de Marco Craso, Sala del Águila, Santuario de Noctiluca y Sala del Volcán, y mediante el empleo de técnicas de biología molecular y microscopía, observamos que las comunidades fototróficas desarrolladas por la iluminación artificial estaban compuestas principalmente por cianobacterias (*Chroococciopsis* sp., *Nostoc* sp., *Phormidium* sp., *Gloeocapsa*-like, etc.), clorofitas (*Friedmannia* sp., *Chlorella* sp., *Choricystis* sp.), rodofitas (*Cyanidium* sp.), bacilariofitas (*Diadismis contenta*) y, en algunos lugares, abundantes comunidades del briófito *Eucladium verticillatum* (Figura 2).



Figura 2. Identificación al microscopio óptico de los microorganismos fototróficos. A: *Nostoc* sp., B: *Friedmannia* sp., C: *Diadema contenta*, D: *Phormidium* sp., E: Colonización del musgo *Eucladium verticillatum* en la Sala del Lago, F: Detalle de las yemas rizoidales producidas por el musgo sobre la superficie de una roca, G: Morfología de la hoja del musgo, H: Propágulos rizoidales para la reproducción vegetativa.

En las manchas verdes, además de las cianobacterias y las algas, se han encontrado estructuras similares a virus parasitando las algas (Figura 3). Este hallazgo merece una investigación más profunda. Hasta la fecha, en la literatura científica, no hemos encontrado publicaciones sobre virus de algas en cuevas, por lo que este descubrimiento abre una nueva línea de investigación. La clorofita *Friedmannia* sp. se asociaba con espeleotemas y producía autosporas desnudas en el esporangio materno (Figura 3). La estructura similar a un virus ocupaba las paredes celulares maternas (Figura 3A y B) y la vaina alrededor de cada autospora, ocasionalmente entrando en la célula. Algunas células contenían estas estructuras difusamente dispersas, mientras que otras se desintegraban dejando vacías las paredes de la célula madre. Estas estructuras destruyen *Friedmannia* sp. y *Cyanotheca* sp., mientras que las cianobacterias no parecen sufrir este tipo de ataque.

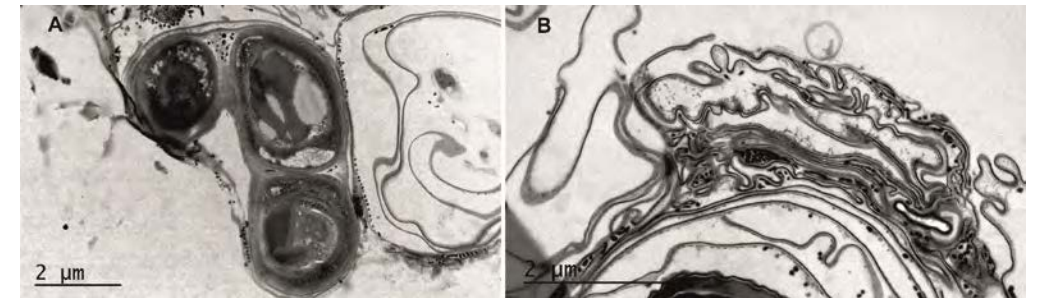


Figura 3. A: El alga *Friedmannia* sp., parasitada por estructuras similares a virus y con las células vacías. B: Ampliación de las paredes celulares.

BIODIVERSIDAD DE LA CUEVA DEL TESORO, ¿ELIMINACIÓN O CONSERVACIÓN?

En el año 1996, Ariño y Saiz-Jiménez publicaron que algunos monumentos albergaban especies que debían preservarse para proteger la biodiversidad. El trabajo hacía referencia a algunas especies de cianobacterias, líquenes y musgos en monumentos del sur y noreste de España. El principal argumento de estos autores era que tales monumentos constituían nichos donde algunas especies encontraban refugio en hábitats amenazados. Hoy en día podemos aplicar estos mismos criterios a las cuevas, ya que su colonización biológica forma parte del ciclo de los elementos en el planeta Tierra, aunque el concepto de ambiente aséptico tienda a invadir nuestras vidas y a proponer métodos de limpieza para su eliminación. La relación natural entre la litosfera y la biosfera es, a largo plazo, más beneficiosa que la lucha artificial para mantener la superficie de los monumentos limpios y, en nuestro caso, las superficies de las rocas y espeleotemas, libre de colonizaciones microbianas por la continua aplicación de biocidas. Existen antecedentes del efecto negativo de la limpieza con biocidas en la cueva de Lascaux, Francia (Bastian *et al.*, 2009; Saiz-Jiménez, 2010; Martín-Sánchez *et al.*, 2012b).

Elliot (2006) efectuó una revisión sobre los pros y los contras de la conservación y restauración de una cueva. Entre las diferentes recomendaciones proponía: solicitar al biólogo de la cueva la realización de un inventario, actualizar la lista de especies y tomar nota de los microhábitats de la cueva y de las zonas sensibles; no eliminar nada de un lugar de estudio biológico y aprender más sobre la vida de la cueva, especialmente de las especies más sensibles (especies raras, amenazadas o en peligro de extinción).

Tras los estudios realizados en los últimos años, y los datos aportados en este trabajo, la Cueva del Tesoro se ha revelado como un yacimiento de nuevas especies para la ciencia, ya que alberga una gran biodiversidad de bacterias y hongos. También, las comunidades fototróficas tienen gran importancia en relación con el estudio de los microorganismos parasitados. Por lo tanto, si se llevara a cabo la total eliminación y limpieza de las comunidades fototróficas en esta cueva, se podría poner en peligro la conservación de la diversidad biológica, debido a las relaciones existentes entre los diferentes microorganismos que habitan la cueva, y evitaría que pudieran llevarse a cabo otras investigaciones posteriores.

En el proyecto mencionado anteriormente *Estudio sobre el desarrollo, eliminación y limpieza de organismos fototróficos en la Cueva del Tesoro*, uno de nuestros objetivos fue ensayar y proponer los métodos de limpieza más adecuados para la eliminación de las manchas verdes que cubrían las paredes y espeleotemas. A tal fin, los métodos ensayados *in situ* fueron la limpieza con peróxido de hidrógeno (Figura 4), la limpieza con hipoclorito sódico (Figura 5) y una limpieza mecánica con nitrógeno líquido (Figura 6).

La limpieza con peróxido de hidrógeno fue muy efectiva ya que eliminó la comunidad fototrófica y no dejó residuos (Figura 4B). La limpieza efectuada se mantuvo a los dos meses después del tratamiento (Figura 4C).

El tratamiento con hipoclorito sódico resultó igualmente efectivo, en comparación con el tratamiento con peróxido de hidrógeno, manteniéndose durante los dos meses posteriores (Figura 5C), e incluso presentando la roca, después de este periodo, un aspecto más blanco que a la terminación del tratamiento, lo que indicaría que con posterioridad tendría un efecto residual.

El nitrógeno líquido aplicado con pincel suponía una limpieza que combina la eliminación mecánica (por el efecto del pincel) con la congelación de las estructuras biológicas, lo que teóricamente supondría una ventaja. La limpieza con este procedimiento fue mucho menos efectiva que la anterior con peróxido de hidrógeno, ya que no fue capaz de eliminar totalmente las manchas verdes (Figuras 6C y D).

De los ensayos realizados se desprende que los métodos más adecuados para la limpieza y eliminación de las manchas verdes fueron el empleo de peróxido de hidrógeno y de hipoclorito sódico. El primero, de uso preferencial, por su inocuidad. El segundo puede dejar residuos y el olor puede permanecer por un corto periodo de tiempo. Por su complicado transporte y ejecución, así como posible peligrosidad para el aplicador, y por no haber mostrado una mayor efectividad que los otros dos tratamientos, no se recomendó el empleo de nitrógeno líquido. Además, si después de la limpieza se eliminara la iluminación, los puntos tratados no deberían desarrollar nuevas comunidades fototróficas y garantizaría la persistencia de la limpieza.

Con el objetivo de conciliar la conservación de la biodiversidad con la de las pinturas rupestres, en este proyecto se propuso realizar por una parte la limpieza en aquellas zonas cercanas a las pinturas, que podrían perjudicar la preservación del patrimonio cultural y por otra la renovación de la red eléctrica con la instalación de puntos de luz amarilla (LEDs de 2.700°K, 590 nm) para inhibir o reducir el crecimiento de microorganismos fototróficos. Además, se deberían establecer o conservar zonas de biodiversidad lejos del arte rupestre y al mismo tiempo mantener una estrecha vigilancia sobre las condiciones ambientales de la cueva, controlando en lo posible la dispersión de microorganismos.

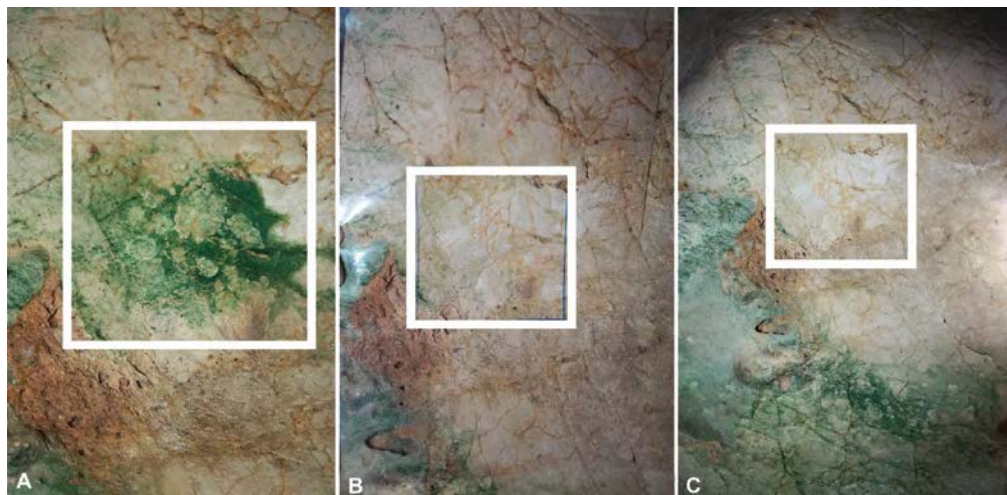


Figura 4. A: Comunidad fototrófica antes del tratamiento con peróxido de hidrógeno. B: Inmediatamente después del tratamiento. C: A los dos meses del tratamiento.

Finalmente, proponemos declarar la Cueva del Tesoro como un reservorio de biodiversidad digno de conservación, siempre que no represente una amenaza para el patrimonio cultural y alentar a los investigadores para que realicen estudios sobre los microorganismos presentes en esta cueva.

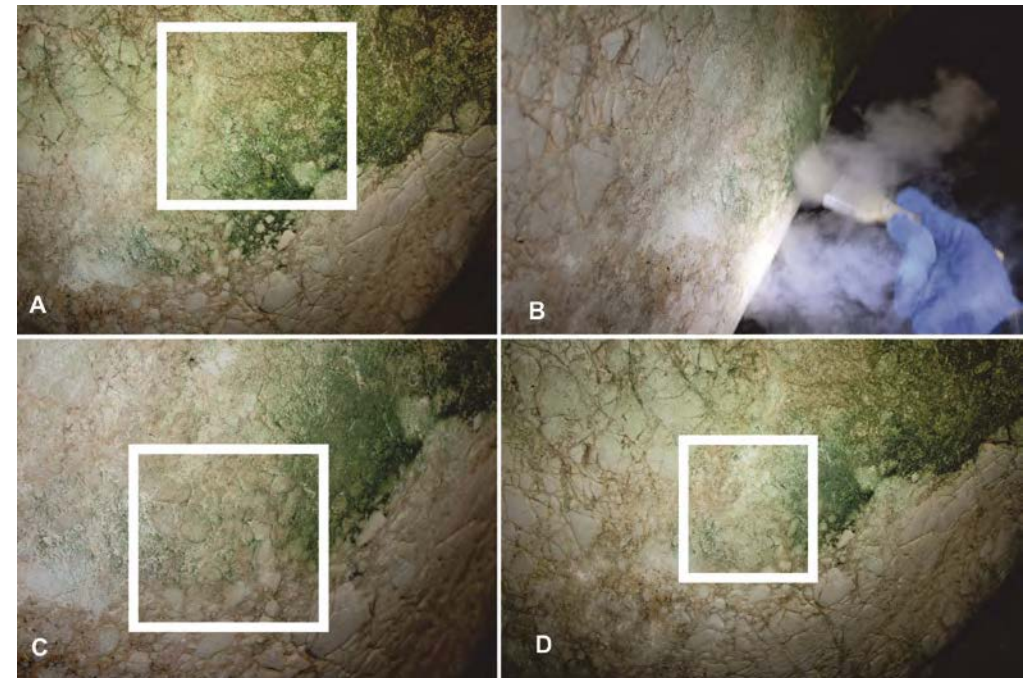


Figura 5. A: Comunidad fototrófica antes del tratamiento con hipoclorito sódico. B: Inmediatamente después del tratamiento. C: A los dos meses del tratamiento. D: A los dos meses del tratamiento.

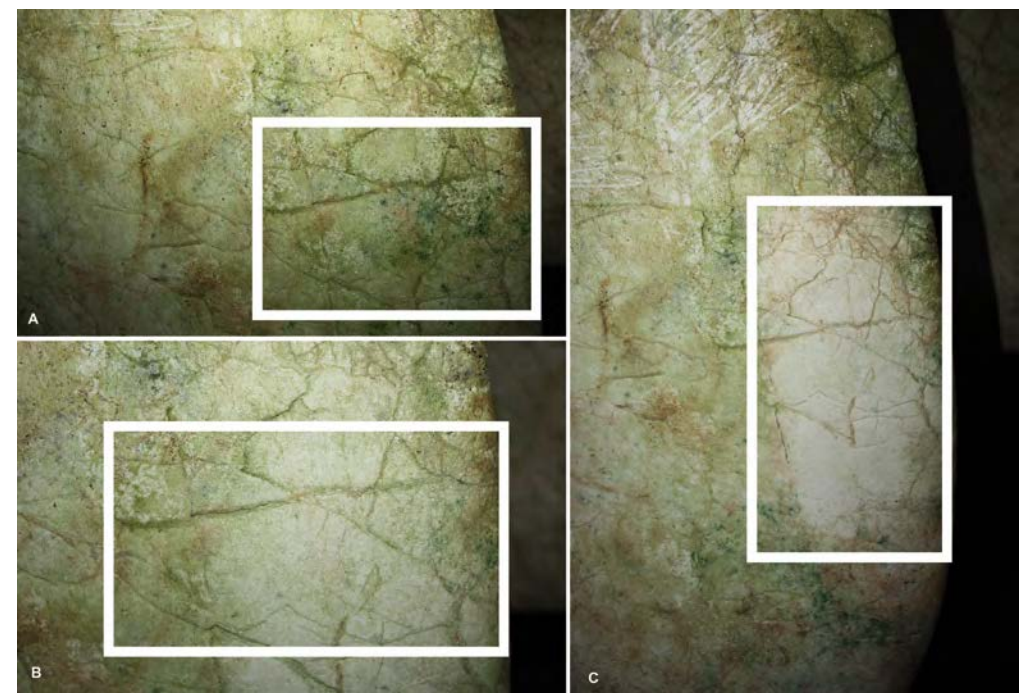


Figura 6. A: Comunidad fototrófica antes del tratamiento con nitrógeno líquido. B: Aplicación del tratamiento. C: Inmediatamente después del tratamiento. D: A los dos meses del tratamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía, código RNM5137 y un contrato del Excmo. Ayuntamiento del Rincón de la Victoria, Málaga.

REFERENCIAS

- Banat, I. M., Franzetti, A., Gandolfi, I., Bestetti, G., Martinotti, M.G., Fracchia, L., Smyth, T. J. y Marchant, R. 2010. Microbial biosurfactants production, applications and future potential. *Applied Microbiology and Biotechnology* 87, 427-444.
- Bastian, F., Alabouvette, C. y Saiz-Jiménez, C. 2009. Impact of biocide treatments on the bacterial communities of the Lascaux Cave. *Naturwissenschaften* 96, 863-868.
- Chang, C. C., Chen, W. C., Ho T-F., Wu, H. S. y Wei, Y. H. 2011. Development of natural anti-tumor drugs by microorganisms. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 111: 501-511.
- Cheeptham, N. y Saiz-Jiménez, C. 2014. New sources of antibiotics: Caves. In: S. Sánchez and A. L. Demain (eds.), *Antibiotics: Current Innovations and Future Trends*: in press. Norwich: Caister Academic Press.
- Docampo S., Trigo M. M., Recio M., Melgar M., García-Sánchez J. y Cabezudo B. 2011 Fungal spore content of the atmosphere of the Cave of Nerja (southern Spain): diversity and origin. *Science of the Total Environment* 409, 835-843.
- Domínguez-Moñino, I., Jurado, V., Hermosín, B. y Saiz-Jiménez, C. 2012. Aerobiología de cuevas andaluzas. En: J. J. Durán y P. A. Robledo (eds.), *Las Cuevas Turísticas como Activos Económicos: Conservación e Innovación*, 299-307. Madrid: ACTE.
- Elliot, W.R. 2006. Biological dos and don'ts for cave restoration and conservation. In: V. Hildreth-Werker y J. Werker (eds). *Cave Conservation and Restoration*, 33-46. Huntville: National Speleological Society.
- Groth, I. y Saiz-Jiménez, C. 1999. Actinomycetes in hypogean environments. *Geomicrobiology Journal* 16, 1-8.
- Groth, I., Schumann, P., Laiz, L., Sanchez-Moral S., Cañaveras, J. C. y Saiz-Jiménez, C. 2001. Geomicrobiological study of the Grotta dei Cervi, Porto Badisco, Italy. *Geomicrobiology Journal* 18, 241-258.
- Harvey, A. 2000. Strategies for discovering drugs from previously unexplored natural products. *Drug Discovery Today* 5, 294-300.
- Herold, K., Gollmick, F. A., Groth, I., Roth, M., Menzel, K. D., Möllmann, U., Gräfe, U. y Hertweck, C. 2005. Cervimycin A-D: a polyketide glycoside complex from a cave bacterium can defeat vancomycin resistance. *Chemistry* 11, 5523-5530.
- Hoyos Gómez, M., Soler Javaloyes, V., Cañaveras Jiménez, J. C., Sanchez Moral, S. y Sanz Rubio, 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*. Madrid: MNCN-CSIC.
- Lamprinou, V., Hernández-Mariné, M., Canals, T., Kormas, K., Economou-Amilli, A. y Pantazidou, A. 2011. Morphology and molecular evaluation of *Iphinoe spelaebios* gen. nov., sp. nov. and *Loriellopsis cavernicola* gen. nov., two stigonematalean cyanobacteria from Greek and Spanish caves. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 61, 2907-2915.
- Lamprinou, V., Skaraki, K., Kotoulas, G., Economou-Amilli, A. y Pantazidou, A. 2012. *Toxopsis calypsus* gen. nov., sp. nov. (*Cyanobacteria, Nostocales*) from cave "Franchi", Peloponnese, Greece: a morphological and molecular evaluation. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 62, 2870-2877.
- Martin-Sanchez, P. M., Nováková, A., Bastian, F., Alabouvette, C. y Saiz-Jiménez, C. 2012a. Two new species of the genus *Ochroconis*, *O. lascauxensis* and *O. anomala* isolated from black stains in Lascaux Cave, France. *Fungal Biology* 116, 574-589.
- Martin-Sanchez, P. M., Nováková, A., Bastian, F., Alabouvette, C. y Saiz-Jiménez, C. 2012b. Use of biocides for the control of fungal outbreaks in subterranean environments: The case of the Lascaux Cave in France. *Environmental Science and Technology* 46, 3762-3770.
- Nováková, A., Hubka, V., Saiz-Jiménez, C. y Kolarik, M. 2012. *Aspergillus baeticus* sp. nov. and *Aspergillus thesauricus* sp. nov.: two new species in section *Usti* originating from Spanish caves. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 62, 2778-2785.
- Roldán, M., Ramírez, M., del Campo, J., Hernández-Mariné, M. y Komátek, J. 2013. *Chalicogloea cavernicola* gen. nov., sp. nov. (*Chroococcales, Cyanobacteria*), from low-light aerophytic environments: combined molecular, phenotypic and ecological criteria. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 63, 2326-2333.
- Saiz-Jiménez, C. 2010. Painted Materials. In: R. Mitchell and C.J. McNamara (eds.), *Cultural Heritage Microbiology*, 3-13. Washington: ASM Press.
- Schirmack, J., Mangelsdorf, K., Ganzert, L., Sand, W., Hillebrand-Voiculescu, A. y Wagner, D. 2014. *Methanobacterium movilense* sp. nov., a hydrogenotrophic, secondary-alcohol-utilizing methanogen from anoxic sediment of a subsurface lake. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 64, 522-527.

Distribución, composición y génesis de espeleotemas silíceos en la cueva volcánica de Algar do Carvão: Terceira, Islas Azores, Portugal

Raquel Daza y María-Ángeles Bustillo

Departamento de Geología. Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC. José Gutiérrez Abascal 2. 28006. Madrid (raquel.daza@mncn.csic.es; abustillo@mncn.csic.es)

RESUMEN

La cueva de Algar do Carvão está situada en la parte central de la isla Terceira (Azores, Portugal), y es la única cueva turística del mundo que presenta grandes espeleotemas formados únicamente de ópalo. La composición opalina de los espeleotemas, y la génesis volcánica, hacen pensar que la fuente de la sílice pueda estar ligada indirectamente a la actividad hidrotermal. Se identifican dentro de la cueva tres tipos de espeleotemas: estalactitas y estalagmitas formadas por agua de goteo, y coladas / recubrimientos de pared formados por agua de escorrentía. Todos los espeleotemas se formaron en ambiente subaéreo. Los análisis de Difracción de Rayos X (DRX) revelaron que la única fase silíceo que forma los espeleotemas es el ópalo-A, por lo que se deduce que son relativamente recientes. Mediante microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM) se observó que los espeleotemas presentan estructura laminada, y una intercalación de microlaminaciones lisas y grumosas constituidas por microesferas de sílice inorgánica, que puntualmente recubren filamentos bacterianos. La fuente de la sílice para la formación de estos espeleotemas no se puede explicar por una simple lixiviación por aguas meteóricas de las rocas volcánicas adyacentes a la cueva. La sílice provendría del ataque de la roca volcánica por aguas ácidas meteóricas poco profundas. La ebullición que sucede en la parte superior de los sistemas geotérmicos, incorpora gases ácidos (CO_2 y H_2S) al vapor resultante, y este, al mezclarse con las aguas meteóricas superficiales produce su acidificación. El principal mecanismo de precipitación del ópalo-A es inorgánico, aunque puntualmente se observa, en ciertas laminaciones, la influencia de bacterias filamentosas.

Palabras clave: cueva volcánica, espeleotema, hidrotermalismo y ópalo-A.

Distribution, composition and genesis of the opal speleothems in the Algar do Carvão volcanic cave (Terceira, Azores Islands, Portugal)

ABSTRACT

The volcanic cave of Algar do Carvão is located in the Terceira Island central part (Azores, Portugal), and it is the unique touristic volcanic cave around the world that present big speleothems formed by opal. The opal composition of the speleothems in a volcanic cave, suggests that the silica origin can be related to hydrothermal activity. Three types of the speleothems have been found inside the cave: stalactites and stalagmites formed by drip water, and big or thin flowstones on the walls formed by runoff water. They are form in subaerial conditions. The Diffraction X-Ray analyses showed opal-A as unique silica phase that form the speleothems, suggesting that they are recently. Optical and Scanning electron microscopes showed laminar structure within the speleothems, and smooth and lumpy microlaminations intercalated between them, and punctually covering the filamentous bacteria. The silica source cannot be explained by a leaching by meteoric water of the adjacent siliceous rocks to the cave. The silica would come from the volcanic rock attack by acid shallow waters. The boiling activity that happens on top of geothermal systems incorporates acid gases (CO_2 y H_2S) to the resulting vapor. This acidifies the shallow meteoric

waters. The opal-A is mainly formed by inorganic precipitation, although sometimes filamentous bacteria tracks are observed in punctual microlaminations of these speleothems.

Keywords: hydrothermal, opal-A, speleothems and volcanic cave.

INTRODUCCIÓN

Los espeleotemas de sílice aunque son poco comunes, se han observado en cuevas de todo el mundo (ver referencias en Hill y Forti, 1997). Aparecen principalmente, en cuevas formadas en rocas constituidas por minerales silicatados, tales como, rocas volcánicas (Webb y Finlayson, 1987; Forti, 2005; Bustillo et al. 2010; Daza et al. 2012; Miller et al. 2014), granitos (Webb y Finlayson, 1987; Willems et al. 2002; Vidal y Vaqueiro, 2007; Cioccale et al. 2008; Vidal et al. 2010), cuarcitas y areniscas (Wray, 1999, 2011; Aubrecht et al. 2008, 2012). Muchos de los espeleotemas de sílice se forman en cuevas de ambientes templados y húmedos, donde se favorece la alteración de los silicatos de las rocas y se producen las soluciones ricas en sílice, formándose pequeños y delgados espeleotemas (Hill y Forti, 1997; Forti, 2005).

En el archipiélago de las islas Azores (Portugal), aparecen estalactitas, estalagmitas, flowstones y vermiculaciones silíceas en tubos de lava, y en chimeneas volcánicas (Forti 2001, 2005). Los espeleotemas de sílice encontrados en la cueva de Algar do Carvão (Isla Terceira) se diferencian, de los citados en las referencias, por presentar un gran volumen y espesor (Forti, 2005). Su localización en una isla con vulcanismo activo reciente (França et al. 2003), plantea la hipótesis de una posible influencia hidrotermal (Daza y Bustillo, 2014) en la formación de estos espeleotemas. En este trabajo se estudian los espeleotemas de la cueva de Algar do Carvão, definiendo los diferentes tipos petrológicos y su génesis.

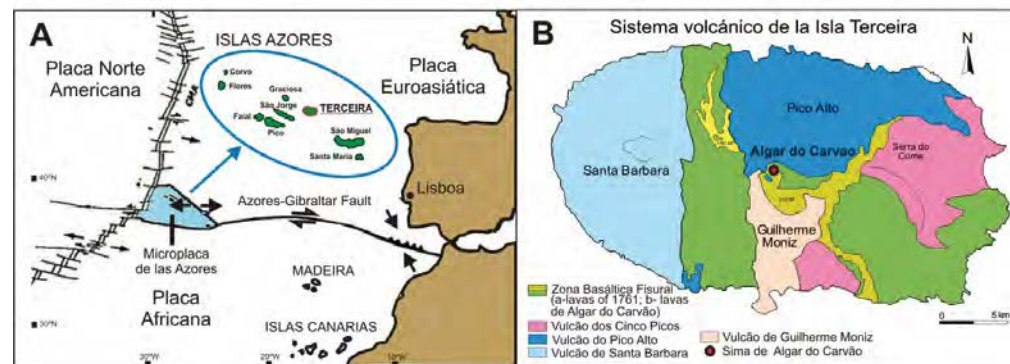


Figura 1. (A) Localización de las Islas Azores en el marco tectónico. (B) Mapa geológico de la Isla Terceira (Nunes, 2000) y localización de la sima de Algar do Carvão.

SITUACIÓN GEOLÓGICA

El archipiélago de las islas Azores está formado por nueve islas de origen volcánico, y se extiende por más de 600 km a lo largo de la Falla Azores-Gibraltar (Figura 1A). Las islas se crearon a partir de la acumulación de productos volcánicos en el fondo oceánico, debido a la conjunción de tres placas tectónicas (França et al. 2003): la placa Americana al NW, la placa Euroasiática al NE y la placa africana al Sur (Figura 1A).

La isla Terceira se sitúa en el centro del archipiélago de las islas Azores, localizado al norte del Océano Atlántico, a unos 1600 km de Europa. Está compuesta por cuatro sistemas volcánicos poligenéticos principales, constituidos por los volcanes de Santa Bárbara, Pico Alto, Serra do Cume-Cinco Picos y Guilherme Moniz, y una Zona

Basáltica Fisural (ZBF) (França et al. 2003; Nunes 2000, 2004) (Figura 1B). Estos sistemas se desarrollaron a lo largo de una gran fisura orientada NW-SE, que atraviesa en diagonal la Isla de Terceira, formándose a partir de ella el Rift de Terceira (Self y Gunn, 1976). Las rocas volcánicas de Terceira comprenden edades del Pleistoceno tardío y del Holoceno (Calvert et al. 2006).

La cueva turística de Algar do Carvão, está situada en la zona central de la Isla de Terceira, a unos 640 m sobre el nivel del mar, emplazada en los flujos de lava de Algar do Carvão dentro de la Zona Basáltica Fisural y cerca de la caldera de Guilherme Moniz (Nunes, 2000) (Figura 1B).

CARACTERÍSTICAS DE LA SIMA ALGAR DO CARVÃO

La cueva de Algar do Carvão se compone de dos partes: 1) la primera corresponde a la parte más antigua de la cueva. Está relacionada con una actividad volcánica de naturaleza silícea, y formada por lavas traquíticas (SiO₂ - 66%) de 3.200 años de edad; y 2) la parte más reciente, la cual, corresponde a una chimenea de un cono volcánico basáltico que estuvo activo aproximadamente hace unos 2.000 años (Forjaz et al. 2004; Nunes et al. 2004), y que se denomina el cono de escorias Algar do Carvão.

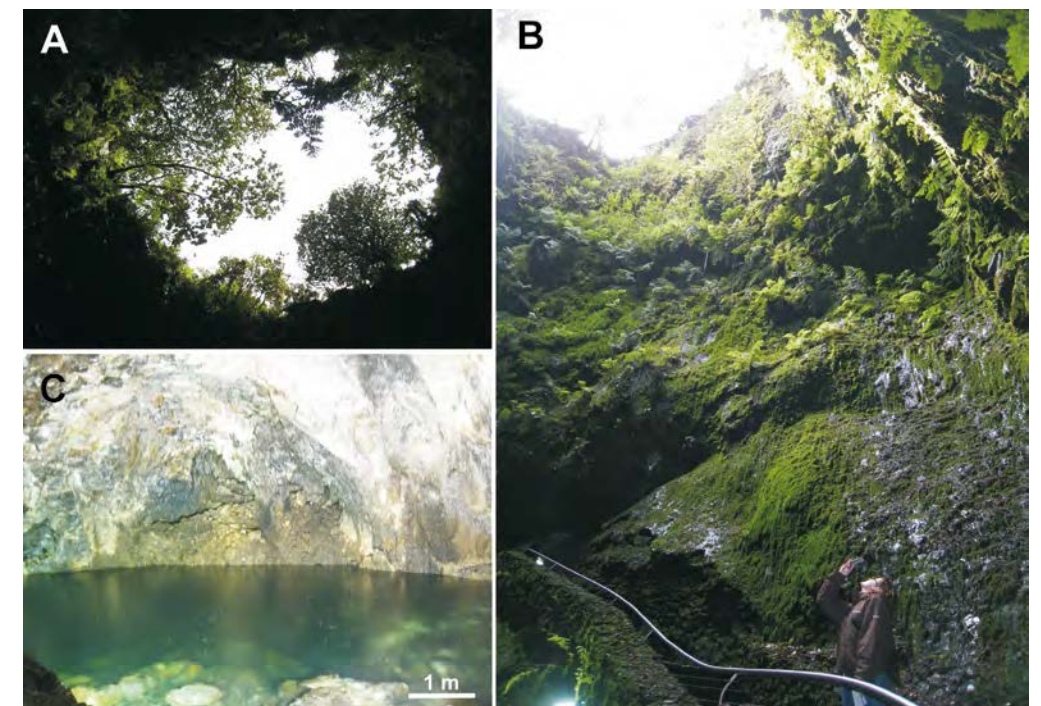


Figura 2. Sima de Algar do Carvão. (A) Apertura de la chimenea, corresponde a la entrada natural de la cueva y presenta unas dimensiones de 17x27 m. (B) Visión general chimenea volcánica de 45 m de la cueva. (C) Lago localizado al fondo de la cavidad.

Este cono produjo una extensa colada lávica, que inundó la caldera de Guilherme Moniz, y se movió hasta la costa sur, y hacia el NE. La apertura de la chimenea corresponde a la boca de la sima, presenta unas dimensiones de 17x27 m (Figura 2A), y prosigue con un conducto vertical de 45 m de desnivel (Figura 2B), correspondiendo a la chimenea volcánica (Figura 2B); a continuación, se desarrolla una rampa, formada por depósitos de gravedad, y finalmente se encuentra otro desnivel en vertical. En total, hay una caída en vertical de 80 m que desemboca en un lago (Figura 2C), que en los meses de lluvia puede alcanzar 15-20 m de profundidad, y en los

meses de verano, quedarse seco (Carvalho et al. 2004). La extensión total horizontal de la cueva es de unos 90 m, incluyendo dos salas abovedadas localizadas por encima del lago.

En la sima de Algar do Carvão, se observan espeleotemas diferentes de gran volumen, englobando, estalactitas (Figura 3A y B), estalagmitas (Figura 3C), y coladas y recubrimientos en las paredes de la cueva (Figura 3D). Las estalactitas y estalagmitas se forman por un goteo casi continuo de aguas de infiltración que pasan a través de fracturas de la roca volcánica. Los recubrimientos se forman por aguas de escorrentía que salen por las grietas y bañan las paredes de la cueva.

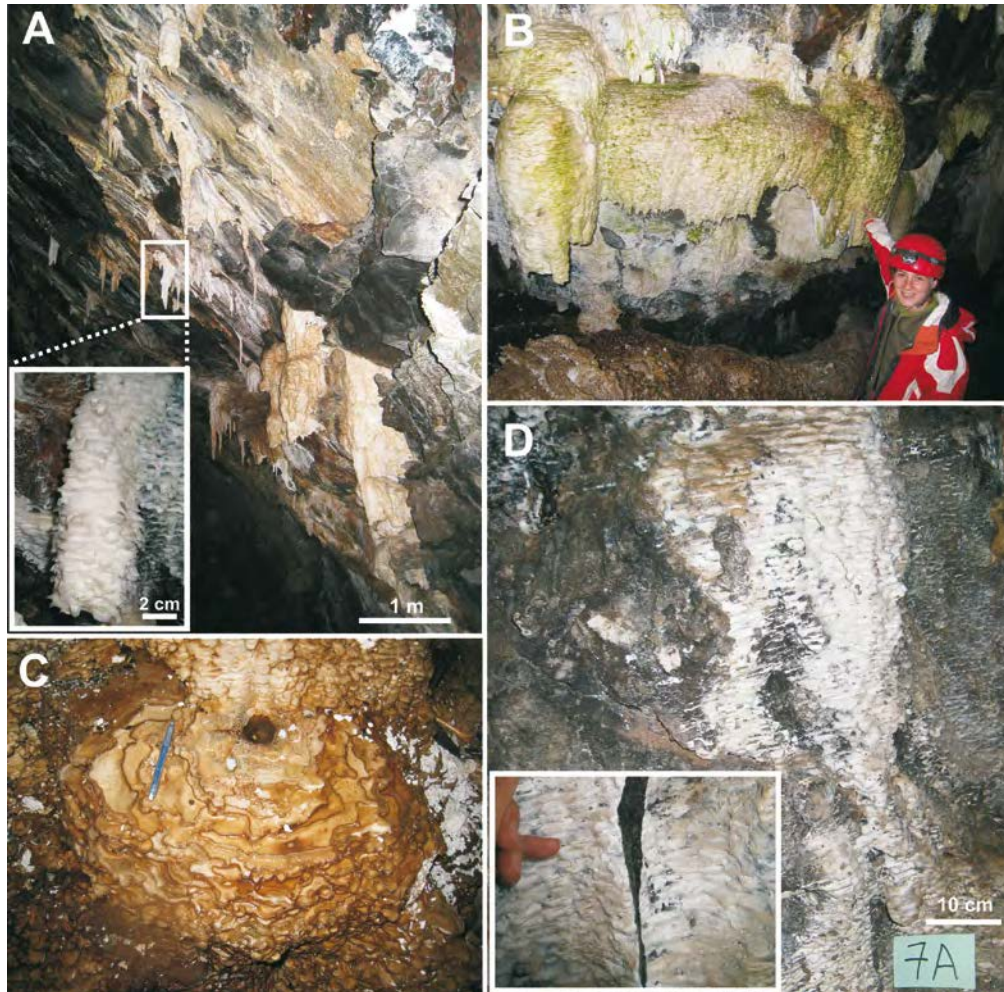


Figura 3. Espeleotemas de la cueva de Algar do Carvão. (A) Estalactitas blancas y ocre que surgen a través de grietas del techo de la cueva, y detalle de una de ellas. (B) Estalactitas blancas en forma de campana. (C) Estalagmita con numerosos gours conocida como la estalagmita de "huevo frito". (D) Recubrimiento (flowstone) de pared de color blanco. Detalle de la superficie.

METODOLOGÍA

Los espeleotemas muestreados corresponden a estalactitas, estalagmitas, coladas y recubrimientos. La mineralogía se obtuvo a partir de análisis de Difracción de Rayos X (DRX), mediante diagramas de polvo total, utilizando un Equipo PHILIPS modelo PW1710, equipado con monocromador de grafito. El estudio petrológico fue realizado por microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM). En SEM, se trabajó sobre fragmentos de muestras metalizadas con oro, con un equipo QUANTA 2000, de la casa FEI, realizándose a la vez análisis químicos puntuales por energía dispersiva (EDS), con un equipo OXFORD Inca.

RESULTADOS

Mineralogía, difracción de Rayos X (DRX)

Los espeleotemas estudiados están formados por ópalo-A (95-100%), pudiendo incluir <5% de minerales accesorios como feldespatos, piroxenos y micas. El ópalo A ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) se caracteriza por presentar una banda prominente entre $15\text{-}30^\circ 2\theta$, con un máximo centrado alrededor de $22^\circ 2\theta$ ($\sim 4 \text{ \AA}$) (Jones y Segnit, 1971), y una anchura total a mitad de la altura (FWHM) que varía entre 6 y $7^\circ 2\theta$, con una media de $6,77^\circ 2\theta$ (Figura 4), lo que determina un ópalo-A desordenado (Herdianita et al. 2000). Dentro de esta banda no se definen otros picos, por lo que no existe ni ópalo-C, ni ópalo-CT, ni cuarzo.

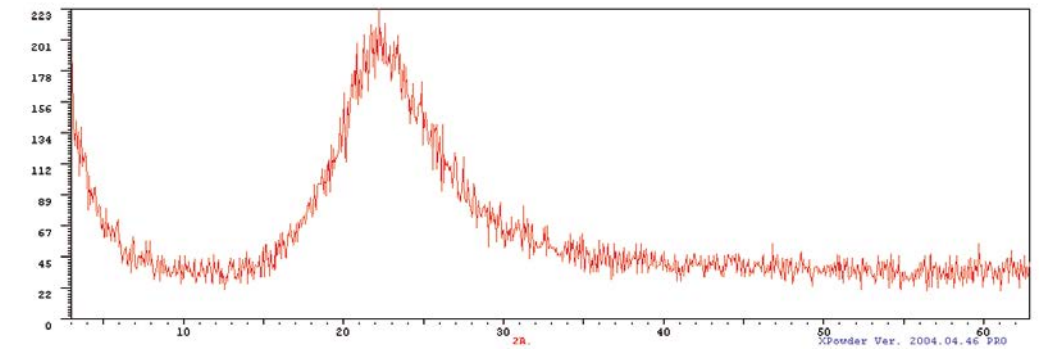


Figura 4. Difractograma de Rayos X donde se observa la estructura de ópalo-A, caracterizada por una banda prominente entre $15\text{-}30^\circ 2\theta$, con un máximo centrado alrededor de $22^\circ 2\theta$ ($\sim 4 \text{ \AA}$) y una anchura total a mitad de la altura (FWHM) entre 6 y $7^\circ 2\theta$.

Estructura a macroescala

Se describen tres tipos de espeleotemas en la cueva: a) estalactitas (Figura 3A y B), de hasta 1 m de longitud y 40-50 cm de diámetro; en este grupo se incluye una variedad de estalactitas en forma de campanas y/o cortinas (Figura 3B), de más 1 m de longitud y más de 50 cm de diámetro, b) estalagmitas de <1 m de diámetro y 50 cm de altura (Figura 3C), y c) coladas y finos recubrimientos de paredes, también conocidos como *flowstones*, con pequeños gours (Figura 3D). Todos los espeleotemas están formados por una intercalación de láminas de 1-3 mm de espesor, de distintas tonalidades de blancos y diferentes grados de transparencia, algunas de ellas son de color blanco mate y otras translúcidas (Figura 5A y B).

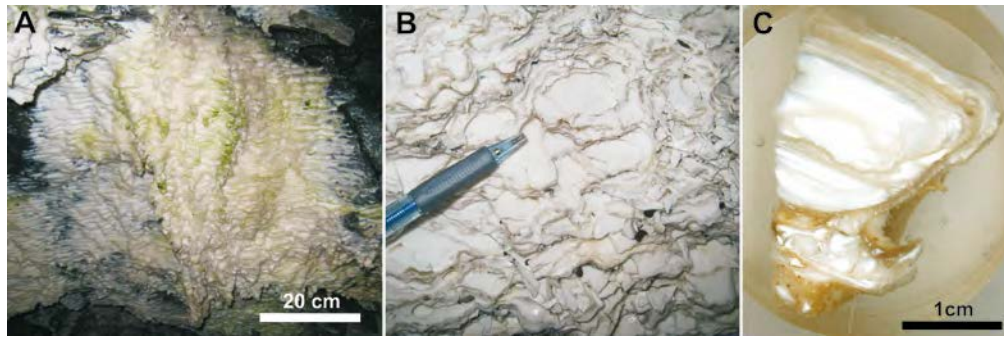


Figura 5. Estructura laminada de los espeleotemas silíceos de Algar do Carvão. (A) Colada formada por laminaciones. (B) Detalle de las laminaciones (1-3 mm de espesor) con distintas tonalidades de blancos. (C) Corte de un gour de estalagmita que presenta laminación planoparalela en su interior.

Estructura a microescala y observaciones en SEM

El estudio petrográfico, realizado en las estalactitas y recubrimientos de la sima de Algar do Carvão, revela una estructura interna definida por finas laminaciones milimétricas y submilimétricas (50-700 μm), alternándose los colores blancos con los pardos. Las laminaciones se disponen de forma plano-paralela (Figura 6A), excepto cuando se forman gours, donde las laminaciones se ondulan (Figura 6B).

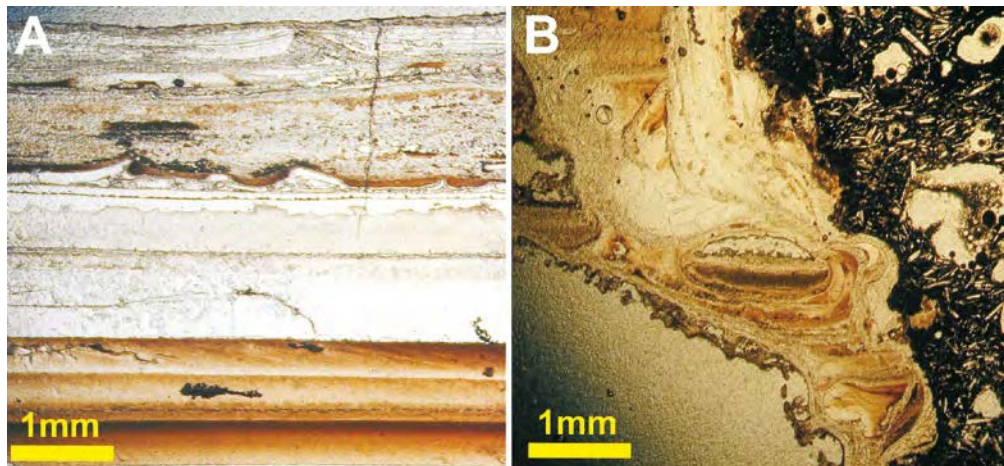


Figura 6. Imágenes de láminas delgadas de los espeleotemas opalinos. (A) Laminaciones planoparalelas (50-700 μm) blancas y pardas de una estalactita opalina, y (B) Laminación ondulada en la formación de un gour de una estalagmita.

Mediante SEM se observa que los espeleotemas estudiados están formados por microesferas de ópalo-A (0.3-0.5 μm de diámetro) que se disponen en microlaminaciones, con aspecto liso o grueso, de unos 5-10 μm de espesor (Figura 7A y B). En ocasiones, las microlaminaciones se adaptan al relieve de la roca volcánica y presentan ondulaciones, igual que en los gours (Figura 7B). Las microlaminaciones más gruesas suelen ser también más porosas y contienen marcas y moldes de filamentos bacterianos (Figura 7C), siendo más escasos o inexistentes en las microlaminaciones de aspecto liso (Figura 7D).

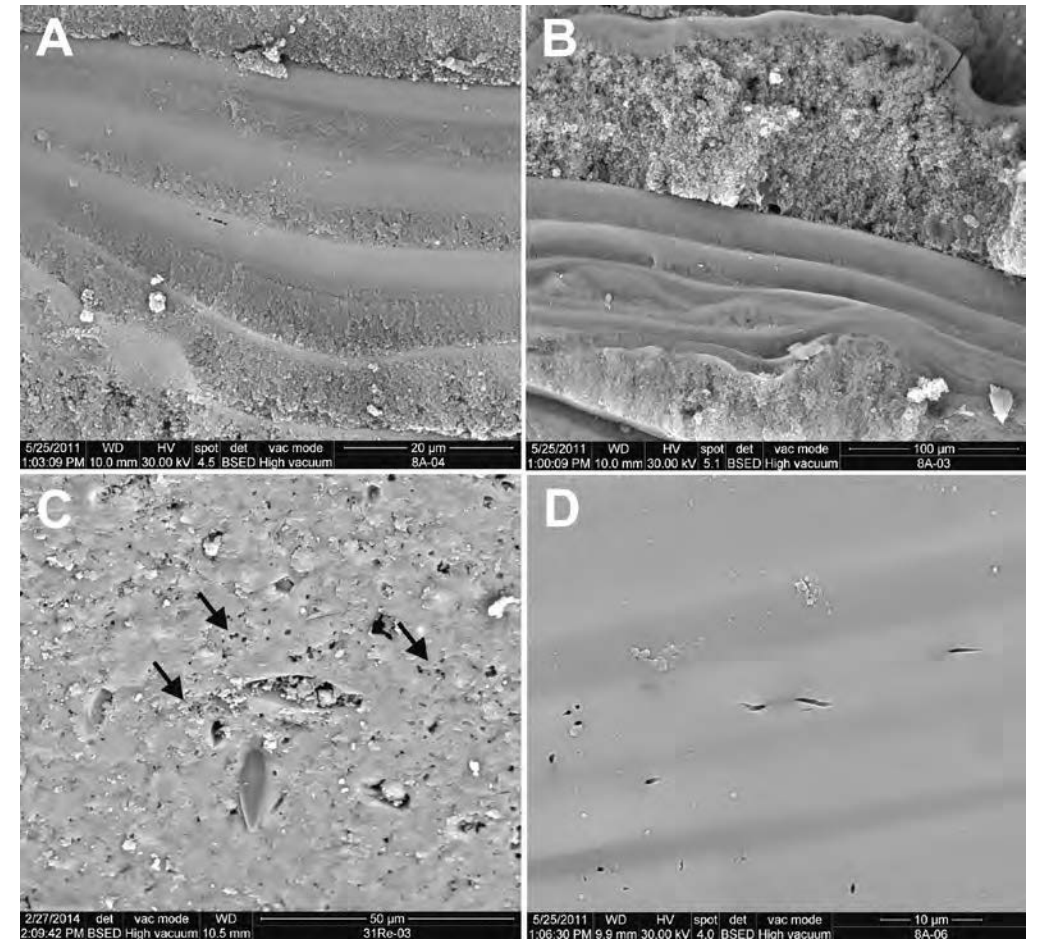


Figura 7. Imágenes SEM de los espeleotemas silíceos de Algar do Carvão. (A) Intercalación de microlaminaciones (5-10 μm) con aspecto liso o grueso, en disposición planoparalela. (B) Ondulación de las microlaminaciones en un gour. (C) Microlaminación gruesa donde se observa huecos esféricos (flechas) correspondientes a secciones transversales de filamentos bacterianos y secciones de diatomeas. (D) Detalle de una microlamina de aspecto liso con escasas evidencias de actividad microbiana.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presencia de ópalo es habitual en los tubos de lava (Hill y Forti, 1997), sin embargo, es menos frecuente que aparezca en gran cantidad. La composición mineralógica indica que la única fase de la sílice es el ópalo-A. Al encontrarse sólo la fase más amorfa de la sílice, sugiere que los espeleotemas no han sufrido casi diagénesis por envejecimiento (Lynne et al. 2008), por lo que se consideran relativamente recientes.

Las estalactitas y estalagmitas de Algar do Carvão presentan ocasionalmente estructuras filamentosas que por la forma y tamaño son interpretadas como moldes de bacterias filamentosas porque solo son marcas. La existencia de filamentos en espeleotemas formados por ópalo-A, ha sido mencionado en algunas ocasiones en cuevas (Willems et al. 2002, Aubrecht et al. 2008, 2012; Miller et al. 2014).

La gran abundancia de sílice que se observa en la cueva no puede explicarse por una simple lixiviación de las rocas volcánicas adyacentes, así que sugiere una fuente de sílice con influencia hidrotermal (Daza, R et al. 2014). El proceso de ebullición que sucede en la parte superior de los sistemas geotérmicos se acompaña de la

transferencia de gases ácidos (CO₂ y H₂S) al vapor resultante. Este vapor, puede penetrar en la superficie como actividad fumarólica, o bien, condensarse en las aguas subterráneas poco profundas, acidificándolas. Estas aguas superficiales ácidas, disolverían los minerales de los suelos y/o rocas volcánicas, provocando un fuerte enriquecimiento en sílice en ellas. Si aceptamos esta hipótesis en el caso de la sima de Algar do Carvão el flujo de agua, cargada en sílice, pasaría a través de las fracturas que hay en la roca de la cueva. Al salir en la cavidad, sufriría un cambio en las condiciones red-ox, y en el pH, que daría lugar a la precipitación general de la sílice. Puntualmente las bacterias existentes en el medio serían englobadas en las fases opalinas precipitadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto CGL-2011- 27826-CO₂-02. La labor investigadora de R. Daza ha sido financiada por la beca JAE-Predoc CSIC del Programa «Junta para la Ampliación de Estudios» cofinanciada por el FSE. Agradecemos a la “Associação Os Montanheiros”, a Fernando Pereira, a Andrea Martín Pérez y a Francisco Sánchez Merino por su colaboración tanto en la logística como en el trabajo de campo. A todo el personal técnico de los laboratorios del MNCN y especialmente a los de los laboratorios de Rx y de técnicas no destructivas, por su ayuda en el estudio mineralógico y de microscopía electrónica.

REFERENCIAS

- Aubrecht, R., Barrio-Amoros, C. L., Breure, A. S. H., Brewer-Carías, C., Derka, T., O. A., F. R., Gregor, M., Kodada, J., Kováčik, L., Lánzos, T., Lee, N. M., Liščák, P., Schlögl, J., Šmída, B. y Vlček, L. 2012. Venezuelan tepuis: their caves and biota. *Acta Geologica Slovaca, Bratislava*, 168 pp.
- Aubrecht, R., Brewer-Carías, C., Šmída, B., Audy, M. y Kováčik, L. 2008. Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstone cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela. *Sedimentary Geology*, 203, 181-195.
- Borges, P., Silva, A. y Pereira, F. 1992. Caves and pits from the Azores with some comments on their geological origin, distribution and fauna. *Proceedings 6th International Symposium on Vulcanospeleology, Hilo, Hawaii*. National Speleological Society, pp. 121-151.
- Bustillo, M., Aparicio, A. y Carvalho, M. 2010. Estromatolitos silíceos en Espeleotemas de la Cueva de Branca Opala (Isla Terceira, Azores). *Macla* 13, 51-52.
- Calvert, A. T., Moore, R. B., McGeehin, J.P. y Rodrigues da Silva, A. M. 2006. Volcanic history and 40Ar/39Ar and 14C geochronology of Terceira Island, Azores, Portugal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156, 103-115.
- Cioccale, M. A., Pasquini, A.I. y Depetris, P. J. 2008. Hallazgo de espeleotemas silíceos en rocas graníticas del batolito de Achala, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Asociación Geológica Argentina*, 63, 417-420.
- Carvalho, M. R., Nunes, J. C. y França, Z. 2004. Controlo hidrogeológico das estalactites siliciosas do Algar do Carvão (Ilha Terceira, Açores). *III Pico Island International Volcanological Meeting, Ilha do Pico, Açores*, Abstract Book, 21-23.
- Carvalho, J. M., Coelho, L., Nunes, J. C. y Carvalho, M. R. 2013. Geothermal Energy Use, Country Update for Portugal. *European Geothermal Congress, Pisa, Italy*, Abstract Book, 11.
- Daza, R., Bustillo, M. A., Carvalho, M. R., Nunes, J. C. y Pereira, F. 2012. Distribución, composición y génesis de depósitos silíceos en la cueva volcánica de Branca Opala (Terceira, Islas Azores). *Geogaceta*, 52, 37-40.
- Daza, R. y Bustillo, M. A. 2014. Exceptional silica speleothems in a volcanic cave: a unique example of silicification and sub-aquatic opaline stromatolite formation (Terceira, Azores). *Sedimentology*, (en prensa).
- Daza, R., Bustillo, M. A., Recio C., Carvalho M. R. y Nunes J. C. 2014. Composición isotópica ($\delta^{18}O$ y δD) de espeleotemas silíceos en las cuevas volcánicas de Algar do Carvão y Branca Opala (Isla Terceira, Azores, Portugal). *Estudios Geológicos* (En prensa, aceptado).

- Ferreira, T. (1994). *Contribuição para o estudo das emanações gasosas associadas a processos de vulcanismo no arquipélago dos Açores*. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 183 pp.
- Forjaz, V. H., Nunes, J. C. y Barcelos, P., 2004. Algar do Carvão volcanic pit, Terceira island (Azores): geology and volcanology. *XIth International Symposium on Vulcanospeleology*, Maio, Madalena, Pico, Abstract Book, 24.
- Forti, P. 2001. Biogenic speleothems: an overview. *International Journal of Speleology*, 30, 39-56.
- Forti, P. 2005. Genetic processes of cave minerals in volcanic environments: An overview. *Journal of Cave and Karst Studies*, 67, 3-13.
- França, Z., Cruz, J. V., Nunes, J. C. y Forjaz, V. H. 2003. Geologia dos Açores: uma perspectiva actual. *Açoreana*, 10, 11-140.
- Herdianita, N. R., Browne, P. R. L. y Rodgers, K. A. 2000. Mineralogical and textural changes accompanying ageing of silica sinter. *Mineralium Deposita*, 35, 48-62.
- Hill, C. A. y Forti, P. 1997. *Cave Minerals of the World*. National Speleological Society Huntsville, Alabama, USA, 463 pp.
- Jones, J. B. and Segnit, E. R. 1971. The nature of opal I. Nomenclature and constituent phases. *Journal of the Geological Society of Australia*, 18, 57-68.
- Lynne, B. Y., Campbell, K. A., Moore, J. y Browne, P. R. L. 2008. Origin and evolution of the Steamboat Springs siliceous sinter deposit, Nevada, U.S.A. *Sedimentary geology*, 210, 11-131.
- Miller, A. Z., Pereira, M. F. C., Calaforra, J. M., Forti, P., Dionísio, A. y Saiz-Jiménez, C. 2014. Siliceous Speleothems and Associated Microbe-Mineral Interactions from Ana Heva Lava Tube in Easter Island (Chile). *Geomicrobiology Journal*, 31, 236-245.
- Nunes, J. C. 2000. Notas sobre a geologia da Ilha Terceira (Açores). *Açoreana*, 9, 205-215.
- Nunes, J. C. 2004. *Atlas Básico dos Açores: Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores, Ponta Delgada*. 60-62.
- Self, S. and Gunn, B. 1976. Petrology, volume and age relations of alkaline and saturated peralkaline volcanics from Terceira, Azores. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 54, 293-313.
- Vidal, J. R., Sanjurjo, J., Vaqueiro, M. and Fernández, D. 2010. Speleothems of Granite Caves. *Comunicações Geológicas*, 97, 71-80.
- Vidal, J. R. and Vaqueiro, M. 2007. Types of granite cavities and associated speleothems: genesis and evolution. *Nature Conservation*, 63, 41-46.
- Webb, J. A. and Finlayson, B. L. 1987. Incorporation of Al, Mg, and water in opal-A-evidence from speleothems[secondary minerals found in caves. *American Mineralogist*, 72, 1204-10.
- Willems, L., Compère, P., Hatert, F., Poulet, A., Vicat, J. P., Ek, C. and Boulvain, F. 2002. Karst in granitic rocks, South Cameroon: cave genesis and silica and taranakite speleothems. *Terra Nova*, 14, 355-362.
- Wray, R. A. L. 1999. Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sydney region, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46, 623-632.
- Wray, R. A. L. 2011. Alunite formation within silica stalactites from the Sydney Region, South-eastern Australia. *International Journal of Speleology*, 40, 109-116.

Aerobiología de la Gruta de las Maravillas

Irene Domínguez-Moñino, Valme Jurado, Bernardo Hermosín y Cesáreo Sáiz-Jiménez

Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IRNAS-CSIC), Avenida Reina Mercedes 10, 41012 Sevilla (idominguez@irnase.csic.es, vjurado@irnase.csic.es, hermosin@irnase.csic.es, saiz@irnase.csic.es)

RESUMEN

La Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva) es una cavidad de interés geológico, que mantiene un régimen anual de visitantes importante. Se consideró de interés realizar un estudio estacional de su aerobiología con el objetivo de conocer la concentración y distribución de las comunidades bacterianas y fúngicas presentes en la cueva, determinar su pauta estacional y el impacto de las visitas. Los análisis realizados indican que mientras algunas especies están presentes a lo largo de las cuatro estaciones del año, como la bacteria *Micrococcus yunnanensis*, los hongos presentan mayor variabilidad no existiendo una especie predominante. Este estudio permite conocer la calidad del aire y comparar los resultados con los obtenidos previamente en otras cuevas visitables.

Palabras clave: aerobiología, bacterias, calidad del aire, Gruta de las Maravillas, hongos.

Aerobiology of the Gruta de las Maravillas

ABSTRACT

*Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva) is a cavity of geological interest, with an important annual regime of visits. We carried out a seasonal study of the cave's aerobiology with the aim of knowing the concentration and distribution of bacterial and fungal communities, and determining their seasonal pattern and visitors' impact. The analysis showed that while some species of bacteria are present along the four seasons, such as *Micrococcus yunnanensis*, the fungi present a higher variability, which means that there is not a predominant species. This study allows us to know the air quality and to compare these results with the ones previously obtained in other touristic caves.*

Keywords: aerobiology, air quality, bacteria, fungi, Gruta de las Maravillas.

INTRODUCCIÓN

La aerobiología es una disciplina científica enfocada al estudio del transporte pasivo de organismos y partículas de origen biológico a través de la atmósfera, según la definición dada por la *International Association of Aerobiology* (IAA), en 1998. Estas partículas aerovagantes comprenden diferentes organismos y sus productos, incluyendo virus, células y esporas de bacterias y hongos, metabolitos asociados (endotoxinas, micotoxinas, etc.), esporas de briofitas y pteridofitas, polen de plantas superiores, ácaros, insectos, etc. (Mandrioli y Ariatti, 2001).

Actualmente, la aerobiología cuenta con diversos campos de aplicación entre los que se encuentra la medicina, fitopatología, polinosis, biodiversidad, conservación del patrimonio cultural, contaminación ambiental, elaboración de modelos predictivos de dispersión de partículas aéreas alérgicas, etc., siendo el área de las alergias el de mayor repercusión.

La aplicación de la aerobiología en cuevas es relativamente reciente (Docampo *et al.*, 2010, 2011, Porca *et al.*, 2011). Las cuevas constituyen un hábitat favorable para el crecimiento de los microorganismos debido a que presentan unas condiciones estables de temperatura y una elevada humedad relativa. Los microorganismos

son capaces de colonizar la superficie de la roca, utilizando una amplia variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, por lo que pueden causar el biodeterioro de los materiales, poniendo en peligro la conservación de la cueva. La alteración de los parámetros ambientales en la cueva, debido a las corrientes de aire o al impacto de las visitas, puede afectar al equilibrio de las comunidades microbianas, influyendo tanto en su concentración como en su composición (Fernandez-Cortes et al., 2011). Por otra parte, un aspecto importante a tener en cuenta, es la presencia en cuevas de bacterias y hongos potencialmente patógenos para la salud humana (Jurado et al., 2010a), que pueden afectar principalmente a personas inmunodeprimidas. Por lo tanto, para garantizar la conservación de las cuevas turísticas y para minimizar los riesgos para la salud derivados de las visitas, es necesario el conocimiento de las comunidades microbianas presentes y de los procesos de dispersión de sus esporas, así como la detección de posibles brotes microbianos.

Se han realizado muy pocos estudios sobre la dispersión aérea de microorganismos en cuevas, y los resultados obtenidos son difícilmente comparables debido a que se han empleado diferentes metodologías. Los trabajos sobre la aerobiología en las Cuevas de Mogao (Dunghuang, China) mostraron la influencia de la temperatura, la humedad relativa y la actividad antropogénica sobre la concentración y la distribución de las bacterias y hongos (Wang et al., 2010a, b). Los estudios del aire de la Cueva de Nerja (Málaga), pusieron de manifiesto la entrada de esporas fúngicas y granos de polen desde el exterior, y el drástico incremento de las esporas de *Aspergillus/Penicillium* como consecuencia del festival de música y danza que se celebra en verano (Docampo et al., 2010, 2011). En cuevas como las de Altamira (Cantabria) y Lascaux (Francia) el turismo masivo ocasionó graves problemas de colonización por microorganismos, por lo que fueron cerradas al público y las visitas se desviaron a las réplicas. Para hacer el seguimiento de los brotes microbianos en estas dos cuevas y en la de Castañar de Ibor (Cáceres), se llevó a cabo un estudio aerobiológico y se propuso una clasificación de las cuevas en cinco categorías según el grado de contaminación por hongos y el riesgo para su conservación y para la salud (Porca et al., 2011).

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio sobre la aerobiología de la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva), ya que se trata de una cavidad de gran interés geológico, que mantiene un importante régimen de visitas, alcanzando los 130.314 visitantes en el año 2011, según los datos proporcionados por los gestores de la cueva. Con este estudio se pretende conocer la diversidad, la concentración y la distribución de las comunidades bacterianas y fúngicas presentes en el aire, determinar si responden a un patrón estacional y evaluar el posible impacto de las visitas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de aerobiología en cinco puntos del interior de la Gruta de las Maravillas (Sala de Las Conchas, Lago 2, Sala del Volcán, Galería de Los Desnudos y Pasillo de salida) y en un punto exterior (Figura 1). Se realizaron cuatro muestreos estacionales durante un ciclo anual, en primavera, verano y otoño de 2011 y en invierno de 2012.

Las muestras fueron tomadas con el sistema Duo SAS (Surface Air System) SUPER 360 (PBI Internacional, Milán, Italia), que permite la recogida de esporas mediante la filtración de un volumen preseleccionado de aire a través de dos cabezales provistos de una serie de orificios. Las esporas impactan directamente sobre placas de Petri que contienen un medio de cultivo que favorecerá el crecimiento de los microorganismos que se deseen cultivar. Tras la incubación de estas placas, las colonias de hongos y bacterias que crezcan podrán ser cuantificadas, aisladas y posteriormente identificadas. El volumen de aire preseleccionado fue de 100 L y las muestras se tomaron por duplicado en cada punto de muestreo para el crecimiento e identificación tanto de hongos como de bacterias. En el caso de los hongos, el medio de cultivo empleado para su cuantificación y aislamiento fue el agar diclorán rosa de bengala cloranfenicol (DRBCA, Merck), ya que el diclorán y el rosa de bengala restringen el diámetro de las colonias de hongos y reducen el crecimiento aéreo, facilitando su recuento (King et al., 1979), y el cloranfenicol inhibe el crecimiento de las bacterias (Beech y Carr, 1955). Para las bacterias se utilizó el agar tripticosa de soja (TSA, BD) suplementado con 50 µg/mL de cicloheximida (Applichem), para inhibir el crecimiento de los hongos (Salkin y Hurd, 1972).

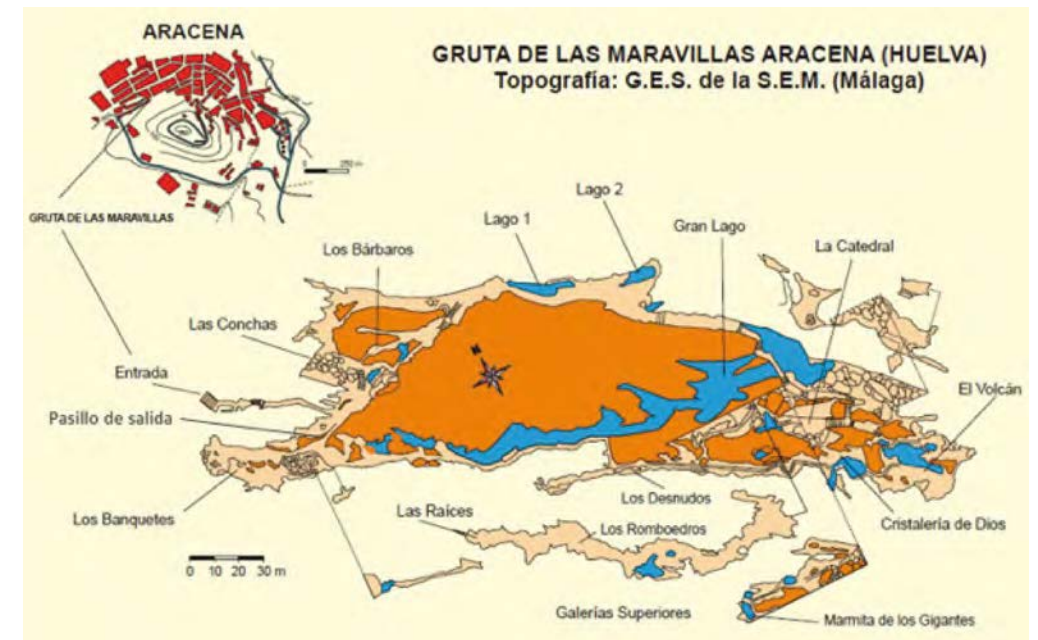


Figura 1. Mapa topográfico de la Gruta de las Maravillas. Fuente: Modificado de Martín-Rosales et al., 2008.

Las placas de Petri fueron incubadas a 25 °C durante cinco días, tras los cuales se realizaron los recuentos de las colonias crecidas y los valores se expresaron como unidades formadoras de colonias (UFC) por metro cúbico de aire, siguiendo las instrucciones del fabricante del sistema DUO SAS SUPER 360. Posteriormente, los hongos fueron aislados y cultivados en medio agar extracto de malta (MEA, BD) y las bacterias en medio TSA.

Los métodos moleculares utilizados para la extracción de ADN, su amplificación mediante la reacción en cadena de la polimerasa, su secuenciación y el posterior análisis filogenético han sido previamente descritos en el caso de los hongos (Jurado et al., 2010b) y en el de las bacterias (Jurado et al., 2005). Los hongos se identificaron mediante la secuenciación de la región ITS (*Internal Transcribed Spacer*) comprendida entre la subunidad pequeña y grande del ARN ribosómico 18S y 28S, respectivamente (ITS1 e ITS2) (Jurado et al., 2010b). La determinación del grado de similitud entre estos hongos y las especies descritas hasta el momento, se llevó a cabo usando el algoritmo BLAST en la base de datos del NCBI (*National Centre for Biotechnology Information*, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>). En el caso de las bacterias se amplificó el gen del ARNr 16S (Jurado et al., 2005) y se empleó el servidor EzTaxon-e (<http://eztaxon-e.ezbiocloud.net>; Kim et al., 2012) para la identificación filogenética.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de las concentraciones de bacterias aisladas a partir de muestras de aire mostró la existencia de un patrón estacional similar en las cinco salas de la Gruta de las Maravillas, que era diferente al del exterior. En general, las menores concentraciones en el aire del interior de la cueva se encontraron en verano y las superiores en otoño, excepto en primavera en Lago 2, donde se registraron los valores más elevados para esta sala (Figura 2A).

La diversidad bacteriana encontrada en el aire de la cueva estaba englobada dentro de los filos *Actinobacteria*, *Proteobacteria*, *Firmicutes* y *Bacteroidetes*. En cuevas, el filo *Proteobacteria* representa la mayor parte de las bacterias, cuando se usan técnicas moleculares para su identificación, en cambio, cuando se emplean métodos de cultivo la mayoría de las bacterias aisladas corresponden a *Actinobacteria* (Jurado et al., 2010a).

La abundancia de *Actinobacteria* en las cuevas sugiere que se trata de un hábitat particularmente favorable para este grupo de microorganismos, los cuales son capaces de adaptarse a bajas temperaturas y a condiciones oligotróficas. Estas bacterias están implicadas en el biodeterioro de pinturas rupestres en cuevas (Schabereiter-Gurtner et al., 2002a, b, 2004) y en pinturas murales en otros ambientes hipógeos (Díaz-Herraiz et al., 2013, 2014). Por otra parte, constituyen una fuente de sustancias bioactivas derivadas de su metabolismo secundario, como antibióticos y sustancias con actividad antitumoral, antiviral, inmunológica y agrobiológica (herbicida) (Jurado et al., 2010a).

En la Gruta de las Maravillas, dentro del filo *Actinobacteria* se identificaron especies pertenecientes a 17 géneros distintos, entre ellos *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Kocuria*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Rhodococcus* y *Streptomyces*, los cuales habían sido anteriormente descritos en cuevas. Todos estos géneros, excepto *Micrococcus*, no mostraron un patrón relevante, pudiéndose encontrar ocasionalmente en cualquier sala, a lo largo de las cuatro estaciones.

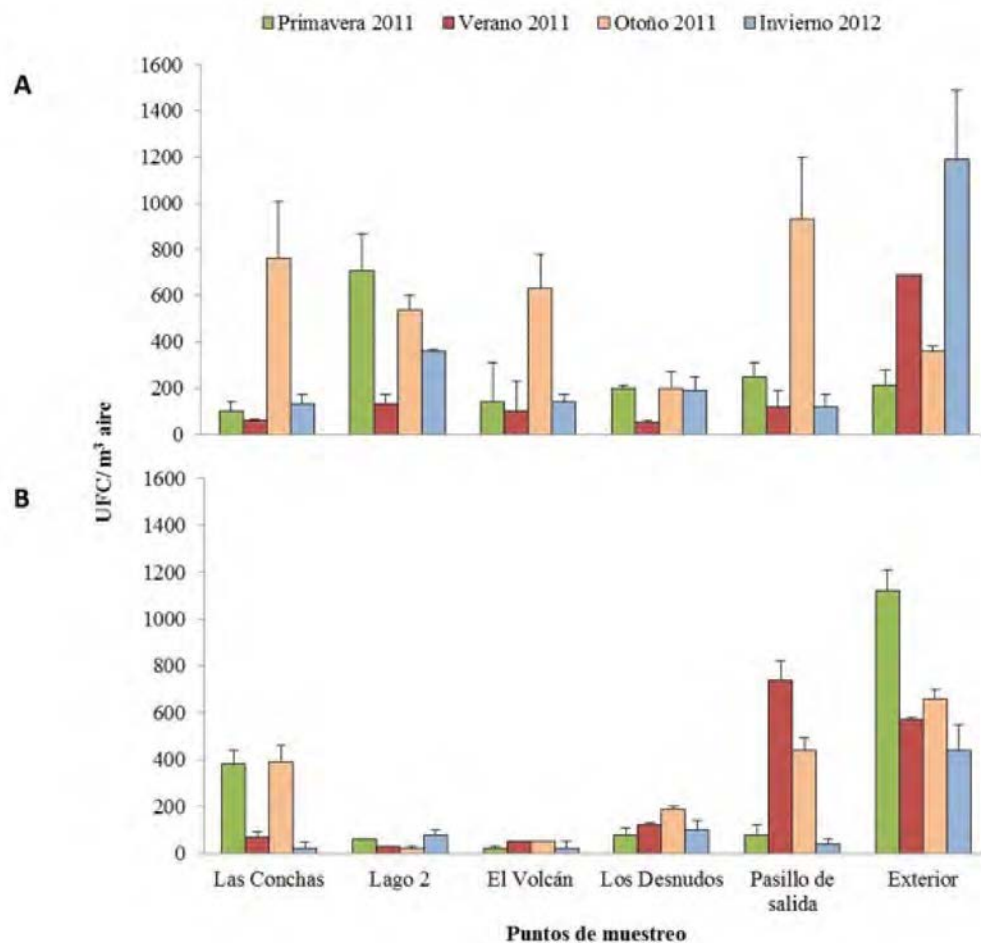


Figura 2. Unidades formadoras de colonias por metro cúbico de aire y desviación típica de las bacterias (A) y hongos (B) cuantificadas a partir de las muestras de aerobiología tomadas en cinco salas de la Gruta de las Maravillas y en un punto exterior de la cavidad, en las cuatro estaciones del año durante un ciclo anual.

El género *Micrococcus* es uno de los más frecuentes entre las bacterias aerovagantes cultivables. En la Gruta de las Maravillas la especie predominante en casi todas las salas de la cueva en todas las estaciones del año fue *Micrococcus yunnanensis*, llegando incluso a representar el 92% de las especies identificadas en verano en Lago 2. También estaba presente en el aire exterior donde, por lo general, no fue la especie más abundante, salvo en otoño. Esta bacteria también ha sido identificada en muestras de agua de la Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca) (Busquets et al., 2014). Además, en el aire de la Gruta de las Maravillas, se encontraron otras especies de este género, como *M. antarcticus*, *M. terreus* y *M. luteus*. Esta última se ha descrito previamente en otras cuevas como Ardales (Málaga) (Fernandez-Cortes et al., 2011), Altamira y Castañar de Ibor (Porca, 2011). La gran abundancia de *M. yunnanensis* y la presencia de otras especies del género *Micrococcus* en la Gruta de las Maravillas podrían explicarse por su gran versatilidad para colonizar ambientes extremos, que se debe a que poseen material genético extracromosomal, que difiere entre las distintas cepas, y que les confiere resistencia a antibióticos, tolerancia a metales pesados y a compuestos orgánicos tóxicos, capacidad de metabolizar un amplio rango de sustratos, incluyendo piridinas, colesterol, ácido benzoico, etc. (Dib et al., 2013). Por otra parte, estas bacterias han desarrollado diversas estrategias de adaptación, dependiendo de la cepa, entre ellas: producción de antibióticos; producción de exopolisacáridos y pigmentos, que les confieren protección; e incremento en la concentración de ácidos grasos insaturados y *anteiso* como estrategia de adaptación a bajas temperaturas. Por ejemplo, *M. yunnanensis* tiene un alto porcentaje de ácidos grasos *anteiso*-C_{15:0} y *anteiso*-C_{17:0}, lo que le permite crecer a bajas temperaturas (Antony et al., 2012).

Por lo general, las especies de *Micrococcus* son consideradas como inocuas para la salud humana, sin embargo, pueden comportarse en ocasiones como patógenos oportunistas, principalmente en personas inmunodeprimidas. Por otra parte, su material genético extracromosomal constituye un reservorio de genes de resistencia a antibióticos, que pueden ser transferidos a especies de bacterias patógenas, con el consiguiente riesgo desde el punto de vista médico (Dib et al., 2013).

Las especies del género *Micrococcus* resultan muy interesantes para la industria farmacéutica y biotecnológica, por una parte, por su capacidad de producir enzimas, compuestos bioactivos, antibióticos y otros metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana, y por otra parte, porque algunas cepas llevan a cabo procesos de degradación y biorremediación, gracias a su capacidad de catabolizar un amplio rango de compuestos xenobióticos perjudiciales, como piridinas, insecticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, colorantes, herbicidas, etc. (Dib et al., 2013).

Entre las bacterias identificadas pertenecientes al filo *Proteobacteria* se incluían representantes de *Alpha*-, *Beta*- y *Gamma-Proteobacteria*, agrupados en 16 géneros distintos. Entre estos géneros encontramos *Brevundimonas*, *Pseudomonas* y *Acinetobacter*, que son ubicuos en la naturaleza y, que algunas de sus especies pueden comportarse como patógenos oportunistas. Este es el caso de *B. diminuta*, *A. lwoffii*, *A. johnsonii*, *A. haemolyticus* y *P. stutzeri*, que han sido identificadas en el aire de la Gruta de las Maravillas. *A. lwoffii* fue además aislada en Castañar de Ibor y Altamira, *A. johnsonii* en Lascaux y *P. stutzeri* en estas tres cuevas (Porca, 2011). *A. ursingii*, fue encontrada en la Galería de Los Desnudos en invierno, la cual ha sido descrita como un importante patógeno oportunista, y no había sido anteriormente aislada a partir de muestras medioambientales (Máder et al., 2010). *Brevundimonas* sp. estaba presente en todas las salas de la cueva en invierno, y en la Galería de los Desnudos en primavera y otoño, sin embargo, no se encontró en el aire exterior. Previamente había sido identificada en la Cueva de las Estalactitas (situada a 75 metros de la Cueva de Altamira) (Porca, 2011). *Prolinoborus fasciculus* estaba distribuida en varias salas en primavera, otoño e invierno. Esta bacteria es capaz de degradar el fenol, que es uno de los mayores contaminantes tóxicos en las aguas residuales industriales, por lo que esta bacteria resulta interesante para la biorremediación (Tambekar et al., 2014).

Los miembros del filo *Firmicutes* encontrados en el aire de la Gruta de las Maravillas estaban representados por once géneros distintos, entre ellos *Aerococcus*, *Bacillus* y *Staphylococcus*. *Aerococcus urinaeequi* se encontró en las cuatro estaciones en distintas salas de la cueva, excepto en la Galería de Los Desnudos, y en otoño estaba presente además en el aire del exterior. Esta especie se encuentra por lo general sobre la vegetación, por lo

que puede proceder del exterior. La presencia de *Bacillus* spp. y *Staphylococcus* spp. en las cuevas se considera un indicador del impacto humano (Lavoie y Northup, 2006).

En el Pasillo de salida en otoño se identificó *Empedobacter brevis*, miembro del filo *Bacteroidetes*. Esta especie está ampliamente distribuida en el ambiente (suelo, agua, hierba), y en el entorno hospitalario, pudiendo originar ocasionalmente infecciones nosocomiales.

Por otra parte, en la Gruta de las Maravillas se ha descrito una nueva especie bacteriana, que ha sido denominada tentativamente como *Bacillus speluncae*, y otra cepa está siendo estudiada como una posible nueva especie, con asignación inicial al género *Ketogulonicigenium*.

En el caso de los hongos presentes en el aire de la Gruta de las Maravillas, en general, las mayores concentraciones se encontraron en la Sala de Las Conchas y en el Pasillo de salida (Figuras 2B), que son las zonas de la cavidad más próximas a la entrada y, por tanto, las que mayor influencia reciben del exterior. Las corrientes de aire pueden transportar e introducir en la cueva esporas fúngicas y materia orgánica procedentes del exterior. En la Sala de Las Conchas las concentraciones de esporas fúngicas siguen el mismo patrón estacional que en el exterior, lo que refuerza la influencia que tiene el aire exterior en las condiciones de la cavidad.

En concreto, las concentraciones de hongos más elevadas se registraron en el Pasillo de Salida, en el muestreo correspondiente a la campaña de verano, con 740 ± 80 UFC/m³ de aire, siendo incluso superiores a las encontradas fuera de la cavidad. Esto puede explicarse por la escasa ventilación de la cueva en esta época del año debido a que las temperaturas son más elevadas en el exterior (Martín-Rosales et al., 2010), junto con el hecho de que se trata de una galería de dimensiones relativamente pequeñas. En la Sala de Las Conchas, el gran volumen de la sala contribuye a que se produzca un efecto de dilución de las esporas fúngicas y, por tanto, a que haya un menor impacto debido a la falta de ventilación de la cueva.

En Lago 2 y en la Sala del Volcán se encontraron las menores concentraciones de hongos en casi todas las estaciones, seguidos por la Galería de los Desnudos (Figuras 2B). Esto puede deberse a varios factores: las grandes dimensiones de estas salas, la menor influencia del exterior al encontrarse más alejadas de la entrada y la presencia de masas de agua en Lago 2 y la Sala del Volcán, las cuales amortiguan los cambios de temperatura y como consecuencia la influencia de ésta sobre las concentraciones de microorganismos.

El análisis de los hongos que mayor abundancia presentaban en las distintas salas no mostró la existencia de ninguna especie o género predominante, como ocurría en el caso de bacterias, encontrándose una mayor diversidad entre los hongos más abundantes.

Encontramos grandes concentraciones de hongos entomopatógenos y/o entomófilos, representados por *Metacordyceps chlamydosporia*, *Simplicillium* sp., *Engyodontium album*, *Aspergillus versicolor* y *Cladosporium cladosporioides*, aunque los dos últimos son ubicuos. La abundancia y perfil de este tipo de hongos coincide con los encontrados en otras cuevas andaluzas, como la Cueva de Ardales y la Cueva del Tesoro (Rincón de la Victoria, Málaga) (Domínguez-Moñino et al., 2012) y refuerza el papel que juegan los artrópodos en la dispersión de hongos, anteriormente descrito en la Cueva de Lascaux (Bastian et al., 2009) y en otros ambientes subterráneos (Jurado et al., 2008).

Metacordyceps chlamydosporia aparecía distribuido a lo largo de todas las salas de la cueva, dependiendo de la estación del año, excepto en invierno. Era la especie más abundante en primavera y otoño en la Sala de Las Conchas, correspondiendo con las épocas del año en las que se registraron las mayores concentraciones de hongos en esta sala. También fue uno de los hongos con mayor abundancia en las distintas salas de la Cueva del Tesoro en primavera, verano y otoño, no encontrándose en invierno (datos no publicados). Se trata del teleomorfo de *Pochonia chlamydosporia*, que era una de las especies con mayor abundancia en la Cueva de Castañar de Ibor (Porca et al., 2011).

Engyodontium album está relacionado con arañas y ácaros. Se encuentra normalmente en ambientes interiores y se ha aislado de pinturas murales y otros ambientes subterráneos, como catacumbas (Jurado et al., 2008) y en la Cueva de Lascaux (Bastian et al., 2009). Es considerado un patógeno oportunista inusual.

El género *Simplicillium* crece sobre diversos sustratos, y comprende especies fungícolas, entomopatógenas y algunas parásitas de quistes y huevos de nemátodos (Zare y Gams, 2001). *Simplicillium* sp. fue el hongo predominante en invierno en todas las salas de la cueva de las que se tomaron muestras, excepto en Las Conchas. La abundancia de este hongo en invierno puede deberse a que algunas de sus especies son parásitas de larvas y pupas de lepidópteros (Zare y Gams, 2001), coincidiendo con el hecho de que la mayoría de especies de lepidópteros entran en estado de letargo en la época invernal, generalmente en forma de oruga o de pupa y, en menor medida, en forma de huevo. En cuevas se han encontrado especies de lepidópteros troglófilas (pueden completar su ciclo de vida dentro o fuera de la cueva) y troglógenas (pueden vivir temporalmente en ambientes hipógeos). En las cuevas de Los Chorros y El Farallón (Albacete) se han registrado varios ejemplares de lepidópteros en estado de letargo en invierno y verano (Pérez Fernández et al., 2012). *Simplicillium* sp. también fue identificada en la Cueva del Tesoro en verano (Domínguez-Moñino et al., 2012).

El género *Cladosporium* es uno de los más frecuentes en ambientes exteriores, por lo que su presencia en el interior generalmente se atribuye a su transporte a través de las corrientes de aire desde fuera (Fernandez-Cortes et al., 2011). Esto concuerda con la presencia de *Cladosporium* sp. en la Sala de Las Conchas y en la Sala del Volcán en primavera, y *C. cladosporioides* en Las Conchas en verano, coincidiendo con que eran las especies más abundantes en el aire exterior de la cueva, respectivamente. *C. cladosporioides* había sido descrito anteriormente en otras cuevas como Lascaux (Bastian et al., 2009), Altamira (Jurado et al., 2009) y Ardales (Fernandez-Cortes et al., 2011). En primavera en la Sala del Volcán se identificó *Davidiella tassiana*, el teleomorfo de *Cladosporium herbarum*, especie cosmopolita, endófitica de plantas, que se ha encontrado asociada a diversos sustratos, y que también estaba presente en el aire de la Cueva del Tesoro (Domínguez-Moñino et al., 2012).

Una de las especies más abundantes en primavera en la Sala del Volcán fue *Aspergillus versicolor*, que ha sido identificado anteriormente en la Cueva de Lascaux (Bastian et al., 2009) y aislado de pinturas murales del Monasterio de la Rábida (Jurado et al., 2008).

Por otra parte, se han identificado especies del género *Penicillium* en primavera en la Galería de los Desnudos y en verano en esta sala y en la Sala del Volcán. Generalmente, se ha considerado que *Penicillium* y *Aspergillus* tienen su origen en ambientes interiores y, tanto sus esporas como fragmentos de sus hifas son capaces de producir efectos adversos sobre la salud humana, que abarcan un amplio rango de enfermedades respiratorias y otras patologías, incluyendo alergias y aspergilosis. Ambos géneros representan los tipos de esporas fúngicas más abundantes en el aire de la Cueva de Nerja (Docampo et al., 2010).

En verano, en la Sala del Volcán se identificó *Ochroconis constricta*. Los miembros del género *Ochroconis* son hongos dematiáceos ampliamente distribuido en el suelo, el aire y en la materia orgánica en descomposición, con algunas especies capaces de causar enfermedades en humanos. Se identificaron especies de este género procedentes de las manchas negras de la Cueva de Lascaux (Martin-Sanchez et al., 2012).

Hay que remarcar la presencia de levaduras de los géneros *Trichosporon*, *Cryptococcus*, *Tilletiopsis* y *Rhodotula*, que comprenden algunas especies patógenas de humanos, como es el caso de *Cryptococcus diffluens*, encontrado en Lago 2 en invierno y en el Pasillo de salida en verano. Algunos autores relacionan la presencia de levaduras en las cuevas con la frecuentación de personas y animales (Vaughan-Martini et al., 2000). Se han aislado especies de *Trichosporon* y *Cryptococcus* procedentes de guano de murciélago en cuevas en Japón (Sugita et al., 2005). En la Cueva de Ardales se ha aislado *Trichosporon* a partir de muestras de excrementos (Stomeo, 2008). *Trichosporon moniliiforme* era la especie más abundante en la Sala de Las Conchas en verano, que también fue identificada en el aire de la Cueva de Castañar de Ibor (Porca, 2011). Las especies del género *Tilletiopsis* son comúnmente citadas como constituyentes de la microflora del filoplano, especialmente en hojas

infectadas por el mildiu pulverulento, teniendo algunas de estas especies interés como agentes de control biológico de otros hongos (Urquhart *et al.*, 1994). *Rhodotorula* spp. son levaduras saprofitas ubicuas, que pueden proceder de diversos tipos de ambientes, incluso de ecosistemas con condiciones desfavorables. Se ha encontrado *Rhodotorula mucilaginosa* en muestras de suelo de la Cueva de Castañar de Ibor (Jurado *et al.*, 2010b) y en muestras de lodo en dos grutas italianas (Vaughan-Martini *et al.*, 2000).

Cadophora malorum fue identificada en invierno en la Sala de Las Conchas. Este hongo puede encontrarse en el suelo, colonizando madera o como patógeno de plantas. *Peniophora limitata* se encontró en otoño en el Pasillo de salida, y ha sido descrito como un basidiomiceto saprófito de plantas. La presencia de estos dos hongos en la cueva puede deberse a su transporte desde el exterior. Lo mismo ocurre con *Oxyporus latemarginatus*, que fue aislado en Las Conchas y en el Volcán en otoño, coincidiendo con que era la especie más abundante en el aire exterior. *O. latemarginatus* es un basidiomiceto patógeno de plantas, capaz de colonizar madera y raíces en descomposición, y de producir compuestos volátiles con actividad antifúngica, por lo que tiene gran interés como agente de control biológico frente a otros hongos fitopatógenos (Lee *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

Las concentraciones de microorganismos encontradas en la Gruta de las Maravillas son relativamente bajas, a pesar de la gran afluencia de visitantes que recibe, debido a las grandes dimensiones de la salas y a las labores de limpieza periódicas. No se pudo evaluar el efecto de las visitas sobre las concentraciones de los microorganismos, ya que no se realizó ningún muestreo en ausencia de público debido a la continua afluencia de visitantes a la cueva.

Las concentraciones de bacterias seguían un patrón estacional similar en las distintas salas de la cueva que difería del exterior, encontrándose, por lo general, las menores concentraciones en verano y las más elevadas en otoño. En el caso de los hongos, las salas más próximas a la entrada de la cueva presentaban un patrón estacional similar al encontrado en el exterior, debido a la introducción de esporas fúngicas transportadas por el aire. En cuanto a la diversidad bacteriana, encontramos que *Micrococcus yunnanensis* es la especie predominante en el aire de la cueva, mientras que entre los hongos más abundantes no se encontró una especie o género predominante. Cabe destacar la abundancia de hongos entomopatógenos, poniendo en evidencia el papel que juegan los artrópodos en la dispersión de esporas fúngicas.

La Gruta de las Maravillas, y las cuevas en general, constituyen reservorios de cepas y especies de microorganismos con características interesantes para la industria biotecnológica y farmacológica, y de especies que aún no han sido descritas.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido cofinanciado por el programa operativo FEDER de Andalucía 2007-2013, y por el Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía, código RNM5137. La participación de CSJ y VJ es a través del proyecto CSIC 201230E125.

REFERENCIAS

- Antony, R., Krishnan, K. P., Laluraj, C. M., Thamban, M., Dhakephalkar, P. K., Engineer, A. S. y Shivaji, S. 2012. Diversity and physiology of culturable bacteria associated with a coastal Antarctic ice core. *Microbiological Research*, 167, 372-380.
- Bastian, F., Alabouvette, C. y Saiz-Jiménez, C. 2009. The impact of arthropods on fungal community structure in Lascaux Cave. *Journal of Applied Microbiology*, 106, 1456-1462.
- Beech, F. W. y Carr, J. G. 1955. A survey of inhibitory compounds for the separation of yeasts and bacteria in apple juices and ciders. *Journal of General Microbiology*, 12, 85-94.

- Busquets, A., Fornós, J. J., Zafra, F., Lalucat, J. y Merino, A. 2014. Microbial communities in a coastal cave: Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca, Western Mediterranean). *International Journal of Speleology*, 43 (2), 05-216.
- Díaz-Herraiz, M., Jurado, V., Cuezva, S., Laiz, L., Pallecchi, P., Tiano, P., Sanchez-Moral, S. y Saiz-Jiménez, C. 2013. The actinobacterial colonization of Etruscan paintings. *Scientific Reports*, 3, 1440. doi: 10.1038/srep01440.
- Díaz-Herraiz, M., Jurado, V., Cuezva, S., Laiz, L., Pallecchi, P., Tiano, P., Sanchez-Moral, S. y Saiz-Jiménez, C. 2014. Deterioration of an Etruscan tomb by bacteria from the order *Rhizobiales*. *Scientific Reports*, 4, 3610. doi: 10.1038/srep03610.
- Dib, J. R., Liebl, W., Wagenknecht, M., Farías, M. E. y Meinhardt, F. 2013. Extrachromosomal genetic elements in *Micrococcus*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97, 63-75.
- Docampo, S., Trigo, M. M., Recio, M., Melgar, M., García-Sánchez, J., Calderón-Ezquerro, M. C. y Cabezudo, B. 2010. High incidence of *Aspergillus* and *Penicillium* spores in the atmosphere of the cave of Nerja (Malaga, southern Spain). *Aerobiología*, 26, 89-98.
- Docampo, S., Trigo, M. M., Recio, M., Melgar, M., García-Sánchez, J. y Cabezudo, B. 2011. Fungal spore content of the atmosphere of the Cave of Nerja (southern Spain): Diversity and origin. *Science of the Total Environment*, 409, 835-843.
- Domínguez-Moñino, I., Jurado, V., Hermosín, B. y Sáiz-Jiménez, C. 2012. Aerobiología de cuevas andaluzas. En: Durán, J. J. y Robledo, P.A. (eds.), *Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 299-308.
- Fernandez-Cortes, A., Cuezva, S., Sanchez-Moral, S., Cañaveras, J. C., Porca, E., Jurado, V., Martin-Sanchez, P. M. y Saiz-Jiménez, C. 2011. Detection of human-induced environmental disturbances in a show cave. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 1037-1045.
- Jurado, V., Fernandez-Cortes, A., Cuezva, S., Laiz, L., Cañaveras, J. C., Sanchez-Moral, S. y Saiz-Jiménez, C. 2009. The fungal colonisation of rock-art caves: experimental evidence. *Naturwissenschaften*, 96, 1027-1034.
- Jurado, V., Groth, I., Gonzalez, J. M., Laiz, L. y Saiz-Jiménez, C. 2005. *Agromyces salentinus* sp. nov. and *Agromyces neolithicus* sp. nov., two novel species of the genus *Agromyces*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 55, 153-157.
- Jurado, V., Laiz, L., Rodríguez-Nava, V., Boiron, P., Hermosín, B., Sanchez-Moral, S. y Saiz-Jiménez, C. 2010a. Pathogenic and opportunistic microorganisms in caves. *International Journal of Speleology*, 39, 15-24.
- Jurado, V., Porca, E., Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., Sanchez-Moral, S. y Saiz-Jiménez, C. 2010b. Fungal outbreak in a show cave. *Science of the Total Environment*, 408, 3632-3638.
- Jurado, V., Sanchez-Moral, S. y Saiz-Jiménez, C. 2008. Entomogenous fungi and the conservation of the cultural heritage: A review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 62, 325-330.
- Kim, O. S., Cho, Y. J., Lee, K., Yoon, S. H., Kim, M., Na, H., Park, S. C., Jeon, Y. S., Lee, J. H., Yi, H., Won, S. y Chun, J. 2012. Introducing EzTaxon-e: a prokaryotic 16S rRNA Gene sequence database with phylotypes that represent uncultured species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62, 716-721.
- King, D. A., Hocking, A. D. y Pitt, J. I. 1979. Dichloran-rose bengal medium for enumeration and isolation of molds from foods. *Applied and Environmental Microbiology*, 37, 959-964.
- Lavoie, K. H. y Northup, D. E. 2006. Bacteria as indicators of human impact in caves. In: Rea, G. T. (ed.), *17th National Cave and Karst Management Symposium, Proceedings*. Albany, NY, NICKMS Steering Committee, 40-47.
- Lee, S. O., Kim, H. Y., Choi, G. J., Lee, H. B., Jang, K. S., Choi, Y. H. y Kim, J.-C. 2009. Mycofumigation with *Oxyporus latemarginatus* EF069 for control of postharvest apple decay and *Rhizoctonia* root rot on moth orchid. *Journal of Applied Microbiology*, 106, 1213-1219.

- Máder, K., Terhes, G., Hajdú, E., Urbán, E., Sóki, J., Magyar, T., Márialigeti, K., Katona, M., Nagy, E. y Túri, S. 2010. Outbreak of septicaemic cases caused by *Acinetobacter ursingii* in a neonatal intensive care unit. *International Journal of Medical Microbiology*, 300, 338-340.
- Mandrioli, P. and Ariatti, A. 2001. Aerobiology: future course of action. *Aerobiologia*, 17, 1-10.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M. y Caballero, V. 2010. Variación temporal de la concentración de anhídrido carbónico en la Gruta de las Maravillas (Aracena, Huelva, España). En: Durán, J.J. y Carrasco, F. (eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Madrid, 159-168.
- Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Calaforra, J. M., Lauritzen, S. E., Sáez, F. y Rodríguez, C. M. 2008. La Gruta de las Maravillas. En: Calaforra, J.M. y Berrocal, J.A. (eds.), *El karst de Andalucía, Geoespeleología, Bioespeleología y Presencia Humana*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Sevilla, 209-215.
- Martin-Sanchez, P. M., Nováková, A., Bastian, F., Alabouvette, C. y Saiz-Jiménez, C. 2012. Two new species of the genus *Ochroconis*, *O. lascauxensis* and *O. anomala* isolated from black stains in Lascaux Cave, France. *Fungal Biology*, 116, 574-589.
- Pérez Fernández, T., Yela, J. L. y Lencina Gutiérrez, J. L. 2012. Lepidópteros de las Cuevas de Los Chorros y El Farallón (Calar del Río Mundo, Riópar, Albacete, España). *Archivos Entomológicos*, 7, 197-200.
- Porca, E. 2011. Aerobiología: mecanismos de dispersión de los microorganismos en cuevas turísticas. *Tesis Doctoral*. Universidad de Sevilla.
- Porca, E., Jurado, V., Martin-Sanchez, P. M., Hermosin, B., Bastian, F., Alabouvette, C. y Saiz-Jiménez, C. 2011. Aerobiology: An ecological indicator for early detection and control of fungal outbreaks in caves. *Ecological Indicators*, 11, 1594-1598.
- Salkin, I. F. y Hurd, N. 1972. Quantitative evaluation of the antifungal properties of cycloheximide. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1, 177-184.
- Schabereiter-Gurtner, C., Saiz-Jiménez, C., Piñar, G., Lubitz, W. y Rölleke, S. 2002a. Altamira cave Paleolithic paintings harbor partly unknown bacterial communities. *FEMS Microbiology Letters*, 211, 7-11.
- Schabereiter-Gurtner, C., Saiz-Jiménez, C., Piñar, G., Lubitz, W. y Rölleke, S. 2002b. Phylogenetic 16S rRNA analysis reveals the presence of complex and partly unknown bacterial communities in Tito Bustillo cave, Spain, and on its Paleolithic paintings. *Environmental Microbiology*, 4, 392-400.
- Schabereiter-Gurtner, C., Saiz-Jiménez, C., Piñar, G., Lubitz, W. y Rölleke, S. 2004. Phylogenetic diversity of bacteria associated with Paleolithic paintings and surrounding rock walls in two Spanish caves (Llonín and La Garma). *FEMS Microbiology Ecology*, 47, 235-247.
- Stomeo, F. 2008. Análisis de comunidades microbianas presentes en la Cueva de Doña Trinidad (Ardales, Málaga) utilizando cultivos y métodos moleculares basados en ADN y ARN. *Tesis Doctoral*. Universidad de Sevilla.
- Sugita, T., Kikuchi, K., Makimura, K., Urata, K., Someya, T., Kamei, K., Niimi, M. y Uehara, Y. 2005. Trichosporon species isolated from guano samples obtained from bat-inhabited caves in Japan. *Applied and Environmental Microbiology*, 71, 7626-7629.
- Tambekar, D.H., Zanwar, D.P. y Borkar, P.R. 2014. Detoxification of phenol by haloalkaliphilic bacteria isolated from Lonar Lake. *Indian Journal of Applied Research*, 4 (6), 431-433.
- Urquhart, E.J., Menzies, J.G. y Punja, Z.K. 1994. Growth and biological control activity of *Tilletiopsis* species against powdery mildew (*Sphaerotheca fuliginea*) on greenhouse cucumber. *Phytopathology*, 84, 341-351.
- Vaughan-Martini, A., Angelini, P. y Zacchi, L. 2000. The influence of human and animal visitation on the yeast ecology of three Italian caverns. *Annals of Microbiology*, 50, 133-140.
- Wang, W., Ma, X., Ma, Y., Mao, L., Wu, F., Ma, X., An, L. y Feng, H. 2010a. Seasonal dynamics of airborne fungi in different caves of the Mogao Grottoes, Dunhuang, China. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 64, 461-466.
- Wang, W., Ma, Y., Ma, X., Wu, F., Ma, X. An, L. y Feng, H. 2010b. Seasonal variations of airborne bacteria in the Mogao Grottoes, Dunhuang, China. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 64, 309-315.
- Zare, R. y Gams, W. 2001. A revision of *Verticillium* section *Prostrata*. VI. The genera *Lecanicillium* and *Simplicillium* gen. nov. *Nova Herwigia*, 73, 1-50.

Biofilms fotosintéticos en la Cueva de Nerja: *Chroococcidiopsis* sp.

Yolanda del Rosal-Padial⁽¹⁾, Mónica Roldán-Molina⁽²⁾ y Mariona Hernández-Mariné⁽³⁾

(1) Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación. Ctra. de Maro, s/n, 29787-Nerja (Málaga, España) (yolanda@cueva-denerja.es)

(2) Universidad Autónoma de Barcelona. Facultad de Ciencias. Servicio de Microscopía. Edificio C, 08193, Bellaterra (Barcelona, España) (monica.rolدان@uab.es)

(3) Universidad de Barcelona. Facultad de Farmacia. Departamento de Botánica. Av. Joan XXIII s/n, 08028, Barcelona (España) (marionahernandez@ab.edu)

RESUMEN

La iluminación en el interior de las cuevas permite el desarrollo de biofilms fotosintéticos, conocidos como *lampenflora* o *mal verde*, sobre paredes, suelo y espeleotemas. Esta colonización induce en el sustrato procesos como, por ejemplo, decoloración, disgregación, ruptura, cristalización o disolución, que dependerá de las características del biofilm, el tipo de iluminación y la humedad del sustrato, entre otros factores. Controlar el desarrollo de estos biofilms es importante, especialmente en cuevas que presentan arte rupestre, un frágil legado del patrimonio cultural que precisa de actuaciones específicas para su adecuada conservación. En la Cueva de Nerja (Málaga, España), declarada Bien de Interés Cultural, se ha llevado a cabo un estudio de los biofilms fotosintéticos, mediante el empleo combinado de técnicas de microscopía, que ha ofrecido información relativa a su huella fotosintética, la disposición espacial de las comunidades microbiológicas y su relación con el sustrato. *Chroococcidiopsis* sp. ha sido identificado como el microorganismo fotosintético más numeroso, en ocasiones exclusivo, de los biofilms analizados. Este microorganismo posee los pigmentos clorofila a, ficocianina y aloficocianina, que les permiten adaptarse a condiciones de escasa iluminación y mediante una gruesa vaina mucilaginoso que se contrae o dilata, en función de la humedad disponible en el medio, pueden resistir situaciones de estrés hídrico y adherirse eficazmente al sustrato. En relación con los procesos de biodeterioro, la presencia de *Chroococcidiopsis* sp. ha sido relacionado con procesos de arenización del sustrato, debido a la disgregación de partículas, el incremento del tamaño de las fisuras y el depósito de cristales. La información obtenida ha sentado las bases para el diseño de estrategias de control basadas en los factores que pueden limitar su supervivencia.

Palabras clave: biodeterioro, biofilm fotosintético, *Chroococcidiopsis* sp., Cueva de Nerja.

Photosynthetic biofilms in Nerja Cave: *Chroococcidiopsis* sp.

ABSTRACT

Lighting inside show caves allows the development of photosynthetic biofilms on walls, floors and speleothems, known as green sickness or lampenflora. Their growth causes deterioration on the host rock such as discoloration, breaking, crystallization or dissolution, depending on the characteristics of the biofilm and environmental factors, mainly the type of lighting and the moisture of the substrate. Control of the development of these biofilms is important, especially in caves with rock art, a fragile legacy of cultural heritage, in need of specific actions for proper conservation. The Nerja Cave (Málaga, Spain), a Good of Cultural Interest has conducted a study of photosynthetic biofilms through the combined use of microscopy techniques, which has provided information on their photosynthetic footprint, organization of the microbiological community and its relationship to the substrate.

Chroococcidiopsis sp. has been identified as the main photosynthetic microorganism, sometimes the only one on some of the biofilms analyzed. This microorganism presents the pigments chlorophyll a, phycocyanin and allophycocyanin, which allow it to adapt to low light conditions. A thick mucilaginous sheath that shrinks or expands depending on the amount of available moisture surrounds it. The sheath helps withstand water stress and contributes to the adherence to the rock. Regarding biodeterioration processes, the presence of *Chroococcidiopsis* sp. has been associated with the substrate arenisation processes, due to disintegration of particles, an increase in the size of cracks and crystal deposition. The information obtained will be used for designing control strategies based on the stress factors that may limit their survival.

Keywords: biodeterioration, *Chroococcidiopsis* sp., Nerja Cave, photosynthetic biofilm.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los microorganismos viven en comunidades unidos a superficies y raramente se encuentran como células individuales móviles (Costerton et al., 1999). Estas comunidades, denominadas biofilms, representan un modo de desarrollo protegido que permite a los microorganismos sobrevivir en un medio hostil (Hall-Stoodley et al., 2010). La estructura del biofilm presenta sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que rodean a los microorganismos, compuesta de polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos y lípidos, que pueden variar en su proporción y con ello las propiedades químicas y físicas de la matriz (Flemming y Wingender, 2010; Warscheid y Braams, 2000). Las EPS protegen y proporciona estabilidad a los biofilms, interviene en los procesos de adhesión a superficies y de absorción de nutrientes y permite la comunicación intercelular (Christensen y Characklis, 1990). Así, un incremento en la síntesis de EPS se considera una respuesta al estrés ambiental (Sutherland, 2001).

El desarrollo de los biofilms depende tanto de las condiciones ambientales como del sustrato. Así, todos los sustratos, naturales o artificiales y en las condiciones adecuadas, son susceptibles de ser colonizados (Di Pippo et al., 2009; Warscheid y Braams, 2000). Las características de los biofilms pueden ser extremadamente variables, así como las consecuencias derivadas de su presencia. En ocasiones, el desarrollo de los biofilms puede alterar física o químicamente el sustrato, a veces de forma irreversible. Controlar el desarrollo de estos biofilms es importante, especialmente cuando su presencia puede poner en riesgo la conservación de elementos que forman parte del patrimonio natural o cultural.

En cuevas turísticas, los biofilms que colonizan el entorno de los focos de luz eléctrica se componen principalmente de microorganismos fotosintéticos, como cianobacterias y algas (Albertano et al., 2012). En zonas más profundas de cavidades, con muy poca, una humedad relativa generalmente elevada, pocas variaciones durante el ciclo diurno y pequeñas diferencias ambientales entre la estación seca y la lluviosa, proliferan cianobacterias filamentosas con vainas calcificadas y con pigmentos accesorios, tales como *Geitleria calcarea* Friedmann, *Herpyzonema pulverulentum* Hernandez-Mariné y Canals, *Loriella* sp. y *Scytonema ocellatum* Lyngb. ex Bornet y Flahault (Hernández-Mariné et al., 2001). En algunos casos se desarrollan comunidades endolíticas fotosintéticas, capaces de penetrar en el interior de la roca, con espesor y profundidad variables según la disponibilidad de agua y de luz jugando un papel clave en los procesos de erosión del sustrato (Warscheid y Braams, 2000). Por otra parte, los polisacáridos de las vainas aglutinan partículas de sustrato y dan protección y estabilidad a las rocas (Ramírez et al., 2010). En términos generales estos microorganismos descritos en cavidades son los mismos que los que colonizan monumentos y edificios hipogeos con patrimonio cultural e iluminados (Rosal et al., 2010). Esta colonización, denominada *lampenflora* (Dobät, 1998) o *mal verde* (Lefevre, 1974), ha sido relacionada con procesos de deterioro del sustrato como, por ejemplo, decoloración, disgregación, ruptura, cristalización, disolución o alteraciones químicas debidas a los ácidos orgánicos generados por el metabolismo de estos microorganismos, proceso especialmente dañino en sustratos calcáreos (Albertano, 2012; Grobbelaar, 2000; Hernández-Marine et al., 2003; Hoffmann, 2002; Lefevre, 1974, Ortega-Calvo et al., 1995; Sáiz-Jiménez, 2012). El tipo de afección al sustrato y la intensidad dependerá, entre otros factores, de las propiedades del biofilm, la iluminación y el sustrato colonizado.

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de biofilms fotosintéticos que se desarrollan sobre espeleotemas de la Cueva de Nerja. Este estudio ha aportado información sobre su estructura tridimensional, su composición, su relación con el sustrato y con las condiciones ambientales que permitirá realizar un diseño de estrategias de control, basadas en los factores que pueden limitar su supervivencia.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de muestreo

La Cueva de Nerja se localiza al sur de la provincia de Málaga (España) y se desarrolla en el seno de mármoles dolomíticos altamente fracturados, en la zona no saturada del acuífero, varios metros por encima del nivel freático. El espesor del suelo encima de la cavidad es muy variable: de 4 a 50 m en la zona abierta al turismo, y superior a 90 m en la zona no visitable. El agua que gotea en el interior de la cueva procede del agua de riego de los jardines, que afecta a la zona más próxima a la entrada, mientras que en el resto de la cavidad el agua de goteo procede de la lluvia y presenta un marcado carácter estacional, con máximos durante el periodo estival (Carrasco et al., 1995; Liñán et al., 2008).

Con una media anual aproximada de 400.000 visitantes, la Cueva de Nerja es una de las cuevas turísticas más visitadas de España. De su volumen total, unos 300.000 m³, tan sólo un tercio se encuentra habilitado para el turismo, las denominadas Galerías Turísticas. La iluminación inicial de este sector de la cavidad se llevó a cabo en 1960, mediante un sistema de lámparas incandescentes de elevada potencia, que aportaban una considerable cantidad de energía al medio en forma de luz y calor. Esta iluminación motivó el desarrollo de una importante colonización fotosintética de paredes y espeleotemas, tal y como indican los primeros trabajos realizados al respecto (Ruiz et al., 1991). Tras un intento fallido de empleo de fibra óptica como sistema de iluminación, en la década de los 90 se instaló el sistema actual, formado por lámparas fluorescentes de 9, 11 y 23 W.

Con el objetivo de obtener la información necesaria para el diseño estrategias de control de los biofilms fotosintéticos de la Cueva de Nerja, se ha llevado a cabo un estudio integral de los mismos, que contempla el análisis de los organismos fotosintéticos, su evolución, relaciones con el sustrato y el ambiente así como la evaluación de las estrategias de colonización. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del estudio de cuatro zonas (A, B, C y D) que presentan colonización fotosintética semejante desde un punto de vista macroscópico (Figura 1). En todos los casos, el sustrato colonizado es un espeleotema de las Galerías Turísticas, que es la única zona de la cueva que presenta colonización fotosintética. En concreto, las muestras A y B se ubican en la zona profunda, mientras que las zonas C y D se encuentran en la zona intermedia, más próximas a la entrada. Las muestras se obtuvieron durante el invierno, mediante raspado de la superficie.



Figura 1. Imágenes que muestran el aspecto macroscópico de las zonas de muestreo (A, B, C y D).

Microscopía

Los grupos taxonómicos fueron identificados mediante el empleo de microscopio óptico Aixoplan (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany), equipado con una cámara digital AxioCam MRc5 y el software Aixoplan LE. Las algas, cianobacterias y sustancias poliméricas extracelulares (EPS) fueron identificados mediante observación directa de las muestras cultivadas y frescas (Rippka *et al.*, 1979). Los morfotipos fueron identificados mediante Albertano *et al.* (2012), Broady y Ingerfeld (1993), Ettl y Gärtner (1995), Komárek y Anagnostidis (1999, 2005) y Komárek (2013).

La microscopía de barrido láser confocal (CLSM) se empleó en la observación de microorganismos vivos. Las imágenes fueron capturadas con una Leica TCS-SP5CLSM (Leica Microsystems, Heidelberg, Alemania), utilizando un objetivo Plan-Apocromático de 63 (NA 1.4, glicerol). Los biofilms se observaron mediante canales múltiples de detección (Roldán *et al.*, 2004). La fluorescencia de las clorofilas y ficobiliproteínas permitió conocer la estructura interna de los biofilms y su distribución en el sustrato (Roldán *et al.*, 2006).

Las muestras para microscopía electrónica de barrido (SEM) se procesaron según Roldán *et al.* (2009) y se examinaron mediante difracción de electrones retrodispersados (EBSD) y por análisis de Espectroscopía de Rayos X (EDX) mediante un Quanta 200, FEI β EDAX.

Para la observación mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM), las muestras se procesaron de acuerdo con Hernández-Marine *et al.* (2001) y fueron observadas a 80 kV mediante un equipo JEOL 1010 (JEOL, Japón).

Parámetros ambientales

Dos sensores equipados con sondas para medir la temperatura y la humedad relativa del aire (datalogger VAISALA MI70 equipado con sondas HMP1554) fueron instalados en las proximidades de las zonas de muestreo A-B y C-D, respectivamente.

Densidad de flujo de fotones fotosintéticos

El valor de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) se determinó mediante el empleo de un sensor cuántico (LI-188B). Para llevar a cabo la medida, el sensor se colocó en paralelo respecto del biofilm y perpendicularmente al haz luminoso. Cada lectura se registró cuando el sensor mostró un valor estable durante al menos 10 segundos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las zonas de muestreo A y B, en la parte más profunda de las Galerías Turísticas, la temperatura media anual del aire fue de 18,8 °C, con oscilaciones entre 17,8 y 19,6 °C, mientras que la humedad relativa media fue de 91%, con oscilaciones entre 79 y 100 %. Por otro lado, en las zonas C y D, la temperatura media del aire fue de 18,6°C, con oscilaciones entre 17,5 y 19,7 °C y la humedad relativa media fue de 78%, con oscilaciones entre 48 y 100%. En ninguna zona de muestreo se observó agua de escorrentía sobre la superficie del sustrato colonizado. Estos datos indican que, en la Cueva de Nerja, la humedad ambiental es relativamente elevada, aunque estos datos no guardan relación estricta con la humedad del sustrato, en los que no se ha observado disponibilidad de agua líquida. El valor obtenido para la radiación fotosintética activa (PPFD) fue relativamente bajo, con valores comprendidos entre 0,39 (D) y 4,93 (C) $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

El empleo de la microscopía permitió observar una distribución superficial del biofilm, integrado por microorganismos de dimensiones y morfología semejante en las cuatro muestras analizadas. Las imágenes mostraron la presencia de pequeñas colonias de color pardo-verdoso, distribuidas irregularmente por la superficie y con tendencia a acumularse en oquedades y grietas (Figura 2 a-b). Estas colonias estaban formadas por células aisladas o en grupo, esféricas, subsféricas o irregularmente poligonales, con diámetro comprendido entre 4,2-8,2 μm . Las células o agrupaciones estaban rodeadas de una matriz mucilaginoso incolora, formada de

capas de hasta 4 μm de grosor, que mantenían a los microorganismos agrupados (Figura 2 c). El espectro de emisión de fluorescencia de los pigmentos mostró la presencia de clorofila a, con máxima emisión a 680-690 nm y ficobilinas (ficocianina y aloficocianina), con máximos de emisión a 650-660 nm (Figura 2 d). El empleo conjunto de las técnicas de microscopía descritas permitió adscribir el microorganismo presente en las muestras al género *Chroococciopsis*.

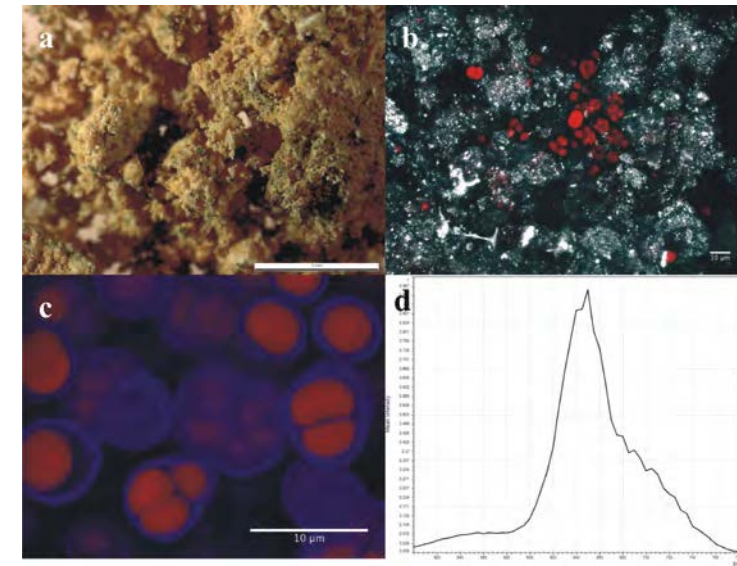


Figura 2. Microscopía láser confocal. a) Distribución irregular de las colonias. b) Vista detallada que muestra las células de *Chroococciopsis* sp. en la superficie y en los huecos del sustrato. c) Colonias formadas por pocas células que presentan una matriz que rodea a los microorganismos, formando una gruesa cubierta a su alrededor. d) Espectro de emisión de los pigmentos fotosintéticos, obtenido mediante el láser de 488-nm, representa la intensidad fotosintética media respecto a la longitud de onda de emisión. No se identifica la presencia de ficoeritrina. El pico máximo corresponde a las ficobilinas ficocianina y aloficocianina.

El género *Chroococciopsis* fue descrito por primera vez por Geitler (1933), en fuentes de agua caliente de Sumatra. Posteriormente ha sido identificado en hábitats extremos de todo el planeta (Grilli-Caiola *et al.*, 1993; Potts, 2001; Potts *et al.*, 2005; Wierzchos *et al.*, 2006): desiertos secos (Baque *et al.* 2013; Fewer *et al.* 2002; Wierzchos *et al.* 2006), aguas dulces, marinas, ambientes hipersalinos (Dor *et al.*, 1991), cuevas con nitratos (Friedmann, 1962; Geitler, 1933) así como cianobionte de líquenes de desiertos (Büdel *et al.*, 2000).

Mediante la microscopía SEM (Figuras 3 a-b) se determinó que la colonización del sustrato por los microorganismos ocupaba principalmente las oquedades y grietas pero sin llegar a formar capas continuas ni penetrar en las capas profundas del sustrato. El análisis elemental cualitativo de la composición de la muestra determinó una mezcla, en diversas proporciones, de calcita, con magnesio, arena y fósforo. La abundancia de fósforo en las muestras A y C y la escasez de microorganismos, indujo a pensar que el origen de este elemento se encontraba en la murcielaguina que se observó en las inmediaciones de ambas zonas de muestreo.

Las imágenes de TEM (Figura 4 a-d) permitieron observar características estructurales celulares, como la vaina de sustancias poliméricas extracelulares, la pared celular Gram negativa o la disposición de las membranas tilacoidales, habitualmente paralelas a la pared celular (Figura 4 a-c). Estas imágenes también mostraron que, en

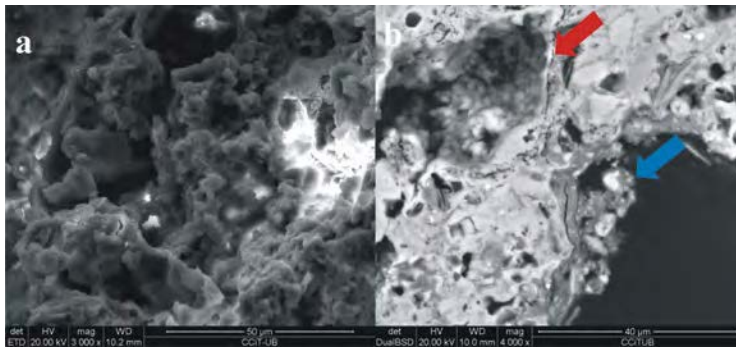


Figura 3. Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). a) un ejemplo de proceso destructivo con disgregación de la roca encajante y distribución discontinua de los microorganismos en la superficie del sustrato. b) biofilm superficial incluido en resina eppoxi, cortado y pulido. *Chroococciopsis* sp. está inmerso en mucilago (flecha azul) en una concavidad. La flecha roja señala microorganismos dentro de una oquedad del sustrato cuya abertura se localizaba en un plano superior al de la fotografía.

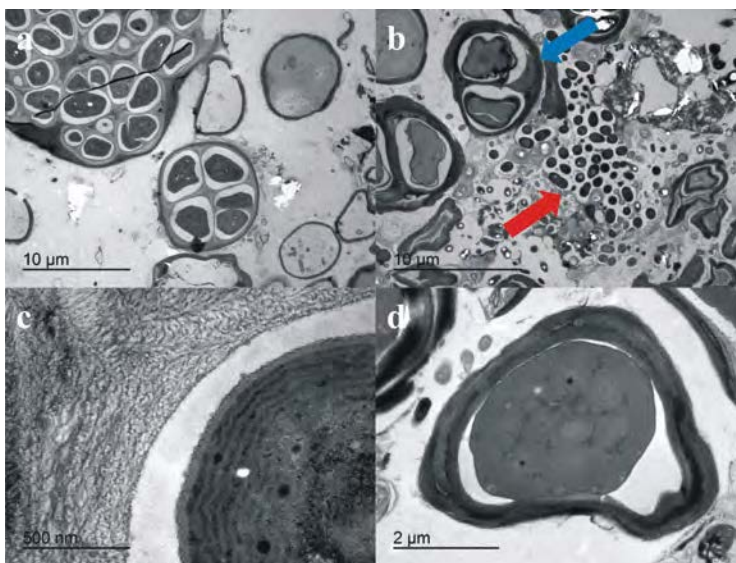


Figura 4. Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (TEM) que muestran detalles ultraestructurales de los biofilms formados por *Chroococciopsis* sp. a) Agregados multicelulares recubiertos por una amplia matriz de sustancias poliméricas extracelulares. b) biofilm con agregados viables, que conservan la integridad celular (flecha azul) junto a vainas vacías (flecha roja) y grupos de bacterias heterótrofas. c) Célula con vaina amplia y fibrosa y disposición de los tilacoides paralelos a la pared celular. d) División múltiple simultánea en el interior de la célula y disposición de los tilacoides en grupos concéntricos, que darán lugar a la formación de baeocitos.

general, los biofilms estaban formados por numerosas agregaciones de microorganismos inviabiles, rodeados de bacterias heterótrofas y junto a otros que mantenían la integridad celular y, por tanto, la viabilidad (Figura 4 b). El proceso de división más comúnmente identificado fue la fisión binaria irregular y, tan sólo en una ocasión, en la zona D, se pudo observar su ciclo de vida completo (Komárek y Anagnostidis, 1998), con fisión múltiple y formación de baeocitos inmóviles, muy abundantes, de alrededor de $1\ \mu\text{m}$ de diámetro. Posteriormente se desintegraron las paredes de la célula madre y se liberaron los baeocitos.

Las imágenes de TEM (Figura 4 a-d) permitieron observar las características estructurales celulares, como la matriz extracelular, la pared celular Gram negativa o la disposición de las membranas tilacoidales, habitualmente paralelas a la pared celular (Figura 4 a-c). Las imágenes de TEM también diferenciaron el estado fisiológico de los microorganismos. Se observó que, en general, los biofilms estaban formados por numerosas agregaciones de microorganismos inviabiles junto a otros que mantenían la integridad celular y, por tanto, la viabilidad (Figura 4 b). El proceso de división más comúnmente identificado fue la fisión binaria irregular y, tan sólo en una ocasión, en la zona D, se pudo observar fisión múltiple y formación de baeocitos inmóviles, muy abundantes, de alrededor de $1\ \mu\text{m}$ de diámetro. En la Figura 4 d se observa la disposición de los tilacoides, formando agrupaciones concéntricas, previa a la formación de los baeocitos. Posteriormente, se desintegraron las paredes de la célula madre y se liberaron.

Esta cianobacteria necesita agua líquida para realizar la fotosíntesis, por lo que su capacidad de desarrollo casmoendolítico, entre fisuras y grietas naturales del sustrato (Golubić *et al.*, 1981) le permite acceder al agua retenida en el sustrato o condensada sobre él, en condiciones de humedad relativa cercana al 100% y disminución de la temperatura de la roca. Esta condición se favorece si la temperatura se eleva durante las visitas y disminuye durante la noche (Saiz-Jiménez, 2012). También puede desecarse sin morir (Alpert, 2006) y recuperarse rápidamente en condiciones favorables. A pesar de que *Chroococciopsis* muestra una notable resistencia a las radiaciones ionizantes (Córdoba-Jabonero *et al.*, 2005), en el medio subterráneo ha sido descrita en condiciones de muy baja iluminación, formando biopelículas con abundante EPS (Albertano, 2012; Lamprinou *et al.*, 2009; Zammitt *et al.*, 2011). En su adaptación a baja iluminación están implicados cambios estructurales, estrategias de nutrición (Albertano 2012 y referencias incluidas) y variación de las proporciones de ficobilinas respecto a la clorofila *a*, aunque no sea capaz de producir ficoeritrina.

CONCLUSIONES

En la Cueva de Nerja, la escasez de agua líquida y la baja iluminación no han evitado la formación de biopelículas fotosintéticas que dan lugar a discoloraciones del sustrato, proporcionan materia orgánica para el crecimiento de organismos heterótrofos, interfieren en el crecimiento de los espeleotemas y contribuyen a su arenización. La presencia, casi exclusiva, del género *Chroococciopsis* en los biofilms fotosintéticos analizados indica su buena adaptación a las características propias de este nicho subterráneo (Saiz-Jiménez, 2012). En comparación con los estudios realizados en otras cuevas con mayor disponibilidad de agua (Mulec *et al.*, 2008; Roldán y Hernández-Mariné, 2009; Smith y Olson, 2007; Urzi *et al.*, 2010), en la Cueva de Nerja se observa una escasa diversidad de microorganismos fotosintéticos por lo que la carencia de agua parece ser el principal factor limitante en el proceso de colonización de dichos microorganismos, de acuerdo con otros trabajos realizados en otros ambientes hipogeos (Roldán *et al.*, 2013), donde, en general, parece más importante la duración de los periodos secos que la cantidad total de agua disponible para el desarrollo, diferenciación y diversidad de los biofilms (Büdel *et al.*, 2008, 2009).

En el caso de la Cueva de Nerja, la limpieza mecánica está totalmente desaconsejada porque al penetrar en las oquedades debería limarse todo el grosor colonizado. La limpieza con chorro de agua es sólo temporalmente efectiva. Facilita la penetración de los microorganismos fotosintéticos en el interior de la roca encajante y les proporciona humedad suficiente para su ulterior desarrollo. El uso de herbicidas o pesticidas dependerá principalmente de la agresividad y penetración de dichos microorganismos al sustrato, así como de la penetración de dichas sustancias en el material y el grosor de la envoltura mucilaginoso de estos organismos. Por otra parte, su uso es desaconsejable por múltiples razones, entre ellas la aparición de nuevas plagas (Saiz-Jiménez

et al., 2012) y la contaminación del medio ambiente. Debido a ello es necesario un especial cuidado de estos ambientes para evitar las condiciones favorables a su crecimiento.

Dada la resistencia de *Chroococcidiopsis*, se propone evitar la entrada de agua procedente de riego, si la hubiera, y controlar la ubicación, la intensidad y calidad de los sistemas de iluminación mediante la instalación y el empleo de leds con un espectro de emisión mínimo en el rango de longitudes de onda no favorables a la absorción por los pigmentos fotosintéticos (leds de temperatura de color alrededor de 2800 Kelvin).

En relación con las actuaciones en cuevas para prevenir el desarrollo de los biofilms fotosintéticos, se comprueba que el conocimiento detallado de los organismos que lo forman, sus procesos de dispersión, sus estrategias de colonización y sus requerimientos específicos es indispensable para llevar a cabo tratamientos específicos para cada uno de los ambientes.

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.
- Alpert, P. 2006. Constraints of tolerance: why are desiccation-tolerant organisms so small or rare?. *The Journal of Experimental Biology*, 209, 1575-1584.
- Baqué, M., Scalzi, G., Rabbow, E., Rettberg, P., y Billi, D. 2013. Biofilm and Planktonic Lifestyles Differently Support the Resistance of the Desert Cyanobacterium *Chroococcidiopsis* Under Space and Martian Simulations. *Elsevier*, 43 (4-5), 377-389.
- Broadly, P. A. y Ingerfeld, M. 1993. Three new species and a new record of *Chaetophoracean* (Chlorophyta) algae from terrestrial habitats in Antarctica. *European Journal of Phycology* 28, 25-31.
- Büdel, B., Becker, U., Follmann G. y Sterflinger K. 2000. Algae, fungi and lichens on inselbergs. Inselbergs. En: Porembski, S. y Barthlott, W. (eds.), *Springer-Verlag*, Heidelberg, Germany, 69-90.
- Büdel, B., Bendix, J., Bicker, F. R. y Green, T. G. A. 2008. Dewfall as a water source frequently activates the endolithic cyanobacterial communities in the granites of Taylor Valley, Antarctica. *Journal of Phycology*, 44, 1415-1424.
- Büdel, B., Schulz, B., Reichenberger, H., Bicker, F.R. y Green, T. G. A. 2009. Cryptoendolithic cyanobacteria from calcite marble rock ridges, Taylor Valley, Antarctica. *Algological Studies*, 129, 61-69.
- Carrasco F., Andreo B., Benavente J. y Vadillo I. 1995. Chemistry of the Nerja Cave system (Andalusia, Spain). *Cave and Karst Science*, 21 (2), 27-32.
- Christensen, B. E. y Characklis, W. G. 1990. Physical and chemical properties of biofilms. En: Characklis, W. G. y Marshall, K. C. (eds.), *Biofilm*, John Wiley y Sons, New York, 93-130.
- Córdoba-Jabonero, P., Zorzano, M.P., Selsis, F., Patel, M. R. y Cockell, C.S. 2005. Radiative habitable zones in martian polar environments. *Icarus*, 175, 360-371.
- Costerton, J. W., Stewart, P. y Greenberg, E. P. 1999. *Science*, 284, (5418), 1318-1322.
- Di Pippo, F., Bohn, A., Congestri, R., De Philippis, R. y Albertano, P. 2009. Capsular polysaccharides of cultured phototrophic biofilms. *Biofouling*, 25, 495-504.
- Dobat, K. 1998. Flore de la lumière artificielle (lampenflora-maladie verte). En: Juberthie, C. y Deçu, V. (eds.). *Encyclopaedia Biospeologica*, 2, Société de Biospéologie, Moulis-Bucarest, 1325-1335.
- Dor, I., Carl, N. y Baldinger, I. 1991. Polymorphism and salinity tolerance as a criterion for differentiation of three new species of *Chroococcidiopsis* (Chroococcales), *Algological Studies*, 64, 411-421.
- Ettl, H. y Gärtner, G. 1995. Syllabus der Boden, Luft und Flechtenalgen, Gustav Fischer, Stuttgart, Jena, New York, 722 pp.

- Fewer, D., Friedl, T. y Büdel, B. 2002. *Chroococcidiopsis* and heterocyst-differentiating cyanobacteria are each other's closest living relatives. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 23, 82-90.
- Flemming, H. C., Wingender, J. 2010. The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8, 623-633.
- Friedmann, E. I. 1962. The ecology of the atmophytic nitrate alga *Chroococcidiopsis kashaii* Friedmann: studies on cave algae from Israel. IV. *Archiv für Mikrobiologie*, 42, 42-45.
- Geitler, L. 1933. Diagnosen neuer Blaualgen von den Sunda-Inseln. *Archiv fuer Hydrobiologie*, 8, 622-634.
- Golubic, S., Friedmann, I. y Schneider, J. 1981. The lithobiontic ecological niche, with special reference to microorganisms. *Sedimentary Geology*, 51, 475-478
- Grilli-Caiola, M. y Billi, D. 2007. *Chroococcidiopsis* from desert to Mars. En: Seckbach, J. (ed.) *Algae and cyanobacteria in extreme environments. Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology*, Springer, Berlin, 553-568.
- Grobbelaar, J. U. 2000. Lithophytic algae: A major threat to the karst formation of show caves. *Journal of Applied Phycology*. 12, 309-315.
- Hall-Stoodley, L., Keevil, C. W. y Lappin-Scott, H. M. 2010. Mycobacterium fortuitum and Mycobacterium chelonae biofilm formation under high y low nutrient conditions. *Journal of Applied Microbiology*, 85 (1), 60-69.
- Hernández-Mariné, M., Roldán, M., Clavero, E., Canals, A. y Ariño, X. 2001. Phototrophic biofilm morphology in dim light. The case of the Puigmolto sinkhole. *Nova Hedwigia*, 123, 235-251.
- Hernández-Mariné, M., Clavero, E. y Roldán, M. 2003. Why there is such luxurious growth in the hypogean environments. *Algological Studies*, 109, 229-239.
- Hoffmann, L. 2002. Caves y other low-light environments: Aerophytic photoautotrophic microorganisms. En: Bitton, G. (ed.), *Encyclopedia of Environmental Microbiology*, John Wiley y Sons, New York, 835-843.
- Komárek, J. y Anagnostidis, K. 1999. Cyanoprokaryota I. Teil: Chroococcales. En: Ettl, H., Gärtner, G., Heynig, H. y Mollenhauer, D. (eds.), *Susswasserflora von Mitteleuropa*, 19(1). G. Fischer, Jena, 548 pp.
- Komárek, J., y Anagnostidis, K. 2005. Cyanoprokaryota II. Teil: Oscillatoriales. En: Büdel, B., Gärtner, G., Krienitz, L. y Schagerl, M. (eds.), *Susswasserflora von Mitteleuropa*, 19(2), Elsevier, Heidelberg, 759 pp.
- Komárek, J. 2013. Cyanoprokaryota III Teil: Nostocales. En: Büdel, B., Gärtner, G., Krienitz, L. y Schagerl, M. (eds.), *Susswasserflora von Mitteleuropa* 19 (3). Elsevier/Spektrum, Heidelberg, 1130 pp.
- Lamprinou, V., Pantazidou, A., Papadogiannaki, G., Radea, C., Economou- Amilli, A. 2009. Cyanobacteria and associated invertebrates in Leontari Cave, Attica (Greece). *Fottea* 9, 155-164.
- Lefevre, M. 1974. La maladie verte de Lascaux. *Studies in Conservation*, 19, 126-156.
- Liñán, C., Carrasco, F., Vadillo, I. y Garrido, A. 2008. Estudios hidrogeológicos en la Cueva de Nerja (Málaga). En: López-Geta, Rubio-Campos y Martín-Machuca (eds.), *Agua y cultura*, Publicaciones del IGME, serie: Hidrogeología y aguas subterráneas 25, 673-683.
- Mulec, J., Kosi, G. y Vrhovsek, D. 2008. Characterization of cave aerophytic algal communities and effects of irradiance levels on production of pigments. *Journal of Cave and Karst Studies*, 70 (1), 3-12.
- Ortega-Calvo, J. J., Ariño, X., Hernández-Mariné, M. y Saiz-Jiménez, C. 1995. Factors affecting the weathering and colonization of monuments by phototrophic microorganisms. *The Science of Total Environment*, 167, 329-341.
- Potts, M. 2001. Desiccation tolerance: a simple process? *Trends Microbiology*, 9, 553-559.
- Potts, T., Roustaei, K., Alamdari, K., Alizadeh, A., Asgari-Chaverdi, A, Khosrowzadeh, L. Niakan, C. A., Petrie, M., Seyedin, L. R., Weeks, B., McCall, M., Zaidi. 2005. Eight Thousand Years of History in Fars Province, Iran., *Archaeology in Iran* 68 (3), 84-92.

- Ramírez, M., Hernández-Mariné, M., Novelo, E. y Roldán, M. 2010. Cyanobacteria-containing biofilms from a Mayan monument in Palenque, Mexico. *Biofouling*, 26 (4), 399-409.
- Rippka, R., Deruelles, J., Waterbury, J. B., Herdman, M. y Stanier, R.Y. 1979. Generic Assignments, Strain Histories and Properties of Pure Cultures of Cyanobacteria. *Journal of General Microbiology*, 111, 1-61.
- Roldán, M., Thomas, F., Castel, S., Quesada, A., Hernández-Mariné, M. 2004. Noninvasive pigment identification in single cells from living phototrophic biofilms by confocal imaging spectrofluorometry. *Applied and Environmental Microbiology*, 70, 3745-50.
- Roldán, M., Oliva, F., Gonzales del Valle, M. A., Saiz-Jiménez, C., y Hernández-Mariné, M. 2006. Does green light influence the fluorescence properties and structure of phototrophic biofilms?. *Applied and Environmental Microbiology*, 72, 3026–3031.
- Roldán, M., Hernández-Mariné, M. 2009. Exploring the secrets of the three-dimensional architecture of phototrophic biofilms in caves. *International Journal of Speleology*, 38, 41–53.
- Roldán, M., Ramírez, M., Campo, J. del, Hernández-Mariné, M. y Komárek, J. 2013. *Chalicogloea cavernicola* gen. nov. sp. nov. (Chroococcales, Cyanobacteria) from low light aerophytic environments: Combined molecular, phenotypic and ecological criteria. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63, 2326-2333.
- Rosal, Y. del, Liñán, C., Garrido, A. y Hernández-Mariné, M. 2010. Los biofilms fotosintéticos de la Cueva de Nerja (Málaga): catalogación, estudio y resultados preliminares. En: Durán, J.J. y Carrasco, F. (eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, Madrid, 563-574.
- Ruiz-Sánchez, J., Marín Girón, F., Ojeda, F., Marín-Olalla, F., Berros, J. y Marín-Olalla, E. 1991. Estudio macroscópico "in situ" y microscópico-ecológico de pequeñas zonas de flora verde (algas verdes y verdeazuladas) del interior de la Cueva de Nerja. En: Carrasco, F. y Marín, F. (eds), *Investigación biológica y edafológica Cueva de Nerja* (Málaga), Trabajos sobre la Cueva de Nerja, 2, 113-125
- Saiz-Jiménez C. 2012. Microbiological and environmental issues in show caves. *World Journal Microbiology and Biotechnology*, 28, 2453–2464.
- Saiz-Jiménez, C., Miller, A. Z., Martín-Sanchez, P. M. y Hernandez Mariné, M. 2012. Uncovering the Origin of the Black Stains in Lascaux Cave in France. *Environmental Microbiology Reports*, 14, 3220-3231.
- Sutherland, I. W. 2001. The biofilm matrix—an immobilized but dynamic microbial environment. *Trends Microbiology*, 9, 222-227.
- Warscheid, Th. y Braams, J. 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, 343-368.
- Wierzbos, J., Ascaso, C. y McKay, C.P. 2006. Endolithic cyanobacteria in halite rocks from the hyperarid core of the Atacama Desert. *Astrobiology*, 6, 415–422.
- Zammit, G., Billi, D., Shubert, E.T., Kastovsky, J. y Albertano, P. 2011. The biodiversity of subaerophytic phototrophic biofilms from Maltese hypogea. *Fottea*, 11, 187–201.

Cueva de las Ventanas, 14 años de experiencias del mal verde y criterios para una nueva iluminación con diodos leds

Federico Ramírez-Trillo⁽¹⁾, Manuel José González-Ríos⁽²⁾

(1) Comisión Técnica de ACTE

(2) Diputación de Granada - Cueva del Agua (cuevadelagua@dipgra.es)

RESUMEN

Tras la habilitación al turismo de la Cueva de las Ventanas en 1999 y surgida la aparición de especies vegetales asociadas a la iluminación de la cavidad, el Ayuntamiento de Piñar, nos pide realizar los pasos necesarios para intentar paliar el problema del llamado mal verde. Se recogen las experiencias realizadas para mitigar el problema, en algunos casos con éxito y otras en fracaso, con sus ventajas y sus desventajas, pero con la seguridad de que las mismas pueden ayudar a conservadores y gestores para intentar paliar el efecto del mal verde en sus cuevas. Se repasan los orígenes de la contaminación, en que lugares aparecen las colonias vegetales y se analizan los diferentes tipos de iluminación utilizada. Con la experiencia se ha llegado a la conclusión de que los factores fundamentales son la intensidad luminosa y el sustrato, en condiciones de saturación de humedad, descartando los parámetros como la temperatura y el tipo de soporte. Se indica la metodología para determinar las zonas contaminadas y determinar las causas de su origen, e igualmente las diferentes actuaciones para eliminar en cada caso la contaminación y se explican los efectos de varios métodos químicos, como el hipoclorito sódico, el agua oxigenada, herbicida, métodos mecánicos como el cepillado o el lavado con agua a presión o el método del camuflaje, como el volteado del sustrato o el manchado, el cambio de la fuente luminosa y su intensidad. Y por último se recomiendan los criterios a tener en cuenta en las instalaciones luminosas para las cuevas de nueva habilitación, con el fin de mitigar al máximo posible la contaminación del mal verde.

Palabras clave: Contaminación, Cueva de las Ventanas, Granada, Mal verde, Piñar.

Cueva de las Ventanas, 14 years testing on lampenflora for a new LED lighting diodes design criteria

ABSTRACT

After enabling the Cueva de las Ventanas for tourism in 1999 the occurrence of lampenflora associated with the illumination was emerged in the cave. The municipality of Pinar asked to us to take the necessary steps to try to improve the problem from its origin. Experiments carried out to mitigate the lampenflora, sometimes successfully sometimes in failure, with its advantages and disadvantages, but with the guarantee that they can help to the cave managers to try to alleviate the aesthetic effect in their caves. Sources of pollution are reviewed, the bio-colonies appear at different places and using different types of lighting. Our experience has come to the conclusion that the key factors are the light intensity and the substrate under conditions of moisture saturation. Other parameters like temperature and type of support were discarded. Methodology must focus to determine contaminated areas and define the causes of their origin, and also the different actions in each case to eliminate pollution and by using various chemical methods, such as sodium hypochlorite, hydrogen peroxide, herbicide or mechanical methods such as brushing or washing with water pressure or camouflage like the substrate flipped or spotting or changing the light source and its intensity. Finally a list of recommended criteria is considered during

the use light installations for new caves enablement, in order to mitigate the possible contamination by lampenflora in the future installation.

Keywords: Pollution, Cueva de las Ventanas, Granada, Lampenflora, Piñar.

INTRODUCCIÓN

Presentamos en esta comunicación las experiencias realizadas para mitigar el problema de la contaminación por especies vegetales en el interior de la Cueva de las Ventanas, en algunos casos con éxito y otras en fracaso, con sus ventajas e inconvenientes, pero con la seguridad de que estas experiencias pueden ayudar a conservadores y gestores para intentar paliar el efecto del mal verde en sus cuevas.

Se repasan los orígenes de la contaminación, en que lugares aparecen las colonias vegetales, preferentemente y se analizan los diferentes tipos de luz utilizada en la iluminación. Con la experiencia se ha llegado a la conclusión de que los factores fundamentales son la intensidad luminosa y el sustrato, en condiciones de saturación de humedad, descartando los parámetros de la temperatura y el tipo de soporte.

El mal verde se manifiesta en primer lugar con especies de algas, originando un sustrato donde favorecen el crecimiento de musgos y estos a su vez favorecen la aparición de helechos. El cambio de factores de iluminación y/o humedad retroceden las especies vegetales hasta la muerte, pero quedan los restos de las mismas ennegreciendo el sustrato, sobre estos restos suelen aparecer líquenes.

Por tener una declaración de BIC y Monumento Natural de Andalucía, fue necesario un informe técnico de un arqueólogo de la no asistencia de arte rupestre en las zonas afectadas por el mal verde (Arribas, 1998).

Se indican las diferentes actuaciones para eliminar en cada caso la contaminación y se explican los efectos de varios métodos químicos, como el hipoclorito sódico, el agua oxigenada, herbicida, métodos mecánicos como el cepillado o el lavado con agua a presión o el método del camuflaje, como el volteado del sustrato o el manchado, el cambio de la fuente luminosa y su intensidad.

La nueva iluminación de la Cueva de las Ventanas está realizada íntegramente con luminarias Led, lo que reduce el consumo y la contaminación calorífica y controla con más eficacia la intensidad luminosa.

Y por último se recomiendan los criterios a tener en cuenta en las instalaciones luminosas para las cuevas de nueva habilitación, con el fin de mitigar la máximo posible la contaminación del mal verde.

DESCRIPCIÓN DE LA CAVIDAD

La visita a la Cueva de las Ventanas se inicia en una primera sala amplia de sesenta metros a la que se accede por tres grandes bocas, de ahí el nombre de Cueva de las Ventanas, donde se puede apreciar el relieve de la roca esculpida por la acción del agua (Ramírez y González-Ríos, 2007).

Al fondo se entra en el *Pasillo*, un estrecho corredor de 33 m lleno de cúpulas y recovecos, éste da acceso a la *Sala de los Desprendimientos*, nombre que recibe por los grandes bloques caídos del techo. A continuación se pasa a la espaciosa *Sala de las Piletas*, de unos 30 m de diámetro, adornada por estalactitas, estalagmitas y bellas coladas donde se ubican las *Piletas* naturales. En uno de sus márgenes se ubica un espectacular mirador conocido como *El Barranco Grande*, de 22 m de profundidad, donde se percibe la sensación del vacío, al estar colgado sobre el mismo borde del barranco. En el 2009 se instaló un auditorio en este espacio.

Se continúa rodeando la Sala de las Piletas y, tras pasar junto a un pequeño lago, se llega a una pasarela, que supera de forma aérea un primer barranco, que accede a la cornisa de la *Sala del Puente*, donde se aprecian arcos de roca natural en una enrevesada galería conocida como *Sala de las Columnas*, llena de precipicios y

magníficos ejemplares de colgaduras. En esta cornisa el paisaje subterráneo es espectacular pues queda realzado al fondo por el contraluz de los rayos solares que entran a través de las ventanas de la *Sala de la Entrada*. De la cornisa se desciende por una rampa de estructura metálica que salva un segundo barranco y entra por la pared opuesta a través de una de las ventanas para acceder al piso inferior y remontar de nuevo por un camino en zig-zag denominado *Cuesta de la Lluvia*, por la infinidad de gotas que caen del techo en épocas invernales.

Al final de la rampa se abre la *Sala de los Priors*, nombre que recibe por dos grandes estalagmitas que crecen en ella, y en el techo se abre la galería superior conocida como *La Cerería* por las "velas" (estalactitas que cuelgan del techo), cerrándose el circuito de la visita retornando a la mediación de la *Sala de Entrada*, tras recorrer unos 500 m de los 1.385 conocidos.

CORROSIÓN BIOLÓGICA POR VEGETALES CLOROFÍLICOS

En las cuevas turísticas se dan una serie de condiciones que facilitan la proliferación de vegetales clorofílicos, la humedad, la luz de los focos, el CO₂ y el aporte exterior de esporas vegetales (Patronato de la Cueva de Nerja, 1991).

El ciclo de colonización se inicia con las algas verdes y continúa con musgos y helechos. Esta vegetación vive a expensas del CO₂ del aire gracias a la clorofila, pero también necesita elementos minerales que extrae de la propia roca desorganizándola y produciendo su corrosión (Pulido-Bosch *et al.*, 1997). Además, los restos vegetales resultantes, fermentan sumándose a los componentes orgánicos aportados desde el exterior.

La iluminación es por tanto la principal causa de la invasión de vegetación clorofílica. Los focos proporcionan las condiciones mínimas para este tipo de vida, siendo imposible de otra manera su proliferación. Los vegetales verdes captan ciertos componentes de la luz blanca conocidos por su color (violeta, índigo, azul, verde, amarillo, naranja, rojo) y componentes definidos científicamente por su longitud de onda expresada en nanómetros (nm).



Figura 1. Diferentes tipos de colonización en la Cueva de las Ventanas.

Así, mediante la absorción de esta energía, realizan la síntesis de los componentes orgánicos indispensables para la vida.

Por otro lado, los diferentes tipos de vegetación no captan las mismas radiaciones y por lo tanto, no proliferan en idénticas condiciones. La absorción se realiza según bandas de longitudes de onda más o menos amplias, pero tienen su máximo desarrollo para los diferentes tipos de vegetación, según el gráfico siguiente:

Espectro visible								
Violeta	Añil	Azul	Verde	Amarillo	Naranja			Rojo
	Algas Verdes	Musgos Helechos		Algas Azules	Algas Verdes	Musgos	Helechos	
380	430	453	500	600	660	670	680	760

Tabla 1. Zona peligrosa entre 643 y 700 nanómetros

Además de esta energía ondulatoria medida en nanómetros existe otro factor desencadenante de la colonización vegetal clorofílica, la intensidad luminosa, medida en Lux; intensidades superiores a 450 lux favorecen la fotosíntesis, el calor desprendido por las fuentes de luz en principio no afecta a la formación de colonias vegetales, dándose el caso de que si el calor emitido se encuentra cerca del sustrato, deseca el mismo, bloqueando el crecimiento de especies vegetales.

El último factor fundamental para el crecimiento del mal verde consiste en la humedad existente, zonas con saturación de agua son los lugares preferentes para la contaminación. Efectivamente, las diferentes estaciones anuales saturan zonas de la cueva de forma diferentes, siendo el otoño e invierno lo más húmedo y la primavera y el verano la más secas, hemos detectado infiltraciones en los meses de verano dado al regadío agrícola de superficie. Dado a la fracturación, existen lugares preferentes donde el goteo es persistente durante todo el año.



Figura 2. A mayor intensidad lumínica se produce el mal verde sobre cualquier soporte.

Las colonias de contaminación del mal verde se arraigan a cualquier tipo de sustrato sea roca, espeleotema o tierra e incluso en superficies antrópicas como solerías, metales, plásticos, con solo los condicionantes de estar saturados de agua y recibir intensidades luminosas de más de 450 lux.

La vegetación subterránea degrada su propia base bajo la acción de rizoides y raíces, órganos que poseen una rizosfera rica en bacterias encargadas de neutralizar las sales minerales, incluida la caliza. La vegetación subterránea degrada su propia base bajo la acción de posteriormente aparecen tejidos muertos y la microflora propia de la humidificación y mineralización. Se produce el ennegrecimiento de la roca y los procesos de corrosión bioquímica y disgregación de la misma. Actualmente todavía se ven cuevas en las que se considera de gran atractivo turístico las exóticas coloraciones que adoptan estos vegetales.

En todo caso, la degradación de cavidades debida a su explotación puede ser atajada y controlada de una manera relativamente fácil y económica, con el mantenimiento adecuado. Sin embargo, la degradación ocasionada por una mala habilitación o mantenimiento es a menudo irreversible, difícil de controlar y muy costosa.

CRITERIOS PARA LA INSTALACIÓN LUMINOSA DE LA CAVIDAD

- **Visibilidad.** Entendemos por visibilidad las instalaciones eléctricas que permite la iluminación del medio subterráneo (Zabal y Marín, 1998). Los criterios tenidos en cuenta, además de la normativa de baja tensión en ambientes húmedos son los siguientes:
- **Una iluminación artística.** Que destaque las profundidades de campo y las sombras, con luminarias estancas y lámparas de bajo consumo de tonos cálidos; en los grandes espacios se combinan con lámparas de luz día.
- **Una iluminación de viales y emergencia.** Cada cinco metros del recorrido de los viales se han colocado luminarias con lámparas de bajo consumo, de tono cálido. Y como emergencia se han montado, dentro de las mismas luminarias instaladas de los viales, lámparas a 12 voltios, que se encienden automáticamente por fallo de flujo eléctrico.
- **Circuitos alternativos.** Se han diseñado tres zonas con sus correspondientes cuadros de maniobras. Con llaves manuales conmutadas para el encendido y el apagado de cada zona a criterio del diseño de visita.

La iluminación artística esta desdoblada en dos circuitos, de tal forma que se puede a voluntad utilizar un 50% o el otro 50% o la totalidad de la iluminación. Esto sirve principalmente para el ahorro energético en momentos de visitas poco frecuentes y para corregir el crecimiento de algas y musgos como consecuencia de la fotosíntesis.

El circuito de viales esta igualmente duplicado, de tal forma que las luminarias pares quedan encendidas cuando se conectan desde el cuadro de mandos principal; esto permite una iluminación mínima de seguridad en caso de apagado accidental de los circuitos conmutados. Las luminarias nones están conmutadas a través de llaves manuales en cada zona. A lo largo del recorrido se ha instalado una línea de fuerza con tomas de corriente.

- **Seguridad.** La fuente de alimentación principal viene suministrada a través de la red, en caso de fallo energético se activa automáticamente un generador de corriente, con suficiente capacidad para alimentar todas las instalaciones de la cueva, con una repuesta de tan solo cinco segundos; con el restablecimiento de la energía a través de la red, el cambio es instantáneo. En caso de fallo del generador, se activarían automáticamente las luminarias de viales, alimentadas por set de baterías a 220V., con una duración mínima de una hora, suficiente para una evacuación desde el punto más alejado del recorrido.
- **Escenificaciones.** A lo largo del recorrido se han escenificado con reproducciones a escala real, las distintas facetas de transformación en la prehistoria (talla de la piedra, arte rupestre, la cerámica, la metalurgia, la agricultura, los enterramientos, etc.), junto con la fauna antigua que ocupó la cueva y maquetas interactivas, que explican el medio físico.
- **Iluminación escénica.** Con la adaptación del barranco grande en un auditorio para 200 plazas, se ha dotado de un sistema de iluminación led comandado por un sistema DMD, con efectos de color, fundidos, movimientos dinámicos y sonido.

MÉTODO SEGUIDO PARA DETERMINAR EL PROBLEMA DEL MAL VERDE

En primer lugar se realizó un inventario de luminarias indicando sus características y ubicación, en segundo lugar se inventariaron las zonas contaminadas, el tipo de sustrato y el análisis de las especies y por último se realizaron mediciones de temperatura, distancia de la luminaria a la zona contaminada e intensidad luminosa. Para ello se diseñó una ficha que recogiese todos estos datos, durante un ciclo completo anual.

Para complementar el estudio, se realizó un plano hidrométrico, que representase las zonas de máxima saturación en etapas invernales y las zonas saturadas todo el año con goteos preferentes.

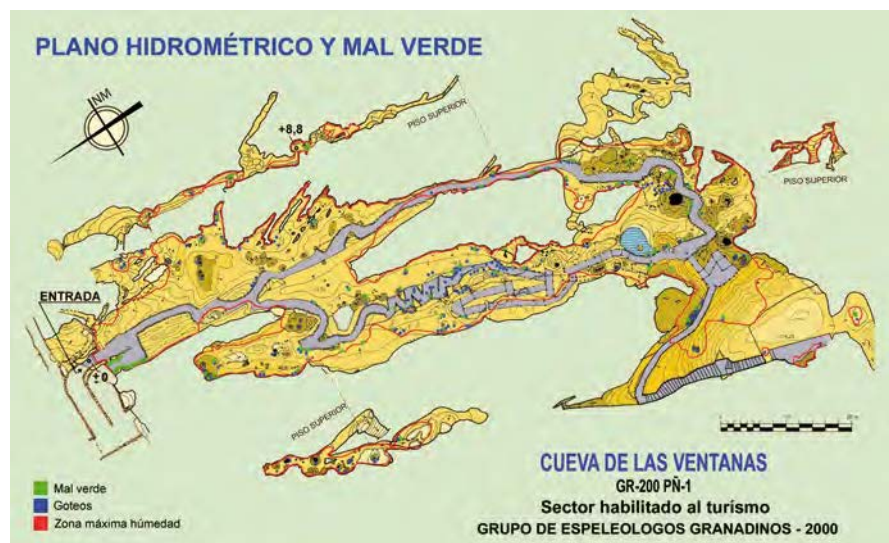


Figura 3. Plano hidrométrico y de "mal verde" en la Cueva de las Ventanas

MÉTODO SEGUIDO PARA ELIMINAR EL PROBLEMA DEL MAL VERDE

Para eliminar el mal verde existente es necesario realizar dos pasos: el primero reorientar, cambiar la intensidad o reubicar las luminarias conflictivas y el segundo, iniciar los trabajos de mantenimiento con la eliminación de las colonias.

ESTUDIO DE LAS LUMINARIAS

Las características de las luminarias instaladas en la cavidad eran de tres tipos: focos con lámparas de tipo fluorescente de bajo consumo con una temperatura de color de 3.400 grados kelvin, focos de alta intensidad con lámparas de aluorodógenos metálico con temperatura de color de 6.000 grados kelvin y focos puntuales con lámparas dicróicas alógenas de 3.400 grados kelvin. De las primeras existían tres tipos. Una para los pasillos con consumo de 18W, y una intensidad de 1.200 lumios. Para la iluminación artística estaban instaladas otras con doble lámpara con consumo de 18W y 1.200 lumios de intensidad y una tercera con cuatro lámparas con un consumo de 24W y 2.400 de luminosidad. Para la iluminación de los grandes espacios estaban instalados focos de aluorodógenos metálicos con 150W y 4.000 lumios. Las características de estas luminarias es la dispersión del haz de la luz determinado por la parábola de los focos era en todos los casos una apertura de 120 grados. En cuanto a las lámparas dicróicas su intensidad y ángulo de proyección era variable pues estaban destinadas a realzar las instalaciones. Todas las luminarias tenían una protección de IP65. Sin embargo el cambio frecuente de las bombillas fundidas, los equipos iban perdiendo su estanqueidad, originándose en muchos casos inundaciones internas de los mismos, originando cortocircuitos. El total de luminarias instaladas era de 295 con un consumo estimado de 8.214 wátios.

LUMINARIAS	TOTAL
1X18W	66
4X9W	131
2X9W	81
BOMBILLA F	4
DICROICA 20	5
DICROICA 50	5
ALUROALOGENO	3
TOTAL	295
TOTAL WATIOS	8214

Tabla 2. Luminarias en la Cueva de las Ventanas.

NUEVAS LUMINARIAS CON DIODOS LED

La nueva iluminación a base de luminarias led, se ha planteado con cinco tipos diferentes de lámparas, en función de su intensidad y el espacio a iluminar. Tenemos que tener en cuenta que se ha utilizado el cableado ya existente.

Las lámparas led están constituidas por grupos de diodos, según la cantidad de estos aumenta su intensidad. Otra característica, es que el propio diodo está encapsulado con una óptica que controla la apertura del ángulo de la luz emitida, no interfieren las parábolas reflectantes de los equipos. Estas lentes tienen un ángulo de apertura estándar de 36 grados, aunque existen también con ángulos de apertura de 24 y 12 grados, por lo que se pueden iluminar zonas puntuales a distancia.

En la cueva se han instalado equipos de 3, 4, 7 y 21 diodos para la iluminación artística, los viales y las escenificaciones de todo el conjunto. Para la iluminación de los viales en las estructuras metálicas se han empleado barras de 7 led, conectados simultáneamente con baterías de encendido de emergencia, para garantizar la seguridad ante un fallo energético.

La cantidad de luminarias instaladas es de 335, cuarenta más de la existentes en la antigua instalación, esta ampliación viene dada por el aumento de las barras de pasillo, por la reducción de la intensidad en algunos puntos en la que fue necesario complementarla con más de un equipo y los montajes DMD para el espacio escénico del auditorio. Aun así el consumo total de los equipos instalados es de 2.456,2 Wátios, lo que origina un ahorro energético de 5.757,8 Wátios. Entorno al 70% menos.

LUMINARIAS INSTALADAS						
CONSUMO TOTAL						2.456,2
ZONA	3 LEDS	4 LEDS	7 LEDS	21 LEDS	BARRAS	
1	71	16	32	0	0	120
2	39	15	31	2	36	125
3	34	21	16	0	16	90
TOTAL	144	52	79	2	52	
EN TOTAL						335

Tabla 3. Luminarias LED en la Cueva de las Ventanas.

Otra ventaja de la nueva iluminación es la vida útil de los diodos, más de 200.000 horas (según fabricante), por lo que los mantenimientos son prácticamente nulos y a las luminarias no se le altera su permeabilidad IP65. Para zonas inundadas se ha empleado luminarias con protección IP67. Para todas las luminarias se eligió una temperatura de color de 4.000 grados kelvin, que da una luz blanca que no distorsiona el cromatismo de la cueva y permite realizar fotografías sin flash.

ELIMINACIÓN DEL MAL VERDE

Como se ha visto anteriormente la Cueva de las Ventanas tiene una declaración BIC y Monumento Natural de Andalucía, por lo que fue necesario un informe previo realizado por un arqueólogo de la no existencia de arte rupestre en las zonas afectadas por el mal verde, ya que todos los métodos empleados no son aconsejables en el caso de presencia de arte rupestre.

Las diferentes actuaciones para eliminar, en cada caso, la contaminación, se han aplicado métodos químicos, métodos mecánicos, método del camuflaje y el cambio de la fuente luminosa y/o su intensidad.

MÉTODOS QUÍMICOS

El Hipoclorito sódico, rebajado al 40%, elimina los musgos y los helechos, tarda en la destrucción periodos no inferiores de dos semanas, no es efectivo con las algas pues suelen estar incrustadas en la porosidad del sustrato. Emplear hipoclorito sódico sin diluir genera durante varios días un fuerte olor a lejía y no acelera el proceso. No elimina los residuos de las especies muertas.



Figura 4. Mal verde eliminado con hipoclorito

Las pruebas realizadas con agua oxigenada se han realizado con diferentes concentraciones: al 50% y aumentando el concentrado de 10% en 10%, los resultados no han sido óptimos, la eliminación de los musgos y helechos tienen un periodo de exterminio de casi cuatro semanas con un alto concentrado de agua oxigenada. No elimina los residuos de las especies muertas y añade un nuevo problema, al secarse el sustrato dejan manchas blanquecinas.

Hemos utilizado herbicida para probar su eficacia, y ha sido espectacular, en tan solo una semana se eliminan en gran parte las algas, los musgos y los helechos mueren. No elimina los restos de las especies muertas. Se debe valorar el efecto contaminante del producto herbicida (fauna, etc.).



Figura 5. Manchas blancas tras el tratamiento con agua oxigenada – Limpieza con agua a presión.

MÉTODOS MECÁNICOS

El cepillado: es eficiente en coladas y superficies duras, no se debe emplear en superficies terrosas o frágiles pues arrastran o rompen el sustrato, elimina todas las especies y se pueden acumular los restos para su recogida. El resultado es instantáneo.

El lavado con agua: Se debe utilizar agua no clorada, utilizando un grupo de presión no superior a dos bares, es efectivo en todos los casos, se tiene que tener la precaución de utilizar una aspiradora de líquidos para recoger los restos, el resultado es instantáneo. Este método se debe utilizar como complementario para las actuaciones realizadas con procedimientos químicos para eliminar los restos vegetales.



Figura 6. Limpieza por el método de agua a presión

MÉTODOS DEL CAMUFLAJE

Hemos experimentado que algunas colonias vegetales que se instalaban en zonas terrosas o arenosas, en estos casos con un simple mezclado de la superficie con sustrato más profundo era más que suficiente para hacer desaparecer visualmente el mal verde.

En otros casos el mal verde se fijaba en piedras sueltas o mamposterías de piedra seca, en estos casos con un simple volteado de las piedras contaminadas hace desaparecer el mal verde, en un aspecto visual.

El manchado, consiste en los lugares donde es imposible eliminar las algas incrustadas por la porosidad o recubiertas por una pátina de espeleotema, se frota con arcilla o tierra. En todos estos casos no se elimina el mal verde pero mejora el impacto visual.

CAMBIO DE LA FUENTE DE ILUMINACIÓN Y SU INTENSIDAD

Para mitigar sucesivas colonias del mal verde es imprescindible evitar las zonas contaminadas con anterioridad, para ello se pueden eliminar las luminarias que estén ubicadas en zonas saturadas de humedad, sobre todo aquellas que los sustratos sean terrosos. En otros casos con una simple reorientación de la luminaria es suficiente. Otra solución sería el cambiar la intensidad de la luminosidad del foco. Recordemos que a la zona de cualquier sustrato saturado no debe recibir una intensidad superior a 450 lux. Con esta regla es fácil determinar la intensidad de la luminaria y su ubicación. Para este control es necesaria la utilización de un Luxómetro.

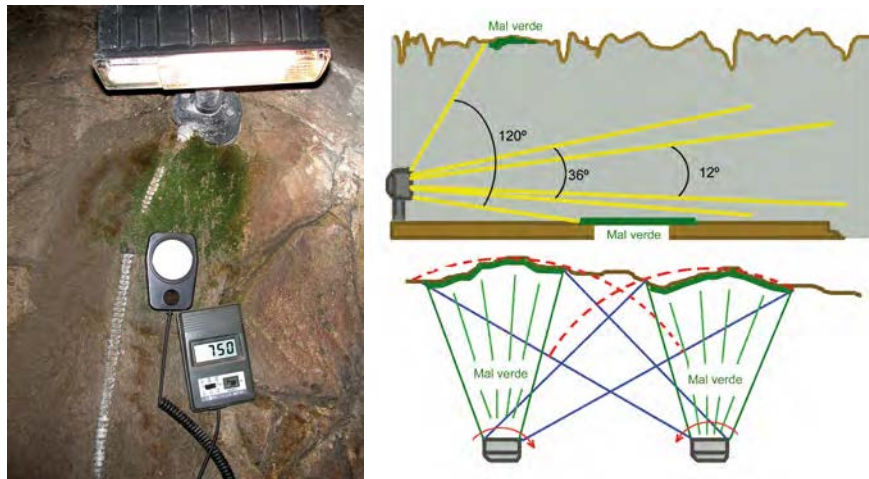


Figura 7. Superados los 450 Lux aparece el mal verde – El ángulo de proyección y la orientación evitan el mal verde.

Otro factor con el que se puede jugar con la iluminación es el ángulo del haz de luz, las luminarias tradicionales dispersa la luz con un ángulo de 120 grados, esto supone que las lámparas que estén cerca del sustrato la intensidad de luz es superior a 450 lux aunque se orienten a distancia, las lámparas de led salen con un ángulo al menos de 36 grados. Lo que hace que la luz se disperse a mayor distancia y no sature de luminosidad los primeros planos.

Existen casos que por cercanía del espacio a iluminar y la intensidad de las luminarias disponibles, exceden los 450 lux, se puede solucionar cruzando los equipos en uve, aumentando de esta forma la longitud del haz luminoso y así resolver el problema. Los equipos instalados se pueden modificar su intensidad, cambiando las conexiones del mismo, siguiendo las instrucciones del fabricante.

En un radio de unos 6 metros en las inmediaciones de las bocas de entrada, se aprecian colonias vegetales asociadas a la humedad, en etapas de saturación y por la penetración de la luz solar.

Antes de acometer la iluminación de una nueva cavidad, es imprescindible realizar un estudio previo, de al menos un año, que recoja las zonas susceptibles de saturación y determinar las zonas preferentes de infiltración.

REFERENCIAS

- Arribas, A., 1998. Problemática de gestión de cavidades con patrimonio cultural y natural. *I Curso de Gestión de Cuevas Turísticas y Turismo Subterráneo*, Aracena, Huelva.
- Patronato de la Cueva de Nerja (AA.VV.) 1991. *Investigación biológica y edafológica Cueva de Nerja* (Málaga). Carrasco, F., Marín, F. (eds.). Nerja, Málaga.
- Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C. M., Vallejo, A., 1997. Human impact in a tourist cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, 142.
- Ramírez, F., González-Ríos, M. J., 2007. Cueva de las Ventanas (Piñar, Granada). Criterios para su habilitación y resultados tras cinco años de gestión. En J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vazques (eds.) *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*, pp. 81-92.
- Zabal, A., Marín, F., 1998. Iluminación de Cavidades Turísticas. *I Curso de Gestión de Cuevas Turísticas y Turismo Subterráneo*, Aracena, Huelva.

Monitorización del estado fisiológico de los *biofilms* de la Cueva de Nerja (Málaga) mediante la fluorescencia *in vivo* de la clorofila *a* asociada al Fotosistema II

Félix L. Figueroa⁽¹⁾, Nathalie Korbee⁽¹⁾, Paula Celis-Plá⁽¹⁾, Celia G. Jerez⁽¹⁾, Félix Álvarez-Gómez⁽¹⁾, Yolanda del Rosal⁽²⁾ y Mariona Hernández-Mariné⁽³⁾

(1) Departamento de Ecología y Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus Universitario de Teatinos s/n. 29071 (Málaga, España) (paulacelispla@uma.es)

(Felix_lopez@uma.es, nkorbee@uma.es, paulacelispla@uma.es, cgjerez@uma.es, Felix_alvarez000@hotmail.com)

(2) Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación. Ctra. de Maro, s/n, 29787-Nerja (Málaga, España) (yolanda@cueva-denerja.es)

(3) Universidad de Barcelona. Facultad de Farmacia. Departamento de Botánica. Av. Joan XXIII s/n, 08028, Barcelona (España) (marionahernandez@ub.edu)

RESUMEN

La taxonomía y estructura de los microorganismos fotosintéticos de los *biofilms* de la Cueva de Nerja han sido estudiados mediante técnicas moleculares y microscópicas. Sin embargo, se desconoce la producción fotosintética y estado fisiológico de los *biofilms* en las condiciones ambientales de la cueva. En este trabajo se presentan los primeros datos del rendimiento y capacidad fotosintética determinados *in situ* en *biofilms* en dos estaciones (Ne 8 y Ne 12) mediante el uso de la técnica no intrusiva basada en la fluorescencia *in vivo* de la clorofila *a* asociada al fotosistema II. Los rendimientos fotosintéticos fueron monitorizados *in situ* cada 5 min como indicadores del estado fisiológico de los *biofilms*: rendimiento efectivo (YII) en periodos de iluminación y rendimiento máximo (Fv/Fm) en periodos de oscuridad. Por otro lado, la producción fotosintética se estimó mediante la tasa transporte electrónico relativo (rETR). El estudio se realizó en dos momentos del año en los que se alcanzaron niveles de CO₂ muy diferentes: marzo con valores medios de 566 ppm y julio con 1065 ppm. Los valores de humedad fueron de 69-72% en marzo y por encima del 95% en julio mientras la temperatura media no cambió mucho en los dos periodos del año (18,3-19,9 °C). En la estación Ne 8 con *biofilms* de *Chroococcidiopsis sp.*, los rendimientos fotosintéticos determinados *in situ* aumentaron sensiblemente (8 veces) con la duplicación de los niveles de CO₂ en el interior de la cueva. En cambio, la producción máxima (rETRmax) de los *biofilms* hidratados solo incrementó 1,34 veces. En la estación Ne 12 con un biofilm de mayor diversidad de organismos fotosintéticos, las diferencias de los rendimientos fotosintéticos no fueron apreciables (0,4-0,5) pero los incrementos de rETRmax fueron de 2,6 veces con la duplicación de los niveles de CO₂. Por otro lado, los rendimientos máximos disminuyeron en el periodo de oscuridad. En este trabajo se demuestra la utilidad de los fluorímetros de pulso de amplitud modulada para valorar el rendimiento y la capacidad fotosintética de los *biofilms* de un modo no intrusivo y mostrar el efecto de las variables ambientales sobre el estado fisiológico de los *biofilms*. La microscopía confocal que aporta información estructural y la fluorescencia *in vivo* que da información funcional de los *biofilms* son técnicas complementarias no intrusivas que pueden valorar y validar de un modo más efectivo las estrategias de erradicación, prevención y control del biodeterioro de las cuevas turísticas en las áreas iluminadas.

Palabra clave: Algas, *biofilms*, Cianobacterias, Cueva de Nerja, Fotosíntesis, Fluorescencia *in vivo* de la Clorofila *a*.

Monitoring of physiological status of biofilms in the Nerja cave (Málaga) by using *in vivo* chlorophyll a fluorescence by photosystem II

ABSTRACT

The taxonomy and the structure of the photosynthetic microorganisms building biofilms in the Nerja Cave have been studied by molecular and microscopy techniques, however, the photosynthetic production and physiological status under the environmental conditions of the cave are unknown. In this manuscript, we present the first data of photosynthetic yields and photosynthetic capacity determined *in situ* in the Biofilms in two sites of the cave (Ne 8 and Ne 12) by using a non intrusive technique based on *in vivo* chlorophyll a fluorescence of photosystem II measurements. Photosynthetic yields were monitored each 5 min as indicators of the physiological status: effective quantum yield (YII) during the illuminated period and maximal quantum yield (Fv/Fm) during dark periods. On the other hand, the photosynthetic production was estimated as relative electron transport rate (rETR). The study was conducted in two days with different atmospheric CO₂ levels: in March with average values of 566 ppm and July with average values of 1065 ppm. The relative humidity values ranged from 69-72% in March and was higher than in July 95% whereas the average temperature did not change so much, ranging from, 18.3 in March to 19.9 °C in July. In the Ne 8 site, with biofilms of the cyanobacterium *Chroococcidiopsis* sp, the photosynthetic yields *in situ* increased 8 times with the double increase of CO₂ levels in July whereas the increase of photosynthetic production of hydrated biofilms (rETR_{max}) was only 1.34 times. In contrast, in Ne 12 site, with a biofilms of higher diversity of algae and cyanobacteria, the photosynthetic yield was maintained similar (0.4-0.5) in the two periods of time but rETR_{max} increase 2.6 times. In this work, it is shown the usefulness of the pulse amplitude modulated fluorometers to measure both photosynthetic yields and production as non intrusive procedure and to show the effect of environmental changes of the physiological status of the biofilms. The microscopy, giving information of the structure and the *in vivo* chlorophyll fluorescence on ecophysiology of the biofilms are complementary non intrusive techniques that can help to get more precise evaluation on the strategies for eradication, prevention and control of the biodeterioration of touristic caves in the illuminated areas.

Keywords: Algae, Biofilms, Cyanobacteria, *in vivo* chlorophyll a fluorescence, Nerja Cave, Photosynthesis.

INTRODUCCIÓN

La luz natural de las zonas más externas de las cuevas, y/o la luz artificial, permiten el desarrollo de *biofilms* fotosintéticos sobre el suelo, paredes y espeleotemas, identificables por su tonalidad verde (Hernández-Mariné et al., 1999; Roldán et al., 2004). El biodeterioro producido por *biofilms* fotosintéticos en cuevas turísticas iluminadas artificialmente se conoce como "mal verde" (maladie verte) (Lefevre, 1974). Combatir el biodeterioro es un objetivo de investigación prioritario en cuevas turísticas y patrimonios culturales ya que estos organismos pueden producir daños mecánicos y químicos en el soporte donde se desarrollan y, por tanto, su crecimiento debe ser controlado en base a una adecuada conservación del sustrato (del Rosal et al., 2010). Para reducir el biodeterioro es importante identificar los componentes del *biofilm*, conocer aspectos de su organización y relación con el sustrato así como su función ecofisiológica (Albertano y Urzi, 1999; Barranquet et al., 2004; Walker y Pace, 2007). En los últimos años se han realizado numerosos estudios de carácter taxonómico y ultraestructural de los microorganismos fotosintéticos de los *biofilms* de la Cueva de Nerja asociados a la iluminación artificial y natural (del Rosal Padial et al., 2002). Sin embargo, se desconocen los rendimientos y producciones fotosintéticas de cianobacterias y algas de los *biofilms* en las condiciones naturales de la Cueva de Nerja. Para realizar este tipo de estudio se requiere contar con equipamiento capaz de realizar medidas *in situ* y no intrusivas. Las medidas de fotosíntesis basadas en la evolución de gases (O₂ o CO₂) requieren la incubación de muestras obtenidas de la piedra e incubadas en cámaras estancas. Además de ser un metodología intrusiva ya que requiere el raspado de la roca, se necesitan tiempos relativamente largos (horas) para tener un conocimiento de la repuesta fotosintética a diversas intensidades de radiación. Hace unos 30 años se desarrollaron

técnicas alternativas no intrusivas para la medida de fotosíntesis en plantas vasculares terrestres basadas en la fluorescencia *in vivo* de la clorofila asociada al fotosistema II mediante fluorímetros de pulso de amplitud modulada que dan información de rendimientos y tasas fotosintéticas en escala de minutos (Schreiber et al., 1986). Posteriormente, se han ido aplicando a macroalgas, microalgas y *biofilms* bentónicos (Flameling y Kromkamp, 1998; Figueroa et al., 2003; Barranquet et al., 2004; Perkins et al., 2002, 2006, 2011).

Las estaciones en donde se realizó este estudio fueron las Ne 8 y Ne 12. La estación Ne 8 se ubica en la Sala de los Fantasmas. Los *biofilms* no han sido sometidos a limpieza previa y el bloque de roca se encuentra sobre un sustrato de piedra (Figura 1). La estación Ne-12 se encuentra próxima al inicio de la Sala del Cataclismo y muy cerca del paso de los visitantes. Presenta dos morfologías de *biofilms* muy diferentes, una más gelatinosa, que se desprende fácilmente del soporte y la otra pulverulenta. El estudio se realizó en el área gelatinosa (Figura 1). En la estación Ne 8 se ha identificado la cianobacteria *Chroococcidiopsis* sp. y en el área gelatinosa de la Ne 12 se ha identificado el alga verde *Desmococcus* sp. y cianobacterias, *Gloeocapsa* sp. y las *Leptolyngbya* en el área gelatinosa de la estación Ne 12 (del Rosal Padial et al., 2010).



Figura. 1 Fotografía del área de medida de las estaciones Ne 8 y Ne 12 en la Cueva de Nerja.

Se presentan a continuación las características de los sistemas de iluminación en las áreas de estudio.

CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LAS LÁMPARAS ARTIFICIALES

Se realizó una caracterización espectral y de temperaturas de color de las lámparas artificiales empleadas en las Galerías turísticas en los dos puntos citados mediante el uso de un espectrorradiómetro de multidiódos SMS-500 (Sphere Optics) que hace barridos de longitudes de onda entre 280-800 nm.

De acuerdo a los espectros de las lámparas presentados en la Figura 2, la lámpara fluorescente compacta de 20 W empleadas en la estación Ne 8 presenta una temperatura de color más baja (4845 °K) que la lámpara de la estación Ne 12 (6952 °K). La lámpara de la estación Ne 8 presenta un espectro más continuo y está más enriquecida en las bandas verde-azuladas, amarillas y rojas del espectro que la lámpara de la estación Ne-12.

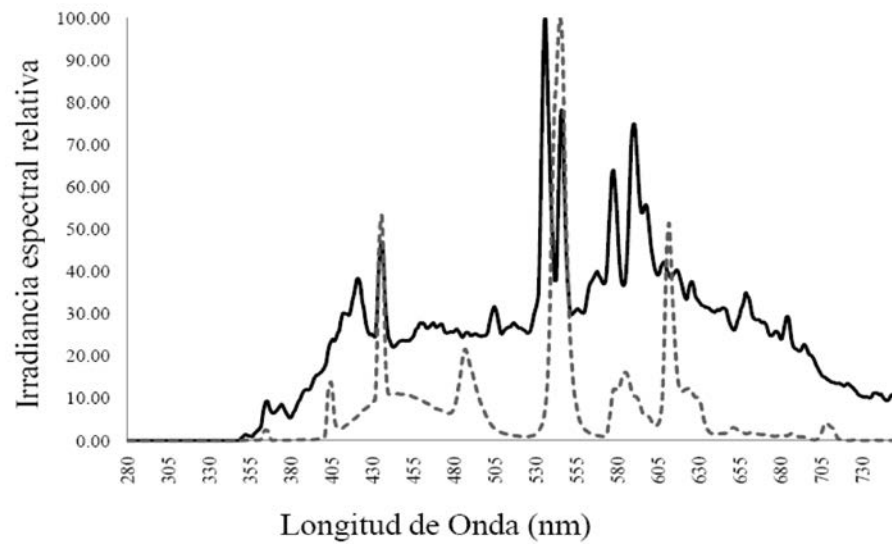


Figura 2. Irradiancia espectral relativa de las lámparas empleadas en la estación Ne 8 (línea continua) y Ne 12 (línea punteada).

ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN

La atenuación de la luz con la distancia se determinó mediante el uso de un sensor plano de corrección coseno (Li 190 SA) conectado a un radiómetro Licor (Li- 250A) ambos de la compañía (Licor, Inc., Nebraska, EEUU).

La atenuación de la luz sigue un patrón exponencial.

$$E_z = E_0 e^{-K_d z} \text{ (unidades: } \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}\text{)}$$

donde E_0 es la irradiancia con el sensor pegado a la lámpara y E_z es la irradiancia a la distancia Z de la lámpara, expresada en metros. Esta ecuación proviene del modelo exponencial de la ley de Lambert-Beer que predice la radiación que se alcanza a una distancia Z de la fuente de luz. El campo lumínico se caracteriza por los valores de coeficiente de atenuación de PAR de la radiación descendente (K_d).

$$K_d = (\ln(E_0) - \ln(E_z)) / z \text{ (unidades: m}^{-1}\text{)}$$

El coeficiente de atenuación vertical (K_d) es una variable óptica aparente ya que depende del ángulo de la fuente de luz. El modelo describe la extinción cuantitativa de la radiación a través de una masa de aire, pero el proceso tiene también un carácter cualitativo ya que K_d es función de la longitud de onda.

El coeficiente de atenuación (K_d) fue de 0.02 m^{-1} en la estación Ne 8 y algo mayor en la estación Ne 12 donde fue de 0.03 m^{-1} (Figura 3). La estación Ne 12 está más cerca del paso de personas y esto puede contribuir a una mayor turbidez en el aire al haber más partículas en suspensión. Las fotosíntesis fue estudiada en *biofilms* situados a unos 100 cm de la lámpara con presencia mayoritaria de luz difusa y valores de irradiancia menores de $5 \mu\text{moles fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

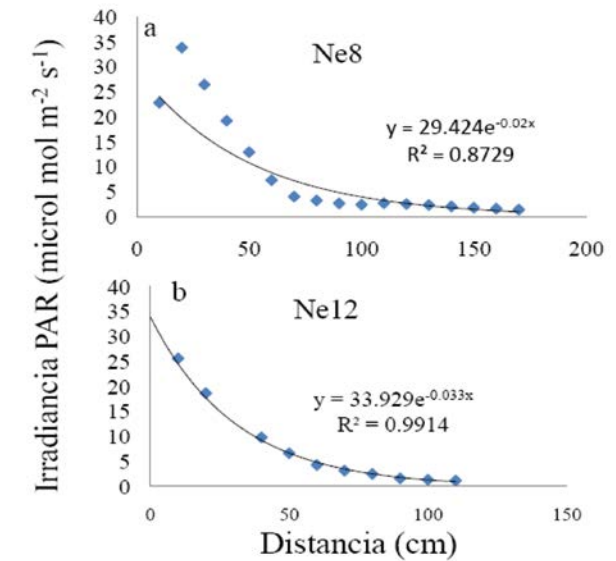


Figura 3. Irradiancia de radiación activa fotosintética (PAR, $\lambda=400-700 \text{ nm}$) con la distancia de la fuente de luz en la estación NE 8 y Ne 12.

VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS

Se monitorizaron la humedad relativa (HR, %) y la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) mediante sondas multiparamétricas aportadas por el Instituto de Investigación de la Fundación Cueva de Nerja. Los niveles de humedad relativa se incrementaron de marzo a julio (Figura 4) como ya se ha constatado en estudios anteriores (Carrasco Cantos *et al.*, 2002). El 31 de marzo de 2014, la humedad relativa media en la estación Ne 8 fue de 72,0% y algo menor en la estación Ne 12 (69%) a pesar que es en esta última estación la humedad relativa de la roca alcanza niveles de saturación (se aprecian gotas de agua e hidratación completa de los *biofilms*). El 25 de julio de 2014 sin embargo, el nivel de hidratación en la estación Ne 12 es de sobresaturación (por encima del 100%) y en la estación Ne 8 sube hasta el 95%. Las diferencias de temperatura en los dos momentos del año analizados fueron mucho más pequeñas que en el caso de la humedad. El 31 de marzo la temperatura media en Ne 8 fue de $18,36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y algo mayor en Ne-12 ($19,59 \text{ }^{\circ}\text{C}$) mientras que el 25 de julio apenas hubo diferencias en la temperatura media entre las dos estaciones, $19,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en Ne 8 y $19,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en Ne 12 (Figura 4). Donde sí hubo diferencias apreciables fue en los niveles de CO_2 (Figura 5). El 31 de marzo los niveles medios en Ne 8 fueron de 597,5 ppm mientras que en Ne 12 fue de 536,5 ppm pasando a 1030 ppm el 25 de julio de 2014 en la estación Ne 8 y a 1100 ppm en Ne 12. Estas duplicaciones de los niveles de CO_2 son ya conocidas en la Cueva de Nerja y se deben al sensible aumento de visitas en los periodos de verano (Carrasco Cantos *et al.*, 2002).

La Cueva de Nerja pasa de tener 11.000-20.000 personas al mes en los primeros y últimos mes del año a 90.000-120.000 personas al mes en el mes de Agosto, lo que da una media de visita de 500.000 personas al año (Carrasco Cantos *et al.* 2002).

ESTADO FISIOLÓGICO: FLUORESCENCIA IN VIVO DE LA CLOROFILA

La fluorescencia *in vivo* de la clorofila es una técnica no intrusiva para determinar la fotosíntesis *in vivo* basada en la determinación de la fluorescencia de la clorofila del fotosistema II (PSII) (por pulsos de amplitud modulada, PAM) y que permite evaluar no sólo rendimientos cuánticos y capacidad fotosintética sino también la distribución de la energía, es decir cuanta energía se transfiere a la cadena de transporte de electrones fotosintética y aquella que es disipada. La fotosíntesis presenta reacciones a cinco niveles funcionales diferentes: procesos a

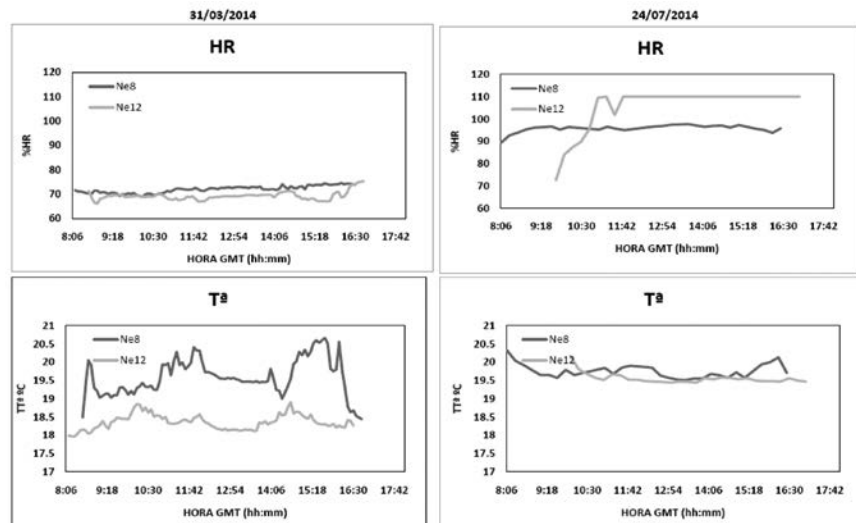


Figura.4 Humedad relativa (%) y Temperatura (°C) del aire en las estaciones Ne 8 y Ne 12.

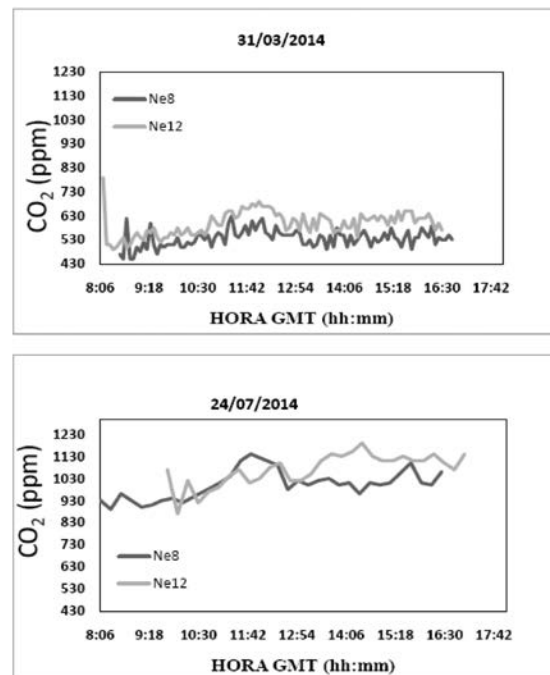


Figura. 5 Niveles de CO₂ en el aire en ppm en las estaciones Ne 8 y Ne 2 de la Cueva de Nerja en dos momentos del año.

nivel de pigmentos, reacciones lumínicas primarias (por ejemplo fotólisis del agua), reacciones de transporte de electrones a nivel tilacoidal, reacciones oscuras en el estroma (ciclo de Calvin) y procesos de retroalimentación regulatorios (lentos). En principio, la fluorescencia de la clorofila podría funcionar como indicador de todos los niveles funcionales citados. La clorofila es el pigmento mayoritario en la antena pigmentaria y canaliza la energía hasta los centros de reacción donde la conversión fotoquímica tiene lugar. La emisión de fluorescencia de la clorofila es complementaria a las otras vías alternativas de de-excitación, las cuales son la vía fotoquímica y disipación por calor. El rendimiento fluorescente es alto cuando los rendimientos fotoquímicos y disipación de calor son bajos. En experimentación ecofisiológica se precisan fluorímetros que provean de datos fiables sobre los procesos de amortiguamiento energético. Para este fin han sido desarrollados los fluorímetros de amplitud modulada (Schreiber *et al.*, 1986, 1993). Los fluorímetros de impulso (no modulados) convencionales tienen dos limitaciones fundamentales. En primer lugar, en la mayor parte de los casos el rayo de luz de amplitud modulada es lo suficientemente intenso como para provocar reacciones fotoquímicas por lo que no es posible una correcta determinación de la fluorescencia basal de las muestras. En segundo lugar, en combinación con los pulsos de saturación para la determinación de los parámetros de fluorescencia, la luz de medida debe ser impuesta sobre niveles de luz ambiental que superan su intensidad en un factor de 10^3 - 10^6 . Estas dos limitaciones han sido resueltas con el fluorímetro de amplitud modulada PAM desarrollado por Schreiber *et al.* (1993) y producidos entre otros por la empresa Heinz Walz GmbH (Effeltrich, Alemania). Existe una amplia descripción de los equipamientos producidos por esta empresa (tanto en el campo de la fluorescencia como en el análisis de evolución de gases, O₂ o CO₂ en su página web: <http://www.walz.com>). En este estudio se emplearon dos fluorímetros: PAM 2000 con luz de medida y luz actínica roja y Junior PAM con luces de medida y actínicas azules (Figura 1). En ambos fluorímetros la fuente de luz está constituida por diodos. Estos fluorímetros permiten la rápida determinación de parámetros de fluorescencia de forma repetitiva y fiable en la misma localización donde viven la cianobacterias y algas.

Se evaluaron dos rendimientos fotosintéticos, el rendimiento máximo (Fv/Fm) obtenido en algas adaptadas a oscuridad (por encima de 15 min) y es un indicador del estado fisiológico del alga (Ralph y Gademann, 2005) y el rendimiento efectivo (YII) o rendimiento de las algas iluminadas. El rendimiento efectivo es en general más bajo que el máximo ya que bajo iluminación hay parte de los centros de reacción reducidos y por lo tanto la eficiencia de transferencia de electrones disminuye. Por otro lado, se determinó la tasa de transporte de electrones relativa (rETR) calculado como el producto entre el rendimiento efectivo y la irradiancia PAR que incide sobre el biofilm. Se realizaron medidas de rendimiento a irradiancias crecientes suministradas por las fuentes de iluminación de los fluorímetros construyendo curvas de relación ETR-irradiancias. A partir de estas funciones se determina la producción relativa máxima (rETR_{max}), mediante la aplicación de ajustes tangenciales (Eilers y Peters, 1988). Detalles de la metodología sobre medida de fluorescencia en algas puede encontrarse en Figueroa *et al.* 2003 y 2013.

La relación entre el rendimiento cuántico efectivo de fluorescencia y la asimilación de carbono o la producción de oxígeno ha sido demostrada tanto en microalgas (Flameling y Kromkamp, 1998), microfítobentos (Kromkamp *et al.*, 1998), macroalgas (Longstaff *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2003) y *biofilms* de líquenes y briófitos en desiertos (Raggio *et al.*, 2014). Sin embargo, esta relación que valida el uso de las medidas de fluorescencia de la clorofila como una determinación indirecta de la actividad fotosintética no ha sido encontrada en todos los casos (Flameling y Kromkamp, 1998). El uso del rendimiento cuántico de fluorescencia en la estimación de la actividad fotosintética in situ a través de la tasa de transporte de electrones y el cálculo de parámetros análogos a los de las curvas de fotosíntesis vs. irradiancia también ha sido una práctica habitual en los diversos trabajos que han aparecido en los últimos años incluido *biofilms* (Hartig *et al.*, 1998, Flameling y Kromkamp, 1998 y Figueroa *et al.*, 2013).

En la estación Ne 8 con biofilms de *Chroococcidiopsis* sp. los rendimientos fotosintéticos determinados in situ aumentaron sensiblemente (8 veces) con la duplicación de los niveles de CO₂ en el interior de la Cueva. En cambio en la estación Ne 12 con un biofilm de mayor diversidad de organismos fotosintéticos, las diferencias no fueron apreciables presentando valores de rendimientos entre 0,4-0,5 en los momentos del año. El notable

incremento del rendimiento en la estación Ne 8 al aumentar los niveles de CO₂ indican que la comunidad de cianobacterias constituida por *Chroococciopsis* sp. está muy por debajo del nivel de saturación de la fotosíntesis por CO₂ respecto a la atmósfera actual, además, hay que tener en cuenta el efecto interactivo positivo del incremento de la humedad en julio que pasó al 95%, valores sensiblemente más altos que en marzo (72%).

En cambio, los rendimientos efectivos de la comunidad de la estación Ne 12 parecen insensibles o incluso disminuyen ligeramente con el incremento de CO₂. Podemos decir que la comunidad constituida por algas verdes *Desmococcus* sp. y cianobacterias, *Gloeocapsa* sp. y *Leptolyngbya* ya tiene su rendimiento fotosintético saturado a niveles de 500 ppm de CO₂. Hay que tener en cuenta además que en esta estación la hidratación de la roca fue completa en los dos momentos del año, aunque la humedad relativa del aire en marzo fuera próxima al 70%. Se han realizado estudios fotosintéticos en *Chroococciopsis* sp. basados en el análisis de fluorescencia in vivo de la clorofila a pues es una especie de gran interés debido a su elevada resistencia a la sequedad y a la radiación ultravioleta en desiertos (Baqué et al. 2012), lo que la hace una buena candidata para estudios de astrobiología (Cokell et al., 2005).

Por otro lado, los rendimientos máximos disminuyeron en el periodo de oscuridad. Esta disminución ha sido previamente observada en macroalgas (Figueroa et al., 2014) y gimnospermas (Porcar-Castell et al., 2008) y se ha relacionado con procesos de fotorrespiración (Peltier y Cournac, 2002) y una inactivación o cierre de fotosistema II en oscuridad que requiere una cierta irradiancia para su desactivación (Porcar-Castell et al., 2008; Figueroa et al., 2014). Finalmente se observa que los valores de rendimientos fueron mayores empleando luz roja como luz de medida (PAM-2000) que la luz azul (Junior-PAM). Esto ratifica la menor eficiencia cuántica de las cianobacterias en luz azul que en roja (Schreiber et al., 2011).

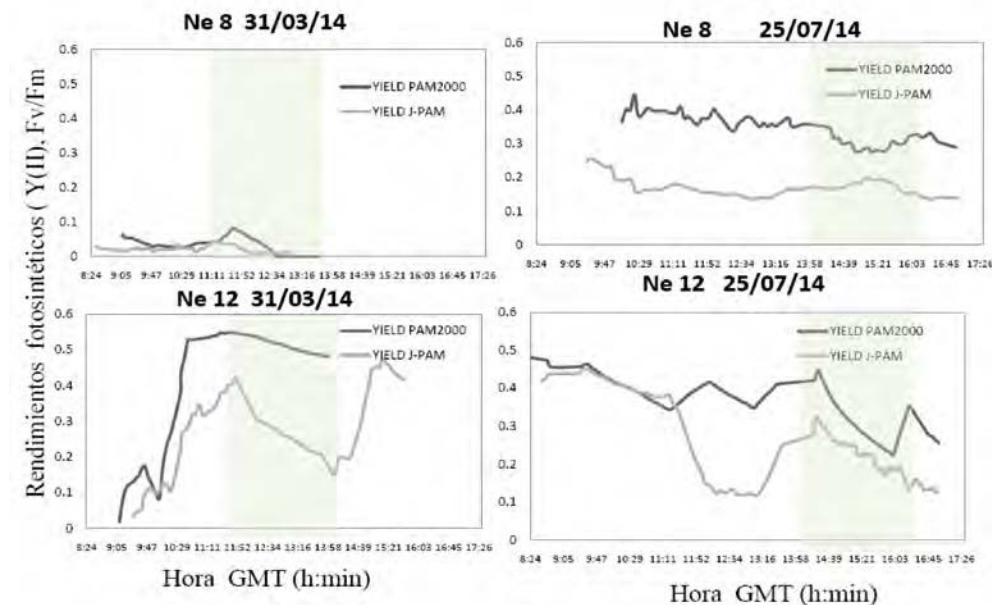


Figura 6. Rendimiento efectivo (Y(II)) en periodos de iluminación y rendimientos máximos (Fv/Fm) en periodos de oscuridad señalados con rectángulo sombreado determinados mediante los fluorímetros PAM 2000 (luz de medida roja) y Junior-PAM (J-PAM) con luz de medida azul en los biofilms de las estaciones Ne8 y Ne 12 en dos momentos del año (31 de marzo y 25 de julio de 2014).

TASA MÁXIMA RELATIVA DE TRANSPORTE ELECTRÓNICO (RETRMAX)

Finalmente, la capacidad máxima fotosintética de los biofilms hidratados expresado como tasa máxima relativa de transporte electrónico (rETR_{max}) fue mayor en julio que en marzo con diferencias mayores en la estación Ne 12 en donde se incrementa 2.6 veces mientras que en Ne 8 el incremento fue de solo 1,34.

Estación de muestreo	31 de marzo de 2014	25 de julio de 2014
Ne 8	4,21±0,65	5,8±0,7
Ne 12	4,63± 0,7	12,3± 1,5

Tabla 1. Tasa de transporte electrónico máxima (rETR_{max}) expresada en μmol electrones m⁻² s⁻¹ en los biofilms expuestos a irradiancias crecientes de radiación roja suministrada por el fluorímetro PAM 2000 en dos zonas de la Cueva de Nerja y en dos momentos del año.

En conclusión el incremento de CO₂ (500 a 1000 ppm aproximadamente) produce en la estación Ne 8 dominada por la cianobacteria *Chroococciopsis* sp. un incremento de 8 veces del rendimiento fotosintético pero solo de 1,34 veces en la producción. Esto se produce además con un incremento de la humedad relativa del 72 al 95%. En cambio en la estación Ne 12 con una comunidad mixta de algas verdes *Desmococcus* sp. y cianobacterias gelatinosas, *Gloeocapsa* sp. y *Leptolyngbya*, el rendimiento fotosintético se mantuvo constante e incluso con una ligera caída al incrementarse el CO₂ pero sí lo hizo la producción con incremento de 2,6 veces en julio respecto a marzo. En este periodo en la estación Ne 12 aunque la humedad relativa del aire se incrementó, la roca permanece siempre hidratada al circular agua por ella. En este trabajo se demuestra mediante el uso de la fluorescencia in vivo que la respuesta fotosintética a los incrementos de CO₂ dependen de la composición taxonómica de los biofilms y además la respuesta fisiológica es muy diferente. Mientras *Chroococciopsis* sp. incrementa la eficiencia, la comunidad mixta de algas verdes *Desmococcus* sp. y cianobacterias gelatinosas, *Gloeocapsa* sp. y *Leptolyngbya* incrementa la producción. Estos resultados son relevantes desde el punto de vista del diseño de sistemas de control y erradicación de los biofilms.

Incrementos de la productividad en comunidades de planctónicas con el aumento de los niveles de CO₂ han sido ampliamente demostrados en experimentos de laboratorio y en el medio natural (Tortell et al. 2008, Mercado y Gordillo, 2011; Engel et al. 2013) aunque hay especies que no presentan estimulación de la actividad fotosintética (Tortell et al. 2000) ni de la respiración (Tanaka et al., 2013) con el incremento de CO₂. Hay muy pocos estudios sobre los niveles de CO₂ y actividad fotosintética de biofilms (Villafañe et al., 2003).

En este trabajo se demuestra que los fluorímetros de pulso de amplitud modulada permiten tener información sobre el rendimiento y capacidad fotosintética de los biofilms de un modo no intrusivo y abre la posibilidad de usar esta información para la monitorización de la funcionalidad de los biofilms con las variaciones ambientales naturales. La microscopía confocal que aporta información estructural y la fluorescencia in vivo que da información funcional de los biofilms son técnicas complementarias no intrusivas que pueden valorar de manera más efectiva las estrategias de erradicación, prevención y control del biodeterioro de las cuevas turísticas en las áreas iluminadas.

REFERENCIAS

Albertano, P. y Urzi, C. 1999. Structural interactions among epilithic cyanobacteria and heterotrophic microorganism in Roman hypogea. *Microbial Ecology*, 38, 244-252.

Baqué, M., Viaggiu E., Scalzi G. y Billi D. 2012. Endurance of the endolithic desert cyanobacterium *Chroococciopsis* under UVC radiation. *Extremophiles*, 17, 161-169.

Barranguet, C., van Beusekom, S. A. M., Veuger, B., Neu, T. R., Manders E. M. M. y Sinke, J. J., Admiraal, W. 2004. Studying undisturbed autotrophic biofilms: still a technical challenge. *Aquatic Microbial Ecology*, 34, 1-9.

- Carrasco Cantos, F., Liñán Baena C., Durán-Valseo, J. J., Andreo Navarro, B. y Vadillo Pérez, I. 2002. Modificaciones de los parámetros ambientales de la Cueva de Nerja provocada por la entrada de visitantes. *Geogaceta*, 31, 15-18.
- Cockell C. S., Shuerger A. C., Billi, D., Friedmann E. I. y Panitz, C. 2005. Effects of simulated martian UV flux on the cyanobacterium, *Chroococcidiopsis* sp 029. *Astrobiology*, 5, 127-140.
- del Rosal, Y., Garrido, A., Liñán C. y Hernández-Mariné, M. 2010. Los biofilms fotosintéticos de la Cueva de Nerja (Málaga): catalogación, estudio y resultados preliminares. En: Durán, J. J. y Carrasco, F. (eds.). *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE), Madrid, 563-574.
- Eilers P. H. C. y Peeters J. C. H. 1988. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton. *Ecological Model*, 42, 199–215.
- Engel A., Borchard C., Piontek J., Schulz K. G., Riebesell U. y Bellerby R. 2013. CO₂ increases ¹⁴C primary production in an Arctic plankton Community. *Biogeosciences*, 10,1291-1308.
- Figueroa F. L., Conde-Álvarez R., Bonomi Barufi J., Celis Plá P., Flores P., Malta E. J., Stengel D. B., Meyerhoff O. y Pérez-Ruzafa A. 2014. Continuous monitoring of in vivo chlorophyll a fluorescence in *Ulva rigida* (Chlorophyta) submitted to different CO₂, nutrient and temperature regimes. *Aquat Biol. accepted*.
- Figueroa F. L., Conde-Álvarez R. y Gómez I. 2003. Relations between electron transport rates determined by pulse amplitude modulated chlorophyll fluorescence and oxygen evolution in macroalgae under different light conditions. *Photosynthesis Research*, 75,259-275.
- Figueroa F. L., Jerez C. y Korbee N. 2013. Use of in vivo chlorophyll fluorescence to estimate photosynthetic activity and biomass productivity in microalgae grown in different culture systems. *Latino American Journal of Aquatic Research*, 4, 801-819.
- Flameling I. A. y Kromkamp J. 1998. Light dependence of quantum yields for PSII charge separation and oxygen evolution in eukaryotic algae. *Limnology y Oceanography*, 43, 284–297.
- Hartig P., Wolfstein K., Lippemeier S. y Colijn F. 1998. Photosynthetic activity of natural microphytobenthos populations measured by fluorescence (PAM) and ¹⁴C-tracer methods: a comparison. *Marine Ecology Progress Series*, 166,53–62.
- Hernández-Mariné, M., Asencio-Martínez, A., Canals, A., Ariño, X., Aboal, M. y Hoffmann, L. 1999. Discovery of populations of the lime incrusting genus *Loriella* (Stigonematales) in Spanish caves. *Archiv für Hydrobiologie, Supplement Algological Studies*, 94, 121- 138.
- Kromkamp J., Barranguet C. y Peene J. 1998. Determination of microphytobenthos PSII quantum efficiency and photosynthetic activity by means of variable chlorophyll fluorescence. *Marine Ecology Progress Series*, 162,45–55.
- Lefevre, M. 1974. La maladie verte de Lascaux. *Studies in Conservation*, 19, 126-156. Mulec, J. y Kosi, G. 2009. Lampenflora algae and methods of growth control. *J. Cave Karst Stud.*, 71, 109-115.
- Longstaff B. J., Kildea T., Runcie J. W., Cheshire A., Dennison W. C., Hurd C., Klana T., Raven J. A. y Larkum A. W. D. 2002. An *in situ* study photosynthetic oxygen evolution exchange and electro transport rate in the marine macroalga *Ulva lactuca* (Chlorophyta). *Photosynthesis Research*, 74,281-293.
- Mercado J. M. y Gordillo F. J. 2011. Inorganic carbon acquisition in algal communities: are the laboratory data relevant to the natural ecosystems? *Photosynthesis Research*, 109, 257–267.
- Peltier G. y Cournac L. 2002. Chlororespiration. *Annu Rev Plant Biol*, 53, 523-550.
- Perkins R.G., Kromkamp, J. C., Serodio, J., Lavaud, J., Jesus, B., Mouget J. K., Lefebvre, S. y Forster, R. M. 2011. The application of variable chlorophyll fluorescence to microphytobenthic biofilms. In: D.J. Sugget et al. eds. Chlorophyll a fluorescence in aquatic sciences : methods and application, *Developments in Applied Phycology* 4 pp. 237-275 DOI 10.1007/978-90-481-7_12. Springer Science+Business Media
- Perkins R. G., Oxborough K., Hanlon A. R. M., Underwood G. J. C. y Baker N. R. 2002. Can chlorophyll fluorescence be used to estimate the rate of photosynthetic electron transport within microphytobenthic biofilms? *Marine Ecology Progress Series*, 228, 47–56.
- Perkins, R. G., Mouget, J. L., Lefebvre S. y Lavaud J. 2006. Light response curve methodology and possible implications in the application of chlorophyll fluorescence to benthic diatoms. *Marine Biology*, 149, 703–712.
- Porcar-Castell A., Pfündel E., Korhonen E. y Juurola E. 2008. A new monitoring PAM fluorometer (MONI-PAM) to study the short- and long-term acclimation of photosystem II in field conditions. *Photosynthesis Research*, 96,173-179.
- Raggio J., Pintado A., Vivas M., Sancho L. G., Büdel B., Colesie C., Weber B., Schroeter B., Lázaro R. y Green T.G.A. 2014. Continuous chlorophyll fluorescence, gas exchange and microclimate monitoring in a natural soil crust habitat in Tabernas badlands, Almería, Spain: progressing towards a model to understand productivity. *Biodiversity and Conservation*, DOI 10.1007/s10531-014-0692-8.
- Ralph P. J. y Gademann R. 2005. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, 82, 22-237
- Roldán, M., Thomas, F., Castel, S., Quesada, A. y Hernández-Mariné, M. 2004a. Non invasive pigment identification in living phototrophic biofilms by confocal imaging spectrophotometry. *Appl. Environ. Microbiol.*, 70, 3745-3750.
- Schreiber U. y Bilger W. 1993. Progress in chlorophyll fluorescence research: Major developments during the past year in retrospect. In: Lüttge H, Ziegler HE (eds) *Progress in botany*, Book 54. Springer, Berlin, pp. 151-173.
- Schreiber U., Klughammer C. y Kolbowski J. (2011). High-end multicolor fluorescence analysis with the Multicolor-PAM.I. Various light quality and applications. *PAM Application Notes*, 1,1-19.
- Schreiber, U., Schliwa, U. y Bilger, W. 1986. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer. *Photosynthesis Research*, 10,51-62.
- Tanaka T., Alliouane S., Bellerby R. G. B., Czerny J., de Kluijver A., Riebesell U., Schulz K. G., Silyakova A. y Gattuso J. P. 2013. Effect of increased pCO₂ on the planktonic metabolic balance during a mesocosm experiment in an Arctic fjord. *Biogeosciences*, 10, 315-323.
- Tortell P. D., Greg H. R., François M. y Morel M. 2000. Inorganic carbon acquisition in coastal Pacific phytoplankton communities. *Limnol Oceanogr*, 45,1485-1500.
- Tortell P. D., Payne C. D., Li Y., Trimborn S., Rost B., Smith W. O., Riesselman C., Dunbar R. B., Sedwick P. y DiTullio G. R. 2008 CO₂ sensitivity of Southern Ocean phytoplankton. *Geophys Res Lett*, 35, DOI: 10.1029/2007GL032583.
- Villafañe V. E., Sundbäck K., Figueroa F. L. y Helbling E. W. 2003. Photosynthesis in the aquatic environment as affected by UVR. In: E.W. Helbling and H. Zagarese (eds.) UV effects in aquatic organisms and ecosystems , pp 357–397. *The Royal Society of Chemistry*, Cambridge, Walker, J. J. and Pace, N. R. 2007.



PATROCINAN



COLABORAN



ISBN 978-84-617-1908-2



9 780201 379624