

NOTAS SOBRE LA EXPLORACIÓN DE LA SIMA IGUNSORO 4, ESPELEOTEMAS Y BIOFILMS DE MICROORGANISMOS (DONAMARÍA, VALLE DEL BIDASOA, NAVARRA).

Notes about the exploration of Igunsoro 4 abyss, espeleothems and microorganisms mats (Donamaría, valle del Bidasoa, Navarra).



Carlos GALÁN, Juliane FORSTNER & Marian NIETO. Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

NOTAS SOBRE LA EXPLORACIÓN DE LA SIMA IGUNSORO 4, ESPELEOTEMAS Y BIOFILMS DE MICROORGANISMOS (DONAMARÍA, VALLE DEL BIDASOA, NAVARRA).

Notes about the exploration of Igunsoro 4 abyss, espeleothems and microorganism mats (Donamaría, valle del Bidasoa, Navarra).

Carlos GALÁN, Juliane FORSTNER & Marian NIETO.

Con la colaboración de: Garbiñe Albisu, José M. Rivas & Egoitz Gabilondo.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.

E-mail: cegalham@yahoo.es

Julio 2021.

RESUMEN

Se describe el hallazgo de una nueva cavidad localizada en un afloramiento de calizas arrecifales Urgonianas de edad Aptiense (Cretácico temprano) en la parte alta de una estribación del monte Demanda (Donamaría, Navarra). Las prospecciones efectuadas permitieron el hallazgo de una nueva sima, de -17 m de desnivel, la cual posee diversos tipos de espeleotemas y biofilms de microorganismos. Estos incluyen Actinobacteria, protozoos Mycetozoa, biofilms rojos de Chromista (reino derivado del reino basal de los protozoos) de la clase Cryptophyceae, y tapices de algas. Se describe la cavidad y se presentan también algunos datos sobre fauna cavernícola. Se comentan los rasgos hidrogeológicos del conjunto.

Palabras clave: Karst en caliza, Biología subterránea, Microbiología, Mycetozoa, Chromista, Hidrogeología.

ABSTRACT

The discovery of a new cavity located in an outcrop of Urgonian reef limestone of Aptian age (early Cretaceous) in the upper part of a foothill of Mount Demanda (Donamaría, Navarra) is described. The surveys carried out allowed the discovery of a new chasm, with a drop of -17 m, which has various types of speleothems and biofilms of microorganisms. These include Actinobacteria, Mycetozoa protozoa, Chromista red biofilms (kingdom derived from the basal kingdom of protozoa) of the class Cryptophyceae, and carpets of algae. The cavity is described and some data on cave fauna are also presented. The hydrogeological features of the complex are discussed.

Keywords: Limestone karst, Underground biology, Microbiology, Mycetozoa, Chromista, Hydrogeology.

INTRODUCCION

En fechas recientes hicimos varias salidas de prospección en la región de Donamaría, a la vez que realizábamos un estudio sobre el ecosistema cavernícola de la cueva Igunsoro 1 (Galán et al, 2021). En una de ellas encontramos una nueva sima, inexplorada, de pequeña boca, que no figuraba en el Catálogo Espeleológico de Navarra, que denominamos Igunsoro 4.

La cavidad resultó de modestas dimensiones (-17 m de desnivel), pero concitó nuestro interés por presentar diversos tipos de espeleotemas, formas de corrosión y, sobretudo, por contener una curiosa gradación de biofilms de microorganismos, de distintos coloridos y modos de ocurrencia, que se extienden desde la zona de penumbra hasta la parte profunda en oscuridad total.

Los biofilms son colonias organizadas y estructuradas de microorganismos que, en el caso de las bacterias, están incluidas en una matriz de exopolisacáridos fabricadas por ellas mismas. Se estima que el 80% de la biomasa microbiana terrestre reside en el interior de biofilms. La capacidad de formar biofilms no parece restringirse a ningún grupo específico de microorganismos y, en la actualidad, se considera que bajo condiciones ambientales adecuadas la inmensa mayoría de ellos, independientemente de la especie, pueden existir dentro de biofilms adheridos a superficies en una interfase sólido/líquida, tal como ocurre en el interior de muchas cuevas (Caumartin, 1963; Northup & Lavoie, 2001; Bonacci et al, 2009; Engel, 2010; Engel & Northup, 2008). Los biofilms son en sí mismos ecosistemas en miniatura, con características funcionales y estructuras complejas, conformados por una o varias especies de microorganismos (bacterias, arquea, protozoos) asociados a una superficie o sustrato.

En años previos describimos de cuevas de Gipuzkoa la ocurrencia de biofilms plasmodiales de intenso color amarillo-oro de amebas gigantes Mycetozoa (protozoos Amoebozoa), los cuales fagocitan bacterias (Galán & Nieto, 2010; Galán et al, 2010), grupo que ha ido mostrando poseer una amplia distribución en los karsts de Gipuzkoa. En este caso, en la sima Igunsoro 4, encontramos otro curioso ejemplo de biofilms de color rojo sobre coladas estalagmíticas, constituido por chromistas de la clase Cryptophyceae.

Este grupo, antiguamente conocido como algas de criptas y cuevas, es actualmente incluido entre los organismos unicelulares eucariotas del phylum Cryptophyta del reino Chromista (Cavalier-Smith, 2010), un reino independiente de microorganismos derivado del reino basal Protozoa. La clase Cryptophyceae está constituida por organismos unicelulares flagelados, fotosintéticos y bacteriófagos, con el interés evolutivo añadido de proceder por endosimbiosis secundaria de un alga roja.

Así, además de topografiar y catalogar la cavidad, incluimos en este trabajo datos de interés zoológico y microbiológico, con comentarios algo más extensos sobre aspectos ecológicos poco conocidos del karst y del ambiente subterráneo.

MATERIAL Y MÉTODOS

La cavidad fue explorada con técnicas de escalada y espeleología vertical (cuerda estática, jumars y escalas) y fue topografiada con instrumental de precisión Suunto. El plano de la sima fue dibujado en programa Freehand. Las muestras de fauna y biofilms fueron estudiadas en laboratorio bajo microscopio binocular Nikon y microscopio óptico M11 Wild-Heerbrugg Suiza. Los principales rasgos de la cavidad son ilustrados con fotografía digital.

RESULTADOS

En el sector de Igunsoro del monte Demanda (775 m snm), situado a 2,5 km al SE de Donamaría (cuenca del río Bidasoa), existían tres cavidades catalogadas, denominadas Igunsoro 1, 2 y 3. En la mayor de ellas (Igunsoro 1, cueva de 184 m de desarrollo y -44 m de desnivel) efectuamos hace poco un estudio de su fauna cavernícola (Galán et al, 2021), visitando también las otras dos. Durante estas prospecciones encontramos una nueva cavidad, no catalogada e inexplorada, que denominamos Igunsoro 4. El hallazgo resultó inesperado ya que posee una pequeña boca (1 m de diámetro) abierta en una zona de prados con pequeñas rocas, en la parte alta de la ladera, y queda oculta por un grupo de zarzas, por lo que no resulta visible a menos que se pase justo al lado de ella. No presenta ningún signo de haber sido visitada ni está cercada por los pastores que tienen su ganado en la zona. Su interior también está intacto. La sima se sitúa a 102 m al NNE de Igunsoro 1, y 20 m más alta.

La sima presentaba una vertical acampanada, más amplia en su base, de -8 m de desnivel estimado, dando la impresión de poseer una galería inferior. Debido a su cercanía a la cueva de Igunsoro 1, y al estar en posición más alta, pensamos que Igunsoro 4 podría comunicar con las galerías de la cueva 1 o al menos tener un desarrollo del mismo tipo. Por lo que valía la pena explorarla. Expondremos a continuación los datos obtenidos.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El sector de Igunsoro forma parte del anticlinorio Norte del Arco Plegado Vasco, continuación de la zona Norpirenaica francesa en la región (Campos, 1979; Boillot & Malod, 1988; Rat, 1988; Galán, 1993). Las cavidades están situadas sobre un afloramiento de caliza que se extiende en sentido WSW hasta el arroyo Ezpeloko erreka, al Sur de Oitz. Esta banda de calizas Urganianas (de edad Aptiense-Albiense, Cretácico temprano), tiene una potencia media de 200 m. El buzamiento observado en la sima es de 30-40° SE.

Litológicamente se trata de calizas con construcciones de rudistas que se extienden sobre el flanco N del sinclinal del monte Demanda. Constituyen la unidad litoestratigráfica 133 (SITNA - Navarra), formando parte del Complejo Urganiano (Campos, 1979; Faci Paricio et al, 2002). En las proximidades del arroyo de Charuta, los últimos niveles de este tramo se encuentran marmorizados, debido al metamorfismo provocado por su proximidad a la falla de Leiza.

La unidad está formada por un conjunto de calizas micríticas, con construcciones de rudistas de distintos tamaños. Alternando con estos niveles se observan algunos tramos de calizas bioclásticas, formados por fragmentos de la bioconstrucción. Estos niveles, de color gris, se encuentran muy recristalizados y localmente marmorizados y dolomitizados, presentando un alto contenido en materia orgánica.

Los estudios faunísticos han determinado la presencia de moluscos, equinodermos, corales, algas calcáreas y rudistas, de especies que permiten atribuirles una edad Aptiense-Albiense. Esta unidad se asocia a depósitos de una amplia plataforma carbonatada, compuesta por facies micríticas con rudistas y corales distribuidos en bancos de orden métrico, con entradas de material terrígeno en un pequeño surco desarrollado en la zona de Oroquieta. Los estudios petrográficos han señalado para las calizas el predominio de biomicritas y biomicritas pelletíferas, con variaciones notables del contenido micrítico (47-80%), foslilífero (12-35%) y pelletífero (menor al 20%), y presencia ocasional de cuarzo e intraclastos (Faci Paricio et al, 2002).

DESCRIPCIÓN DE LA CAVIDAD

Sima Igunsoro 4.

Localización: A 102 m al NNE de Igunsoro 1. A 2,5 km al SE de Donamaría.

Coordenadas ETRS89, UTM30N: N 4.773.002; E 609.879; Altitud: 568 m snm.

Dimensiones: Desnivel -17 m. Desarrollo 28 m.

Topografía: C. Galán & J. Forstner. S.C.Aranzadi. 2021.

Plano de la cavidad en Figura 01. Imágenes de la cavidad en Figuras 02 á 10.

Descripción: La boca, de 1 m x 1,5 m de diámetro, está oculta por un grupito de pequeños arbustos espinosos y zarzas. La boca cae en vertical aérea de -8 m, de forma tubular-acampanada, más amplia en su base (3 m de diámetro). Las paredes de la sima tienen aristas de corrosión y rebordes sinuosos, en roca-caja de caliza compacta, y diversas espeleotemas y recubrimientos de coladas estalagmíticas de calcita, con flujos de láminas de agua y goteos. Algunos nichos laterales a lo largo del trazado presentan una profusión mayor de espeleotemas.

La base de la vertical forma una galería en rampa descendente, que se amplía y dobla en ángulo, y presenta otro resalte vertical de -2 m, continuando en rampa de bloques sueltos en cuyo fondo (cota -17 m) la cavidad se cierra en gateras, impracticables por estrechas, en dos puntos distintos. Varios goteos e hilos de agua se infiltran entre los bloques. Previo al escalón de -2 m hay una alta chimenea fusiforme con coladas columnares y, en un costado de su base, otra galería en gatera vertical en roca compacta, impracticable. Debe existir una continuación inferior más amplia, ya que observamos murciélagos en vuelo que se desplazaban entre esta gatera y uno de los estrechamientos del fondo de la cavidad.

El suelo de la cavidad carece de espeleotemas y está cubierto de bloques, limpios de otros sedimentos. Las paredes y bóvedas presentan aristas de corrosión, algunas de formas muy afiladas, y sin embargo están recubiertas de espeleotemas. Las paredes poseen costras y coladas de calcita, estalactitas cónicas (algunas creciendo de forma excéntrica, perpendiculares a la pared) y pequeñas espeleotemas botroidales también de calcita, así como costras y formas globulares de aragonito. Es un curioso conjunto donde las morfologías de corrosión de las paredes alternan con una gran profusión de espeleotemas. Es probable también que algunas formas hialinas y botroidales contengan ópalo-A, de origen biogénico.

Y es que, junto o sobre las espeleotemas hay numerosos biofilms, principalmente de Actinobacteria y Mycetozoa, que pueden contribuir mediante subproductos de su metabolismo, tanto a procesos de corrosión de la roca como a la precipitación de carbonatos y formación de espeleotemas. Trataremos este tema al final del siguiente apartado.

La morfología fusiforme de la sima sugiere que esta se ha formado en el endokarst, y ha evolucionado ampliando progresivamente su volumen por disolución o corrosión de las paredes, aumentando su altura hasta abrirse al exterior. Este tipo de pozos de disolución, de sección cilíndrica u oval, y forma ahusada, frecuentemente se forman en karsts cutáneos de montaña, en zona templada, en calizas masivas como las del complejo Urgoniano (Maire, 1980).

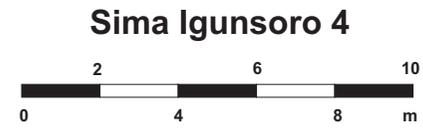
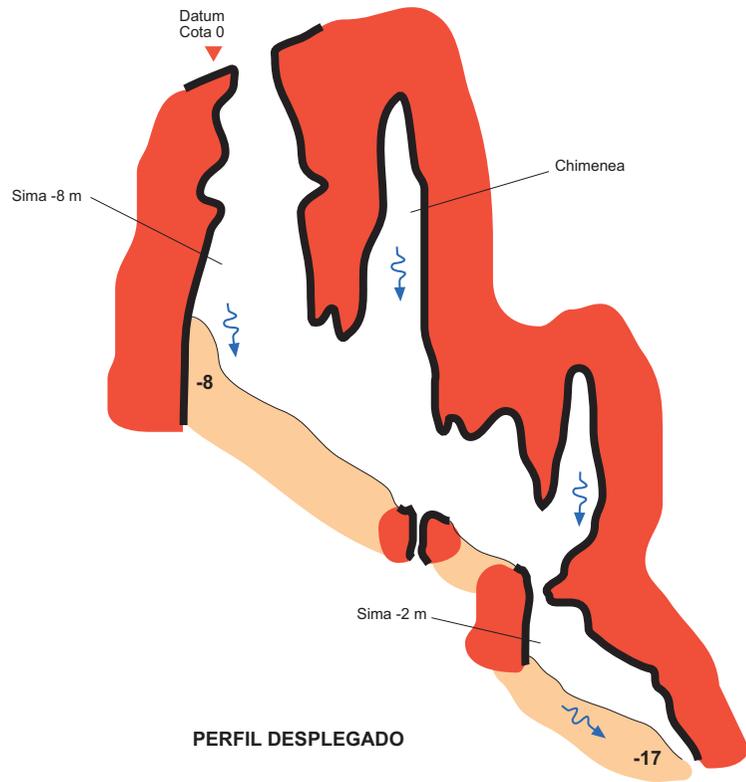
MICROORGANISMOS Y FAUNA CAVERNÍCOLA

La cavidad, dada su pequeña boca, posee una zona de penumbra acentuada, hasta la base del pozo de -8 m, a la que sigue una zona oscura (a la que eventualmente puede llegar una débil intensidad lumínica), y tras el acodamiento de la galería en rampa constituye una zona de oscuridad total. La humedad relativa es muy elevada (100% a sobresaturación), con numerosas películas de agua y goteos, y el ambiente es isotérmico (temperatura media de 10°C).

La sima posee algunos representantes de fauna troglóxena y trofófila, comunes en cuevas de la región, principalmente moluscos gasterópodos Zonitidae (*Oxychillus cellarius* y *Oxychillus draparnaudi*) y Clausiliidae (*Clausilia bidentata pyrenaica*), opiliones Nemastomatidae (*Nemastoma bimaculatum*), araneidos Tetragnathidae (*Meta bourneti*) y Agelenidae (*Tegenaria inermes*), isópodos Oniscidae (*Oniscus asellus*), y varias especies de dípteros, en distintas familias (Sciaridae, Limnobiidae, Mycetophilidae). Las especies de *Oxychillus*, *Tegenaria*, *Meta* y *Oniscus* son troglófilas. También encontramos en la cavidad dos ejemplares de quirópteros *Myotis daubentoni* (Vespertilionidae), especie también presente en Igunsoro 1 (Galán et al, 2021), y que ocasionalmente se presenta en cuevas (Galán, 1997).

En zona de penumbra, hasta la cota -8 m, son frecuentes películas de algas verdes sobre la roca-caja, así como tapices de musgos y pequeños helechos en las primeras repisas, próximas a la boca. En zona de penumbra más acentuada hay algunos recubrimientos morados que probablemente corresponden a Cyanobacteria (aunque pudiera también tratarse de algas). En zona oscura se presentan numerosos biofilms blancos de Actinobacteria, que cubren grandes superficies y a menudo se confunden con los depósitos de carbonatos, así como extensiones menores de biofilms amarillos que corresponden a Mycetozoa, similares a los hallados previamente en cavidades de Gipuzkoa (Galán & Nieto, 2010; Galán et al, 2010). Es posible que los tapices amarillos de colores más claros incluyan también bacterias de ese color. Pero la ocurrencia más llamativa de biofilms corresponde a unos tapices rojizos sobre coladas estalagmíticas húmedas en la base de la sima de Cryptophyceae (reino Chromista), organismos unicelulares flagelados actualmente incluidos en un reino independiente derivado del reino basal Protozoa (Cavalier-Smith, 2010).

Figura 01. Plano de la cavidad.



Coordenadas ETRS6, UTM 30N:
N 4.773.000; E 609.879; Altitud: 568 m snm.
Dimensiones: Desarrollo 28 m. Desnivel -17 m.
Topografía: C.Galán & J. Forstner. SCA. 2021.
Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología SCA.

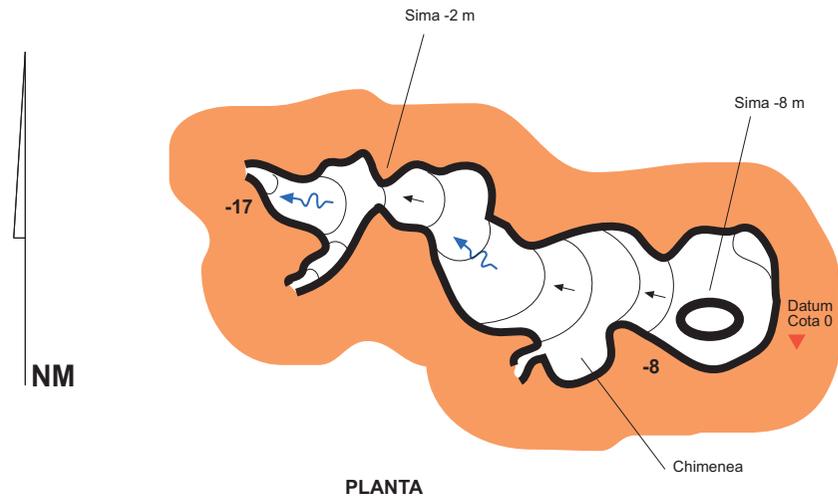




Figura 02. Zona de Igunsoro, en una estribación del monte Demanda (Donamaría, Navarra), con algunos integrantes de las salidas de exploración y muestreos biológicos en las cavidades del sector.

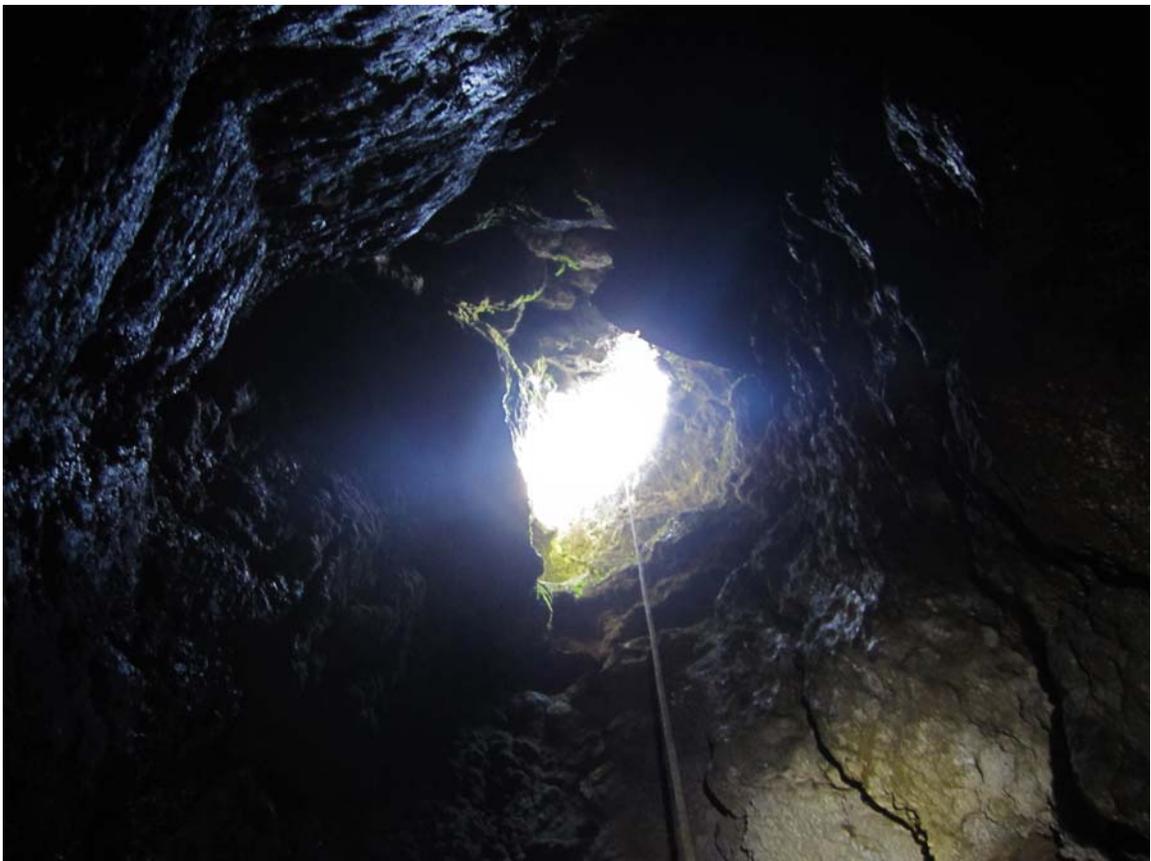


Figura 03. Boca semi-oculta de la sima Igunsoro 4 y vista de la vertical de acceso de -8 m desde el interior.



Figura 04. Vista desde el interior hacia la base del pozo de entrada, con diversas espeleotemas, tapices amarillos de protozoos Mycetozoa y blancos de Actinobacteria. Imágenes con flash.



Figura 05. Tapices amarillos de Mycetozoa (flechas rojas) y chimenea ahusada con espeleotemas columnares y cónicas.



Figura 06. Galería en rampa y paso estrecho con vertical de -2 m. Se aprecian espeleotemas cónicas y botroidales, algunas de crecimiento excéntrico (flecha roja), y recubrimientos blancos de Actinobacteria y carbonatos.



Figura 07. Rampa de bloques y vertical de -2 m, con láminas de corrosión, pequeñas espeleotemas botroidales sobre las aristas y biofilms blancos de Actinobacteria.



Figura 08. Colectando fauna bajo la vertical de -2 m y ascenso del paso estrecho. Notese a ocurrencia de láminas de corrosión, pequeñas espeleotemas botroidales y biofilms blancos de Actinobacteria.



Figura 09. Coladas estalagmíticas de calcita en la cota -8 m y biofilms rojos de Cryptophyceae.



Figura 10. Tapices de algas verdes en la vertical de acceso y cornisas superiores con espeleotemas, algas y musgos.

Cryptophyceae es una clase de microorganismos unicelulares flagelados que habitualmente viven en aguas frías, dulces o marinas, oligotróficas, pero también sobre sustratos de roca húmedos. Poseen clorofila a y c2, ficocianina, ficoeritrina y carotenos, por lo que adquieren colores marrones, rojizos y/o verde-azulados. Son organismos autótrofos y bacteriófagos, capaces de vivir en medios con luz escasa gracias a la combinación de pigmentos fotosintéticos que poseen. Se conocen unas 200 especies .

Las muestras examinadas al microscopio poseen una estructura compleja, en las que es posible observar células individuales, con forma oval de 10 micras de talla. Éstas están englobadas en una especie de gelatina, formando colonias grandes y lobuladas, que aparentemente se multiplican por separación de lóbulos o por formación de zoosporas biflageladas.

Según la bibliografía revisada son fotótrofos y bacteriófagos a la vez. La ingestión de bacterias por fagocitosis les proporciona el fósforo y nitrógeno que necesitan. Algunas especies son abundantes en aguas frías, habitando en la zona profunda de escasa luz de lagos nórdicos y de alta montaña, donde pueden sobrevivir a la congelación invernal y polar.

Las criptofíceas tienen uno o dos plastos laminares, situados en posición parietal, muchas veces bilobulados. Estos presentan generalmente un único pirenoide en el centro del plasto, hacia el lado dorsal de la célula, o bien en posición central entre los dos lóbulos. Los plastos están rodeados por cuatro membranas y contienen un orgánulo, el nucleomorfo, incluido en un compartimento entre las dos membranas interiores y las dos exteriores. El nucleomorfo contiene un genoma altamente reducido, lo que sugiere que el plasto se derivó de un simbiote eucariota, siendo el nucleomorfo el remanente del núcleo del simbiote. Los estudios genéticos sugieren que el simbiote pudo haber sido un alga roja, aunque sus rodoplastos son muy diferentes.

Evolutivamente, las criptofíceas se originaron por simbiogénesis entre una célula heterótrofa huésped y un alga endosimbionte Rhodophytina, lo que constituye una endosimbiosis secundaria. Por ello, los plastos de las criptofíceas comparten características comunes con las algas rojas, tales como la presencia del pigmento rojo ficoeritrina y la r-ficocianina.

El grupo está incluido en el reino Chromista (Cavalier-Smith, 2010), derivado del reino basal de los Protozoa. El reino Chromista incluye algas cromofitas, diatomeas, dinoflagelados, haptofitas, cryptofitas, algas pardas, cloracneas, y los grupos heterótrofos de los ciliados, foraminíferos, radiolarios, heliozoos y oomicetos. Según esta moderna re-clasificación taxonómica de los taxa basales de organismos, Protozoa constituye un supergrupo basal parafilético eucariota (grado), pero excluye a todos aquellos grupos caracterizados por contener diversos tipos de algas y otros organismos relacionados con ellas y que Cavalier-Smith agrupa en el reino Chromista. Protozoa constituye así el primer nivel o grado evolutivo en la historia del mundo eucariota y se puede definir como el grupo constituido por todos los eucariontes que no pueden considerarse animales, plantas, hongos ni cromistas, ya que estos reinos superiores provienen en última instancia de algún tipo de protozoo primitivo dentro de su historia evolutiva.

Así la cavidad posee una serie de biofilms o biopelículas, que incluyen criptofíceas rojas, algas verdes y cyanobacterias azuladas en zonas de penumbra, y tapices blancos de Actinobacteria y amarillos de Mycetozoa (protozoos Amoebozoa) en zona oscura. Estos microorganismos se encuentran en estado libre sólo transitoriamente (fase planctónica). Las células individuales se van asociando al sustrato por adhesión y luego se agregan en microcolonias celulares, generando por posterior maduración de la biopelícula los tapetes o recubrimientos microbianos que observamos a simple vista. En una última fase las células que conforman el tapete se desprenden de la colonia, retornan a la vida planctónica y se dispersan para repetir el ciclo y extenderse.

Los biofilms microbianos, aunque sólo tienen un espesor milimétrico, están formados por capas de microorganismos, que se mantienen unidas o incrustadas en una matriz de sustancias poliméricas extracelulares (exopolisacáridos y proteínas) segregadas por ellos mismos, conteniendo una o varias especies distintas, y formando un micro-ecosistema que crece sobre superficies generalmente húmedas o sumergidas. Algunos de los microorganismos pueden formar redes de filamentos que endurecen los films. La formación de los biofilms se inicia mediante señales extracelulares presentes en el medio o producidas por los microorganismos. Una vez adheridos a un sustrato, coordinan la diferenciación y formación de estructuras complejas, con características funcionales diversas, así como el desarrollo de una matriz extracelular adhesiva protectora. Se estima que el 80% de la biomasa microbiana terrestre reside en el interior de biofilms (Northup & Lavoie, 2001; Engel, 2010).

De modo general, un biofilm puede contener un 15% de células y un 85% de matriz extracelular, en la que se forman canales y estructuras por donde circulan agua, enzimas, nutrientes y residuos. Allí las células y grupos de células pueden establecer relaciones de cooperación, comunicándose a través de señales químicas, que regulan la expresión de los genes de manera diferente en las distintas partes de la comunidad, como un tejido en un organismo pluricelular. Para adaptarse a un biofilm, los microorganismos hacen cambios en su estructura y metabolismo. Algunos genes y proteínas se encienden y se apagan a través de las diferentes fases de desarrollo de la comunidad. La expresión génica de las biopelículas es bastante distinta a la de las células planctónicas ya que los requerimientos y organizaciones son muy diferentes y es necesaria una sincronización de eventos para vivir en comunidad. Por ello resulta difícil no sólo identificar las especies presentes sino también el funcionamiento del conjunto.

Los biofilms en las cuevas pueden participar en procesos de disolución y corrosión del sustrato rocoso, así como en procesos constructivos de deposición y génesis de minerales secundarios o espeleotemas. En la sima Igunsoro 4 encontramos ejemplos de formas de corrosión de la roca-caja caliza, así como ejemplos de formación de espeleotemas botroidales, excéntricas y en forma de encostramientos o recubrimientos extensos, muchos de los cuales probablemente están asociados a la actividad de los microorganismos que conforman los biofilms, pero es poco o nada lo que sabemos de las interconexiones geomicrobiológicas en unos casos u otros. Podemos apreciar algo sobre su macroforma o colorido, u observar algunos detalles al microscopio, a diferentes aumentos, pero en realidad desconocemos la extraordinaria complejidad de estos conjuntos de seres vivos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Esta breve nota aporta datos sobre una nueva cavidad en un afloramiento de calizas Urgonianas en la zona de Donamaría (valle del río Bidasoa). Aunque posee dimensiones modestas, alberga varias especies de invertebrados cavernícolas y quirópteros, destacando la ocurrencia de variados biofilms, que incluyen Algas, Cyanobacteria, Actinobacteria, Mycetozoa y Cryptophyceae.

Los biofilms de microorganismos han sido la forma más temprana de vida sobre la Tierra, existiendo evidencias fósiles desde hace 3.500 millones de años. Estos se presentan en todo tipo de ambientes, incluyendo medios extremos, como las cavernas. Trabajos efectuados en las dos últimas décadas, incluyendo secuencias de rARN 16S y 18S en cultivos de muestras de cuevas han identificado la presencia en ellas de aproximadamente la mitad de los filos bacterianos reconocidos y algo menos de la mitad de los filos de arqueas reconocidos. No obstante, sabemos más sobre la diversidad eucariota microbiana de las descripciones de especies clásicas en lugar de las secuencias de genes moleculares (Bonacci et al, 2009).

En el medio subterráneo existe un conjunto de vacíos en continuidad, desde espacios intergranulares hasta fracturas, conductos y macrocavernas, que a su vez están conectados a los ecosistemas de superficie. Junto a organismos quimioautótrofos, capaces de sintetizar materia orgánica en ausencia de la luz solar, existen también organismos heterótrofos que proceden de superficie y necesitan materia orgánica para reproducirse, la que es aportada por las aguas de infiltración, por el ingreso de troglóxenos y por frecuentes restos vegetales que ingresan por gravedad a través de las bocas de simas y cuevas.

Estos dos tipos de poblaciones, una exógena y heterotrófica, y otra endógena y autotrófica, comunmente no son halladas juntas (Caumartin, 1961). En presencia de materia orgánica predominan formas heterótrofas, mientras que las autótrofas son eliminadas por ser más sensibles a las modificaciones en el equilibrio químico. Las bacterias en general se encargan de la descomposición de los residuos muertos y excreciones, disgregando el complejo orgánico en formas inorgánicas simples. A través de esta acción ingresan de nuevo en el ciclo de los elementos las combinaciones químicas de carbono, nitrógeno y fósforo que, a no ser por estas transformaciones, se perderían para el resto de los organismos. Las bacterias heterótrofas metabolizan la materia orgánica y sintetizan su propia sustancia, constituyendo así un canal entre la materia orgánica y la biomasa animal, ya que muy diversos crustáceos, diplópodos e insectos troglobios se alimentan de bacterias en alguna fase de su ciclo de vida. Las bacterias autótrofas quimiosintéticas son capaces de producir en oscuridad total la síntesis de materia orgánica nueva, ya que gracias a su especial metabolismo obtienen energía de la oxidación de compuestos inorgánicos. En conjunto, la acción de las bacterias en las cavernas consiste en determinar los cambios que sufre la materia orgánica, ya sea en el sentido de su mineralización, ya en el de su síntesis.

Las cuevas, en cuanto a la penetración e intensidad de la luz presentan tres zonas distintas: zona de entrada, penumbra y zona oscura. Cada zona tiene condiciones fisicoquímicas y de nutrientes específicas relacionadas con gradientes que influyen en la distribución de los seres vivos. Además, las diferentes partes de las galerías en zona oscura (obviamente la más extensa) pueden tener condiciones drásticamente diferentes, como concentraciones de metales u oxígeno disuelto, disponibilidad de agua, litología, tipos de sustrato. También parte de ella puede depender de material orgánico alóctono introducido por el aire, el agua que fluye o gotea, o el guano, mientras que es generalizada la utilización del carbono orgánico autóctono, producido a partir de la productividad primaria quimiolitototrófica.

En simas de modestas dimensiones, como la que es objeto de este trabajo, las tres zonas están representadas casi por igual, existiendo por lo tanto un continuo y una gradación de los biofilms, con especies y grupos taxonómicos que van desde las algas fotosintéticas hasta bacterias quimioautótrofas, estando representados grupos capaces tanto de fotosíntesis como de fagocitosis o predación de otros microorganismos, tales como Cyanobacteria, Cryptophyceae y Mycetozoa.

Aunque se han logrado importantes avances en nuestra comprensión de las funciones geomicrobiológicas y biogeoquímicas de los microorganismos cavernícolas en los ciclos de metales y nutrientes, incluida la disolución y precipitación de carbonatos, existen todavía muchos interrogantes. Los métodos de extracción de ADN y ARN, así como el aislamiento y cultivo de bacterias, permiten identificar y describir un importante número de especies y grupos de especies, así como reproducir en el laboratorio los efectos de la acción microbiana sobre las rocas y minerales. Sin embargo, el aislamiento o identificación de una cepa bacteriana no significa que esta especie esté metabólicamente activa en una cueva, sino que podría haber llegado a ella transportada por el aire o el agua, puede también tratarse de ADN antiguo, de células muertas, o encontrarse inactiva y atrapada en un biofilm, junto a otras especies que realmente están activas en la cueva. El estudio del ARN incluye protocolos de extracción y manipulación más complejos y costosos (por lo que esta técnica ha sido escasamente aplicada en el estudio de microorganismos en cuevas), pero dado que la cantidad de ARN en una célula es proporcional a su actividad metabólica, puede permitir obtener mayor información para discriminar las especies que están metabólicamente activas y que participan en los procesos biogeoquímicos que ocurren en una cueva. Tal vez los mayores interrogantes que plantea la complejidad de los distintos biofilms, no es sólo su composición en especies o su microestructura, sino el conocer los procesos biogeoquímicos en los que interactúan y sus resultados, a nivel de su acción sobre la roca-caja y espeleotemas, y sobre su papel en la síntesis o degradación de la materia orgánica, y su significado como aporte trófico para el conjunto del ecosistema y su fauna de invertebrados cavernícolas.

Los biotopos más estables y bajos en nutrientes (bajos en carbono y nitrógeno orgánico), propios del ambiente profundo de las cuevas, han ido siendo colonizados por microorganismos desde antiguo y, según su litología y condiciones hidrológicas, la selección ha conducido a su adaptación al ambiente hipógeo y a la diferenciación de taxa específicos, auténticos cavernícolas.

La principal conclusión de este trabajo es que aún es muy poco lo que conocemos de la diversidad microbiana en ambientes subterráneos y, como ha sido dicho, de su actividad metabólica y de los procesos en que interactúan estos microorganismos. Se trata en consecuencia de un microcosmos que permanece aún en gran parte desconocido. En esta nota nos limitamos a aportar los datos obtenidos en una simple cavidad, que resultó llamativa, especialmente, por la diversidad de biofilms coloridos que contiene y sus rasgos hidrogeológicos asociados.

AGRADECIMIENTOS

A todos los integrantes y colaboradores del Laboratorio de Bioespeleología de la S.C.Aranzadi que participaron en las prospecciones y trabajos de campo en las cavidades de Igunsoro y que permitieron el hallazgo y exploración de la sima Igunsoro 4. A tres revisores anónimos, del Centro de Ecología del IVIC (Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas), BC - Biosphere Consultancies (Reino Unido) y Sociedad de Ciencias Aranzadi (San Sebastián, País Vasco), por sus aportes críticos, correcciones y sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Bonacci, O.; T. Pipan & D.C. Culver. 2009. A framework for karst ecohydrology. *Environmental Geo.*, 56: 891-900.
- Caumartin, V. 1961. La Microbiologie souterraine: ses techniques, ses problèmes. *Bull. Soc. Nord. France*, 14.
- Caumartin, V. 1963. Review of the microbiology of underground environments. *Bull. Nat. Speleol. Soc.*, 25:1-14.
- Cavalier-Smith, T. 2010. Kingdoms Protozoa and Chromista and the eozoan root of the eukaryotic tree. *Biol. Lett.* 6: 342-345.
- Engel, A.S. & D. Northup. 2008. Caves and karst as model systems for advancing the microbial sciences. In: Martin, J. & W. White (eds). *Frontiers in Karst Research*. Karst Waters Institute, Special Publication 13, Leesburg Virginia, pp 37-48.
- Engel, A.S. 2010. Microbial Diversity of Cave Ecosystems. Chapter 10, in: L.L. Barton et al. (eds.), *Geomicrobiology: Molecular and Environmental Perspective*, 219 Springer Science.
- Galán, C. 1993. Fauna Hipógea de Gipuzkoa: su ecología, biogeografía y evolución. *Munibe (Ciencias Naturales)*, S.C.Aranzadi, 45: 1-163 (número monográfico).
- Galán, C. 1997. Fauna de Quirópteros del País Vasco. *Munibe (Ciencias Naturales)*, S.C. Aranzadi, 49: 77-100.
- Galán, C.; Nieto, M. & C. Vera Martin. 2010. Recubrimientos de microorganismos (Mycetozoa) y espeleotemas en una cueva en caliza Jurásica de la cuenca del río Leizarán (Gipuzkoa, País Vasco). *Pag web aranzadi-sciences.org*, Archivo PDF, 28 pp.
- Galán, C. & M. Nieto. 2010. Mycetozoa: extrañas formas de vida en cuevas de Gipuzkoa. Nuevos hallazgos en karsts en caliza Urgoniana en Aizkorri (Igitegi), Izarraitz (Aixa) y Udalaitz (Montxon koba). *Pag web aranzadi-sciences.org*, Archivo PDF, 33 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; J. Forstner & I. Herraiz. 2021. El ecosistema cavernícola de la cueva Igunsoro 1 (cuenca del Bidasoa, Donamaría, Navarra). *Publ. Dpto. Espeleo. S.C.Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org*, PDF, 42 pp.
- Maire, R. 1980. *Eléments de kartologie physique*. *Spelunca 1980 - n° 1 supplément. Spécial N° 3. FFS, Paris*: 56 pp.
- Northup, D. & K. Lavoie. 2001. Geomicrobiology of caves: a review. *Geomicrobiol Journ.*, 18: 199-222.