INTERACCIONES GEOMICROBIOLÓGICAS, QUIRÓPTEROS Y FAUNA CAVERNÍCOLA EN CAVIDADES DEL VALLE DE MALA ERREKA (GAZTELU, GIPUZKOA).

Geomicrobiological interactions, chiroptera and cave fauna in cavities of the Mala erreka valley (Gaztelu, Gipuzkoa).

Carlos GALÁN, José M. RIVAS & Marian NIETO. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Abril 2018.

INTERACCIONES GEOMICROBIOLÓGICAS, QUIRÓPTEROS Y FAUNA CAVERNÍCOLA EN CAVIDADES DEL VALLE DE MALA ERREKA (GAZTELU, GIPUZKOA).

Geomicrobiological interactions, chiroptera and cave fauna in cavities of the Mala erreka valley (Gaztelu, Gipuzkoa).

Carlos GALÁN, José M. RIVAS & Marian NIETO.
Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.
Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.
E-mail: cegalham@yahoo.es
Abril 2018.

RESUMEN

Las cuevas en caliza a menudo presentan interesantes ejemplos de interacciones geomicrobiológicas, poco conocidas. En este trabajo presentamos datos sobre dos cavidades de moderadas dimensiones localizadas en un afloramiento de calizas arrecifales Urgonianas en el valle de Mala erreka. Las cavidades presentan tapices de algas y bacterias de contrastantes colores. La actividad de los microorganismos altera la roca y las espeleotemas de calcita, formando moonmilk y recubrimientos algodonosos tenues de cristales aciculares de yeso. Se reporta el hallazgo de una nueva colonia de quirópteros *Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber) y datos adicionales sobre fauna cavernícola.
Palabras clave: Espeleología, Karst en caliza, Biología subterránea, Quirópteros, Geomicrobiología, Espeleotemas de yeso.

ABSTRACT

Limestone caves often present interesting examples of geomicrobiological interactions, little known. In this work, we present data on two cavities of moderate dimensions located in an outcrop of Urgonian reef limestones in the Mala erreka valley. The cavities have tapestries of algae and bacteria of contrasting colours. The activity of the microorganisms alters the rock and the calcite speleothems, forming moonmilk and thin cottony coatings of acicular crystals of gypsum. We report the finding of a new colony of bats *Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber) and additional data on cave fauna.
Keywords: Speleology, Limestone Karst, Subterranean Biology, Bats, Geomicrobiology, Gypsum speleothems.

INTRODUCCION

La revisión de datos sobre afloramientos de caliza con escasas referencias de cuevas, nos condujo a prospectar un pequeño karst en calizas arrecífales de edad Cretácico temprano (Aptiense-Albiense) el cual es atravesado por el valle de Mala erreka. El valle, profundamente entallado (de sección en V), presenta laderas de muy fuerte pendiente cubiertas de vegetación densa, con pequeñas paredes verticales, lapiaz y bloques sueltos. En la parte baja del afloramiento hay una antigua cantera y dos manantiales, con caudales del orden de 10-15 l/s de media anual.

Aunque el afloramiento tiene una extensión E-W de 2 km y hasta 500 m de potencia máxima de calizas masivas y estratificadas del complejo Urgoniano (que disminuye por cambios de facies en las zonas de borde), en el mismo se conocen sólo tres pequeñas cavidades (de 12, 40 y 70 m de desarrollo), que exploramos en el curso de este trabajo, sin hallar por ahora otras adicionales.

Suscitó también nuestro interés el hecho de que una de las cavidades posee un yacimiento con restos óseos humanos de época prehistórica (edad de Bronce) de 14 individuos y restos óseos de fauna que incluía quirópteros *Rhinolophus*. La revisión de la cavidad mostró que en ella habita en la actualidad una pequeña colonia (7-8 individuos) de *Rhinolophus ferrumequinum*, no reportada previamente, por lo que constituye una nueva cita para la especie, así como una fauna diversa de invertebrados troglóxenos y troglófilos.

Igualmente se documentó la ocurrencia de tapices de algas, junto a pequeñas criptógamas, en zona de penumbra, y de tapices de bacterias y protozoos en zona oscura. Lo que da lugar a interesantes interacciones geomicrobiológicas, que incluyen procesos de alteración de la roca caja y espeleotemas de calcita, formación de moonmilk y recubrimientos aciculares de yeso, unido a las peculiares morfologías y coloridos que presentan los tapices orgánicos. Una suma de detalles que presentamos en esta nota.

MATERIAL Y METODOS

El trabajo describe las cavidades visitadas y sus principales rasgos geomicrobiológicos y faunísticos. Así como la ocurrencia de distintos tipos de espeleotemas y geoformas. Se utilizaron cascos con frontales Leds y las técnicas habituales en bioespeleología, colectando con métodos directos algunas muestras de fauna, tapices orgánicos y espeleolotemas, los cuales fueron analizados posteriormente en laboratorio. Se tomaron fotografías con una cámara digital a fin de ilustrar detalles de las cuevas y su entorno.

RESULTADOS

Las cuevas prospectadas, objeto de este trabajo, se localizan en la parte SW del acuífero Gaztelumendi, perteneciente a la subunidad de Urbeltza, la cual es parte a su vez de una unidad hidrogeológica mayor denominada unidad de Elduayen (EVE, 2003). Geológicamente, la unidad se enclava en una zona muy compleja en el borde suroccidental del macizo de Cinco Villas. Incluye una gran variedad de materiales geológicos, desde el Paleozoico hasta el Cretácico superior (Campaniense), comprendiendo una gran variedad litológica, con permeabilidades muy diferentes, lo que ocasiona la existencia de numerosos acuíferos con diferentes tipos de conexiones hidráulicas.

Estructuralmente la subunidad de Urbeltza incluye materiales Jurásicos presentes en la cuenca del río Berastegi y abarca hasta los materiales Urgonianos de Gaztelumendi o Iturregi. La estructura geológica consiste en una sucesión de escamas tectónicas con desplazamientos de vergencia Norte y dirección E-W, que superponen en ocasiones los términos jurásicos entre sí. Los materiales jurásicos conforman un sinclinal cuyo flanco meridional se encuentra en parte laminado por el cabalgamiento del complejo Urgoniano. La estratificación buza hacia el Sur con valores de unos 45° en el Norte que se suavizan hacia el Sur.

La subunidad Urbeltza define la cuenca drenada por el manantial Urbeltza, que surge a partir de una fractura vertical a unos 10 m por encima del arroyo Marijan (afluente del río Berastegi). Dentro de la subunidad se engloban cuatro acuíferos: el acuífero Urbeltza, el acuífero Marijan, el acuífero Gaztelumendi y los acuíferos cuaternarios. Presentan relaciones hidráulicas y en conjunto constituyen un acuífero multicapa kárstico de flujo difuso (EVE, 2003) (Vista de conjunto en el Mapa 1).

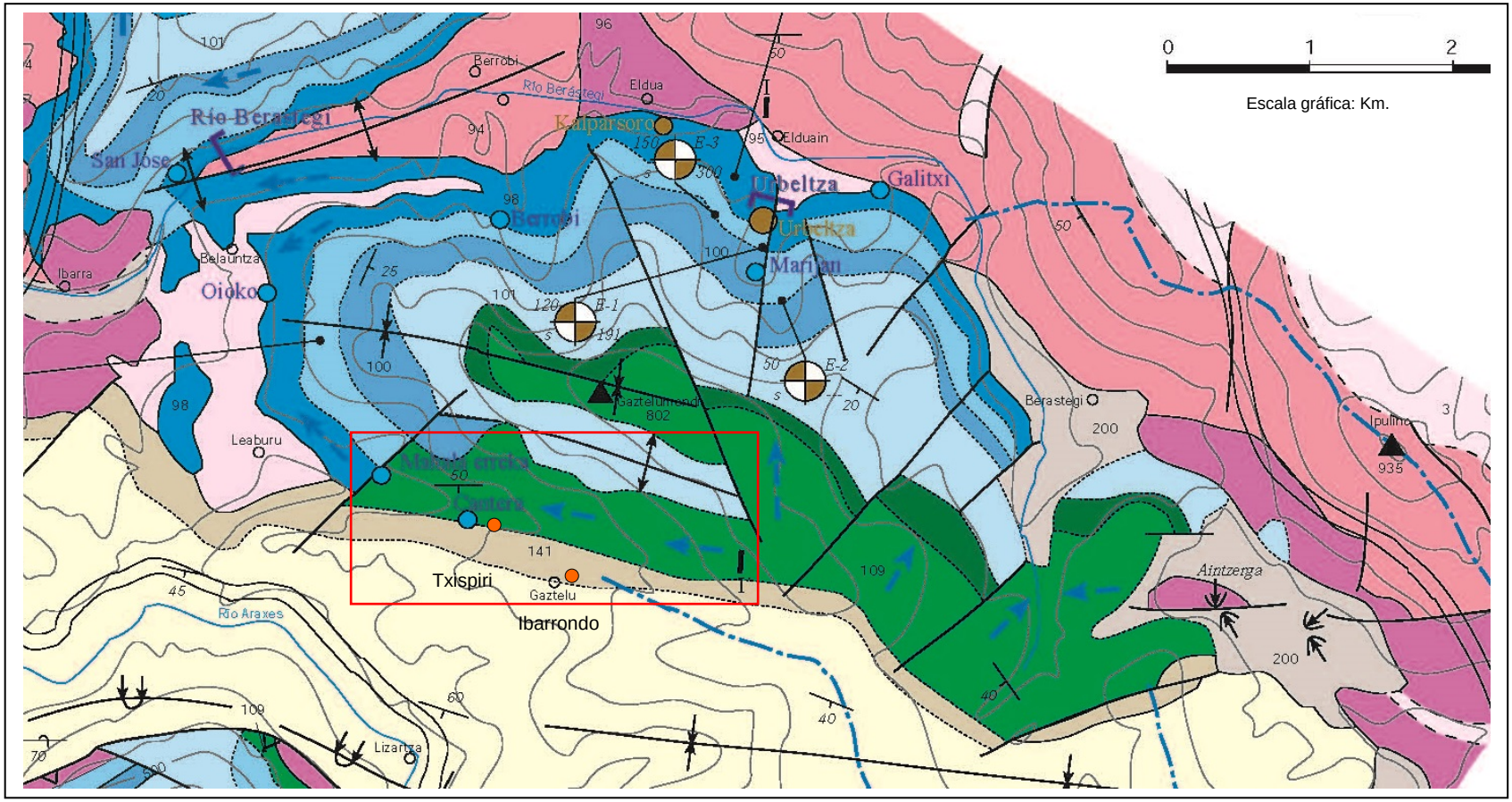
El acuífero Urbeltza conforma el elemento capacitivo de la subunidad, conectado directamente con el manantial Urbeltza. Está constituido por carniolas, dolomías y brechas olistostrómicas del Jurásico basal. Tiene una superficie de afloramiento de 0,7 km^2 y una potencia media de 100 m. Esta banda se encuentra recubierta por materiales carbonáticos jurásicos y urgonianos y por materiales cuaternarios en la depresión de Berastegi. Los límites del acuífero son la falla de Galitxi al N, margas y margocalizas del Lías superior al Sur, la misma falla de Galitxi y materiales triásicos al W y la depresión de Berastegi al E. La estructura corresponde al flanco septentrional de un sinclinal con buzamientos de unos 45° hacia el Sur. Las menores cotas del acuífero se producen en la falla de Galitxi y en el barranco de Marijan, donde presenta cotas de 240 m snm, encontrándose los puntos altos del acuífero en Berastegi a cota 400 m snm. El substrato impermeable está formado por los niveles arcillosos y yesíferos del Trías a lo largo de la falla de Galitxi y por los materiales limolíticos y areniscosos del Buntsandstein en el resto de la subunidad. La superficie de recarga está constituida, además de los 0,7 km^2 de afloramientos permeables ligados directamente con el manantial, por la ladera oriental de Berastegi, las depresiones Berastegi y Aintzerga, afloramientos urgonianos del Sur y SE del acuífero Gaztelumendi y W de la depresión de Berastegi; en conjunto, la superficie considerada asciende a 15,5 km^2.

El acuífero Marijan, situado al Sur del acuífero Urbeltza, está constituido por calizas nodulosas con sílex del Dogger con una potencia aproximada de 100 m. Los materiales infrayacentes, de baja permeabilidad, están constituidos por margas y margocalizas del Lías superior, que en determinadas condiciones hidrológicas producen transferencia de aguas al acuífero Urbeltza. El techo del acuífero está formado por margas arenosas y limolitas del Malm. La superficie de materiales permeables ligados directamente con el acuífero es de 0,44 km^2. Además, existen dos cuencas impermeables que drenan sus aguas al acuífero y suman 1,9 km^2. La geometría del acuífero es similar a la del Urbeltza, si bien se sitúa a mayor cota topográfica. La descarga principal del acuífero se produce por el manantial Marijan.

El acuífero Gaztelumendi está constituido por calizas masivas y estratificadas del complejo Urgoniano con una potencia máxima de 500 m, que disminuye por cambios de facies y por efectos tectónicos. El substrato impermeable está formado por materiales detríticos del propio complejo Urgoniano y por algunos términos jurásicos sobre los que cabalga. Los términos permeables jurásicos son los que facilitan la conexión hidráulica con el acuífero Urbeltza. La estructura corresponde a una serie monoclinal buzante al Sur, que ha sufrido un desplazamiento hacia el N laminando la serie jurásica. Los afloramientos permeables tienen una extensión de 5,7 km^2, siendo la cuenca externa despreciable, y transfieren sus aguas subterráneas a los acuíferos inferiores. Con la excepción de la banda Urgoniana SW, de 1 km^2, donde se localizan las cavidades de Txispiri e Ibarrondo, que descargan sus aguas a los manantiales menores de Mala erreka y Cantera.

Por último, los acuíferos cuaternarios (4,6 km^2) contribuyen a la recarga del acuífero Urbeltza. Se instalan en depresiones kársticas cuaternarias desarrolladas en parte sobre materiales jurásicos y urgonianos permeables. Están constituidos por limos, arenas y gravas, con un espesor medio es de unos 12 m. Los materiales detríticos están en contacto a cota superior con la práctica totalidad de las litologías de la subunidad, por lo que transfieren el agua a las mismas.

Mapa 1. Unidad hidrogeológica de Elduayen - Subunidad de Urbeltza. Fuente: EVE - Mapa hidrogeológico del País Vasco escala 1:100.000.



El afloramiento de calizas Urgonianas de Gaztelu donde se localizan las cavidades corresponde a las bandas de calizas arrecifales (109, verde) y de margocalizas (141, gris) incluidas en el rectángulo rojo. Las bandas azules corresponden a margas y calizas Jurásicas, de la subunidad de Urbeltza, de estructura sinclinal y con drenaje hacia las surgencias de Urbeltza y Marijan, al N. La parte alta y más extensa del afloramiento Urgoniano drena hacia las calizas Jurásicas infrayacentes. En cambio, la franja SW de Gaztelu drena hacia las surgencias de Mala (o Mahala) y Cantera. Las flechas azules indican la dirección del drenaje subterráneo. Los puntos naranja, las cuevas de Txispiri e Ibarrondo. Explicaciones adicionales en el texto.

Figura 01. Valle de Mala erreka. Zona de surgencias en el curso bajo del afloramiento de calizas Urgonianas y laderas de fuerte pendiente con lapiaz y pequeñas paredes, recubiertas de musgo y vefgetación densa.

Figura 02. Abruptas laderas en el valle de Mala erreka y ascenso hacia la cueva de Txispiri.

Figura 03. A +48 m sobre el fondo del valle de Mala erreka se localiza la boca de acceso de la cueva de Txispiri. Se aprecia parte de la base de la cantera de Mala, en la imagen superior, y la carretera a Gaztelu.

Figura 04. La boca de la cueva de Txispiri, vista desde el interior, y galería principal con sección en ojo de cerradura. El relleno sedimentario excavado mostró un yacimiento con restos óseos humanos, de época prehistórica.

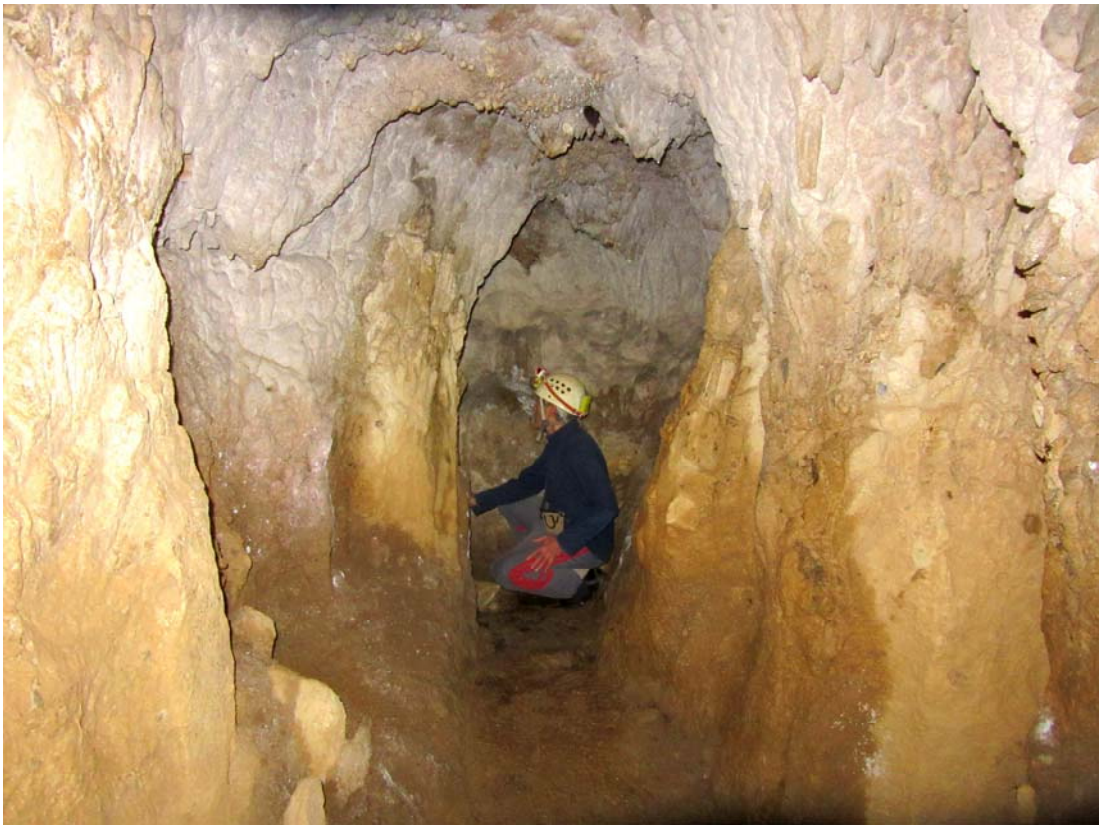


Figura 05. La cavidad posee numerosos tapices de microorganismos (algas, bacterias y protozoos Mycetozooa).

Figura 06. Un ejemplar de *Rhinolophus ferrumequinum* y espeleotemas de calcita en la bóveda. Algunas de ellas presentan superficies alteradas húmedas de tipo moonmilk y crecimientos de agujas de yeso.

Figura 07. Galería principal y sala terminal de Txispiri con ejemplares de quirópteros *Rhinolophus ferrumequinum* descansando en las bóvedas. En algunas espeleotemas se aprecian manchas ocres debidas al orín de los quirópteros, junto a superficies teñidas por tapices bacteriales blancos y ocres.

Figura 08. Varios ejemplares de quirópteros Rhinolophus posados y en vuelo en la sala terminal de la cavidad, de temperatura más cálida y con grandes estalagmitas.

Figura 09. Paso de la estrecha gatera que da acceso a la protegida salita terminal, refugio cálido para los quirópteros. Se aprecian tapices amarillos de bacterias y plasmodios de protozoos Amoebozoa Mycetozoa.

Figura 10. Muchas espeleotemas en la cueva de Txispiri presentan superficies de alteración, tapices bacteriales blancos, y amarillos de protozoos Amoebozoa (flechas negras).

Figura 11. Detalle de espeleotemas y raicillas que alcanzan la cavidad, algunas de ellas concrecionadas por calcita. Algunas coloraciones ocres y rojizas son debidas a actividad bacterial, que moviliza hidróxidos de hierro de la roca-caja. La presencia de guano y orines de quirópteros también promueve crecimientos bacteriales.

Figura 12. Araneidos y lepidópteros Geometridae, junto a redes de diaclasas y leptoclasas, a partir de las cuales precipita carbonato de calcio, formando espeleotemas que recubren las paredes y bóvedas, contrastando con el color gris de la roca-caja de caliza Urgoniana.

Figura 13. Detalles de la gatera de acceso a la sala final, con manchas de orín y deyecciones de guano de quirópteros. Las espeleotemas de calcita presentan alteraciones en forma de moonmilk debidas a la acción bacterial. Los sedimentos del suelo en la galería principal fueron removidos sobre un metro de espesor por la excavación arqueológica.

Figura 14. Un aspecto llamativo de la cavidad es la ocurrencia de tapices de bacterias y algas, de colores azules y verdes, respectivamente, en el límite entre la zona de penumbra y la zona oscura de la cueva.

Figura 15. Pequeñas criptógamas, algas y tapices bacteriales, de contrastantes colores, en la cueva de Txispiri.

Figura 16. El color de los tapices de bacterias y algas cambia según la intensidad de luz utilizada. En la imagen inferior se aprecia una banda blanca de espeleotemas de calcita con crecimientos de agujas de yeso en su borde, de color gris más claro. Una suma de interacciones geomicrobiológicas curiosas y poco conocidas.

Los manantiales más significativos son los Urbeltza y Marijan. Urbeltza drena el acuífero del mismo nombre y es uno de los más importantes de Gipuzkoa, siendo el de mayor caudal de estiaje (100 l/s). El manantial surge a través de una fractura que comunica el acuífero con el exterior, pero la comunicación es deficiente, elevándose el nivel piezométrico hasta 40 m en aguas altas. Surge a cota 256, a unos 10 m sobre el cauce del arroyo Marijan. Se encuentra captado mediante un canal junto a las aguas de Marijan por la papelera Kalparsoro. Existe registro de los caudales aportados por ambos manantiales desde 1983. Se ha determinado que Marijan representa el 12,6% del caudal, si bien el caudal de estiaje del mismo es nulo. El manantial Urbeltza representa el 87,4 % del caudal, está regulado de forma natural, presentando máximos de 800 l/s y estiajes mínimos de 100 l/s (1989), siendo el volumen anual medio drenado de 9,8 Hm^3. Marijan se sitúa en las cercanías de Urbeltza a una cota de 280 m. La salida del manantial está cubierta por derrubios y no es visible. Está captado por un canal que conduce sus aguas hasta Urbeltza. Los recursos medios drenados por el manantial son 1,5 Hm^3, secándose en verano y alcanzando puntas de 500 l/s en invierno (EVE, 2003).

Mala Erreka y Cantera son dos manantiales de menor entidad ligados a las calizas urgonianas. Su caudal medio estimado es de 15 y 10 l/s respectivamente. Estos últimos descargan la cuenca drenada por la barra SW de calizas Urgonianas de Gaztelu.

El funcionamiento hidráulico de la subunidad responde aproximadamente al siguiente esquema: el agua llega a las carniolas y dolomías jurásicas, que constituyen el elemento capacitivo principal, por diferentes caminos: bien se infiltra directamente a partir del agua caída sobre las mismas carniolas y dolomías, bien se transfiere muy lentamente en épocas de estiaje de los materiales jurásicos de baja permeabilidad dispuestos a techo del acuífero, bien del acuífero Marijan. También resulta claro que existe un flujo de las calizas urgonianas de Gaztelumendi, situadas a cotas altas, hacia las carniolas y dolomías jurásicas. Por último, el agua contenida en los acuíferos cuaternarios y sus cuencas externas también se transfiere a las calizas y dolomías jurásicas ya que en ambas depresiones, bajo el recubrimiento cuaternario, se encuentran las litologías jurásicas y urgonianas permeables.

La barra SW de calizas Urgonianas de Gaztelu está desconectada hidráulicamente del cuerpo principal drenado por el complejo surgente de Urbeltza-Marijan, constituyendo un acuífero libre en posición lateral. Su sustrato impermeable lo constituyen facies detríticas del mismo complejo Urgoniano, compuestas por limolitas calcáreas y margas de baja permeabilidad. A techo de la barra se sitúan materiales calcáreos y detríticos del Cretácico superior, de baja permeabilidad (Ver Mapa 1).

En esta barra SW se localizan las pequeñas cavidades prospectadas en este trabajo (Txispiri e Ibarrondo). En ambos casos se trata de cavidades fósiles, sin actividad hídrica actual, pero con perfiles en ojo de cerradura y morfologías que sugieren un antiguo funcionamiento en condiciones freáticas. Su posición topográfica actual indica que se trata de fragmentos de redes de galerías, más extensas en el pasado, que fueron recortadas por el avance de la erosión de superficie y entallamiento del valle de Mala erreka.

La cueva de Txispiri está situada a 1 km al W de Gaztelu, en la ladera que mira a una cantera y frente a ésta, a +48 m de desnivel sobre el fondo del arroyo de Mala erreka. Sus coordenadas UTM son: N 4.774.716; E 578.740; altitud 325 m snm. La cueva tiene dos galerías que dan al exterior, pero una de ellas es en la actualidad una gatera de 8 m obstruida por bloques. En el punto de unión de ambas se forma una pequeña sala o ensanchamiento, del que parte una galería meandriforme horizontal, con trazado en zeta, que se estrecha en su parte final formando una gatera, la cual da paso a una salita terminal recubierta de espeleotemas. La boca de acceso mide actualmente 2 m de ancho por 3 m de altura y está orientada al NW. La galería principal, con sección en ojo de cerradura, tiene 25 m de largo hasta la gatera, siendo esta la zona excavada, con suelo de sedimentos. El desarrollo total (contando la segunda galería y la sala terminal) asciende a 40 m, siendo el desnivel de -2 m (Figuras 01 á 16).

La cueva posee un yacimiento arqueológico, descubierto en 1934 por T. de Aranzadi y excavado en 1944 por M. Ruíz de Gaona. En el se encontraron restos óseos humanos correspondientes al menos a 14 individuos (11 adultos, 1 juvenil y 2 infantes), un alisador o cincel de hueso, fragmentos de cerámica de varios vasos troncocónicos y ovoideos decorados con cordones con digitaciones, y restos óseos de mamíferos (tejón, corzo, jabalí, cabra, oveja, toro) (Altuna et al, 1995) y micromamíferos (ratones *Mus*, *Arvicola spelaea*, insectívoros *Talpa*, junto con quirópteros *Rhinolophus*) (Ruíz de Gaona, 1945). La secuencia cultural es atribuida al Bronce (Altuna et al, 1995). En la ampliación donde confluyen las dos galerías se encontraron estalagmitas calcinadas y señales de fuego cerca de la boca; en opinión de Ruíz de Gaona (1945) se trataría de hogueras para alejar a las fieras, dado el uso funerario de la cavidad por parte del hombre en esa época.

El reporte de huesos de quirópteros llamó nuestra atención y motivó que efectuáramos una prospección de la cavidad y del afloramiento, en busca de otras cavidades en este abrupto flanco. En efecto, el acceso a la cueva requiere remontar una ladera abrupta, con escalones verticales, bloques y surcos de lapiaz, recubiertos por musgo y una vegetación enmarañada. En la cota 290 m snm se localiza otra pequeña cueva (Txispiri 2), pero es sólo una corta galería de 12 m, situada algo más al N y más baja. No obstante, la parte por nosotros prospectada es pequeña, y cabe la posibilidad de encontrar otras cavidades en este sector.

La cueva de Txispiri resultó interesante por varias razones. En primer lugar, el hallazgo de una colonia del murciélago grande de herradura, *Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber) constituida por 7-8 ejemplares (Figuras 05 á 08). Al momento de la visita (inicio de primavera) estaban activos (no hibernaban) y ello no permitió efectuar observaciones detalladas, salvo constatar la ocurrencia de la especie, lo que aporta una nueva cita para la misma en la región. Un ejemplar se encontraba al fondo de la galería principal (antes de la gatera) y el resto en la sala final, que posee una temperatura algo más elevada (13ºC) que la galería en zeta (11ºC). En diversos puntos hay pequeñas acumulaciones de deyecciones y guano de quirópteros, y marcas de orín sobre espeleotemas, utilizadas como lugar de descanso. Probablemente estos pequeños aportes orgánicos también contribuyen a la proliferación y crecimiento de tapices de microorganismos.

La fauna cavernícola encontrada incluye especies troglóxenas y troglófilas comunes en cuevas de la región. Destacan diversas especies de dípteros nematóceros y braquíceros (de varias familias distintas), lepidópteros Geometridae, tricópteros Limnephilidae, araneidos Agelenidae y Tetragnathidae, isópodos Asellidae, moluscos Zonitidae, Elonidae y Clausilidae (Figura 12). No hallamos durante la prospección especies troglobias, pero es factible que aparezcan con muestreos más detallados, con empleo de cebos.

Otro aspecto significativo lo que constituye el hallazgo en la cavidad de diversos tapices de microorganismos, que incluyen algas, cianobacterias, hongos, tapices bacteriales y recubrimientos de plasmodios de protozoos Mycetozoa (amebas gigantes). Su ocurrencia está relacionada con procesos geomicrobiológicos de alteración de la roca-caja y espeleotemas, formación de moonmilk, espeleotemas aciculares de yeso, recubrimientos porosos de calcita, residuos de corrosión y delgados films cromóforos de oxi-hidróxidos de hierro y manganeso que tiñen con distintos colores las coladas de calcita.

El medio ambiente hipógeo es en general muy limitado en nutrientes, pero contiene una amplia variedad de interfases redox. Las interacciones entre los microorganismos de las cuevas y los ambientes minerales conducen a la disolución de la roca caja, o a la precipitación de minerales secundarios (= espeleotemas). Así por ejemplo, muchos de los tipos de moonmilk son formados como parte del ciclo de vida de microorganismos (Caumartin & Renault, 1958; Williams, 1959; Hill & Forti, 1997; Northup et al, 1997). Los procesos metabólicos de bacterias oxidantes pueden generar considerable acidez, disolviendo las paredes de roca de las cuevas y las espeleotemas, o generando diversos residuos de corrosión y moonmilk. La precipitación de minerales secundarios ocurre a través de procesos activos o pasivos. En las cuevas, la mineralización inducida por microorganismos ha sido documentada para la formación de carbonatos, mooonmilk, silicatos, oxi-hidróxidos de hierro y manganeso, sulfatos y nitratos, a escalas que van desde el nivel microscópico a macro-rasgos. En casi todos estos casos se trata de procesos mediados por bacterias, y más raramente hongos y algas. Uno de los más visibles grupos de bacterias observados en cuevas son las colonias de actinomycetes, que generalmente forman manchas blancas y son responsables del distintivo olor que presentan las cuevas. Otros grupos de bacterias y microorganismos pueden no ser observables a simple vista o pasar desapercibidos. En el extremo opuesto, hay ocurrencias de biofilms de bacterias y protozoos marcadamente coloridos. Pasaremos revista a los ejemplos hallados en la cueva de Txispiri.

En la ampliación de la galería principal, en el límite entre la zona de penumbra y la zona oscura, destacan recubrimientos azules y verdes de bacterias y algas bajo una repisa con crecimiento de pequeñas criptógamas (Figuras 14 á 16). Los recubrimientos azules, a tenor de la iluminación empleada, varían en color desde tonos azules claros a otros más intensos, y son debidos a cianobacterias (antiguamente clasificadas como algas verde-azules). Las cianobacterias son bacterias fotosintéticas que producen oxígeno y tienen la habilidad de fijar el nitrógeno atmosférico. Se pueden presentar también en simbiosis con hongos y mohos (Zygomycetes y Deuteromycetes tales como *Penicillium* y *Aspergillus*, que pueden tener también colores azules y blancos), formando mosaicos que se interdigitan con algas verdes, las cuales a su vez se extienden y gradan o se mezclan con los crecimientos de pequeñas criptógamas. Las muestras tomadas observadas bajo el microscopio hasta 800 aumentos forman tramas complejas, de límites imprecisos entre unos organismos y otros. Las figuras 14 á 16 ilustran estos aspectos, donde también se puede apreciar la ocurrencia de productos de alteración arcillosos, de colores ocres, y tapices bacteriales blancos. En adición, la figura 16 muestra el borde de una espeleotema de calcita con crecimientos grises de agujas de yeso, así como extraños recubrimientos lobulados, grises a negros, de naturaleza incierta.

En la sala final y en la gatera hay tapices blancos y amarillos de bacterias y tapices amarillo-oro de amebas gigantes (protozoos Mycetozoa) (Figuras 9 y 10). Los recubrimientos orgánicos de Mycetozoa están constituidos por plasmodios hialinos, con cuerpos fructíferos de color amarillo intenso, los cuales a la luz de las linternas brillan en la oscuridad, con un llamativo efecto estético. Se presentan sobre pequeñas superficies en paredes, bóvedas y sobre espeleotemas, a veces en agregados densos. Los Mycetozoa constituyen un phylum inedependiente de amebas (Baldauf, 2008); no son bacterias ni hongos, sino que están incluidos entre las amebas (protozoos Amoebozoa). Se caracterizan por presentar como aparato vegetativo un plasmodio (masa multinucleada, ameboidea y fagocítica), la cual se propaga formando masas gelatinosas que desarrollan cuerpos fructíferos con esporas. Situados entre los animales y los vegetales, se alimentan de bacterias y pueden desplazarse sobre el sustrato. Los ejemplos de Txispiri son similares a los hallados previamente en otras cuevas de Gipuzkoa y se incluyen en el orden Trichiida (Galán & Nieto, 2010; Galán et al, 2010). Posiblemente se trata de especies nuevas, aún no descritas a nivel específico, cuyo ciclo biológico y modo de ocurrencia resultan inhabituales, ya que los plasmodios de Mycetozoa se encuentran en zona de oscuridad total, creciendo y fructificando sobre espeleotemas y paredes expuestas de roca, donde el contenido orgánico es excepcionalmente bajo. Estos protozoos, unicelulares pero de gran tamaño, se alimentan de bacterias que fagocitan. En sus inmediaciones se encuentran muchos tapices de bacterias blancas y amarillas, las últimas probablemente pertenecientes al grupo *Xanthobacter* o algún género afín.

La Figura 11, correspondiente a la salita terminal, muestra grandes estalagmitas, coladas y otras espeleotemas con diversos colores. Algunas coloraciones ocres, rojizas y negras en las espeleotemas de calcita son debidas a oxi-hidróxidos de hierro y manganeso, producidos y movilizados por la actividad bacterial. A través de fisuras de la bóveda penetran raíces procedentes de la superficie exterior, que alcanzan la cueva, y algunas de ellas están siendo concrecionadas por espeleotemas de calcita.

Hay ejemplos de redes poligonales de pequeñas diaclasas, a partir de las cuales ha precipitado carbonato de calcio formando espeleotemas porosas, debidas a la acción bacterial (Figura 12). Recubrimientos más extensos de calcita, sobre paredes y bóvedas, presentan alteraciones en forma de moonmilk (Figura 13). En menor proporción hay también crecimientos aciculares de yeso, producidos o mediados por acción bacterial. Estos últimos ejemplos alcanzan gran profusión en la cueva de Ibarrondo.

Figura 17. En la parte Este del mismo afloramiento se localiza la cueva de Ibarrondo, que posee también ejemplos de tapices bacteriales azules en el inicio de la zona oscura (flechas negras) y extensos recubrimientos de moonmilk de calcita y sobrecrecimientos de cristales de yeso, de origen biogénico.

Figura 18. Boca de acceso y galería principal de la cueva de Ibarrondo, de 60 m de extensión, con paredes y suelos con recubrimientos estalagmíticos, gours y coladas.

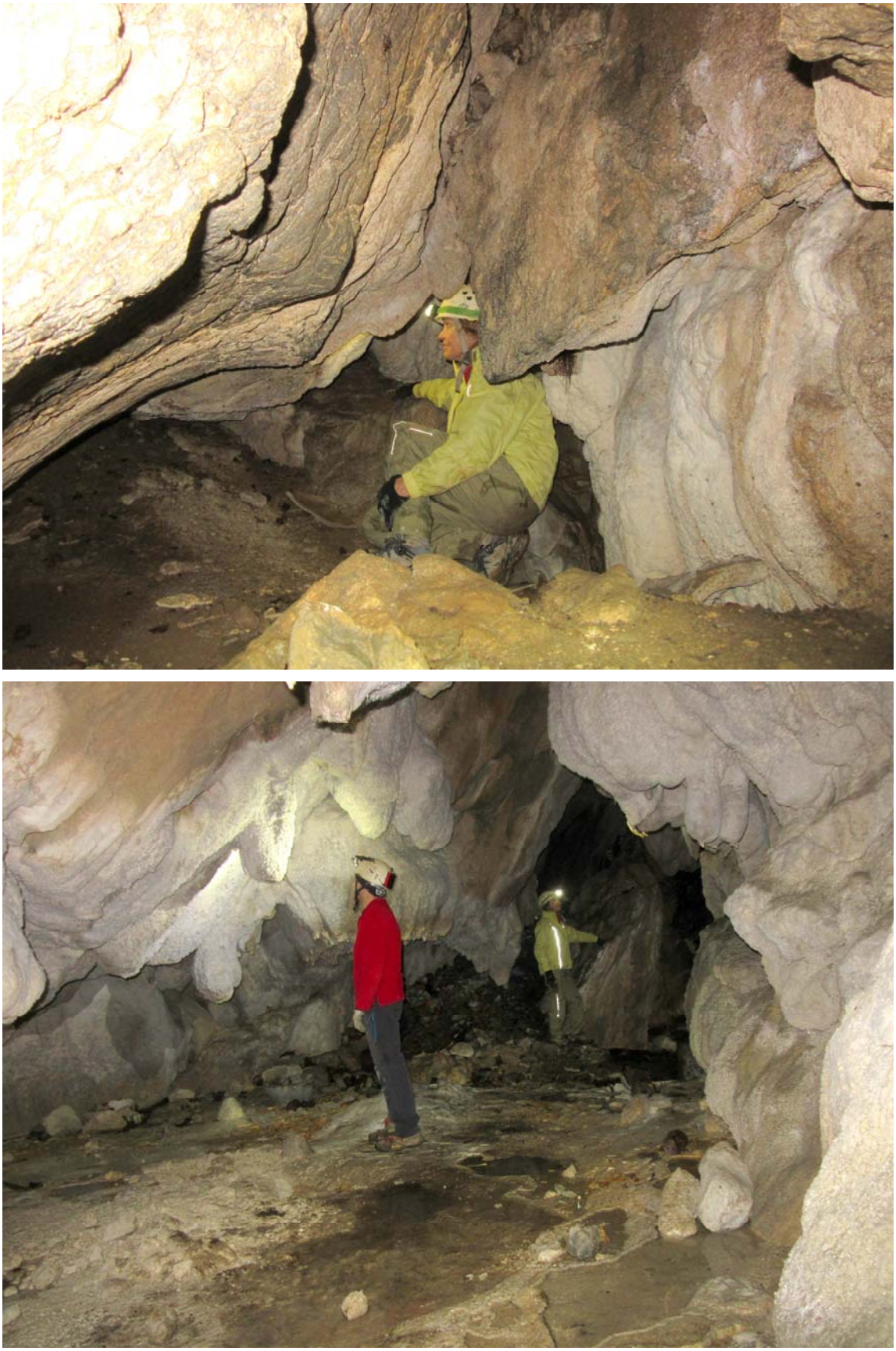


Figura 19. Zonas cercanas a la entrada, con diversidad de espeleotemas y tapices bacteriales.

Figura 20. Galería ascendente en la cueva de Ibarrondo, con recubrimientos de espeleotemas de calcita, con superficies de alteración húmedas y pastosas, de tipo moonmilk.

Figura 21. Nichos elevados con coladas y columnas. La cavidad posee una segunda boca-claraboya y entre las dos bocas se establecen corrientes de aire que ventilan la atmósfera húmeda interna.

Figura 22. Las espeleotemas de calcita de las paredes y coladas presentan en muchos puntos superficies de alteración de tipo moonmilk (arriba), mientras que las zonas más ventiladas poseen abundantes formas algodonosas de frostworks y agujas de yeso, de color gris claro (debajo).

Figura 23. La alteración de las espeleotemas de calcita por acción bacterial produce extensos sobrecrecimientos de frostworks de yeso. En los cristales de yeso el Ca procede de la calcita y el S es producto de la actividad metabólica de los microorganismos.

Figura 24. En la cueva de Ibarrondo, de atmósfera húmeda, las interacciones geomicrobiológicas alteran la roca y la superficie de las espeleotemas de calcita, formando moonmilk y crecimientos aciculares de yeso.

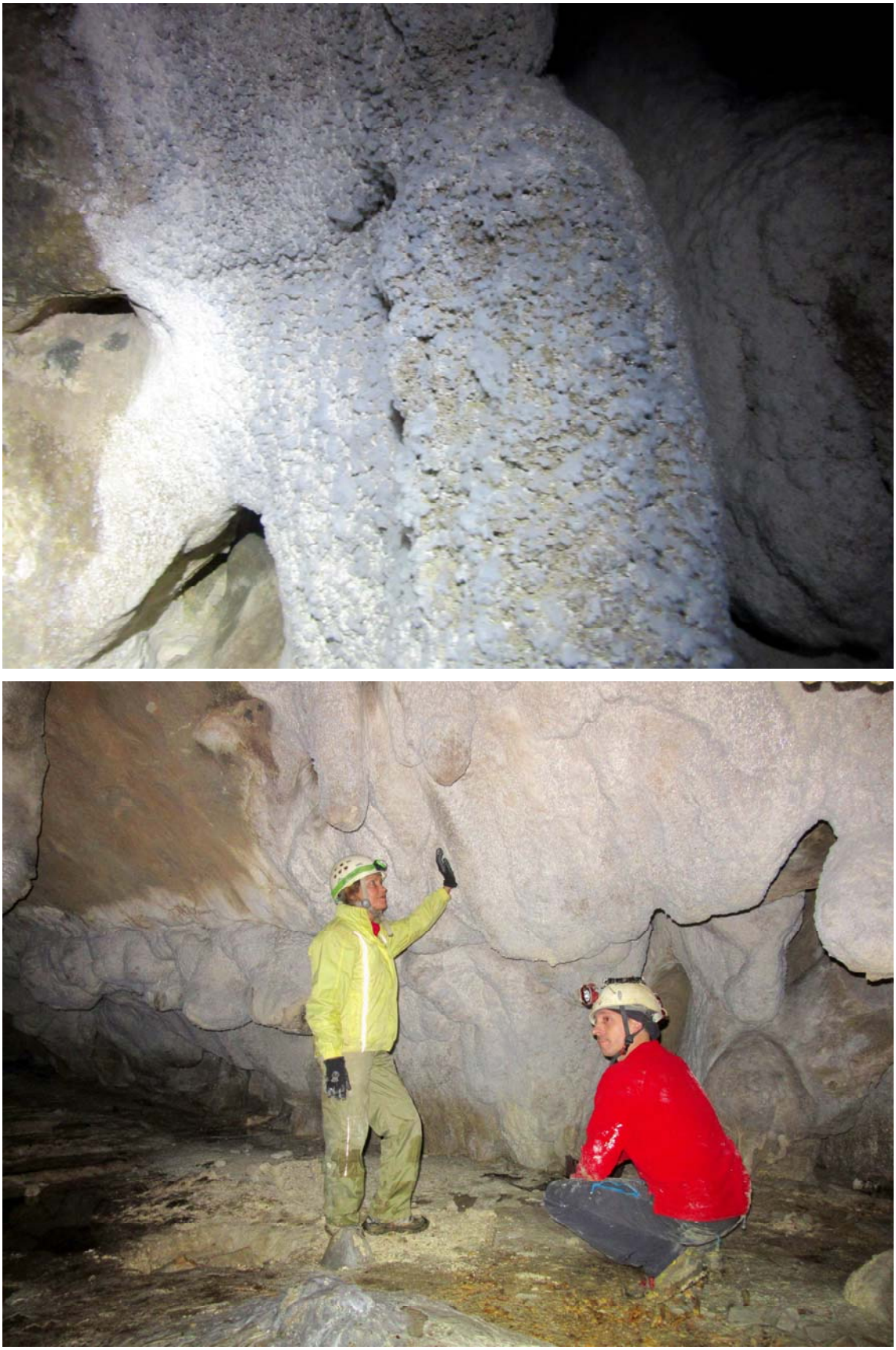


Figura 25. Detalles de recubrimientos de frostworks de cristales aciculares radiantes de yeso sobre espeleotemas de calcita, en las zonas más ventiladas de las galerías. Un proceso geomicrobiológico que en la cueva de Ibarrondo alcanza más extensión que en la cueva de Txispiri.

La cueva de Ibarrondo se localiza muy cerca del casco urbano de Gaztelu, sobre una colina con numerosos surcos de lapiaz. Sus coordenadas UTM son: N 4.774.450; E 579.753; altitud 460 m snm. La cavidad, de entrada descendente, da paso a una amplia galería horizontal con suelos estalagmíticos, gours y numerosas espeleotemas. Presenta pequeños nichos con espeleotemas y posee una continuación ascendente, que pasa bajo una claraboya (segunda boca) para luego seguir otro tramo descendente donde se cierra en una pequeña sala. Cerca de la claraboya hay una galería lateral colgada, que sigue una diaclasa. La cavidad totaliza 70 m desarrollo y -6 m de desnivel (Figuras 17 á 25). Aunque el ambiente interno es húmedo, con numerosos goteos y filtraciones, se trata de una cavidad bien ventilada, ya que se establecen corrientes de aire entre las dos bocas, situadas en extremos opuestos de la cueva. Las bóvedas muestran en diversos puntos morfologías freáticas, con cúpulas y pendants, ahora recubiertos de calcita.

Los invertebrados encontrados pertenecen a los mismos grupos observados en la cueva de Txispiri. También, en la boca de acceso, hay algunos ejemplos de tapices orgánicos verdes y azules, de algas y cianobacterias. Pero lo más llamativo de la cavidad es la existencia de extensos recubrimientos blandos y húmedos de moonmilk de calcita (Figuras 20 á 22). Muchas coladas presentan también superficies de alteración, húmedas y porosas. Mientras que en el lado Sur de la galería principal se encuentran, recubriendo a la calcita, extensas formaciones de pequeñas agujas de yeso, formando frostworks de aspecto algodonoso, frágiles y disgregables, de color gris claro (Figuras 22 á 25).

Algunas espeleotemas de yeso son simples recubrimientos de grupos de agujas de yeso de débil diámetro y varios mm de largo, pero tambien hay recubrimientos delicados y densos que despliegan crecimientos radiales (frostworks) y tramas con formas algodonosas de intrincado diseño, muy delicadas y que recuerdan al algodón de azúcar o algodón de fibra de vidrio. Observadas al microscopio los frostworks de yeso despliegan una estructura radial, creciendo las espículas en todas las direcciones del espacio, a partir de una base común. En las formas algodonosas, la trama es más compleja: pueden crecer agujas radiantes de aspecto espinoso, formas filamentosas que se unen en engrosamientos y tramas conjugadas de diversas formas. Hay incluso filamentos curvos y anastomosis de formas filamentosas.

Los frostworks de yeso se localizan en las áreas más ventiladas de las paredes y bóvedas, sobre espeleotemas de calcita o sobre la propia roca-caja, y pueden tener tanto un origen orgánico como inorgánico. Nosotros nos inclinamos a creer que tienen un origen orgánico, mediado por acción bacterial, sobretodo porque se encuentran junto a superficies de alteración y moonmilk. Los cristales de yeso se formarían por el Ca procedente de la calcita alterada y S producido por la actividad metábolica bacterial (Barton et al, 2001; Northrup et al, 1997). En otros ejemplos de cuevas con plasmodios de Mycetozoa encontramos agregados aciculares de yeso en las superficies de alteración generadas por las bacterias bajo los mismos (Galán & Nieto, 2010).

Pero también pueden tener un origen inorgánico, precipitando el yeso a partir de las aguas percolantes que ascienden por capilaridad debido al gradiente de evaporación existente entre las paredes y la atmósfera de la galería. Ello es posible porque el yeso es muy soluble y el ión sulfato posee una reactividad comparativamente alta, siendo muy frecuente en las aguas subterráneas, en distintas litologías. En estos casos el S debe proceder de trazas de pirita contenidas como elemento minoritario en la roca-caja, algo que es frecuente en las calizas Urgonianas.

Ejemplos de crecimientos aciculares de yeso se encuentran en cuevas en muy distintas litologías. En Gipuzkoa las hemos encontrado en cuevas en caliza y en cuevas en arenisca de la Formación Jaizkibel (Galán & Vera Martín, 2010; Galán, 2013). Ejemplos de frostworks de yeso son frecuentes también en cuevas en arcilla de la región de las Bardenas, Navarra (Galán, 2015 a, 2015 b; Galán et al, 2015). En todo caso los ejemplos de la cueva de Ibarrondo (y en menor proporción de la cueva de Txispiri) reúnen rasgos peculiares, que creemos interesante describir e ilustrar, ya que constituyen nuevos ejemplos de la diversidad de interacciones geomicrobiológicas que se producen en cuevas en caliza.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En las cavidades prospectadas están presentes poblaciones de bacterias de grupos capaces de corroer superficialmente la roca-caja y producir residuos de corrosión (entre ellos oxi-hidróxidos de hierro y manganeso), de propiciar la formación de espeleotemas de yeso, y/o de alterar la calcita para producir recubrimientos blandos de tipo moonmilk. Los films de Mycetozooa de hecho se alimentan fagocitando bacterias.

En general es conocida la intervención de distintos microorganismos, especialmente bacterias, en la alteración del sustrato rocoso y en la génesis de diversas espeleotemas, especialmente moonmilk. Muchas bacterias, como producto de su metabolismo, generan ácidos que atacan el sustrato rocoso, produciendo corrosión de la roca. De igual modo es frecuente que las bacterias generen polímeros extracelulares, usualmente ácidos, que contienen grupos funcionales que fácilmente enlazan iones metálicos y contribuyen a la corrosión y a la ruptura de carbonatos y silicatos (Ford & Mitchell, 1990). La presencia de Mycetozoa es un indicador de diversos tipos de actividad bacterial, la cual estaría involucrada en procesos activos de corrosión y/o de creación o destrucción de depósitos de minerales secundarios en las cuevas.

Los microorganismos pueden promover la precipitación de carbonatos a través de controles biológicos al alterar los índices de saturación de las soluciones o al remover inhibidores cinéticos de la cristalización, tales como iones magnesio, sulfato o fosfato, lo que influye en la morfología de los cristales de calcita generados.

La más convincente evidencia de acción microbial en la formación de espeleotemas es la relativa al moonmilk. Su delicada estructura fibrosa y facilidad de alteración por procesos constructivos y destructivos ha dificultado su análisis. Entre los mecanismos propuestos para la formación del moonmilk mediada por bacterias se encuentran los dos siguientes: (a) Corrosión bioquímica de la roca-caja por ácidos orgánicos producidos por microorganismos (*Arthrobacter, Flavobacterium, Pseudomonas*). (b) Precipitación activa de moonmilk por bacterias como *Macromonas bipunctata* (Hill & Forti, 1997). Tales microorganismos pueden intervenir en la deposición de moonmilks constituidos por otros minerales; no sólo calcita o hidromagnesita, sino también en moonmilks constituidos por yeso, sílice amorfo, etc. Cañaveras et al (2006) han mostrado que el moonmilk contiene numerosos filamentos de especies de Proteobacteria con fenotipos que precipitan calcita. La evidencia morfológica sugiere que el moonmilk se forma por colonización microbial, seguida de deposición de calcita a lo largo de las superficies bacteriales, ruptura microestructural, y acumulación de fibras colapsadas. A medida que el proceso se repite a través de oscilaciones estacionales, los depósitos de moonmilk se hacen más gruesos, formando los significativos depósitos hallados en muchas cuevas. Otros investigadores han identificado también la presencia de *Crenarchaeota*, un grupo de Archaea, en tales depósitos (Gonzalez et al., 2006). Estos trabajos presentan un detallado cuadro de las relaciones fisiológicas y geoquímicas en la formación de depósitos biogénicos en los ambientes de cuevas.

Bacterias de distintos grupos son a su vez agentes de disolución de la roca-caja y destrucción por ejemplo de pinturas rupestres en cuevas (Northup & Lavoie, 2001). Muchas bacterias sulfuro-oxidantes producen ácido sulfúrico como producto de desecho, el cual reacciona con la caliza para formar yeso, un mineral que es altamente soluble en agua. Así, bajo determinadas condiciones, la acción bacterial puede formar espeleotemas de yeso, a la vez que en general ataca y disuelve el sustrato de roca.

Los ejemplos encontrados en las cuevas de Txispiri e Ibarrondo contienen diversos tipos de bacterias y amebas e involucran una multiplicidad de interacciones geomicrobiológicas mediadas por los microorganismos. Ello genera diversos resultados, destacando la formación de moonmilks de calcita y frostworks de yeso, de curiosos diseños. Las cavidades contienen a su vez una fauna cavernícola someramente investigada, que incluye una colonia de quirópteros *Rhinolophus ferrumequinum*. La Naturaleza nos muestra así que las cavernas, aún de pequeño tamaño, pueden albergar un amplio espectro de organismos y fenómenos, de indudable interés científico.

BIBLIOGRAFÍA

Altuna, J.; A. Armendariz; F. Etxeberria; K. Mariezkurrena; X. Peñalver & F. Zumalabe. 1995. Txispiri. Carta Arqueológica de Gipuzkoa. II. Cuevas. Munibe (Antropologia-Arkeologia). Suplemento nº 10. 2 pp.

Baldauf, S. 2008. An overview of the phylogeny and diversity of eukaryotes. Journal of Systematics and Evolution, 46 (3): 263-273.

Barton, H.A.; J.R. Spear & N.R. Pace. 2001. Microbial life in the underworld: Biogenicity in secondary mineral formations. Geomicrobiology Journal, 18: 359-368.

Cañaveras, J.C.; S. Cuezva; S. Sanchez-Moral; J. Lario; L. Laiz,; J.M. Gonzalez & C. Saiz-Jimenez. 2006. On the origin of fiber calcite crystals in moonmilk deposits. Naturwissenschaften, 93: 27-32.

Caumartin, V. & P. Renault. 1958. La corrosion biochemique dans un reseau karstique et la genese du Mondmilch. Notes Biospeleologiques, 13: 87-109.

EVE - Ente Vasco de Energía. 2003. Mapa Hidrogeológico del País Vasco. Escala 1/100.000. Eusko Jaularitza - Gobiernp Vasco. 383 p.

Ford, T. & R. Mitchell. 1990. The ecology of microbial corrosion. In: Marshall, K.C. (Ed.). Advances in microbial ecology II. Plenum Press, New York, NY: 231-262.

Galán, C. 2013. Cuevas, geoformas y karstificación en areniscas Eocenas de la Formación Jaizkibel: Actualización de datos para Mayo 2013. Versión PDF de Conf. audiovisual Hondarribia, Expo. Flysch C.Vasca. 10-05-13. Web aranzadi-sciences.org, 82 pp.

Galán, C. 2015 a. Sistemas de cuevas en arcilla de 880 m de desarrollo explorado (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 55 pp.

Galán, C. 2015 b. Espeleotemas de yeso, illita, calcita y ópalo-CT en cuevas en arcilla (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 35 pp.

Galán, C. & M. Nieto. 2010. Mycetozoa: curiosas formas de vida en cuevas de Gipuzkoa. Nuevos hallazgos en caliza Urgoniana en los karsts de Aizkorri (Igitegi), Izarraitz (Aixa), y Udalaitz (Montxon koba). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 33 pp.

Galán, C. & C. Vera Martin. 2010. Espeleotemas de magnetita, hematita, yeso, ópalo-A, y otros minerales secundarios en una cueva del pseudokarst de Jaizkibel: Caracterización por espectroscopía Raman, difracción de rayos X (DRX) y espectrometría por dispersión de energía (EDS). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 16 pp.

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; Dv. Arrieta & Daniel Arrieta. 2015. Espeleotemas y quirópteros en una cueva en arcilla de 158 m de desarrollo (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF, 42 pp.

González, J.M., M.C. Portillo & C. Saiz-Jimenez. 2006. Metabolically active Crenarcheota in Altamira Cave. Naturwissenschaften, 93: 42-45.

Hill, C.A. & P. Forti. 1997. Cave minerals of the world. 2nd ed. Huntsville, Ala., National Speleological Society, 463 p.

Northup, D.E. & K.H. Lavoie. 2001. Geomicrobiology of caves: a review. Geomicrobiology Journal, 18(3): 199-222.

Northup, D.E.; A.L. Reysenbach & N.R. Pace. 1997. Microorganisms and speleothems. In: Hill, C.A. & P. Forti, eds., Cave Minerals of the World, 2nd ed, National Speleological Society, Huntsville, p. 261-266.

Ruíz de Gaona, M. 1945. Resultados de la exploración de la caverna prehistórica de Txispiri (Gaztelu). Bol. Real Soc. Vascongada de Amigos del País, 1. 157-176, 271-288 y 389-402. San Sebastián.

Williams, A.M. 1959. The formation and deposition of moonmilk. Trans. Cave Res. Group, 5(2): 133-138.