

ESPELEOTEMAS DE YESO, ILLITA, CALCITA Y ÓPALO-CT EN CUEVAS EN ARCILLA (BARDENA NEGRA)

Gypsum, illite, calcite and opal-CT speleothems in clay caves (Bardena Negra)



Carlos Galán.

Sociedad de Ciencias Aranzadi.

Noviembre 2015.

ESPELEOTEMAS DE YESO, ILLITA, CALCITA Y ÓPALO-CT EN CUEVAS EN ARCILLA (BARDENA NEGRA)

Gypsum, illite, calcite and opal-CT speleothems in clay caves (Bardena Negra)

Carlos Galán.

Laboratorio de Biospeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Noviembre 2015.

RESUMEN

En la región semi-desértica de las Bardenas (Navarra) existen sistemas de cuevas y simas en arcilla, formadas por procesos de tubificación o piping. La roca-caja consiste en materiales arcillosos, con intercalaciones menores de nivelitos de lutitas, margas y calizas, pertenecientes a la Formación Tudela (de edad Mioceno). Recientes exploraciones en las mesetas de Las Nasas (Bardena Negra) han permitido estudiar sistemas de simas con hasta 880 m de galerías y -100 m de desnivel. La mayor cavidad individual (Sima Nasa Alta 04) alcanza 380 m de desarrollo y -40 m de desnivel. Estas cavidades constituyen los ejemplos más notables hasta ahora conocidos para cuevas en arcilla en todo el globo. Las cavidades poseen singulares espeleotemas de yeso, illita, calcita y ópalo-CT. En menores proporciones y en distintas combinaciones hay también ocurrencias de anhidrita, caolinita, montmorillonita, halita y silicatos amorfos. Estos datos resultan de gran interés ya que prueban la existencia de disolución durante el proceso de karstificación y espeleogénesis, a la vez que constituyen los primeros reportes de espeleotemas para cuevas en arcilla. El trabajo describe las espeleotemas halladas y discute su génesis.

Palabras clave: Karst, Espeleotemas, Cuevas en arcilla, Geoespeleología, Mineralogía, Hidrogeología, Espeleogénesis.

ABSTRACT

In the semi-desert region of the Bardenas (Navarra) are interesting systems of caves and chasms in clay, formed by processes of piping. Rock-box consists of clay materials, with minor interbedded mudstones, marl and limestone, belonging to the Tudela Formation (of Miocene age). Recent explorations in the plateau of the Nasas (Bardena Negra), have allowed to study systems of potholes with 880 m of galleries and -100 m depth. The largest individual cavity (Sima Nasa Alta 04) reaches 380 m of development and -40 m of depth. The cavities have unique speleothems of gypsum, illite, calcite and opal-CT. In smaller proportions and in different combinations there are also occurrences of anhydrite, kaolinite, montmorillonite, halite and amorphous silicates. These data are of great interest because they prove the existence of dissolution over the process of karstification and speleogenesis, at the same time there are the first reports of speleothems to caves in clay. The paper describes the speleothems found and discusses its genesis.

Keywords: Karst, Speleothems, Caves in clay, Geoespeleology, Mineralogy, Hydrogeology, Speleogenesis.

INTRODUCCIÓN

Las cuevas en arcilla son extraordinariamente raras a nivel mundial, ya que se trata de materiales arcillosos poco consistentes y poco solubles, por lo tanto, poco susceptibles de experimentar procesos de karstificación y generar cavidades a escala humana (macro cavernas). Los casos conocidos se dan en regiones áridas a desérticas, generalmente en antiguas cuencas lacustres que se rellenaron con evaporitas y materiales arcillosos.

La formación de cuevas en este tipo de terrenos ocurre por procesos de piping o tubificación, en los que las partículas arcillosas son removidas grano a grano, con escasa intervención de la disolución. Una vez formados los conductos iniciales de drenaje subterráneo, la ampliación de las galerías ocurre principalmente por procesos erosivos.

La tubificación o piping consiste en una remoción de partículas de la roca por flujos canalizados de aguas subterráneas en materiales granulares y rocas poco solubles (Parker & Higgins, 1990; Dunne, 1990). En su forma pura el piping es el extremo teórico de un espectro espeleogenético, con 100% de disolución kárstica en el extremo opuesto. Entre ambos extremos hay toda una gama de situaciones intermedias (en rocas carbonáticas impuras, evaporitas, areniscas limosas, arcillas y otras rocas poco solubles), donde disolución y piping actúan juntas, en variables proporciones. La tubificación participa también en el desarrollo de cavidades formadas por procesos múltiples (Halliday, 2004, 2007), así como en la génesis del karst en cuarcitas en zonas tropicales (Urbani, 1986; Galán, 1991; Galán & Herrera, 2005; Galán & Lagarde, 1988).

Por todo ello, la aplicación del término karst o pseudokarst resulta controversial para la formación de cavidades y sistemas de drenaje subterráneo en arcillas, ya que existe un continuo entre cuevas de tubificación y cuevas de disolución. A la luz de los conocimientos actuales y de los sistemas de cavidades que hemos descubierto en las Bardenas en materiales arcillosos de la

Formación Tudela (de edad Mioceno), puede hablarse inambiguamente de "karst en arcilla", tanto por la magnitud de los fenómenos como porque existe cierto grado de disolución de los materiales, además de tubificación y posterior erosión (Galán, 2015).

El objeto de esta nota es precisamente describir las espeleotemas halladas, lo que a su vez prueba ampliamente la ocurrencia de procesos de disolución y precipitación de minerales secundarios, formadores de espeleotemas en las cuevas en arcilla.

La topografía de la región de estudio está acribillada de depresiones, dolinas, simas, cuevas, túneles y conductos, que conducen el drenaje subterráneo hacia surgencias en la cabecera de valles secos y barrancos entallados o gullies. Algunos de estos relieves locales son de corta vida, dado que también actúa sobre el terreno la erosión normal de superficie. Algunas formas específicas locales pueden formarse o destruirse tras una simple tormenta. Pero el relieve global y las macrocavernas tienden a persistir a través de largos períodos de tiempo, acompañando al retroceso de los escarpes de las mesetas y a la erosión incisa de la red de gargantas y gullies sobre las zonas bajas y planicies. El relieve de superficie muestra en adición numerosas geoformas, a menudo de rasgos estéticos llamativos, así como todo un conjunto de rasgos geomorfológicos singulares, propios de esta región de las Bardenas (Figuras 01 á 05).

En las cavidades en arcilla que hemos explorado predominan galerías con ambientes secos, pero en las cuevas mayores son también frecuentes cauces con suelos de arcilla húmeda e incluso pozas aisladas de agua, que evidencian una circulación hídrica temporal, con unas condiciones atmosféricas de mayor humedad. Se trata en consecuencia de redes de drenaje subterráneo de carácter temporal, al igual que la red hidrográfica de superficie. La alternancia de actividad hídrica introduce cambios cíclicos en el contenido de humedad de la atmósfera subterránea, con condiciones alternas de humectación y desecación. Ello propicia la precipitación de minerales secundarios a partir de las soluciones que fluyen a través de las arcillas. La existencia de cavidades con numerosas bocas genera también corrientes de aire que facilitan la evaporación y precipitado de sustancias en solución.

Las espeleotemas estudiadas en esta nota se localizan en cuevas en el flanco W de las mesetas de la Nasa Alta (629 m snm) y Nasa Baja (602 m snm) (Figuras 6 á 8), ambas en la denominada Bardena Negra, zona con mayor cobertura vegetal que ocupa la mitad meridional de las Bardenas (la mitad septentrional, más árida, es llamada Bardena Blanca). Un total de 15 cavidades han sido descritas en trabajos previos (Galán, 2015; Galán & Nieto, 2015; Galán et al, 2015), e incluyen cuevas de hasta 158 m en la Nasa Baja y 380 m en la Nasa Alta. Los sistemas de drenaje subterráneo atraviesan un desnivel de -100 m y el conjunto de galerías topografiadas en ambas Nasas suma un total de 1.094 m de desarrollo, existiendo un conjunto aún mayor por explorar. Tales sistemas de simas y cuevas constituyen hoy los ejemplos más extensos y notables hasta ahora conocidos -a nivel mundial- para cuevas en arcilla.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos presentados son el resultado de prospecciones efectuadas en 2015 en cavidades de las Nasas Alta y Baja (Bardena Negra). En su exploración se utilizaron los equipos habituales en espeleología (cascos, iluminación Leds, instrumental topográfico de precisión Suunto, cuerda estática, jumars, material para colección de muestras y cámara fotográfica digital Cannon PowerShot). Las propiedades físico-químicas de las muestras de espeleotemas fueran estudiadas en laboratorio e incluyen observaciones bajo microscopio binocular Nikon (hasta 800 aumentos) y análisis mineralógico por DRX (cristalografía por difracción de rayos-X).

RESULTADOS

CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO GENERAL

Las Bardenas es una amplia región situada en el SE de Navarra, que formó parte de una cuenca endorreica durante el Terciario, hasta que el río Ebro abrió su paso para conectar con el Mediterráneo. Se extiende unos 40 km en sentido N-S por algo más de 20 km en sentido E-W, con una superficie que cubre 600 km².

La cuenca endorreica comenzó a formarse durante el Eoceno y pasó a ser exorreica en el Mioceno final. Durante este lapso se rellenó de sedimentos fluvio-lacustres procedentes de la elevación de la cadena Pirenaica, al Norte, pero también recibió algunos aportes de la cadena Ibérica, situada al Sur. A partir del Plioceno la cuenca comienza a erosionarse, vaciando buena parte de los materiales Terciarios, fundamentalmente arcillosos y margosos, y originando relieves tabulares de formas caprichosas, una red de barrancos y cañones entallados o gullies, y numerosas simas y cuevas formadas por tubificación o piping.

Desde un punto de vista climatológico, la región se caracteriza por tener un clima continental árido á subdesértico, con un promedio de lluvias de 350 mm/a. Los contrastes térmicos son también importantes, con temperaturas que superan los 40°C en verano y -5°C en los meses invernales, cuando son frecuentes las heladas. Cabe destacar que las lluvias son poco frecuentes y muy variables a lo largo del año, oscilando entre valores mensuales de 10 á 55 mm. Por lo general hay dos máximos pluviométricos anuales (a fin de primavera e inicio del otoño); durante estos máximos las lluvias son de baja intensidad (lloviznas de carácter ciclona), por lo que su capacidad erosiva es baja. Mientras el resto del año, aunque las precipitaciones son menores, las lluvias son de elevada intensidad y corta duración (carácter tormentoso), por lo que poseen una alta capacidad erosiva (Marín & Desir, 2010). Las tasas de erosión en las Bardenas son muy elevadas. La pérdida de materiales alcanza 32 Tm/Ha/a (toneladas métricas por



Figura 01. Las Bardenas es una región árida a semidesértica, con relieves tabulares (mesetas con agudas crestas de extrañas formas, erosionadas por profundas cárcavas), constituida esencialmente por una potente secuencia de materiales arcillosos, con intercalaciones delgadas y espaciadas de nivelitos de calizas, margas y areniscas.



Figura 02. En los materiales arcillosos de las Bardenas, su alto contenido en sodio intercambiable y su coeficiente de hinchamiento producen agrietamientos que facilitan la infiltración y el desarrollo de los procesos de pipping.



Figura 03. Las arcillas de la Formación Tudela poseen un alto contenido en yeso, sobretodo en la parte inferior de la serie. Nivelitos delgados de yeso son con frecuencia observables en las paredes de los cañones entallados o gullies.

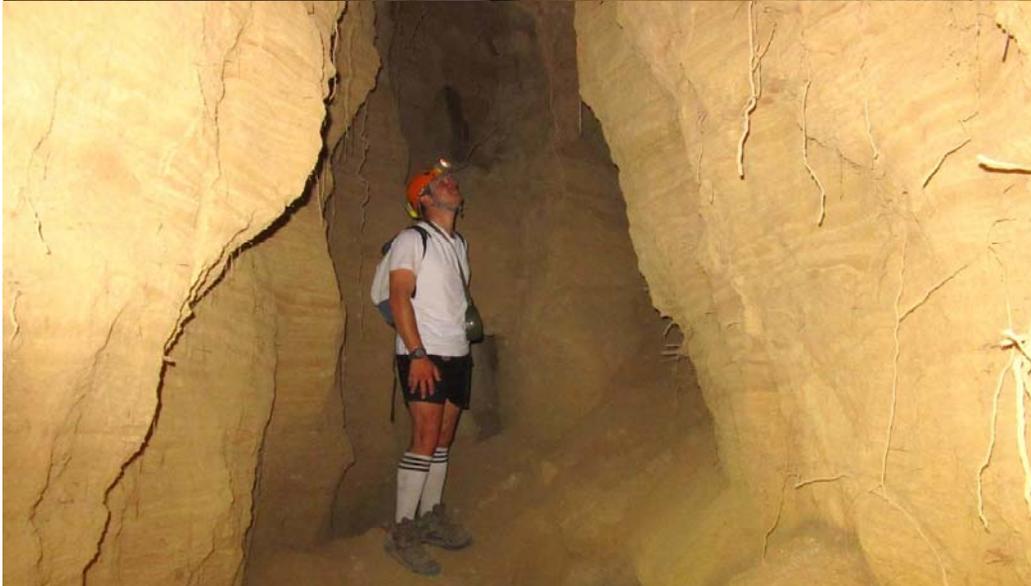
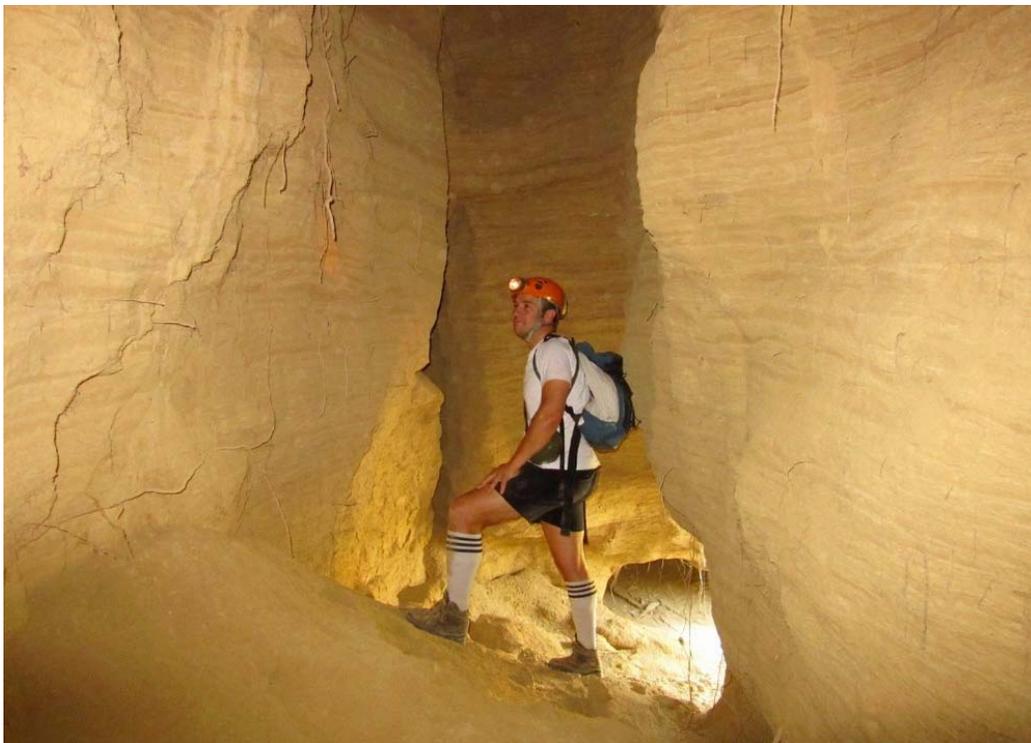


Figura 04. Morfología típica de las cavidades en arcilla de las Bardenas, en este caso en cuevas de hasta 60 m de desarrollo en cañones en materiales arcillosos Holocenos de la Bardena Blanca.



Figura 05. Gargantas entalladas o gullies, características de las Bardenas. Han sido formada por procesos de tubificación y erosión. Algunas de ellas son el resultado simple del colapso del techo de galerías de cuevas.



Figura 06. La alargada meseta de la Nasa Baja, escarpes en su flanco W, y red de barrancos entallados o gullies al W de la misma. Parte del área de estudio, con diversas cavidades en arcilla.



Figura 07. Extremo N de la Nasa Baja (arriba), collado entre ambas Nasas (centro) y flanco W de la Nasa Alta (debajo), el sector explorado con mayor número de cavidades.



Figura 08. Relieve en el flanco W de la Nasa Baja (arriba). Depresiones con pináculos internos (centro). Sima Nasa Baja 01, de 50 m de desarrollo y -18 m de desnivel, la cual posee espeleotemas de illita.

hectárea al año) para materiales Terciarios y 77,2 Tm/Ha/a para materiales Holocenos (Desir & Marín, 2007). De ello se desprende que la erosión es muy importante y la evolución del paisaje está controlada por la litología y las características climáticas, siendo a su vez estas últimas las que condicionan los procesos erosivos.

Desde un punto de vista geológico, la parte basal de la cuenca, que aflora al W, está constituida por una espesa secuencia de arcillas y yesos (Formación Lerín, de edad Mioceno), a la que suprayace una secuencia margo-arcillosa sensiblemente horizontal (Formación Tudela, también Miocena). Esta posee algunos nivelitos de yeso (Figura 3), pero fundamentalmente está formada por potentes conjuntos de sedimentos arcillosos, térreos, de potencia decamétrica, entre los cuales se intercalan espaciadas delgadas capas de arenisca margosa, lutitas, y de calizas y margas en sus zonas más altas (Figuras 6 á 8). Estos materiales están revestidos por glaciares de cobertera del Pleistoceno (cantos y gravas con abundante matriz limo-arcillosa) y sedimentos Holocenos arcillosos, menos compactos, en las zonas planas inferiores. La Formación Tudela, en la que se desarrollan las cavidades y las espeleotemas estudiadas en este trabajo, está constituida por arcillas limosas grises y ocres, en ocasiones rojizas. Aparecen con intercalaciones de capas de caliza y margocaliza, aunque también pueden intercalarse capas de arenisca y limonita, en tramos de espesor decimétrico a métrico. Las arcillas poseen niveles calcáreos con texturas de tipo grainstone y grano fino, clastos y proporciones variables de limos o lutitas terrígenas, lo que les confiere un carácter margoso. Las capas menos frecuentes de arenisca poseen paleocanales de tipo ribbon o bien forman niveles tabulares de espesor centimétrico. En conjunto representan distintos episodios de sedimentación calcárea en pequeños lagos de carácter relativamente efímero y salino, alternando con episodios en los que domina la sedimentación terrígena de llanura lutítica aluvial, surcada localmente por pequeños canales fluviales sinuosos.

La litología de los materiales arcillosos Terciarios y Holocenos es semejante. Las arcillas de la Formación Tudela constituyen un material ligeramente dispersivo, de estructura masiva, pH alcalino (8.3 á 9), conductividad eléctrica alta (3 á 5 mS), ausencia casi total de materia orgánica, altos valores de SAR (Sodium Adsorption Ratio) y ESP (Exchangeable Sodium Percentage), y coeficientes de hinchamiento que pueden llegar hasta el 12%. Mineralógicamente estos materiales presentan un alto contenido en arcillas, calcita y cierto porcentaje de cuarzo. Los minerales de la arcilla identificados han sido illita (82-86%), clorita (9-16%) y trazas de caolinita.

Tanto la capacidad de hinchamiento de estos materiales como la dispersión son factores importantes en el desarrollo de los distintos procesos de erosión ya que ambos causan agrietamiento. Los altos valores de SAR y sodio intercambiable sugieren que en estos sedimentos resulta fácil la génesis de procesos de piping (Marín & Desir, 2010). La presencia de arcillas expansivas y elevados valores de SAR y ESP son suficientes para definir un lugar como altamente susceptible al piping y la razón principal para su ocurrencia (García-Ruiz, 2011). Cuando el sodio representa un alto porcentaje del total de cationes puede producirse piping y colapsos de gran envergadura. El piping en estos casos coincide con materiales poco coherentes, con alto contenido en limos y arcillas con un elevado contenido en sales. Estos materiales pueden verse afectados por la disolución del sodio, de manera que se acelera la pérdida de coherencia y se facilita la exportación de materiales finos en los conductos iniciales por los que fluye el agua. A la vez, al haber un predominio de arcillas expansivas, se favorece el agrietamiento y la canalización de la escorrentía hacia el interior del sedimento, siguiendo unas líneas preferentes de flujo subterráneo subsuperficial (Gutiérrez et al, 1997).

Es importante destacar que, desde un punto de vista hidrogeológico, la permeabilidad de todos estos materiales es muy baja, debido al marcado predominio de los términos arcillosos y la escasa potencia de las intercalaciones de otras litologías. Esta impermeabilidad basal determina que la mayor parte de la erosión y remoción de materiales actúe a través de la formación de barrancos y cañones entallados, precisamente por procesos de piping.

En las laderas de las mesetas (con arcillas Miocenas de la Formación Tudela) predomina la escorrentía y los procesos erosivos de superficie. Las fuertes pendientes (superiores a 30° y llegando hasta la verticalidad), dificultan la infiltración. No obstante pueden producirse procesos de piping a diversas escalas.

A muy pequeña escala los microconductos son destruidos al progresar la erosión en las siguientes fases alternas de lluvias fuertes. También llegan a producirse deslizamientos en forma de coladas de barro, a lo largo de surcos en las laderas. Estos movimientos de masas se producen cuando las arcillas se comportan de manera plástica y tienen carácter estacional, ocurriendo generalmente en invierno (cuando la evapotranspiración es mínima y el grado de humedad es más alto). En tales condiciones las arcillas se cargan de humedad y alcanzan su límite plástico, deslizando como un fluido. Se han llegado a reportar coladas de 42 m de largo y 80 cm de espesor, con un volumen de material movilizado de 90 m³ (Marín & Desir, 2010). Estas coladas resultan luego removidas durante eventos tormentosos en la época estival.

A mayor escala, las exploraciones recientes han mostrado que los procesos de piping, facilitados por la existencia de un fuerte gradiente hidráulico, pueden evolucionar hasta generar conductos mayores, simas y macrocavernas, las cuales localmente pueden alcanzar gran profusión, extensión y desarrollo, formando sistemas de drenaje subterráneo y cavidades con rasgos comparables a los del karst clásico en caliza (Galán, 2015; Galán & Nieto, 2015; Galán et al, 2015).

CAVIDADES Y ESPELEOTEMAS

Las cavidades en las que encontramos las espeleotemas que describimos en este trabajo se localizan en el flanco W de las mesetas de la Nasa Alta y de la Nasa Baja (Figuras 6 á 8), y se desarrollan en materiales arcillosos de la Formación Tudela. Conforman un conjunto de simas y cuevas, en número de 15, que suman 1.094 m de desarrollo de galerías. Una descripción

detallada de dichas cavidades (Nasa Baja 01 á 03, Nasa Alta 01 á 12) ha sido expuesta en trabajos previos (Galán, 2015; Galán et al, 2015).

Los datos sobre espeleotemas han sido obtenidos en nueve cavidades, que suman 904 m de galerías (Nasa Baja 02 y 03; Nasa Alta 03 á 06, Nasa Alta 08 á 10), pero observaciones de campo y la revisión de fotografías tomadas en las cavidades muestra que hay ocurrencias menores de espeleotemas (de un tipo u otro) en todas ellas (Figuras 9 á 25).

La mayor diversidad de espeleotemas se encuentra en las cavidades más grandes: cueva Nasa Baja 02 (158 m, -18 m), sima Nasa Alta 03 (70 m, -28 m), sima Nasa Alta 04 (380 m, -40 m), sima Nasa Alta 09 (170 m, -30 m). Pero hay cavidades pequeñas con espectaculares ejemplos de espeleotemas de illita (cueva Nasa Baja 03, 6 m, -2 m) y de yeso (sima Nasa Alta 05, 20 m, -10 m).

Las ocurrencias más frecuentes son las de espeleotemas de illita y de yeso. Las primeras son formadas principalmente por fluidificación de las arcillas en épocas húmedas y posterior desecación (al cohesionarse por retracción y pérdida de agua en épocas secas o en condiciones de mayor ventilación). Generalmente forman pequeñas estalactitas "fluidas" y coladas, de tonos ocres, pero hay ejemplos en que adquieren tonalidades blancas, recubriendo paredes y suelos. Como luego veremos, algunas de ellas son formas compuestas, en las que el carbonato cálcico (u otras sales) pueden contribuir a una recementación secundaria de las espeleotemas durante su consolidación en fases secas. Las espeleotemas de yeso son también muy abundantes y generalmente forman recubrimientos extensos, blancos, con eflorescencias aciculares y/o algodonosas sobre los taludes de arcilla y bloques sobresalientes. Algunas son revestimientos simples de grupos de agujas blancas de menos de 0.5 mm de diámetro y varios mm de largo, pero también 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. Su mecanismo general de formación se debe a precipitación por evaporación: las aguas percolantes en las arcillas ascienden por capilaridad entre los poros debido al gradiente de evaporación existente entre las paredes y la atmósfera de la galería. La cristalización en forma de frostwork (grupos de agudas agujas radiantes a partir de un punto) y las delicadas tramas algodonosas, pueden generarse tanto por evaporación de soluciones capilares como a partir de aerosoles. Como en el caso anterior, hay también formas compuestas, donde cristalitas de yeso pueden crecer sobre recubrimientos de calcita o combinados con otros minerales secundarios.

Con menor frecuencia en las cavidades más grandes (Nasa Baja 02, Nasa Alta 03, Nasa Alta 04 y Nasa Alta 09) existen sobre paredes arcillosas y bóvedas compactas con niveles de lutitas y margas, costras o recubrimientos (de espesor milimétrico) de otras espeleotemas blancas. Estas presentan la mayor diversidad mineralógica. Generalmente contienen calcita, sola o combinada con ópalo-CT, y otros minerales secundarios, tales como anhidrita, caolinita, montmorillonita, halita y silicatos amorfos. En el siguiente apartado nos referiremos por separado a la ocurrencia de cada mineral secundario y sus características.

De momento conviene destacar que, aunque se trata de minerales secundarios conocidos (para cuevas en caliza y/u otras litologías), constituyen el primer reporte de espeleotemas para cuevas en arcilla. Adicionalmente, algunos modos de ocurrencia y combinación de minerales en las espeleotemas resultan novedosos y originales.

MINERALOGÍA DE ESPELEOTEMAS

Conviene primero señalar que nuestras identificaciones son válidas para las muestras analizadas. Por analogía, atribuimos igual composición a espeleotemas de aspecto y morfología similares (como muchas de las mostradas en las fotos que acompañan a este texto) (Figuras 9 á 25), pero esto encierra mayor incertidumbre y en algunos casos resulta difícil precisar, porque varios minerales distintos pueden tener aspectos parecidos o presentarse combinados, así como también, una única especie mineral puede presentar diversas formas de ocurrencia.

Es probable que existan más fases minerales y minerales secundarios distintos (formando espeleotemas) que los reportados, pero sería necesario un esfuerzo analítico mayor, sobre un mayor número de muestras, para caracterizar sus composiciones. En este apartado nos centraremos en describir la mineralogía de las espeleotemas estudiadas, sus principales características y probable origen. Son reportados 9 minerales distintos, que ordenamos en 4 grupos.

1. Sulfatos.

- Yeso. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Monoclínico. Sulfato de calcio hidratado. Son las espeleotemas más comunes en este grupo de cuevas. Ello no extraña, porque este mineral se encuentra ampliamente disponible en la secuencia arcillosa de la Formación Tudela, formando nivelitos observables en las paredes de depresiones y barrancos. Sin embargo, su presencia en espeleotemas no es de origen detrítico, sino que se trata de cristalizaciones secundarias a partir de las aguas subterráneas que percolan las arcillas, las cuales ascienden por capilaridad y precipitan por evaporación de las soluciones. 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.

Ha sido hallado en casi todas las cavidades exploradas, generalmente en forma de recubrimientos aciculares milimétricos, de cierta extensión, de colores blancos, hasta blanco grisáceo, y en ocasiones con tenues tonos gris-azulado. Las agujas cristalinas son muy delgadas (0.2 mm) y largas (5-10 mm), formando recubrimientos delicados y densos, donde las agujas pueden crecer en paralelo o formando pequeñas borlas o formas radiales, las cuales crecen sobre la arcilla de las paredes en las zonas más secas y ventiladas. En las simas Nasa Alta 03 y 05 y en la cueva Nasa Baja 02, las espeleotemas de yeso forman recubrimientos densos y

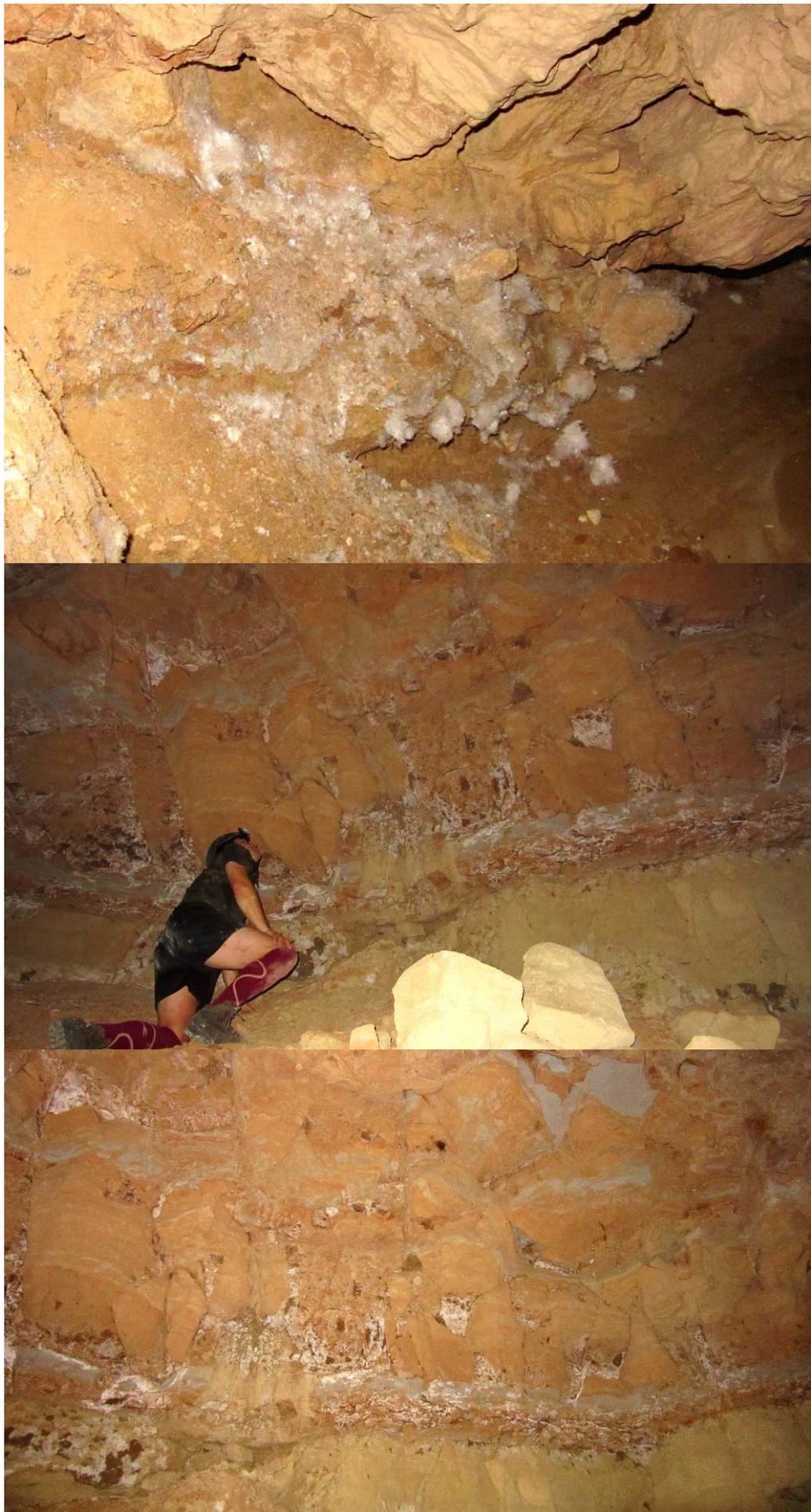


Figura 09. Cueva Nasa Baja 02. Recubrimientos de espeleotemas aciculares y algodonosas de yeso (arriba). Tramo con espeleotemas blancas y ocre, con calcita, ópalo y otros minerales secundarios.

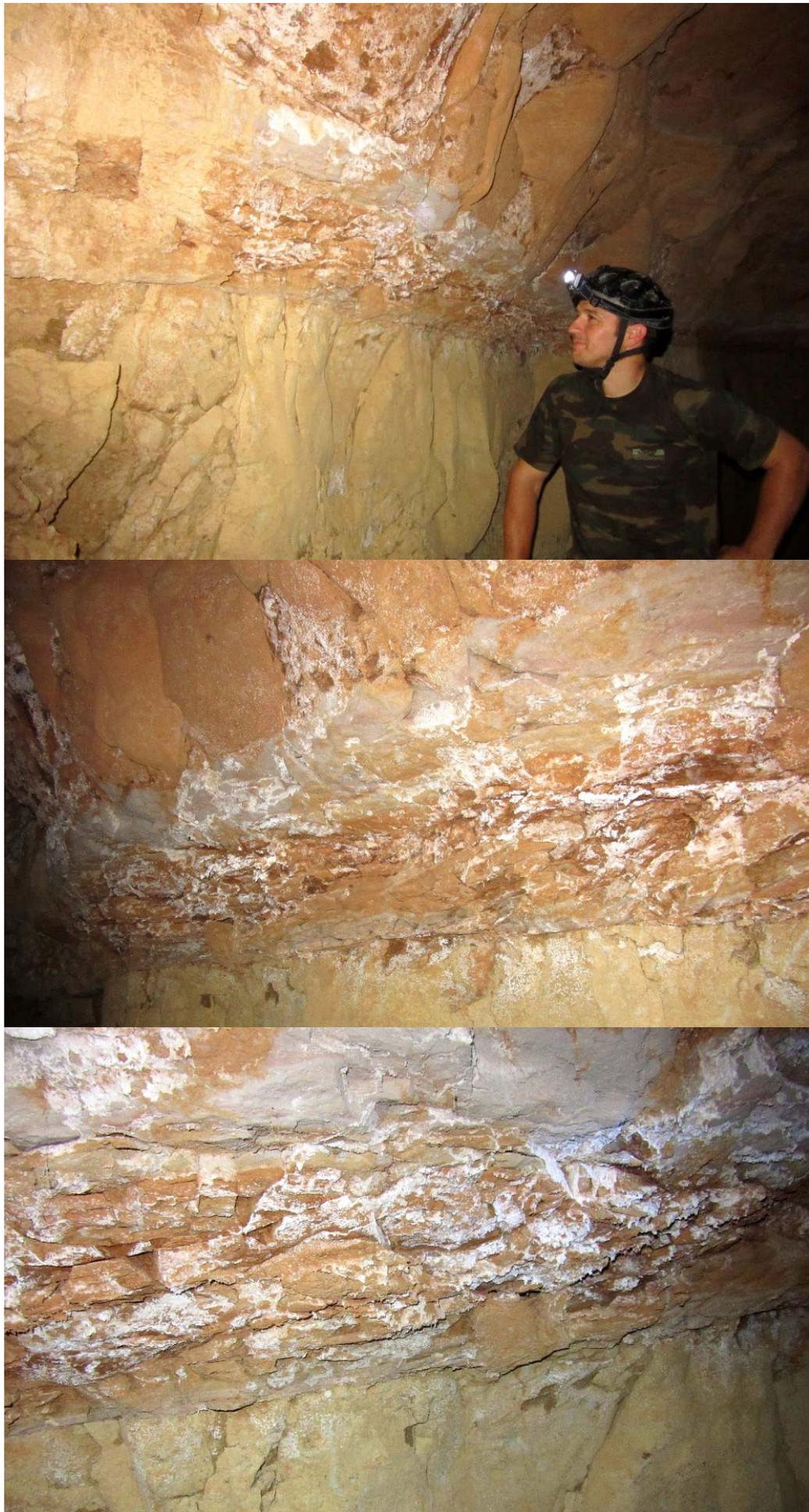


Figura 10. Recubrimientos de espeleotemas diversos (de calcita, ópalo-CT, calcita y ópalo, yeso, anhidrita y silicatos amorfos) en la cueva Nasa Baja 02.



Figura 11. Cueva Nasa Baja 02. En la cavidad habitan quirópteros (imágenes superiores). Entre las espeleotemas halladas, en la vecindad de puntos de reposo de quirópteros (con huellas de orín de los mismos), se encuentran diversas espeleotemas, entre ellas, algunas que contienen caolinita.



Figura 12. En el talud de la parte central de la Nasa Baja, se encuentra la pequeña cueva Nasa Baja 03, con una curiosa profusión de espeleotemas blancas y ocre claro de illita.

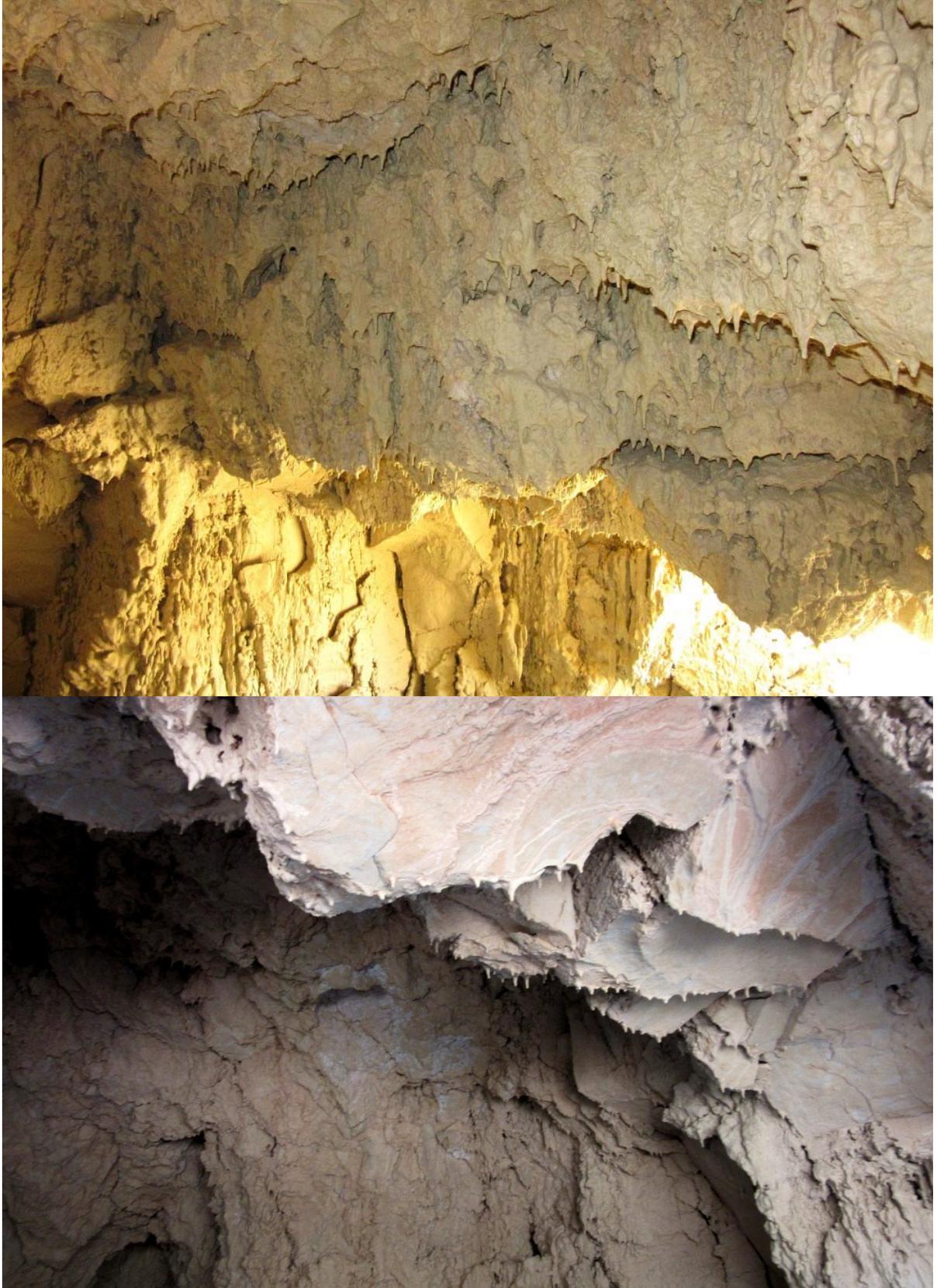


Figura 13. Diversidad de espeleotemas de mica-illita en la cueva Nasa Baja 03 (imagen superior), formadas por fluidificación de las arcillas en épocas húmedas. Algunas de ellas están recementadas por carbonatos (imagen inferior). Al fondo se observan algunos recubrimientos tenues de espeleotemas aciculares de yeso.



Figura 14. El flanco W de la Nasa Alta, donde se encuentra gran número de simas (arriba). Bocas de las simas Nasa Alta 02 y Nasa Alta 03 (centro). Vista desde el interior, sima Nasa Alta 03 (debajo). Las zonas con manchas gris-azulado son recubrimientos de espeleotemas de yeso.



Figura 05. Sima Nasa Alta 03. Desde la vertical de entrada la cavidad posee extensos recubrimientos aciculares de yeso sobre áreas extensas (arriba) y delicados crecimientos radiales (frostworks) (debajo) en zonas de aire en calma y/o sobre prominencias salientes, lo que sugiere su probable formación a partir de aerosoles.



Figura 16. En zonas secas de la sima Nasa Alta 03 hay espeleotemas de yeso junto a calcita (arriba), costras opacas de calcita y de halita (centro) y recubrimientos finos de ópalo y calcita (debajo).

extensos de agujas cristalinas. Algunas son revestimientos simples de grupos de agujas blancas, pero también 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. La sima Nasa Alta 05 destaca a este respecto por poseer espectaculares crecimientos algodonosos, sobre arcilla y sobre bloques y aristas salientes, los cuales pueden formar proyecciones colgantes en forma de estalactitas níveas y etéreas. Esta ocurrencia sugiere su génesis a partir de aerosoles sólidos autóctonos. Adicionalmente, en Nasa Baja 02 y Nasa Alta 03 y 04, hay ejemplos de formas compuestas, donde pequeñas agujas de yeso crecen sobre costras milimétricas de calcita, y de calcita y ópalo. Estas espeleotemas son muy delicadas y se deshacen fácilmente al tocarlas. Algunas formas algodonosas son tan frágiles que resultan prácticamente delicuescentes.

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 con aspecto de gotas, y tramas conjugadas de diversas formas, siempre de muy débil diámetro. Hay incluso filamentos curvos y anastomosis de formas filamentosas.

Maltsev (1990, 1993) sugiere que muchos frostworks de yeso son efímeros y su formación puede deberse a la disolución de yeso por agua de condensación, causada por variaciones microclimáticas y en el flujo de aire, y ha reportado para cuevas en yeso en Ucrania la formación de frostworks de yeso por diferencias estacionales en el flujo de aire. Los frostworks crecen durante los meses de verano, cuando baja la humedad relativa a 70-90%, y se disuelven parcialmente durante el invierno, cuando la humedad se eleva y se aproxima al 100%. En invierno, films de aguas de condensación atacan los frostworks de yeso en su base (o contacto con las paredes), causando su desprendimiento de las paredes y su caída como nieve al suelo de la cueva. En los meses de verano, el agua de condensación produce evaporación y se forman delicados cristales de frostworks.

En nuestro caso, de cuevas en arcilla, de ambiente seco y buena ventilación, los frostworks pueden formarse (y destruirse) por condiciones alternas simples de mayor o menor humedad. Aunque las espeleotemas de yeso se forman preferentemente en las zonas secas y más ventiladas de las galerías (de mayor evaporación), los frostworks y las formas algodonosas predominan en zonas de atmósfera en calma y en condiciones a veces de mayor humedad. Por ello, nos inclinamos más bien a sostener la hipótesis de que se originan por precipitación a partir de aerosoles o por una mezcla de ambos procesos. Los cambios estacionales o cíclicos, de mayor o menor humedad, propiciarían la formación de aerosoles en épocas húmedas, su precipitación y crecimiento de frostworks a continuación en época seca, y su disolución parcial en un nuevo ciclo húmedo, cuando se forman nuevos aerosoles. Las formas algodonosas mayores que hemos encontrado alcanzan a lo sumo 2 cm de espesor y su trama es tan delicada que por simple efecto de la gravedad tienden a formar proyecciones colgantes, casi delicuescentes, que apenas soportan su propio peso. En todo caso, este tipo de ocurrencia de frostworks de yeso resulta excepcional.

- Anhidrita. CaSO_4 . Ortorrómico. Sulfato de calcio. La anhidrita se forma por deshidratación del yeso, bien a altas temperaturas o bien por la evaporación de soluciones salinas (Hill & Forti, 1997). Nosotros sólo lo hemos detectado por DRX en una de las muestras de la cueva Nasa Baja 02, donde formaba costras blanco-ocres, de aspecto similar al de otras costras más blancas que resultaron estar compuestas de yeso en finas películas. La muestra analizada vista al microscopio muestra una estructura porosa. Probablemente la anhidrita se ha formado por deshidratación de yeso, en condiciones muy secas y ventiladas en esa parte de la cueva, lo que impide su rehidratación en yeso.

2. Silicatos.

- Illita. $(\text{K}, \text{H}_2\text{O}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} ((\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O})$. Monoclínico. Mica-illita (conjunto de minerales micáceos-arcillosos). Las espeleotemas de illita se han formado por fluidificación de las arcillas en épocas húmedas y posterior desecación, en condiciones más secas o de mayor ventilación). En este proceso, repetido, la alteración de los silicatos de los minerales arcillosos en la cueva da por resultado final la illita.

Las espeleotemas de illita son frecuentes en todas las cuevas de las Nasas, generalmente formando pequeñas estalactitas "fluidas" de hasta varios cm y coladas estalagmíticas, de tonos ocres, pero hay ejemplos en que adquieren tonalidades blancas, recubriendo paredes y suelos. En muestras muy blancas de las cuevas Nasa Baja 3, Nasa Alta 4 y Nasa Alta 10, se detectó por DRX la presencia de calcita, recementando la capa externa de las espeleotemas de illita. El carbonato cálcico contribuye así a una recementación secundaria de las espeleotemas de illita durante su consolidación en fases secas.

- Ópalo-CT. $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Sílice amorfa o sílice hidratada. Actualmente se lo considera un mineraloide. Está compuesto de dióxido de silicio (sílice), lo mismo que el cuarzo. Pero está constituido por diminutas lepisferas formadas por capas sucesivas de tridimita y/o cristobalita (de igual composición pero distinta estructura cristalina), más sílice amorfa. Según sea su empaquetamiento estructural puede presentar distintas morfologías. En la sima Nasa Alta 04 ha sido hallado formando delgadas películas translúcidas, casi inapreciables, y asociado a calcita en capas alternas, en recubrimientos cristalinos milimétricos de color blanco. La sílice puede proceder de granos de cuarzo y/u otros silicatos contenidos en la roca-caja.

La ocurrencia en capas alternas de ópalo y calcita en espeleotemas es bastante común en cuevas en caliza, pero ha sido poco reportada. Las bandas de ópalo suelen gradar lateralmente dentro del material carbonatado o pueden superponerse en capas alternas. En cada capa las puntas de ópalo pueden llenar los espacios entre los cristales de calcita. Mills (1965) ha propuesto que el

proceso es debido a que el agua rica en sílice típicamente mantiene grandes cantidades de bicarbonato en solución. La pérdida de dióxido de carbono de las soluciones, cuando el agua subterránea entra a las galerías, causa una subida del pH. Dado que la solubilidad de la sílice está controlada por el pH, este incremento causa que la sílice se disuelva y precipite el ión carbonato, decreciendo el pH tras la deposición, y precipitando entonces la sílice. Así, la sílice frecuentemente se deposita como una capa sobre la calcita previamente precipitada o rellenando los intersticios entre los cristales de calcita. En cada ciclo sucesivo de afluencia de las soluciones se repite la secuencia bandeada calcita-ópalo.

En nuestro caso, la ocurrencia de ópalo parece rara, o bien cabe la posibilidad de que pase desapercibida precisamente por su asociación a las espeleotemas de calcita.

- Caolinita. $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Triclínico. Silicato de aluminio. La caolinita está presente como traza entre los minerales de la arcilla de la Formación Tudela. La caolinita fue detectada por DRX de una muestra tomada en la cueva Nasa Baja 02, correspondiente a una delgada costra blanca, porosa, en la vecindad de cúpulas de la bóveda utilizadas por quirópteros y con manchas de orín de los mismos. La muestra de esta espeleotema, vista al microscopio, es una costra blanco-opaca, muy porosa, y que se disgrega con facilidad en gránulos pequeños, polvorientos. No parece ser un material detrítico, sino una costra cristalina en cuya formación creemos pudo intervenir algún cambio de pH o Eh por su cercanía al orín de quirópteros, que alteraría los silicatos. Su ocurrencia, muy rara, puede tener por tanto un origen químico-biogénico.

- Montmorillonita. $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Monoclínico. Hidroxisilicato de sodio, aluminio y magnesio. Fue detectada por DRX en una muestra tomada en la Sima Nasa Alta 04 de una costra blanca de calcita. La montmorillonita estaría formando una capa superficial creciendo sobre la espeleotema de calcita. Para Hill (1987) la montmorillonita puede formarse en cuevas en caliza bajo condiciones de flujo lento de soluciones con altas concentraciones de bicarbonato HCO_3 .

- Silicatos amorfos. En otras muestras de costras y recubrimientos blancos de poco espesor, de las cuevas Nasa Baja 02, Nasa Alta 04 y Nasa Alta 09, los espectros DRX indican la ocurrencia de silicatos amorfos, cuyos minerales no es posible identificar con esta técnica cuando la estructura no es cristalina o se trata de sustancias amorfas (cristales de tamaño nanométrico). En todo caso es de destacar que en estas cuevas de las Nasas hay muchas ocurrencias de pequeños films, costras delgadas y recubrimientos, de espeleotemas inusuales, que podrían ser objeto de estudio con técnicas analíticas más finas. Su diversidad guarda relación con la diversidad mineralógica de los materiales arcillosos ricos en sales (y con intercalaciones menores de nivelitos de margas y caliza) que presenta la Formación Tudela.

3. Carbonatos.

- Calcita. CaCO_3 . Carbonato de calcio. Trigonal. Es el mineral formador de espeleotemas más común en las cuevas en caliza. En las cuevas de las Nasas es frecuente formando costras blancas, recubrimientos cristalinos, pequeñas estalactitas cónicas y coladas estalagmíticas. De colores blanco-cristalinos. Generalmente se presenta sola o combinada con ópalo-CT en capas alternas. Los mejores ejemplos se encuentran en la cueva Nasa Baja 02 y en las simas Nasa Alta 04, 08 y 09. Los carbonatos obviamente son abundantes en esta litología y la calcita precipita por evaporación y pérdida de CO_2 al alcanzar las soluciones la atmósfera de las galerías. Previamente ha sido indicada su ocurrencia con ópalo y montmorillonita.

En la cueva Nasa Baja 02, en un tramo amplio y ventilado, con paredes muy compactas, de lutitas y margas, existe una gran profusión de espeleotemas blancas (o blancas y ocre). En su mayoría forman costras o recubrimientos (de espesor milimétrico) de yeso, pero también hay pequeñas estalactitas de calcita, y combinaciones de recubrimientos de calcita con cristalitas de yeso sobre ellos. La formación de espeleotemas compuestas de calcita y yeso ha sido satisfactoriamente explicada, para otras litologías, por Forti & Marsigli (1978). La deposición de calcita es controlada por la pérdida de CO_2 , mientras que la deposición de yeso es controlada por la evaporación de pequeñas cantidades de agua que alcanzan la superficie por capilaridad o tensión superficial. De este modo se pueden incluso producir crecimientos de cristales de yeso sobre la calcita en lugares de alta ventilación y evaporación.

4. Haluros.

- Halita. NaCl . Cúbico. Cloruro de sodio. Aparece en una muestra de corteza blanca, muy tenue, sobre arcilla seca del suelo de la sima Nasa Alta 03. Vista al microscopio su superficie es ligeramente botroidal y sólida. Pero se deshace con facilidad en polvo.

El mecanismo por el cual la halita (y otros haluros) son depositados en cuevas es relativamente simple si sus componentes están disponibles. Las sales solubles son lixiviadas y transportadas en solución a las cuevas, donde cristalizan por evaporación. Los haluros pueden derivar de secuencias de evaporitas intercaladas en las arcillas, en regiones áridas o que tuvieron climas áridos en el pasado. Una temperatura alta y una baja humedad relativa (como ocurre en la región en verano) favorecen la evaporación del agua de percolación y se depositan entonces con facilidad estas sales altamente solubles. Las sales pueden acumularse en los suelos durante períodos secos, y, cuando las condiciones pasan a ser algo más húmedas, las soluciones salinas pueden fluir desde



Figura 17. Sima Nasa Alta 04. Desde la misma entrada y en las zonas más ventiladas a lo largo de toda la galería principal, de 250 m, hay numerosos recubrimientos de espeleotemas aciculares de yeso.



Figura 18. Recubrimientos de espeleotemas aciculares de yeso, en la sima Nasa Alta 04. Algunas de ellas han crecido sobre espeleotemas de calcita y ópalo. En una de las muestras se encontró también montmorillonita.



Figura 19. Sima Nasa Alta 04. Espeleotemas de yeso creciendo sobre suelos arcillosos (arriba). Estalactitas de illita (imágenes central e inferior). Al fondo se aprecian otros recubrimientos blancos, con mayor diversidad mineralógica (calcita, ópalo y silicatos amorfos, entre otros minerales).



Figura 01. Sima Nasa Alta 04. Espeleotemas de illita formando coladas estalagmíticas y pequeñas estalactitas. Pequeños recubrimientos de agujas de yeso en las zonas más ventiladas (debajo).

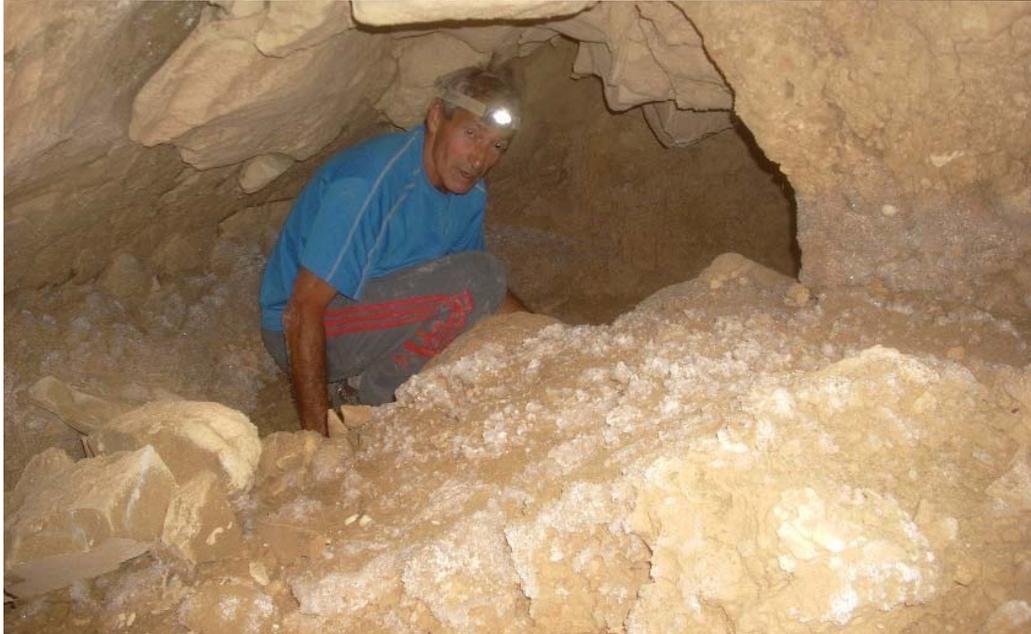


Figura 21. Entrada a la sima Nasa Alta 05 (arriba), la cual posee llamativos recubrimientos aciculares de yeso formando frostworks, de varios cm, así como otros con aspecto de algodón de azúcar.



Figura 22. Detalles de espeleotemas algodonosas y frostworks de yeso en la pequeña sima Nasa Alta 05. Algunos son tramas complejas de frágiles filamentos, casi delicuescentes, que cuelgan por gravedad.

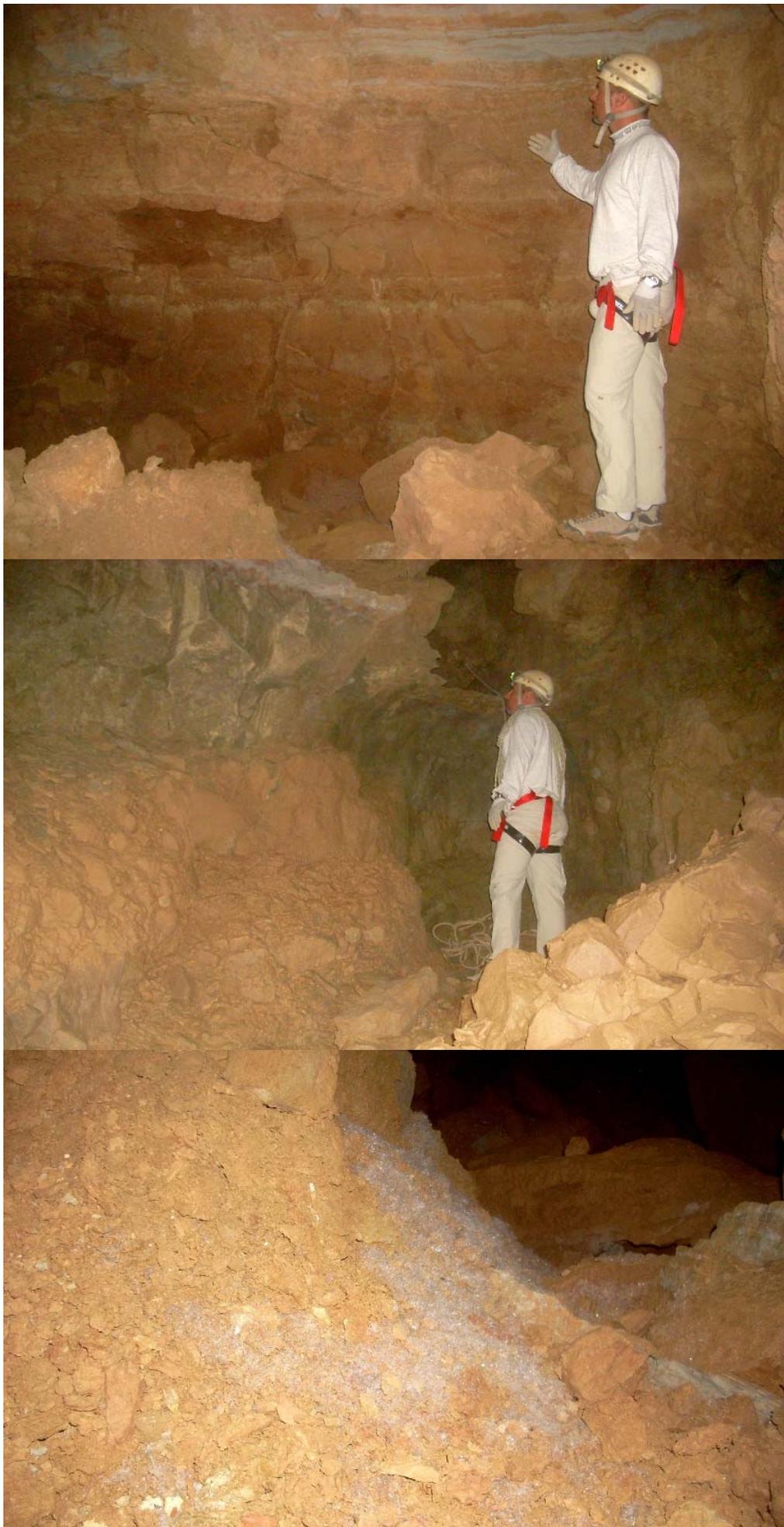


Figura 23. Sima Nasa Alta 09, cavidad de 170 m, con espeleotemas de yeso y de calcita.



Figura 24. Cueva Nasa Alta 10. Posee espeleotemas de illita formando estalactitas de hasta 10 cm de longitud y coladas blancas, algunas de ellas recementadas con carbonatos.

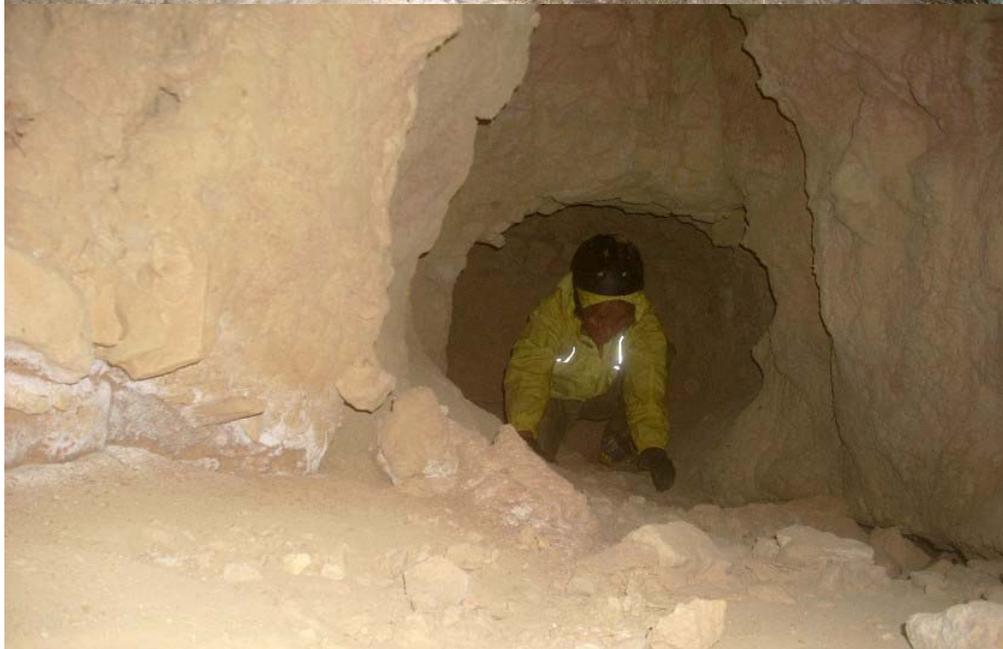


Figura 25. Morfología de las galerías de la cueva Nasa Alta 10, en la cual también se encuentran algunos pequeños recubrimientos de espeleotemas aciculares de yeso.



Figura 26. Flanco W de la Nasa Alta (en la zona de cavidades), con un estrato de caliza de 4 m en la parte alta, cuyo colapso progresivo desprende bloques sobre la ladera. Estos y los procedentes de intercalaciones delgadas de otras litologías, forman coluviones junto a los materiales arcillosos predominantes. Su disolución aporta una gran diversidad de componentes que pueden participar en la mineralogía de las espeleotemas halladas en las simas y cuevas.

el suelo y causar la deposición de halita en forma de costras. En la región, el contenido de la arcilla en sales de sodio es elevado, y pueden formarse también costras salinas en geoformas de superficie.

Nuestra impresión es que puede estar presente, junto a yeso y/o calcita, en otros recubrimientos blancos observados en las cuevas de las Nasas. Aunque tal vez no sea muy frecuente porque, debido a su alta solubilidad, las espeleotemas de halita pueden destruirse tan rápidamente como se formaron, cuando las condiciones ambientales pasan a ser más húmedas, lo que puede ocurrir con facilidad en período invernal y/o épocas de lluvia. En todo caso su ocurrencia sólo ha sido detectada en una de las muestras analizadas.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Hemos pasado revista a los distintos tipos de espeleotemas encontrados en estas cavidades, destacando la ocurrencia de nueve minerales secundarios distintos. No obstante, por la dinámica de estas cavidades y la alternancia de condiciones secas y húmedas en la atmósfera de las cuevas, que introduce el clima regional, las espeleotemas halladas no alcanzan gran profusión en volumen (como en las cuevas en otras litologías), y generalmente comprenden pequeños recubrimientos de poco espesor.

Su escaso volumen y la baja consistencia de los materiales arcillosos en que están excavadas las cuevas, sugieren que casi la entera totalidad de estas espeleotemas tiene una corta vida, destruyéndose en condiciones de alta humedad o cuando las crecidas hidrológicas erosionan, producen colapsos y amplían los conductos y galerías. Así que si bien se trata de espeleotemas que se pueden formar rápidamente, de igual modo pueden resultar destruidas con facilidad. La excepción a esto puede darse en galerías o tramos de ellas que han alcanzado un perfil de equilibrio y donde las crecidas hidrológicas no alcanzan a inundar toda su anchura, limitándose a excavar cauces encajados en el suelo de las mismas. En estas galerías estables y, en general bien ventiladas, las espeleotemas pueden crecer y mantenerse durante períodos de tiempo mayores.

La dinámica de los procesos de piping y formación de redes de cuevas de tubificación es muy activa, tanto en lo que concierne al proceso de espeleogénesis en arcilla como a la ocurrencia de espeleotemas en cavidades que han evolucionado hasta el tamaño de macrocavernas.

Aparte de la novedad que plantean estos hallazgos de espeleotemas en cuevas en arcilla, lo más interesante en nuestra opinión es que prueban que existe cierto grado de disolución (y posterior precipitación de minerales secundarios). Así, los procesos de disolución acompañan a la tubificación desde las fases iniciales de creación de conductos. El crecimiento volumétrico de las cavidades ocurre por procesos erosivos, principalmente, acompañando o como resultado de la actividad hidrológica temporal (o intermitente), asociada al clima y régimen de lluvias en la región.

La formación de cavidades, a su vez, esta asociada a la formación y evolución remontante de la cabecera de los gullies, que actúan como nivel de base local para la salida de las aguas subterráneas. De hecho muchos gullies (o tramos de estos) parecen ser el resultado simple del colapso del techo de galerías subterráneas, existentes previamente.

Lo que a su vez destaca que la karstificación y espeleogénesis locales, en los materiales arcillosos, está relacionada y coevoluciona con la erosión y desmantelamiento de los relieves de superficie. Tratándose por consiguiente de todo un conjunto de rasgos geomorfológicos interrelacionados. En suma, un conjunto de procesos, comandados a gran escala por la litología de los materiales y los factores climáticos.

La ocurrencia de espeleotemas ocupa por tanto un lugar en esta trama sistémica. E indica que los procesos de disolución (y precipitación) son parte interviniente en el modelado de conjunto (Figura 26), aunque a primera vista pareciera que por tratarse de materiales poco solubles su acción sería insignificante. Adicionalmente la disolución (a través de fisuras e intergranular) puede también propiciar la alteración y desagregación de las rocas, facilitando la erosión de superficie.

Lo conocido y lo expuesto en este trabajo sobre espeleotemas y cavidades en arcilla en las Bardenas, abre sin duda un amplio campo para futuras investigaciones, a la vez que pone de manifiesto que estamos en presencia de un valioso tipo de karst en arcilla, original, y de gran interés científico para la karstología, hidrogeología y espeleogénesis a nivel global.

AGRADECIMIENTOS

A todos los colaboradores del Laboratorio de Bioespeleología de la S.C.Aranzadi que nos acompañaron en distintas ocasiones en las exploraciones y trabajos de campo en las Bardenas. De modo especial para este trabajo queremos agradecer la colaboración de: Marian Nieto, David Arrieta, Daniel Arrieta, Anabella Besance, Piero Di Bartolomeo y Ainhoa Miner. A dos revisores anónimos de la Sociedad de Ciencias Aranzadi y Sociedad Venezolana de Espeleología que nos aportaron información bibliográfica, correcciones y útiles sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Desir, G. & C. Marín. 2007. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). *Catena*, 71: 31-40.
- Dunne, T. 1990. Hydrology, mechanics and geomorphological implications of erosion by subsurface flow. In: Higgins, C.G. & Coates, D.R., Eds. *Groundwater geomorphology: The role of surface water in earth-surface processes and landforms*. Geological Society of America, Special Publication 252.
- Forti, P. & M. Marsigli. 1978. Sulla genesi delle inflorescenze gessose sopra le concrezioni calcitiche delle grotte del Bolognese. *Act. 8° Cong. Naz. Speleol.*, Perugia, 8 pp.
- Galán, C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas silíceas y rocas carbonáticas: un estudio comparado. *Munibe (Ciencias Naturales.)*, S.C.Aranzadi, 43: 43-72.
- Galán, C. 2015. 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. & F. Herrera. 2005. Sistema Roraima Sur, Venezuela: la mayor cavidad del mundo en cuarcitas: 11 km. Pág. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 27 pp. + Reeditado en Pág. web Cota0.com.
- Galán C. & J. Lagarde. 1988. Morfologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quarzites du Roraima. *Karstologia* 11-12: 49-60.
- Galán, C. & M. Nieto. 2015. Nuevos datos sobre cuevas en arcilla, cárcavas y procesos de piping en la Bardena Negra. *Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi*. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 38 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.
- García-Ruiz, J.M. 2011. Una revisión de los procesos de sofusión o piping en España. *Cuadernos de Investigación Geográfica, Universidad de La Rioja*, 37(1): 7-14.
- Gutiérrez, M.; Sancho, C.; Benito, G; Sirvent, J. & Desir, G. 1997. Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain. *Geomorphology*, 20: 237-253.
- Halliday, W.R. 2004. Piping caves and Badlands pseudokarst. In: Gunn, J. Ed. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Taylor & Francis Books, London: 1260-1268.
- Halliday, W.R. 2007. Pseudokarst in the 21ST Century. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1): 103-113.
- Hill, C.A. 1987. Geology of Carlsbad Cavern and other caves in the Guadalupe Mountains. *New Mexico Bur. Mines Mineral Res. Mem.* 117: 150 p.
- Hill, C. & P. Forti. 1997. *Cave mineral of the World*. Second. Ed. Nat. Speleol. Soc., Huntsville, 464 p.
- Maltsev, V.A. 1990. The influence of seasonal changes of cave microclimate upon the genesis of gypsum formations in caves. *Nat. Speleol. Soc. Bull.* 52 (2): 99-103.
- Maltsev, V.A. 1993. Minerals of the Cupp-Coutunn karst cave system, southeast Turkmenistan. *World of Stones*, Moscow, Plus Ltd., 2: 5-30.
- Marín, C. & G. Desir. 2010. Procesos de erosión en una zona de clima semiárido de la depresión del Ebro (Bardenas Reales, NE de España). *Rev. C. & G.*, 24 (3-4), 63-72.
- Mills, J.P. 1965. Petrography of selected speleothems of carbonate caverns. M.S. Thesis, Univ. Kansas, Lawrence, 44 p.
- Parker, G. & C. Higgins. 1990. Piping and pseudokarst in drylands. In: Higgins, C. & Coates, D.R. eds. *Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms*. Geological Society of America. Special Publ. 252.
- Urbani F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. *Interciencia*, 11 (6): 298-300.