

CUEVAS DE TUBIFICACIÓN Y CÁRCAVAS EN ARCILLA: PSEUDOKARST DE LAS BARDENAS.
PIPING CAVES AND GULLIES IN CLAY: BARDENAS PSEUDOKARST.



Carlos Galán & Marian Nieto.
Laboratorio de Bioespeleología.
Sociedad de Ciencias Aranzadi..
Mayo 2015.

CUEVAS DE TUBIFICACIÓN Y CÁRCAVAS EN ARCILLA: PSEUDOKARST DE LAS BARDENAS.

PIPING CAVES AND GULLIES IN CLAY: BARDENAS PSEUDOKARST.

Carlos Galán & Marian Nieto.

Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.

E-mail: cegalham@yahoo.es

Mayo 2015.

RESUMEN

Las cuevas en arcilla son poco comunes a nivel mundial. Su génesis resulta de interés en Geoespeleología por producirse por procesos de tubificación en materiales inconsolidados y rocas poco solubles. Su espeleogénesis está estrechamente asociada a la formación y evolución de cárcavas y pequeños cañones, que actúan como nivel de base local para el flujo de aguas subterráneas. Normalmente ocurren en zonas áridas a desérticas, formándose por procesos de remoción subterránea grano-a-grano de las partículas arcillosas, con poca o nula intervención de la disolución.

En la región de las Bardenas (SE de Navarra, N Spain) existen interesantes ejemplos de formación de cárcavas y barrancos entallados, con numerosos arcos y puentes de roca, túneles y cuevas en arcillas. Las mayores cavidades alcanzan decenas de metros de desarrollo y poseen biotopos peculiares en oscuridad total que pueden servir de refugio a diversos vertebrados e invertebrados de hábitos cavernícolas. La proliferación de cavidades de tubificación a distintos niveles en las paredes de los barrancos contribuye a su vez a la erosión remontante de la red de drenaje epígeo, generando una geomorfología pseudokárstica de badlands, con depresiones, simas y colapsos, a menudo en continuidad. El trabajo describe e ilustra los ejemplos encontrados en este peculiar relieve.

Palabras clave: Espeleología, cuevas en arcilla, tubificación, pseudokarst, geomorfología, fauna cavernícola.

ABSTRACT

Clay caves are uncommon worldwide. Its genesis is of interest in Geospeleology by occur by piping processes in unconsolidated materials and poorly soluble rocks. Its speleogenesis is closely associated with the formation and evolution of gullies and small canyons, who act as local base level for the flow of groundwater. Normally they occur in arid desert areas. Caves are formed by processes of underground removal grain-to-grain of clay particles, with little or no intervention from the solution.

In the region of the Bardenas (SE of Navarra, northern Spain) there are interesting examples of gullies and ravines carved with numerous arches and rock bridges, tunnels and caves in clay. The largest cavities reach tens of meters of galleries development and have unique biotopes in total darkness that can serve as a refuge for many vertebrates and invertebrates of cavernicolous habits. Proliferation of piping caves at different levels on the walls of the ravines in turn contributes to eroding headward of epigeous drainage network, generating a pseudokarst geomorphology of badlands, with depressions, potholes and collapses, often in continuity. The paper describes and illustrates the examples found in this particular relief.

Keywords: Speleology, clay caves, piping, pseudokarst, geomorphology, cave fauna.

INTRODUCCIÓN

Las Bardenas es una región árida a desértica situada en el SE de Navarra. Posee una topografía singular, con relieves ruñiformes, mesetas, agudos cerros aislados, chimeneas de las hadas, taludes con crestas y cárcavas, planicies escalonadas a distintos niveles y una red entallada de drenaje temporal, donde amplios barrancos tienen una red secundaria de gargantas y pequeños cañones (Figuras 1 á 16). En la vecindad de las paredes verticales de los mismos, por procesos subterráneos de tubificación o piping, se desarrollan simas, cuevas, túneles, hundimientos y cárcavas adicionales, dando un paisaje distintivo de badlands en materiales arcillosos.

La geología y geomorfología de las Bardenas ha sido objeto de múltiples descripciones y publicaciones, pero pocas de ellas han estudiado los procesos de piping, siendo poco o nada conocida la existencia y formación de cuevas en arcilla. Nuestro trabajo parte de un enfoque espeleológico y se centra en el estudio de cañones, cárcavas y otros ejemplos que muestran el desarrollo de simas, cuevas y mesocavernas. Aunque las cavidades individuales en estos terrenos poco estables se forman y destruyen con facilidad, los procesos erosivos y de piping en arcilla hacen que la red de cárcavas y cañones experimente una evolución remontante, por lo que persiste la morfología de conjunto, con nuevos ejemplos activos. Particular énfasis ha sido puesto en la prospección de la fauna que habita en este tipo de cuevas, ya que se trata de biotopos subterráneos con la posibilidad potencial de contener formas especializadas. Los mejores ejemplos encontrados de cuevas en arcilla se sitúan en la Bardena Blanca, en las planicies inferiores de zonas áridas. Describiremos a lo largo del texto los diversos ejemplos encontrados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos presentados son el resultado de una serie de prospecciones efectuadas en 1977, 2011, 2014 y 2015. Se utilizaron las técnicas habituales en espeleología y montaña, con uso de cuerda estática y jumars, cascos con iluminación de Leds, material topográfico Suunto y el material de colección habitual en bioespeleología, utilizando como conservador alcohol etílico a 70°. Muestras de roca y fauna fueron estudiadas en laboratorio bajo microscopio binocular Nikon, con magnificación de hasta 800 aumentos, y análisis geo-químicos sencillos. Las cavidades y los principales rasgos geomorfológicos son ilustrados con fotografía digital.

RESULTADOS

CUEVAS EN ARCILLA, PIPING Y BADLANDS PSEUDOKARST: CONTEXTO GENERAL.

Los enclaves de interés encontrados durante el estudio se localizan en la Bardena Blanca: zonas de Castil de Tierra, Matalafiera, Cuesta de Lucas, Piskerra, La Ralla, El Rallón, y en los barrancos Grande, de las Cortinas, de las Cuevas, y de los Cambrones. Situados a altitudes de entre 290 y 492 m snm. La toponimia utilizada corresponde al Mapa Geológico de Navarra (geologia.navarra.es).

Las cuevas en arcilla son raras a nivel mundial. Probablemente los mejores ejemplos corresponden a las denominadas Mud Caves de Arroyo Tapiado, localizadas en el área desértica de Anza-Borrego, California (USA); a lo largo de una red de nueve barrancos el flujo de aguas subterráneas ha excavado por procesos de piping 22 cuevas en arcilla, desde pocos a varias decenas de metros de desarrollo de galerías, alcanzando la mayor de ellas 280 m (Lindsay & Lindsay, 1985; Bremner, 2009). Este tipo de cavidades es comparable a las halladas en las Bardenas, tanto por su morfología, asociación a cañones y génesis por piping.

Existen muchos otros ejemplos de cavidades formadas por piping o tubificación, pero en otras litologías, que generalmente involucran rocas más duras (cuarcitas, areniscas, esquistos, limolitas y lutitas compactas) así como de otro origen o intercaladas entre lechos de rocas duras (ejemplos en tufa y cenizas volcánicas, margas entre caliza, loess, etc.) (Parker, 1964; Parker & Higgins, 1990; Parker et al., 1990; Halliday, 2004, 2007; Eberhard & Sharples, 2013).

Las cuevas de tubificación son espacios subterráneos naturales, a escala humana, que se extienden en zona oscura y han sido formadas por la remoción grano-a-grano de partículas por el flujo canalizado de las aguas subterráneas, con poca o nula intervención de la disolución en el desarrollo volumétrico de los conductos. No obstante, la disolución puede jugar un importante papel en las fases iniciales de la formación de conductos, como ocurre por ejemplo para el karst en cuarcita de los tepuys de Venezuela (Urbani, 1986; Galán, 1991; Galán & Herrera, 2005; Galán & Lagarde, 1988; Galán et al, 2004) y otros fenómenos kársticos en arenisca de cemento carbonático. Por lo que existe un continuo entre cuevas de tubificación y cuevas de disolución, en rocas de distintas solubilidades.

La remoción intergranular de partículas puede producir tanto grandes como pequeños conductos y puede involucrar tanto rocas poco solubles como materiales inconsolidados. La utilización del término pseudokarst para este tipo de cavidades y terrenos es controversial. A menudo hidrólogos, geomorfólogos y karstólogos utilizan diferentes terminologías, aunque sus conclusiones son muy similares (Higgins & Coates, 1990). El término pseudokarst por sofusión ha sido usado como sinónimo de piping por algunos autores europeos (Desir et al., 2009; García-Ruiz, 2011), pero no es utilizado en otros países ni en medios anglofonos. El enfoque tradicional de los geólogos es expresado claramente por Parker et al. (1990), mientras que el punto de vista en hidrología no-kárstica es explicado con elegancia por Dunne (1990). No obstante, el énfasis de Dunne se centra en el movimiento del agua subterránea a través de microporos y vacíos intergranulares en el medio edáfico, mientras los conceptos de Parker involucran depresiones, cuevas y conductos mayores, por lo que resultan más congruentes con las corrientes actuales en karstología y espeleogénesis (Halliday, 2004).

En el caso de las Bardenas, las cuevas se desarrollan en materiales arcillosos, de consistencia variable, relacionados con una red de cárcavas, pequeños cañones y barrancos entallados, donde existe una red hidrográfica de superficie de carácter temporal (asociada al régimen de lluvias). En estos terrenos subdesérticos existen también intercalaciones delgadas de lutitas, margas, calizas y areniscas, de débil espesor, así como depresiones y colapsos que generan una morfología de badlands: zonas desnudas, de escasa pendiente, intrincadamente disecadas por una escorrentía de flujo intermitente, con estrechos interfluvios y superficies con resistentes caprock (roca sello), donde la expansión y la contracción de las arcillas con la alternancia de las lluvias y sequías repetidamente cubre y destapa pequeños conductos formados por piping (Mears, 1968) (Figuras 1 a 17).

El proceso de piping en arcilla clásicamente comienza con el transporte laminar de partículas a través de pequeñas grietas, pudiendo ocurrir una cantidad limitada de disolución intergranular de la matriz o de las partículas (Striebel & Schäferjohann, 1997). Una vez que se establece un conducto continuo, el transporte se vuelve turbulento y la socavación aumenta el mecanismo erosivo. A medida que los tubos se hacen más grandes, aumenta el volumen de flujo. El hundimiento y colapso local del techo pueden permitir la entrada de volúmenes adicionales de escorrentía, ampliando aún más los conductos, e incorporar fragmentos de la superficie, lo que lleva al desarrollo de conductos tortuosos. Los tubos resultantes pueden propagarse verticalmente o con cierta inclinación, cuesta arriba o cuesta abajo, y pueden desarrollarse trenzados y redes dendríticas. En otros casos, los conductos incipientes desarrollan en su parte inferior otras hendiduras, dando lugar de novo a la remoción de partículas, con una tendencia final a la horizontalidad, determinada por el nivel de base local impuesto por el fondo del barranco hacia el cual desaguan. Las arcillas cambian sus propiedades físicas según su estado de hidratación. La alternancia de expansión y contracción forma repetidamente grandes y pequeñas grietas. Algunas arcillas son especialmente plásticas cuando están mojadas, y pueden formar bloques de dislocación, deslizamientos y colapsos, cuya posterior



Figura 01. Relieves de la Bardena Blanca, con cerros y mesetas de arcillas de distintos colores.



Figura 02. Paisaje típico de la Bardenas Blancas, con planicies, mesetas, cerros aislados y redes de barrancos.



Figura 03. El Castil de Tierra, emblema de las Bardenas, con el barranco Grande en su base. Debajo, paisaje característico de las planicies Holocenas, con pequeños barrancos y formas residuales.



Figura 04. Barrancos con paisajes ruñiformes, con cavidades en sus paredes, y estratos intercalados de rocas duras que, al progresar la erosión de las arcillas, colapsan y deslizan formando acumulaciones caóticas



Figura 05. Mesetas de arcilla, con estratos intercalados de rocas duras, y formación de barrancos en las zonas planas. Algunos estratos colapsados de caliza muestran morfologías de disolución.



Figura 06. Las mesetas tabulares, a distintos niveles, evolucionan hacia cerros aislados y agudas crestas al progresar la erosión y perder los estratos duros intercalados que las coronan.



Figura 07. Prospecciones en zonas altas de las mesetas y crestas, en busca de cavidades.



Figura 08. Formas de erosión en la meseta de La Ralla. Con topes e intercalaciones de rocas duras en voladizo y flancos entallados por profundas cárcavas, en materiales arcillosos Terciarios de la Formación Tudela.



Figura 09. Los flancos verticales de las mesetas suavizan sus bases con crestas surcadas por cárcavas.



Figura 10. Descendiendo de la meseta de Piskerra (Formación Tudela), con una torre secundaria. En la imagen inferior puede apreciarse desde arriba la torre y el regolito que recubre el tope de la cumbre.

remoción contribuye significativamente a la erosión y a la ampliación de las galerías. Un alto contenido en sodio intercambiable desflocula estas arcillas, concentrando el flujo de agua en las grietas y proporcionando una lubricación adicional. Debido a que muchos conductos son de corta duración, sólo algunos persisten el tiempo suficiente para alcanzar el tamaño de cuevas.

Las cuevas encontradas en las Bardenas son muy similares a las que se presentan en arcillas y lutitas en la zona árida de Arroyo Tapiado (California). La lluvia aquí es rara y escasa, pero suficiente para generar numerosas cuevas de tubificación en gargantas estrechas en depósitos lacustres del Plioceno medio. Excepto cuando están parcial o completamente llenas por colapsos de material desagregado, las gargantas son ranuras profundas y estrechas, serpenteantes, con paredes verticales, y suelen ser recorridas por arroyos temporales. De igual modo, algunos valles ciegos se interrumpen por estrechos sumideros de tubificación o poseen cabeceras cortadas por paredes con entalladuras verticales tubulares. En otros casos, grandes bloques desmoronados se acuñan entre las paredes y forman los techos de cuevas de recubrimiento que pueden alcanzar decenas de metros de largo. No son tampoco infrecuentes las cuevas a varios niveles con múltiples entradas y colapsos. En condiciones atmosféricas normales, las galerías de las cuevas constituyen ambientes secos y polvorientos, pudiendo presentar "cascadas secas" de materiales pulverulentos y afloramiento de raíces en sus paredes y techos.

CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

Las Bardenas es una amplia región situada en el SE de Navarra, que formó parte de una cuenca endorreica durante el Terciario (la depresión o lago del Ebro), hasta que la erosión perforó la cadena costera catalana y 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. Durante el Cuaternario los materiales Terciarios, fundamentalmente arcillosos y margosos, fueron erosionados vaciando gran parte de la cuenca y originando relieves tabulares aislados, de formas caprichosas. Si bien toda la cuenca posee climas continentales áridos, la Bardena Blanca es la que ofrece un aspecto más desolado y desértico, con relieves extraños de mogotes y cerros de erosión de topes tabulares.

Actualmente se distingue una zona plana y deprimida, la gran hondonada central, que siguen de N a S el barranco Grande y el de los Hermanos, a 280 m de altitud, y que separa la Bardena Blanca, al N, de la Bardena Negra, al S. La Bardena Blanca constituye una depresión erosiva amplia y compleja, teniendo las más curiosas y aisladas formas del relieve, con mesetas y cerros que en su parte N alcanzan 490 m de altitud, y presentan un aspecto desolado y desértico. La Bardena Negra ocupa la porción meridional, con relieves de mayores altitudes, mayor cantidad de vegetación, y ofrece formas de erosión más comunes, propias de las comarcas Terciarias peninsulares. En lo que sigue nos referiremos exclusivamente a la Bardena Blanca, que, como indicamos en el inicio del apartado anterior, es la zona prospectada donde encontramos gran número de cuevas en arcilla, formadas por piping.

Geológicamente, la parte basal, 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 superior sensiblemente horizontal (Formación Tudela, también Miocena). Esta posee algunos niveles de yeso, principalmente en su parte inferior, pero fundamentalmente está formada por potentes conjuntos de sedimentos arcillosos, térreos, de potencia decamétrica, entre los cuales se intercalan otros margosos, areniscosos, y en sus zonas más altas, de calizas y margas, pero separados unos de otros en capas de escasa potencia. Estos materiales están revestidos por glacia 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 está constituida por arcillas limosas grises y ocreas, 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. Los niveles calcáreos presentan texturas de tipo grainstone y grano fino, con restos de algas (charáceas), clastos y proporciones variables de limos o lutitas terrígenas, lo que les confiere un carácter margoso. La continuidad lateral de estas capas de caliza puede alcanzar centenares de metros, desarrollando superficies estructurales cartografiables. Las capas menos frecuentes de arenisca poseen paleocanales de tipo ribbon o bien forman niveles tabulares de espesor centimétrico a métrico. 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.

A lo largo del Pleistoceno se formaron diversos glacia de piedemonte, encajándose los más recientes sobre los anteriores. Estos glacia de cobertera son depósitos poco consistentes formados por limos y arcillas con clastos angulosos de caliza, gravas y cantos rodados, de escasa cementación y potencia inferior a 2 m.

Durante el Holoceno se depositan limos, arcillas, arenas y gravas de origen mixto (aluvial-coluvial). Predominan en ellos los términos lutíticos con delgadas hiladas de cantos de caliza y arenisca, así como niveles arenosos. Su espesor varía de 2 a 5 m. En los fondos de valle de barrancos y arroyos predominan arcillas y lutitas grises y ocreas, también con clastos de diferentes tamaños y naturaleza, incluso bloques. En menor medida, también se observan niveles de arenas y láminas de yeso. Su potencia es poco discernible, pero se estima que localmente puede superar los 15 m (Figuras 17, 37 y 38).

Los relieves estructurales de las Bardenas están constituidos por materiales pertenecientes al Mioceno, consistentes principalmente en arcillas, con tramos métricos intercalados de margas, calizas y areniscas. La disposición subhorizontal de estos sedimentos, con

capas de distinta dureza (y distinta resistencia a la erosión), ha dado lugar a un relieve tabular de mesetas, con una serie de superficies escalonadas, replanos y resaltes estructurales que marcan los niveles más competentes. Los niveles duros permiten configurar la estructura regional, consistente en una sucesión tabular poco deformada, con un ligero basculamiento hacia el S y SE (Castiella et al, 1978). Los resaltes forman escarpes verticales o de pendientes pronunciadas que superan a veces los 100 m de desnivel. También son frecuentes los pequeños cerros cónicos (residuales) y alargadas crestas acanaladas que han perdido su techo de estratos duros.

Las formas erosivas son muy frecuentes, dado el predominio de sedimentos blandos y los rasgos de un clima semiárido, lo que favorece el desarrollo de la incisión y la formación de aristas y surcos sobre los sedimentos del Terciario. Los barrancos de arroyada y las cárcavas predominan en las zonas planas Holocenas y al pie de los escarpes. La erosión, muy activa en las Bardenas, determina la progresiva excavación de barrancos, su entallamiento vertical y excavación remontante hacia sus cabeceras.

La evolución geomorfológica de la región, sucintamente, queda enmarcada en una amplia fase Terciaria de colmatación y relleno de la depresión endorreica del Ebro, a la que sigue otra fase exorreica erosiva que va vaciando los materiales depositados, a través de la red fluvial del Ebro, hacia el Mediterráneo. Esa fase supone la movilización de una gran cantidad de material por el proceso de vaciado. El paso del régimen endorreico al exorreico según diversos autores (Riba, 1964; Salvany, 1989), debió producirse en el tránsito Mioceno-Plioceno, aunque faltan dataciones para establecer claramente el comienzo de dicho proceso. En el Holoceno, la dinámica erosiva fluvial ha seguido profundizando el modelado de la región, tanto por la acción llevada a cabo en los fondos de los valles, como por la ejercida en las laderas. La influencia del sustrato es puesta de manifiesto por la profusión de superficies estructurales, escarpes, mesas y cerros cónicos, a lo que se suma la incisión de la red de drenaje en las planicies y especialmente en la Bardena Blanca.

Estudios recientes para cuantificar las tasas de erosión en las Bardenas señalan que la pérdida de materiales es muy elevada. Estas pérdidas alcanzan 32 Tm/Ha/año (toneladas métricas por hectárea al año) para materiales Terciarios y 77,2 Tm/Ha/año 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 de erosión.

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. Únicamente pueden desarrollarse micro-procesos de disolución y karstificación en los niveles de calizas y areniscas, pero dados su escaso espesor, su significación como acuíferos puede considerarse nula. 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.

CONTEXTO CLIMÁTICO, LITOLOGÍA Y PIPING

El clima en la región de las Bardenas es árido a desértico, con una precipitación media anual de 350 mm y una evapotranspiración potencial de 790 mm. La temperatura media anual es de 13°C, oscilando entre valores medios mensuales de 8°C a 24°C, con máximos diarios que alcanzan 40-50°C en verano y mínimos de -5°C en épocas invernales, con frecuentes heladas. Las precipitaciones medias mensuales oscilan entre 10 y 55 mm, con dos máximos anuales (a finales de primavera y comienzos del otoño). Durante estos máximos las lluvias son de baja intensidad (lloviznas de carácter ciclónico), 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).

La distribución de las precipitaciones junto a la litología de los materiales son los factores principales que controlan la erosión. Sin embargo, otros factores, como la pendiente y formas del relieve, condicionan la escorrentía y la infiltración. Con fuertes pendientes la escorrentía es máxima y dificulta la infiltración, lo que inhibe el desarrollo de los procesos de tubificación o piping. Mientras que en las planicies y zonas de menor pendiente, la infiltración es mayor y se desarrollan intensamente los procesos de piping y formación de cavidades (Figuras 18 a 36).

En la Bardena Blanca predominan ampliamente dos litologías: (1) Las arcillas terciarias de la Formación Tudela (de edad Mioceno inferior a medio), con una potencia aproximada de 300 m, que forman los cerros y mesetas, y que poseen intercalaciones menores de calizas lacustres, areniscas y yesos, las cuales se van haciendo más potentes hacia el techo de la serie, alcanzando en algunos casos los 2 m de potencia. (2) Las arcillas y limos poco litificados de edad Holoceno, que ocupan las planicies y la depresión central de la cuenca. Estos materiales proceden del lavado de las arcillas terciarias de los cerros circundantes. Al estar estos materiales arcillosos menos litificados, el drenaje temporal se encaja en una red de barrancos y cañones de fondo plano, de dimensiones variables, que pueden alcanzar 5 a 20 m de profundidad y anchura y desarrollos de más de 10 km de longitud, que pueden exportar anualmente hasta 12 Hm³ de sedimentos al río Ebro (Desir & Marín, 2007). Localmente, en torno a los barrancos, pueden desarrollarse redes de cañones o gargantas menores, de escasa anchura pero profundamente entallados, formados precisamente por procesos de piping.

La litología de los materiales arcillosos Terciarios y Holocenos es semejante. Las arcillas de la Fm. Tudela constituyen un material ligeramente dispersivo, de estructura masiva, pH alcalino (8.3 a 9), conductividad eléctrica alta (3 a 5 mS), ausencia casi total de materia orgánica, altos valores de SAR y ESP, y coeficientes de hinchamiento que pueden llegar hasta el 12%. Mineralógicamente estos materiales presentan un alto contenido en arcillas (30%) y calcita (41%), y algo menos de cuarzo (24%). 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. Las arcillas y limos Holocenos tienen composiciones similares a los



Figura 11. En los taludes basales de arcillas de la Formación Tudela, la erosión normal excava un relieve entallado de aristas y surcos. Debido a la pendiente, predomina la escorrentía y se dificulta la infiltración.



Figura 12. Relieve entallado de aristas y surcos, con fragmentos colapsados de los estratos duros.



Figura 13. Al alcanzar las zonas planas, en las arcillas agrietadas se comienzan a labrar cauces temporales, donde se inicia la excavación de cañones y gargantas.

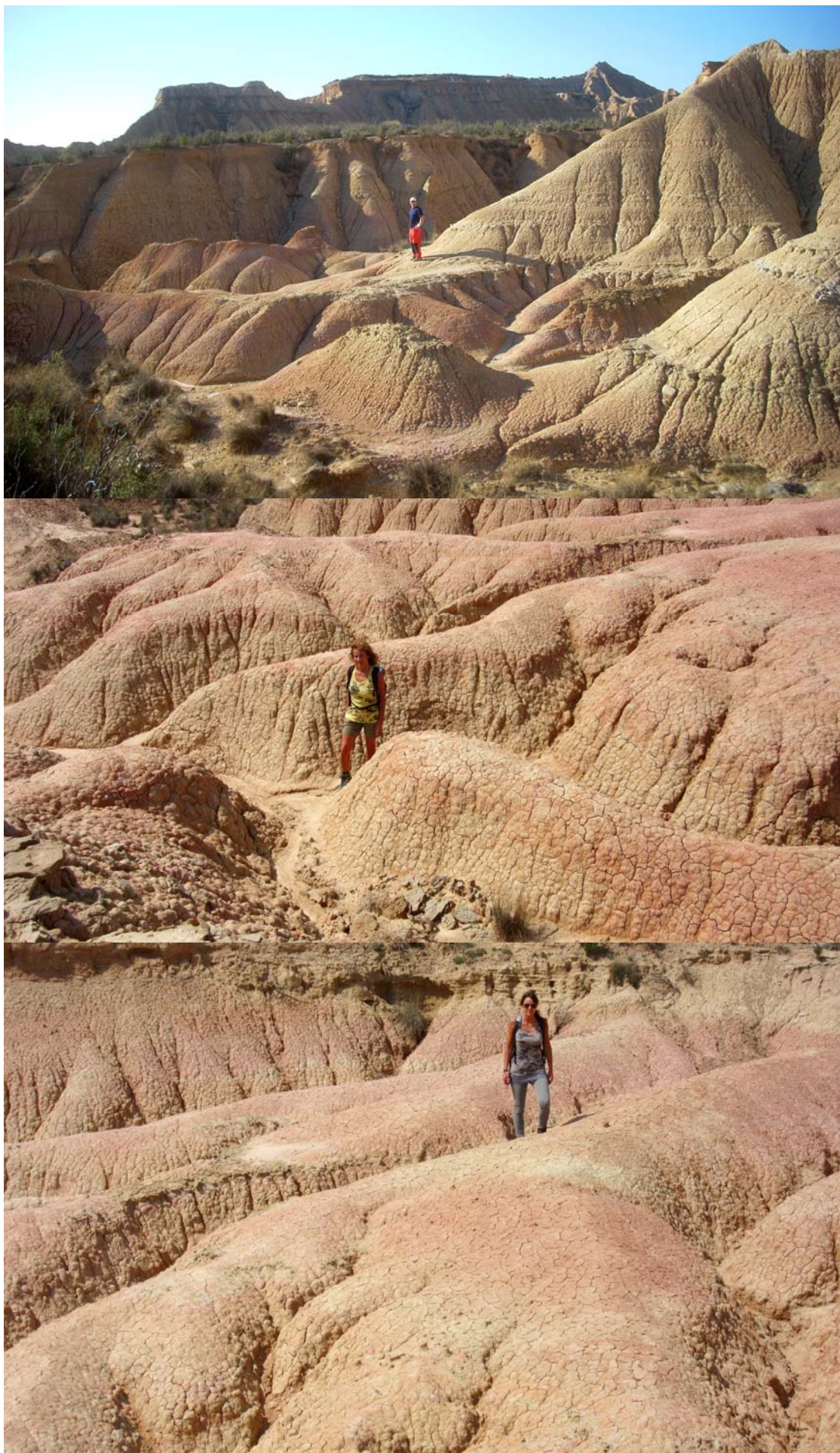


Figura 14. Arcillas entalladas con surcos y cárcavas. Nótese su reticulado con costras de eflorescencia de sales.



Figura 15. En las arcillas Holocenas de las planicies, por procesos de erosión y piping se van formando entalladuras, hundimientos, simas de colapso, profundas gargantas y gullies.



Figura 16. Los barrancos más grandes poseen numerosos arcos y puentes de roca, que perforan aristas residuales.



Figura 17. Láminas de yeso entre las arcillas Holocenas, en el interior de los barrancos y en superficie.

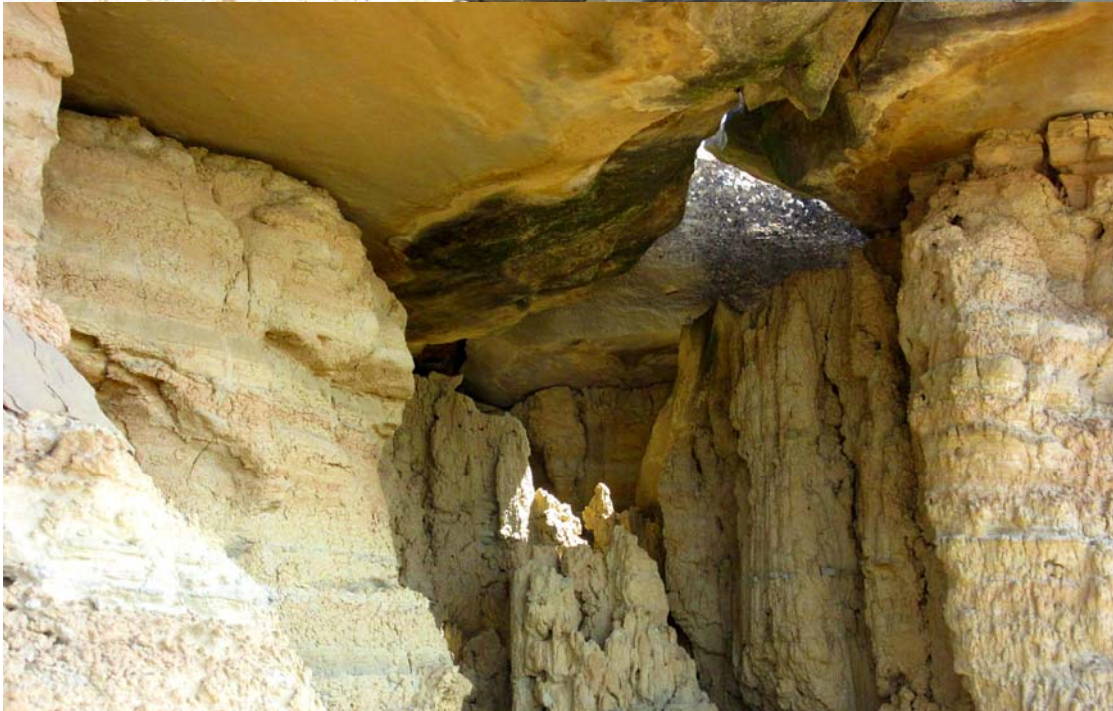


Figura 18. Bajo solapas de rocas duras, en las arcillas de la Formación Tudela se excavan por procesos de piping abrigos, pequeñas simas y cuevas, algunas de ellas con cortas galerías en oscuridad.



Figura 19. En las gargantas entalladas o gullies, el colapso de bloques de arcilla puede servir de techo a túneles, los cuales pueden seguir largos y tortuosos trayectos. Otras veces, el flujo temporal de agua sobre el fondo del barranco socava la base de los colapsos y rellenos y genera cortos túneles techados.



Figura 20. En cabecera de los gullies son frecuentes cortos túneles, a veces perforando aristas de sus meandros.

anteriores, un índice de dispersión medio y altos valores de SAR y ESP. El contenido en materia orgánica, el pH y la conductividad son similares en ambos casos. Se han reconocido ligeras diferencias entre distintos niveles, pero sin mayor significación. Los altos valores de SAR (Sodium Adsorption Ratio) y sodio intercambiable (ESP: Exchangeable Sodium Percentage) 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 subsuperficial (Gutiérrez et al, 1997).

Las arcillas con elevadas tasas de expansión y contracción, aumentan la susceptibilidad a la desecación, agrietamiento e infiltración. Sin embargo, no parecen ser estos solos los valores determinantes, ya que en las Bardenas, como han señalado Desir & Marín (2007) los procesos de piping no se desarrollan en laderas de fuertes pendientes donde la escorrentía tiende a fluir en superficie.

CUEVAS Y PSEUDOKARST EN LA BARDENA BLANCA

Básicamente, y para lo que a este trabajo sobre karstificación y formación de cuevas en arcilla concierne, puede distinguirse dos grandes tipos de relieves y cavidades. En las mesetas y sus flancos, los topes e intercalaciones de estratos de rocas duras, resultan más resistentes a la erosión sobresaliendo en forma de solapas y voladizos horizontales. Esto ocurre tanto a pequeña como a gran escala, y bajo estos salientes las arcillas Terciarias de la Fm. Tudela son erosionadas por la escorrentía, formando pendientes fuertes (incluso subverticales) con acanaladuras y surcos. Los salientes que extraploman a menudo colapsan por gravedad (al avanzar su descompresión mecánica), desprendiéndose en forma de lajas y bloques tabulares, que deslizan por las pendientes y pueden formar acumulaciones caóticas. Las laderas de las mesas y cerros (de distintas alturas), tienen pendientes fuertes en su parte superior y progresivamente más suaves hacia sus bases. Bajo las cornisas de rocas duras y teniendo a estas como techo se forman a menudo abrigos y pequeñas cuevas, muy someras. Algunos abrigos llegan a tener una gran amplitud, pero en general profundizan poco, constituyendo cavidades iluminadas o en penumbra, pero sin formar auténticas galerías.

En las arcillas Terciarias predomina la escorrentía, y las fuertes pendientes (superiores a 30° y llegando hasta la verticalidad), dificultan la infiltración. No obstante pueden producirse procesos de piping 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 de comportan de manera plástica y tienen carácter estacional, ocurriendo generalmente en invierno (cuando la evapotranspiración es mínima y el grado de humedad es alto por las frecuentes nieblas). 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.

En estos relieves hemos encontrado no obstante algunos ejemplos de formación de cuevas, bajo solapas de rocas duras. Los techos, agrietados, pueden dejar pasar el agua produciendo cárcavas y pequeñas simas en la arcilla infrayacente, con pequeñas galerías de tubificación en oscuridad, generalmente terminadas en colapsos caóticos. Pero en conjunto, se trata de fenómenos poco significativos, que más bien cabría atribuirlos a la categoría de abrigos con pequeñas prolongaciones de galerías en arcilla (Figura 18).

El segundo tipo de relieves y cavidades ocurre en las planicies (escalonadas a varios niveles) con materiales arcillosos Holocenos. Nuestra apreciación es que estos materiales, aunque son de similar litología que las arcillas Terciarias, son más porosos y algo menos coherentes. Su disposición horizontal, facilita que el drenaje se encaje formando una red de barrancos, gargantas y cañones menores, pero con paredes de gran verticalidad. Las gargantas entalladas o gullies, forman una red dendrítica que ocupa considerables extensiones y actúa como afluente de los barrancos más grandes. Ambos son de fondos planos o subhorizontales. Y en la vecindad de sus paredes los procesos de piping alcanzan gran profusión, con formación de gran número de cuevas penetrables y galerías menores (mesocavernas, de diámetros inferiores a 20 cm) (Figuras 19 á 40) . Todo ello prueba que existe infiltración vertical en estos materiales y flujos subterráneos subhorizontales que desaguan hacia los niveles de base locales constituidos por el fondo de los barrancos.

El proceso de piping en estas arcillas se inicia por la formación de agrietamientos en el suelo superior, asociados a la expansión y contracción de las arcillas bajo las condiciones meteorológicas alternas de humectación y desecamiento. El alto contenido en sodio intercambiable, yeso, micas y otros filosilicatos, o incluso los granos de cuarzo, pueden experimentar cierto grado de disolución, desagregando los materiales parentales y canalizando los flujos de infiltración hasta formar canalículos y conductos tubulares que facilitan la remoción intergranular. Ocurre entonces la canalización de las aguas subterráneas siguiendo unas líneas preferentes de flujo. La presencia de niveles menos permeables en profundidad favorece entonces la circulación horizontal y la evolución de los conductos. Puede comprenderse también que para que las aguas infiltradas circulen y desagüen es necesario que exista cierto gradiente hidráulico, como en el karst clásico, en este caso determinado por el salto topográfico existente entre la superficie de la planicie y el fondo entallado de cárcavas y barrancos, que llega a alcanzar desniveles de 5 á 20 m. La ampliación de los conductos prosigue por erosión del material particulado (por los fuertes contrastes pluviométricos), y por desprendimientos y colapsos de volúmenes mayores,



Figura 21. Gargantas entalladas con tramos que forman sistemas de cuevas-túneles sucesivos.



Figura 22. Sistemas de pequeñas cuevas y mesocavernas en gullies secundarios y zonas con colapsos.



Figura 23. Sistemas de pequeñas cuevas, túneles y puentes de arcilla en la red de pequeños cañones.



Figura 24. Simas del orden de -10 m con sus bases más amplias, con mesocavernas u obstruidas por colapso.



Figura 25. Sima de -20 m de desnivel, ampliada por colapso y continuada en galería hasta una boca inferior.



Figura 26. Simas recortadas por el retroceso de las paredes de los barrancos, formando surcos de hasta -20 m de desnivel en los barrancos más grandes, recorridos por circulaciones temporales de agua tras las lluvias..



Figura 27. Caverna oblicua ascendente, de 20 m de desarrollo. Su boca se abre en el fondo de un cañón y forma un túnel con salida a un plano superior.



Figura 28. Caverna horizontal que finaliza en una sala con una claraboya de +8 m de desnivel
La imagen inferior sin flash.



Figura 29. Cueva horizontal y luego ligeramente ascendente con una alta galería de 20 m de desarrollo.

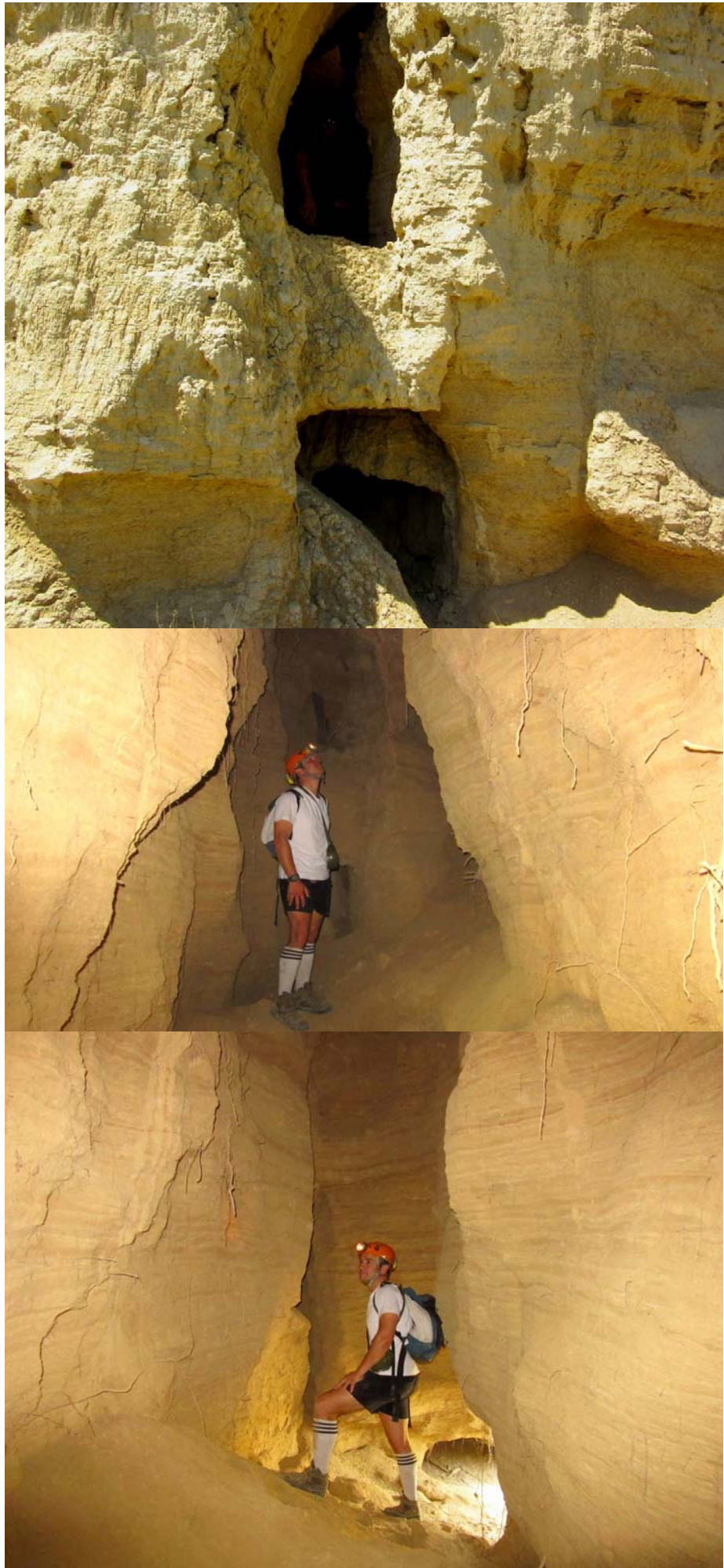


Figura 30. Cueva subhorizontal abierta en la base de otro cañón, de 20 m de desarrollo.

que son removidos en aguas altas. Nótese que los largos períodos sin lluvia y de fuerte insolación favorecen la desecación y el agrietamiento, que dirigen la infiltración vertical, la cual es seguida posteriormente por una fuerte erosión cuando las precipitaciones son intensas, tendiendo en la parte basal a organizar flujos subhorizontales hacia el fondo de los cañones. Si los procesos persisten llegan a formarse auténticas cuevas con galerías de varias decenas de metros de desarrollo. En la vecindad de estos gullies o gargantas entalladas es donde se da la mayor profusión de cavidades. En nuestras prospecciones hemos encontrado más de 50 cuevas de este tipo, las mayores de ellas de 60 m de desarrollo penetrable y simas de hasta -20 m de desnivel. Describiremos estas a continuación con más detalle, ya que existen diversos sub-tipos de cuevas:

(1) Cuevas con tramos techados por bloques de desprendimiento. El desmoronamiento de bloques de la parte superior de las paredes de las cárcavas puede techar la zona inferior del conducto, dejando un tramo de bloques acuñaos que forman el techo, o bien resultan perforados por la actividad hídrica basal, formando desde pequeños túneles hasta galerías sinuosas de varias decenas de metros de largo (Figura 19).

(2) Son frecuentes también perforaciones entre los meandros de los gullies o en aristas residuales de cañones más amplios, los cuales dejan cavidades en forma de arcos y puentes de roca (de arcilla), generalmente muy cortos en longitud, pero que pueden alcanzar amplios diámetros (figuras 16 y 20 a 23).

(3) Simas cercanas al borde de cañones y barrancos. De trazado vertical, pueden contener un fondo de bloques arcillosos colapsados, que obstruyen la continuación, pero también pueden proseguir en rampa en galerías tubulares que terminan conectando con cuevas horizontales inferiores, en la base de los barrancos hacia los cuales se dirige su drenaje temporal. Pueden alcanzar más de 20 m de desarrollo. En las paredes de algunos barrancos se encuentran fragmentos de tubos verticales residuales, que al progresar el retroceso de la pared por erosión remontante, resultan perforados y parcial o totalmente colapsados (Figuras 24 a 26).

(4) Cuevas similares a las anteriores, que se extienden desde la base del cañón, con chimeneas o claraboyas abiertas a la superficie. Las hay de trazado en L (con la rama de acceso horizontal) y otras con galerías oblicuas, con pendiente ascendente. Pueden formar túneles, abiertos en sus extremos, de dos decenas de metros de longitud (Figuras 27 y 28).

(5) Las cuevas más grandes que hemos encontrado se desarrollan en horizontal, con galerías en general más altas que anchas, de varios metros de diámetro. Suelen poseer un cauce entallado inferior con claras muestras del flujo temporal de agua. Se ramifican en conductos tubulares menores, tanto horizontales como ascendentes. Es frecuente observar en sus paredes el afloramiento de raíces del suelo superior (Figuras 29 a 35). Generalmente sus diámetros se van reduciendo hasta constituir gateras y laminadores, impracticables tanto por su estrechez (mesocavernas) como porque pueden tender a desmoronarse. Las mayores cuevas que hemos visitado alcanzan 60 m de desarrollo penetrable (en terreno estable), con algunas continuaciones estrechas en las que no hemos intentado proseguir por temor a su derrumbe, pero que sin duda tienen desarrollos mayores como mesocavernas.

(6) Simas que forman ranuras alargadas, con bocas de 1 m de ancho por varios metros de largo, de hasta -10 m de desnivel. Su base es ligeramente más amplia y suele prolongarse en laminadores estrechos y mesocavernas, generalmente más anchas que altas, con huellas evidentes de circulación temporal de agua (Figuras 24 y 40). Como en el caso anterior, parece poco prudente intentar proseguir por estos conductos de débil diámetro, en un terreno arcilloso que parece poco estable (aunque pudiera no serlo). La morfología de este tipo de cavidades sugiere que existe un flujo subterráneo subhorizontal que forma cuevas primero y evoluciona después ampliándose en sentido vertical hasta formar gullies. En forma inversa hemos encontrado pequeñas cuevas surgentes que a los pocos metros prosiguen como laminadores de morfología similar a la hallada en la base de las simas en ranura.

(7) Existen por último tramos en el cauce de los cañones, que se interrumpen en sumideros y reaparecen a varias decenas de metros de distancia como resurgencias, constituyendo mesocavernas que, por su débil dimensión, no resultan practicables (Figura 36).

(8) También es de señalar la existencia en cañones con colapsos y zonas laterales acarcavadas, de cuevas multinivel, generalmente con galerías de escaso diámetro, ventanas y mesocavernas, en las que sólo es factible recorrer algunos metros en los tramos de galerías más amplios (de tamaño métrico) (Figura 39). Resulta evidente que han sido formadas por procesos de piping.

En condiciones atmosféricas normales, las galerías de las cuevas constituyen ambientes secos y polvorientos, pudiendo presentar afloramiento de raíces en sus paredes y techos. Ello sugiere por ejemplo que la presencia de raíces, así como de galerías excavadas por pequeños mamíferos, puede guiar y facilitar también la infiltración.

El desarrollo acumulado de galerías en las cuevas exploradas suma algo más de 400 m de conductos subterráneos. A lo que se suma una red aún mayor de mesocavernas. Por lo que se trata de una red de drenaje subterráneo subsuperficial, asociada a una red dendrítica de barrancos y cañones de decenas de kilómetros de desarrollo. Por ello nos parece adecuada la denominación de Pseudokarst en arcilla, generado por procesos de piping y entallamiento de la red de drenaje. Este peculiar pseudokarst posee también todo un conjunto de geoformas de superficie (Figuras 41 y 42). Destaca la diversidad de Chimeneas de las Hadas, arcos y puentes de roca, zonas de cárcavas con profusión de surcos y entalladuras, y zonas con elevaciones y lomas con superficies endurecidas por la eflorescencia de sales y agrietadas por desecación en retículos de tipo popcorn y formas botroidales.

La fauna encontrada en las cuevas incluye pequeños mamíferos (topillos y roedores), algunos carnívoros (como zorros y comadrejas), diversos lagartos en las zonas de entrada, e incluso encontramos que pueden servir de refugio a aves como la lechuza blanca (*Tyto alba*). Entre los invertebrados son frecuentes isópodos terrestres, ortópteros, pequeños coleópteros, dípteros, y conchas de caracoles terrestres (aunque estos últimos pueden constituir material arrastrado). Estas arcillas tienen un bajo a nulo contenido en materia orgánica, pero la presencia de raíces y restos vegetales (madera muerta, semillas, arrastradas o aportadas por los vertebrados) pueden servir de alimento a invertebrados detritívoros y fitófagos. Cabe decir que hasta el momento sólo hemos hallado formas troglóxenas (sin adaptaciones especiales para la vida hipógea), pero no es de descartar que algunos isópodos y coleópteros puedan

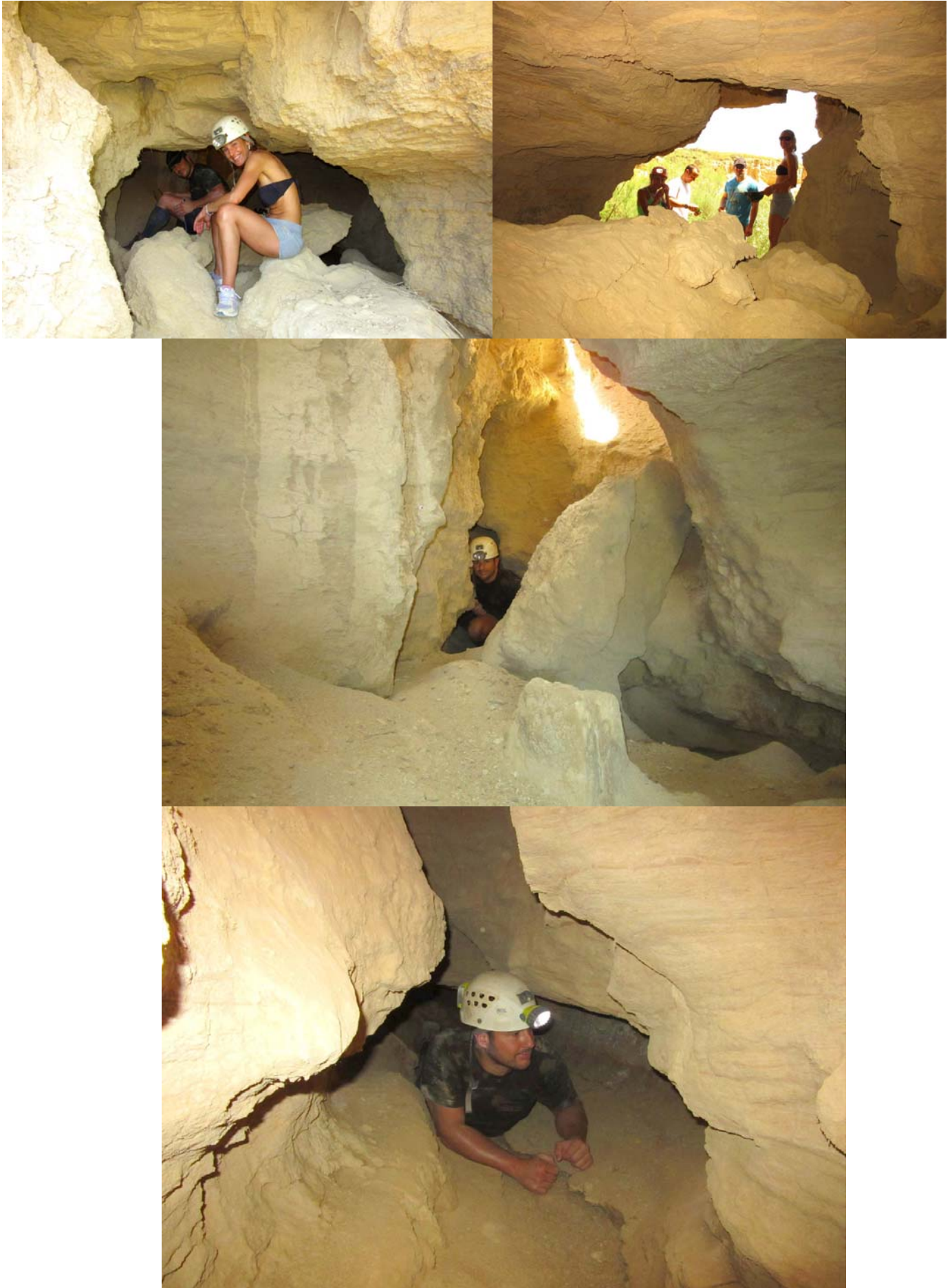


Figura 31. Caverna de 40 m, con entrada de techo bajo, que luego se ramifica en varias galerías.



Figura 32. En una zona caótica con bloques de colapso, en el fondo de un pequeño cañón, se abre una cavidad ramificada de 30 m, con una red de galerías de pequeño diámetro.

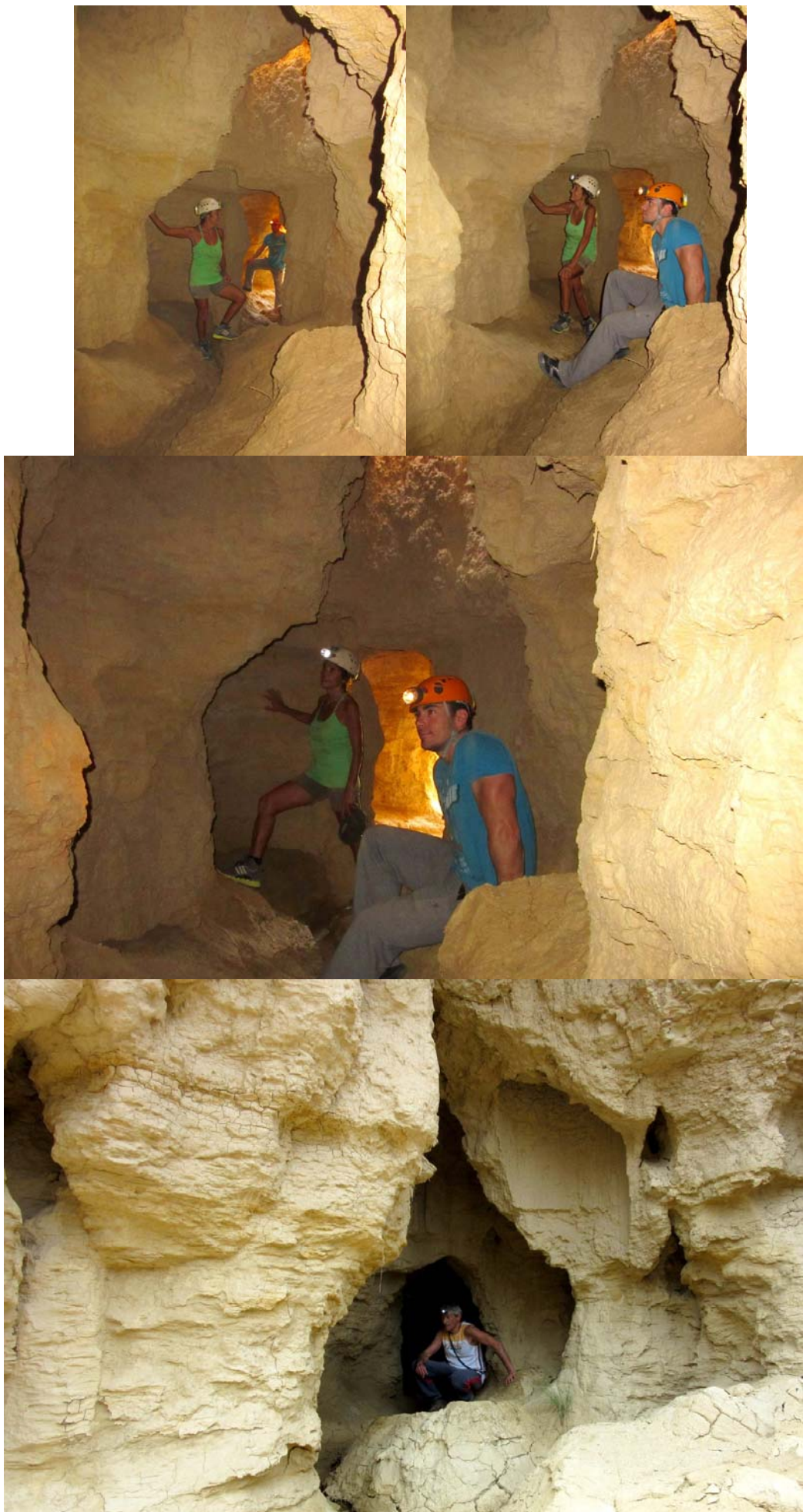


Figura 33. Una de las mayores cavidades exploradas. Alcanza 50 m de desarrollo practicable.

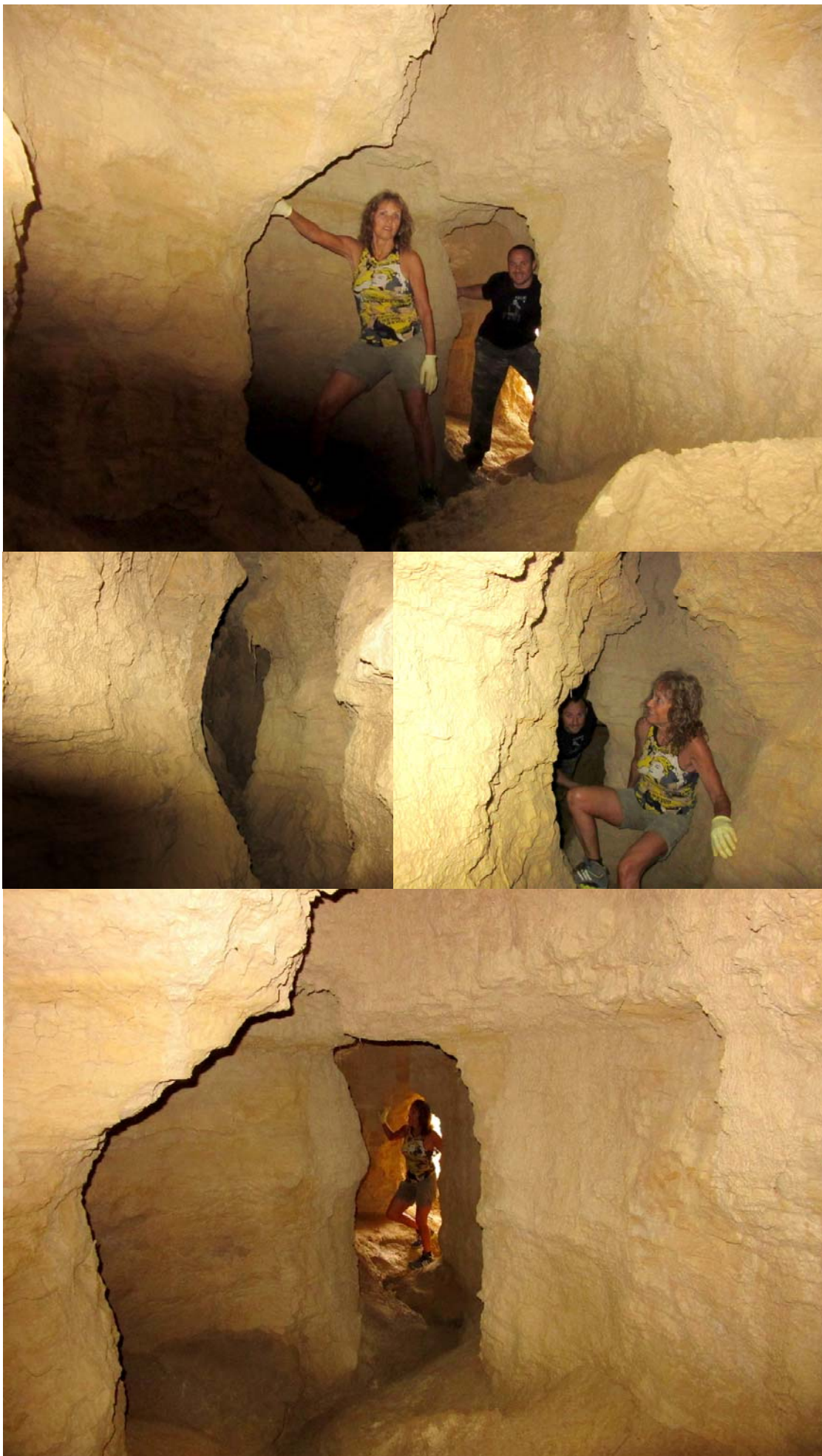


Figura 34. Otras imágenes de la cavidad anterior (Figura 33). Las galerías profundas se ramifican en conductos de diámetros progresivamente menores.

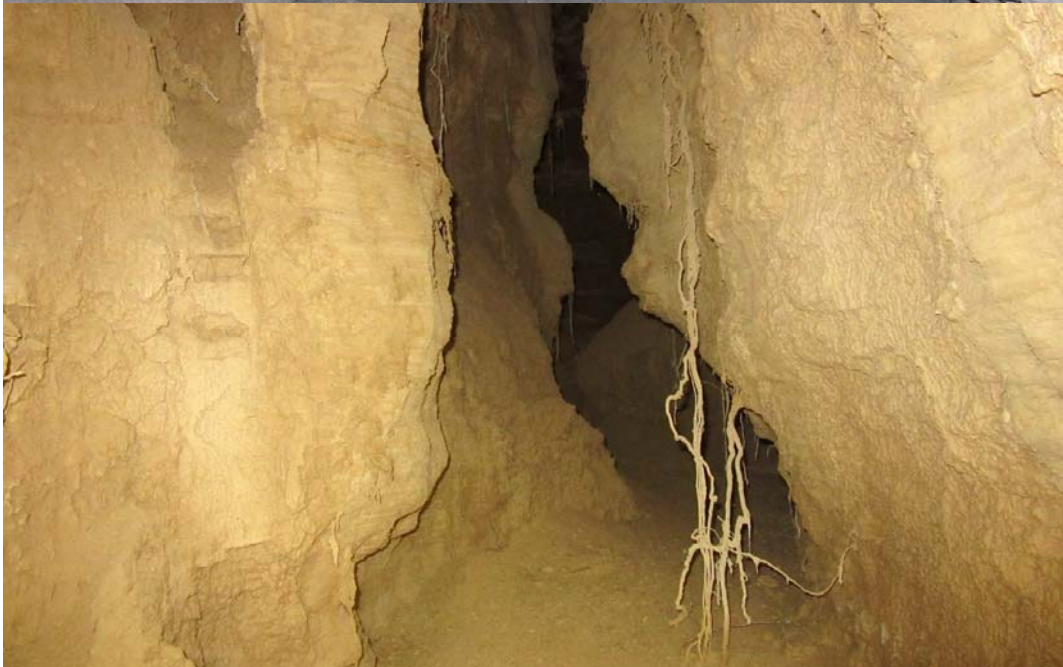


Figura 35. Caverna surgente que finaliza en estrechos laminadores. Se puede apreciar la presencia de raíces.

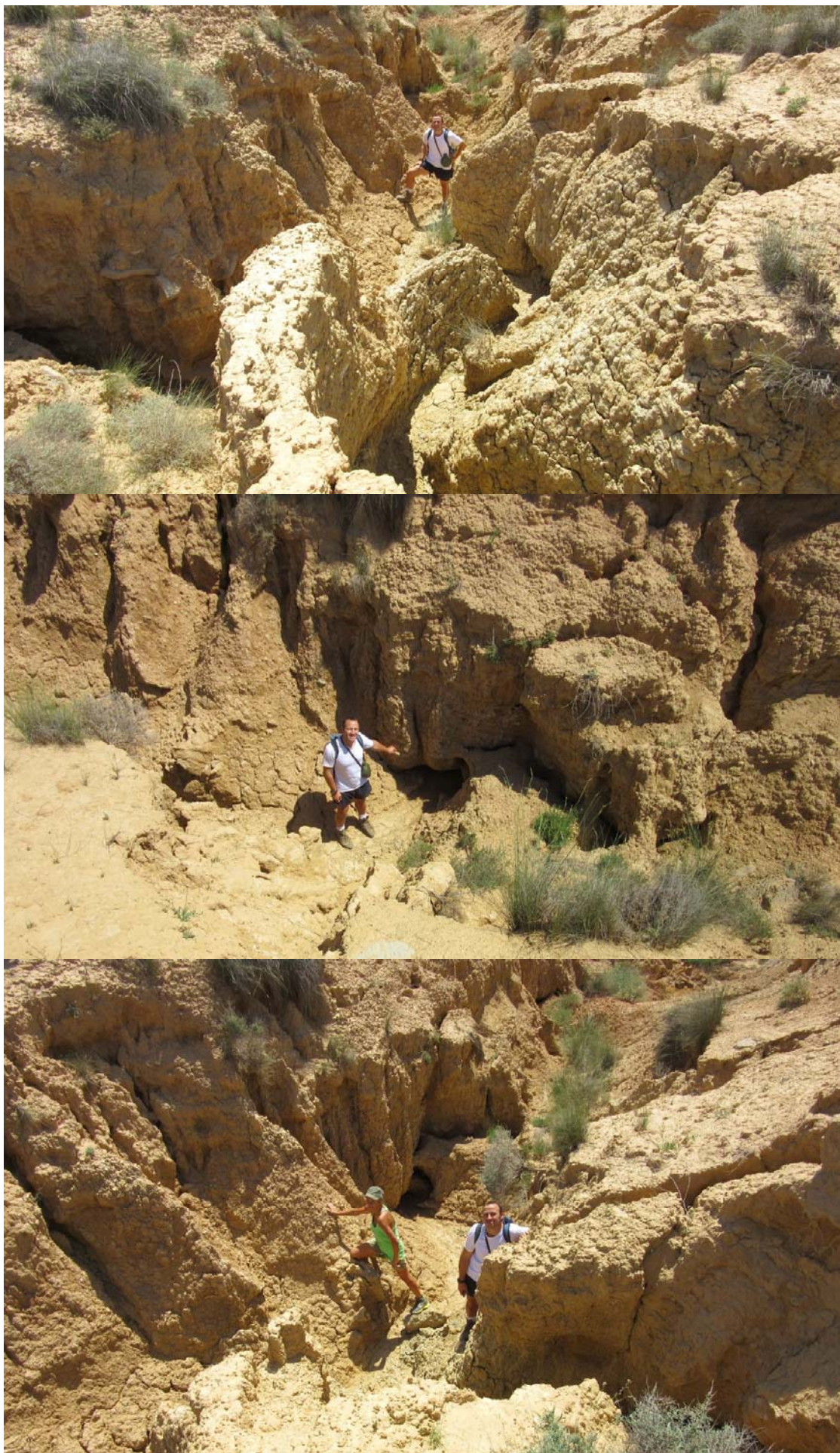


Figura 36. Algunos gullies presentan ramificaciones dendríticas, con sumideros y surgencias en tramos de sus cauces. El flujo subterráneo discurre a través de mesocavernas y conductos menores, impracticables.



Figura 37. Los gullies entallados pueden presentar diversidad de litologías, con horizontes laminados, clastos y arcillas más o menos propicias para el desarrollo de los procesos de piping y formación de abrigos basales.



Figura 39. La erosión en la base de los barrancos entalla los cauces y produce el retroceso de sus paredes, deslizamientos y colapsos. Las diferencias de litología (observables en las paredes) pueden ser más o menos favorables para el desarrollo de procesos de piping, erosión y colapso. Los materiales desprendidos son removidos por las crecidas.



Figura 39. En las paredes de algunos barrancos existen zonas con cárcavas y cavidades a varios niveles, con bocas entrelazadas por conductos menores y redes de mesocavernas formadas por piping.



Figura 40. Erosión remontante de la cabecera de la red de gullies a través de la captura de cuevas y tubos de piping.



Figura 41. Chimeneas de las Hadas a distintas escalas (las más pequeñas corresponden a columnas de arcilla formadas por la lluvia bajo un tope de guijarros. Abajo: formas residuales en arcilla con morfología de popcorn.



Figura 42. Otros ejemplos de morfologías residuales: montículos con eflorescencia de sales, agrietamiento de las arcillas por desecación, ventanas perforadas en crestas residuales bajo el tope de rocas duras y ejemplos de formas de disolución.

completar su ciclo vital en estos ambientes (por lo que cabría considerarlos formas troglófilas). Un muestreo sistemático, con el empleo de cebos atrayentes en zonas profundas en oscuridad, podría aportar nuevos datos. No obstante, el lavado de las galerías por las crecidas durante eventos de tormenta hace poco probable la existencia de biotopos con condiciones adecuadas para la vida de cavernícolas especializados. Nuestro conocimiento al respecto es sólo de naturaleza preliminar.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este peculiar pseudokarst de la Bardena Blanca existe un considerable número de cuevas en arcilla, formadas esencialmente por procesos de disolución intergranular, piping y erosión. Aunque han sido exploradas más de 50 cavidades, lo conocido es sólo una fracción de la extensa red kilométrica de cañones y cárcavas, por lo que pueden existir muchas otras cavidades, incluso con mayores desarrollos. No obstante, estas cavidades y relieves, tienen una duración efímera en el tiempo a escala geológica: en sólo unas pocas décadas pueden formarse nuevas cavidades y destruirse o colapsar otras anteriores, ya que la erosión normal en estos terrenos arcillosos poco litificados y ricos en sales es muy rápida.

Cabe destacar que en las cavidades de mayor desarrollo de galerías de amplio diámetro, no obstante, las paredes resultan bastante compactas, como si la ventilación de su atmósfera hubiera propiciado el hinchamiento y/o adhesión de los componentes arcillosos, otorgándoles mayor estabilidad que la que se observa en mesocavernas y conductos menores. Muestras de las arcillas de estas paredes, observadas al microscopio binocular, no muestran concrecionamiento o presencia de minerales secundarios cementantes, pero si una estrecha imbricación de las partículas arcillosas, con menor porosidad aparente que las arcillas Holocenas de superficie. Ello sugiere que cuando los pipes o conductos de tubificación evolucionan hasta generar macrocavernas (a escala métrica) pueden modificar levemente sus propiedades físicas (su plasticidad, grado de coherencia y resistencia mecánica), confiriendo a las galerías mayor estabilidad y persistencia en el tiempo.

Probablemente el aspecto más controversial reside en la asociación y co-evolución de conductos (pipes) y cárcavas (gullies). Se ha dicho que los gullies propician la formación de cuevas, pero de modo inverso es también apreciable que son los procesos de piping y la presencia de cuevas las que generan los gullies.

La formación y evolución de las cárcavas parece responder a varios procesos: retroceso de la cabecera, arroyada, socavamiento basal, profundización, desplome, lavado de las paredes y, sobre todo, piping (Desir y Marín, 2007; Desir et al, 2009). A la vez los gullies constituyen la principal vía de remoción y exportación de materiales fuera de la cuenca. La evolución del relieve está controlada básicamente por la litología y la climatología y, como consecuencia, se trata de un modelado muy dinámico y cambiante debido a los procesos de erosión hídrica y piping (Desir et al, 2009). Estos autores señalan que, dentro de esta dinámica erosiva, el retroceso de las cabeceras se produce principalmente por procesos de piping. La magnitud y la intensidad de estos procesos serían función del orden del gully. Así, en los tributarios de menor orden la dinámica de retroceso de las cabeceras y la ampliación del cauce por colapsos, piping y socavación basal es mucho más activa que en los tributarios de mayor orden donde domina la profundización del canal. Los distintos mecanismos pueden actuar al mismo tiempo o por separado. La secuencia evolutiva normal pasa por un primer estadio erosivo, con predominio de la incisión del fondo y las paredes, continua con la expansión lateral por el colapso de los conductos de piping, y prosigue con otra fase en la cual el retroceso de la cabecera es el proceso dominante (propiciado por el colapso de bloques y vuelcos), que en su fase final serán lavados y exportados. Así, el piping es el mecanismo precursor para el avance del retroceso de las cabeceras y de la ampliación del canal, siendo la densidad y magnitud de los pipes función de las dimensiones y de la distancia al margen del gully.

Nosotros observamos que los conductos de piping tienden a desarrollarse cerca de las cárcavas y barrancos, formando simas o evolucionando por colapso hacia hundimientos con conductos de distintos diámetros (Figura 40). Ocasionalmente, si se generalizan los colapsos, se constituye un relieve caótico que pasa a formar parte de formaciones más extensas de badlands. Para García-Ruíz (2011) los conductos de piping pueden ser tanto una causa como una consecuencia de la evolución de las cárcavas.

En las zonas estudiadas, la densidad de piping aumenta cerca de las cárcavas y el piping parece ser el factor controlante de la orientación de las mismas, hasta el punto de que la forma sinuosa o meandriforme de muchas cárcavas no parece ser resultado de evolución subaérea, sino del colapso de la red de drenaje subsuperficial. Muchas cárcavas muestran festones correspondientes a hundimientos relativamente recientes, de forma que gran parte del retroceso de la cabecera se debe a la erosión remontante, la cual captura colapsos y hace más rápido ese retroceso. A su vez, los procesos de piping remontan aguas arriba a medida que progresa el retroceso de las cabeceras.

En algunos casos se forman simas alargadas y gullies ciegos, de manera que se produce una cárcava por hundimiento de una red subsuperficial, pero aguas abajo interrumpe su recorrido para continuar fluyendo por vía subsuperficial o a través de mesocavernas. García-Ruíz (2011) se refiere por ejemplo a "cañones de piping" para aludir a galerías que se desploman en gran parte de su trazado, con un canal localmente incidido que aguas arriba termina bruscamente en una pared vertical, sin área de cabecera que lo alimente.

Puede concluirse que los procesos de piping en arcilla ocurren en ambientes áridos, asociados a una rápida evolución de cárcavas. En tales ambientes el piping sólo es posible si coinciden varios factores: (1) Materiales poco consolidados sobre rocas blandas (lutitas y margas). (2) Presencia de arcillas expansivas, con tendencia al agrietamiento. (3) Alto contenido en sodio, que favorece la dispersión de las arcillas. (4) Fuerte gradiente hidráulico en cortas distancias. El proceso de piping genera así redes de drenaje subterráneo, incentiva la formación de cuevas y cárcavas, que a su vez favorecen la aparición de nuevos conductos. El presente trabajo describe por primera vez para las Bardenas la presencia de cuevas en arcilla y de un peculiar pseudokarst, con rasgos notables a nivel mundial.

AGRADECIMIENTOS

A todos los compañeros y colaboradores del Laboratorio de Bioespeleología de la S.C. Aranzadi que nos acompañaron en distintas épocas en las exploraciones y los trabajos de campo: Patxi Iriarte, Garikoitz Estornés, David Arrieta, Daniel Arrieta, Anabella Besance, Ainhoa Miner, Piero Di Bartolomeo, Rubén Conde, Raket Ares, José M. Rivas, y Carolina Vera Martín.

BIBLIOGRAFÍA

- Bremner, L. 2009. The Carrizo Badlands Mud Caves in Arroyo Tapiado. Anza-Borrego Desert State Park. California. Desert USA.
- Castiella, J.; Solé, J. & Del Valle, J. 1978. Mapa y Memoria Geológica de Navarra a escala 1:200.000. Servicio Geológico, Diputación Foral de Navarra.
- Desir, G. & Marín, C. 2007. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). *Catena*, 71: 31-40.
- Desir, G.; C. Marín & M. Gutiérrez. 2009. Influencia de los procesos de sofusión (Piping) en la evolución del modelado. Bardenas Reales (Navarra). Congr. Cientif. Univ. Murcia, Cong. Internac. sobre Desertificación. Topic 2: Soil erosion and desertification: 223-226.
- 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.
- Eberhard, R. & Sharples, C. 2013. Appropriate terminology for karst-like phenomena: the problem with 'pseudokarst'. *International Journal of Speleology*, 42 (2): 109-113.
- 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. & 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., F. F. Herrera & J. Astort. 2004. Génesis del Sistema Roraima Sur, Venezuela, con notas sobre el desarrollo del karst en cuarcitas. *Bol. Soc. Venezolana Espeleol.* 38: 17-27.
- 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.
- Higgins, C.G. & Coates, D.R. Eds. 1990. *Groundwater Geomorphology: The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms*, Boulder, Colorado: Geological Society of America. Special Publ. 252.
- Lindsay, L. & D. Lindsay. 1985. *The Anza-Borrego Desert Region*. Wilderness Press, 170 pp.
- 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.
- Mears, B. 1968. Piping. In: R.W. Fairbridge (Ed). *Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold, New York.
- Parker, G. et al. 1990. Piping and pseudokarst in drylands. 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 Publ. 252.
- Parker, G. 1964. Officers Cave, a pseudokarstic feature in altered tuff and volcanic ash in the John Day formation in eastern Oregon: *Geological Society of America Bulletin*, 75: 393-401.
- Parker, G. & Higgins, C. 1990. Piping and pseudokarst in drylands. In: Higgins, C.G. & Coates, D.R. eds. *Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms*. Geological Society of America. Special Publ. 252.
- Riba, O. 1964. Estructura sedimentaria del Terciario Continental de la Depresión del Ebro en su parte riojana y Navarra. Aportación española al XX Congr. Geogr. Int. Reino Unido. Zaragoza.
- Salvany, J.M. 1989. Los sistemas lacustres evaporíticos del sector navarro-riojano de la Cuenca del Ebro durante el Oligoceno y Mioceno inferior. *Acta Geol. Hisp.*, 24, 3-4.
- Striebel, T. & Schäferjohann, V. 1997. Karstification of sandstone in central Europe: Attempts to validate chemical solution by analysis of water and precipitates. In: *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology*, vol. 1, Basel, Switzerland.
- Urbani F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. *Interciencia*, 11 (6): 298-300.