

CUEVAS, CONDUCTOS Y FORMAS FRACTALES EN EL FLANCO SUR DE LA ÉSTROZA (BARDENAS).

Caves, pipes and fractal forms on the Southern flank of the Estroza (Bardenas).



Carlos GALÁN, Marian NIETO & Iñigo HERRAIZ.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Enero 2019.

CUEVAS, CONDUCTOS Y FORMAS FRACTALES EN EL FLANCO SUR DE LA ESTROZA (BARDENAS).

Caves, pipes and fractal forms on the Southern flank of the Estroza (Bardenas).

Carlos GALÁN, Marian NIETO & Iñigo HERRAIZ.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Enero 2019.

RESUMEN

El trabajo describe la exploración y estudio de un conjunto de simas, pequeñas cavidades y conductos de tubificación o piping, desarrollados en el flanco Sur de la Punta de la Estroza, en lutitas de edad Mioceno (Formación Tudela, Terciario). Las cavidades presentan numerosos conductos de régimen hídrico temporal, que ilustran la extensa difusión que poseen los procesos de piping en los interfluvios entre barrancos paralelos, a lo largo de los flancos de los relieves tabulares de las Bardenas. Las cavidades poseen espeleotemas de yeso y se desarrollan a distintas escalas, con rasgos fractales. Muchas cavidades se obstruyen por colapso o prosiguen a través de pipes cuyas reducidas dimensiones no permiten el paso del ser humano. No obstante transfieren las aguas subterráneas entre depresiones y cavidades mayores, formando una extensa red de drenaje subterráneo. El trabajo discute los rasgos, propios de sistemas complejos, que posee el karst en arcilla en la región de las Bardenas.

Palabras clave: Karst y cuevas en arcilla, Espeleología, Tubificación, Hidrogeología, Geomorfología, Sistemas complejos.

ABSTRACT

The work describes the exploration and study of a set of chasms, small cavities and tubing or piping conduits, developed on the southern flank of Punta de la Estroza, in shales of Miocene age (Tudela Formation, Tertiary). The cavities have numerous conduits of temporary water regime, which illustrate the widespread diffusion of the piping processes in the interfluves between parallel ravines, along the flanks of the tabular reliefs of the Bardenas. The cavities have gypsum speleothems and develop at different scales, with fractal features. Many cavities are blocked by collapse or continue through pipes whose small dimensions do not allow the passage of the human being. However, they transfer groundwater between depressions and larger cavities, forming an extensive underground drainage network. The work discusses the features, typical of complex systems, which own the karst in clay in the Bardenas region.

Keywords: Karst and caves in clay, Speleology, Piping, Hydrogeology, Geomorphology, Complex Systems.

INTRODUCCION

La región semidesértica de las Bardenas cubre una superficie de 600 km² y presenta una extensa red de cañones y mesetas. A raíz de las exploraciones efectuadas en años recientes, la región está mostrando que en ella se encuentran miles de cavidades en arcillas y lutitas, una litología inusual para el desarrollo del karst.

Aunque la mayoría de estas cavidades son de moderadas o pequeñas dimensiones (de sólo decenas de metros), cada tanto encontramos sistemas mayores de cuevas o simas, cuyas características sólo pueden develarse mediante la prospección directa del terreno y la exploración de cavidades individuales. Las Bardenas contienen hoy los ejemplos más diversos de karstificación y espeleogénesis en arcilla y los mayores sistemas de simas y cuevas hasta ahora conocidos para esta litología a nivel global (Galán, 2015, 2017; Galán et al, 2017, 2018 a, 2018 b).

Adicionalmente estamos constatando que en muchas zonas de relieve aparentemente normal (generado por la erosión hídrica de superficie), pueden coexistir sistemas de macrocavernas bien delimitados, rodeados por extensas áreas con mesocavernas, vacíos y pipes menores, que forman sistemas hidrogeológicos donde el drenaje es esencialmente subterráneo.

En la presente nota describimos cinco nuevas cavidades, localizadas en el flanco de una meseta, que a la vez presenta áreas extensas acribilladas de conductos menores, donde el drenaje es fundamentalmente subterráneo y a la vez coexiste con una red de barrancos y geoformas erosivas normales, en una trama de carácter complejo.

Aparte de describir las cavidades halladas, el objeto central de esta nota es analizar y discutir esta trama de complejidad añadida, propia de sistemas inhomogéneos, que difiere de los rasgos habituales observados en el karst clásico en caliza.

MATERIAL Y METODOS

En la prospección y exploración de simas se utilizaron frontales con iluminación de Leds y técnica de cuerda estática y jumars para verticales. Se efectuaron levantamientos topográficos con instrumental de precisión Suunto (brújula y clinómetro). Los planos fueron dibujados en formato digital con programa Freehand. Se tomaron fotos a color para ilustrar los principales rasgos de las simas exploradas y la geomorfología de su entorno.

RESULTADOS

Las cavidades y geoformas descubiertas se localizan sobre el flanco Sur de la meseta de la Estroza (462 m snm) (Bardena Blanca, Navarra). Si bien toda la región de las Bardenas posee climas continentales áridos, la Bardena Blanca es la que recibe menos precipitaciones (170 á 350 mm/a) y presenta un aspecto más desolado y desértico.

La cuenca endorreica de las Bardenas se rellenó de sedimentos fluvio-lacustres (fundamentalmente arcillosos) durante el Eoceno-Mioceno. Al labrar el Ebro su paso y conectar con el Mediterráneo, pasó a ser exorreica en el Mioceno final o en el tránsito Mioceno-Plioceno (Riba, 1964; Salvany, 1989). Durante este lapso se rellenó de sedimentos fluvio-lacustres procedentes de la elevación de la cadena Pirenaica, al Norte, pero también recibió aportes de la cadena Ibérica, situada al Sur. A partir del Plioceno la cuenca comienza a erosionarse, vaciando gran parte de la misma y originando los relieves tabulares, escarpes y cerros cónicos de formas caprichosas característicos de la región. Durante el Cuaternario, la dinámica erosiva fluvial ha seguido profundizando el modelado, tanto por la acción llevada a cabo en los fondos de valle, como por la ejercida en las laderas y escarpes de mesetas, a lo que se suma la incisión Holocena de la red de drenaje en las planicies. A ello contribuyen los procesos subterráneos de tubificación o piping, con la consiguiente formación de cavidades.

Geológicamente, la parte basal de la cuenca, que aflora al W, está constituida por una espesa secuencia de margas grises con yesos (Formación Lerín, de edad Ageniense, Mioceno basal), a la que suprayace una secuencia arcillosa sensiblemente horizontal (Formación Tudela, de edad Orleaniense, Mioceno temprano). En la zona de estudio los materiales aflorantes corresponden a lutitas ocre y rojas. Se trata de potentes conjuntos de sedimentos arcillosos, térreos, de potencia decamétrica, entre los cuales se intercalan delgados nivelitos de margas, limolitas, y en sus zonas más altas, de calizas, pero separados unos de otros. Su potencia de conjunto alcanza 180 m y constituye la unidad litoestratigráfica 369, la cual ha sido previamente descrita por Faci Aparicio et al (2002) y SITNA Navarra. 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 los fondos de valle y zonas planas inferiores.

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-columial). Predominan en ellos los términos lutíticos con delgadas hiladas de cantos de caliza, así como niveles arenosos. Su potencia es poco discernible, pero se estima que localmente puede alcanzar los 15 m.

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).

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. 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 la excavación remontante hacia sus cabeceras.

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. La mayor parte de la erosión y remoción de materiales en las planicies actúa a través de la formación de barrancos y cañones entallados o gullies, generados precisamente por procesos de tubificación o piping.



Figura 01. Punta SE de la Estroza y su flanco Sur, con paredes verticales coronadas por estratos de rocas más duras y resistentes (calizas y margas). Sobre el talud, geofomas cónicas y pequeñas chimeneas de las hadas bajo fragmentos desprendidos de los estratos superiores.



Figura 02. Boca de la Sima La Estroza Sur 01, abierta en lutitas ocre y rojas, e inicio del descenso a la misma. Se aprecia un bloque en el borde. Muy cerca hay otras depresiones, pipes y dolinas menores.



Figura 03. Vertical de acceso de la Sima La Estroza Sur 01, abierta en lutitas ocre y rojas, y galería inferior, con un gran arbusto-bola (quenopodiácea del género *Salsola*), planta rodadora propia de áreas esteparias salinas.



Figura 04. Galería inferior de la Sima La Estroza Sur 01, terminada en obstrucción por bloques en la cota -10 m.

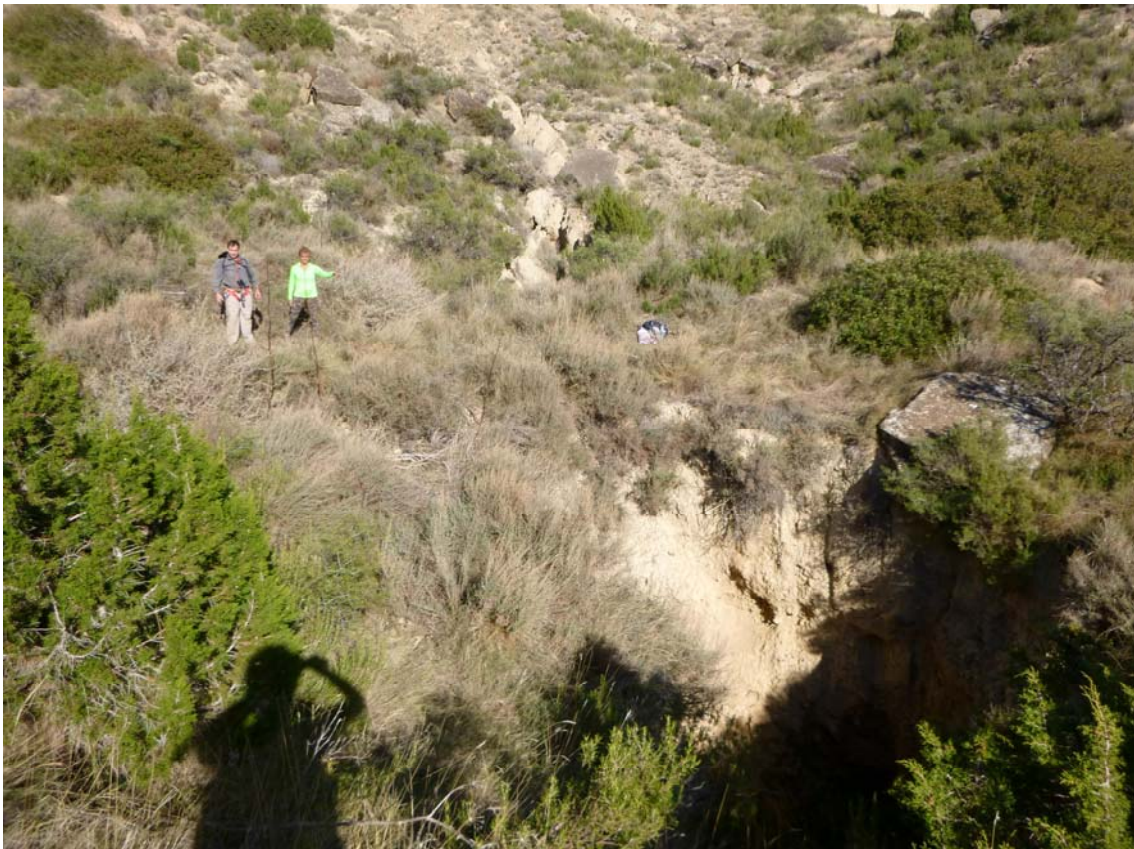


Figura 05. Ascenso en jumars de la Sima La Estroza Sur 01 y detalles de su entorno, con otras pequeñas depresiones ocultas por la vegetación. El área constituye una zona de infiltración y cabecera de un sistema subterráneo.



Figura 06. A poca distancia de la sima 01 hay otra depresión, cegada por colapso de bloques (arriba), y un poco más abajo se abre la boca de la Sima La Estroza Sur 02, que forma parte del mismo sistema (debajo).



Figura 07. Sima La Estroza Sur 02. Vistas del pozo de acceso y fondo obstruido de la cavidad.



Figura 08. Interfluvio bajo el cual se desarrolla el sistema de simas 01-02 (arriba) y vista de conjunto del flanco Sur, desde la parte media, con surcos y barrancos desigualmente entallados (debajo).



Figura 09. La Formación Tudela, aunque es fundamentalmente arcillosa, contiene intercalados algunos estratos de calizas, margas o areniscas, de débil espesor. La erosión forma abrigo bajo solapas rocosas y chimeneas de las hadas bajo bloques fragmentados de rocas duras. Zona próxima al collado del Sierrón.



Figura 10. Incipientes chimeneas de las hadas bajo bloques de rocas duras. Puede apreciarse que el relieve de materiales arcillosos ha sido rebajado por la erosión normal después del emplazamiento de los bloques. Ello denota la coexistencia de la erosión de superficie junto a procesos de karstificación.



Figura 11. El flanco Sur de La Estroza visto desde la zona del collado del Sierrón. El flanco posee barrancos en paralelo y extensas áreas con cavidades y drenajes subterráneos, a distintas escalas.



Figura 12. Geoformas y cavidades en miniatura, en el collado del Sierrón. Arriba: formas cónicas y depresión drenada por una cavidad (flecha roja). Debajo: Detalle de la misma (diámetro del conducto = 30 cm).



Figura 13. Boca inferior de la cavidad de la Figura 12 (arriba) y nueva cavidad-túnel en miniatura, con bocas de colapso que forman claraboyas o simas sucesivas (debajo). Ambas poseen rasgos de naturaleza fractal. Se trata de ejemplos que están muy extendidos, a distintas escalas, en muchos sectores del flanco Sur de La Estroza y de otras mesetas.



Figura 14. Otros ejemplos de pequeños conductos y mesocavernas (diámetros de 20 cm o inferiores, flecha roja) en lutitas de la Formación Tudela (arriba) y cauce inferior del barranco en que se encuentra el sistema de simas 03 á 05 (debajo). Nótese la ocurrencia de estratos delgados de margas, intercalados en la serie arcillosa.

El sector explorado está situado en el flanco Sur de la meseta de La Estroza y desciende en fuerte pendiente hacia la planicie inferior central de la Bardena Blanca, surcada por el Barranco Grande y una red de cañones menores. Previamente, en 2018, exploramos dos cavidades (Simas del Risco) localizadas bajo el escarpe vertical que corona la meseta en la Punta SE de La Estroza (Galán et al, 2018 b). En este caso, las prospecciones se extendieron hacia el W, S y SE de dicho sector, abarcando las zonas medias y bajas del mismo flanco.

Las cinco simas exploradas se desarrollan en arcillas y lutitas ocre y rojas de la Formación Tudela, en el flanco Sur de la meseta, a cotas de entre 400 y 352 m snm, en la zona de cabecera y zona media de los barrancos que van entallando dicho flanco. Geoformas, pequeñas cavidades y conductos menores fueron encontrados hasta cotas más bajas, de 340 m snm. A continuación describimos las simas exploradas y algunos rasgos destacables de su entorno. Para diferenciarlas de las Simas del Risco, denominamos a éstas Simas de La Estroza Sur 01 á 05, pero ambos grupos se encuentran en el mismo flanco. La referencia para las coordenadas UTM de las cavidades es la cartografía SITNA, contrastada con datos de campo.

Sima La Estroza Sur 01.

Situación: A 240 m en planta al SW de la Punta de la Estroza, a 50 de distancia a la pared que corona la meseta.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.679.100; E 624.468; Altitud 400 m snm.

Dimensiones: Desnivel: -10 m; Desarrollo espacial: 15 m. Figuras 01 á 05. Plano en Figura 26.

Descripción: La boca, de 4 m de diámetro, presenta en su lado menos abrupto una vertical de -5 m, que prosigue en rampa hasta la cota -8 m. En la parte inferior la cavidad se amplía y forma una galería de 6 m de largo, colmatada por sedimentos en su extremo (cota -10 m). En la zona más baja hay crecimientos de espeleotemas aciculares de yeso. Al lado de esta cavidad hay otras depresiones o dolinas, cegadas por bloques, que profundizan 2-3 m.

Sima La Estroza Sur 02.

Situación: A 28 m en planta al S de la sima La Estroza Sur 01 y 10 m más baja.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.679.075; E 624.470; Altitud 390 m snm.

Dimensiones: Desnivel: -6 m; Desarrollo espacial: 10 m. Figuras 06 á 07. Plano en Figura 26.

Descripción: A escasos 10 m al Sur de la sima 01 hay otra depresión alargada, con aspecto de sima, pero se taponó a -2 m por rellenos de bloques y arcilla, aunque su fondo parece ser la continuación de la sima 01. Y a unos -10 m más abajo y más al Sur, se abre una segunda boca de sima, poco apreciable de lejos. Esta tiene en superficie 2 m de diámetro y desciende -3 m en vertical para seguir en rampa hasta la cota -6, donde acaba obstruida por sedimentos.

Las simas 01 y 02, junto a las pequeñas depresiones próximas, constituyen el área de alimentación de un sistema, el cual se extiende por la ladera, con pipes menores, hacia el cauce de un barranco inferior.

Geoformas y pequeñas cavidades.

Situación: Parte media-baja de la ladera, hacia el E, hasta el collado de El Sierrón. Figuras 08 á 14.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N del collado: N 4.679.002; E 624.797; Altitud 352 m snm.

Descripción: A lo largo de la ladera, cruzando varias vaguadas hacia el E, no encontramos cavidades apreciables, aunque sí pequeños hundimientos y pipes verticales. Ya cerca del collado del Sierrón, sobre la cota 350 m snm, encontramos algunos abrigos formados bajo solapas rocosas (constituidas por un estrato métrico de caliza margosa) y varios ejemplos de chimeneas de las hadas formadas bajo fragmentos de bloques tabulares, desprendidos de estratos superiores de la serie.

En la zona del collado hay numerosas mesocavernas y pipes menores, que reproducen en miniatura los rasgos de cavidades más grandes (diversos ejemplos en Figuras 12 á 14). También se observan geoformas cónicas en miniatura. Lo que denota su naturaleza fractal, aspecto que será comentado con mayor detalle en el apartado de Discusión y conclusiones. De momento sólo señalar que existen circulaciones subterráneas, que profundizan varios metros bajo la superficie, a través de agrietamientos, pipes menores, o de la porosidad de la roca, ampliada por disolución y desagregación de los materiales arcillosos.

Sima La Estroza Sur 03.

Situación: A 350 m en planta al Este de la sima La Estroza Sur 02, en la parte baja de un barranco sobre el collado del Sierrón.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.679.107; E 624.817; Altitud 362 m snm.

Dimensiones: Desnivel: -10 m; Desarrollo espacial: 30 m. Figuras 14 á 18. Plano en Figura 27.

Descripción: Remontando un barranco de acentuada pendiente, situado al E del collado del Sierrón y más bajo, encontramos varios replanos y depresiones con acumulaciones y deslizamientos de arcilla húmeda. Tras subir un pequeño escarpe se alcanza otro replano, donde se abre la boca inferior de la cavidad. Esta posee una galería surgente horizontal, de donde procede la mayor parte de las acumulaciones de arcilla encontradas más abajo. La cueva tiene una galería de 10 m y finaliza en laminadores y pequeños conductos. Sobre esta cueva se abre la boca superior (cota 0 = 362 m snm), que forma una sima 2 x 4 m de diámetro y -4 m de vertical. En su base posee galerías en ambas direcciones. En sentido descendente prosigue hasta un estrechamiento que comunica con el laminador de la cueva inferior. Hacia arriba, se prolonga 10 m, capturando el drenaje de la sima 04.

Sima La Estroza Sur 04.

Situación: En el mismo barranco y 6 m al N de la sima 03, colgada en la pared de un escarpe vertical.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.679.112; E 624.818; Altitud 366 m snm.

Dimensiones: Desnivel: -7 m; Desarrollo espacial: 10 m. Figuras 19 á 20. Plano en Figura 27.

Descripción: Sobre la depresión donde se encuentra la boca de la sima anterior (03), se abre una boca tubular, colgada en la pared de un escarpe. La boca tiene una vertical de -3 m y se amplía en su base, para seguir en sima más estrecha hasta la cota -7, donde intersecta pipes menores, subhorizontales. El drenaje se dirige hacia la sima 03 y procede de la galería que asciende hacia el N bajo el talweg del barranco, donde existen otras depresiones.

Sima La Estroza Sur 05.

Situación: A 45 m en planta al NW de la sima 04, remontando el mismo barranco.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.679.142; E 624.786; Altitud 390 m snm.

Dimensiones: Desnivel: -8 m; Desarrollo espacial: 20 m. Figuras 21 á 25. Plano en Figura 27.

Descripción: Por encima de las cavidades anteriores, el barranco asciende a lo largo de 50 m, presentando en su vaguada varias depresiones o simas de colapso, de hasta 3 m de diámetro y profundidad. En la cota 390 m snm se alcanza una boca mayor y más profunda, que constituye la sima 05.

Su boca tiene 4 m de diámetro y, tras un escalón vertical de -2 m, prosigue en rampa con dos galerías. Una galería amplia descendente y de techo bajo, que al cabo de 8 m se obstruye por bloques en la cota -8 m. Y otra ascendente, subhorizontal, que se desarrolla bajo un estrato duro de margas grises y profundiza 8 m. Ambas galerías tienen paredes con lutitas bandeadas ocre y rojizas y diversos crecimientos de espeleotemas aciculares y frostworks de yeso.

A +5 m por encima de la boca de la cavidad, se abre otra boca colgada de sima que profundiza -7 m, pero no enlaza con la sima 05. El terreno en que se desarrollan estas cavidades, tiene partes con lutitas compactas, de estratificación horizontal, junto a otras con una mezcla heterogénea de materiales arcillosos y clastos de caliza, procedentes de los glaciares de acumulación o parte de coluviones de ladera más recientes. Los distintos materiales forman interdigitaciones muy irregulares, que las galerías subterráneas atraviesan sin dificultad. Los materiales colapsados y removidos desde niveles próximos a la superficie, pueden ser redepositados en niveles inferiores, y vueltos a reexcavar, repetidas veces.

El conjunto descrito de las simas 03 á 05, forma un segundo sistema, que se abre en abanico hacia la cabecera de cuenca, a la que vez que se entalla y profundiza bajo el talweg del barranco externo. La boca inferior de la sima 03 constituye la surgencia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las cavidades descritas forman dos sistemas subterráneos, que se extienden a lo largo de la ladera. Pero cada uno de ellos, además de las cinco simas principales (macro cavernas), posee en su cuenca muchas otras depresiones, dolinas y pipes menores, con conductos de muy diversos diámetros. Las galerías inferiores de las simas, generalmente con cauces de arcilla húmeda, invariablemente se obstruyen por colapso o prosiguen a través de mesocavernas y pipes menores (arrastraderos y laminadores) que no permiten el acceso del ser humano, pero que sí conducen las aguas de infiltración. A relativamente corta distancia con respecto a la superficie. Esto también permite que se produzcan colapsos sobre los conductos de circulación hídrica, formándose nuevas bocas de simas, hundimientos y dolinas de contornos subverticales.

Los ejemplos de pequeños sistemas fractales, que reproducen en miniatura los rasgos de sistemas de cavidades mayores, muestran propiedades semejantes, a distintas escalas (Galán, 2017).

Las lutitas y arcillas de la Formación Tudela son materiales granulares, primariamente impermeables. Pero poseen altos valores de sodio intercambiable y se agrietan con facilidad por cambios de volumen que ocurren según su grado de hidratación (Gutiérrez et al, 1997; Marín & Desir, 2010). La escorrentía puede entonces penetrar por las grietas hacia el interior del sedimento. La disolución del sodio a nivel intergranular desflocula las arcillas y acelera su pérdida de coherencia, produciendo cierto grado de desagregación que permite actuar al proceso de tubificación o piping. Los flujos de infiltración se canalizan y generan conductos subterráneos tubulares (pipes), los cuales conducen el drenaje y evolucionan excavando volúmenes mayores de roca.

El proceso de piping actúa de forma general por remoción de partículas en materiales granulares y rocas poco solubles. En su forma pura el piping es el extremo teórico de un espectro espeleogenético, con 100% de disolución kárstica en el extremo opuesto (Parker & Higgins, 1990; Dunne, 1990; Halliday, 2004). Entre ambos extremos hay situaciones intermedias, donde la disolución y el piping pueden actuar juntos, en variables proporciones, existiendo un continuo entre cuevas de tubificación y de disolución, en rocas de distintas solubilidades.

En los materiales arcillosos de las Bardenas estos procesos están ampliamente extendidos, pudiéndose hablar de la existencia de un auténtico karst en arcilla. Sólo que muy distinto al karst clásico en caliza, tanto por la litología de los materiales como por la importancia que revisten los procesos de piping y erosivos, los cuales comandan el modelado regional. En el sector estudiado podríamos decir que hay pocas cuevas, a escala humana, pero una gran cantidad de conductos subterráneos menores.



Figura 15. Colada de material evacuado de la surgencia de la sima 03, localizada sobre un escarpe en el cauce del barranco (arriba, flecha roja). Boca inferior (surgencia) de la sima 03 (debajo, flecha blanca)). La boca superior de la sima se abre en una depresión sobre el escarpe de la surgencia (flecha azul).



Figura 16. Galería surgente de la Sima La Estroza Sur 03. Se observa la arcilla húmeda del cauce temporal y la continuación ascendente con mesocavernas y laminadores de escaso diámetro.



Figura 17. Boca-surgencia de la sima 03, con material evacuado (arriba) y boca superior de la sima 03, semioculta por la vegetación (debajo). El óvalo blanco indica el perímetro aproximado de la boca. Se observa también otro conducto vertical sobre el escarpe lateral (flecha azul).



Figura 18. Vista desde la boca hacia el interior (arriba) y galería inferior (debajo) en la Sima La Estroza Sur 03.



Figura 19. Sima La Estroza Sur 04. Se encuentra colgada en una pared (flecha roja) que cierra el lado N de la depresión en que se encuentra la sima 03 (flecha negra) (arriba). Debajo: inicio del descenso.



Figura 20. Sima La Estroza Sur 04. Tras un tramo amplio, la sima sigue a través de un conducto vertical más estrecho, que intercepta en su base conductos subhorizontales menores. El drenaje se dirige hacia la sima 03.



Figura 21. Entre las simas 04 y 05, a lo largo del cauce del barranco se encuentran varias depresiones de 2-3 m, cegadas por sedimentos, y pipes menores. Ello indica que existen circulaciones subterráneas bajo el cauce.



Figura 22. La sima La Estroza Sur 05 se abre a 50 m de distancia y a +24 de desnivel sobre la sima 04. La vertical de acceso atraviesa un estrato de margas y prosigue en rampa hasta interceptar una galería inferior. El drenaje subterráneo se dirige bajo el cauce hacia la sima 04. Obsérvese la ocurrencia de pipes menores.



Figura 23. Galería inferior de la Sima La Estroza Sur 05. El tramo descendente prosigue 8 m hasta una obstrucción por material colapsado, entre el cual se infiltra el drenaje a través de pequeños conductos.



Figura 24. Tramo ascendente de la galería inferior de la sima 05. Se extiende teniendo como techo un estrato de margas y en las paredes se aprecian lutitas bandeadas ocres y rojizas. Posee espeleotemas y forstworks de yeso.



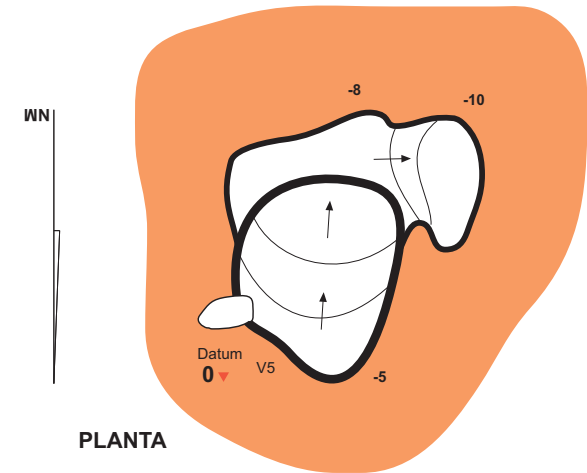
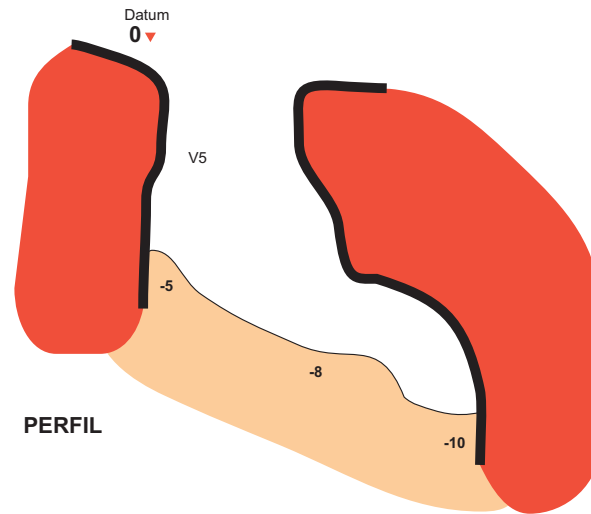
Figura 25. Colgada a +5 m sobre la sima 05, se abre otra boca de sima, que desciende -7 m y prosigue en pipes menores. Obsérvese la diversidad de materiales.

Figura 26. Plano de las simas 01 y 02.

Sima La Estroza Sur 01.



Coordenadas ETRS89, UTM30N:
N 4.679.100; E 624.468. Altitud: 400 m snm.
Dimensiones: Desnivel: -10 m. Desarrollo espacial: 15 m.
Topografía: C.Galán, M. Nieto & I.Herraiz. SCA. 2019.
Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.



Sima La Estroza Sur 02.



Coordenadas ETRS89, UTM30N:
N 4.679.075; E 624.470. Altitud: 390 m snm.
Dimensiones: Desnivel: -6 m. Desarrollo espacial: 10 m.
Topografía: C.Galán, M. Nieto & I.Herraiz. SCA. 2019.
Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.

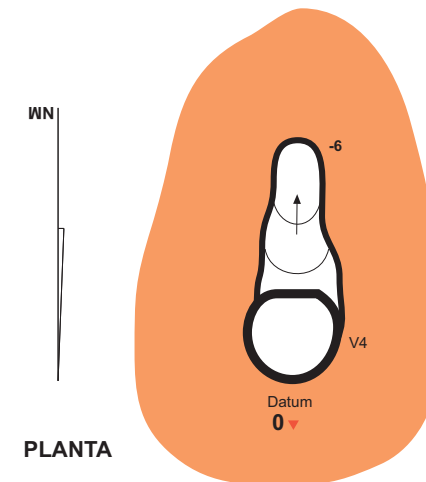
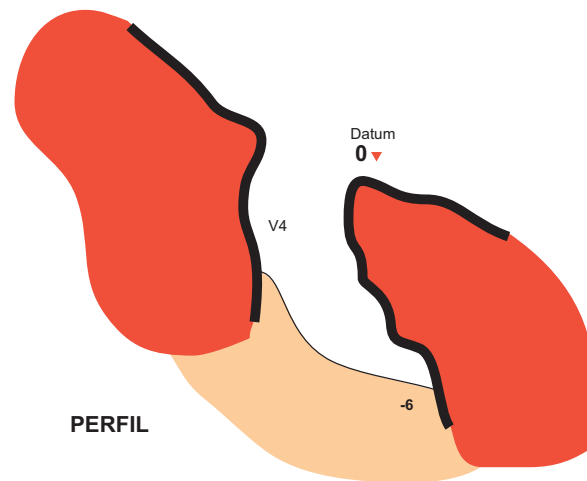


Figura 27. Plano de las simas 03 a 05.

Sima La Estroza Sur 03.



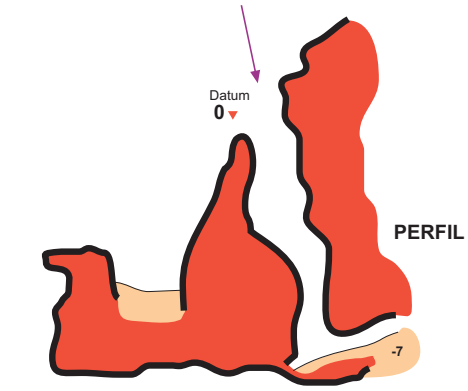
Coordenadas ETRS89, UTM30N:
 N 4.679.107; E 624.817. Altitud: 362 m snm.
 Dimensiones: Desnivel: -10 m. Desarrollo espacial: 30 m.
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & I.Herraiz. SCA. 2019.
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.



Sima La Estroza Sur 04.



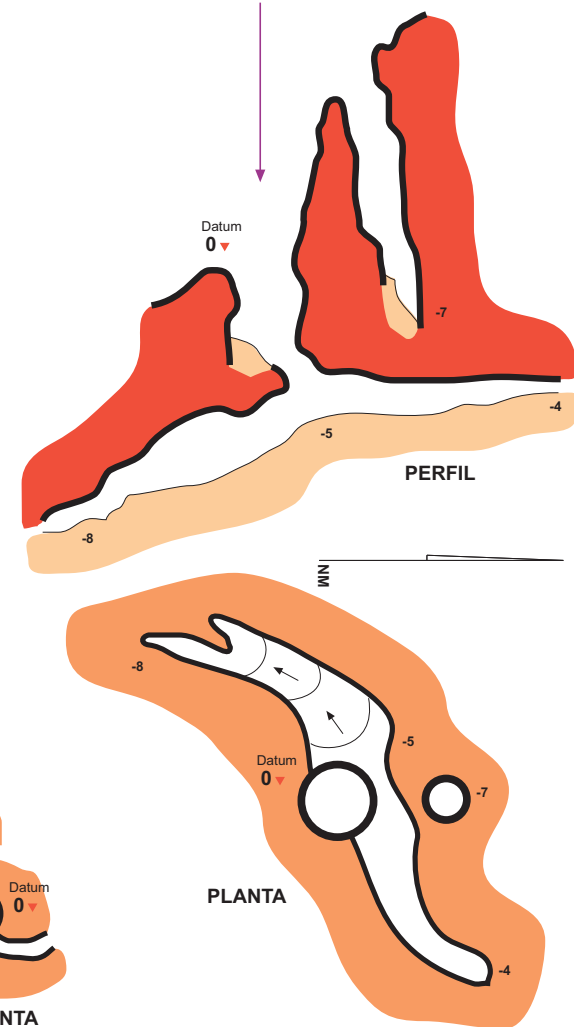
Coordenadas ETRS89, UTM30N:
 N 4.679.112; E 624.818. Altitud: 366 m snm.
 Dimensiones: Desnivel: -7 m. Desarrollo espacial: 10 m.
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & I.Herraiz. SCA. 2019.
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.



Sima La Estroza Sur 05.



Coordenadas ETRS89, UTM30N:
 N 4.679.142; E 624.785. Altitud: 390 m snm.
 Dimensiones: Desnivel: -8 m. Desarrollo espacial: 20 m.
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & I.Herraiz. SCA. 2019.
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.



De esta forma las aguas de infiltración (aprovechando diferencias locales de potencial hidráulico) excavan redes de conductos, con cuevas o simas penetrables en sólo algunas partes de esos sistemas. Sus rasgos litológicos e hidrológicos denotan que se trata de sistemas inhomogéneos, de carácter complejo y naturaleza fractal. Los sistemas inhomogéneos se caracterizan por poseer diferencias en algunas de sus propiedades intensivas entre distintas partes del sistema, sin estar estas partes separadas por superficies de discontinuidad bien definidas. Las pequeñas galerías, mesocavernas, pipes verticales y conductos menores de circulación, ocurren en rocas granulares (arcillas y lutitas) primariamente impermeables.

En hidrogeología habitualmente se distingue entre TPP (terrenos permeables en pequeño, a través de intersticios y poros del sustrato rocoso o sedimentos sin consolidar, que contienen el agua como una esponja) y TPG (Terrenos permeables en grande, que se presentan en rocas solubles, donde las aguas han disuelto la roca y son almacenadas y circulan a través de fisuras y conductos mayores, formando redes de galerías, cavernas y ríos subterráneos, como es propio en el karst clásico). En el caso de las Bardenas se trata de TPG (Terrenos permeables en grande), donde existe disolución en baja proporción, y ésta queda limitada a la zona más superficial, con espesores de 10-20 m con respecto a la superficie topográfica.

Podemos intuir que ese pequeño porcentaje de creación de vacíos por disolución intergranular, desagrega progresivamente las partículas de arcilla y aumenta la porosidad secundaria. Aunado esto a los agrietamientos por cambios de volumen, se inician circulaciones hídricas subterráneas que permiten ir evacuando grano a grano las partículas desagregadas, permitiendo actuar al proceso de piping. La remoción de materiales amplía progresivamente los pipes hasta formar conductos de mayor diámetro y, eventualmente, el desarrollo de este proceso conduce a formar galerías colectoras, simas y cavernas.

Dada la variabilidad de las precipitaciones, en esta región árida a semi-desértica, la red hidrológica es de régimen temporal. Las crecidas, con fuerte poder erosivo, amplían los conductos, pero a la vez son frecuentes los colapsos, por la inestabilidad de los materiales arcillosos. El material desprendido por colapso amplía también las galerías al resultar removido en subsecuentes crecidas. Esto puede dar lugar a desarrollos dendríticos, a obstrucciones en galerías y fondos de sima, y también a una alternancia de morfologías en los conductos principales, con tramos en forma de galerías amplias, alternando con meandros estrechos, laminadores y/u otros rasgos geomorfológicos, como se puede apreciar en las cavidades descritas.

La excavación de conductos en estos materiales arcillosos adquiere a su vez características propias de sistemas complejos. La evolución progresiva de la somera red de drenaje subterráneo, amplía la infiltración y formación de nuevos pipes a áreas contiguas, donde de nuevo se inician procesos de disolución y desagregación de la roca adyacente. Por otro lado, la erosión de superficie y los colapsos pueden destruir y remover completamente zonas previamente excavadas. Así que de modo simultáneo estos sistemas crecen, se amplían y se destruyen, a distintas velocidades en distintas partes. Esto introduce una amplia gama de complejidad, por iteración múltiple de los mismos procesos (Galán, 2015, 2017). Probablemente en ello se encuentra la mejor explicación para la ocurrencia de rasgos fractales.

El mecanismo de piping es el proceso fundamental que actúa en la formación de cavidades, pero, como ha sido dicho, también existe cierto grado de disolución de los materiales parentales. La presencia de espeleotemas de yeso y otros minerales secundarios constituye una evidencia de que existe disolución en las lutitas y una posterior precipitación de yeso secundario en las paredes de las galerías.

Nuestra impresión actual es que se trata de un proceso de kartificación incompleto o peculiar, donde entran en juego muchas fases de equilibrio. En distintas partes del sistema, o como fases sucesivas en el tiempo, pueden actuar procesos de disolución (principalmente del sodio intercambiable, lo que aumenta la porosidad secundaria y desagrega las arcillas), procesos de piping, y procesos de erosión, colapso y remoción de materiales desprendidos. Estos últimos actúan y comandan sobretodo la ampliación volumétrica de las galerías y conductos excavados.

En el sector estudiado, la escorrentía superficial ha excavado progresivamente una red de surcos y barrancos sobre el flanco Sur de la meseta, que profundizan su incisión en el relieve hasta alcanzar la planicie inferior. Este entallamiento erosivo deja interfluvios que forman espolones y crean así diferencias de cota entre niveles altos y bajos de la ladera y entre el fondo de los barrancos y el tope de los interfluvios. Según cómo evolucione esta excavación en surcos, se crean nuevas diferencias de potencial hidráulico, que permiten extender los procesos de piping e introducir variaciones en la configuración de las redes de conductos.

También cabe señalar que algunos barrancos (como el que contiene el sistema de las simas 03 á 05) parecen haberse formado por hundimiento progresivo del talweg del barranco sobre sistemas de galerías y conductos subterráneos. Este aspecto ha sido señalado previamente para la formación de gullies (cañones entallados) por colapso del terreno sobre galerías inferiores (Galán, 2015). En ambos casos se pueden dar situaciones contrapuestas y a la vez complementarias. Tanto la presencia de gullies y barrancos propicia y extiende los procesos de piping, como en forma inversa las redes de pipes y galerías pueden colapsar extendiendo y entallando los gullies y barrancos. En suma, una gama de complejidad, sostenida por distintos procesos y equilibrios, que difiere considerablemente de los rasgos del karst clásico en caliza y otras rocas solubles.

El uso del término karst para esta litología y este tipo de cavidades en arcilla creemos que es perfectamente aplicable, tanto porque existe cierto grado de disolución de los materiales, como porque existe drenaje subterráneo sobre extensas áreas. Aunque cabría caracterizarlo como un karst donde el proceso de piping predomina sobre la disolución, en la creación de vacíos.

El trabajo, de naturaleza descriptiva, aporta nuevos ejemplos de formación de cavidades en arcillas y lutitas de la Formación Tudela, así como detalles de interés científico sobre la geomorfología y dinámica de la región semidesértica de las Bardenas.

AGRADECIMIENTOS

A todos los compañeros que nos acompañaron en prospecciones anteriores efectuadas en la región de las Bardenas. A tres árbitros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, Sociedad Venezolana de Espeleología y Biosphere Consultancies (Reino Unido), por la revisión crítica del manuscrito y sus útiles sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Castiella, J.; Solé, J. & J. Del Valle. 1978. Mapa y Memoria Geológica de Navarra a escala 1:200.000. Servicio Geológico, Diputación Foral de Navarra.
- 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. & D.R. Coates, Eds. 1990. Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms. Geological Society of America, Special Paper 252.
- Faci Paricio, E.; A. Olivé Davó; A. Martínez Arias & P.P. Hernaiz. 2002. Memoria de la Hoja 245-I, Alera. Cartografía Geológica de Navarra, escala 1: 25.000. Gobierno de Navarra. 101 pp.
- 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. 2017. Dinámica de piping y sistemas complejos de cuevas en arcilla: Bardena Blanca. Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 36 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; I. Herraiz; D. Arrieta & J. Forstner. 2017. Cuevas en arcilla en el cañón de Las Bodegas (Bardena Blanca). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 54 pp.
- Galán, C.; M. Nieto & J. Forstner. 2018 a. Notas sobre técnicas de exploración de cuevas en arcilla en la región semidesértica de las Bardenas. Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 37 pp.
- Galán, C.; I. Herraiz & A. Miner. 2018 b. Simas del Risco: Dos nuevas simas en lutitas ocre y rojas de la Formación Tudela (Bardena Blanca). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 30 pp.
- Gutiérrez, M.; C. Sancho; G. Benito; J. Sirvent & G. Desir. 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.
- 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.
- Parker, G. & C. Higgins. 1990. Piping and pseudokarst in drylands. In: Higgins, C.G. & D.R. Coates, Eds. 1990. Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms. Geological Society of America, Special Paper 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.