

**CUEVAS EN ARCILLA EN EL BARRANCO DEL CALDERO (BARDENA BLANCA) CON NOTAS SOBRE LA FORMACIÓN Y RAMIFICACIÓN DE CAÑONES Y GEOFORMAS RESIDUALES.**

Caves in clay in the Caldero canyon (White Bardena) with notes on the formation and branching of canyons and residual geofoms.



**Carlos GALÁN, Marian NIETO & Ainhoa MINER.**

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

# CUEVAS EN ARCILLA EN EL BARRANCO DEL CALDERO (BARDENA BLANCA) CON NOTAS SOBRE LA FORMACIÓN Y RAMIFICACIÓN DE CAÑONES Y GEOFORMAS RESIDUALES.

Caves in clay in the Caldero canyon (White Bardena) with notes on the formation and branching of canyons and residual geofoms.

**Carlos GALÁN, Marian NIETO & Ainhoa MINER.**

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Agosto 2019.

## RESUMEN

El trabajo describe la exploración y estudio de un sistema de cuatro cuevas en arcilla, localizadas en el barranco del Caldero (Bardena Blanca), y algunos conductos y geofomas adyacentes. Las cavidades constan de depresiones de poco fondo que son drenadas por pequeñas galerías hasta la base de las paredes del cañón. Su ampliación volumétrica y colapsos generan el retroceso de las paredes, y la formación y ramificación de nuevos cañones, entallados en la planicie. Las cavidades poseen espeleotemas de yeso y eflorescencias salinas, y se desarrollan en arcillas y limos ocre y rojos (Facies Las Bardenas) de la Formación Tudela, de edad Aquitaniense (Mioceno temprano, Terciario continental), que rellenaron la planicie central de las Bardenas. Se describen y discuten los rasgos de estas cavidades y la evolución del relieve local, ilustrando el trabajo con fotografía digital.

*Palabras clave:* Karst y cuevas en arcilla, Espeleología, Tubificación, Hidrogeología, Geomorfología, Génesis de cañones.

## ABSTRACT

The work describes the exploration and study of a four caves system in clay, located in the Caldero canyon (White Bardena), and some adjacent conduits and geofoms. The cavities consist of low depth depressions that are drained by small galleries to the base of the canyon walls. Its volumetric expansion and collapses generate the regression of the walls, and the formation and branching of new canyons, notched in the plain. The cavities have gypsum speleothems and saline efflorescences, and develop in ocher and red clays and silt (Facies Las Bardenas) of the Tudela Formation, of Aquitanian age (early Miocene, continental Tertiary), which filled the central plain of the Bardenas. The features of these cavities and the evolution of the local relief are described and discussed, illustrating the work with digital photography.

*Keywords:* Karst and caves in clay, Speleology, Piping, Hydrogeology, Geomorphology, Canyon genesis.

## INTRODUCCIÓN

La región de las Bardenas, situada en el SE de Navarra, es una comarca semidesértica muy extensa, que ocupa una superficie de 600 km<sup>2</sup>. Se trata de una antigua cuenca endorreica que se rellenó de sedimentos fluvio-lacustres (fundamentalmente arcillosos) durante el intervalo Eoceno - Mioceno (Terciario) y pasó a ser exorreica en el Mioceno final. La erosión posterior fue vaciando la cuenca, generando planicies y relieves tabulares de formas caprichosas. Actualmente posee una trama entallada de barrancos y cañones que disecta los materiales arcillosos y que es drenada por una red hidrográfica de carácter temporal, ya que las lluvias en la región son muy escasas (170 mm/a en la Bardena Blanca y 350 mm/a para el conjunto de la región). Junto con el Desierto de Tabernas (en Almería) constituye una de las regiones más áridas de toda Europa.

Las cuevas en arcilla (caves in clay, mud caves) son muy raras a nivel mundial, ya que se trata de materiales arcillosos poco consistentes y poco solubles, por lo tanto, poco susceptibles de experimentar procesos de karstificación y generar cavidades (simas y cuevas) a escala humana (macro cavernas). La formación de cavidades en este tipo de terrenos ocurre por procesos de piping, aunque también interviene la disolución intergranular, en proporciones limitadas y variables, al aumentar la porosidad secundaria e ir desagregando los materiales parentales (Striebel & Schäferjohann, 1997). Una vez que se establece un conducto continuo, el transporte se vuelve turbulento y la socavación aumenta el mecanismo erosivo.

La tubificación o piping consiste en una remoción de partículas de la roca por flujos canalizados de aguas subterráneas en materiales granulares y rocas poco solubles (Parker & Higgins, 1990; Dunne, 1990). En su forma pura el piping es el extremo teórico de un espectro espeleogenético, con 100% de disolución kárstica en el extremo opuesto. Entre ambos extremos hay toda una gama de situaciones intermedias, donde disolución y piping pueden actuar juntas, en variables proporciones (Halliday, 2004).

En nuestro caso, en los materiales arcillosos de la Formación Tudela, a la luz de los conocimientos actuales y de los sistemas de cavidades descubiertos, puede hablarse inambiguamente de "karst en arcilla o de fenómenos kársticos en arcilla", tanto por la magnitud de los fenómenos como porque existe cierto grado de disolución de los materiales parentales, además de piping y procesos erosivos (Galán, 2015). La ocurrencia de disolución es probada ampliamente, ya que ocurre también el fenómeno inverso de precipitación de minerales secundarios y formación de espeleotemas. En este trabajo aportamos la descripción de un nuevo sistema subterráneo, donde la génesis de cavidades va unida a la formación de gargantas entalladas o gullies y al desarrollo de barrancos mayores, contribuyendo los procesos kársticos a la evolución y modelado del relieve de conjunto.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

Se utilizaron cascacos con iluminación de Leds, técnica de cuerda estática y jumars para verticales, y material topográfico de precisión Suunto. Los planos han sido dibujados en programa Freehand. Los principales rasgos de las cavidades y su entorno son ilustrados con fotografía digital de 4 megapíxeles de resolución (Panasonic).

## **RESULTADOS**

Las cavidades descubiertas se localizan en la parte E del barranco del Caldero, al ENE de la cumbre del cabezo o meseta de Piskerra (472 m snm), parte central de la Bardena Blanca, en territorio de Navarra. Las cuatro cavidades se localizan en un sector del barranco o cañón que presenta paredes de 10 m de altura, en su zona de borde, y constan de depresiones-simas superiores (en la cota 365 m snm) que enlazan a través de pequeñas galerías con la base de la pared del cañón y cauce del barranco seco.

Los materiales aflorantes corresponden a arcillas y limos ocre y rojos de la Formación Tudela, facies Las Bardenas (unidad litoestratigráfica 376), de edad Aquitaniense (Mioceno temprano, Terciario), que suprayacen a margas grises con yesos de la Formación Lerín (Mioceno basal). Estas arcillas son el equivalente lateral de la unidad 369 (lutitas ocre y rojas) que aflora en los taludes de la Estroza. El área contiene además algunos glaciares de acumulación, actuales o subactuales, de fangos arenosos con cantos (unidad litoestratigráfica 534) y rellenos de fondos de valle con arcillas y limos Holocenos (Faci Aparicio et al, 2002).

Además de las caprichosas formas de erosión que presenta el área de estudio, lo más interesante del sistema de cavidades descubierto reside en que cada cavidad presenta rasgos similares a las otras pero con distinto grado de desarrollo y extensión, lo que permite ilustrar el proceso de formación de nuevas gargantas entalladas y cañones (a partir del colapso de las cavidades) y la ramificación de los mismos sobre la planicie.

## **CONTEXTO GEOLÓGICO**

La facies Las Bardenas configura un conjunto eminentemente arcilloso, constituido por arcillas y limos ocre y rojos, con nivelitos intercalados de areniscas y/o calizas grises (unidad litoestratigráfica 376) y niveles delgados esporádicos de areniscas (unidad 377). Esta facies alcanza gran extensión en la parte central de la Bardena Blanca. Debido a la aridez así como a la escasa vegetación existente, se facilita el desarrollo de espectaculares y caprichosas formas de erosión, tan características de esta región, con mesetas tabulares, cerros cónicos, taludes con cárcavas y una planicie surcada por una red de cañones y barrancos.

Litológicamente la unidad 376 se presenta con un carácter bastante homogéneo, estando constituida en conjunto y de forma bastante monótona por arcillas y limos de tonalidades ocre y rojas, de aspecto masivo, que de modo esporádico presenta nivelitos intercalados de areniscas grises de espesor decimétrico y métrico, a veces de gran continuidad lateral. Cuando esto sucede, han sido individualizadas y diferenciadas en la cartografía como la unidad 377, que forma por ejemplo el tope de la meseta de Piskerra y otras mesetas adyacentes. Localmente, en la zona de La Junta y Corral de La Junta, al W del área de estudio, la unidad presenta una serie de nivelitos de calizas grises, de espesor decimétrico y extensión muy localizada.

Aunque predominan las tonalidades ocre en las arcillas y lutitas, se diferencian de forma rítmica horizontes rojizos, de espesores decimétricos, incluso métricos, relacionados con procesos edáficos, así como algunos horizontes grisáceos de espesor centimétrico a decimétrico. Ocasionalmente entre estas lutitas se reconoce algún nivel de yeso disperso.

Las areniscas que se intercalan en las lutitas suelen ser de grano medio a fino, los granos están cementados por carbonatos y son de tonalidades grises, con base planar y abundantes ripples de corriente (climbing-ripples), llegando en ocasiones estos a constituir un único paquete arenoso. No obstante también se reconocen cuerpos de espesor métrico (1 a 1,5 m) con base irregular y erosiva. Finalmente se observan también canales con desarrollo de acreción lateral, correspondientes a point-barr.

Desde el punto de vista sedimentario estos depósitos se relacionan con facies distales de abanicos aluviales de procedencia pirenaica. Se corresponderían con extensas llanuras de fangos, cortadas de forma esporádica por algunos canales efímeros, y con encharcamientos lagunares locales representados por los tramos carbonatados.

A la facies Las Bardenas (incluida en la Formación Tudela) se le ha atribuido una edad Aquitaniense (Mioceno temprano), en base a la ocurrencia de distintas algas charáceas (*Chara cylindrica*, *Ch. microcera*, *Ch. tornata*, *Sphaerochara aff. minutissima*). Las cavidades estudiadas se desarrollan exclusivamente en materiales arcillosos grises de la unidad 376. En las cavidades, las galerías presentan un aspecto seco y poroso, y las arcillas se desagregan con facilidad formando en el suelo rellenos pulverulentos, de materiales constituidos por partículas finas.

## DESCRIPCIÓN DE CAVIDADES

### **Sima-cueva El Caldero 01.**

Situación: A 400 m en planta al ENE de la torre del Cabezo de Piskerra.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.675.893; E 629.232; Altitud 365 m snm.

Dimensiones cueva: Desnivel: -10 m; Desarrollo espacial: 50 m. Figuras 01 á 06. Plano en Figura 20.

Descripción: El barranco del Caldero se extiende de NW a SE (desde el barranco Grande) sobre la planicie situada al N de Piskerra. Inicialmente es un barranco amplio y de poco fondo, pero remontando hacia el SE sus paredes adquieren mayor altura (10 m) formando un cañón más estrecho y entallado. En su lado S, en la base de los taludes de Piskerra, presenta varios cañoncitos o gullies, con algunos arcos de roca. En su lado N (margen derecha del barranco) presenta también algunos pequeños abrigos y grutas. Pero al alcanzar una posición al ENE de Piskerra, describe un giro hacia el S, y las paredes alcanzan mayor altura (10 m).

En la base de la pared NE en este sector se abre la boca de una cueva, de 3 m de alto x 1 m de ancho (cota -10 m). Esta boca inferior da paso a una galería sinuosa y ascendente, alta y estrecha, que tras dos arrastraderos se abre a un meandro en la base (cota -4 m) de una depresión cerrada o sima superior (cota 0 m). La depresión tiene un entrante lateral de 7 m de largo y otro más extenso, de orientación W-E, de 25 m de desarrollo, contorneado en todo su perímetro por paredes verticales. La cavidad totaliza 50 m de desarrollo y -10 m de desnivel.

### **Sima-cueva El Caldero 02.**

Situación: A 32 m en planta al SE de El Caldero 01.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.675.869; E 629.257; Altitud 365 m snm.

Dimensiones cueva: Desnivel: -10 m; Desarrollo espacial: 80 m. Figuras 07 á 13. Plano en Figura 20.

Descripción: A 30 m al SE de la cavidad 01 se abre de modo semejante la boca de otra cueva, de 4 m de alto x 1,5 m de ancho. A 2 m de la entrada forma un codo de 90°, se amplía y se bifurca. Una galería-chimenea ascendente conduce a la base (cota -6 m) de una depresión cerrada superior, de 10 m de diámetro (cota 0). La otra galería, de 20 m de desarrollo, es primero horizontal y luego forma un meandro sinuoso, estrecho y ascendente, que desemboca en dos puntos distintos de otra depresión. En las paredes de la galería hay zonas con arcillas rojas y finos recubrimientos de pequeñas espeleotemas aciculares de yeso. Cerca de la boca y en la depresión superior hay también eflorescencias salinas blancas.

La depresión-sima superior está limitada por paredes verticales de -6 á -4 m. Su suelo tiene un perfil subhorizontal irregular, ya que presenta varios meandros entallados, colapsos y pipes menores. La zona más amplia tiene 20 m de largo, pero tras un estrechamiento describe un codo y se prolonga por espacio de 25 m más. La cavidad totaliza 80 m de desarrollo.

### **Sima-cueva El Caldero 03.**

Situación: A 40 m en planta al SE de El Caldero 02.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.675.839; E 629.281; Altitud 365 m snm.

Dimensiones cueva: Desnivel: -10 m; Desarrollo espacial: 60 m. Figuras 14 á 17. Plano en Figura 21.

Descripción: Más al SE y en paralelo al borde del cañón se abren otras tres depresiones-simas (de -4 á -5 m), interconectadas por pequeños conductos, que desembocan en dos ramas descendentes, abiertas a un corredor en la base de la pared. Como en el caso anterior, presentan un suelo irregular, con pipes y colapsos, totalizando el conjunto 60 m de desarrollo. La rama Sur presenta una galería arrastradero con huellas evidentes de circulación periódica de agua y numerosas raicillas alcanzan la galería.

### **Sima-cueva El Caldero 04.**

Situación: A 45 m en planta al SE de El Caldero 03.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.675.805; E 629.300; Altitud 365 m snm.

Dimensiones cueva: Desnivel: -10 m; Desarrollo espacial: 12 m. Figuras 18 á 19. Plano en Figura 21.

Descripción: La cavidad se localiza más al SE de la 03, tras cruzar una vaguada lateral del barranco del Caldero. Consta de una depresión-sima superior, de 9 m de largo y -5 m de desnivel, paralela al borde, que conecta a través de una corta galería en arco (que posee una sima-claraboya tubular en su techo), con la cabecera de una especie de zanjón caótico, descendente, y abierto a la base del cañón externo. Computamos sólo la galería en arco y la depresión-sima superior, con un desarrollo de 12 m. El zanjón posee también colapsos y conductos menores (no penetrables). El drenaje subterráneo desciende -10 m de desnivel.



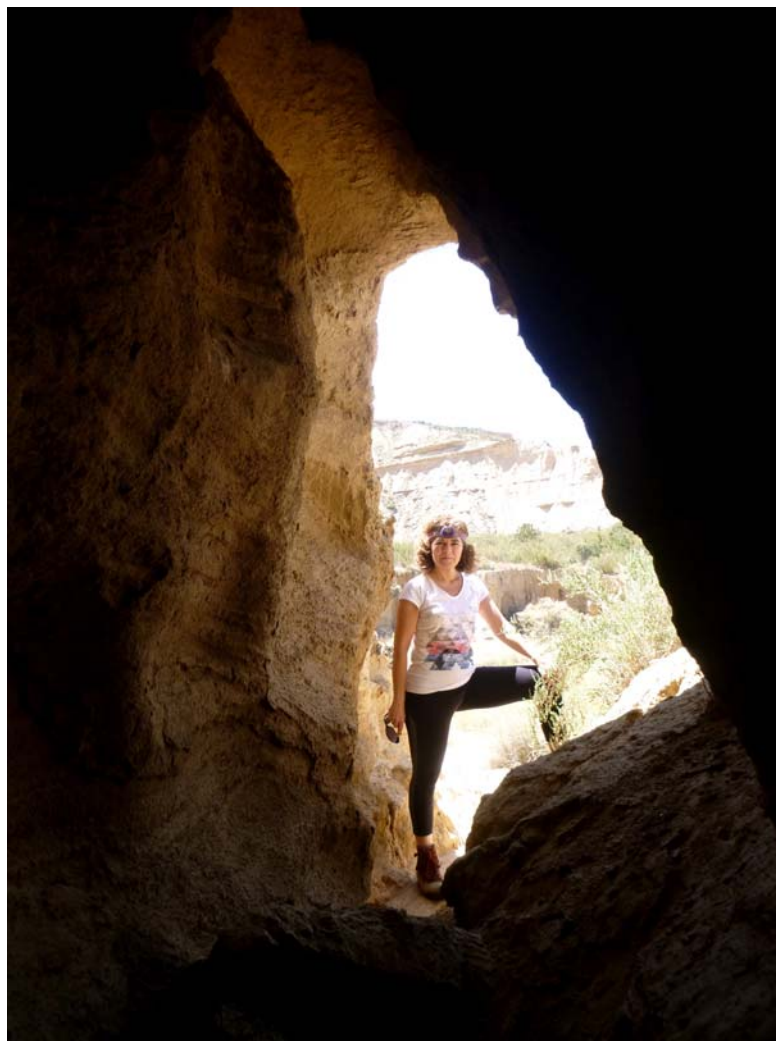


**Figura 01.** Planicie de la Bardena Blanca en el sector del Caldero. Vista hacia el SE, con el Piskerra al fondo (arriba) y detalle del barranco del Caldero, en su parte inicial, de poco fondo (debajo).





**Figura 02.** Barranco del Caldero. Geoformas con cárcavas laterales (arriba) y pequeña gruta en la pared N del barranco, con eflorescencias salinas (debajo).



**Figura 03.** Boca inferior de acceso a la cueva-sima El Caldero 01.





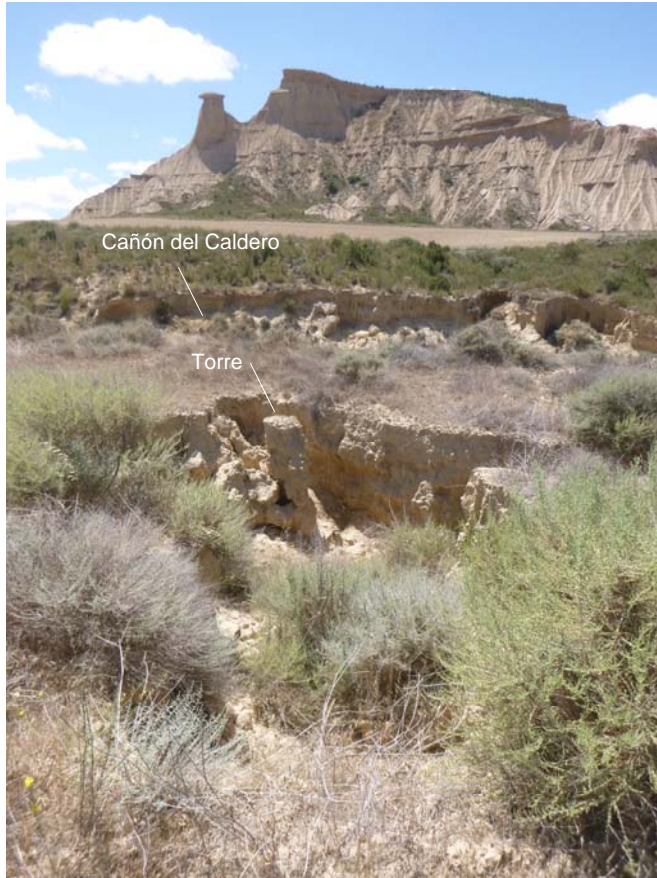
**Figura 04.** Numerosas raíces alcanzan la bóveda de la galería meandro del Caldero 01. Se aprecia el cauce entallado, con rellenos pulverulentos de partículas finas.





**Figura 05.** Salida de la galería meandro al fondo de la depresión-sima superior del Caldero 01.





**Figura 06.** Depresión-sima superior del Caldero 01. Detalles del acceso a la galería meandro inferior (arriba) y la larga y sinuosa depresión superior, con colapsos internos (debajo). La meseta de Piskerra al fondo).





**Figura 07.** Galería principal y boca de acceso inferior de la cueva-sima El Caldero 02.





**Figura 08.** Galería-claraboya ascendente y galería principal del Caldero 02.



**Figura 09.** Diversos aspectos de la galería principal de la cueva-sima El Caldero 02.





**Figura 10.** Detalles de las paredes de la cueva-sima El Caldero 02, con horizontes de arcillas rojas y grises, y recubrimientos tenues de espeleotemas aciculares de yeso.





**Figura 11.** Cueva-sima El Caldero 02. Depresión-sima Norte, de -6 m, con la apertura de la claraboya (arriba).  
Extremo E de la depresión-sima Sur, de -6 á -4 m, de trazado sinuoso (debajo).





**Figura 12.** Cueva-sima del Caldero 02, con la zona de acceso a la galería inferior (en el extremo W de la depresión-sima Sur).





**Figura 13.** Detalle de las dos entradas a la galería inferior de la cueva-sima El Caldero 02.





**Figura 14.** Cueva-sima El Caldero 03. Depresión Norte. Vista desde superficie y desde el interior.





**Figura 15.** Cueva-sima El Caldero 03. Depresión Sur (arriba) y vista hacia la rama Sur del corredor abierto (debajo), con un cauce entallado, donde se abre las bocas de las galerías inferiores, en las cotas -6 y -8 m.





**Figura 16.** Cueva-sima El Caldero 03. Boca de la galería de la cota -6 m (imagen superior) y gatera de enlace con el fondo de la depresión Sur en la cota -5 m (imagen inferior), con raíces y bloques de colapso.





**Figura 17.** Cueva-sima El Caldero 03. Detalles de la galería inferior (cota -8 m) y corredor abierto (cota -10 m).





**Figura 18.** Cañón del Caldero, con algunas charcas de agua y efloroscencias salinas, tras lluvias recientes (arriba). Y boca inferior de la cueva-sima El Caldero 04 (debajo), la cual forma un túnel que enlaza con otra depresión.





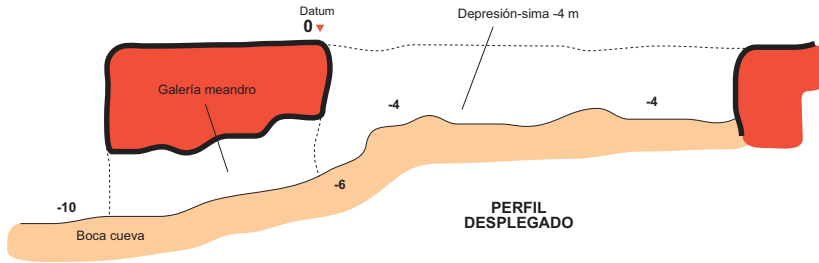
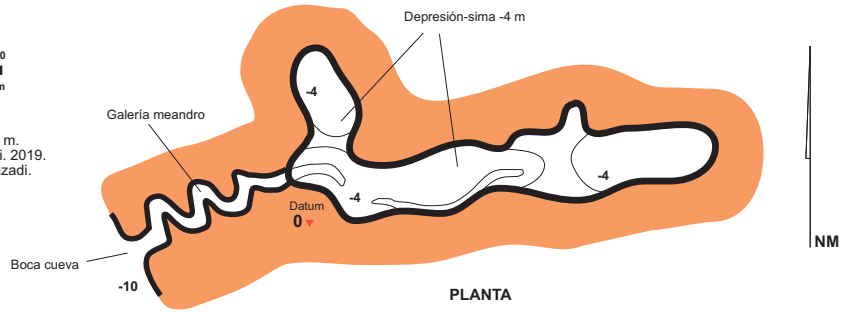
**Figura 19.** Depresión-sima superior de la cueva-sima El Caldero 04 y el cañón adyacente, con charcas de agua.



### Cueva-sima El Caldero 01



Coordenadas ETRS89, UTM30N:  
 N 4.675.893; E 629.232. Altitud: 365 m snm.  
 Dimensiones: Desnivel: -10 m. Desarrollo espacial: 80 m.  
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & A. Miner. S.C. Aranzadi. 2019.  
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.



### Cueva-sima El Caldero 02



Coordenadas ETRS89, UTM30N:  
 N 4.675.869; E 629.257. Altitud: 365 m snm.  
 Dimensiones: Desnivel: -10 m. Desarrollo espacial: 50 m.  
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & A. Miner. S.C. Aranzadi. 2019.  
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.

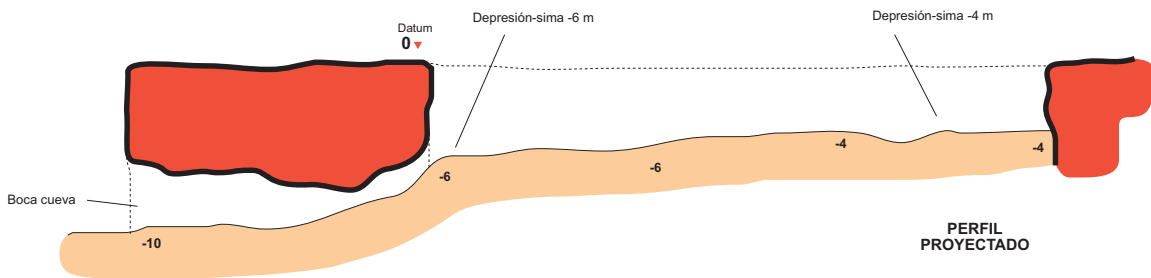
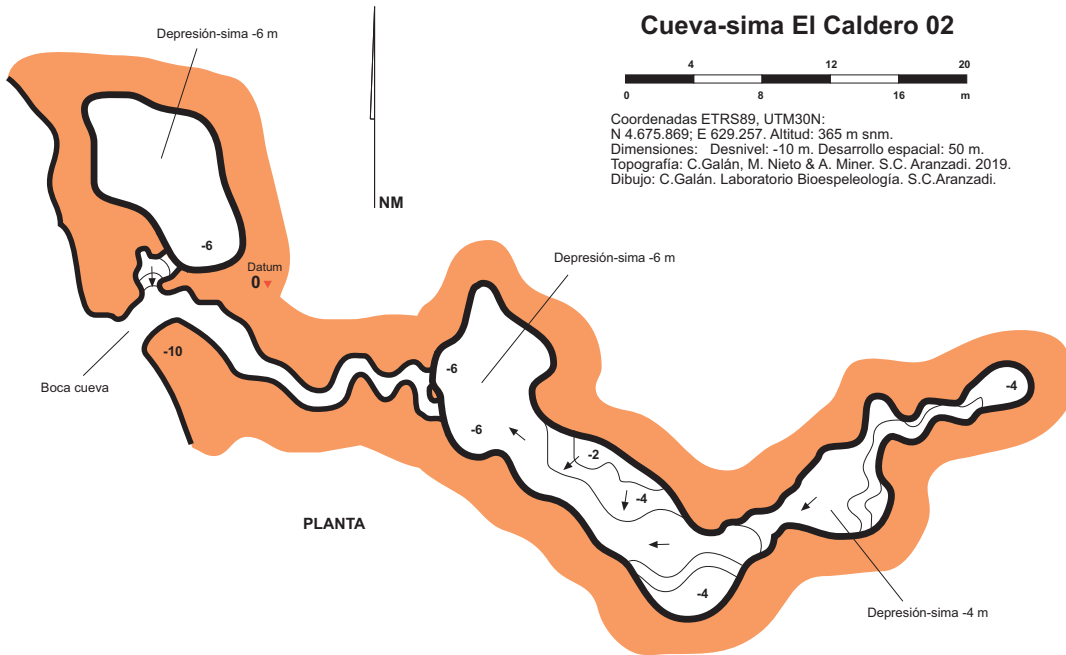


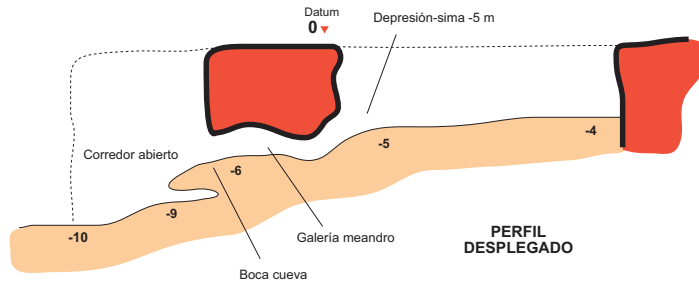
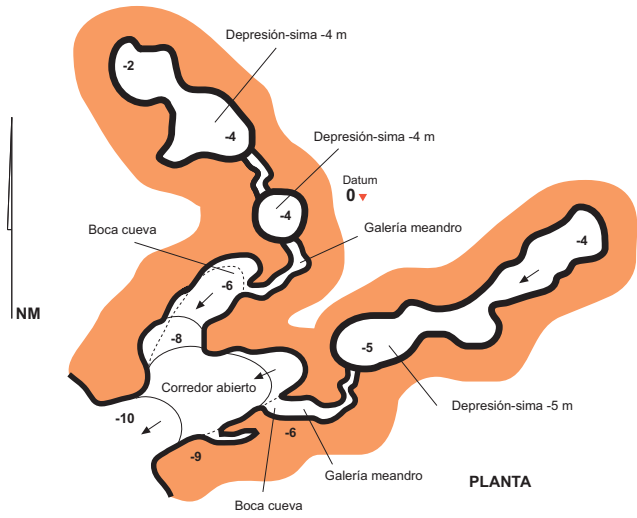
Figura 20. Plano de las cavidades El Caldero 01 y 02.

Figura 21. Plano de las cavidades El Caldero 03 y 04.

### Cueva-sima El Caldero 03



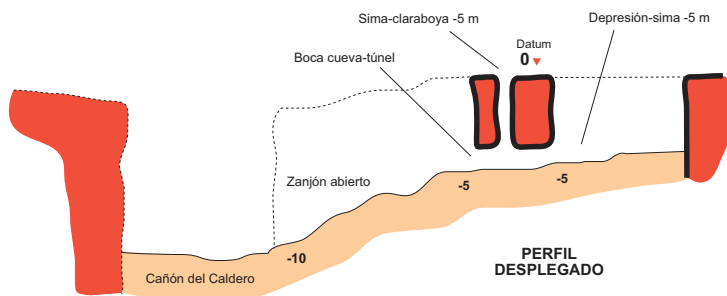
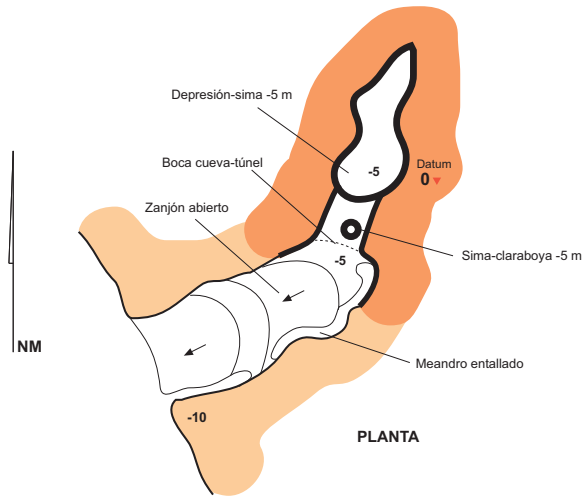
Coordenadas ETRS89, UTM30N:  
 N 4.675.839; E 629.281. Altitud: 365 m snm.  
 Dimensiones: Desnivel: -10 m. Desarrollo espacial: 60 m.  
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & A. Miner. S.C. Aranzadi. 2019.  
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.



### Cueva-sima El Caldero 04



Coordenadas ETRS89, UTM30N:  
 N 4.675.805; E 629.300. Altitud: 365 m snm.  
 Dimensiones: Desnivel: -10 m. Desarrollo espacial: 12 m.  
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & A. Miner. S.C. Aranzadi. 2019.  
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.







**Figura 22.** Cortas cavidades perforan el borde del cañón entre las cuevas-simas El Caldero 01 y 02.





**Figura 23.** Detalle de otra gruta con claraboyas que perfora el borde superior del cañón, al lado de El Caldero 02.





**Figura 24.** Fragmento residual de un conducto que perfora una prominente punta entre las cavidades 02 y 03. Se aprecian eflorescencias salinas en la pared exterior del cañón del Caldero.

El conjunto de cavidades presenta similares morfologías, con depresiones superiores y galerías de menores diámetros que enlazan con la base de la pared del cañón externo, cuyo talweg constituye el nivel de base local. El colapso progresivo de las depresiones y la remoción de materiales amplía sus desarrollos longitudinales y ocasiona el retroceso de sus cabeceras. Las cavidades 01 á 03 alcanzan 50 á 80 m de desarrollo, y en el caso de las simas 03 y 04 los tramos de galerías inferiores han colapsado totalmente formando corredores abiertos.

En las depresiones-simas el drenaje se entalla entre los materiales desprendidos, formando nuevos conductos y pipes menores, y dejando algunos otros colgados sobre las paredes. Resulta más o menos evidente que la continuación de los procesos de piping y erosivos, acabará generando nuevos cañones y ramificaciones, en una evolución remontante que prosigue su labor disectando la planicie. Algunos remanentes de los procesos erosivos han dejado colgados fragmentos de antiguos conductos. Esto se aprecia bien en varias perforaciones que presenta el borde del cañón entre las simas 01 y 02, y en una punta saliente a 20 m al S de la boca inferior de la sima 02 (Figuras 22 á 24).

En cambio, en la pared SW del cañón (margen izquierda), no encontramos cavidades, aunque sí varias gargantas entalladas o gullies que se extienden más de un centenar de metros hacia los taludes de la meseta de Piskerra. En algunos puntos estos presentan arcos y puentes de roca, y pequeños abrigos y grutas en la base de sus paredes.

Las cavidades y cañones muestran evidencias de una actividad hídrica de carácter temporal, acorde con las condiciones de aridez propias de un clima continental semi-desértico. Sólo en el cauce del barranco principal se presentan algunos tramos con charcas de agua, que han quedado tras lluvias recientes. De igual modo en el cañón externo se aprecian zonas con eflorescencias salinas, depositadas por evaporación de las arcillas humedecidas por las lluvias.

Las precipitaciones en la Bardena Blanca alcanzan 170 mm al año, con fuertes contrastes térmicos. Las temperaturas diurnas superan los 40°C en verano y los -5°C en los meses invernales. Cabe destacar que las lluvias en realidad son poco frecuentes y muy variables, con dos máximos pluviométricos anuales; 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 erosión exporta 77,2 Tm/Ha/año de materiales arcillosos en la Bardena Blanca (Desir & Marín, 2007).

La atmósfera en las galerías subterráneas es en general seca y bien ventilada, por la existencia de corrientes de aire entre las distintas bocas y depresiones. La humectación de las arcillas tras las lluvias, es seguida por evaporación y precipitación de las sustancias disueltas, formación de espeleotemas, y desecación de las galerías (donde sólo los cauces entallados llegan a conservar algo de arcilla húmeda). La temperatura interna oscila en torno a 12-15°C, con mayor amplitud cerca de las bocas.

## **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

La presencia y desarrollo de cavidades está controlada por la existencia generalizada de procesos de tubificación o piping en los materiales arcillosos. La capacidad expansiva y el alto contenido en yeso y sales de sodio de los materiales arcillosos de la facies Las Bardenas de la Formación Tudela, facilitan la infiltración y el desarrollo de los procesos de piping, siempre que exista cierto gradiente hidráulico, lo que aparentemente se consigue con cierta facilidad en zonas de borde, cuando las paredes de barrancos y cañones alcanzan o superan los 10 m de altura.

Estas 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, colapsos y también espeleotemas de arcilla. Un alto contenido en sodio intercambiable desflocula estas arcillas, concentra el flujo de agua en las grietas y proporciona una lubricación adicional. El proceso de piping en las arcillas comienza con el transporte laminar de partículas a través de pequeñas fisuras, pudiendo ocurrir una cantidad limitada de disolución intergranular de la matriz o de las partículas, aumentando también su porosidad. 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 y formando depresiones en el plano superior.

La tendencia final del drenaje es hacia la horizontalidad, determinada por el nivel de base local impuesto por el fondo del cañón. El crecimiento volumétrico de las cavidades ocurre por excavación, colapso y remoción de los materiales desprendidos por procesos erosivos, a la vez que sigue actuando la tubificación, en una evolución remontante, con formación de cavidades en zonas progresivamente más altas y retroceso de las cabeceras de las depresiones y redes subterráneas.

En torno a la red de drenaje de superficie (de carácter o régimen hidrológico temporal) se organiza sobre amplias áreas redes menores de drenaje subterráneo, comandados por la ocurrencia de procesos de piping en arcillas. La evolución de estas y su progresivo colapso conduce a la formación de nuevos cañones y gullies, que se ramifican sobre áreas mayores de la planicie. Las cavidades descritas en esta nota son un claro ejemplo de ello, sumando 202 m de desarrollo de depresiones y galerías en las cuatro cuevas exploradas.



El trabajo aporta nuevos ejemplos sobre procesos de karstificación y formación de cavidades en arcilla, así como detalles sobre la formación y ramificación de cañones, a expensas del progresivo colapso de cavidades de piping. Nuestra principal conclusión es que la región de las Bardenas contiene un importante karst en arcilla, de características originales, y por ello de gran interés para la karstología, hidrogeología y espeleogénesis a nivel global.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos los compañeros y colaboradores que nos acompañaron en prospecciones anteriores efectuadas en la región de las Bardenas. A dos árbitros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, por la revisión crítica del manuscrito y sus útiles sugerencias.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Desir, G. & C. Marín. 2007. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). *Catena*, 71: 31-40.
- Dunne, T. 1990. Hydrology, mechanics and geomorphological implications of erosion by subsurface flow. In: Higgins, C.G. & 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-III, Los Hermanos. Cartografía Geológica de Navarra, escala 1: 25.000. Gobierno de Navarra. 97 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.
- 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.
- Striebel, T. & V. Schäferjohann. 1997. Karstification of sandstone in central Europe: Attempts to validate chemical solution by analysis of water and precipitates. In: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology*, vol. 1, Basel, Switzerland.