

**CUEVAS DEL BOJACAR: NUEVOS SISTEMAS SUBTERRÁNEOS EN ARCILLA (BARDENA BLANCA) Y  
NOTAS SOBRE SU FAUNA CAVERNÍCOLA.**

**Bojacar's caves: new subterranean systems in clay (White Bardena) and notes on its cave fauna.**



**Carlos GALÁN, Marian NIETO & Juliane FORSTNER.**  
Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.  
Mayo 2019.

# CUEVAS DEL BOJACAR: NUEVOS SISTEMAS SUBTERRÁNEOS EN ARCILLA (BARDENA BLANCA) Y NOTAS SOBRE SU FAUNA CAVERNÍCOLA.

**Bojacar's caves: new subterranean systems in clay (White Bardena) and notes on its cave fauna.**

**Carlos GALÁN, Marian NIETO & Juliane FORSTNER.**

**Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.**

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

**E-mail: cegalham@yahoo.es**

**Mayo 2019.**

## RESUMEN

El trabajo describe la exploración y estudio de dos sistemas de cavidades en arcilla, localizadas en el sector del Bojacar (flanco NE de la Punta de la Estroza, Bardena Blanca). El primer sistema comprende una red entallada de gullies, con túneles y cavidades menores y una cueva bien formada de 12 m de desarrollo. El segundo sistema consta de cuatro simas que enlazan entre sí a través de una galería colectora inferior, totalizando 184 m de desarrollo y -30 m de desnivel. Los cauces subterráneos, de régimen hídrico temporal, se extienden bajo un flanco de acentuada pendiente para emerger en el talweg de un barranco inferior. Ambos sistemas se desarrollan en arcillas y lutitas ocre y rojas de la Formación Tudela (de edad Mioceno, Terciario). Poseen espeleotemas de yeso y fauna cavernícola. Se describen y discuten los rasgos de estas cavidades en arcilla, ilustrando el trabajo con fotografía digital.

*Palabras clave:* Karst y cuevas en arcilla, Espeleología, Tubificación, Hidrogeología, Geomorfología, Biología subterránea.

## ABSTRACT

The work describes the exploration and study of two systems of cavities in clay, located in the sector of Bojacar (flank NE of Punta de la Estroza, White Bardena). The first system comprises a gullies network with tunnels and minor cavities and a well-shaped cave of 12 m of development. The second system consists of four abysses that link to each other through a lower collector gallery, totaling 184 m of development and -30 m of unevenness. The subterranean channels, of temporary water regime, extend under a flank of accentuated slope to emerge in the talweg of a lower ravine. Both systems are developed in ocher and red clay and lutites of the Tudela Formation (of Miocene age, Tertiary). They have gypsum speleothems and cave fauna. The features of these cavities in clay are described and discussed, illustrating the work with digital photography.

*Keywords:* Karst and caves in clay, Speleology, Piping, Hydrogeology, Geomorphology, Subterranean Biology.

## INTRODUCCIÓN

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 dos nuevos sistemas subterráneos, 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 son ilustrados con fotografía digital de 4 megapíxeles de resolución (Panasonic). Varias muestras de la roca-caja, espeleotemas y fauna de artrópodos fueron estudiadas en laboratorio bajo microscopio binocular (Nikon) hasta 800 aumentos.

## RESULTADOS

Las cavidades descubiertas se localizan al Este de la Punta de la Estroza (462 m snm), en territorio de Navarra. El sector, denominado El Bojacar, debe su nombre a la ocurrencia de arbustos de boj *Buxus sempervirens* L. (Buxaceae), y está situado bajo el escarpe vertical que corona la meseta y desciende en fuerte pendiente hacia la planicie inferior central de la Bardena Blanca, surcada por el Barranco Grande y una red de cañones afluentes menores. Las cavidades se encuentran en dos zonas distintas, pero próximas entre sí, a cotas de 375 y 374 m snm.

Los materiales aflorantes en la ladera corresponden a lutitas ocre y rojas de la Formación Tudela, de edad Orleaniense (Mioceno temprano, Terciario). Constituyen la unidad litoestratigráfica 369, descrita por Faci Aparicio et al (2002) y SITNA Navarra. El área contiene algunos glacis de acumulación, con gravas y cantos rodados Pleistocenos-Holocenos (unidad litoestratigráfica 517) y rellenos de fondos de valle con arcillas y limos Holocenos (unidad 527).

Las cavidades exploradas se localizan en la unidad 369, de lutitas ocre y rojas, con intercalaciones delgadas de nivelitos de caliza y/o arenisca. Su potencia alcanza 180 m y suprayace y grada sobre margas grises con yesos pertenecientes a la Formación Lerín, de edad Ageniense, Mioceno basal (unidad 356). Litológicamente se trata de una unidad muy heterogénea, de tonalidades claras, en la que predominan lutitas ocre que presentan un aspecto masivo, con tonalidades de color ocre y a veces rojizo. Los tramos basales de la serie suelen ser algo margosos; en general presentan tonalidades rosáceas, en ocasiones con intercalaciones de horizontes centimétricos oscuros.

Desde el punto de vista sedimentario estos depósitos corresponden a facies de orla distal de abanicos (en la cuenca endorreica Miocena), con desarrollo de amplias llanuras de fangos y donde de forma esporádica se localizaron episodios fluviales efímeros así como áreas lagunares donde precipitaron carbonatos (Faci Aparicio et al, 2002).

Los dos sistemas explorados se desarrollan en arcillas y lutitas ocre, en el talud de la meseta, a cotas de entre 375 y 344 m snm, en la cabecera de los barrancos que van entallando el flanco NE de la prominente punta de La Estroza. A continuación describimos las cavidades exploradas y algunos rasgos destacables de su entorno. La referencia para las coordenadas UTM es la cartografía SITNA, contrastada con datos de campo.

## DESCRIPCIÓN DE CAVIDADES

### Sistema del Bojacar 01.

Situación: A 170 m en planta al NE de la Punta de la Estroza.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.679.362; E 624.750; Altitud 375 m snm.

Dimensiones cueva: Desnivel: +2 m; Desarrollo espacial: 12 m. Figuras 01 á 11. Plano en Figura 27.

Descripción: A 90 m por debajo del plano superior de la punta de la Estroza, donde el flanco NE se suaviza y pierde inclinación, se aprecia desde lejos la presencia de dos cañoncitos o gullies profundamente entallados. En este sector los materiales arcillosos están parcialmente revestidos por glacis de acumulación Pleistocenos-Holocenos con gravas y cantos rodados de distintos tamaños que alcanzan la confluencia de los barrancos.

Entrando por la zona inferior y remontando los cañoncitos se aprecia que estos se entallan progresivamente en la ladera, al aumentar la pendiente, y forman estrechas gargantas de fondo bastante plano, con paredes de 5 á 8 m de altura y 2 m de anchura, que ascienden, pero menos abruptamente que el relieve externo. Presentan diversas oquedades, mesocavernas y algunos tramos techados por colapso de las paredes. En el cañón situado más al E, tras varias revueltas se encuentra una cueva horizontal.

La boca, de 3 m de alto, da paso a una amplia galería-meandro, de bóvedas compactas y paredes con estratos de lutitas ocre con bandeado rojizo y gris-claro. Tras 12 m de recorrido finaliza de modo abrupto en cul de sac.

Aparentemente la cavidad captura la infiltración dispersa de una serie de pequeñas depresiones en el borde externo del gully. Posee un cauce con huellas de drenaje temporal y actúa como cavidad surgente.

Por encima de la posición ocupada por la cueva el barranco asciende con mayor pendiente, con diversos colapsos, puentes de roca y tramos perforados por cortos túneles, pero de débiles dimensiones. El otro gully y la continuación inferior del barranco que sigue a su confluencia presentan también pequeñas oquedades y geofomas pero no cuevas apreciables. Estos gullies parecen haberse formado por erosión remontante a partir de pequeñas cavidades y pipes cuyos techos han colapsado.



**Figura 01.** La punta de la meseta de La Estroza avanza hacia el Este formando un espolón por donde discurre la ruta de descenso hacia los sistemas de cuevas del Bojacar.



**Figura 02.** Descendiendo desde la punta de la Estroza por la arista o espolón Este (arriba) y vista desde la arista sobre los cañoncitos entallados o gullies del sistema del Bojacar 01 (debajo). Se aprecian bloques de margas y calizas fragmentados de los estratos superiores de la serie de la Formación Tudela, en el tope de la meseta.



**Figura 03.** Gargantas entalladas o gullies del sistema del Bojacar 01, con su fondo recorrido por cauces temporales.



**Figura 04.** Cauce del gully E del sistema 01, con pequeñas oquedades y mesocavernas (arriba) y boca de la cueva de 12 m (debajo, flecha roja), en la pared E. Se aprecian rellenos de cantos rodados del glacis de acumulación.



**Figura 05.** Boca de la cueva de 12 m del sistema 01, de 3 m de alto (arriba) y vista de la galería subterránea hacia el interior (debajo), con cauce temporal de arcilla húmeda, tras lluvias recientes.





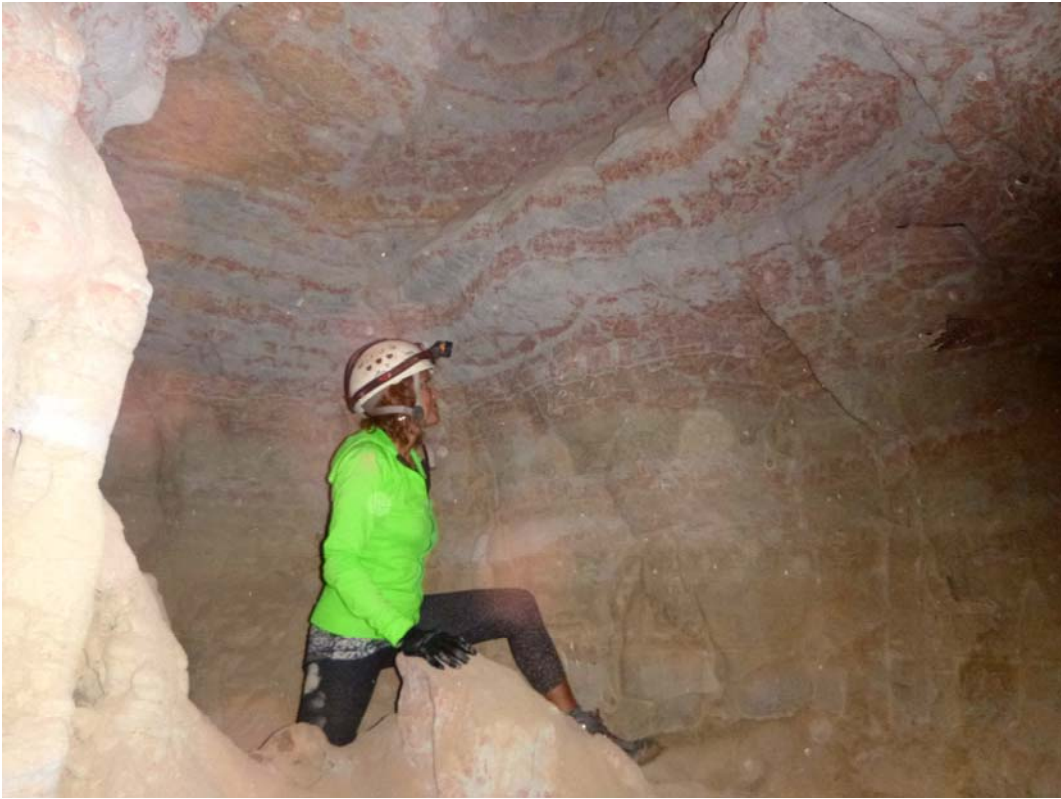
**Figura 06.** Cueva del sistema 01 del Bojacar, de paredes compactas, con bandeados de lutitas rojas, ocre y grises.



**Figura 07.** Detalles morfológicos de la cueva del sistema 01, con bandeados de lutitas de colores y cauce húmedo.



**Figura 08.** Diversos aspectos de la bóveda y paredes de la amplia galería de la cueva del sistema 01 del Bojacar.



**Figura 09.** Cueva del sistema 01 con material colapsado en la boca del gully.



**Figura 10.** Pequeños túneles y puentes de roca en el cauce superior del gully E (arriba) y explorando la cabecera del gully W, también con pequeñas cavidades, poco significativas, pero ilustrativas de los procesos de piping y erosivos.



**Figura 11.** Glacis de acumulación con cantos rodados y gravas (de edad Pleistoceno-Holoceno) recubriendo a la unidad de arcillas y lutitas ocre y rojas de la Formación Tudela (de edad Mioceno) en la que se desarrollan las cavidades y gullies del sistema del Bojacar 01.

## **Sistema del Bojacar 02.**

Situación: A 236 m en planta al ENE de la Punta de la Estroza. A 95 m al E del sistema 01.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.679.376; E 624.846; Altitud 374 m snm.

Dimensiones sistema simas: Desnivel: -30 m; Desarrollo espacial: 184 m. Figuras 12 á 26. Plano en Figura 28.

Descripción: El relieve de la punta de la Estroza, que avanza hacia el E, abre su flanco en forma de abanico, con la cabecera de pequeños barrancos convergiendo sobre su arista más prominente. Tras explorar el sistema 01, cruzamos al SE hacia un collado o arista secundaria que lo separa del siguiente barranco.

Sobre el collado se abren dos pequeños hundimientos y una boca amplia en rampa con una sima de -13 m, que enlaza con la base de otra sima, de -11 m, localizada en el flanco NE y algo más baja (cota -4 m). En su base forma una sala amplia (cota -15 m) desde donde se ve la luz de la sima 1. La sala da paso a una galería-meandro descendente que sigue hacia el SE hasta alcanzar un arrastradero con fuerte corriente de aire. La sima 2 posee además a media altura otra sima que enlaza con la galería.

Sobre el flanco, a 10 m de la sima 2, se abre la sima 3 (cota -10 m), con una vertical de -5 m. De su base plana parte una galería horizontal que, tras pasar un bloque, gira hacia el W y a los pocos metros enlaza mediante otra sima de -4 m con la galería colectora, antes del arrastradero (cota -18 m). Al lado del bloque hay otra sima interna, estrecha, que lleva a un conducto inferior.

La sima 4 se localiza a 10 m de la anterior (cota -14 m). Presenta una vertical de -12 m con dos ventanas colgadas en las paredes. La base de esta sima (cota -26 m) da paso a una galería estrecha que gira y presenta otro arrastradero, el cual comunica con la galería inferior de la cueva-surgencia. La ventana superior enlaza también con la cueva-surgencia a través de una sima en rampa y posee una bifurcación que tras un paso estrecho comunica con el meandro y la gatera con corriente de aire de la sima 2. La otra ventana es más estrecha y se bifurca, enlazando tanto con la galería-meandro como con la sima bajo el bloque de la sima 3.

La cueva surgencia se localiza en la cabecera del talweg del barranco inferior, a 55 m de la sima 1 y a -30 m de desnivel (cota 344 m snm). Una galería colectora enlaza la base de las distintas simas y conecta unas con otras, por lo que se trata de una única cavidad. Entrando por la boca inferior puede remontarse hasta un escalón vertical desde donde se divisa la luz de la ventana de la sima 4. Bajo este escalón hay una galería con cauce entallado que lleva hasta la gatera de la base de la sima 4.

Para recorrer el conjunto hay que entrar con cuerda desde las simas superiores, ya que diversos tramos subverticales dificultan el paso en sentido ascendente. La cavidad presenta varias ramificaciones y un meandro inferior entallado, con arcilla húmeda (indicador de la circulación temporal de agua), que repetidamente desaparece en laminadores bajo bloques de colapso para volver a reaparecer en los tramos inferiores. La cavidad incluye varios conductos en bypass, posee, espeleotemas aciculares y frostworks de yeso, y alcanza un desarrollo espacial de 184 m y -30 m de desnivel total (entre la boca superior y la surgencia).

El trazado de las galerías es relativamente complejo y parece corresponder a varios conductos (procedentes de las simas y de pipes adicionales) que han evolucionado entallando los cauces y dejando colgadas galerías más amplias a distintos niveles.

En la continuación inferior del barranco y otras ramas del mismo hay otras pequeñas cavidades y mesocavernas (galerías inferiores a 20 cm de diámetro), que no permiten el paso del ser humano pero que reproducen en miniatura o a menor escala los mismos rasgos de la cavidad principal. De igual modo, sobre la sima 1 hay otras dolinas y depresiones, cuyo drenaje parece derivar subterráneamente y alimentar al colector subterráneo del sistema 02. El desnivel total del sistema hidrogeológico (desde la dolina superior hasta la surgencia) alcanza -50 m.

## **BIOLOGÍA SUBTERRÁNEA**

El medio subterráneo en ambas cavidades muestra una actividad hídrica de carácter temporal, acorde con las condiciones de aridez de un clima continental semi-desértico. El promedio anual de precipitaciones en la región es de 350 mm y los contrastes térmicos son también importantes, con temperaturas que superan los 40°C en verano y -5°C en los meses invernales. Cabe destacar que las lluvias son poco frecuentes y muy variables a lo largo del año, 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 atmósfera subterránea es en general seca y bien ventilada, por la existencia de corrientes de aire entre las múltiples bocas o a través de conductos y pipes menores. 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 conservan arcilla húmeda). La temperatura interna oscila en torno a 12°C, con mayor amplitud cerca de las bocas. Las galerías se desarrollan cerca de la superficie y a menudo raíces y raicillas de la vegetación epigea alcanzan las mismas, constituyendo un importante aporte de materia orgánica, disponible para la fauna cavernícola. Aunque estos ambientes no parecen muy propicios para la ocurrencia de troglóbios o cavernícolas especializados (que requieren condiciones de alta humedad relativa), debe recordarse que se trata de una zona árida a desértica, donde la simple presencia de una mayor constancia de la temperatura ambiente, protección contra la aridez y fuerte insolación, así como la oscuridad reinante, facilitan su utilización para la reproducción y el descanso de muchas especies de artrópodos.



**Figura 12.** Confluencia de los gullies del sistema 01 (arriba) y collado al SE con la sima en rampa (boca superior) del sistema 02.





**Figura 13.** Vista desde el collado hacia la boca de la segunda sima del sistema del Bojacar 02 (arriba) y detalle de la misma (debajo). La boca-surgencia de la cavidad se encuentra al SE, en el fondo del barranco (flecha azul).



**Figura 14.** Descendiendo a la sima 2 y vista desde la sala basal de la vertical de -13 m de la sima 1.



**Figura 15.** Vertical de -11 m de la sima (con un coleóptero Scarabeidae en vuelo) y galería descendente inferior, con un cauce meandriforme entallado y bandeados de arcillas rojas y grises.



**Figura 16.** Ascenso en jumars de la sima 2. Posee una sima intermedia que comunica con la galería inferior.



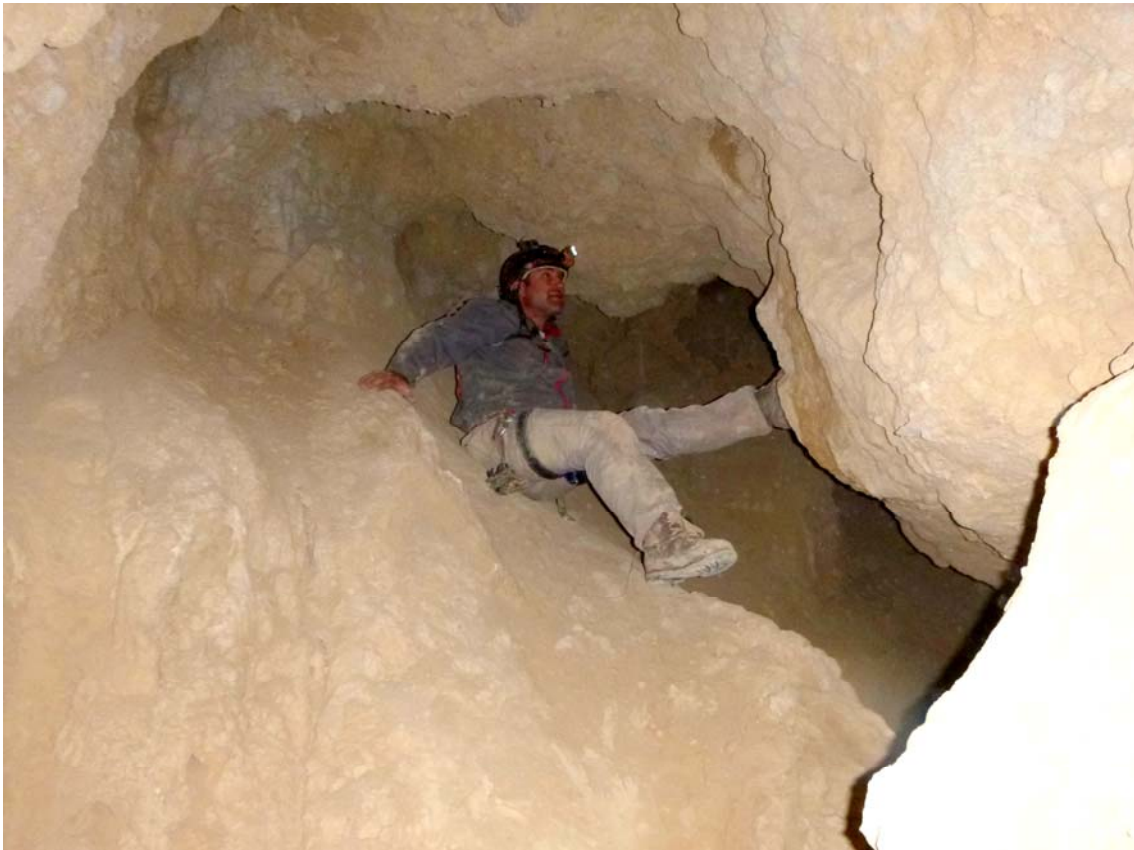
**Figura 17.** Descenso de la sima 3 y galería horizontal inferior.



**Figura 18.** Detalles de las paredes de la galería horizontal de sima 3 y vertical de -4 m de enlace con la galería meandro principal que viene de sima 2.



**Figura 19.** Galería meandro principal en la zona próxima a la gatera y ascenso de la vertical de sima 3.



**Figura 20.** Galería basal de sima 4, la cual enlaza a través de gateras con las simas 2 y 3 y con la cueva-surgencia.





**Figura 21.** Galería en rampa que enlaza la cueva-surgencia con una ventana en la sima 4. Se aprecia en el techo clastos protuberantes que parecen estalactitas y espeleotemas fluidas de arcilla.



**Figura 22.** Galería de la cueva surgencia vista desde el interior hacia el exterior (arriba) y continuación ascendente de la cueva (debajo), con algunas espeleotemas milimétricas de agujas de yeso (de coloraciones grises).



**Figura 23.** Cueva-surgencia con galería inferior y continuación ascendente hacia la ventana de la sima 4. Se aprecian raíces que alcanzan la galería. Las manchas oscuras corresponden a flujos de agua de lluvia caída durante una tormenta la noche anterior a la exploración.



**Figura 24.** Galería superior de la cueva-surgencia y detalle de una araña troglófila sobre la pared de lutitas multicolores.



**Figura 25.** Galería inferior de la cueva-surgencia la cual comunica a través de una gatera con la base de la sima 4.



**Figura 26.** Boca de la cueva surgencia y claraboya anexa, en la cabecera de un gully o barranco entallado inferior.

# Sistema del Bojacar 01



Coordenadas ETRS89, UTM30N:  
N 4.679.362; E 624.7502 Altitud: 375 m snm.  
Dimensiones cueva: Desnivel: + 2 m. Desarrollo espacial: 12 m.  
Topografía: C. Galán; M. Nieto & J. Forstner. SCA. 2019.  
Dibujo: C. Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C. Aranzadi.

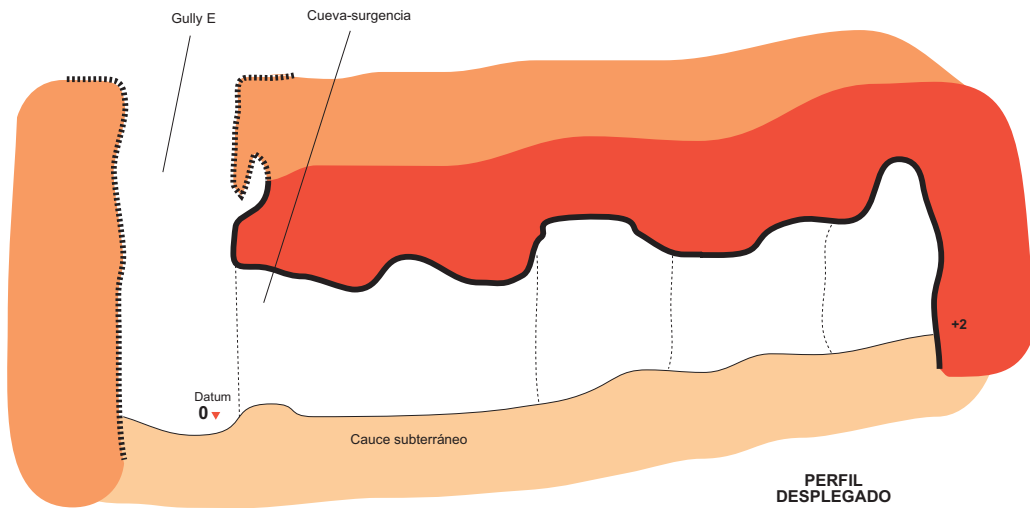
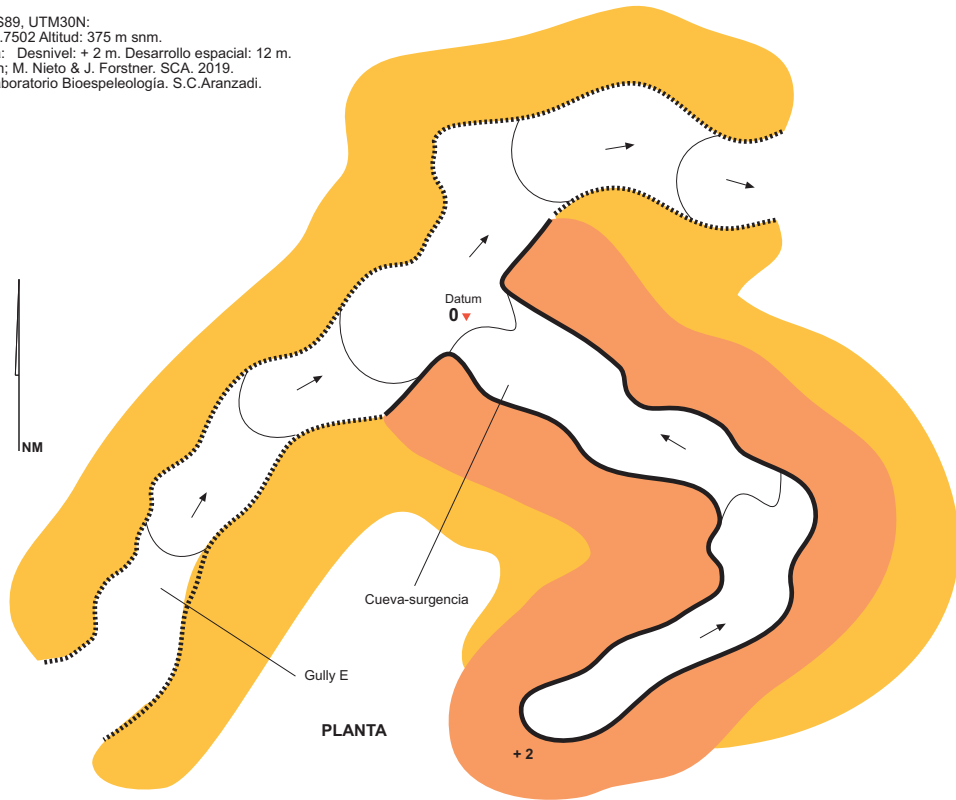


Figura 27.  
Plano de la cavidad 01.

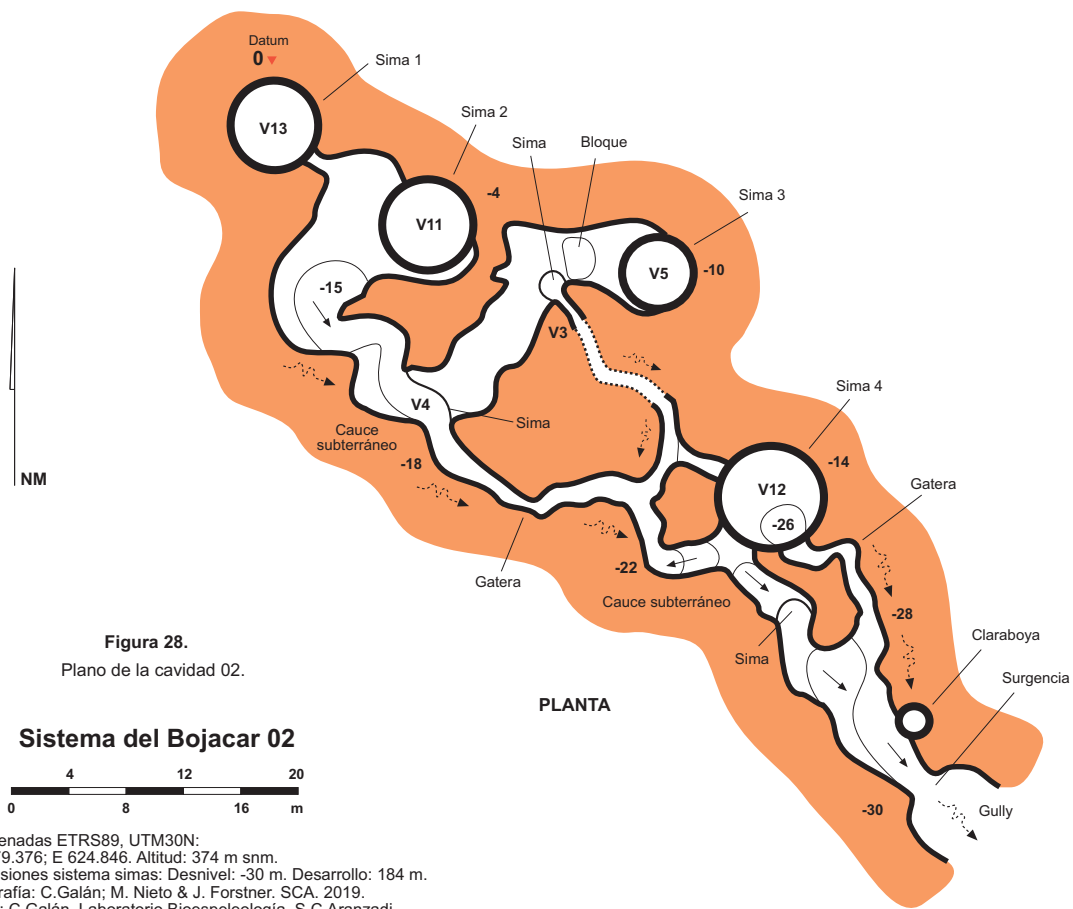
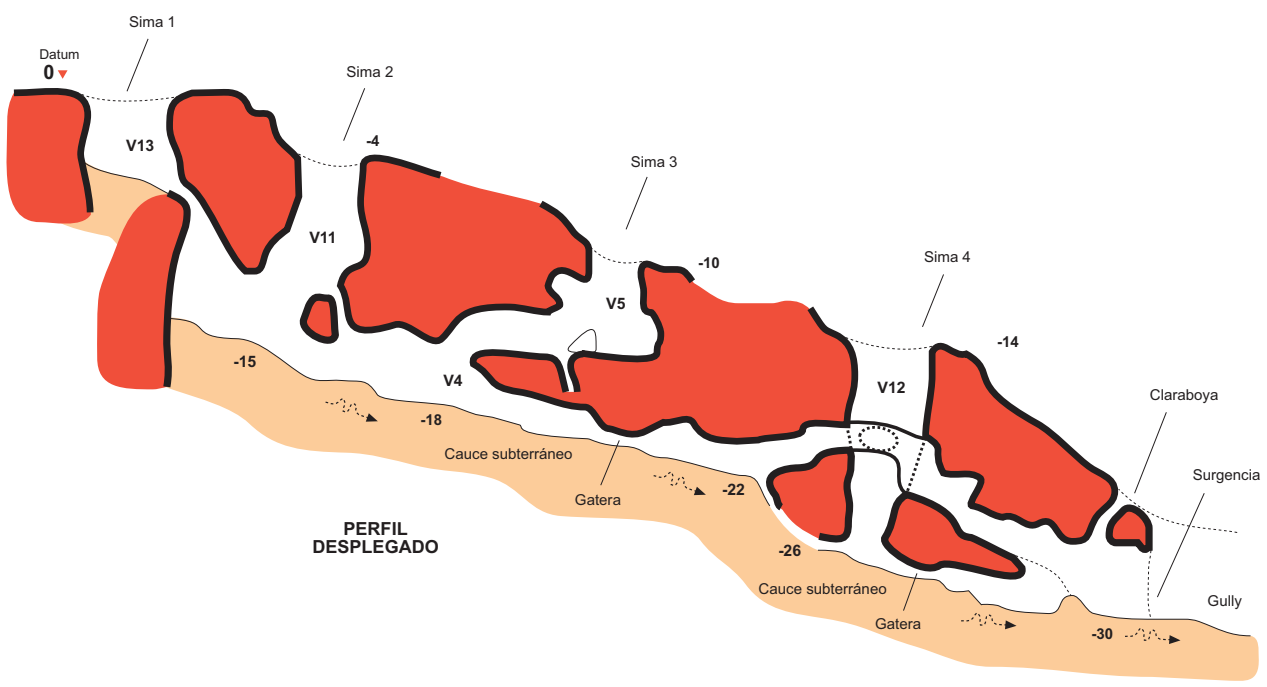


Figura 28.  
Plano de la cavidad 02.

**Sistema del Bojacar 02**

Coordenadas ETRS89, UTM30N:  
 N 4.679.376; E 624.846. Altitud: 374 m snm.  
 Dimensiones sistema simas: Desnivel: -30 m. Desarrollo: 184 m.  
 Topografía: C.Galán; M. Nieto & J. Forstner. SCA. 2019.  
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.





En la zona de entrada de ambas cavidades y base de las simas, la fauna de invertebrados incluye especies troglóxenas de araneidos, dípteros, colémbolos Onychiuridae, coleópteros Scarabeidae y Curculionidae, e himenópteros Ichneumonidae. Los más frecuentes y fácilmente observables en las zonas de entrada son araneidos. También son frecuentes conchas vacías de caracoles terrestres epigeos, de especies comunes en la región, tales como *Iberus gualterianus alonensis* y *Otala punctata* (Gastropoda: Helicidae), pero se trata de material arrastrado desde superficie por las crecidas hidrológicas y no de habitantes cavernícolas (estos caracoles son frecuentes en romerales y campos de cultivo). Ambas especies de caracoles han sido halladas previamente en otras simas de esta región de las Bardenas (Galán et al, 2018 a, 2018 b).

En zona oscura la fauna es mucho más escasa, encontrándose araneidos (con sus telas de caza y puestas de huevos o cocoons), de especies aparentemente troglófilas y hábitos predadores. Otras especies detritívoras o micrófagas incluyen especies de isópodos Porcellionidae y diplópodos Julidae.

En la cueva del sistema 02 encontramos ejemplares de isópodos terrestres *Porcellio haazi* Arcangelli (Porcellionidae), especie troglófila recientemente hallada en otra cavidad en la Bardena Negra (Galán et al, 2019). La especie es de hábitos micrófagos y se alimenta de materiales orgánicos en zonas con restos vegetales y raicillas que alcanzan la galería. Este es el segundo reporte de esta especie (frecuente en suelos y troncos en barrancos secos en la cuenca del Ebro) para el ambiente de cuevas.

Entre los diplópodos Julidae, previamente habíamos hallado en otras cuevas en los flancos de la Estroza la especie de milpiés *Cylindroiulus caeruleocinctus* (Galán et al, 2018 b). En esta ocasión, en la cueva del sistema 02 encontramos otra especie de la misma familia: *Ommatoiulus rutilans* (Koch, 1847). Se trata de un elemento europeo, propio de zonas secas, que alcanza hasta 5 cm de talla. De cuerpo cilíndrico y color marrón oscuro a rojizo, posee ocelos dispuestos en campos triangulares. De hábitos detritívoros y fitófagos se alimentan de hojas en descomposición y otra materia vegetal muerta, pudiendo también consumir hongos, por lo que juegan un importante papel en la fragmentación de la hojarasca (Blower, 1985; Spelda, 2015). Las hembras de *O.rutilans* una vez fecundadas acostumban enterrar sus huevos en galerías del suelo. Creemos que esta especie, sin modificaciones especiales para la vida hipógea, frecuente las zonas con vegetación de boj de la Estroza y utiliza el ambiente algo más húmedo de las cuevas como lugar de descanso y protección ante la aridez de superficie, donde eventualmente encuentra algunos recursos tróficos (raicillas y restos vegetales aportados por las crecidas), a la vez que un lugar adecuado para la reproducción y puesta de sus huevos. No está claro si es capaz de completar todo su ciclo de vida en la cueva (en cuyo caso entraría en la categoría ecológica de troglófilo) o si su presencia se limita a sólo algunas partes de su ciclo, completando el resto en superficie.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presencia y desarrollo de cavidades parece depender o estar controlada por la existencia generalizada de procesos de tubificación o piping en los materiales arcillosos de la Formación Tudela. La capacidad expansiva y el alto contenido en yeso y sales de sodio de los materiales arcillosos, facilitan la infiltración y el desarrollo de los procesos de piping. En zonas de talud, con materiales arcillosos poco litificados, las diferencias de cota pueden establecer un fuerte gradiente hidráulico, que facilita la formación de cavidades. Puede comprenderse que la erosión subterránea llega a ser muy importante durante las crecidas, excava el terreno, pero a la vez produce colapsos y aplastamiento de las galerías ya formadas.

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, colapsos y también espeleotemas de arcilla. Un alto contenido en sodio intercambiable desfloclula 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 (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 y pueden desarrollarse redes dendríticas. La tendencia final es a la horizontalidad, determinada por el nivel de base local impuesto por el fondo del cañón hacia el cual desaguan.

Aunque muchos conductos son de corta duración, algunos persisten el tiempo suficiente para alcanzar el tamaño de cuevas o macrocavernas, y una vez alcanzada esta etapa su persistencia en el tiempo resulta mayor, sobre todo si logran concentrar la actividad hídrica. 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 redes subterráneas.

La ocurrencia de espeleotemas, pone a su vez de manifiesto que los procesos de disolución (y precipitación de sustancias disueltas) interactúan y acompañan a los procesos de piping, por lo que no se trata simple o solamente de procesos erosivos de remoción mecánica.



**Figura 29.** Parte inferior del barranco del sistema de simas 02 y red de cañones y barrancos sobre la planicie inferior.



**Figura 30.** Pequeñas cavidades y geoformas en la red entallada de cañones y barrancos sobre la planicie.



**Figura 31.** En la red inferior de barrancos los procesos de piping coadyuvan al desarrollo de gargantas entalladas o gullies, con diversas cavidades y geoformas en sus paredes y bordes.



**Figura 32** Surcos de piping y simas que perforan los bordes de cañones y profundos barrancos. La punta Este de La Estroza al fondo.



**Figura 33.** En torno a la red de cañones sobre la planicie se desarrollan sistemas de drenaje subterráneo, con numerosas pequeñas cuevas y conductos de piping. Los colapsos de bóvedas y paredes pueden destruir las cavidades formadas, ampliar los cañones y contribuir al modelado de conjunto.



**Figura 34.** Son frecuentes en la red de cañones muy diversas geoformas, incluyendo sistemas de pequeñas cavidades y mesocavernas que reproducen en miniatura los rasgos de los sistemas mayores.

De modo conjugado con la karstificación de las arcillas se produce la formación de gullies y el modelado del relieve. La erosión normal (de superficie) comanda la evolución del relieve, generando el retroceso de los escarpes y taludes de las mesetas, formación de surcos y cárcavas, así como la incisión de la red de barrancos en las planicies y zonas bajas de la antigua cuenca endorreica. Pero en torno a esta 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 tubificación o piping en arcillas (con intercalaciones menores de nivelitos de margas) (Figuras 29 á 34). La red entallada de cañones y barrancos constituye el nivel de base local hacia el cual drenan las circulaciones subterráneas.

La litología de los materiales, su estructura, y el relieve resultante del trabajo erosivo, son factores que condicionan tanto la espeleogénesis como la diversidad de geofomas presentes en superficie. Los factores climáticos a su vez condicionan este peculiar modelado de terrenos comparativamente "blandos", que experimentan una rápida evolución temporal, a escala geológica.

Los procesos de formación de cavidades y sistemas de drenaje subterráneo en arcillas están ampliamente extendidos en la región de las Bardenas y, según muestran las prospecciones efectuadas pueden alcanzar gran extensión en los flancos y taludes de las mesetas (Galán, 2015; Galán et al, 2018 a, 2018 b, 2019), aunque también hay gran número de cavidades de modestas dimensiones en torno a la red de barrancos de las planicies.

Los sistemas del Bojacar, estudiados en este trabajo, muestran la diversidad de situaciones que pueden presentarse durante la espeleogénesis y evolución posterior de las cavidades, ya que se trata de sistemas complejos, de dinámica no-lineal, donde la roca-caja y los rellenos detríticos son sometidos reiteradamente a piping y erosión. El sistema 01 es un claro ejemplo de co-evolución entre el desarrollo de gullies y cuevas, mientras el sistema 02 muestra la creación de simas, a lo largo de un flanco, asociadas a una galería colectora que conecta con una cueva-surgencia que constituye la cabecera de un barranco inferior.

Estas cavidades constituyen a la vez un hábitat subterráneo extenso, que puede servir de refugio a una amplia variedad de invertebrados y vertebrados de hábitos variablemente cavernícolas, los cuales buscan la humedad y la sombra bajo las inclementes condiciones climáticas del desierto. En los sistemas del Bojacar 01 y 02 encontramos una diversa representación de invertebrados, que incluyen diversas especies troglóxenas de caracoles terrestres, araneidos, dípteros, colémbolos, coleópteros e himenópteros, así como poblaciones aparentemente troglófilas de araneidos, isópodos Porcellionidae y diplópodos Julidae.

El trabajo aporta nuevos ejemplos sobre procesos de karstificación y formación de cavidades en arcilla, así como detalles de interés biológico y geomorfológico. Nuestra principal conclusión es que estamos en presencia de un notable karst en arcilla, poco conocido y 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 y de modo especial para este trabajo a Iñigo Herraiz, quien participó en una de las salidas para topografiar el sistema 02. A dos árbitros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, por la revisión crítica del manuscrito y sus útiles sugerencias.

## BIBLIOGRAFÍA

- Blower, J.G. 1985. Millipedes: Keys and Notes for the Identification of the Species. Synopses of the British Fauna. Linnean Society of London.
- 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.; I. Herraiz & A. Miner. 2018 a. 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.
- Galán, C.; M. Nieto & I. Herraiz. 2018 b. Nuevos sistemas de cavidades en los taludes de la meseta de la Estroza (Bardena Blanca). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 44 pp.
- Galán, C.; M. Nieto & J. Forstner. 2019. Tripa Azul: un nuevo sistema de simas en arcilla de edad Mioceno (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 42 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.
- Spelda, J. 2015. Orden Julida. Ibero Diversidad Entomológica (Sociedad Entomológica Aragonesa) (27 A): 1-18.
- 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.