

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y GEOCRONOLÓGICA DE CAVIDADES KÁRSTICAS EN EL PARQUE NACIONAL DE LOS PICOS DE EUROPA: INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA

MONTSERRAT JIMÉNEZ-SÁNCHEZ¹, DANIEL BALLESTEROS²,
JOAQUÍN GARCÍA-SANSEGUNDO¹, SANTIAGO GIRALT³, MÓNICA MELÉNDEZ ASENSIO⁴,
MARÍA JOSÉ DOMÍNGUEZ-CUESTA¹, LAURA RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ⁵

RESUMEN

Uno de los rasgos más singulares del patrimonio geológico del Parque Nacional de los Picos de Europa es el espectacular desarrollo del endokarst, que incluye una red de conductos subterráneos de más de 470 km de longitud, descubiertos por grupos espeleológicos y apenas conocida desde el punto de vista científico. Para caracterizar este patrimonio geomorfológico y geocronológico se han investigado dos cavidades kársticas de más de 2 km de longitud (Torca la Texa y El Frailín de Camplengu). La metodología de trabajo diseñada combina métodos espeleológicos (topografía, modelización, morfometría) con métodos geológicos (cartografía geológica, geomorfológica, geocronología, análisis estructural). Los resultados muestran que: 1) las cuevas están constituidas por conductos freáticos y epifreáticos, cañones y pozos vadosos y pasajes modificados por procesos de gravedad, con formas de origen fluvio-kárstico, de gravedad y de precipitación química; 2) el desarrollo de las cavidades está controlado por el encajamiento de la red fluvial, el glaciario, el clima, la estructura geológica y las diferentes litologías del sustrato y 3) la historia geomorfológica de las cuevas consta de seis fases, y su origen es anterior al Pleistoceno Medio. El conocimiento científico adquirido ha sido transferido al OAPN, pero también a la comunidad científica, al Parque Nacional de los Picos de Europa y a distintos sectores sociales, con la realización de una tesis doctoral, varias publicaciones científicas especializadas, la impartición de conferencias y ponencias, la realización de audiovisuales divulgativos y la aparición en los medios convencionales de comunicación. Así, se ha cumplido con el doble propósito de realizar investigación y generar acciones de transferencia a las administraciones públicas y a la Sociedad.

Palabras clave: karst, endokarst, cuevas, patrimonio geológico, geomorfología, geocronología, Picos de Europa.

¹ Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, c/Arias de Velasco, s/n, 33005 Oviedo.

² UMR 6266 IDEES, Université de Rouen-Normandie-CNRS, 7 de Rue Thomas Becket, 76821, Mont Saint-Aignan, Francia.

³ Instituto Ciencias de la Tierra Jaume Almera (ICTJA-CSIC), c/ Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona.

⁴ Instituto Geológico y Minero de España. Unidad de Oviedo, c/ Matemático Pedrayes, 25, 33005 Oviedo.

⁵ Laboratoire de Géographie Physique (UMR 8591, CNRS), Meudon, Francia.

GEOMORPHOLOGICAL AND GEOCHRONOLOGICAL CHARACTERIZATION OF KARST CAVES IN THE PICOS DE EUROPA NATIONAL PARK: RESEARCH AND TRANSFER OF KNOWLEDGE

ABSTRACT

Karst caves are one of the most prominent features of the Picos de Europa National Park, in which more than 470 km length of cave passages discovered by speleologists, are still poorly known from the scientific point of view. This project has contributed to enhance the value of geoheritage linked to endokarst, with the geomorphological and geochronological study of two karst cavities, more than 2 km long («Torca la Texa» and «El Frailín de Camplengu»). The methodology of work combines speleological methods (topographic, morphometric and 3D models of the cavities) and geological methods (geomorphological a geological mapping, geochronology, structural analysis). The results of the project show that: 1) caves are formed by phreatic and epiphreatic passages, vadose shafts and canyons, and gravity enlarged passaged, in which fluviokarst, gravity and chemical precipitation forms appear; 2) the development of the cavities is controlled by fluvial network incision, glacial action, climate change and the geological bedrock (structure and lithology); 3) the evolution model of the caves includes six phases, and the origin of the caves is prior to 350 ka (Middle Pleistocene). The information of the project provides a robust base of scientific knowledge that has been transferred to the OAPN, and also to the scientific community, the Picos de Europa National Park and to different social sectors and media, with the elaboration of a doctoral thesis, scientific publications, conferences, appearance in social media and design of educational videos. Therefore, we have reached the double aim of research development and transfer of knowledge to the Administration and Society.

Keywords: karst, endokarst, caves, geoheritage, geomorphology, geochronology, Picos de Europa.

INTRODUCCIÓN

La preocupación creciente por la conservación del medio natural ha provocado un incremento de los esfuerzos científicos encaminados a su estudio y conocimiento. Habitualmente, los espacios naturales son valorados en función de su riqueza florística y faunística, en suma, por su biodiversidad. Sin embargo, en los últimos tiempos, y cada vez con más frecuencia, los criterios de conservación basados en el reconocimiento del valor patrimonial de la geodiversidad contribuyen a promover la creación, conservación y revalorización de espacios naturales protegidos, entre los que destacan los asociados a áreas kársticas. El reconocimiento de la singularidad del patrimonio geológico y geomorfológico de estas áreas ha contribuido a su inscripción en la Lista de Patrimonio de la Humanidad (Williams, 2008). Este es el caso de las Cuevas de Agttelek Karst y el Slovak Karst, con 712 cavidades identificadas, el espectacular karst del Sur de China o el Parque Nacional de Mammoth Cave (UNESCO, <http://whc.unesco.org/en/list/bienes> 725, 1248 y 150 respectivamente), aparte de otros espacios relacionados con el desarrollo del karst y con su ocupación humana prehistórica, como la Cueva de Altamira y el Arte Paleolítico del Norte de España, inscrito en 1985 y ampliado en 2008 (<http://whc.unesco.org/en/list/310>), o el Yacimiento Arqueológico de Atapuerca (inscrito en 2000, <http://whc.unesco.org/en/list/989>).

Los paisajes kársticos se caracterizan por su gran complejidad, ya que integran rasgos, valores y procesos naturales tanto superficiales como subterráneos, y de origen tanto biótico como abiótico. El conocimiento del patrimonio abiótico subterráneo (geológico y geomorfológico) implica el estudio e inventario de las peculiaridades geomorfológicas e hidrológicas de las cavidades y de los procesos que controlan su dinámica pues, como ya han mostrado diferentes trabajos, deben ser conocidas y consideradas para la gestión de los espacios naturales protegidos (WILLIAMS 2008, HARLEY *et al.*, 2011, BALLESTEROS *et al.*, 2015a). Por otra parte, los depósitos de las cuevas (espeleotemas y sedimentos detríticos) pueden ser contemplados como archivos naturales que reflejan la propia historia geomorfológica y paleoclimática de la cavidad y del sistema kárstico en el que se enclava y que, además, permiten realizar una

aproximación a su edad mediante el empleo de diferentes técnicas de datación (WALKER, 2005). De este modo, se podrá contribuir a establecer la historia evolutiva de las cuevas y del macizo kárstico en que se encuentran, lo que genera un conocimiento básico relevante como valor añadido en aquellas zonas amparadas por figuras de protección.

El Parque Nacional de los Picos de Europa, con una superficie de 674,5 km² que abarca parte de las autonomías de Asturias, Cantabria y Castilla-León, posee un patrimonio natural que le ha hecho merecedor del reconocimiento de distintas figuras de protección, no sólo de ámbito nacional, sino también supranacional. Así, además de la figura de Parque Nacional (declarado como tal en 1918, y ampliado posteriormente en 1995 y 2014 hasta su actual extensión) ostenta el título de Reserva de la Biosfera, otorgado por la UNESCO en 2003. A ello han contribuido sus valores faunísticos y botánicos, pero también sus rasgos geológicos y geomorfológicos. Así, entre las singularidades del Parque, está su patrimonio geológico y geomorfológico, marcado por el espectacular desarrollo del karst, que ha sido objeto de diversos estudios en los últimos años (GONZÁLEZ TRUEBA & SERRANO CAÑADAS 2008; BALLESTEROS *et al.*, 2013; 2015a; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2014). El fenómeno kárstico se encuentra magníficamente representado en este espacio natural, cuyo sustrato geológico está constituido mayoritariamente por calizas carboníferas densamente fracturadas (MERINO TOMÉ *et al.*, 2009 y referencias citadas en él), que afloran constituyendo los roquedos característicos de las zonas más elevadas del parque y condicionan el desarrollo de extraordinarias manifestaciones kársticas, tanto subaéreas como subterráneas. Así, a la importancia de las dolinas y lapiazes de origen kárstico, se suman formas tan singulares y visitadas por el público, en las que al desarrollo del karst se superpone el glaciario, como los emblemáticos Lagos de Covadonga, el polje de los Llanos de Comella o las espectaculares depresiones glaciokársticas o Jous de las zonas más altas, que le confieren al Parque incluso una toponimia peculiar y exclusiva (JIMÉNEZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2014). Sin embargo, parte del extraordinario valor del patrimonio geomorfológico de la zona viene dado por el espectacular desarrollo de cavidades subterráneas, cuatro

de las cuales (Torca Urriellu, el Sistema del Hitu, la Red de Toneyu y la Torca del Cerro) han sido declaradas Monumento Natural por el Principado de Asturias por sus excepcionales valores tanto geológico como natural (Decretos 17 a 20/2003, BOPA nº 75 del 29 de marzo). En conjunto, el endokarst está constituido por más de 470 km de conductos subterráneos conocidos, que incluyen el 14% de las cuevas del mundo con más de 1 km de desnivel (BALLESTEROS *et al.*, 2013; 2015a).

La finalidad concreta del proyecto «Caracterización geomorfológica y geocronológica de cavidades kársticas en el Parque Nacional de los Picos de Europa» ha sido contribuir al conocimiento del patrimonio kárstico subterráneo del Parque, mediante la caracterización geomorfológica y geocronológica de dos cavidades kársticas. Más concretamente, se han abordado un conjunto de objetivos desde una perspectiva doble: la generación de datos científicos y la transferencia de la investigación.

Los objetivos relacionados con la generación de datos científicos son los siguientes: 1. Caracterizar las cavidades desde el punto de vista geomorfológico, con la

identificación, descripción y establecimiento de la distribución espacial de las distintas formas presentes en las cavidades kársticas. 2. Caracterizar las cavidades desde el punto de vista geocronológico, lo que supone la realización de dataciones cronológicas absolutas para obtener su edad. 3. Establecer la influencia de los factores geológicos (litológicos, estructurales) y geomorfológicos en el origen de las cuevas. 4. Establecer un modelo de evolución y desarrollo temporal de las cavidades (historia espeleogenética) que integre los datos anteriores en términos de cronología relativa y de cronología absoluta. Por otra parte, se aborda un quinto objetivo, que pretende transferir el conocimiento generado al Organismo Autónomo Parques Nacionales, a la comunidad científica y a la sociedad en general.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se han estudiado dos cavidades kársticas, denominadas Torca la Texa (2.200 m de longitud, 215 m de desnivel) y El Frailín de Camplengu (2.326 m de longitud, 247 m de desnivel), localizadas en el entorno de los Lagos de Covadonga, en el NO de los Picos de Europa (Figura 1), y se ha definido, para cada una de ellas, un entorno de trabajo de 45 km² de extensión.



Figura 1. Localización de las dos cavidades objeto de estudio y de la zona de estudio definida a su alrededor.

Figure 1. Setting of the two karst cavities and the study site

La caracterización geomorfológica de las cavidades se realizó utilizando una combinación de métodos espeleológicos (elaboración del plano de las cavidades y su modelización 3D y análisis morfométrico) y geológicos (cartografía geomorfológica de las cuevas y descripción de formas y depósitos). El plano o topografía de las cuevas se confeccionó en un SIG a escala 1:500 mediante el método espeleológico (BALLESTEROS *et al.*, 2015b), empleando el distanciómetro láser DistoX1 (HEEB 2009) para la medición de 977 visuales topográficas entre 962 estaciones topográficas. Los datos se procesaron mediante la aplicación informática Compass, que permitió también la elaboración del modelo 3D de las cuevas, considerando prismas octogonales definidos individualmente entre estaciones topográficas sucesivas (FISH 2001). Esta información topográfica fue analizada morfométricamente para definir la geometría de las cuevas. Para ello se calcularon 14 índices y parámetros morfométricos (KLIMCHOUK 2006; PARDO-IGUZQUIZA *et al.*, 2011; PICCINI 2011), se analizó la distribución de los conductos de las cuevas frente a la altitud (FILIPPONI *et al.*, 2009; PARDO-IGUZQUIZA *et al.*, 2011), y se definieron los grupos de conductos en función de su dirección e inclinación (BALLESTEROS *et al.*, 2014). La cartografía geomorfológica de las cavidades de estudio se elaboró en SIG, a escala 1:500 mediante trabajo de campo, y siguiendo las clasificaciones previas de formas de las cuevas kársticas (JIMÉNEZ-SÁNCHEZ *et al.*, 2011). Las formas de las cuevas fueron ubicadas sobre la topografía espeleológica, representándolas de manera diferente dependiendo de su localización en el suelo, paredes y techo de las cuevas. Esta cartografía fue complementada por un catálogo con 22 formas del endokarst, basado en las 40 descripciones in situ de formas y depósitos, 16 cortes estratigráficos elaborados en el interior de las cuevas de estudio, así como 25 descripciones de espeleotemas mediante microscopía óptica.

Para realizar la caracterización geocronológica de las cavidades se realizaron modelos de cronología relativa, basados en superposición de formas, así como dataciones absolutas (BALLESTEROS *et al.*, 2015, 2019). La obtención de estas edades numéricas se estableció a partir de 26 dataciones $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ de muestras de espeleotemas, tomadas en las cavidades de estudio y en Pozo Lluçia, perteneciente al Sistema de Torca la Texa (Tabla 1). Las dataciones fueron realizadas por espectrometría alfa en el Insti-

tuto de las Ciencias de la Tierra Jaume Almera (IC-TJA-CSIC). Además, se obtuvieron edades mínimas de 350.000 años en tres espeleotemas cuya edad supera el límite del método de datación del U/Th.

Muestra	Referencia del Laboratorio	Edad (ka BP)
TEX-01	5511	156±12
TEX-02	5311	65±6
TEX-03	5711	181±21
TEX-04	5811	>350
TEX-21	3313	109±7
TEX-24B	1914	95±6
TEX-26	3413	1,33±0,09
TEX-29	6814	13±1
LL-04	1614	17±1
LL-13	6914	78±3
LL-14	1115	9,8±0,4
LL-15	2215	126±11
LL-17	715	116±8
LL-18	415	12±9
LL-20	1615	259±59
LL-21	615	63±3
LL-22	1315	22±2
LL-23	1215	10±1
LL-24	1715	45±3
FR-03	714	>350
FR-09	2014	100±6
FR-10	1415	>350
FR-11	515	182±10
FR-12	1815	124±20
FR-13	1515	300±46
FR-14	2015	219±20
FR-15	815	205±19
FR-16	2715	287±36
FR-17	915	>350
FR-18	1015	192±45

Tabla 1. Edades de espeleotemas obtenidas en el sistema kárstico de Torca la Texa (Cuevas de Torca la Texa, notación TEX y Pozo Lluçia, notación LL) y El Frailín de Camplengu (notación FR).

Tabla 1. Speleothems ages obtained in Torca la Texa system (Torca la Texa, and Pozo Lluçia caves, sample labels TEX and LL) and El Frailín de Camplengu (sample labels FR).

Para establecer el papel de las discontinuidades en el origen y desarrollo de las cavidades de estudio se realizó el análisis estructural de las discontinuidades del macizo kárstico, con la medida de la orientación y buzamiento de las familias de diaclasas. Para ello se diseñó y aplicó un método innovador, denominado SpeleoDisc (BALLESTEROS *et al.*, 2014), que permite comparar la posición de las discontinuidades con las mediciones topográficas de las cuevas para establecer la relación existente entre ellas.

La integración de todos los datos obtenidos, junto con otros datos geológicos y geomorfológicos de carácter regional y global, permitió la propuesta de un modelo evolutivo de las cuevas coherente con los conocimientos existentes de la historia geológica y geomorfológica de los Picos de Europa (BALLESTEROS *et al.*, 2019). El modelo integra las distintas fases de evolución definidas por los principales eventos geomorfológicos de-

tectados en las cuevas, así como por las edades de los espeleotemas y sedimentos fluviales y la información geomorfológica regional.

RESULTADOS

Caracterización geomorfológica de las cavidades

El plano (Figura 2A) de Torca La Texa comprende 2,6 km de conductos subterráneos dispuestos de forma horizontal, inclinada y vertical, tal y como muestra el modelo 3D de la cavidad (Figura 2B). El perfil desarrollado de la cueva (Figura 2C) muestra que estos conductos están situados entre 1.305 y 1.090 m de altitud, presentando por tanto un desnivel de 215 m. Su geometría es compleja, con galerías horizontales comunicadas entre sí por rampas y pozos de hasta 50 m de alto. Por su parte, El Frailín

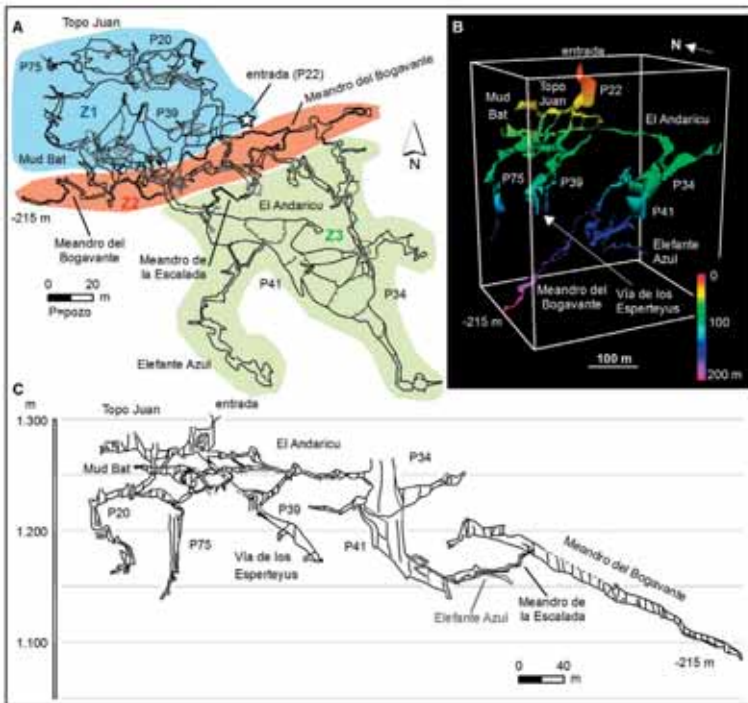


Figura 2. Geometría de Torca La Texa: A Topografía espeleológica (planta). B Modelo tridimensional visto desde el SO. C Perfil desarrollado.

Figure 2. Geometrical features of Torca La Texa: A Speleological map. B Tridimensional (3D) model (view from SW). C Cave projected section.

de Camplengu está constituida por 2,7 km de conductos ubicados entre 1.331 y 1.086 m s.n.m., con un desnivel de 247 m entre la entrada de la cueva y su punto más profundo (Figura 3). La sima está formada principalmente por galerías de dirección NO-SE que se disponen consecutivamente entre sí. Los parámetros e índices morfométricos calculados estiman el volumen de Torca La Texa en 81.555 m³, 1,2 veces el volumen de El Frailín (64.244 m³), mientras que el área de Torca La Texa (5.858 m²) es ligeramente inferior a la de El Frailín de Camplengu (6.572 m²). Estas diferencias en cuanto a volúmenes y áreas de las cuevas derivan de las diferencias geométricas existentes entre las secciones transversales de los conductos. Torca La Texa presenta principalmente conductos de sección subredondeada, coeficiente de asimetría (R) de 0,79 y un ancho y alto promedio de 1,01 y 1,71 m, respectivamente. Además, Torca La Texa presenta grandes pasajes,

de entre 20 y 50 m de diámetro, que contribuyen a incrementar el volumen de la cavidad. Por su parte, El Frailín de Camplengu presenta galerías esbeltas (más altas que anchas) con 0,55 de coeficiente de asimetría (R), 3,02 m de ancho medio y 10,13 m de altura media.

A partir de las direcciones e inclinaciones topográficas de las cuevas, los conductos se clasifican en grupos con el fin de caracterizar su disposición espacial y permitir, con posterioridad, establecer el control estructural de acuerdo con el método SpeleoDisc (BALLESTEROS *et al.*, 2014). Estadísticamente, las direcciones e inclinaciones de los conductos kársticos de las cuevas muestran semejanzas entre sí, con valores de dirección media de 91,1 ° -105,3° y de inclinación media de 20,4 ° -32,0°. A partir de la totalidad de los datos de ambas cavidades, se han definido seis grupos de conductos. El grupo A (10 % del total) incluye pozos con 83° de

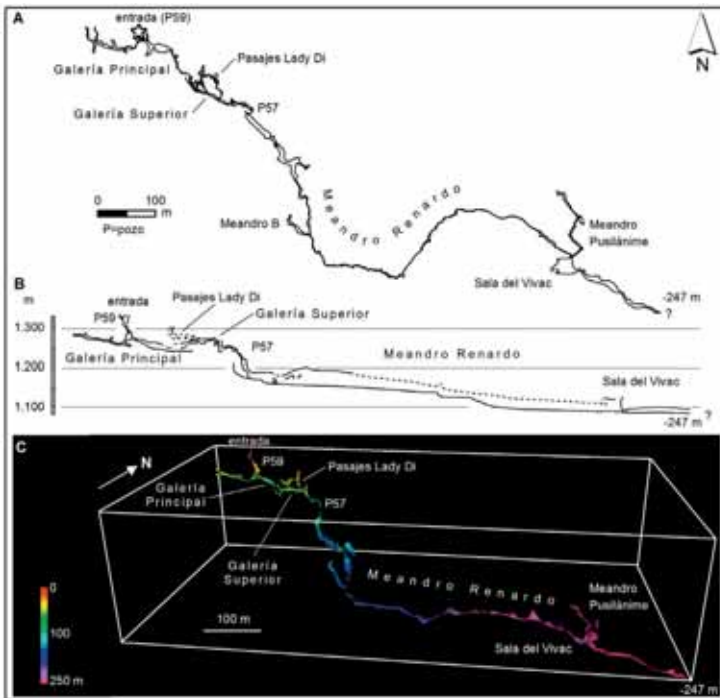


Figura 3. Geometría de la Cueva El Frailín de Camplengu: A Topografía espeleológica (planta). B Perfil desarrollado. C Modelo tridimensional visto desde el S.

Figure 3. Geometrical features of El Frailín de Camplengu: A Speleological map. B Cave projected section. C Tridimensional (3D) model (view from S).

inclinación media; el grupo B (14 % del total), muestra orientación N64°O, y se identifica sólo en Torca La Texa; el grupo C (14 % del total) comprende galerías subhorizontales de dirección N86°E; el grupo D (12 % del total) incluye galerías subhorizontales de dirección N132°O; el grupo E (20 % del total), con galerías subhorizontales de dirección N-S; por último, el grupo F (25 % del total) incluye galerías subhorizontales de dirección N127°E, existentes únicamente en El Frailín de Camplengu.

Las cuevas de estudio están constituidas por dos tipos principales de conductos espeleogénéticos: cañones y pozos vadosos, y conductos freáticos/epifreáticos (Figura 4). En ellos se reconocen formas fluviokársticas menores, espeleotemas y formas de gravedad. Los cañones y pozos predominan los de tipo sinuoso, de entre 10 y 900 m de largo, entre 0,3 y 3,0 m de ancho y de hasta 60 m de alto. Por ellos suele discurrir encajado un río subterráneo con un caudal de hasta 4 l/s y velocidades aproximadas de entre 0,1 y 1 m/s. Los pozos vadosos se corresponden con los conductos subverticales de las cuevas y presentan una anchura de entre 0,4 y 30 m y una altura

de hasta 100 m. Los conductos freáticos/epifreáticos representan el 45 % de los conductos de las cavidades de estudio. Están formados por pasajes de hasta 250 m de largo y de 0,5-2 m de diámetro. Su dirección media es O-E y son frecuentemente ondulados. Su inclinación varía entre 3 y 32° hacia el SE, con tramos ascendentes y descendentes de hasta 15 m de desnivel. Los conductos freáticos/epifreáticos se organizan en tres niveles de cuevas (Figura 5): nivel 1, situado a 1.238-1.275 m s.n.m., nivel 2, ubicado a 1.140-1.180 m s.n.m. y nivel 3, localizado a 1.083-1.096 m s.n.m. Los niveles 1 y 2 han sido identificados en las dos cuevas de estudio mientras que el nivel 3 solamente en El Frailín de Camplengu. Estos niveles de cuevas se inclinan 2-9° hacia el SE, hacia donde convergen los conductos freáticos/epifreáticos, coincidiendo con los antiguos flujos de aguas freáticas deducidos a partir de las marcas de corriente.

Caracterización geocronológica de las cavidades

Las 26 edades U/Th obtenidas en espeleotemas varían entre 1,33±0,09 ka y 300±46 ka BP, siendo las relativamente más frecuentes las ubicadas dentro del

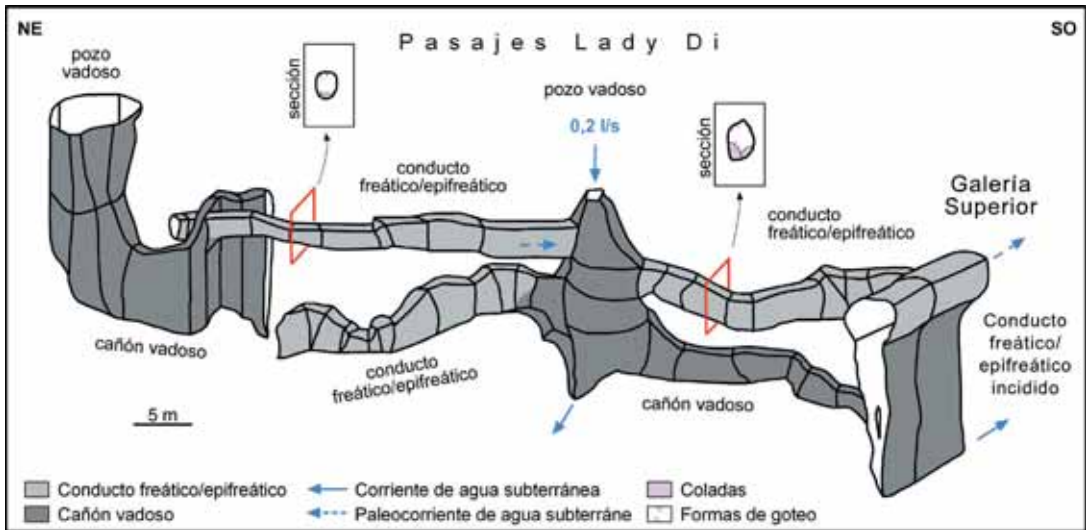


Figura 4. Modelo 3D del nivel superior de El Frailín de Camplengu mostrando conductos freáticos/epifreáticos interceptados por los cañones y pozos vadosos y conductos freáticos/epifreáticos incididos.

Figure 4. 3D model of upper cave level of El Frailín de Camplengu, showing phreatic/epiphreatic passages intercepted by vadose canyons and shafts and incised phreatic/epiphreatic passages.

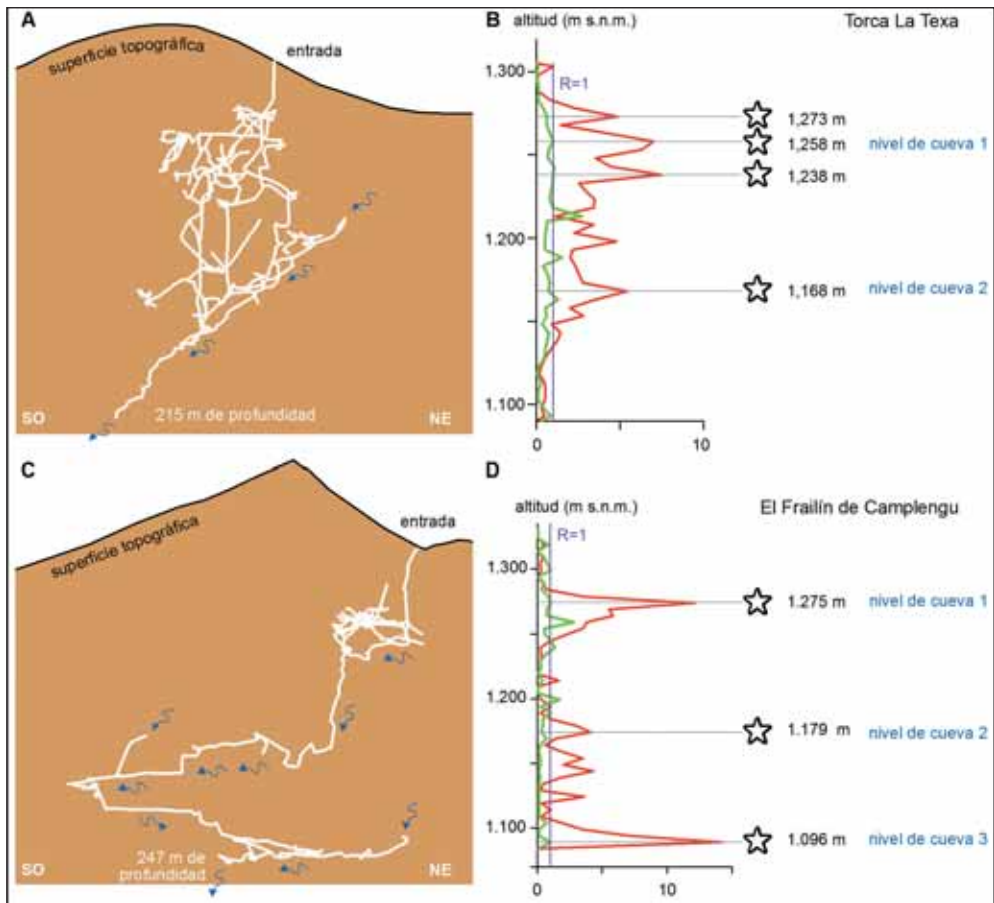


Figura 5. Perfiles proyectados sobre un plano de dirección N45°E de las cuevas y distribución vertical del porcentaje de conductos y del coeficiente de asimetría considerando la longitud real de las coordenadas polares. A, B Torca La Texa. C, D El Frailín de Camplengu.

Figure 5. Projected sections of the caves along N45°E and vertical distribution of passages percentage and asymmetry coefficient considering real length of polar coordinates. A, B Torca La Texa. C, D El Frailín de Camplengu.

rango de 10-200 ka (Tabla 1). Las relaciones espaciales entre los espeleotemas datados y otras formas de las cuevas permiten aproximarse a la distribución temporal de los procesos fluvio-kársticos, de precipitación química y de gravedad. Por ejemplo, en el cañón vadoso de la figura 6A, se ha datado una colada (Figura 6B) cuya edad es inmediatamente posterior al depósito sedimentario de origen fluvial que cobija.

La Figura 7 muestra los datos cronológicos y las evidencias de campo permiten establecer cuatro

generaciones de espeleotemas, que van desde hace más de 350 ka hasta la actualidad. En la figura se indican las edades obtenidas frente a la altitud de cada depósito datado, así como la barra de error de la datación y los depósitos que datan, pre-datan y post-datan cada datación. La primera generación (Pleistoceno Medio) representa el comienzo de los procesos de precipitación de espeleotemas e integra coladas y una estalagmita que están situadas sobre la superficie de los conductos freáticos/epifreáticos o sobre depósitos de gravedad o fluviales (repre-



Figura 6. A. Conducto freático/epifreático incidido perteneciente a la Galería Superior, cuya geometría original está parcialmente enmascarada por la presencia de coladas (El Frailín de Camplengu); imagen cortesía de S. Ferreras. B Colada colgada recubriendo sedimentos de terraza fluvial. C Muestra FR-16 de la colada de B mostrando su laminación interna. La edad de esta colada se estableció en 287 ± 36 ka BP.

Figure 6. A Incised phreatic/epiphreatic passage from the «Galería Superior» sector (El Frailín de Camplengu) in which the original geometry is partially masked by flowstones (image by S. Ferreras). B Hanging flowstone covering fluvial terrace sediments. C Sample FR-16 taken from the flowstone mentioned in B showing its internal lamination. The age of this flowstone was established in 287 ± 36 ka BP.

sentados con colores marrón y naranja respectivamente en la Figura 7). La segunda generación de espeleotemas (220-145 ka; MIS7-6; Pleistoceno Medio a Superior) precipita generalmente sobre depósitos de terraza fluvial, depósitos de derrubios y espeleotemas de la primera generación. La tercera generación (125-45 ka; MIS 5-4; Pleistoceno Superior) incluye espeleotemas que precipitaron en secuencias lacustres endokársticas (representados con colores rojizos en la Figura 7), sobre las paredes de

los cañones vadados, o sobre cicatrices de depósitos de terraza fluvial, bloques desprendidos o sobre espeleotemas previos; además, esta tercera generación es coetánea al depósito local de sedimentos fluviales en determinados pasajes subterráneos. Finalmente, la cuarta generación de espeleotemas (<25 ka; MIS 2-1; Pleistoceno Superior-Holoceno) se ubica en cañones vadados y otros tipos de conductos, sobre depósitos de aguas tranquilas o espeleotemas previos de la tercera generación.

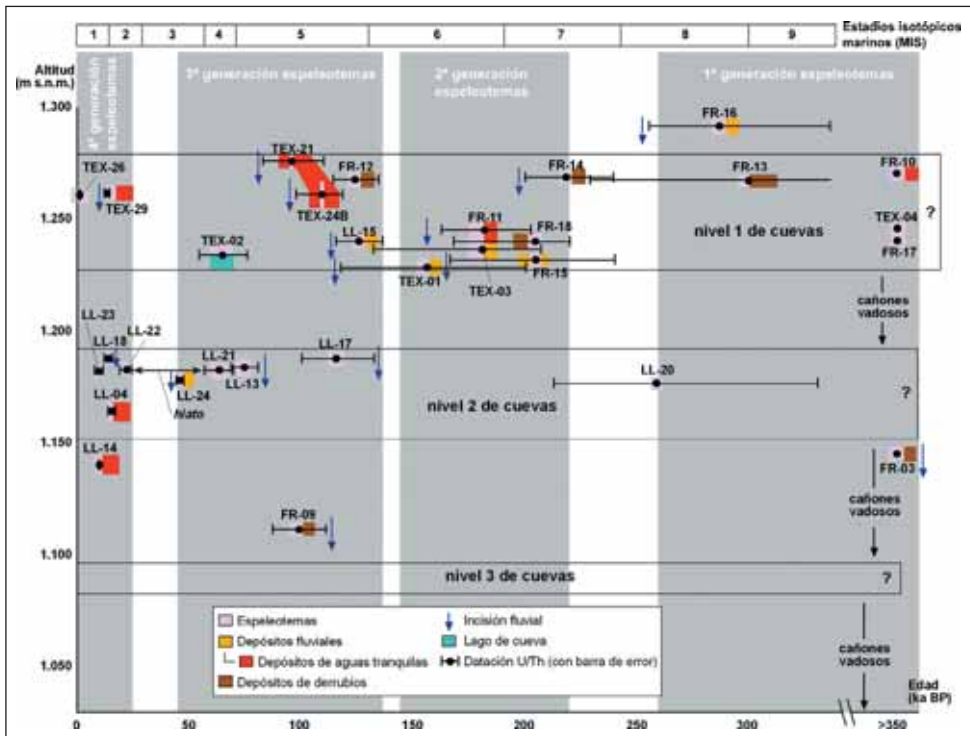


Figura 7. Edades U/Th de los espeleotemas situados según su altitud (m s.n.m.) actual, mostrando con la barra el error de cada datación. Esquemáticamente se detalla el proceso que cada datación predata y posdata (sedimentación fluvial, incisión fluvial y procesos de gravedad).

Figure 7. Relationships between U/Th ages of speleothems and altitude (m.a.s.l.), showing the bars with dating errors. The processes predated and postdated by each numerical age are also shown (fluvial sedimentation, fluvial incision and gravity processes).

Factores espeleogénéticos

La cartografía geomorfológica de la zona de estudio evidencia que el relieve ha evolucionado por procesos kársticos, glaciares, gravitacionales, periglaciares y nivales, que han generado principalmente valles y depósitos glaciares y algunas depresiones glaciokársticas. Localmente, se reconocen importantes depósitos de gravedad, ambientes lacustres y palustres restringidos a determinadas depresiones cerradas o a depósitos *kame* represados por morrenas glaciares. La distribución de estas formas y la de las cuevas no guarda una relación preferente, lo que sugiere que las cuevas deben de ser las más antiguas de las formas del relieve. Únicamente, algunas doli-

nas parecen haberse desarrollado en relación con la presencia de cavidades en el sustrato.

Los mapas y cortes geológicos evidencian que las cuevas se encuentran en las calizas masivas y estratificadas de las formaciones Valdeteja y Picos de Europa. Las rocas estefanienses, cuyos afloramientos eran más extensos en el pasado, constituyeron parte de las áreas fuente de los sedimentos presentes en las cuevas estudiadas. El control estructural tiene gran importancia a escala local (escala de cueva) debido a la gran dispersión en la orientación y buzamiento de las estructuras y a la presencia local de pliegues. La comparación realizada mediante el método SpeleoDisc (BALLESTEROS *et al.*, 2014) entre

los grupos de conductos identificados y la posición de las discontinuidades pone de manifiesto que el desarrollo de los conductos ha seguido las intersecciones de planos de diaclasas y estratificación. Las diaclasas participaron en la formación de casi todos los conductos de las cuevas de estudio, mientras que la estratificación sólo participó en la génesis de los grupos A, C y E de conductos previamente definidos, que representan el 48 % de la longitud total de las cuevas analizadas.

Evolución geomorfológica de las cuevas

Las cuevas de estudio se han desarrollado en relación con el encajamiento de los ríos Cares y Casañó y con el levantamiento tectónico/isostático de los Picos de Europa, desde, al menos, el Pleistoceno Medio y, muy probablemente, desde el Plioceno. El modelo evolutivo propuesto incluye seis fases: (1) desarrollo de los niveles de cuevas de 1.238-1.275, 1.140-1.180 y 1.083-1.096 m s.n.m., presumiblemente durante el Plioceno y hasta el Calabriense; (2) comienzo del dominio de las condiciones vadosas en el Pleistoceno Medio, con la formación de la mayor parte de los cañones y pozos vadosos y los pasajes modificados por gravedad; (3) relleno sedimentario de las cuevas entre 225 y 145 ka (MIS7-6); (4) vaciado de las cuevas entre 125 y 45 ka (MIS 5-3), con fenómenos locales de sedimentación fluvial; (5) pausa en la karstificación entre aproximadamente 42 y 24 ka (MIS 3-2); y (6) reactivación de la karstificación y desarrollo de la cuarta generación de espeleotemas desde hace 22 ka (MIS 2-1).

DISCUSIÓN

La caracterización geomorfológica y geocronológica de cuevas kársticas, y del macizo kárstico en que se enclavan, puede ser establecida eficientemente mediante una metodología multidisciplinar que combina de manera innovadora técnicas específicas de la espeleología, geomorfología, geología estructural, estratigrafía, geocronología y el empleo de Sistemas de Información Geográfica. De entre las innovaciones realizadas en el proyecto destaca el método SpeleoDisc, que ha permitido relacionar cuantitativamente la estructura geológica con el desarrollo de las cuevas. La metodología desarrollada en este proyecto es clave para la realización de

investigaciones posteriores en el medio subterráneo del Parque Nacional y en otros ambientes similares.

Desde el punto de vista geomorfológico, Torca La Texa y El Frailín de Camplengu son cuevas alpinas con un patrón ramificado, con un predominio de la componente horizontal sobre la vertical. Están formadas por 5 grupos de conductos: A (conductos subverticales), B (conductos inclinados 40° al NO), C, D, E y F, formados por pasajes subhorizontales de dirección N86°E, N132°W, N-S y N127°E, respectivamente. Las cavidades están desarrolladas en su mayoría en las calizas masivas y estratificadas de las formaciones Valdeteja y Picos de Europa y su morfología está controlada fundamentalmente por la intersección entre planos de diaclasas y estratificación, con un predominio de la influencia del diaclasado.

Desde el punto de vista geocronológico, las técnicas de datación utilizadas han permitido una aproximación a la edad de las cavidades y los procesos que determinan su evolución, en un contexto complejo en que la aplicación de geocronología absoluta reviste gran dificultad. Las dataciones U/Th mediante espectrometría alfa proporcionan las edades de los espeleotemas, permitiendo establecer la cronología de las cuevas alpinas, fundamentalmente entre 225.000 y 10.000 años (Pleistoceno Medio a Superior), siendo estos datos complementados por las primeras dataciones OSL obtenidas en cavidades kársticas del Parque Nacional, que van desde los 10.000 a los 68.000 años. Con esta información, se ha podido asignar edades numéricas al modelo espeleogenético establecido, que consta de seis fases evolutivas, la primera de las cuales podría encontrarse en el Plioceno.

Los productos generados en este proyecto proporcionan herramientas prácticas para el uso y gestión del conocimiento en el Parque Nacional de los Picos de Europa. Así, se dispone por primera vez de una base cartográfica en SIG que integra datos tanto del medio subterráneo como de superficie, un catálogo de formas del endokarst y una base de datos cronológicos entre los que están las primeras dataciones OSL de cuevas del Parque Nacional.

El proyecto ha permitido generar contribuciones científicas relevantes a nivel nacional e internacional, diseñar herramientas específicas de divulgación y alcanzar difusión a través de los medios de comu-

nicación. Con todo ello se ha logrado la transferencia de conocimiento a la comunidad científica tanto nacional como internacional, al Parque Nacional, al OAPN y a diversos sectores de la Sociedad.

Transferencia de resultados

La información generada dentro del proyecto que ha sido transferida al Organismo Autónomo Parques Nacionales, incluye todos los datos cartográficos (mapas geológico, geomorfológico y de fracturación del exokarst; cartografía geomorfológica y topografía de las cavidades escogidas) en el formato *shape* para su manejo en Sistema de Información Geográfica, un catálogo de formas reconocidas en las cavidades kársticas, la base de datos cronológicos absolutos y los modelos de reconstrucción de la historia geomorfológica reciente de las cavidades, además de un audiovisual para divulgación.

En el ámbito científico, se elaboró una Tesis Doctoral, 12 publicaciones especializadas dirigidas a la comunidad científica, tres de ellas en la revista *Geomorphology*, incluida en el *Journal Citation Report* (BALLESTEROS *et al.*, 2014, 2015b, 2017) y 10 contribuciones a congresos nacionales e internacionales. Una de las publicaciones científicas fue premiada con la distinción «Primer Premio en la I Convocatoria del premio a la mejor contribución científica de socios jóvenes de la SEG», por la Sociedad Española de Geomorfología, y una contribución a congreso obtuvo el «Accésit al premio a la mejor comunicación referida al territorio español», presentada en el V Simposio Internacional sobre el Karst, por la Academia Malagueña de Ciencias.

También se realizaron distintas acciones de difusión científica. En el ámbito de la Administración General del Estado, específicamente del Organismo Autónomo Parques Nacionales, así como del Parque Nacional de los Picos de Europa, se presentaron cuatro ponencias, una en las XII Jornadas de difusión de proyectos (Daimiel, 18-20 de octubre de 2016), otras dos en el curso «Patrimonio Geológico en la Red de Parques Nacionales: el Parque Nacional de los Picos de Europa. Desarrollando la Red» (Cangas de Onís, 5-7 octubre de 2016 y 3-6 de octubre de 2017), y una cuarta en la reunión mantenida

con la Dirección y Personal del Parque Nacional de los Picos de Europa (Cangas de Onís, 25 de enero de 2017).

En lo que respecta a la transferencia a la sociedad y divulgación, se impartieron 7 conferencias dirigidas principalmente a usuarios del Parque Nacional y se editaron dos vídeos divulgativos. Uno de los vídeos, financiado dentro de las acciones previstas en el proyecto, se titula «Las cuevas del Parque Nacional de los Picos de Europa: una historia por descubrir» (<https://goo.gl/wNnQnG>), y fue galardonado con la Mención de Honor en el Certamen Ciencia en Acción XVIII (Modalidad «Trabajos de Divulgación Científica. Libros, Revistas y Redes Sociales»). El segundo vídeo fue realizado por la Oficina de Comunicación de la Universidad de Oviedo en el marco del programa TESELAS, emitido el 17 de junio 2016 por la Televisión del Principado de Asturias (<https://goo.gl/wX12Uc>). Finalmente, el proyecto fue objeto de interés en 15 noticias de prensa.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Organismo Autónomo Parques Nacionales la financiación del proyecto «Caracterización geomorfológica y geocronológica de cavidades kársticas en el Parque Nacional de Picos de Europa» (referencia 580/12, acrónimo GEOCAVE). También agradecemos la atención, apoyo e interés del Dr. Miguel Menéndez de la Hoz y del resto del personal del Parque Nacional de los Picos de Europa involucrado en la gestión del proyecto. A los equipos espeleológicos, su atención y su trayectoria a lo largo del tiempo, que nos ha permitido acceder al medio subterráneo de los Picos de Europa, especialmente a los Grupos Espeleológico Polifemo, Grupo de Espeleología Diañu Burlón, GEMA y GES Montañeiros Celtas. A Belén Naves Ramos, su apoyo a lo largo de la realización del proyecto. Agradecemos también a la Fundación para el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología (FICYT) del Principado de Asturias la financiación de la beca-contrato del Programa de ayudas predoctorales Severo Ochoa (referencia BP10/119) que posibilitó la realización de la Tesis Doctoral de Daniel Ballesteros en el marco del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLESTEROS, D.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; GARCÍA-SANSEGUNDO, J. 2013. Patrimonio geológico subterráneo en espacios naturales protegidos: caracterización geomorfológica preliminar de sistemas kársticos profundos en el Parque Nacional de los Picos de Europa (España). En: J. Vega, A. Salazar, E. Díaz-Martínez & C. Marchán (eds.) Cuadernos del Museo Geominero, 15. Patrimonio geológico, un recurso para el desarrollo. pp. 361-370. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- BALLESTEROS, D.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; GARCÍA-SANSEGUNDO, J.; BORREGUERO, M. 2014. SpeleoDisc: A 3-D quantitative approach to define the structural control of endokarst. An application to deep cave systems from the Picos de Europa, Spain. *Geomorphology* 216: 141-156.
- BALLESTEROS, D.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; DOMÍNGUEZ-CUESTA, M.J.; GARCÍA-SANSEGUNDO, J.; MELÉNDEZ-ASENSIO, M. 2015a. Geoheritage and geodiversity evaluation of endokarst landscapes: the Picos de Europa National Park, North Spain. En: B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Durán, P. Jiménez & J.W. LaMoreaux (eds.) *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. pp. 619-627. Springer. Berlin.
- BALLESTEROS, D.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; GIRALT, S.; GARCÍA-SANSEGUNDO, J.; MELÉNDEZ-ASENSIO, M. 2015b. A multi-method approach for speleogenetic research on alpine karst caves. Torca La Texa shaft, Picos de Europa (Spain). *Geomorphology* 247: 35-54.
- BALLESTEROS, D.; GIRALT, S.; GARCÍA-SANSEGUNDO, J.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M., 2019. Quaternary regional evolution based on karst cave geomorphology in Picos de Europa (Atlantic Margin of the Iberian Peninsula). *Geomorphology* 336: 133-151.
- FISH, L. 2001. Computer modeling of cave passages. *Compass Tape* 15: 19-24.
- FILIPPONI, M.; JEANNIN, P.-Y.; TACHER, L. 2009. Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology* 106: 86-99.
- GONZÁLEZ-TRUEBA, J.; SERRANO CAÑADAS, E. 2008. La valoración del patrimonio geomorfológico en espacios naturales protegidos. Su aplicación al Parque Nacional de los Picos de Europa. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 47: 175-194.
- HARLEY, G. L.; POLK, J. S.; NORTH, L. A.; REEDER, P.P. 2011. Application of a cave inventory system to stimulate development of management strategies: The case of west-central Florida, USA. *Journal of Environmental Management* 92:2547-2557.
- HEEB, B. 2009. An all-in-one electronic cave surveying device. *Cave Radio Electronics Group J.* 72: 8-10.
- JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; DOMÍNGUEZ-CUESTA, M.J.; ARANBURU, A.; MARTOS, E. 2011. Quantitative indexes based on geomorphologic features: A tool for evaluating human impact on natural and cultural heritage in caves. *Journal of Cultural Heritage* 12: 270-278.
- JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; BALLESTEROS, D.; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, L.; DOMÍNGUEZ-CUESTA, M.J. 2014. The Picos de Europa National and Regional Parks. En: F. Gutiérrez & M. Gutiérrez (eds.) *Landscape and Landforms of Spain*. pp 155-163. Springer. Berlin.
- KLIMCHOUK, A. 2006. Cave un-roofing as a large-scale geomorphic process. *Speleogenes. Evol. Karst Aquifers* 4: 1-11.
- MERINO-TOMÉ, O.; BAHAMONDE, J.R.; COLMENERO, J.R.; HEREDIA, N.; VILLA, E.; FARIAS, P. 2009. Emplacement of the Cuera and Picos de Europa imbricate system at the core of the Iberian-Armorican arc (Cantabrian Zone, north Spain): New precisions concerning the timing of arc closure. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 729-751.

- PARDO-IGUZQUIZA, E.; DURÁN-VALSERO, J.J.; RODRÍGUEZ-GALIANO, V. 2011. Morphometric analysis of three-dimensional networks of karst conduits. *Geomorphology*, 132: 17-28.
- PICCINI, L. 2011. Recent developments on morphology analysis of karst caves. *Acta Carsologica* 40: 43-52.
- WALKER, M. 2005. Quaternary dating methods. Wiley. New York. John Wiley & Sons. Chichester. 304 pp.
- WILLIAMS, P. 2008. A global review of Karst World Heritage Properties: present situation, future prospects and managements requirements. IUCN. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2008-037.pdf>

