

LOS CONJUNTOS MORFOLÓGICOS DE FLUJO ASCENDENTE (*Morphologic Suite of Rising Flow*) EN LA COVA DES PAS DE VALLGORNERA (Llucmajor, Mallorca)

por Antoni MERINO ^{1,2} y Joan J. FORNÓS ²

Resumen

La presencia de Conjuntos Morfológicos de Flujo Ascendente es uno de los criterios más importantes a la hora de identificar procesos de espeleogénesis hipogénica en una cavidad. En el presente trabajo se describen los conjuntos morfológicos presentes en la Cova des Pas de Vallgornera, lo que viene a documentar la participación de una recarga basal de origen hipogénico en la génesis de la cueva, además de los consabidos procesos de alimentación hídrica meteórica y de mezcla de aguas en un acuífero costero instalado en una plataforma de karst eogenético.

Abstract

The presence of Morphologic Suite of Rising Flow is a crucial criterion when processes of hypogene speleogenesis must be identified in a cave. The aim of this paper is to describe this morphological assemblage found in Cova des Pas de Vallgornera, what sheds light on the participation of a deep-seated recharge of hypogenic origin in the cave genesis in addition to meteoric water recharge and the coastal mixing zone processes, in a coastal aquifer installed in an eogenetic karst platform.

Introducción

Desde el descubrimiento de las nuevas galerías y salas que forman el sector Descobriments 2004 (MERINO *et al.*, 2008), se han venido sucediendo toda una serie de hallazgos de nuevas morfologías y espeleotemas que han ido arrojando luz sobre la compleja y dilatada espeleogénesis de la Cova des Pas de Vallgornera. Entre éstos cabe destacar las morfologías ligadas a fenómenos de disolución de sentido ascendente presentes sobre las paredes, techos y suelos de las galerías y salas de la cavidad. Estas morfologías, denominadas en inglés *Morphologic Suite of Rising Flow*, Conjunto Morfológico de Flujo Ascendente, han sido descritas por KLIMCHOUK (2007, 2009). Según este autor estas formas de características peculiares estarían ligadas a mecanismos de corrosión de origen hipogénico, provocados por flujos transversales ascendentes, teniendo cada una de estas formas unas funciones hidrológicas específicas. Este conjunto morfológico estaría formado básicamente por: puntos de alimentación (*feeders*), morfologías de techo y pared y puntos de descarga (*outlets*).

En fechas recientes se han publicado diversos trabajos llevados a cabo en la cavidad (GINÉS *et al.*, 2008, 2009a, 2009b; GRÀCIA *et al.*, 2009a, 2009b) donde

se describen los *rising wall channels* y se mencionan también los *feeders*. En el presente trabajo se pretende describir en detalle los conjuntos de formas de flujo ascendente que se han localizado en la cavidad, así como su situación y presencia en las distintas partes de la cueva; se describirán asimismo toda una serie de características y morfologías asociadas que suelen estar también presentes en cavidades de origen hipogénico, aunque no son exclusivas de éstas, como puedan ser las galerías cegadas (*dead ends*) o los tabiques de roca (*partitions*), así como la interacción con otras formas características de la espeleogénesis ligada al karst litoral. Con ello se intenta aportar nuevos datos y pruebas que demuestren la implicación en la espeleogénesis de la cavidad de una recarga basal de origen hipogénico.

Puntos de alimentación (*feeders*)

Los *feeders* han sido descritos como conductos verticales o subverticales a través de los cuales los fluidos más ligeros y agresivos circulan en sentido ascendente de un nivel basal o inferior a otro situado directamente sobre él. Esta morfología se localizaría en la parte inferior del sistema de flujo transversal (KLIMCHOUK, 2007).

1 Grup Espeleològic de Llubi

2 Karst and Littoral Geomorphology Research Group. Universitat de les Illes Balears

En la Cova des Pas de Vallgornera este conjunto de formas se encuentra representado en la cavidad por los *feeders* puntuales, *feeders* con aspecto de grieta o fractura y *feeders* laterales. Estas morfologías se desarrollan en general en el suelo de las galerías y están distribuidos de manera aislada por numerosos puntos de la cavidad.

Los *feeders* puntuales (Figura 1) suelen presentar una boca de aspecto elíptico y en algunos casos circular; sus dimensiones son muy variables yendo desde unos pocos decímetros hasta 1 m de diámetro mayor. La parte interna presenta una forma tubular de aspecto irregular (Figura 2).



Figura 1: Antiguo *feeder* situado en el suelo de una galería. Actualmente se trata de un respiradero, *vent*, que en fases anteriores y en condiciones freáticas actuó como un *feeder*. Se puede apreciar su forma tubular y los depósitos multicolores adosados a sus paredes. Este hecho es muy común y en la cavidad se encuentran múltiples ejemplos de ello. (Foto A. Merino).

Figure 1: Former *feeder* located in the floor of a passage. Currently it is a *vent* that in former stages and in phreatic conditions acted as a *feeder*. Its tubular shape is clearly seen as well as ferromanganese deposits coating the walls. This assemblage is quite common and it is widely represented throughout the cave. (Photo A. Merino)

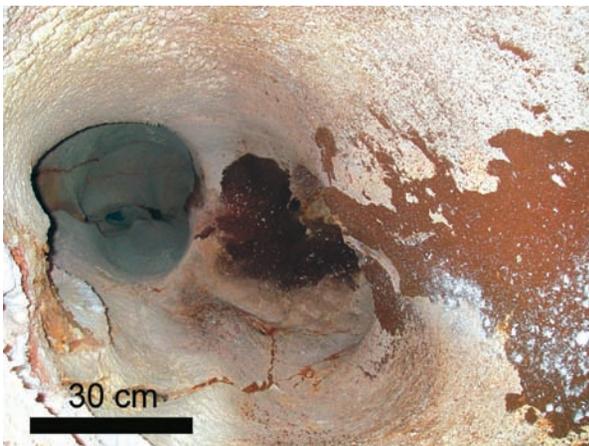


Figura 2: Antiguo *feeder* vertical de forma tubular cuyas paredes están afectadas por un proceso de degradación de la roca. (Foto A. Merino).

Figure 2: Former tubular-shaped vertical *feeder* whose walls are affected by weathering processes. (Photo A. Merino)

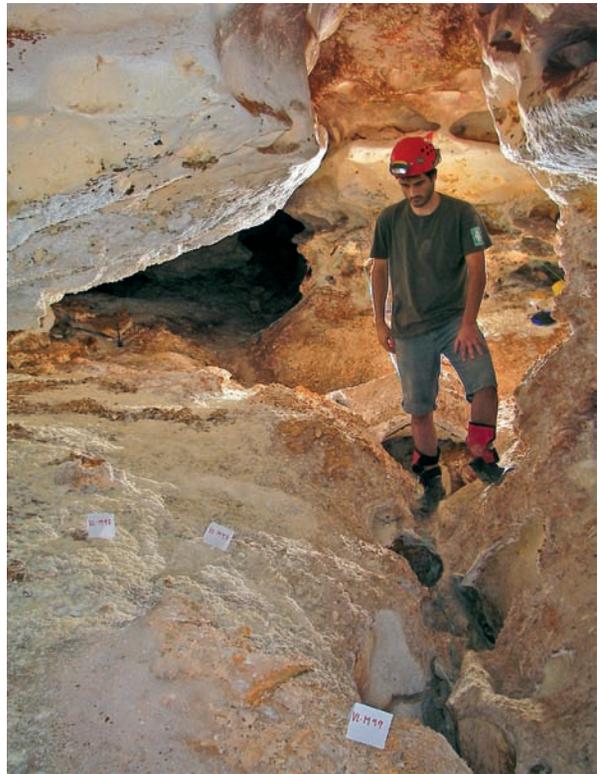


Figura 3: Fractura sobre la que se observa un conjunto de *feeders* a lo largo del suelo de una galería. (Foto A. Merino).

Figure 3: Group of *feeders* developed along a fissure in the floor of a gallery. (Photo A. Merino)



Figura 4: Antiguo *feeder* que ha evolucionado a un respiradero, *vent*, con la boca rodeada por depósitos minerales, *rim*, precipitados en condiciones aéreas. (Foto A. Merino).

Figure 4: Former *feeder* turned into a *vent*, with a rim of minerals deposited in vadose conditions around its mouth. (Photo A. Merino)

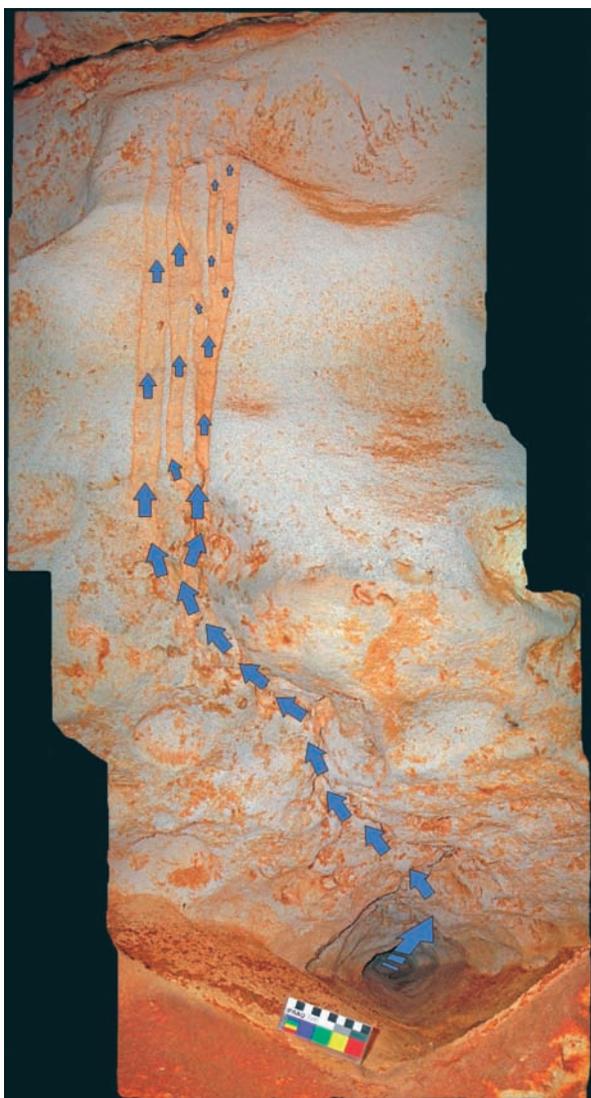


Figura 5: *Feeder lateral*. En la foto se puede apreciar un conjunto completo de morfologías hipogénicas de flujo ascendente. Las flechas indican la dirección de los flujos hipogénicos a lo largo de su recorrido. (Foto A. Merino).

Figure 5: *Side feeder*. A complete set of hypogenic morphologies of rising flow is plainly observed. Arrows indicate the hypogenic flows direction along its path. (Photo A. Merino)

Los *feeders* con apariencia de fractura o grieta (Figura 3) alcanzan varios metros de longitud, prolongándose a lo largo de numerosas galerías donde conforman el suelo irregular de las mismas, llegando en ocasiones a tener hasta 1 m de anchura.

Tanto los *feeders* puntuales como los *feeders* con apariencia de fractura o grieta se hallan ampliamente representados en casi todos los sectores de la cavidad, tanto en las galerías del nivel superior como en las que se localizan en el actual nivel freático. En el sector F, situado unos 5 m por encima del nivel freático, se han localizado galerías que se sitúan sobre otras del Sector del Clypeaster (MERINO *et al.*, 2008); aquéllas presentan en el suelo conjuntos de *feeders* puntuales y otros del tipo fractura que pondrían en comunicación ambos niveles de galerías a través de los *outlets* localizados en el techo de las galerías del nivel inferior. En algunos

lugares esta comunicación se ha podido establecer de manera clara, aunque debido a las reducidas dimensiones que presentan ambas morfologías no se ha podido pasar físicamente de un nivel a otro. Estos tipos de *feeders* suelen presentar en muchos casos un estadio evolutivo complejo que puede considerarse avanzado, consecuencia de la propia historia espeleogenética de la cavidad. Estas morfologías han sido producidas en condiciones freáticas, es decir cuando la cueva se encontraba total o parcialmente sumergida. A estos estadios les han sucedido otros con un descenso del nivel freático, lo que ha provocado que estos tubos hayan quedado en muchos casos expuestos al aire en galerías secas. En determinadas circunstancias y condiciones estas formas han servido para canalizar los movimientos convectivos del aire entre diferentes niveles de la cavidad, lo que ha dado lugar a la precipitación de una costra mineral, *rim*, (Figura 4) alrededor de la boca del conducto-respiradero, *vent* (MERINO, 2006; MERINO *et al.*, 2009a, 2009b).

Por último los *feeders* laterales (Figura 5) están distribuidos por casi todos los sectores de la cavidad y en sus distintos niveles. Se trata de morfologías localizadas en las paredes de las galerías a distintas alturas, formadas por conductos de dimensiones variables, que rara vez exceden de un 1 m de eje máximo, siendo su parte más interior de menores dimensiones que la parte más externa. Es posible observar como el conducto desarrollado desde un punto en el interior de la roca va ganando anchura y altura hasta llegar a la galería (Figura 6). La sección de estos tubos es variable, encontrándose desde formas más o menos circulares, subrectangulares hasta romboidales; en el techo de estos conductos existe una acanaladura que a modo de grieta o canal pone en comunicación la parte más interna de esta morfología con la pared de la galería.

Morfologías de techo y pared: canales ascendentes de pared (*rising wall channels*), cúpulas y canales de techo (*ceiling channels*)

Las morfologías de techo y paredes incluyen entre otros, canales ascendentes de disolución (*rising wall channels*), cúpulas y canales de techo (*ceiling channels*); estas estructuras ponen en contacto los *feeders* con los *outlets*, siendo por lo tanto morfologías que indican un flujo en sentido ascendente (KLIMCHOUK, 2007).

Estas morfologías son muy abundantes en toda la cavidad, destacando la abundancia de *ceiling channels*, canales de techo, en el nivel superior de la cueva. Los *rising wall channels*, canales ascendentes de disolución, ya fueron descritos en esta cavidad (GINÉS *et al.*, 2008, 2009a, 2009b; GRÀCIA *et al.*, 2009a, 2009b). Se trata de estructuras de dimensiones muy variables que ponen en comunicación los *feeders* con los *outlets* o con dis-

tintos tipos de cúpulas (Figuras 5, 6). Los conjuntos más característicos están formados por un *feeder* lateral, en cuyo techo existe un surco que a modo de grieta lo recorre en toda su longitud desde su parte más interna; tiene forma sinuosa y su profundidad es muy variable. Al llegar a la zona más exterior y encontrarse con el ángulo de la pared, el surco se profundiza, pudiendo alcanzar hasta 60 mm de profundidad. A partir de este punto y por encima de la boca del *feeder*, se configura un canal o conjunto de ellos que de manera ascendente van desarrollándose a lo largo de la pared, observándose a menudo como estos canales entran en coalescencia los unos con los otros. Su forma y dimensiones varían de acuerdo con el ángulo que presenta el plano de la pared respecto a la vertical. Se observa como en las paredes

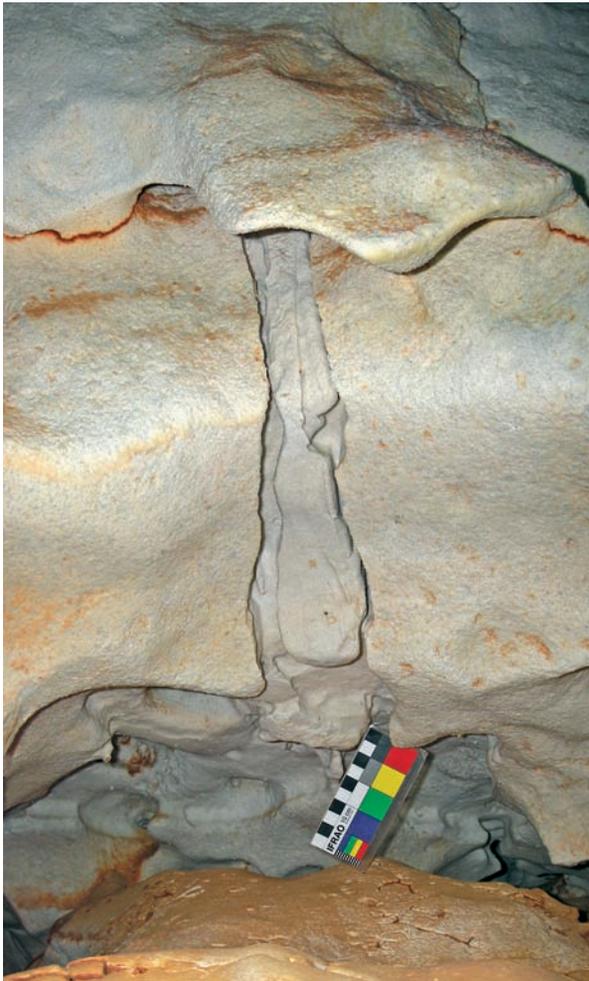


Figura 6: *Feeders* laterales y canal ascendente de disolución muy marcado. Se observa como desde dos *feeders* situados a ambos lados de una cúpula se ha producido una concentración de flujo que al alcanzar el ángulo con la pared ha excavado un canal ascendente de pared muy profundo y con una notable anchura que desaparece en una fractura. Se aprecia también cómo en la zona central de la bóveda se ha generado un incipiente *pendant*. (Foto A. Merino).

Figure 6: Side feeders and conspicuous rising wall channel. It is possible to observe a cupola with two feeders located both sides, from where the flow has been concentrated. On reaching the edge of the wall a deep and notable wide rising channel has been excavated; the channel ends in a fissure. Besides, an incipient pendant is visible in the central part of the ceiling. (Photo A. Merino)

con un ángulo bastante extraplomado es mayor la anchura y sobre todo la profundidad al tiempo que la longitud de los canales aumenta, alcanzando más de 1 m de longitud, unos 35 mm de anchura y profundidades máximas que oscilan de 22 a 25 mm. Al hacerse la pared más vertical los canales van perdiendo profundidad y anchura, desapareciendo totalmente cuando el plano de la misma se dispone ya de forma subvertical. En los casos en los que la geometría de la pared lo permite, los canales ascendentes llegan a comunicar con los *outlets* situados en el techo. En ocasiones la trayectoria de los canales ascendentes, en su recorrido desde las zonas de alimentación hasta las zonas de descarga, se ve interrumpida por la existencia de pequeñas cúpulas a las cuales llega uno o varios canales y de las que suele surgir uno solo, pero presentando éste una mayor profundidad.

Otro conjunto de canales ascendentes característico y que se repite a lo largo de numerosos puntos de la cavidad, es el formado en zonas donde las paredes están cubiertas de abundantes concavidades poco marcadas, *subdued pockets*, (GRÀCIA *et al.*, 2005; MERINO, 2006), *wall pockets* y *ceiling pockets* (Figura 7) que en

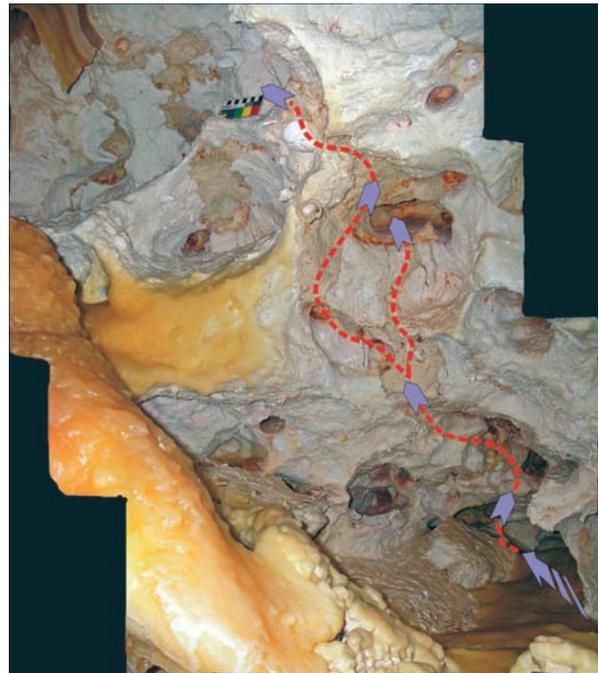


Figura 7: Canales ascendentes de disolución afectando a un conjunto de *wall pockets* y *ceiling pockets*. Se aprecia como desde un pequeño *feeder* lateral, se ha generado un canal (se puede ver claramente en todo su recorrido debido al cambio de color) que recorre el techo y penetra en una concavidad donde el flujo se concentra en la zona más abovedada, creándose de nuevo un surco que lo comunica con una concavidad vecina, repitiéndose varias veces este proceso. Las flechas indican la dirección de los flujos hipogénicos a lo largo de su recorrido. (Foto A. Merino).

Figure 7: A group of wall pockets and ceiling pockets affected by rising wall channels. It can be seen how from a side feeder a channel has been excavated (it is clearly visible along its way due to the change in colour). The channel covers the ceiling and penetrates into a concavity where the flow is concentrated on the most vaulted area, generating a new groove that puts it in communication with a nearby concavity; this process is repeated several times. Arrows indicate the hypogenic flows direction along its path. (Photo A. Merino)

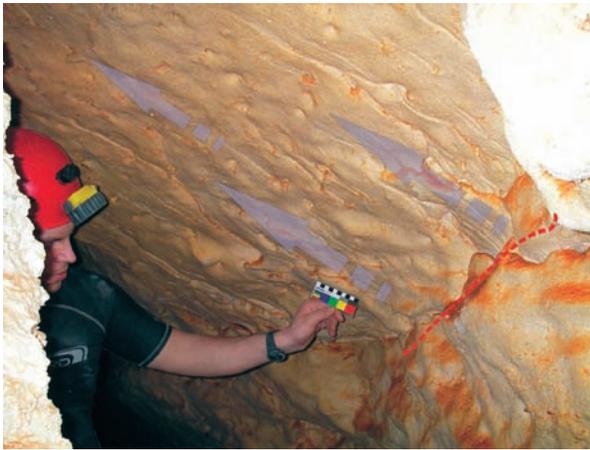


Figura 8: Canales ascendentes de disolución que se generan a partir de una fractura en una pared extraplomada. Las flechas indican la dirección de los flujos hipogénicos a lo largo de su recorrido. (Foto A. Merino).

Figure 8: Rising wall channels generated from a fracture on an overhanging wall. Arrows indicate the hypogenic flows direction along its path. (Photo A. Merino)



Figura 9: Canales ascendentes de disolución que nacen de un conjunto de *feeders* de pequeño tamaño asociados al parecer a una junta de estratificación. (Foto A. Merino).

Figure 9: Rising wall channels arising from a group of small feeders, apparently linked to a bedding plane. (Photo A. Merino)



Figura 10: Conjunto de canales ascendentes de disolución que se desarrollan a lo largo de una discontinuidad en la roca, cubren una concavidad poco marcada y desaparecen en una nueva fractura. (Foto A. Merino).

Figure 10: Assemblage of rising wall channels developed along a fissure, affecting a subdued pocket and disappearing into a new fissure. (Photo A. Merino)

ocasiones entran en coalescencia dando lugar a *composed pockets* (GRÀCIA *et al.*, 2009b). Partiendo de un *feeder* lateral existe un canal de dimensiones variables que recorre las paredes de las concavidades, que al llegar a la zona más abovedada, crea unas cúpulas de corrosión que afectan a una buena parte del techo de estas morfologías. De aquí se abre un nuevo canal más profundo y de menor anchura que corta el ángulo existente entre dos morfologías contiguas, creando de nuevo un surco que recorre la siguiente concavidad. Esta combinación de formas se puede llegar a repetir varias veces en función de la densidad de las concavidades existentes. En todos los casos, estos canales ascendentes así como las cúpulas están muy marcados y diferenciados del resto de la pared, debido a los cambios de color producidos por la corrosión que ha actuado sobre las paredes cubiertas de formas de reconstrucción, coladas parietales, o bien sobre paredes que presentan un cierto grado de alteración como consecuencia de haber estado bajo el nivel freático en períodos determinados.

Además, se han localizado una serie de conjuntos de canales ascendentes que se desarrollan a partir de planos de fracturas que cubren en algunos casos amplias zonas de las paredes de las galerías (Figuras 8, 9, 10). Se trata de surcos de dimensiones variables que rara vez alcanzan dimensiones centimétricas en su anchura y profundidad, al contrario de lo que ocurre con su longitud que puede superar un metro de recorrido (GRÀCIA *et al.*, 2009b). Se disponen de manera paralela y en ellos se observan fenómenos de coalescencia. La característica más peculiar y que los distingue del resto de canales es que éstos, nacen aparentemente de grietas y fracturas muy estrechas que afectan a las paredes y también desde juntas de estratificación. Estas morfologías quedan expuestas al caer bloques o desmoronarse las paredes. Su recorrido a lo largo de los lienzos extraplomados de las paredes acaba en muchos casos en una nueva grieta o fractura por donde desaparecen. Se ha constatado la presencia de este tipo de canales ascendentes, que en muchos casos pasa casi desapercibida, en numerosos puntos de la cavidad encontrándose asociado a lugares donde se han producido desprendimientos de bloques de las paredes. Ello lleva a pensar en el papel jugado por este tipo de forma de corrosión en la morfogénesis de la cavidad ya que la disolución preferencial ocurrida a lo largo de las grietas y fracturas que afectan a la roca encajante, puede haber provocado zonas de inestabilidad local sufriendo posteriormente desequilibrios mecánicos que acaban produciendo hundimientos y roturas de bloques.

Por último, se ha observado la presencia de unas morfologías similares a los canales ascendentes de pared, pero de recorrido más corto, en ocasiones inferior al decímetro. Se sitúan normalmente sobre las paredes de concavidades poco marcadas, *subdued pockets* y sobre *wall pockets* (Figuras 11, 12). El inicio de estos estrechos y, en ocasiones profundos canales, a modo de incisiones en la roca, suele ser un punto de dimensiones milimétricas del cual nace un pequeño surco que se prolonga en sentido ascendente hasta varios centímetros. A veces estos canales confluyen en una cúpula donde se concentran y de la cual nace un nuevo canal de mayores dimensiones. Este tipo de canal ascendente



Figura 11: Canales ascendentes de disolución de pequeña longitud desarrollados a partir de diminutos puntos en las paredes de distintas concavidades. (Foto A. Merino).

Figure 11: Short rising solutional channels developed from tiny points located in wall pockets. (Photo A. Merino)



Figura 12: *Subdued pocket* con aspecto de higo que presenta numerosos canales ascendentes al igual que las paredes adyacentes. (Foto A. Merino).

Figure 12: Fig-shaped subdued pocket showing a large number of rising channels like the neighbouring walls. (Photo A. Merino)

podría estar controlado por las características litológicas de los materiales depositados en las facies de lagoon. En concreto es posible observar cómo en las zonas donde se dan este tipo de morfologías la roca presenta una abundancia de restos fósiles que integran la matriz de la roca, que a su vez presenta una mayor porosidad al ser el grano de la misma más grosero.

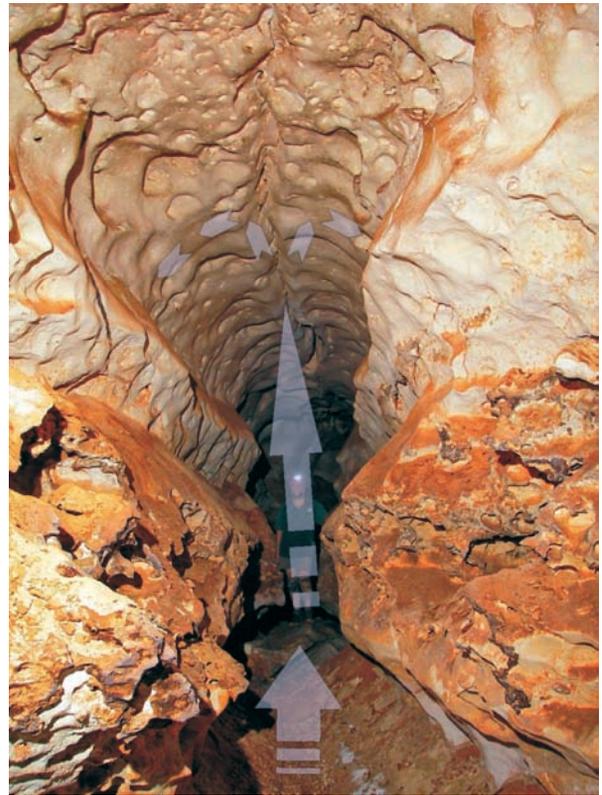


Figura 13: Espectacular canal de techo con numerosas cúpulas y concavidades asociadas. Se puede observar como la diaclasa claramente visible en el techo de la galería, condiciona el desarrollo tanto del canal como de las cúpulas. Las flechas indican la dirección de los flujos hipogénicos a lo largo de su recorrido. (Foto A. Merino).

Figure 13: Stunning ceiling channel with a great deal of associated cupolas and pockets. The visible fracture in the ceiling rules the channel and cupolas development. Arrows indicate the hypogenic flows direction along its path. (Photo A. Merino)

Los *ceiling channels* o canales de techo (Figura 13), se encuentran muy bien representados principalmente en las galerías que constituyen el nivel superior de la cavidad. Las galerías que tienen un control estructural acentuado pueden presentar acanaladuras que recorren grandes tramos del techo de las mismas (Figuras 14, 15, 16, 17). Por otra parte, en lugares donde el techo no está afectado por discontinuidades de la roca, estas morfologías presentan un recorrido muy sinuoso con el techo completamente plano y anchuras que alcanzan varios decímetros, siendo su profundidad variable. En este caso, cuando los *ceiling channels* son abundantes y están entrelazados pero separados por *pendants* llegan a presentar fenómenos de anastomosis (Figuras 18, 19).

Las cúpulas se localizan en el techo de las galerías y en la parte más abovedada de algunos *wall pockets* y *ceiling pockets*; la forma puede ser circular, alargada o presentar formas mixtas entre ambas (Figura 20). Sus dimensiones son decimétricas alcanzando algunas de ellas órdenes métricos. Su desarrollo en profundidad es variable creando en ocasiones unos vacíos importantes. Las cúpulas aisladas más peculiares presentan unos canales ascendentes que penetran por su parte inferior, existiendo luego un nuevo canal o conjunto de ellos que



Figura 14: Canal de techo muy marcado condicionado por la existencia de una fractura. (Foto A. Merino).

Figure 14: Particularly pronounced ceiling channel controlled by a fracture. (Photo A. Merino)

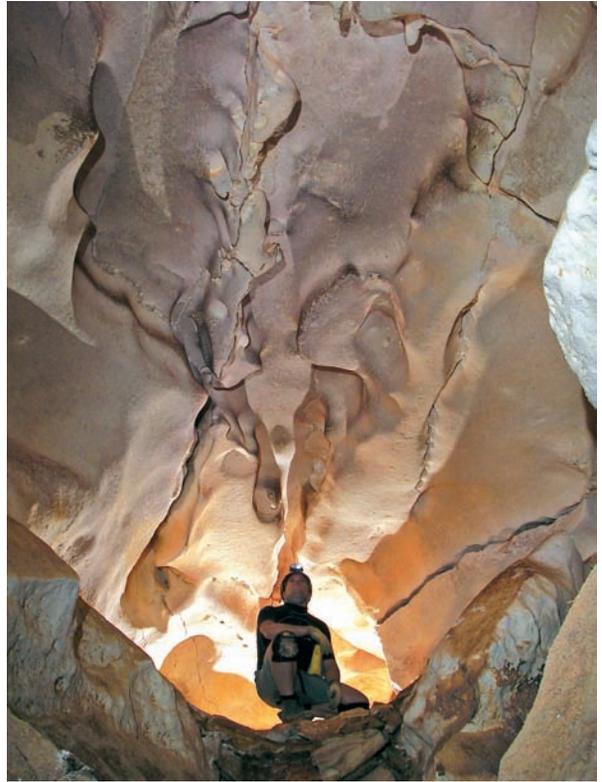


Figura 16: Canal de techo de forma sinuosa e irregular con cúpulas asociadas. (Foto A. Merino).

Figure 16: Sinuous ceiling channel with associated cupolas. (Photo A. Merino)

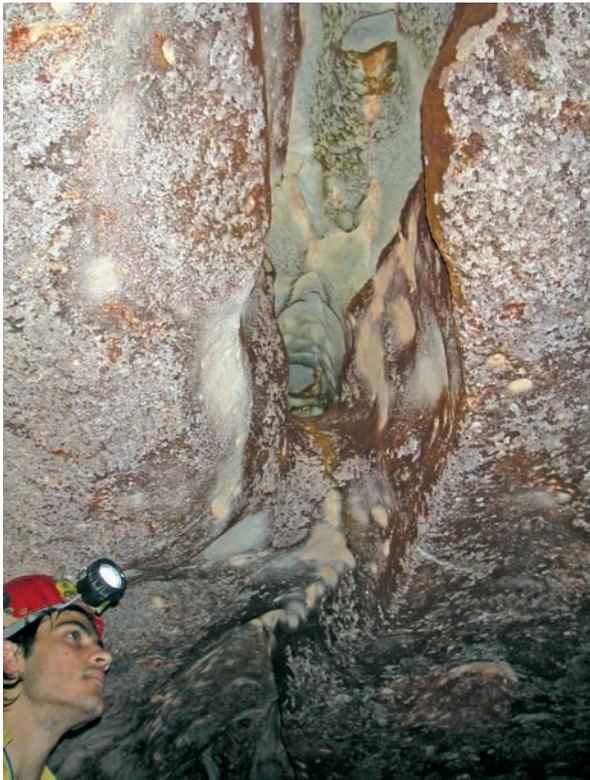


Figura 15: Canal de techo conectado con un outlet; se pueden observar también una serie de pequeñas cúpulas de forma alargada. (Foto A. Merino).

Figure 15: Ceiling channel connecting with an outlet; a group of elongated small cupolas are also visible. (Photo A. Merino)

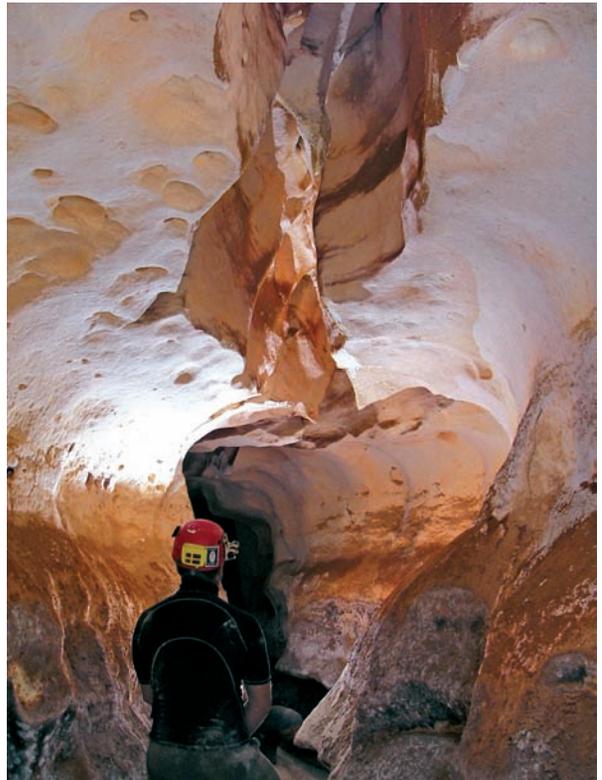


Figura 17: Canal de techo de aspecto meandriforme. (Foto A. Merino).

Figure 17: Meandering ceiling channel. (Photo A. Merino)

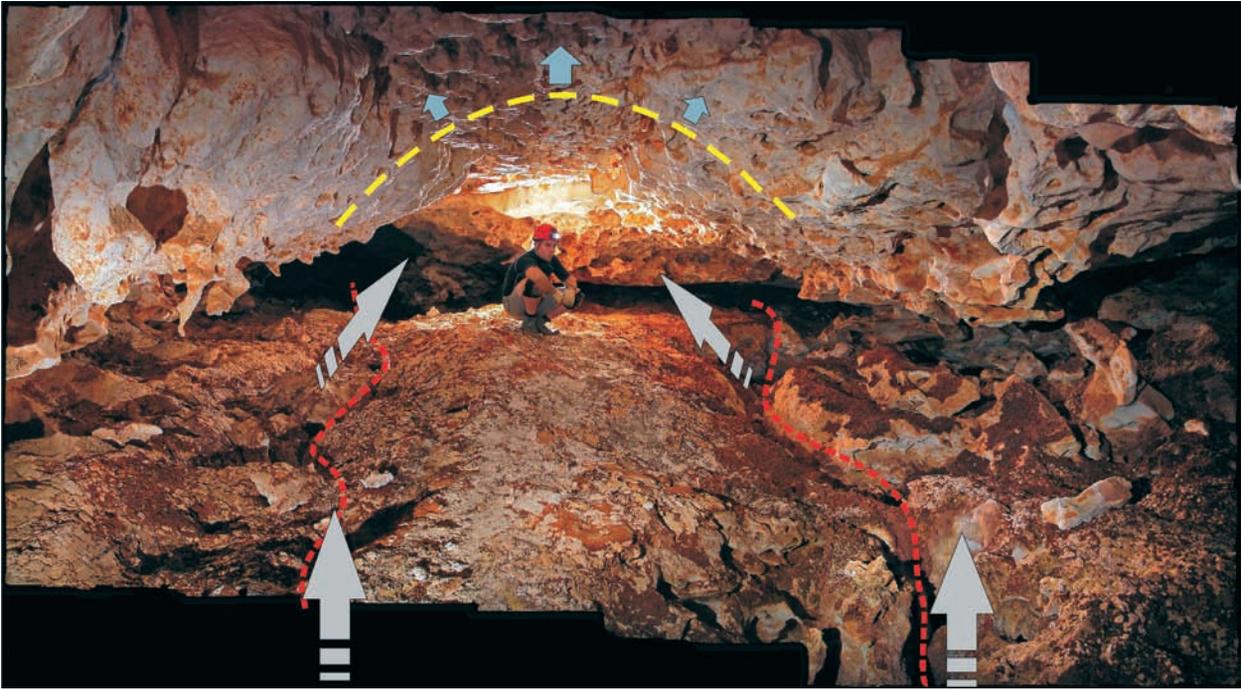


Figura 18: Canal de techo de notables dimensiones que presenta un avanzado estado de desarrollo por la individualización de *pendants*. En el suelo a ambos lados de la fotografía se pueden apreciar dos *fissure-feeders* que se prolongan varios metros a lo largo de la galería. Las flechas indican la dirección de los flujos hipogénicos a lo largo de su recorrido. (Foto A. Merino).

Figure 18: Ceiling channel of considerable dimensions showing a late stage of development with isolated pendants. Two fissure-feeders that extend several metres along the passage floor can clearly be seen both sides of the photo. Arrows indicate the hypogenic flows direction along its path. (Photo A. Merino)



Figura 19: Anastomosis de canales de techo y *pendants* individualizados. (Foto A. Merino).

Figure 19: Anastomoses of ceiling channels and isolated pendants. (Photo A. Merino)

salen de su parte más superior. En otras ocasiones allí donde estas morfologías existen superpuestas, el conjunto de canales que las conecta y recorre suele ser sinuoso, iniciándose en su zona más baja y alcanzando finalmente la parte más alta del conjunto.

Puntos de descarga (*outlets*)

Los *outlets*, puntos de descarga, están formados por cúpulas y conductos verticales que partiendo desde el techo de una galería de un nivel determinado, conecta con el siguiente situado sobre ella (KLIMCHOUK, 2007).



Figura 20: Conjunto de cúpulas y *outlets* de pequeño tamaño en el nivel superior de la cavidad. Las cúpulas de mayor tamaño representan ejemplos de *underdeveloped outlets* ya que son morfologías cerradas sin una continuidad hacia niveles superiores. (Foto A. Merino).

Figure 20: Group of cupolas and small-scale outlets located at the upper level of the cave. The largest cupolas provide examples of *underdeveloped outlets* on account of being closed morphologies with no continuities to upper levels. (Photo A. Merino)



Figura 21: *Outlet* de dimensiones medias localizado a escasos metros sobre el nivel freático actual de la cavidad. En las paredes es posible observar un grupo de estrechos canales ascendentes de disolución. (Foto A. Merino).

Figure 21: *Medium-sized outlet* located a few metres above the current phreatic level of the cave. An assemblage of tiny rising channels is seen on the walls. (Photo A. Merino)



Figura 23: *Outlet* de forma alargada. (Foto A. Merino).

Figure 23: *Elongated outlet*. (Photo A. Merino)

Están representados por cúpulas de paredes muy suaves y principalmente por conductos verticales estrechos que ascienden desde el techo de las galerías y que se extienden a lo largo de las mismas durante varios metros (Figuras 21, 22). Esta morfología representa una



Figura 22: *Outlet* en el techo de una galería situada en el nivel superior de la cavidad. Se observa también un canal de techo a lo largo de la misma. (Foto A. Merino).

Figure 22: *Outlet* in the ceiling of a passage situated at the upper level of the cave. A ceiling channel is also present along the gallery. (Photo A. Merino)

continuidad de los *rising wall channels*, canales ascendentes de pared. Dentro de este conjunto de formas de descarga se localizan *successful outlets* que consiguen poner en comunicación dos niveles de la cavidad, como es el caso descrito antes en el Sector del Clypeaster (MERINO *et al.*, 2008). Por otra parte se han encontrado cúpulas prácticamente cegadas que se corresponderían con los *outlets* en estadios intermedios de desarrollo, *underdeveloped outlets*. Las formas más representativas y abundantes están constituidas por unos *outlets* estrechos y de varios metros de longitud que aprovechan las fracturas existentes en el techo de las galerías (Figuras 23, 24).

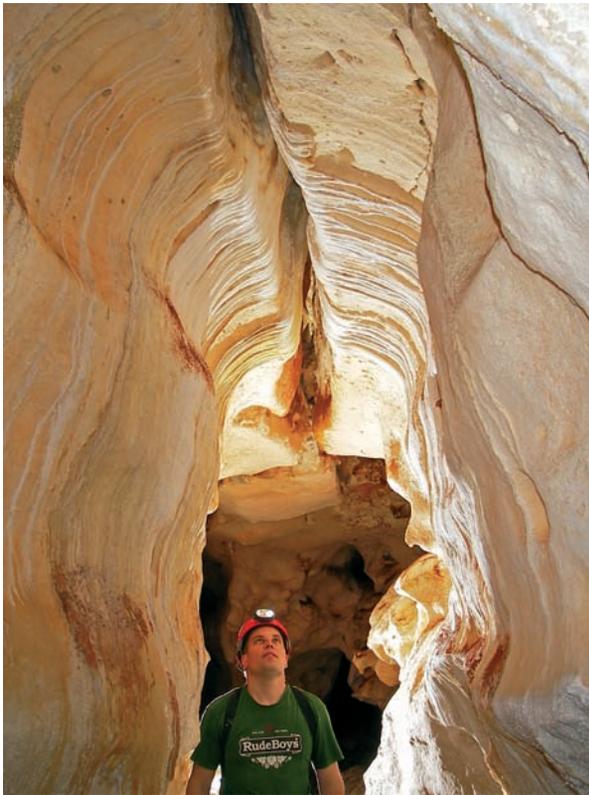


Figura 24: Típica forma de desagüe que aprovecha una fractura situada a lo largo del techo de una galería que actúa como un *outlet* longitudinal. Esta morfología es muy común en toda la cavidad. (Foto A. Merino).

Figure 24: Typical pattern of discharge that benefits from a fracture located along a ceiling passage and acts as an elongated outlet. This morphology is very common throughout the cave. (Photo A. Merino)

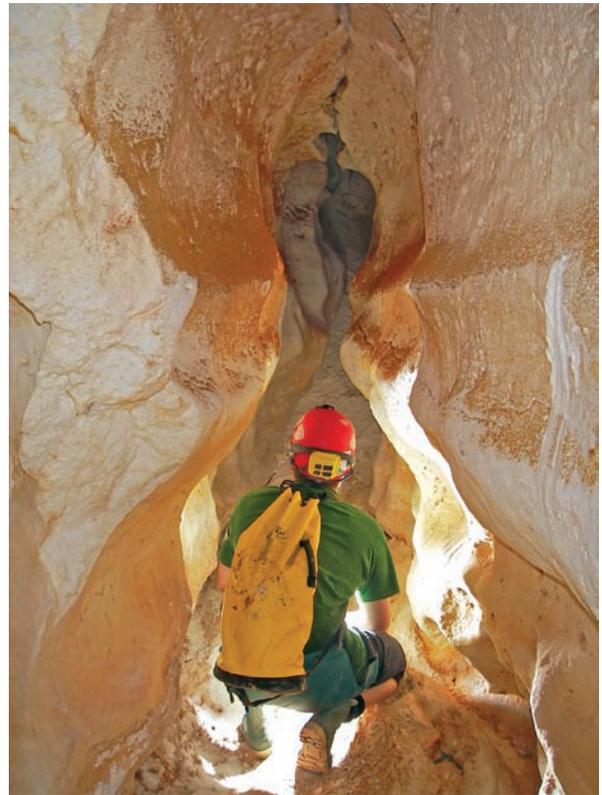


Figura 25: Galería cegada de pequeñas dimensiones que acaba de forma brusca. En el techo es visible un *outlet*; el suelo al estar cubierto de una capa de colada no presenta morfologías observables. (Foto A. Merino).

Figure 25: Dead end. Small passage ending in an abrupt way. An outlet is observable in the ceiling; the floor does not show any morphology due to the presence of carbonate deposits. (Photo A. Merino)

Otras morfologías asociadas

GALERÍAS CIEGAS (*DEAD ENDS*) Y TABIQUES DE ROCA (*PARTITIONS*)

Otro conjunto morfológico asociado a las cavidades de origen hipogénico son las galerías ciegas, que acaban en cul-de-sac, *dead ends*, y los tabiques de roca, *partitions*. La génesis de estas formas es difícil de explicar mediante mecanismos relacionados con flujos laterales que afectan a las galerías; por el contrario encajan perfectamente en el marco de un proceso generado por flujos transversales (KLIMCHOUK, 2009). Los *dead ends* (Figuras 25, 26) son galerías que acaban cegándose pero que están abiertas a la recarga mediante *feeders* en la parte más baja y a la descarga mediante los *outlets* localizados en el techo.

Por otra lado los tabiques de roca (Figura 27) separan galerías adyacentes, mostrando una estructura planar (Figura 28). El grosor es variable, presentando una mayor anchura en la parte superior al contrario de lo que ocurre en la parte más inferior que es mucho más delgada, lo que confiere al conjunto un aspecto de cuña (Figuras 29).



Figura 26: Galería cegada que presenta algunos *feeders* casi totalmente colmatados por la acumulación de sedimentos alóctonos. En el techo es posible observar la abundancia de formas de disolución entre las cuales se situarían distintos *outlets*. (Foto A. Merino).

Figure 26: Dead end. Blind termination passage showing some *feeders* almost utterly covered with allochthonous sediments. The abundance of solutional morphologies is visible in the ceiling; among them several outlets would be located. (Photo A. Merino)



Figura 27: *Partition*. Tabique de roca que presenta un aspecto de cuña.
(Foto A. Merino).

Figure 27: *Partition*. Wedge-shaped rock separation. (Photo A. Merino)

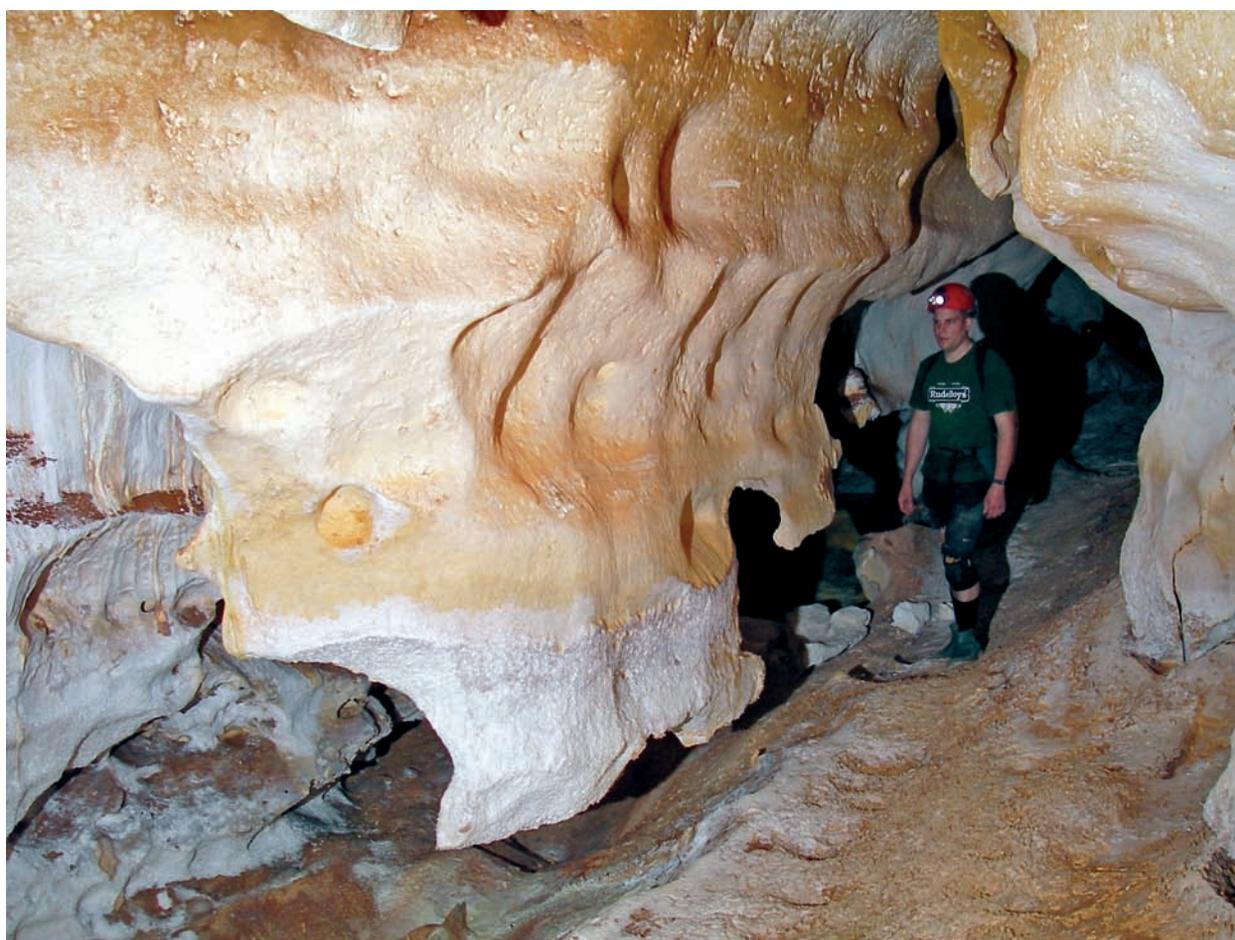
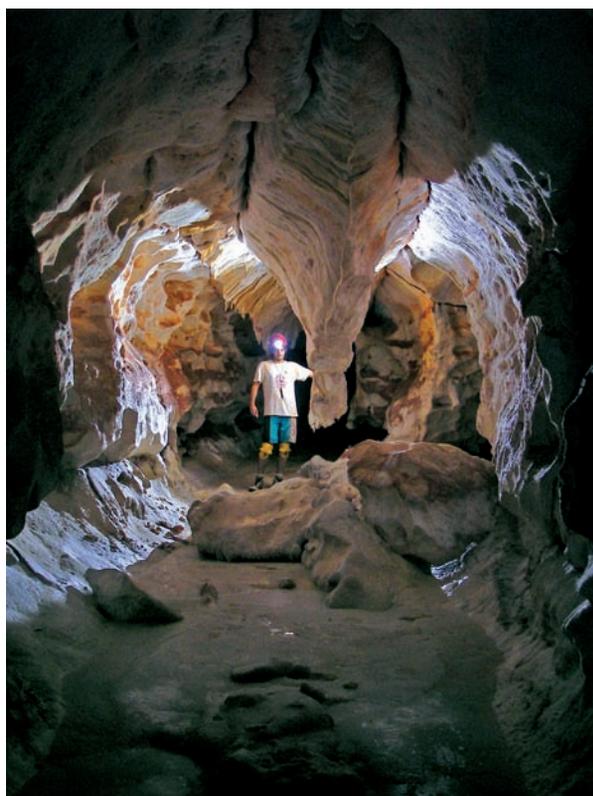


Figura 28: Vista lateral del mismo tabique de la figura 27. (Foto A. Merino).

Figure 28: Side view of the same rock separation of figure 27. (Photo A. Merino)



OTROS TIPOS DE CONCAVIDADES

Si bien los flujos ascendentes se concentran en muchas ocasiones en canales que los van guiando hacia zonas más altas, *rising wall channels*, también puede producir una circulación de estos fluidos de menor densidad que afecta de manera generalizada a las paredes de las galerías así como a las zonas en las que existen discontinuidades en la roca. Esta circulación produce, dependiendo de la geometría de las paredes de la galería, unos movimientos convectivos de estos flujos agresivos que provocan la formación de diferentes tipos de concavidades ascendentes de disolución de dimensiones variables (Figuras 30, 31).

Estas células convectivas irían produciendo una disolución preferencial en una misma zona que acabaría provocando un estadio inicial de desarrollo de una concavidad. A lo largo del tiempo, y siempre que se mantuvieran las mismas condiciones de circulación, la concavidad iría profundizándose llegando a capturar

Figura 29: *Partition*. Sección de galería en el piso superior donde se puede apreciar claramente la existencia de un tabique de roca que separa dos galerías adyacentes e individualizadas. (Foto A. Merino).

Figure 29: *Partition*. Cross-section of a gallery situated at the upper level; a thin rock separation between two adjacent and isolated passages is clearly seen. (Photo A. Merino)



Figura 30: Multitud de pequeñas concavidades de disolución que cubren la pared inclinada de una galería. Al mismo tiempo son claramente visibles un *feeder* lateral y su correspondiente canal ascendente cuya zona más interna presenta unas paredes totalmente cubiertas de concavidades de mayor desarrollo. (Foto A. Merino).

Figure 30: Great variety of small solutional hollows affecting an overhanging wall in a passage. At the same time a side feeder as well as its rising wall channel, whose inner part is covered by larger caverns, are clearly seen. (Photo A. Merino)

fluidos que iniciarían un proceso de disolución en sentido ascendente (Figura 32), que aprovecharía la acusada porosidad primaria de la roca para penetrar más hacia el interior y de esta manera acelerar el proceso erosivo y de debilitamiento de la zona afectada. Siendo por lo tanto un importante factor a tener en cuenta en los procesos de hundimiento y ajuste mecánico que se producen en las galerías a lo largo de la evolución de la cavidad. Todo ello provocaría que en estadios más avanzados de dicha evolución, la masa de roca se viera afectada por una elevada concentración de concavidades de disolución, que por coalescencia llegarían a crear verdaderas morfologías espongiiformes de orden métrico o centimétrico, *spongeworks*.

BUBBLE TRAILS

En anteriores trabajos publicados sobre las distintas morfologías de corrosión existentes en la Cova des Pas de Vallgornera, se hace mención a las *bubble trails* (GINÉS *et al.*, 2008, 2009a, 2009b; GRÀCIA *et al.*, 2009a, 2009b). Se trata de unos canales de disolución desarrollados sobre las paredes, que presentan una determinada inclinación y que han sido provocados por la liberación gaseosa de CO₂ en condiciones evidentemente



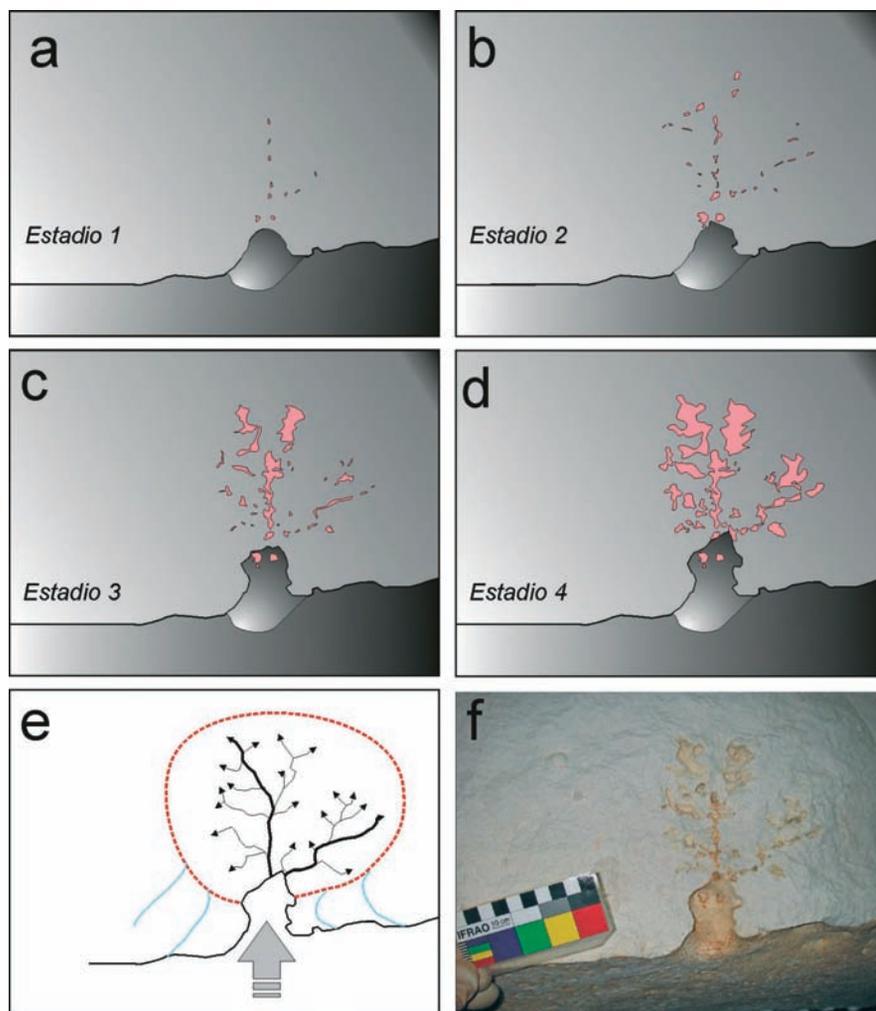
Figura 31: Pared de galería que muestra en su parte superior una zona claramente extraplomada que está cubierta por concavidades de disolución de diferentes medidas y estadios evolutivos más avanzados. Se puede observar como un poco por debajo de la zona media de la fotografía, allí donde el ángulo de la pared cambia, existe una fractura por donde han circulado flujos agresivos, que han dado lugar también a un canal ascendente de pared, *rising wall channel*. (Foto A. Merino).

Figure 31: A wall in a gallery showing in its upper part an overhanging section whose wall is covered by solutional hollows of different sizes with more evolved stages. Below the middle section of the photography, just where the wall's angle changes, a fissure is visible; aggressive fluids have flowed through it generating a rising wall channel. (Photo A. Merino)

freáticas (CHIESA & FORTI, 1987), como consecuencia de la disminución de la presión al ir decreciendo la profundidad durante el ascenso de aguas de origen profundo cargadas con dióxido de carbono en disolución. Esta liberación del gas disuelto se produce a una profundidad determinada para una concentración dada de CO₂ (PALMER & PALMER, 2000; PALMER, 2007), lo que implica que para concentraciones medias de gas la formación de burbujas se suele producir pocos metros por debajo del nivel freático. Ello implica que las morfologías ascendentes de disolución del tipo *bubble trails* se deben producir en niveles claramente estratificados, a no ser que se hayan estado produciendo de forma continua-

Figura 32: Esquema evolutivo de una concavidad de disolución ascendente. a) Concavidad de pequeñas dimensiones y diminutos vacíos existentes en el seno de la roca. b), c), d) Diferentes estadios evolutivos donde se produce un crecimiento de la concavidad al tiempo que entran en coalescencia los pequeños vacíos que hay dentro de la masa rocosa. e) Dirección y sentido de la circulación de flujos en la concavidad y en la roca. f) Sección de una concavidad de sentido ascendente donde se observa como los flujos han aprovechado la porosidad primaria de la roca para ir penetrando dentro de la misma disolviéndola e iniciando una progresión de sentido vertical y lateral de aspecto dendriforme.

Figure 32: Evolutionary diagram of a small solutional ascending hollow. a) Reduced hollow and small-scale voids within the rock. b), c), d) Different evolutionary stages where the hollow is enlarged, at the same time small voids coalesce within the rock mass. e) Flow direction through the hollow and rock. f) Cross section of a small ascending hollow where it can be clearly seen how fluids have been benefited from the rock primary porosity to penetrate into it, corroding it and starting a dendritic shaped ascending and lateral progression.



da en el tiempo con diferentes niveles freáticos a cotas diversas. Esta estratificación no se da de forma clara e inequívoca en la cavidad, ya que las morfologías de disolución ascendente se encuentran prácticamente en todos los niveles y cotas, tanto en los sectores subacuáticos, situados a varios metros por debajo del nivel del agua, como en la zona de fluctuación del nivel freático, varios metros por encima de éste, y también presentan un desarrollo muy significativo en el nivel superior de la cavidad que va desde los +5 hasta los +10 m sobre el nivel freático actual; podemos afirmar por tanto, que presentan una amplia distribución vertical a lo largo de toda la cueva. Por otra parte, y en lo relativo a las distintas morfologías y tamaños de los canales ascendentes de disolución, éstos no muestran un patrón determinado para un nivel concreto sino que, al igual que sucede con su distribución, se presentan combinados en todos los sectores de la cavidad.

Según AUDRA *et al.* (2002) la pérdida de CO₂ en un fluido ascendente daría lugar a un agua sobresaturada en CaCO₃ lo que provocaría la precipitación de una serie de depósitos y espeleotemas:

a) Entre éstos y debido a su particular relación con las *bubble trails* destacarían las *folias*, con una morfología inconfundible y cuya presencia parece estar casi exclusivamente relacionada con un contexto

hipogénico que incluiría la liberación de burbujas de dióxido de carbono a poca profundidad (AUDRA *et al.*, 2009). El aspecto de este espeleotema es consecuencia por una parte de una fuerte pérdida de CO₂ que ocurre por debajo del nivel freático, la existencia de paredes con una cierta inclinación y el confinamiento de burbujas de dióxido de carbono que provoca la precipitación de calcita en los alrededores de las burbujas de gas.

- b) Pináculos coraloides subacuáticos, *tower coral*.
- c) Estalagmitas cónicas subacuáticas, *cave cones* y calcita flotante, *cave rafts*.

De estos dos últimos espeleotemas, sólo se han localizado algunos ejemplares de estalagmitas cónicas subacuáticas y acumulaciones de calcita flotante, mayoritariamente de origen vadoso, en puntos concretos y casi siempre relacionados con gours cuyas aguas están sobresaturadas en carbonato cálcico. Los pináculos coraloides subacuáticos se han localizado, de momento, sólo en un tramo de la Galería del Tragus (MERINO *et al.*, 2008), donde existe una especie de cubeta, hoy en día seca, con las paredes cubiertas de una capa de aragonito que se depositó en régimen freático (MERINO, 2006). Hasta el presente no se ha localizado ningún ejemplar ni conjunto de *folia*, a lo largo de los más de 65 km de desarrollo que tiene la cavidad (GRÁCIA *et al.*,

2009a). Todo ello, unido a la presencia ubicua en todos los niveles de los canales ascendentes de corrosión y a la falta de depósitos masivos de calcita flotante en sus distintas formas, lleva a pensar que la génesis de la mayor parte de estas morfologías estaría relacionada con el ascenso de flujos hipogénicos muy agresivos, más que con la liberación de burbujas de dióxido de carbono. Aún así, es muy probable que en algunos estadios a lo largo de la prolongada espeleogénesis de la cavidad se hayan producido aportes de CO₂ provenientes de aguas profundas. De hecho ya se puso de manifiesto en su momento la existencia de gas metano CH₄ en algunos pozos con aguas termales de la zona de meridional de Lluçmajor (LÓPEZ, 2007), cercana a la cavidad, gas que por oxidación podría generar CO₂ (GINÉS *et al.*, 2008, 2009a).

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los compañeros del Grup Espeleològic de Llubí su ayuda a lo largo de las campañas llevadas a cabo en la cavidad, especialmente a Toni Mulet. Agradecimiento que se hace extensible también y de manera muy particular a Anders Kristofersson, sin olvidar a Toni Croix y Santiago García de la Agrupación Voltors. Por último, nos complace subrayar el interés y apoyo aportado por el amigo Joaquín Ginés, así como sus acertados comentarios y sugerencias a este estudio. El presente trabajo es una contribución al proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, CGL2009-07392.

Bibliografía

- AUDRA, P.; BIGOT, J.Y. & MOCOCHAIN, L. (2002): Hypogenic caves in Provence (France). Specific features and sediments. *Acta Carsologica*, 31 (3): 33-50. Postojna, Eslovenia.
- AUDRA, P.; MOCOCHAIN, L.; BIGOT, J.Y. & NOBÉCOURT, J.C. (2009): The association between bubble trails and folia: A morphological and sedimentary indicator of hypogenic speleogenesis by degassing, exemple from Adaouste Cave (Provence, France). *International Journal of Speleology*, 38 (2): 93-102.
- CHIESA, M. & FORTI, P. (1987): Studio morfologico di due nuove cavità carsiche dell'Iglesiente (Sardegna Sud occidentale). *Ipoantropo*, 4: 40-45. Reggio Emilia, Italia.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F. & MERINO, A. (2008): Noves observacions sobre l'espeleogènesi en el Migjorn de Mallorca: els condicionaments litològics en alguns grans sistemes subterranis litorals. *Endins*, 32: 49-79. Palma de Mallorca.

- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2009a): On the role of hypogene speleogenesis in shaping the coastal endokarst of southern Mallorca (Western Mediterranean). In: KLIMCHOUK, A.B. & FORD, D.C. (eds.) *Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1: 91-99. Simferopol, Ukraina.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2009b): About the genesis of an exceptional coastal cave from Mallorca island (Western Mediterranean). The lithological control over the pattern and morphology of Cova des Pas de Vallgornera. In: WHITE, W.B. (ed.) *Proc. 15th Int. Congress Speleol.*, 1: 481-487. Kerrville, U.S.A.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; JAUME, D.; FORNÓS, J.J.; URIZ, M.J.; MARTÍN, D.; GIL, J.; GRÀCIA, P.; FEBRER, M. & PONS, G. (2005): La Cova des Coll (Felanitx, Mallorca): espeleogènesi, geomorfologia, hidrologia, sedimentologia, fauna i conservació. *Endins*, 27: 141-186. Palma de Mallorca.
- GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; GAMUNDÍ, P.; CLAMOR, B.; POCOVÍ, J. & PERELLÓ, M.A. (2009a): Les descobertes subaquàtiques a la Cova des Pas de Vallgornera (Lluçmajor, Mallorca): Història i descripció dels descobriments, hidrologia, espeleotemes, sediments, paleontologia i fauna. *Endins*, 33: 35-72. Palma de Mallorca.
- GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; GAMUNDÍ, P.; CLAMOR, B. & POCOVÍ, J. (2009b): Morfologies de corrosió a la part submergida de la Cova des Pas de Vallgornera. Sector Antic, Sector de Gregal i Sector de les Grans Sales. *Endins*, 33: 73-98. Palma de Mallorca.
- KLIMCHOUK, A.B. (2007): *Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective*. National Cave and Karst Research Institute. Special paper 1. 106 pàgs. Carlsbad. New Mexico.
- KLIMCHOUK, A.B. (2009): Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106: 100-117.
- LÓPEZ, J.M. (2007): *Las manifestaciones hidrotermales del sur de Lluçmajor, Mallorca*. Memoria d'Investigació. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. 132 pàgs. Inédito.
- MERINO, A. (2006): Espeleotemas poco frecuentes y morfologías de corrosión hallados en la Cova des Pas de Vallgornera. *Endins*, 30: 49-70. Palma de Mallorca.
- MERINO, A.; MULET, A.; MULET, G.; CROIX, A. & GRÀCIA, F. (2008): La Cova des Pas de Vallgornera (Lluçmajor, Mallorca): alcanza los 55 kilómetros de desarrollo topográfico. *Endins*, 32: 33-42. Palma de Mallorca.
- MERINO, A.; FORNÓS, J.J. & ONAC, B.P. (2009a): Preliminary data on mineralogical aspects of caves rims and vents in Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca. In: WHITE, W.B. (ed.) *Proc. 15th Int. Congress Speleol.* 1: 307-311. Kerrville, U.S.A.
- MERINO, A.; FORNÓS, J.J. & ONAC, B.P. (2009b): Datos preliminares sobre la mineralogía de los precipitados asociados a los respiraderos y toberas existentes en la Cova des Pas de Vallgornera. *Endins*, 33: 99-104. Palma de Mallorca.
- PALMER, A.N. (2007): *Cave Geology*. Cave books. 454 pàgs. Dayton, Ohio.
- PALMER, A.N. & PALMER, M.V. (2000): Hydrochemical interpretation of cave patterns in the Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*: 62 (2): 91-108.