

# EL MUNDO SUBTERRÁNEO Y LAS CALAS

## LAS CALAS NECESITAN UN LITORAL CALCÁREO: EL EJEMPLO DE LAS BALEARES

Joan J. Fornós

La cala es una geoforma litoral compleja donde convergen una serie de procesos que interaccionan con una gran variabilidad. El karst, provocado por la disolución de las rocas calcáreas y responsable de la formación de la mayoría de cuevas, es uno de los más destacados.

La línea de costa es una zona en permanente evolución y cambio por efecto de la interacción entre el medio sólido que corresponde a la tierra, el medio líquido, que corresponde al mar y al agua dulce, y el medio gaseoso, que corresponde a la atmósfera. Las dinámicas propias que afectan a cada uno de los tres, junto a la variable tiempo, hacen que los diferentes procesos que actúan o han actuado queden reflejados en la morfología costera.

Uno de los más vistosos accidentes litorales, la cala, es una geoforma compleja debida a la convergencia de varios factores esenciales en su génesis que interfieren con una considerable variabilidad.

El primer factor, el más importante y básico, es la eustasia, es decir, la variación del nivel del mar más o menos uniforme a escala mundial, causada por las fluctuaciones del hielo acumulado en las zonas continentales y polares, o por el cambio de la capacidad de las cuencas oceánicas y marinas. En períodos fríos, cuando el mar merma porque hay grandes acumulaciones de hielo en las zonas continentales, el nivel de base que condiciona los cursos fluviales también baja y en consecuencia los ríos tienden a la incisión de los valles para acomodarse a la nueva situación. De la misma manera, si tenemos huecos o cavidades que se hayan formado en el interior de las formaciones geológicas, la pérdida del apoyo hidrostático al bajar el nivel freático puede provocar el colapso. Por el contrario, en períodos cálidos el hielo continental se funde y el agua vuelve al océano, y la correspondiente subida del nivel del mar

inunda las partes bajas de los valles fluviales encajados, que a la larga –pero no siempre– podrán ser rellenados por depósitos sedimentarios, ya sean continentales, de transición o marinos.

El segundo factor que favorece el desarrollo de una cala es el componente fluvial. Aunque en la actualidad los procesos ligados a la circulación fluvial en las Baleares son muy poco visibles, en algún momento pueden haber ejercido su papel con el establecimiento de una corta red de drenaje, ahora relictas, que se puede reconocer aunque nunca alcanza las características típicas de un estuario.

La estructura tectónica es el tercer factor y actúa como condicionante básico de las líneas de debilidad aprovechadas por todos los procesos erosivos que acabarán modelando el paisaje. La debilidad se traduce en la ruptura de la roca, las fracturas o fallas, como consecuencia de los esfuerzos mecánicos que se producen en la corteza terrestre (los procesos tectónicos), y como tienen un componente direccional, su papel se traducirá en la linealidad de las formas resultantes. En las calas a menudo los encajonamientos se entrecruzan en varios ángulos, mostrando una característica planta cuadrículada.

Comentados estos aspectos, podemos decir que las calas se han asociado tradicionalmente a la incisión fluvial que se produjo durante el último estadio glacial –culminado, ahora hace 100.000 años–, que, con la posterior subida del nivel de la mar, creó un ambiente de estuario rodeado de acantilados. Ahora bien, la variabilidad morfológica de las calas que vemos si las

**«UNO DE LOS MÁS VISTOSOS ACCIDENTES LITORALES ES LA CALA. UNA GEOFORMA COMPLEJA DEBIDA A LA CONVERGENCIA DE VARIOS FACTORES ESENCIALES EN SU GÉNESIS»**

A la izquierda, Anna Sanchis. Serie «La cala encantada», 2012. Arcilla, escayola y acrílicos sobre tabla, 21 x 28 cm.

observamos atentamente nos indica que la linealidad de los recorridos de los torrentes y del frente litoral (condicionada por la fractura) no acaba de encajar con el trazado de la mayoría de las calas y de buena parte de los torrentes, y por tanto, se tiene que postular algún otro proceso que contribuya al desarrollo y evolución de estas formas. Así pues, hay un nuevo modelo de evolución de las calas en el que los procesos relacionados con el karst asumen un papel importante.

#### ■ EL KARST Y LA DEPENDENCIA DE LA ROCA

La palabra *karst* proviene del término *karra*, que tiene un origen preindoeuropeo y viene a significar cualquier cosa relacionada con piedra. Buena parte de la actual Eslovenia occidental y del Trieste italiano muestran un paisaje pedregoso, estéril, sin escorrentía superficial, que le confiere unas características muy específicas. A partir de la denominación toponímica de la zona, a finales del siglo XVIII, la escuela geográfica y geológica vienesa germanizó e internacionalizó el término desde un punto de vista científico. Las características paisajísticas, pues, de la zona del Karst (o Kras) sirvieron a los científicos para definir los fenómenos kársticos y, a partir de este momento, se extendió el término allá donde se repetían las características geomorfológicas, es decir, los paisajes carbonáticos, afectados por la porosidad y la solubilidad de la roca.

Entendemos por karst todo el conjunto de procesos que derivan de estas características hidrológicas distintivas y dan un paisaje que resulta de la combinación entre una roca con elevada solubilidad y una bien desarrollada porosidad secundaria (debida a la fractura de la roca). El hecho de la elevada porosidad (espacio vacío en el interior de la roca) implica que el agua se infiltra rápidamente hacia el subsuelo, por tanto, desaparece la escorrentía superficial. A la vez, esta infiltración multiplica el posible contacto del agua con la roca, que, al presentar una elevada solubilidad, se va disolviendo. Con eso la roca se vacía y adopta unas formas muy características. A su vez, esta disolución incrementa más la porosidad (los huecos se amplían) y podemos decir que el proceso se autoalimenta. Solubles lo son todas las rocas, en mayor o menor medida, pero solo unas cuantas son susceptibles de alimentar fenómenos kársticos. Estos fenómenos serán remarcables cuando otros procesos geomórficos físicos, tanto los hidrodinámicos como los aerodinámicos (como por ejemplo los que inciden en el modelado fluvial, glacial o eólico) tengan una intensidad



© Joan J. Fornós

Los acantilados carbonáticos miocénicos de las Baleares son la base fundamental donde confluyen con su máxima intensidad el karst y las calas.

**«LAS CALCÁREAS SON  
ROCAS RESISTENTES A  
LA EROSIÓN. ESO HACE  
PREVER QUE EN EL  
LITORAL LA FORMA MÁS  
CARACTERÍSTICA SEAN LOS  
ACANTILADOS»**

menor. Entre las rocas más solubles, las evaporitas (sales y yesos) y sobre todo las rocas calcáreas nos muestran los ejemplos más espectaculares.

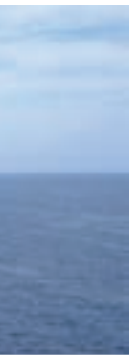
Las formas kársticas por excelencia generadas en estas rocas son las dolinas (un tipo de depresiones cerradas circulares en forma de embudo, *foies* en el País Valenciano, *comes* en las Baleares), las cuevas (o cavidades subterráneas) y las formas

acanaladas del lenar (*karren* o *lapiaz*) que se observan en los afloramientos rocosos superficiales.

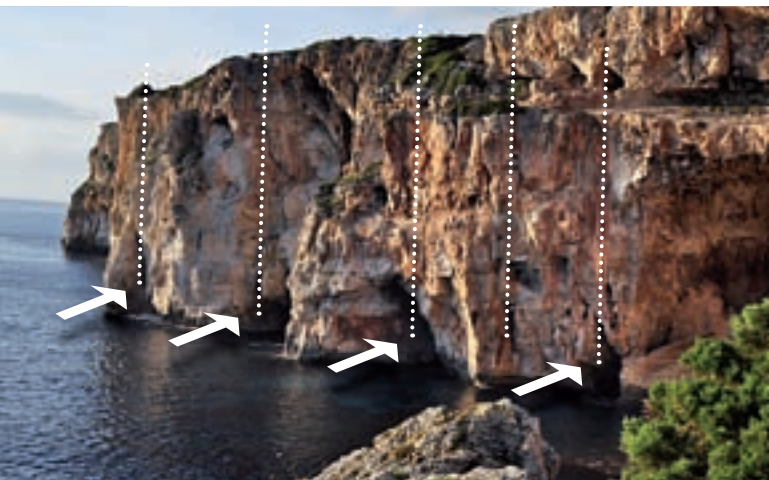
Cualquier proceso geomórfico requiere un sustrato material, de manera que las características químicas y, sobre todo, texturales de la roca condicionan en primer grado las formas resultantes. A eso debemos añadir la ruptura de la roca, que ofrece espacios de debilidad por donde ataca preferentemente la acción erosiva de los procesos físicos, y a la larga condiciona también la acción de los procesos kársticos o de disolución, ya que se utilizan estos planos que da la fractura como conductos preferentes del agua. Así, con el ejercicio de su tarea de disolución, el agua va ensanchando los planos creando conductos y cavidades que van debilitando la estructura global de una formación geológica.

En las Islas Baleares, las rocas calcáreas son omnipresentes. Nos encontramos en una zona con clima templado y con una pluviometría estacional más o menos regular, por lo que es fácil pensar que uno de los procesos





más importantes que afectan al modelado de las islas será el kárstico. Las calcáreas son rocas que podríamos considerar duras, o sea, resistentes a la erosión producida por los procesos físicos. Eso hace prever que en el litoral la forma más característica sean los acantilados. La variabilidad que encontraremos dentro de estos vendrá dada por los aspectos geológicos, entre los que los de carácter tectónico o estructural, debidos a los procesos de deformación y ruptura que han sufrido a lo largo de los tiempos geológicos, serán los principales. Otra cosa son los procesos químicos.



© Joan J. Fornós

Los conductos kársticos freáticos en la base de los acantilados (flechas) relacionados con la fractura (líneas de puntos) favorecen la dinámica erosiva marina.



© Joan J. Fornós

La fractura marca los puntos de debilidad en la roca donde inciden tanto los procesos de disolución por las aguas freáticas como la quiebra mecánica de la roca que da lugar a colapsos y derrumbes.

El mayor desarrollo de calas en las Baleares se da principalmente asociado a los materiales carbonatados del Mioceno superior (de 11,6 a 5,3 millones de años). Se trata de un conjunto de depósitos que afloran de forma extensa en el sur de Menorca y en el sur y zona oriental de Mallorca, configurando lo que denominamos *les marines*. Corresponden a un relieve estructural integrado por un conjunto de formaciones de calcáreas y calcarenitas bien estratificadas en un relieve tabular horizontal y que, al llegar a la línea de costa, quedan cortados por jorjes verticales. Estos materiales se sedimentaron en un ambiente de plataforma marina somera con un gran desarrollo de los arrecifes de coral y un clima mucho más cálido que el actual.

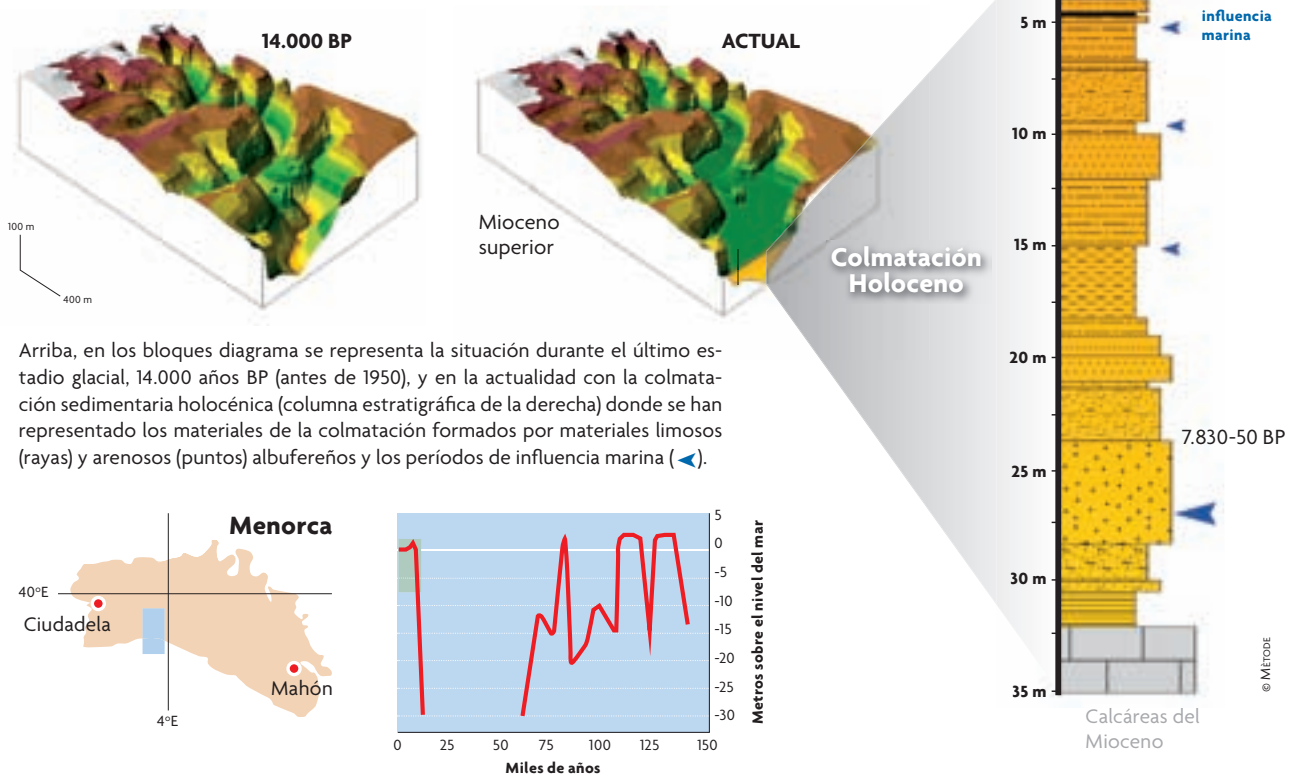
#### ■ EL PAPEL DE LA ESTRUCTURA Y LA FRACTURA

Los materiales aludidos del Mioceno superior, tal y como indica su disposición, son posorogénicos, es decir, no han sufrido ninguna deformación compresiva importante como la que afecta a los materiales más antiguos que afloran en las Baleares (originada por el choque entre la placa africana y la europea durante la orogenia alpina) y que nos dan los relieves más importantes. Estos materiales, sin embargo, sí que están afectados por una tectónica distensiva producida por el subsiguiente relajamiento después de la compresión. El resultado es un conjunto de fracturas y diaclasas (ruptura sin movimiento vertical) con una orientación muy constante, de acuerdo con el campo de esfuerzos que las ha producido. Se pueden reconocer varias direcciones que se entrecruzan dando en superficie una especie de reticulado. Una de estas direcciones coincide con la predominante de la línea de costa y es la responsable de los acantilados y de su retroceso con la ayuda de la dinámica marina; las otras direcciones, con un ángulo más o menos normal a la línea de costa, tienden a dar formas esquinadas, fácilmente observables en la mayor parte del litoral.

Como ya se ha comentado, la fractura actúa como camino preferente por donde penetra el agua y por tanto en ella se concentra la disolución de la roca. Por el mismo motivo, allá donde se produce el cruce de fracturas se incrementa esta penetración y por tanto la disolución. Se convierte en el lugar preferente de formación de simas, sumideros y también de depresiones cerradas o dolinas.

Algunos ejemplos paradigmáticos de calas, los tenemos en la isla de Menorca, donde podemos observar los diversos estadios evolutivos, desde su inicio, con el caso de cala Sant Llorenç, hasta el estadio más desarrollado de la bien conocida cala Galdana. En el primer caso, un barranco de fuerte pendiente y corto trayecto meandrizante está rodeado de acantilados importantes, cuya linealidad depende de las direcciones de fractura, que presentan

## Modelo evolutivo de la colmatación sedimentaria en el caso del barranco de Algendar (cala Galdana).



Arriba, en los bloques diagrama se representa la situación durante el último estadio glacial, 14.000 años BP (antes de 1950), y en la actualidad con la colmatación sedimentaria holocénica (columna estratigráfica de la derecha) donde se han representado los materiales de la colmatación formados por materiales limosos (rayas) y arenosos (puntos) albufereños y los períodos de influencia marina (◀).

En la gráfica se detalla la curva de oscilación del nivel del mar en las Baleares desde el último estadio interglacial, es decir, durante los últimos 150.000 años.

formas cóncavas penetrantes. Estas concavidades muestran señales de desmantelamiento gravitacional reciente con cicatrices delapsionales y acumulación de bloques al pie. La observación de conductos freáticos, ligados al nivel actual del mar que desembocan en la línea de costa y que coinciden con los puntos de debilidad estructural, permite relacionarlos con la formación de dolinas. La captura de estas, junto a las cavidades subyacentes, por parte del mar provoca el colapso de las paredes, favorecido por las grietas verticales, lo que genera las formas cóncavas y da lugar de forma repetitiva y coalescente al retroceso del acantilado. El proceso fluvial iniciaría aquí probablemente su incisión.

Un caso ya totalmente desarrollado es el de cala Galdana. Ligada a un curso de agua perenne, presenta un claro aspecto de desembocadura fluvial, pero con un fondo plano a causa de la colmatación sedimentaria de la última subida del nivel de la mar. La forma de la cala es típicamente circular, delimitada por acantilados verticales que muestran formas cóncavas que se van sucediendo con continuidad, tanto en el tramo final del barranco como aguas arriba, donde quedan realizadas por

el trazado meandrante del riachuelo. Las formas cóncavas coinciden con puntos de debilidad estructural de las paredes (fracturas verticales), aprovechadas por hundimientos de tipo kárstico. Los colapsos o hundimientos son provocados por dolinas con conductos verticales favorecidos por la fractura y que son captados por otros horizontales, situados al nivel del mar.

### ■ CÓMO PUEDE EVOLUCIONAR UNA CALA

Podemos decir que una cala representa la interacción total entre el modelado fluvial, la estructura de la formación geológica, la dinámica marina y el proceso kárstico. En la zona litoral, las cavidades kársticas son muy abundantes. Se conoce la presencia de toda una serie de conductos y cavidades más o menos desarrollados que siguen un trazado paralelo al litoral, así como de canales que prolongan a una cierta profundidad el lecho de los torrentes y barrancos. Esta situación es explicable por el fenómeno hidrológico que en estas situaciones produce la mezcla de agua marina, que penetra tierra adentro gracias a la porosidad, y el agua meteórica de infiltración

que alimenta los acuíferos subterráneos. El encuentro de estas aguas de composición química diferente las convierte en mucho más agresivas y justifica en este lugar una mayor corrosión de la roca calcárea y provoca la formación de grandes huecos. Por tanto, tendremos como consecuencia toda una serie de cavidades y conductos a lo largo del contacto entre la cuña de intrusión marina y el acuífero de agua dulce. Las características y trazado de esta intrusión dependerán evidentemente del caudal freático y fluvial y del grado de porosidad de la roca.

Por otra parte, el proceso kárstico se relaciona también con la fractura distensiva que canaliza preferentemente el flujo del agua a través de las discontinuidades que representan las fracturas. Este mecanismo provoca la digitación de las cavidades y favorece la actividad erosiva marina que tenderá a ir capturando (o interceptando) las cavidades y los conductos, lo que da lugar al inicio de entradas marinas (las digitaciones) que podrían acabar en calas.

En este punto hay que tener presente la variabilidad del nivel marino durante el Cuaternario. El máximo desarrollo de cavidades y conductos se produciría en los momentos de estabilización marina, cuando la actividad de disolución permitiría el desarrollo de los huecos relacionados con el correspondiente nivel del mar. La variabilidad del nivel, debida al glacioeustatismo, puede explicar la superposición de pisos de disolución a diferentes cotas, lo que probablemente favorecería la formación de dolinas y su posterior colapso por pérdida de apoyo hidráulico en momentos de descenso del mar (períodos glaciales o regresivos). Las formas finales de las calas, limitadas por paredes verticales y con una planta circular o elíptica, y también de buena parte del trayecto

de los barrancos, especialmente en sus últimos tramos, así lo hacen pensar. En resumen, las etapas de descenso del nivel del mar implicarían el colapso y aceleración de los procesos de dismantelamiento de cavidades y conductos, mientras que durante los períodos de subida del nivel marino tendríamos la invasión por parte del mar de las zonas más excavadas durante el encajonamiento de los torrentes y también la tendencia a la colmatación sedimentaria de estos.

El análisis detallado de las calas de las Baleares nos permite decir que la mayor parte tienen mucho que ver con el aprovechamiento de conductos y cavidades kársticas. No quiere decir eso que el mecanismo de formación sea único y debido exclusivamente al fenómeno del karst, sino que la interacción de los diferentes procesos, entre ellos el fluvial, derivaría en una cala y en el barranco asociado. La gran diversidad observada en la morfometría de las calas sería el fruto de esta interacción con otros factores, como la dinámica marina, la estructura geológica, la variación litológica de las rocas carbonatadas y, finalmente, la evolución del nivel del mar durante el Cuaternario. ☺

#### BIBLIOGRAFÍA

- FORD, D. y P. WILLIAMS, 2007. *Karst Hydrology and Geomorphology*. Wiley, Chichester.
- FORNÓS, J. J. *et al.*, 2004. «Història natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà». *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 11.
- FORNÓS, J. J. *et al.*, 2007. «Geomorfologia litoral. Migjorn i Llevant de Mallorca». *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 15.
- ROSSELLÓ, V. M., 2005. «Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica». *Cuadernos de Geografía*, 77: 1-18.

**Joan J. Fornós.** Profesor titular e investigador del Grupo de investigación sobre el karst y la geomorfología litoral. Universidad de las Islas Baleares.



© MÈTODE

Vista aérea de la cala Galdana (Menorca) con las características kársticas asociadas. (A) conducto freático dependiente de la fractura; (B) dolinas de colapso relacionadas con conductos freáticos; (C) incidencia de la fractura en la localización de los procesos kársticos.