

Las costas rocosas del Migjorn de Menorca: acantilados y calas

Joan J. Fornós¹, Lluís Gómez-Pujol^{1,2}, Vicenç M. Rosselló³, Bernadí Gelabert⁴,
Francesca Segura³ y Josep E. Pardo-Pascual⁵

¹ Grup de Ciències de la Terra (Geologia i Paleontologia “Guillem Colom”). Universitat de les Illes Balears, Palma.

² ICTS SOCIB, Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares (MINECO-CAIB), Palma.

³ Departament de Geografia, Universitat de València, València.

⁴ Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma.

⁵ Departament d'Enginyeria Cartogràfica i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València, València.

RESUMEN

La zona meridional de Menorca (Migjorn) se caracteriza por ser una plataforma carbonatada desarrollada en un ambiente arrecifal durante el Mioceno superior. Está surcada por una serie de cursos torrenciales fuertemente encajados que en su desembocadura al mar dan lugar a una forma de bahía denominada “cala” que está delimitada por paredes de elevada pendiente. La fracturación y la diaclasación penetrativa que afecta a la alternancia de materiales calcareníticos y calcisiltíticos miocenos, junto con la distribución de éstos, es el principal factor que condiciona el trazado de los cursos fluviales, así como el desarrollo de los procesos de tipo kárstico asociados a la circulación preferencial y la formación de conductos. La interacción en la zona litoral de los procesos endokársticos, en los cuales la mezcla de aguas favorece los procesos de disolución, la actividad torrencial, así como la dinámica marina –teniendo presente la variabilidad glacio-eustática acontecida durante el Cuaternario– favorece el desarrollo y dinamismo del propio karst (i.e. colapso de cavidades, formación de dolinas, etc.) lo que se traduce, finalmente, en la configuración de la geoforma tan característica y compleja que es la cala.

Palabras clave: acantilados, Mioceno superior, fracturación distensiva, barrancos, karst, cala

ABSTRACT

The southern region of Menorca –Migjorn– is built up by a carbonate platform developed in a reef environment during the Upper Miocene. This structural platform is dissected by a set of canyon-like creeks that when reach the coast result in narrow and cliffy bays known as “cala”. Joints and penetrative fractures that affect the Upper Miocene calcarenites and calcilutites rock outcrops exert the main control of the streams pathway and direction. Karst processes also play a critical contribution related to the preferential circulation and void formation. The interaction at the coast between marine and endokarstic processes –where mixing zone waters enhance rock solution–, between the fluvial processes and sea level (including sea level fluctuations during Quaternary times– enhance the dynamics and the development of karst (i.e. cave collapse, dolines formation, etc.) and this, finally, results in the configuration of a very representative rock coast macroform such as the “cala”.

Keywords: cliffs, Upper Miocene, fractures, streams, karst, cala

1 | Introducción

La línea de costa, como zona de interacción entre los procesos marinos y terrestres junto con la presencia de la capa atmosférica, experimenta un conjunto de dinámicas propias que se caracterizan por una acusada variabilidad temporal (Woodroffe, 2003). El resultado es que la línea de costa se convierte un ente dinámico que se encuentra en continua evolución. Desde un punto de vista geomorfológico, tal variabilidad temporal y espacial de procesos resulta en la génesis de un espectro amplio de formas, de configuraciones del relieve, como consecuencia de la interacción de los procesos físicos -ya sean hidrodinámicos o atmosféricos- o químicos. En el caso de Menorca y concretamente en el de su mitad meridional, dada la omnipresencia del substrato carbonatado, la disolución juega un papel importantísimo en el modelado de la costa

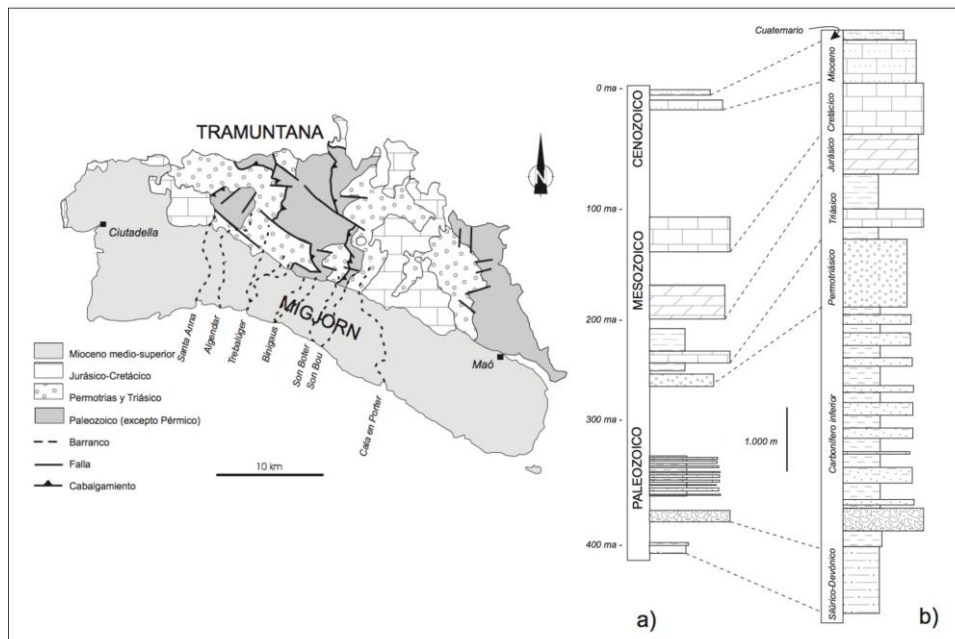


Figura 1. Mapa geológico simplificado de la isla de Menorca y registro sedimentario (a) y columna estratigráfica de los materiales que afloran en Menorca (b). Modificado de Rosell y Llompart (2002).

Figure 1. Menorca simplified geological map and sedimentary register (a) and Menorcan stratigraphic log (b). After Rosell y Llompart (2002).

rocosa. A lo que hay que añadir el papel, nada desdeñable, de la textura del roquedo, así como los parámetros estructurales o la contribución de determinados organismos y su acción bioerosiva o de bioprotección (Gómez-Pujol y Fornós, 2004a y b).

Una visión simplificada de la geología de la isla de Menorca (Obrador *et al.*, 1983; Rosell y Llompart, 2002; Fornós *et al.*, 2002) evidencia la clara división de la isla en dos mitades siguiendo una dirección oeste-este. Así, la zona septentrional (*Tramuntana*) está formada por materiales estructurados, en su mayor parte paleozoicos y mesozoicos, con un predominio de las litologías silíceas (con la excepción de los materiales jurásicos), mientras que la mitad meridional (*Migjorn*) está compuesta por materiales post-tectónicos pertenecientes al Mioceno –superior en su mayor parte– que se caracterizan por su composición carbonatada, presentando una amplia variedad textural, desde calizas a calcarenitas o calcilitas.

El dominio de los materiales carbonatados en el Migjorn de Menorca (Fig. 1) condiciona la interacción entre los procesos físicos y químicos. La resistencia inicial a la erosión mecánica de las rocas calizas, consideradas duras, explica el predominio de los acantilados en la línea de costa, más o menos bien desarrollados en función de los aspectos estructurales, tectónicos, aunque también sedimentológicos que afectan a los materiales miocenos. Así pues, los acantilados son una forma básica y omnipresente del litoral meridional menorquín. Por otra parte, el clima del Mediterráneo occidental, donde se sitúa la isla de Menorca, se caracteriza por un clima templado suave y una pluviometría estacional, relativamente importante. Lo que conlleva un claro

desarrollo de los procesos de disolución de las litologías carbonatadas y, por tanto, el desarrollo del modelado kárstico en todas sus versiones: ya sea a modo de exokarst o a modo de endokarst (García-Senz, 1985; Fornós, 2003; Ginés, 2003; Ginés y Fornós, 2004; Gómez-Pujol y Fornós 2004c)

Los objetivos del presente trabajo se centrarán en la revisión de las investigaciones publicadas hasta la fecha sobre las costas rocosas del Migjorn menorquín, aportando algunos datos nuevos que enfatizan la estrecha interrelación entre la tectónica (fracturación) y los procesos de acento kárstico, sin olvidar el esporádico funcionamiento fluvial de los barrancos que drenan el sur de la isla.

En este sentido, este estado de la cuestión no dejará de tratar una de las formas más características de la isla: la cala. Expresión morfológica de todos los procesos anteriormente mencionados y de las oscilaciones del nivel del mar a lo largo del Plioceno y, muy especialmente, durante los cambios climáticos del Pleistoceno-Cuaternario.

2 | La estructura geológica del Migjorn de Menorca (litología y tectónica)

Si hay un lugar donde se hace más evidente el condicionamiento estructural y litológico, junto con la interacción de diferentes procesos geomórficos, ese lugar es la costa meridional de la isla de Menorca.

Desde un punto de vista litológico las rocas que afloran en los acantilados costeros que forman la costa del Migjorn menorquín son carbonatadas y pertenecen al Mioceno superior (Pomar *et al.*, 2002). Están formadas por una alternancia de calizas arrecifales, calcarenitas y calcisiltitas que son el resultado de la evolución sedimentológica neógena y del ambiente deposicional en el que se formaron. Su amplia variabilidad textural es uno de los aspectos a tener en cuenta en el desarrollo y evolución morfológica de dicho litoral.

Rosell y Llompart (2002), así como Obrador y Pomar (2004), describen de forma detallada las características, tanto estratigráficas como sedimentológicas, de dichos depósitos, aunque no de forma del todo coincidente (Fig. 2). Para nuestros propósitos

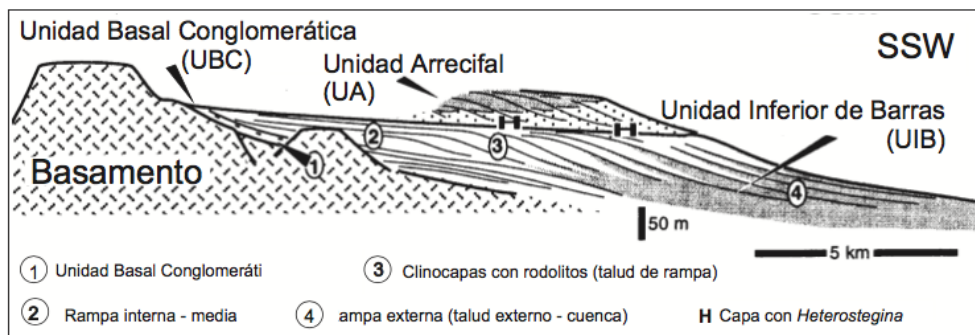


Figura 2. Esquema deposicional de las unidades del Mioceno postorogénico de Menorca. Modificado de Pomar *et al.* (2002).

Figure 2. Depositional units sketch at the Upper Miocene from Menorca. After Pomar *et al.* (2002).

seguiremos la descripción de estos últimos, especialmente lo relacionado con las unidades de mayor presencia en la franja litoral meridional de la isla (Obrador *et al.*, 1983).

Así, la unidad inferior aflorante en la línea de costa y presente, especialmente, en la zona central de la isla, corresponde a la denominada Unidad Inferior de Barras. Ésta se generó en un ambiente de rampa progradante desarrollada en una plataforma somera y sus componentes principales, casi exclusivamente, son bioclásticos (en su mayor parte fragmentos de algas coralíneas). El conjunto muestra una marcada estratificación que alterna los niveles calcareníticos (*grainstones* y puntualmente *rudstones*) con los calcisiltíticos (*packstones*), con ligera pendiente en dirección sur, y que localmente pueden presentar estructuras internas tractivas (i.e. barras), así como niveles intensamente bioturbados. La unidad superior, Unidad Arrecifal, siempre dispuesta sobre la anterior, corresponde a un ambiente de plataforma arrecifal, también progradante, con diversas facies deposicionales relacionadas con dicho ambiente (frente, talud o *lagoon*) pero que, en general, está dominada por las calcarenitas de grano grueso (*rudstones*) –que se corresponden con los taludes y en los cuales la laminación presenta una mayor pendiente– y las calizas (*framestones*) que presentan un aspecto más masivo siendo la estratificación menos evidente.

Los materiales del Mioceno superior son postorogénicos. Es decir, se depositaron después de la estructuración correspondiente a la orogénesis alpina que articuló el cinturón bético y con él su continuación nororiental; el denominado Promontorio Balear, en el cual se enmarca la isla de Menorca. Los efectos de la estructuración alpina son visibles en la zona de *Tramuntana* de Menorca, donde, en los materiales anteriores al Mioceno superior, puede apreciarse un complejo sistema de cabalgamientos (Roca, 1992).

Los depósitos neógenos presentan tan sólo fracturación extensiva (Gelabert *et al.*, 2005). Se trata de dos sistemas con orientaciones distintas: una más general de dirección NW-SE, con saltos superiores al orden decamétrico y una longitud kilométrica con un ligero buzamiento preferente hacia el SW; así como un segundo sistema, de dirección NNE-SSW, en el que destaca la falla de Santa Eulàlia-Son Bou. (Bourrouilh, 1983; Roca, 1992; Rosell y Llopart, 2002)

Según Gelabert (2003) y Gelabert *et al.* (2005), esta falla extensiva de edad miocena habría actuado de forma compresiva con posterioridad (Plio-Cuaternario), dando un fenómeno de inversión tectónica y provocando la formación de un anticlinal muy laxo con eje aproximado N-S y que definiría la estructura general del *Migjorn* de Menorca. Como consecuencia del cual, aflorarían en la línea de costa del sector central del sur de la isla, las facies del Mioceno superior más profundas (Unidad Inferior de Barras), mientras que en los extremos (Maó y Ciutadella) aflorarían los niveles superiores (Unidad Arrecifal) (Fig. 3). Relacionada con la estructura anticlinal, se observan un conjunto importante de diaclasas con orientaciones variables en función de su localización en el anticlinal suave. Así en los flancos oriental y occidental predominan unas direcciones E, ENE y ESE, mientras que en el sector central los trazados N, NNE y NNW son los predominantes.

Es destacable, también, la fracturación presente con una dirección paralela a costa, responsable, en su mayor parte, de su trazado y de la formación de los imponentes acantilados, así como el trazado característico en forma de semicírculo en las inmediaciones de la albufera de Son Bou asociado a una falla extensional de tipo *rollover*.

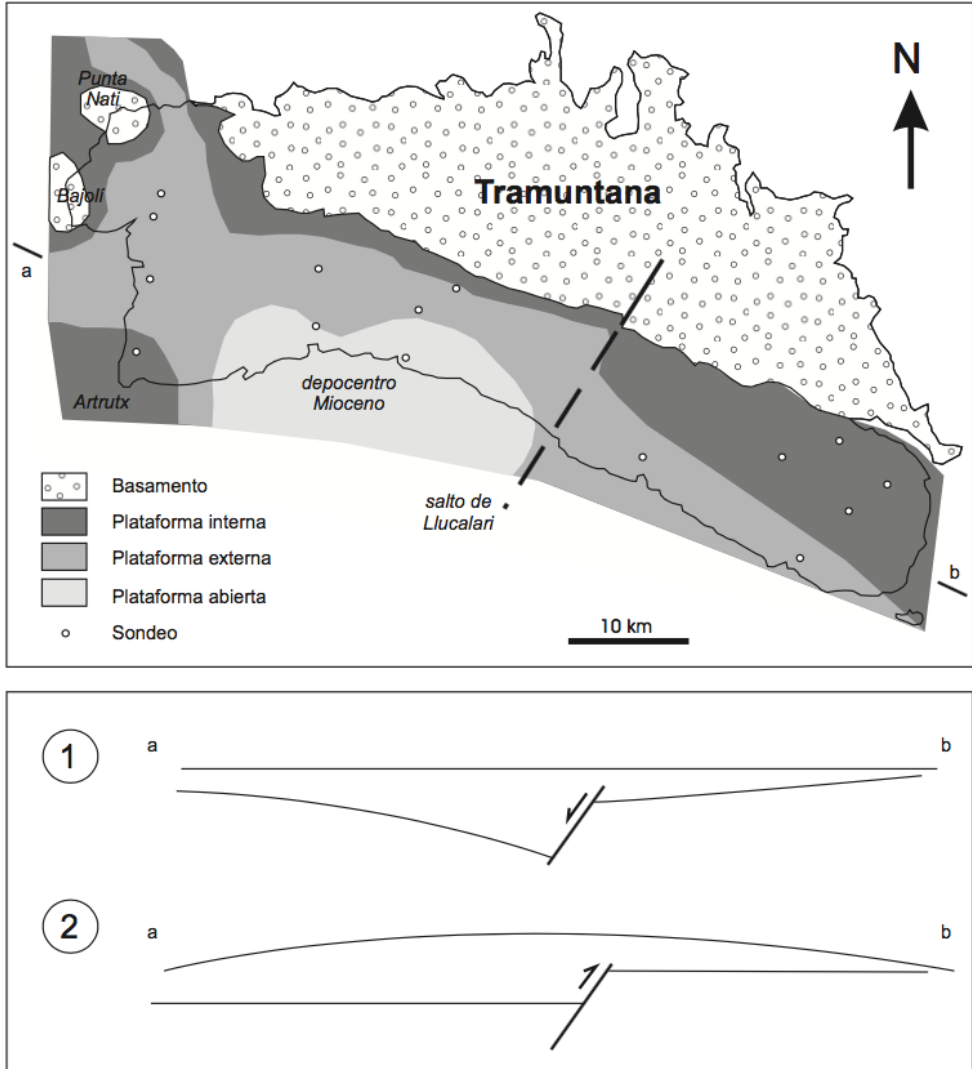


Figura 3. Esquema de la distribución de la paleotopografía durante el Mioceno superior. Corte W-E de la zona del Migjorn durante el Mioceno superior (1) y su posterior evolución durante el Plio- Cuaternario (2). Modificado de Gelabert (2003).

Figure 3. Paleotopography during the Upper Miocene. W-E Migjorn section during the Upper Miocene (1) and its evolution during the Plio-Quaternary (2). After Gelabert (2003).

3 | El papel de la estructura en el modelado del litoral menorquín

La forma anticlinal de eje N-S que caracteriza la plataforma carbonatada del Mioceno superior del Migjorn de Menorca controla, como hemos comentado, la distribución y características de la fracturación y diaclasamiento de los materiales miocenos. Así quedan perfectamente delimitadas tres áreas con una red drenaje de ca-

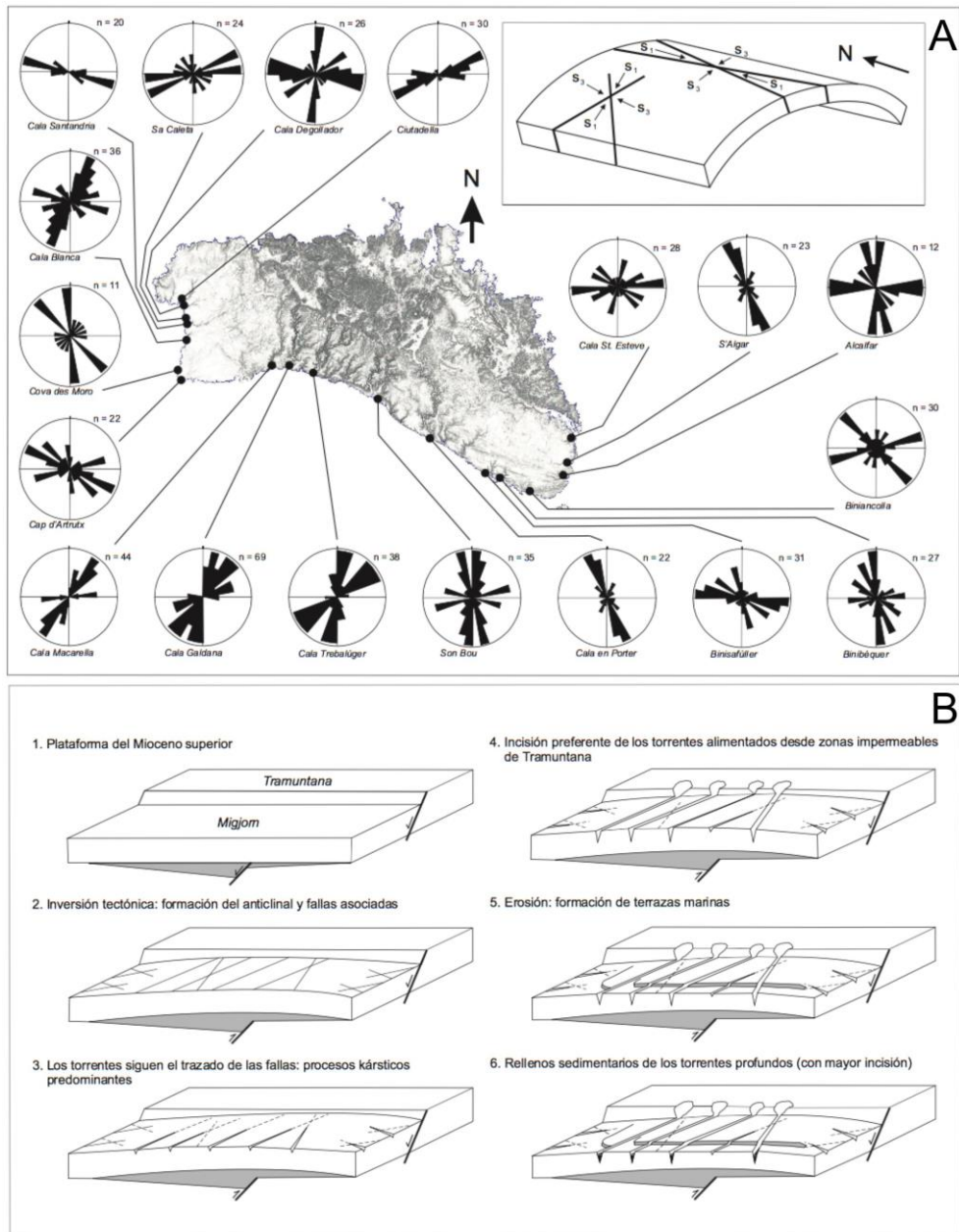


Figura 4. A) Situación de las estaciones de fracturación realizadas sobre el mapa de pendientes de Menorca. Diagrama en rosa de las orientaciones de falla. En el recuadro, asociación ideal de fallas y sistema de esfuerzos en un anticlinal. B) Esquema de la evolución geodinámica del sistema de torrentes del Migjorn de Menorca Modificado de Gelabert (2003).

Figure 4. A) Fracture rose directions along the Migjorn of Menorca. Faults and joints schema in the upper-right box. B) Migjorn streams geodynamic evolution. After Gelabert (2003).

racterísticas bien diferenciadas (Gelabert *et al.*, 2005; Segura *et al.*, 2007): a) la parte central, más elevada, destaca por un sistema de barrancos, con cauces muy encajados y paredes muy verticalizadas, que siguen el trazado de la fracturación debida a la inversión tectónica de la falla normal de Son Bou-Santa Eulàlia. El grado de incisión y encajamiento es variable en función de la proporción de rocas impermeables expuestas en cada una de las cuencas de drenaje); b) los sectores oriental y occidental, muy diferenciados, presentan barrancos de pendientes suaves y escasa incisión de los cauces, además de un trazado con tendencias E-W, que encaja también con la estructuración del antifórme.

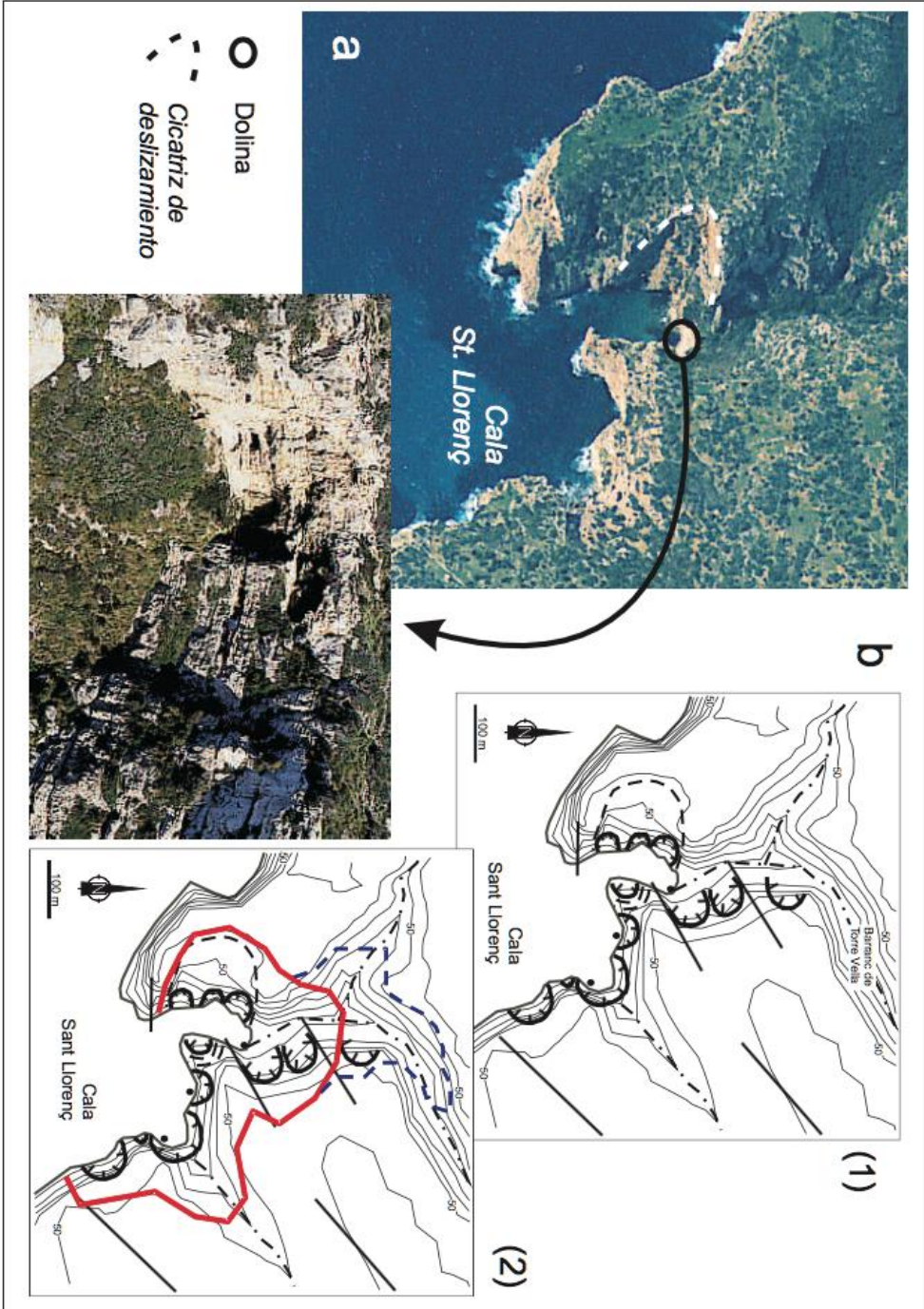
La principal orientación del cauce de los barrancos coincide claramente con las principales orientaciones de las fracturas medidas en la plataforma carbonatada miocena (Fig. 4). La fracturación es no tan sólo visible en el desarrollo y trazado de los torrentes y en el de la línea de costa o en las desembocaduras de los barrancos, sino que, al favorecer la circulación del flujo freático, también controla el desarrollo y evolución de los conductos kársticos del subsuelo, así como de su evolución y distribución de las formas superficiales, principalmente las de colapso. De toda esa conjunción de procesos e interferencia entre modelado fluvial, kárstico, litoral y tectónica, es ejemplo paradigmático una macroforma, tan característica en el Mediterráneo, como la cala.

4 | El papel del karst en la evolución del litoral menorquín

En el *Migjorn* de Menorca, los procesos de modelado producto de la disolución kárstica –tanto del endokarst como del exokarst– son básicos para entender las morfologías presentes, especialmente en la zona litoral. La climatología templada, con una pluviometría más o menos regular y marcado carácter estacional, favorece la evolución de los procesos kársticos (García-Senz, 1985). Eso, sin menoscabo de la interferencia con otro tipo de procesos, como puedan ser los fluviales y los marinos, actuando siempre sobre los depósitos tabulares miocenos que presentan una importante diaclasación estructural que condiciona el flujo hídrico.

Podemos considerar las diversas formas de tipo kárstico a diferentes escalas. En nuestro caso ponderamos dos escalas que definen los principales accidentes del litoral. Una primera que podemos encasillar como de macroescala y que, en su vertiente más simple, relacionamos con las calas. Así, en otro orden de magnitud, la microescala, en la que englobaríamos todas las morfologías desarrolladas sobre el sustrato rocoso de la línea de costa asociadas al lapiaz o *karren* litoral.

Las calas, tradicionalmente, se han asociado a la incisión fluvial que tuvo lugar durante el último o últimos periodos glaciales. La posterior inundación y conversión a un ambiente de estuario durante la transgresión holocena habría dado lugar a esta forma de costa entre acantilados (Rosselló, 2005). Sin dejar de lado el importante papel que pueda jugar la red de fracturación en el trazado –especialmente en el final del recorrido de los torrentes así como en el de la línea de costa y la forma de las calas (Rosselló, 1995)–, la gran variabilidad morfológica y el papel poco claro de los actuales procesos fluviales hacen pensar en la intervención de otros procesos para explicar el desarrollo y evolución de los barrancos y sus cauces y, por consiguiente, de las calas. En este sentido se aboga por una clara interrelación entre la cala y el modelado kárstico (Fig. 5).



Un claro ejemplo lo podemos focalizar en Cala Galdana. Aunque muy modificada en la actualidad, puesto que se trata de un importante centro turístico, la apariencia del conjunto, es claramente de desembocadura fluvial con un importante relleno sedimentario y un ambiente de albufera y restinga originado en la última transgresión flandriense (Fornós *et al.*, 1998). El barranco presenta, en esta zona baja, una trayectoria meandriforme, de perfil cóncavo. En la cala, propiamente dicha, las paredes verticales muestran también estas formas cóncavas delimitadas claramente por paredes muy verticalizadas y favorecidas por una diaclasación (fracturación) vertical de direcciones N50-60° y N120-140°, así como muy relacionadas con hundimientos y colapsos de tipo kárstico. Dichos hundimientos son muy visibles en la línea de costa actual y también es muy patente su relación con la fracturación las paredes de los acantilados. La relación entre dolinas, conductos verticales, fracturación y, en general, formas endokársticas horizontales es muy evidente en todo el sector (Rosselló *et al.*, 2002).

Exploraciones recientes en el endokarst sumergido litoral (Gràcia *et al.*, 2000) ponen de manifiesto un cierto paralelismo entre la presencia de conductos endokársticos y el trazado de los actuales lechos de los barrancos. Este fenómeno abogaría por el clásico modelo de evolución de litoral carbonatado como producto de la zona de disolución preferente en la zona de mezcla de aguas en los acuíferos marinos carbonatados (Smart y Whitaker, 1991), donde la cuña de agua marina interacciona con las aguas freáticas continentales (Whitaker y Smart, 1990; Mylroie y Carew, 1990). La presencia de fracturación y/o diaclasamiento importante, transversal a la línea de costa, en la zona central del *Migjorn* de Menorca, favorece la canalización del flujo a través de dichas discontinuidades (Back *et al.*, 1984), ahondándose de esta manera en los procesos de disolución de forma digitada e incrementándose así la porosidad kárstica que, a la larga facilitará la actividad abrasiva marina gracias a los puntos de debilidad creados, bien sea en forma de conductos o depresiones.

A este proceso hay que añadir la variabilidad del nivel del mar durante el Pliocuatnario debido a las fluctuaciones glacio-eustáticas. Dicha variabilidad, con oscilaciones de orden superior a los cien metros, daría lugar a la superposición de varios niveles de disolución que se relacionarían con momentos de estabilidad del nivel del mar y que, en su proceso evolutivo, darían lugar a la formación de cavidades asociadas a depresiones kársticas o dolinas y cañones kársticos. El colapso de buena parte de estas cavidades se daría en momentos de descenso del nivel marino, como respuesta a la pérdida de soporte hidráulico. El mecanismo no se desarrollaría de forma única, sino que el resultado final suele ser una concurrencia de procesos fluviales, kársticos y, en última instancia, marinos que derivan en una serie de formas entre las que destaca, por su singularidad, la cala que abordaremos más adelante.

Desde el punto de vista kárstico -a microescala- tampoco puede obviarse la presencia de un modelado como el del lapiaz o karren litoral (Ginés, 2000; Gómez-Pujol y Fornós, 2004c) recurrente en buena parte del litoral carbonatado del sur y que

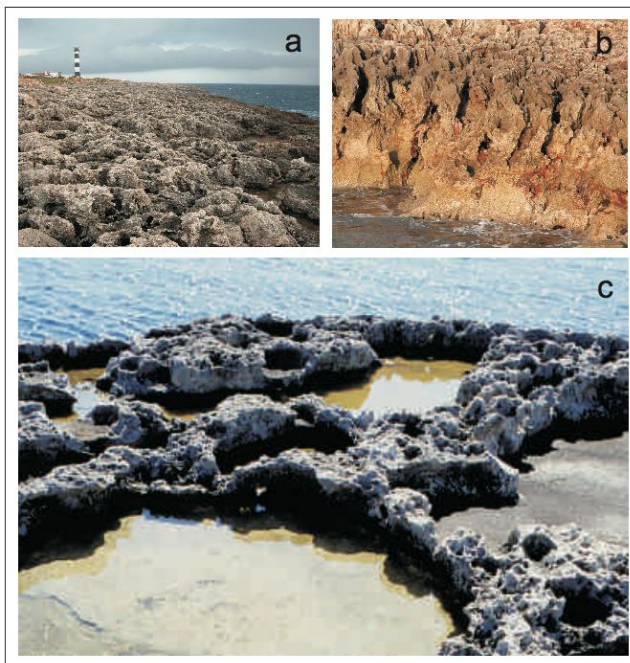
(página anterior)

Figura 5. Modelo evolutivo de formación de una cala y barranco asociado por coalescencia de dolinas de colapso. Ejemplo de Cala Sant Llorenç. Modificado de Fornós (2003).

Figure 5. *Cala and stream evolution model. Notice that the stream is associated to the coalescence of different collapse doline. Example from Cala Sant Llorenç. After Fornós et al. (2003).*

Figura 6. Lapiaz o karren litoral bien desarrollado sobre los niveles calcareníticos del Mioceno superior de la zona del Migjorn de Menorca. (a) Aspecto general en la zona del Cap d'Artrutx, (b) desarrollo de los pináculos en Cala Blanca, (c) cubetas o kame-nitzas en el área de Punta Prima. Modificado de Fornós (2003).

Figure 6. Coastal karren intensively developed at the Upper Miocene calcarenitic rock outcrops along the Menorcan Migjorn coast. (a) General overview at Cap d'Artrutx, (b) Pinnacles forms at Cala Blanca, (c) basin pools at Punta Prima. After Fornós (2003).



y abarca todas las formas de alteración desarrolladas sobre las rocas carbonatadas en ambientes litorales en los cuales la disolución, junto con la actividad biológica y otros procesos como la haloclástia, ejercen un papel esencial (Gómez-Pujol y Fornós, 2009).

Se puede observar una clara relación entre el desarrollo del lapiaz litoral y la forma general de los acantilados o costa rocosa en general, así como de los aspectos texturales que presenta la roca sobre la que se generan. Así, el máximo desarrollo se da en la zona de Migjorn tanto en las calcarenitas del Mioceno superior como en las eolianitas cuaternarias cuando éstas están presentes. Especialmente llama la atención el grado de evolución del lapiaz que se da en la costa baja rocosa tanto occidental (Ciutadella) como Oriental (Maó), mientras que, en la zona central, tanto por la altura y verticalidad de sus acantilados como por su textura más calcisiltítica, el lapiaz costero presenta un desarrollo más moderado.

En la zona litoral del Migjorn de Menorca se pueden observar prácticamente todas las formas que se han descrito relacionadas con el lapiaz litoral, desde la más frecuente y característica como son las cubetas, pozas o *kamenitza*, hasta los alveólos o microalveólos (*pits*) o los pináculos (*pinnacles*) (Gómez-Pujol *et al.*, 2009). Todas ellas se distribuyen formando un claro gradiente resultado de la interacción de los procesos marinos, continentales y, en función de ello, de los parámetros ecológicos y de microhábitats generados (Fig. 6).

5 | Una macroforma emblemática: la cala

Si por una cosa destaca en general el paisaje del litoral calcáreo mediterráneo y, muy especialmente, el balear, del cual el menorquín es un ejemplo paradigmático, es

por la presencia de calas (Kelleat and Scheffers, 2009; Furlani *et al.*, 2016). El término cala tiene unos orígenes pre-indoeuropeos (Kranj, 1998) y se puede definir, a grandes rasgos, como una forma de bahía en el litoral rocoso de la que ya Penck (1894) destacó como característica básica, la presencia de paredes verticalizadas y la inundación marina posterior a la profunda incisión acaecida durante periodos de descenso del nivel marino (Fig. 7). Aunque esta forma puede darse en cualquier litología, se ha venido considerando la aplicación de dicho término, tan sólo cuando está asociada a plataformas carbonatadas (Rosselló, 2001; Gómez-Pujol *et al.*, 2013), y en algunos casos teniendo presente que buena parte de los cursos fluviales a los que están asociados no son funcionales (Rosselló, 2005).

En el caso de las calas presentes en el *Migjorn* de Menorca, parece evidente que el desarrollo y evolución de las mismas es compleja, con la intervención de diversas agentes y controles, entre los cuales la influencia kárstica jugaría un rol importante. Así, la evolución del modelado kárstico en una plataforma carbonatada tabular (con marcada estratificación prácticamente horizontal y con fracturación y/o diaclasación más o menos regular y distensiva), desarrollada en la zona del endokarst litoral por influencia de la corrosión preferente en la zona de mezcla de aguas, junto con la repetitiva oscilación glacioeustática del nivel marino, implicaría una subordinación de la evolución de la red de drenaje, a la captura de depresiones kársticas (dolinas) (Fornós, 2004), favoreciéndose el retroceso de los acantilados y configurando en los valles incisos la forma de cala.

Uno de los aspectos sedimentológicos y de forma asociados a las calas y a los barrancos –a tratar en detalle en el próximo apartado– es el relleno sedimentario de



Figura 7. Un típico ejemplo de cala delimitado por paredes verticalizadas. Cala en Porter.
Figure 7. A paradigmatic example of cliffy-sided cala at Cala en Porter.

sus fondos que es muy variable en función del espacio de acomodación. A su vez, éste está intrínsecamente relacionado con la incisión del cauce fluvial-torrencial y con el estadio de desarrollo evolutivo de la cala (Segura *et al.*, 2007).

Desde un punto de vista morfométrico la relación entre longitud (anchura de la bahía) y penetración de la cala presenta una distribución de valores característica y diferenciada de otros tipos de costas-valles de inundación, que en el caso de Menorca no depende tanto del grado de incisión fluvial, como del espaciado de la fracturación y del retoque kárstico (Gómez-Pujol *et al.*, 2013).

5 | El relleno de los fondos de los barrancos

Los aspectos hidrogeomorfológicos estudiados en el *Migjorn* de Menorca así como diversos estudios sedimentológicos de sondeos de reconocimiento han permitido conocer la magnitud del relleno sedimentario y las características de los valles encajados (Fornós *et al.*, 1998; Fornós, 1999).

Las características de estos cursos fluviales presentan diferencias a lo largo de toda la costa meridional, pudiéndose diferenciar claramente dos sectores en base a sus atributos. Así, en los márgenes oriental (zona de Maó) y occidental (zona de Ciutadella) los barrancos presentan un recorrido longitudinal relativamente corto –en pocas ocasiones superior al kilómetro– y los cauces son sólo apreciables cerca de la línea de costa, aunque allí, con una incisión importante y con rasgos kársticos que ensombrecen el modelado fluvial (i.e. valles colgados, dolinas, poljes). En cambio, en la zona central del *Migjorn*, los barrancos presentan trazados fluviales de mayor recorrido, atravesando todo el altiplano meridional e incluso, en muchos de ellos, adentrándose en la zona de *Tramuntana*. La característica más interesante de dichos barrancos es la presencia en sus tramos finales de unos fondos planos, relativamente anchos (debidos al relleno sedimentario), que vienen delimitados por paredes verticales, relativamente altas. Estas paredes verticales están esculpidas en los típicos materiales calcareníticos que constituyen toda la zona del *Migjorn* y que presentan una marcada estratificación con una suave pendiente en dirección sur.

De oeste a este, los barrancos que presentan fondos planos con relleno sedimentario importante son: el Barranc de Santa Anna que desemboca en Cala Macarella, el Barranc d'Algendar que vierte sus aguas en Cala Santa Galdana, el Barranc de Trebalúger que da nombre a la cala homónima, el Barranc de Son Bou y Barranc de Son Boter que vierten sus aguas en la Albufera de Son Bou y, finalmente, el Barranc de Cala en Porter que finaliza en la cala de su mismo nombre (Fig. 8). Todos ellos tienen su cabecera en los materiales impermeables de la zona de *Tramuntana* y siguen un curso relativamente rectilíneo en dirección sur. En esta zona central se localizan algunos otros torrentes de características geomórficas similares, aunque relativamente más cortos, como el de Binigaus o el de Sa Torre, pero que en sus desembocaduras no presentan rellenos sedimentarios.

Desde un punto de vista geomorfológico, los rellenos sedimentarios de los barrancos adoptan en la parte baja de los mismos una topografía plana asociada a una sedimentación de materiales finos que queda limitada por unas paredes prácticamente verticales cortadas en los materiales miocenos calcareníticos y/o calcisiltíticos. Ese fondo de las calas-barrancos, subhorizontal, no supera en ningún caso los 4-5 m sobre la actual cota del nivel del mar.

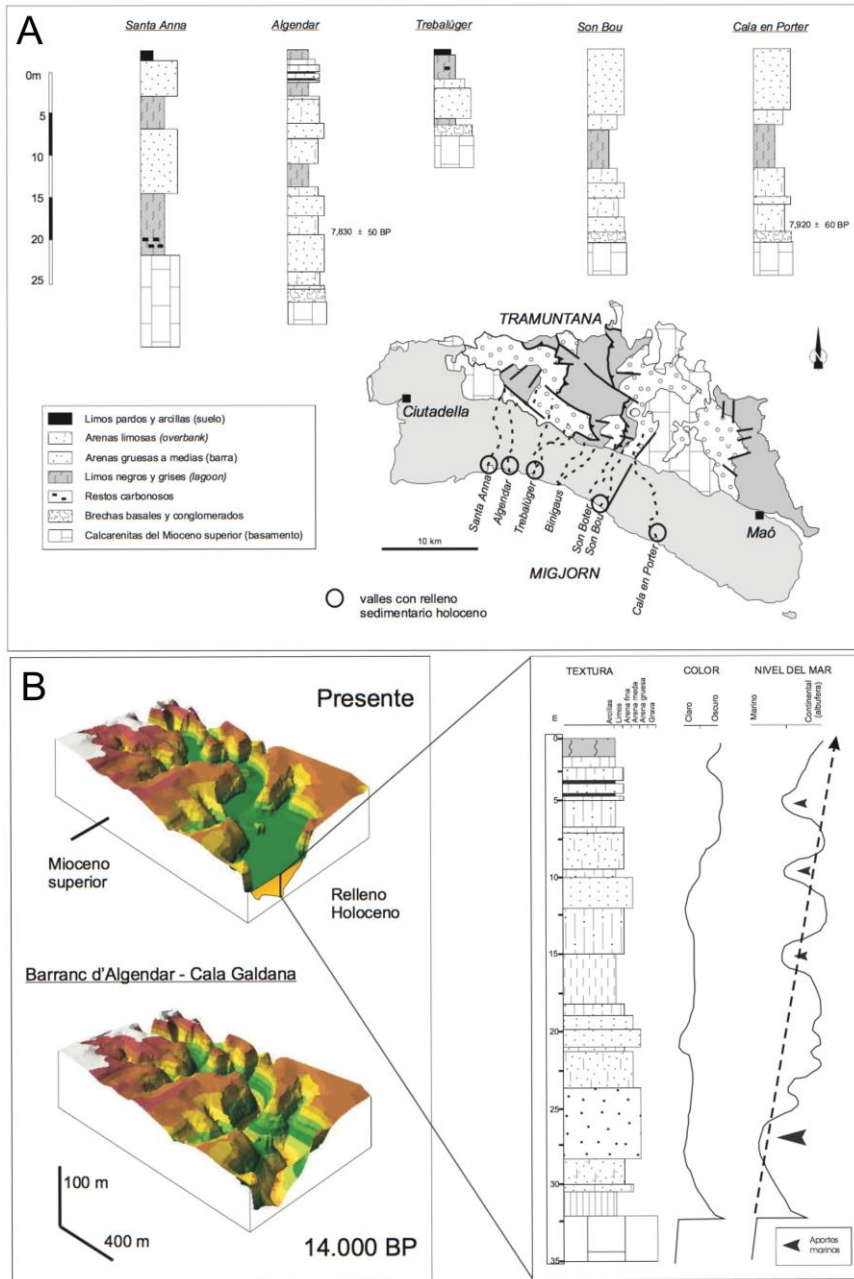


Figura 8. A) Esquema geológico y geomorfológico de la isla de Menorca con el trazado de los principales torrentes de la zona central, y las columnas estratigráficas esquemáticas de los rellenos sedimentarios en algunos de ellos. B) Modelo evolutivo en 3D del Barranc d'Algendar (Cala Galdana) y columna estratigráfica sintética. Modificado de Fornós y Segura (2003).

Figure 8. A) Geomorphic and geological sketch of Menorca. Notice the main streams in the central sector of the island, as well as, the logs at the different stream mouths. B) Evolution model for the Barranc d'Algenda (Cala Galdana) and stratigraphic log. After Fornós y Segura (2003).

La morfología de la incisión se ha estudiado mediante sondeos eléctricos (Pardo *et al.*, 1997) observándose una incisión máxima que supera los 50 m en los barrancos de Macarella, Cala Galdana y Trebalúger. Aunque en los sondeos mecánicos realizados tan sólo se ha podido alcanzar una potencia máxima del relleno sedimentario de 31 m en Cala Galdana –probablemente debido al no encontrarse alineado con el depocentro del barranco– no puede descartarse la presencia de sumideros de tipo kárstico como los descritos aguas arriba (Pardo *et al.*, 1997). La potencia del relleno sedimentario disminuye de forma progresiva aguas arriba, llevando aparejadas tanto una variación en el tipo de relleno como de las facies sedimentarias.

La sedimentación presente en estos rellenos es mayoritariamente de materiales finos, lutíticos, de coloración oscura que alternan con materiales arenosos no consolidados, blanquecinos y pardos. Los materiales de tipo detrítico, como gravas o conglomerados, o materiales lutíticos, con coloraciones rojizas, son tan sólo testimoniales.

El conjunto de la secuencia del relleno sedimentario se interpreta como facies de transición litoral con diversos subambientes, caracterizados por una mayor o menor influencia marina. Así, en la base, suelen encontrarse gravas y a veces conglomerados con cantos redondeados a subangulosos y limos rojos que se interpretarían como facies de reacondicionamiento basal y depósitos de tipo fluvial. Estas facies presentan escasa potencia y una distribución muy aleatoria. Los limos negros y grises son la facies más abundante. Caracterizados por una importante presencia de la materia orgánica que, puntualmente, resulta en acumulaciones de restos carbonosos. Esta facies es rica en fauna de tipo salobre y localmente pueden observarse niveles con fauna y flora únicamente de agua dulce. Se interpreta como un ambiente de albufera. Arenas de gruesas a medias, bien clasificadas, con los granos subredondeados y escasa presencia de materia orgánica se intercalan con las anteriores facies y se corresponderían a materiales acumulados por la acción eólica y/o retrabajamiento marino en un sistema playa/duna típico. La presencia de niveles con arenas limosas ricas en fauna, con características claramente tanto marinas como salobres, se interpretaría como depósitos de transición del sistema playa-duna al sistema lagunar lacustre, probablemente formando pequeños abanicos de rebase, intralagunares, y deltas de inundación. La secuencia en todos los casos acaba con facies limosas y/o arenosas de colores parduzcos que presentan abundantes restos vegetales y que se corresponden con los procesos de edafogénesis que se dan en la actualidad.

Las dataciones de algunos niveles de los sondeos indican que toda la secuencia corresponde al Holoceno, siendo la edad más antigua, la obtenida en la base del relleno de Cala en Porter, con una edad de 7920±60 BP (Yll, 1992 y Yll *et al.*, 1994).

Agradecimientos

El presente trabajo es una contribución a los proyectos de investigación MINECO CGL2013-48441-P y CGL2016-79246-P (AEI/FEDER, UE).

Bibliografía

Back, W., Hanshaw, B.B. y Van Driel, J.N. (1984): Role of groundwater in shaping the Eastern Coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico. En: La Fleur, R.G. (ed.), *Groundwater as a*

- Geomorphic Agent*. Allen and Unwin, Inc. London. The Binghamton Symposia in Geomorphology: International Series, 13(12): 281-293.
- Bourrouilh, R. (1983): *Stratigraphie, sédimentologie et tectonique de l'île de Minorque et du Nord-Est de Majorque (Baléares). La terminaison Nord-orientale des Cordillères Bétiques en Méditerranée occidentale*. Memorias del Instituto Geológico y Minero de España, 99: 1-672.
- Fornós, J.J. (1999): Rebliment holocènic de la vall incisa de Santa Anna, Sud de Menorca (Mediterrània occidental). En: Rosselló, V.M. (ed.), *Geoarqueologia i Quaternari litoral, Memorial M.P. Fumanal*: 342-355. València, Publicacions de la Universitat de València
- Fornós, J.J. (2003): El karst y la evolución del litoral del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 101-110. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J.J. (2004): Morfologia costanera i processos litorals. El paper de la fracturació i el karst. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 201-212. Palma, Societat d'Història Natural de Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Fornós, J.J. y Segura, F. (2003): El relleno de los fondos de los barrancos del Migjorn de Menorca. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 111-121. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Fornós, J.J., Fumanal, M.P., Pons, G.X., Barón, A., Fornés, A., Pardo, J.E., Rodríguez-Perea, A., Rosselló, V.M., Segura, F. y Servera, J. (1998): Rebliment holocènic a la vall incisa del barranc d'Algendar (Cala Galdana, sud de Menorca, Mediterrània Occidental). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 41: 173-189.
- Fornós, J.J., Pomar, L. y Ramos-Guerrero, E. (2002): Balearic Islands. In: Gibbons, W. and Moreno, T. (eds.) *The Geology of Spain*. The Geological Society. 327-334. London.
- Furlani, S., Papalardo, M., Gómez-Pujol, L. y Debrat, M. (2014): The rock coast of the Mediterranean and Black seas. En: Kenedy, D., Stephenson, W.J., Naylor, L. (eds.), *Rocky coast geomorphology, a global synthesis*: 77-87. London, Geological Society of London.
- García-Senz, J.M. (1985): *Estudio geomorfológico del karst del Migjorn menorquí*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Geodinámica Externa e Hidrogeología. Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona. 51 pp.
- Gelabert, B. (2003): La estructura geològica de Menorca. Las zonas de Tramuntana y Migjorn. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 39-48. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo, J.E., Rosselló, V.M. y Segura, F. (2005): Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65: 139-155.
- Ginés, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca; una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra. Palma, Universitat de les Illes Balears.
- Ginés, J. (2003): El modelado kárstico. En: Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gómez-Pujol, L. (eds.), *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 8: 65-70. Palma, AGE, Universitat de València, Universitat de les Illes Balears, Societat d'Història Natural de les Balears.
- Ginés, J. y Fornós, J.J. (2004): Caracterització del karst del Migjorn. La seva contribució al modelat del territori. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 259-274. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004a): Forma, procesos y zonación en el lapiaz -karren- litoral de Menorca, 1: aproximación morfométrica. En: Benito, G. y Díez-Herrero, M. (eds.),

- Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 347-355. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004b): Forma, procesos y zonación en el lapiaz –karren– litoral de Menorca, 2: observaciones mediante microscopía electrónica de barrido. En: Benito, G. y Díez-Herrero, M. (eds.), *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 347-355. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004c): Les microformes litorals del Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2009): Coastal karren in the Balearic Islands. En: Ginés, J.J., Knez, M., Slabe, T. y Deybrodt, W. (eds.), *Karst rock features, karren sculpturing*: 487-502. Ljubljana, ZRC Publishing.
- Gómez-Pujol, L., Fornós, J.J. y Pomar, F. (2011): El karren litoral a les Illes Balears. *Endins*, 35 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 55: 99-112.
- Gómez-Pujol, L., Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Segura, F.S. y Onac, B.P. (2013): Structural control on the presence and carácter of calas: Observations from Balearic Islands limestone rock coast macroforms. *Geomorphology*, 194: 1-15.
- Gràcia, F., Clamor, B. y Lavergne, J.J. (2000): Les coves de Cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 23: 41-57.
- Kelletat, D. y Scheffers, A. (2009): Europe, coastal geomorphology. En: Schwartz, M.L. (ed.). *Encyclopedia of Coastal Sciences*: 452-462. Berlin, Springer.
- Kranjc, A. (1998): Kras (The Classical Karst) and the development of karst science. *Acta Carsologica* 27, 151-164.
- Mylroie, J.E. y Carew, J.L. (1990): The flank margin model for dissolution cave development in carbonate platforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 413-424.
- Obrador, A. y Pomar, L. (2004): El Miocè de Migjorn. En: Fornós, J.J., Obrador, A. y Rosselló, V.M. (eds.), *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 235-244. Palma, Societat d'Història Natural de les Balears, Institut Menorquí d'Estudis.
- Obrador, A., Pomar, L., Rodríguez-Perea, A. y Jurado, M.J. (1983): Unidades deposicionales del Neógeno menorquí. *Acta Geològica Hispànica*, 18: 87-97.
- Pardo, J.E., Rodríguez-Perea, A., Fornós, J.J., García, F. y Cervera, T. (1997): Caracterización de los fondos de las calas y los barrancos menorquines mediante sondeos eléctricos. *Dinámica Litoral Interior, Actas XV Congreso de Geógrafos Españoles*, 1: 191-203.
- Penck, A. (1894). *Morphologie der Erdoberfläched*. Engelhorn. Stuttgart.
- Pomar, L., Obrador, A., y Westphal, H. (2002): Sub-wavebase cross-bedded grainstone on a distally steepened carbonate ramp, Upper Miocene, Menorca, Spain. *Sedimentology*, 49: 139-169.
- Roca, E. (1992): *L'estructura de la conca Catalano-Balear: paper de la compressió i de la distensió en la seva gènesi*. Tesis Doctoral, Barcelona, Universitat de Barcelona. 330 pp.
- Rosell, J. y Llompart, C. (2002): *El naixement d'una illa. Menorca. Guia de geologia pràctica*. Maó, Institut Menorquí d'Estudis, 279 pp.
- Rosselló, V.M. (1995): Les cales, un fet geomòrfic epònim de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 38: 167-180.
- Rosselló, V.M. (2005): Cala, una mesoforma litoral: concepte, models i aproximació morfomètrica. *Cuadernos de Geografía*, 77, 1-18.
- Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Gelabert, B., Giménez, J., Ginés, J., Pardo, J. y Segura, F. (2002): El papel del karst en el macromodelado litoral: el ejemplo de las calas de las Islas Baleares. En: Carrasco, F., Durám J.J. y Andreo, B. (eds.), *Karst and Environment*: 329-335. Madrid, ITGME.
- Segura, F.S., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Fornós, J.J. y Gelabert, B. (2007): Morphometric indices as indicators of tectonic, fluvial and karst processes in calcareous drainage basins, South Menorca Island, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1928-2946.

- Smart, P.L. y Whitaker, F.F. (1991): Karst processes, hydrology and porosity evolution. En: V.P. Wright, V.P, Esteban, M. y Smart, P.L. (eds.), *Palaeokarsts and Palaeokarstic Reservoirs*. P.R.I.S. Occ. Publ. Series, 2: 1-54. Reading, University of Reading.
- Whitaker, F.F. y Smart P.L. (1990): Active circulation of saline ground waters in carbonate platforms: Evidence from the Great Bahama Bank. *Geology*, 18: 200-203.
- Woodroffe, C.D. (2003): *Coasts. Form, process and evolution*. Cambridge, Cambridge University Press. 622 pp.
- Yll, E.I. (1992): *Estudi de l'evolució de la vegetació i el clima durant el Tardiglacial i el Postglacial a partir d'anàlisis pol·líniques del Delta de l'Ebre i de Menorca*. Tesis doctoral. Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Yll, E.I., Pérez-Obiol, R., Pantaleón-Cano, J. y Roure, J.M. (1997): Palynological evidence for climatic change and human activity during the Holocene on Minorca (Balearic Islands). *Quaternary Research*, 48: 339-347.