EL KARST LITORAL EN EL LEVANTE DE MALLORCA: UNA APROXIMACIÓN AL CONOCIMIENTO DE SU MORFOGÉNESIS Y CRONOLOGÍA

por Joaquín GINÉS [1, 2]

Resum

Es procedeix a l'estudi del carst litoral en la meitat oriental de l'illa de Mallorca, enfocant-lo des d'una perspectiva pluridisciplinar que s'ocupa tant de diferents aspectes del seu modelat epigeu (lapiaz costaner, cales i barrancs, paleocarst i morfologia de la línia de costa...) com, sobretot, de les peculiaritats del ric endocarst existent a l'àrea estudiada. Les investigacions s'han dirigit, en especial, a l'anàlisi de les interferències observades entre el modelat endocàrstic i la dinàmica litoral, aportant dades novedoses sobre matèries molt variades. Els temes tractats abracen des de la geoquímica i l'espeleogènesi, en els aqüífers carbonatats litorals, fins als nombrosos exemples de cavitats mixtes de gènesi càrstico-marina. S'ha dedicat particular atenció als rebliments al·lòctons de les coves costaneres, que inclouen tant materials detrítics diversos (calcarenites marines i/o eòliques) com restes paleontològiques de vertebrats endèmics. Els rebliments autòctons de les cavitats (espeleotemes, en general) assoleixen especial rellevància, degut a les grans possibilitats pel que fa a la seva datació radiomètrica. El conjunt d'interferències analitzades permet reconstruir l'evolució de l'endocarst estudiat, al llarg del Plio-Quaternari.

El principal interès dels treballs realitzats resideix en les valuoses informacions cronoestratigràfiques, obtingudes en relació amb les fluctuacions pleistocèniques del nivell marí. Concretament, l'estudi dels espeleotemes freàtics ha demostrat que aquestes cristal·litzacions constitueixen un excel·lent registre de la història del nivell de la Mediterrània, durant el Pleistocè Mitjà i Superior i l'Holocè. Aquesta categoria de dipòsits secundaris, propis de les coves càrstiques litorals, ha estat estudiada mitjançant tècniques diverses (datacions radiomètriques Th/U, mesures d'ESR, microscopia òptica i electrònica, difracció de raigs-X, anàlisis d'isòtops estables...), per tal d'obtenir dades cronològiques, paleoclimàtiques, mineralògiques i cristal·logràfiques precises. Presenten particular transcendència les corbes eustàtiques proposades per a la Mediterrània occidental, corresponents als darrers 300 ka, les quals resulten molt detallades en el rang d'edats compreses entre 150 i 50 ka BP. Centrant-nos en el darrer interglacial (estadi isotòpic 5), es distingeixen quatre pulsacions transgressives, situades entre 130 i 80 ka BP, separades per tres esdeveniments de signe fred que ocasionen davallades brusques del nivell de la Mediterrània, d'almenys 20 metres de magnitud.

(Resum de la Tesi Doctoral en Geografia, desenvolupada per l'autor a la Universitat de les Illes Balears, amb el títol indicat a dalt).

Abstract

This paper deals with the study of littoral karst on the eastern half of Mallorca through a multidisciplinary approach that takes into account both the different aspects of its surface modelling (coastal karren, coves and their associated gullies, coastline morphology and paleokarst, etc.) and above all, the singularities of the rich endokarst found in the study area. The investigation has been specially oriented toward the analysis of the observed interferences between endokarstic evolution and littoral dynamics, and it has furnished new data on a large number of subjects, which range from geochemical and speleogenetical aspects of coastal carbonate aquifers to numerous examples of mixed caves of karstic-marine origin. Particular attention has been given to allochthonous infillings (marine and/or eolian calcarenites) and paleontological remains of endemic vertebrates. Autochthonous infillings (chiefly speleothems) present in the caves are of special interest because of the possibilities of their radiometric dating. The set of interferences analysed has permitted the reconstruction of the evolution of the studied endokarst during Plio-Quaternary times.

The principal interest of the work carried out resides in the valuable chrono-stratigraphical information obtained on sea-level fluctuations during the Pleistocene. Specifically, the study of phreatic speleothems has demonstrated that these deposits are an excellent register of Mediterranean sea-level changes during the Middle and Upper Pleistocene and the Holocene. This category of secondary mineral deposits, which are specific to littoral karstic-caves, have been studied using a number of diverse techniques (radiometric Th/U datings, ESR measurements, optical and electronic microscopy, X-ray diffration, stable isotope analysis, etc.) with the aim of obtaining precise chronological, paleoclimatological, mineralogical and crystallographical data. The eustatic curves proposed for the last 300 ka in the western Mediterranean area show significant transcendencies, being extremely detailed for the period between 150 and 50 ka BP. When attention is centred on the last interglacial event (isotopical stage 5), four transgressive peaks between 130 and 80 ka BP can be identified, these being separated by three cold pulsations that produced abrupt sea-level falls in the Mediterranean of at least 20 metres.

(Abstract from the Ph.D. thesis on geography by the author, Universitat de les Illes Balears, under the above title.)

1 Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Ctra. de Valldemossa km 7.5, E-07071 Palma de Mallorca.

2 Grup Espeleològic EST. Palma de Mallorca.

Introducción

En estas páginas se procede a sintetizar el contenido de la tesis doctoral en Geografía, elaborada por el autor en el Departament de Ciències de la Terra de la Universitat de les Illes Balears, bajo la dirección del Dr. Joan J. Fornós Astó. La exposición pública de la tesis tuvo lugar el día 12 de Diciembre del 2000, en la sala de juntas del edificio Mateu Orfila de la UIB. El tribunal estuvo integrado por investigadores destacables en los campos relacionados con el estudio del karst, la geocronología del Cuaternario y la geomorfología litoral; presidió el tribunal el Dr. Vicenç M. Rosselló Verger (Departament de Geografia, Universitat de València), formando parte también del mismo los Drs. José M. Calaforra Chordi (Departamento de Hidrogeología y Química Analítica, Universidad de Almería), Juan J. Durán Valsero (Instituto Geológico y Minero de España, Madrid), Jaume Servera Nicolau (Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears) y Paola Tuccimei (Dipartimento di Scienze Geologiche, Università di Roma III).

La defensa de la tesis, que contó con la asistencia de un numeroso público interesado en estas cuestiones, obtuvo la calificación de Excelente *cum laude* por unanimidad del tribunal.

Aparte de los ejemplares de la tesis depositados en la Universitat de les Illes Balears, también es posible consultar diversas copias disponibles en las bibliotecas de las instituciones siguientes: Federació Balear d'Espeleologia (Palma de Mallorca), Museu Balear de Ciències Naturals (Sóller, Mallorca), Societat d'Història Natural de les Balears (Palma de Mallorca), Associació de Geògrafs de les Illes Balears (Palma de Mallorca), Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (Madrid) y Centre de Documentation de l'Union Internationale de Spéléologie / Bibliothéque de la Société Suisse de Spéléologie (La Chaux-de-Fonds, Suiza).

Estructura y contenido de la tesis doctoral

La memoria correspondiente a la presente tesis constaba de 595 páginas, a las que hay que añadir un anexo fotográfico constituido por 29 láminas de imágenes en color. La estructura general de la memoria queda recogida en la Tabla I, la cual da cuenta del índice simplificado de la tesis con expresión tan sólo de las grandes unidades que la componen, a saber: 7 capítulos principales, más otros 3 accesorios que los complementan (introducción, bibliografía y anexo fotográfico).

El contenido del trabajo se organiza en tres grandes bloques temáticos. El primero de ellos tiene carácter introductorio ocupándose de las generalidades sobre el karst litoral, así como aquellas otras relativas al área geográfica objeto de estudio; además, se describen e interpretan en detalle las características del modelado epigeo de la zona trabajada, y las peculiaridades de su rico endokarst. El segundo bloque sistematiza las variadas interferencias que tienen lugar entre el modelado endokárstico y la dinámica litoral, estudiando en detalle bastantes de esas interacciones. Finalmente, el tercero y principal bloque temático (ver Tabla I) trata de manera exclusiva de una de las interferencias aludidas, procediéndose al estudio exhaustivo de los *espeleotemas freáticos* como herramienta muy valiosa de cara al mejor conocimiento geocronológico y paleoclimático del Cuaternario.

Conclusiones principales

La presente investigación ha permitido extraer un repertorio amplio de conclusiones, relativas a la morfogénesis y cronología del karst litoral en el levante de Mallorca. Dichas conclusiones abarcan diversas vertientes entre las que se cuentan: la geomorfología kárstica en los ambientes costeros, la ubicación cronológica de los procesos y formas estudiados y —de particular relevancia— las informaciones que pueden deducirse en relación al conocimiento del Cuaternario en nuestro entorno geográfico. Estas últimas se concretan, en especial, en interesantes datos acerca tanto de la historia del nivel marino como del paleoclima durante el Pleistoceno Medio y Superior. Con la finalidad de conseguir una mayor claridad expositiva, las conclusiones principales obtenidas se enumerarán agrupándolas de manera análoga a la distribución en capítulos usada a lo largo de la referida memoria (Tabla I).

Aspectos generales

Se considera adecuado destacar los siguientes puntos, en lo que concierne a cuestiones generales:

- Se procede a establecer el alcance del término *karst litoral* o *karst costero*, enunciándolo como: *franja de un terreno o macizo calcáreo en la que se constata la influencia geomorfológica del medio marino, materializada en un extenso y variopinto abanico de interrelaciones entre el modelado kárstico y la dinámica litoral.* Esta concepción huye de planteamientos basados en visiones fragmentarias de la morfogénesis propia de las rocas calcáreas; en particular, se hace hincapié en la necesidad de no usar el término karst litoral para hacer referencia al micromodelado costero de las rocas carbonatadas, el cual debería ser designado con la expresión mucho más adecuada de *lapiaz costero* o *karren litoral.*

Bloque 1 *(capítulos introductorios)*

INTRODUCCIÓN 13
1. EL KARST LITORAL 23
2. EL ÁREA GEOGRÁFICA ESTUDIADA: EL LEVANTE DE MALLORCA. 59
3. EL MODELADO EPIGEO EN EL ÁREA DE ESTUDIO 109
4. EL ENDOKARST DEL LEVANTE DE MALLORCA 153

Bloque 2

5. INTERFERENCIAS ENTRE LOS MODELADOS ENDOKÁRSTICO Y LITORAL. 213

Bloque 3

6. ESPELEOTEMAS FREÁTICOS Y PALEONIVELES MARINOS 341

7. CONCLUSIONES 517
8. BIBLIOGRAFÍA 541
9. ANEXO FOTOGRÁFICO 579

Tabla I:
Indice abreviado de la tesis en el que se recogen, tan sólo, los títulos de sus diferentes capítulos. Asimismo, se indican los tres grandes bloques temáticos en los cuales se estructura el contenido de la memoria.

Table I:
Abridged contents of the thesis which gives each chapter title and shows the three principal thematic blocks under which the thesis is structured.

- El repaso de las tendencias de investigación observables en la bibliografía internacional sobre el karst costero —entendido en el sentido amplio antes enunciado— evidencia hasta 7 temáticas principales, sobre las que se incide al abordar estas materias. Centrándonos en la bibliografía disponible sobre las Baleares, se ponen de manifiesto peculiaridades específicas, como son el alto porcentaje de trabajos publicados sobre temas como: la descripción morfológica del endokarst costero, las interferencias morfo-sedimentarias entre endokarst y litoral (y su reconstrucción espeleocronológica), el estudio de las fluctuaciones glacioeustáticas a través de los espeleotemas freáticos y, para terminar, la cuestión de las calas. Por el contrario, son muy escasas las referencias dedicadas a cuestiones como el lapiaz costero, que son en cambio profusamente estudiadas en otros ámbitos geográficos.

- A la hora de proceder al estudio del karst litoral de Mallorca, se ha considerado conveniente restringir el área de trabajo a su costa oriental, desde el Cap des Freu (Capdepera) hasta el Cap de ses Salines (Santanyí). Ello se ha debido a la presencia —en la zona de estudio elegida— de diferentes litologías que incluyen calizas mesozoicas estructuradas, depósitos carbonatados postorogénicos del Mioceno Superior y eolianitas pleistocénicas; asimismo, son también muy variados los ambientes geomorfológicos y ecológicos, resultantes de los distintos grados de exposición que se dan a lo largo de este extenso sector de la línea de costa. Las unidades morfoestructurales y fisiográficas abarcadas por el área de trabajo son en concreto dos: los materiales plegados de las Serres de Llevant, y los relieves tabulares del Migjorn.

El modelado epigeo litoral

Han merecido atención determinados aspectos del modelado epigeo en el área de referencia, los cuales poseen algún tipo de dependencia con respecto al carácter calcáreo del sustrato. Los aspectos a resaltar, en este sentido, son los siguientes:

- La discusión sobre el posible papel de los procesos kársticos en la formación de las calas no aporta evidencias de peso al respecto. En general, las calas de la región natural del Migjorn son el resultado de la inundación de los sectores terminales de sistemas fluvio-torrenciales, careciéndose de pruebas determinantes que aboguen —en el sector estudiado— por una componente kárstica importante en la morfogénesis de estos fenómenos.

- Los sistemas fluviales que originaron las calas han de ser relacionados con condiciones paleoclimáticas mucho más húmedas que las presentes —y con niveles de base inferiores al actual— acontecidas como mínimo en el Pleistoceno Inferior, remontándose tal vez hasta el Plioceno o incluso la transición Mioceno - Plioceno. Se apunta la probabilidad de que la excavación de estas redes fluvio-torrenciales y la espeleogenésis desarrollada en las calcarenitas tabulares del Mioceno Superior puedan corresponder a un mismo gran evento geomórfico, el cual podría haber estado controlado por un nivel marino al menos 25 metros inferior al de hoy en día.

- También es objeto de atención el paleokarst fini-Mioceno, que aparece expuesto de manera vistosa a lo largo de los acantilados costeros del Migjorn. En particular, se describen las formas observadas en el litoral próximo a Mondragó (Santanyí), donde

es analizada la incidencia de estos fenómenos en la morfología de detalle de la línea de costa. Queda puesto en evidencia que los colapsos paleokársticos presentan un comportamiento geomorfológico ambivalente, en cuanto a su resistencia a los mecanismos de erosión costera. En unos casos los colapsos constituyen zonas más resistentes a la dinámica erosiva litoral, que originan prominencias notables de la costa; en otras ocasiones, estas estructuras paleokársticas son trabajadas preferentemente por la erosión marina, dando lugar a ensenadas de pequeño o mediano tamaño. Las características diferenciales de uno u otro comportamiento —en el caso de estos fenómenos paleokársticos— están condicionadas por las peculiaridades litológicas de los depósitos del Mioceno Superior involucrados en los colapsos, así como por los tipos de brechas resultantes y su grado de cementación.

El endokarst costero

Las conclusiones que consideramos necesario resaltar, acerca del endokarst litoral en el levante de Mallorca, son las siguientes:

- Para proceder al establecimiento de los rasgos diferenciales del endokarst en estudio, se propone una clasificación espeleogenética de las cuevas de Mallorca, basada en el contexto hidrogeológico en el que se han generado las cavidades. Se distinguen diversas categorías espeleogenéticas, entre las que destaca la constituida por lo que se han denominado *cuevas litorales*, presentes tanto en las Serres de Llevant como, sobre todo, en la región kárstica del Migjorn. Esta categoría incluye cavernas generadas por disolución freática en la zona de mezcla costera, así como cavidades mixtas de génesis kárstico-marina.

- La observación de los numerosos fenómenos endokársticos, existentes en la mitad oriental de la isla, permite distinguir en términos generales una trilogía morfológica bien definida, representada por los aspectos ahora enumerados:
  - — un gran desarrollo de los desprendimientos rocosos, resultado de los procesos de reajuste mecánico de las bóvedas y paredes de las cavidades;
  - — una notable y, en ocasiones exuberante, ornamentación natural consistente en una enorme variedad de espeleotemas;
  - — la presencia de lagos de aguas salobres, cuya superficie viene controlada por la posición del nivel marino, en los cuales tiene lugar la deposición freática de carbonatos.

- No obstante, el endokarst costero posee caracteres diferenciales en las dos unidades morfoestructurales que conforman el área estudiada; estos rasgos particulares están relacionados con los diferentes contextos lito-estratigráficos y estructurales que caracterizan, de modo respectivo, a las Serres de Llevant y a la plataforma del Migjorn. En la primera de estas unidades, las cavidades subterráneas son relativamente variadas en cuanto a su morfogénesis (simas vadosas, galerías freáticas, cuevas litorales...), mientras que en la segunda la gran mayoría de las cavernas corresponden a un único modelo morfogenético, representado por localidades paradigmáticas como las famosas Coves del Drac (Manacor).

- La tipología de cavidad kárstica que predomina totalmente en el Migjorn está constituida por grandes salas, evolucionadas gracias a progresivos hundimientos de sus bóvedas y decoradas por una profusión de depósitos estalagmíticos. Estas salas constituyen unidades volumétricas yuxtapuestas y más o menos independientes que, comunicándose entre sí, pueden dar lugar a cavernas de notable desarrollo; las entradas de estas cavidades corresponden en la mayoría de las ocasiones a hundimientos, ligados al crecimiento volumétrico antigravitacional del endokarst. Las cotas inferiores de las cuevas se encuentran ocupadas por lagos de aguas salobres, establecidos en correspondencia con el presente nivel marino. Con suma frecuencia estas cavidades poseen importantes continuaciones subacuáticas, ya que la disposición actual que presentan responde a su inundación parcial como resultado del ascenso postglacial experimentado por el Mediterráneo. Los desarrollos espeleológicos máximos, conocidos en esta región kárstica, superan los 5.000 metros de recorrido hipogeo; algunas cavidades llegan a cotas de hasta -30 metros por debajo del nivel actual del mar, según los conocimientos actuales.

- Se establece un modelo genético y evolutivo para el endokarst del Migjorn, que contempla una génesis inicial en condiciones freáticas —en la zona de mezcla costera— a la que seguiría una dilatada y compleja evolución vadosa, interferida por las fluctuaciones eustáticas cuaternarias. Los vacíos y conductos primigenios deben haberse formado, presumiblemente, en relación con un nivel marino al menos 25 metros inferior al presente, acontecido en algún momento del Plioceno o incluso de la transición Mioceno - Plioceno. La posible relación que pudiera existir entre esta fase inicial de la espeleogénesis y la excavación de los sistemas de barrancos del levante de Mallorca, aunque resulta plausible, está todavía por corroborar.

Interferencias entre endokarst y litoral

El segundo bloque importante de contenidos gravita sobre el siguiente hecho: existe un abanico amplio de interferencias entre el modelado endokárstico y la dinámica litoral (Tabla II), que ocasionan variados conjuntos morfo-sedimentarios controlados por las oscilaciones glacioeustáticas de la superficie de las aguas marinas. Las posibilidades espeleocronológicas de estas situaciones son remarcables, en la medida en que la historia del nivel del mar introduce una pauta temporal, la cual facilita la reconstrucción evolutiva de las cavidades litorales y sus rellenos. Dentro de estos planteamientos, destacaremos los siguientes aspectos:

- En un plano estrictamente teórico, las consecuencias geomorfológicas de las oscilaciones del nivel marino sobre el endokarst litoral pueden ser agrupadas en cuatro grandes categorías: las repercusiones de carácter hidrológico de dichas fluctuaciones, la morfogénesis resultante de la actuación conjunta o independiente de ambos modelados, la existencia de rellenos específicos del endokarst litoral, y las implicaciones cronológicas que se derivan del carácter discontinuo (en el espacio y en el tiempo) impuesto por las variaciones eustáticas.

- Se ha procedido a hacer balance de las interferencias entre karst y litoral, que es posible constatar en las 40 cavidades estudiadas. Las más frecuentes de ellas consisten en la presencia de lagos de aguas salobres —debidos a la inundación eustática parcial de las cavernas— en los cuales es del todo normal la presencia de espeleotemas aéreos, sumergidos a causa de la transgresión marina postglacial. Abundan asimismo los fenómenos de captura marina de cuevas kársticas, siendo habitual la presencia en las cavidades costeras de sedimentos alóctonos, ya sean de emplazamiento eólico o estrictamente marinos.

- Situándonos en el plano de las repercusiones hidrológicas del control marino sobre los acuíferos litorales, se aportan datos sobre las concentraciones de los iones Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-} y Cl^{-} en las aguas superficiales de lagos subterráneos, situados a diferentes distancias de la línea de

INTERFERENCIAS ENTRE EL MODELADO ENDOKÁRSTICO Y LA DINÁMICA LITORAL *(Bloque 2)*

- La eustasia a lo largo del Cuaternario y su conocimiento geocronológico
- Repercusiones geomorfológicas de las oscilaciones eustáticas sobre el endokarst litoral: intento de sistematización
- La hidrogeología y la espeleogénesis en los acuíferos kársticos costeros
  - Generalidades sobre su comportamiento hidrogeológico
  - Particularidades de la espeleogénesis
  - Algunos datos geoquímicos de las cavidades investigadas
- Cuevas marinas y capturas kárstico-marinas
  - Algunos ejemplos destacables de capturas kárstico-marinas
- Los rellenos de las cavidades estudiadas
  - Depósitos alóctonos litorales
  - Depósitos osíferos plio-cuaternarios
  - Rellenos autóctonos químicos:
    - espeleotemas aéreos
    - **espeleotemas freáticos y paleoniveles marinos *(Bloque 3)***
- Datos espeleocronológicos aportados por las interferencias analizadas

Tabla II: Interacciones morfo-sedimentarias entre la evolución del endokarst y la dinámica litoral, analizadas en las presentes investigaciones.

Table II: Morpho-sedimentary interactions between the endokarstic evolution and the littoral dynamics analysed for the present investigation.

costa. Para todos los elementos analizados se observa una muy buena correlación inversa entre su concentración y la distancia con respecto al litoral, observándose como la cuantía de dichos iones disminuye conforme nos alejamos de la costa. En particular, se utiliza la concentración del cation K^+ para evaluar el porcentaje de agua del mar en el sistema hidroquímico, obteniendo valores máximos del orden del 80 % de agua salada en las localidades más próximas al litoral (Cova des Drac de Cala Santanyí), hasta llegar a porcentajes inferiores al 5% en cavidades situadas 1,5 kilómetros hacia el interior (Cova de sa Gleda, Manacor).

- Se incluyen también algunos perfiles verticales de conductividad, realizados en los lagos de una localidad del litoral de Manacor (Cova de Cala Varques A) en condiciones estivales e invernales. En ambos casos se aprecia la existencia de claros gradientes de conductividad —la cual crece paulatinamente hacia el fondo— gradientes que presentan dos rupturas de pendiente, relacionadas con condiciones muy estáticas de estratificación de las aguas subterráneas; estas rupturas reflejan diferencias de densidad debidas a factores físico-químicos (salinidad, temperatura...). Los perfiles medidos poseen una mayor dimensión vertical en condiciones invernales, a causa del mayor aporte de aguas meteóricas. Las aguas subterráneas alcanzan una salinidad próxima a la del agua marina a una profundidad cercana a los -4 metros en verano y -5 metros en invierno, siempre en la localidad de referencia.

- Han sido calculados los Indices de Saturación con respecto a la Calcita y al Aragonito, en las aguas superficiales de algunos de los lagos subterráneos muestreados. En la totalidad de los casos existe sobresaturación con respecto a la Calcita, y sólo en alguno de ellos las aguas se encuentran ligeramente subsaturadas en relación al Aragonito. Esta aparente inactividad de los procesos de disolución no parece ser extensiva a todo el perfil de los acuíferos costeros mallorquines; en este sentido, las exploraciones subacuáticas realizadas en nuestras cuevas litorales denotan la existencia de horizontes activos de disolución, que se corresponden con haloclinas donde tiene lugar la mezcla de aguas de diferentes salinidades.

- La revisión teórica de la espeleogénesis, en los acuíferos litorales, pone de manifiesto el control que el nivel marino ejerce sobre la disposición espacial de los vacíos generados. En el caso del karst litoral del levante de la isla no se han encontrado evidencias claras acerca de horizontes preferenciales de espeleogénesis, que sea posible relacionar con pretéritos niveles del Mediterráneo. No obstante, la gran extensión que ostentan las cuevas del Migjorn por debajo de la actual cota ±0 metros —alcanzando profundidades de hasta -30 metros bajo el nivel del mar— inclina a pensar que la excavación de los vacíos iniciales ha sucedido a cotas bastante inferiores al presente nivel marino. Esta fase espeleogenética primigenia debe corresponderse a un nivel de base inferior al actual, el cual pudo condicionar a su vez la formación de la red de barrancos epigeos del sur y sureste de Mallorca.

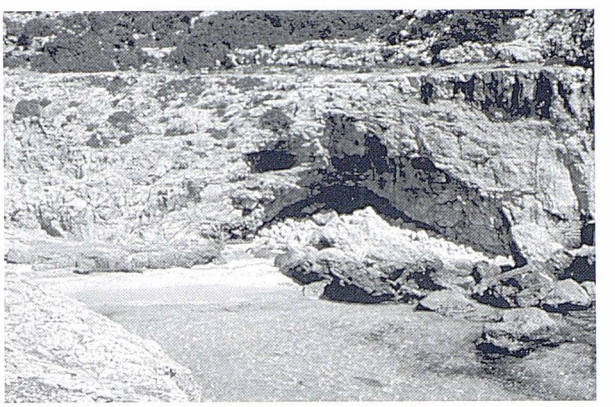


Foto 1: Entrada de la Cova de Cala Falcó (Manacor), cavidad resultante de la captura marina de una cueva kárstica próxima a la línea de costa.

Photo 1: Entrance to the Cova de Cala Falcó (Manacor). A karstic cave affected by marine erosion owing to its proximity to the sea-shore.

- Se describen diversos ejemplos de la captura marina de cuevas kársticas (Cova de na Mitjana y Cova de na Barxa, en Capdepera; Cova des Coloms y Cova de Cala Falcó, en Manacor), captura cuya posición cronológica corresponde, en todas las localidades estudiadas, al Pleistoceno Superior o al Holoceno. Se proponen reconstrucciones espeleocronológicas de estas cavidades, efectuadas en conjunción con los datos inferidos a partir de otros tipos de interferencias entre karst y litoral. En la totalidad de los casos analizados, las cuevas evidencian una dilatada evolución morfológica previa a la captura, que ha de abarcar necesariamente al menos el Pleistoceno Medio e Inferior.

- Una clase particular de cuevas de génesis marina la constituyen morfologías de este tipo excavadas en las zonas muy fracturadas, existentes en los flancos de los cuerpos centrales de los colapsos paleokársticos tratados con anterioridad. Estas situaciones son muy frecuentes en tramos de costa concretos, como el de Mondragó (Santanyí). Dejando de lado esta peculiaridad —casi anecdótica—, la incidencia del paleokarst fini-Mioceno del Migjorn en aspectos tales como la evolución del endokarst plio-pleistocénico, o la morfología de las calas, no está suficientemente documentada.

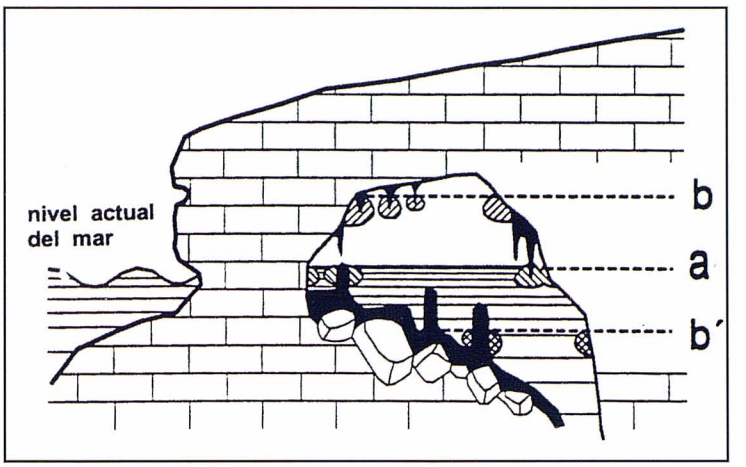


Figura 1:
Esquema conceptual sobre las posibilidades geocronológicas de una cueva costera, que contiene paleoniveles de espeleotemas freáticos.
a: sobrecrecimiento freático actual correspondiente al presente nivel marino. **b**: alineación de espeleotemas freáticos, localizados por encima del nivel actual del mar (eventos cálidos). **b'**: paleonivel de espeleotemas freáticos hoy en día sumergidos (pulsaciones frías).

Figure 1:
Conceptual diagram of the possible geochronological events within a coastal cave containing phreatic speleothems indicating sea-paleolevels.
***a**: phreatic overgrowths corresponding to the present-day sea-level. **b**: aligned phreatic overgrowths on speleothems above the current sea-level (warm event). **b'**: submerged paleolevels of phreatic speleothems (cold pulsation).*

- En las cuevas litorales son frecuentes los rellenos alóctonos relacionados ya sea con la propia captura marina de estos vacíos kársticos, o con el emplazamiento eólico de sedimentos de origen marino. Se aportan datos mineralógicos y sedimentológicos sobre los rellenos alóctonos observados, tratándose en su mayoría de calcarenitas bioclásticas de mineralogía por lo general calcítica, aunque también se detectan en algunas muestras porcentajes elevados de Dolomita (20-35 % como máximo) y mucho menores de Aragonito y de Cuarzo; las granulometrías predominantes corresponden a arenas de medias a finas, con tamaños de grano entre 0,5 y 0,125 mm. El tipo de depósito más frecuente y vistoso consiste en dunas adosadas a los acantilados costeros, que penetran por gravedad en cavidades kársticas preexistentes, obturando a menudo su ingreso. En cuanto a la cronología de estas eolianitas no se dispone de informaciones precisas, aunque en algún caso (Secret des Moix y Cova des Sòtil, en Manacor) parece tratarse de sistemas dunares anteriores al último interglacial, y por lo tanto correspondientes —en abstracto— al Pleistoceno Medio.

- Los restos paleontológicos de vertebrados pliopleistocénicos no constituyen depósitos específicos del endokarst costero. Sin embargo su interdigitación con otras morfologías y sedimentos, cuya génesis y deposición están controladas por las vicisitudes del nivel marino, suministra un variado y singular registro de gran valor crono-estratigráfico. En este sentido, se procede a efectuar una interpretación espeleocronológica integrada del yacimiento de la Cova de na Barxa, en Capdepera, conjugando los datos paleontológicos junto con evidencias geomorfológicas y dataciones tanto de espeleotemas vadosos como freáticos. Todo ello pone de relieve la complicada historia morfosedimentaria de esta caverna, cuya historia queda reconstruida con bastante detalle en los últimos 200 ka.

- Los procesos de deposición de espeleotemas constituyen un tipo de relleno específicamente kárstico, de gran valor gracias a la posibilidad de realizar dataciones absolutas por métodos radiométricos. Se repasan las dataciones disponibles sobre cristalizaciones precipitadas en condiciones vadosas. Los datos reunidos son lo bastante escasos como para no poder aventurar nada sobre episodios preferentes de estalagmitización. No obstante, de las pocas dataciones disponibles se desprende que los procesos de deposición de espeleo-temas aéreos han sido activos, incluso, durante los mínimos termométricos del Pleistoceno Medio y Superior. Por otra parte, en ambientes litorales como el que nos ocupa hay que considerar —además de los condicionantes paleoclimáticos— el importante papel desempeñado por las fluctuaciones del nivel marino; debe tenerse en cuenta que la deposición de espeleotemas aéreos puede resultar controlada altimétricamente por el nivel marino presente o pasado, quedando inhibida su formación por debajo de la cota alcanzada en cada momento por las aguas marinas. De esta manera la existencia de hiatus deposicionales, en los espeleotemas aéreos de localidades cercanas al actual nivel del mar, debe ser interpretada teniendo en mente que pueden corresponder no a causas paleoclimáticas directas (pluviometría, temperatura...), sino a controles paleoambientales indirectos como son las variaciones eustáticas.

- Dentro del capítulo final de este bloque de contenidos, se desarrolla una reconstrucción espeleocronológica de los acontecimientos geomorfológicos individualizados en las cavidades del Cap Vermell (Capdepera), que se considera extrapolable a la generalidad del karst litoral del levante de la isla. Las localidades estudiadas permiten establecer que, durante el Pleistoceno Medio y Superior, las cavidades se encontraban ya en unas condiciones morfológicas y volumétricas similares a las presentes; queda además bien documentado cómo, en los últimos 300 ka, las cavernas han experimentado tan sólo pequeños —pero muy interesantes—

retoques morfo-sedimentarios, ligados a las vicisitudes cuaternarias del nivel marino.

Espeleotemas freáticos y paleoniveles marinos

Los espeleotemas freáticos de las cuevas costeras mallorquinas suponen sin duda la vertiente de estudio más importante y novedosa, dentro del abanico de interferencias constatadas entre karst y litoral. Este tipo de cristalizaciones constituye un excelente registro de los paleoniveles pleisto-holocénicos del Mediterráneo (Figura 1), ofreciendo unas muy amplias posibilidades en cuanto a las investigaciones paleoambientales centradas en los tiempos cuaternarios. Estas cuestiones conforman el tercer gran bloque temático de la presente memoria (Tabla III); de hecho los capítulos dedicados a los espeleotemas freáticos constituyen su núcleo, tanto por la originalidad del registro abordado como por las aportaciones que se realizan al conocimiento del Cuaternario en el área mediterránea. Se resaltan a continuación las conclusiones siguientes:

- Con el fin de lograr un adecuado encuadre cronoestratigráfico de la materia, se realiza un detenido repaso del Pleistoceno y Holoceno marino de Mallorca, referenciándolo a los estadios climáticos del registro marino de isótopos de oxígeno. Esta revisión evidencia las limitaciones que conlleva la nomenclatura de uso habitual en la designación de los diversos pisos del Cuaternario marino —basada, sobre todo, en criterios faunísticos y estratigráficos—, si la pretensión perseguida es hacer referencia de manera unívoca a los diferentes eventos climáticos del Pleistoceno y Holoceno.

- Desde el punto de vista morfogenético, se ha procedido a situar los espeleotemas freáticos en el contexto de las diversas clasificaciones existentes, acerca de los depósitos minerales secundarios de las cavernas. Conviene hacer hincapié en una cuestión clave: las alineaciones de este tipo de espeleotemas registran el nivel alcanzado por las aguas freáticas, el cual a su vez viene controlado por la posición del nivel marino. En consecuencia, los espeleotemas freáticos se erigen en un registro excepcional de la historia cuaternaria del nivel del mar.

- Son sistematizadas las morfologías de esta clase de espeleotemas observables en las cuevas de Mallorca, señalándose asimismo la distribución espacial de estos llamativos depósitos en el conjunto de la isla. En la zona de trabajo elegida, se han investigado un total de 15 localidades que contienen alineaciones de espeleotemas freáticos, individualizándose un mínimo de 30 paleoniveles de estas cristalizaciones, correspondientes a antiguas estabilizaciones de la superficie de las aguas marinas. La situación altimétrica de estos depósitos abarca desde poco menos de la cincuentena de metros de altitud, hasta algo más de veinte metros por debajo del nivel marino presente.

- Han sido realizadas algunas investigaciones sobre la mineralogía y cristalografía de estos depósitos, utilizando difractometría de Rayos-X, microscopía óptica sobre réplicas de acetato de las muestras, y microscopía electrónica de barrido (SEM). Se han analizado mediante difracción de Rayos-X un total de 42 muestras de espeleotemas freáticos, siendo la mineralogía dominante la Calcita, en particular la Calcita magnesiana (HMC) con contenidos de $MgCO_3$ por lo general inferiores al 11 %; también es frecuente la presencia de Aragonito, detectándose asimismo porcentajes bajos de Dolomita en algunas localidades. La deposición de Aragonito parece relacionarse con condiciones paleoambientales cálidas correspondiendo, en las muestras analizadas, siempre a cristalizaciones pertenecientes al último interglacial (estadio isotópico 5).

- El estudio cristalográfico de las muestras obtenidas, efectuado mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM), ha aportado nuevos datos sobre esta clase de depósitos. Las cristalizaciones de aragonito exhiben siempre

ESPELEOTEMAS FREÁTICOS Y PALEONIVELES MARINOS *(Bloque 3)*

- Las oscilaciones del nivel marino en el Cuaternario: su conocimiento en la isla de Mallorca
- Los espeleotemas freáticos: génesis y morfología
- Los espeleotemas freáticos en las cuevas de Mallorca
- Datos mineralógicos y cristalográficos
- Dataciones isotópicas por el método de las series de Uranio (Th/U)
- Las mediciones de ESR (*Electron Spin Resonance*)
- Datos aportados por el estudio de los isótopos estables de C y de O

- **El conocimiento de los paleoniveles del Mediterráneo por medio de los espeleotemas freáticos mallorquines**
  - ***La posible incidencia de la neotectónica***
  - ***Una curva eustática para los últimos ka***
  - ***Algunas consideraciones paleoclimáticas***

Tabla III: Metodología empleada para el estudio de los espeleotemas freáticos, en las cuevas costeras del levante de Mallorca, como herramienta para el conocimiento de los paleoniveles marinos durante el Cuaternario.

Table III: Methodology used in studying the phreatic speleothems from coastal caves on eastern Mallorca as a mean of obtaining a better knowledge of sea-level changes during the Quaternary.

un hábito acicular, que origina depósitos cuyas morfologías son redondeadas y sus superficies muy lisas. Los espeleotemas calcíticos presentan variadas fábricas que abarcan desde agrupaciones fibrosas de cristales elongados, hasta cristalizaciones macrocristalinas de hábito romboédrico; las formas resultantes incluyen, respectivamente, desde concreciones de apariencia botrioidal o globular hasta espectaculares ejemplares de morfología exterior poliédrica, pasando por abundantes espeleotemas freáticos de aspecto coraloide.

- La realización de dos programas de datación absoluta, de muestras de espeleotemas freáticos, ha permitido precisar la edad de los paleoniveles marinos que generaron esas cristalizaciones. Las dataciones han sido efectuadas usando la técnica $^{230}Th/^{234}U$, basada en la desintegración radioactiva de las series del Uranio. En total se han datado 40 muestras pertenecientes a antiguos niveles marinos, cuyas alturas están comprendidas entre +40 metros s.n.m y -23 metros bajo el actual nivel del Mediterráneo.

- Las edades obtenidas, en el caso de las 22 muestras recolectadas a alturas superiores a la actual cota ±0 metros de la superficie marina, oscilan entre 3,9 ka —para un espeleotema subactual— y >350 ka B.P., edades estas últimas atribuibles como mínimo al estadio isotópico 9. Están muy bien representados (11 dataciones) los diversos picos cálidos habitualmente distinguidos dentro del último gran aconteciemiento interglacial (subestadios 5a, 5c y 5e), con cronologías que abarcan desde 83,4 ka hasta 130,4 ka B.P., y materializados en forma de paleoniveles de cristalizaciones freáticas situados a altitudes próximas a los +2 metros s.n.m.

- El hecho de encontrar depósitos pertenecientes al mismo evento climático, pero situados a altimetrías diferentes, informa sobre la existencia de deformaciones tectónicas recientes en el área estudiada. A este respecto, los espeleotemas atribuidos a los subestadios 5a, 5c y 5e se hallan a altitudes crecientes de sur a norte, pasándose de los +1,4 metros de las localidades más meridionales hasta llegar a los +2,5 metros en las septentrionales. Esta situación denota un basculamiento del orden de poco más de un metro, responsable de las diferencias altimétricas observadas en función de la latitud.

- Las dataciones comentadas hasta ahora corroboran la asunción geomorfológica que relacionaba la existencia de alineaciones elevadas de cristalizaciones freáticas, con antiguos niveles del Mediterráneo asociados a eventos de signo cálido (interglaciales). Asimismo se confirma la relativa gran antigüedad —Pleistoceno Medio, al menos— de los paleoniveles más altos (>30 metros s.n.m.), tal como sugerían las evidencias provinientes del registro marino pleistocénico de Mallorca.

- Se ha tenido ocasión de muestrear y datar 18 especímenes de espeleotemas freáticos, que hoy en día permanecen sumergidos por debajo del nivel del mar. Tales cristalizaciones corresponden a otros tantos paleoniveles marinos, cuyas cotas se sitúan a profundidades comprendidas entre -1,5 y -23 metros; en particular, son abundantes las alineaciones de estos espeleotemas localizadas a profundidades de entre -13 y -17 metros. Estos depósitos registran estabilizaciones regresivas del Mediterráneo, ligadas a acontecimientos climáticos de relativo carácter frío. Las edades obtenidas oscilan entre 63,7 ka y >350 ka B.P., relacionándose con los estadios isotópicos 4, 6, 7 y 8, así como con los subestadios 5b, 5d y 5e integrados dentro del último gran evento interglacial. Algunas muestras, al aportar edades superiores a los 350 ka, han de corresponder como mínimo al estadio isotópico 9.

- Ha sido posible también disponer de dataciones de algunas muestras de estas cristalizaciones, realizadas mediante la técnica ESR (*Electron Spin Resonance*). Concretamente, se han efectuado mediciones de ESR en un total de 10 muestras, obteniendo resultados cronológicos poco consistentes, muy en línea con el escepticismo sobre las posibilidades y fiabilidad de este método que abunda en la bibliografía internacional.

- Las investigaciones isotópicas han abarcado también el análisis de isótopos estables del Oxígeno ($\delta^{18}O$) y del Carbono ($\delta^{13}C$), realizados a partir de 23 muestras tanto de espeleotemas freáticos como vadosos; en 3 de los especímenes freáticos estudiados se han efectuado estos análisis, asimismo, secuencialmente en las diferentes bandas de crecimiento de los espeleotemas. También han sido analizados los isótopos estables del O y del C en las aguas de los lagos de algunas localidades, para tener constancia de la composición isotópica de los precipitados carbonáticos actuales. Los datos analíticos aportados ponen de manifiesto una evidente covariación positiva de los valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$, los cuales presentan valores en alza —composiciones isotópicas más "pesadas"— conforme se incrementa la componente marina en el sistema hidrogeoquímico.

- Las tendencias isotópicas observadas en las bandas de crecimiento de algunas de las muestras, correspondientes a cristalizaciones formadas durante el último interglacial, denotan una evolución hacia composiciones isotópicas "pesadas" a lo

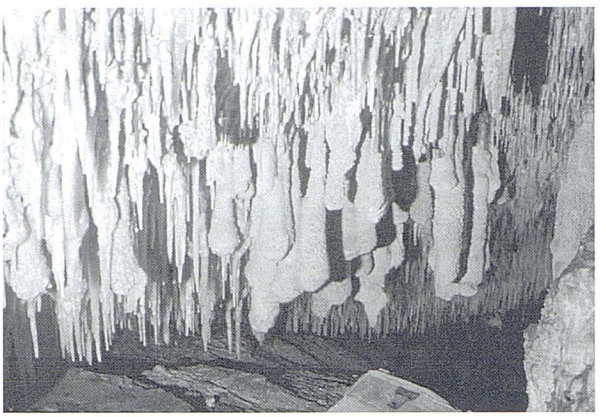


Foto 2: Espeleotemas freáticos desarrollados sobre estalactitas aéreas pre-existentes, en las Coves del Drac (Manacor). Estas cristalizaciones subacuáticas registran un paleonivel marino, situado algo más de un metro por encima del presente nivel del Mediterráneo.

Photo 2: Phreatic speleothems on some pre-existing aerial stalactites, Coves del Drac (Manacor). These subaquatic deposits record sea-paleolevels lying at just over one metre above the actual level of the Mediterranean Sea.

largo de los subestadios de signo cálido 5a y 5e. Dicha tendencia es interpretada como resultante de una mayor intrusión marina en el sistema, asociada a condiciones climáticas de aridez creciente. Esta inferencia paleoclimática cuestionaría la asunción habitual que relaciona —en nuestro entorno geográfico— los momentos interglaciales con episodios climáticos de signo marcadamente húmedo.

- La integración de los programas de datación absoluta llevados a cabo sobre espeleotemas freáticos, muestreados tanto por encima como por debajo del nivel marino actual, aporta interesantes precisiones tendentes a la construcción de una curva eustática válida para los últimos 300 ka en el Mediterráneo Occidental. Esta curva es especialmente detallada en el rango de edad comprendido entre 60 ka y 150 ka B.P., período que incluye el último gran evento interglacial (estadio isotópico 5) con las abruptas pulsaciones climáticas que en la actualidad se distinguen dentro de él.

- Las conclusiones más destacables, que se desprenden de las curvas eustáticas propuestas, son las siguientes:
  - Escasez y poca consistencia de los datos cuyas edades son mayores de 300 ka (estadios isotópicos 9 o anteriores).
  - El estadio 8, de signo frío, está representado por dos paleoniveles regresivos a -23 y -13,5 metros, con edades respectivas de 288 y 260 ka B.P.
  - El penúltimo interglacial (estadio 7) se encuentra poco documentado, existiendo evidencias sólidas de un nivel marino a +5 metros en torno a los 232 ka, así como una estabilización negativa a -8 metros (201 ka B.P.) asociada ya a la transición hacia el estadio isotópico 6.
  - Durante el evento frío previo al último interglacial (estadio 6) tiene lugar una regresión marina, registrada mediante un paleonivel a -14 metros en torno a los 147 ka B.P.
  - En el último y complejo gran evento interglacial (estadio 5; 80-135 ka B.P.) se constatan hasta 7 pulsaciones climáticas de signo contrapuesto, que se traducen en la alternancia de picos transgresivos (de +1,4 a +2,5 metros s.n.m.) entre los que se intercalan breves episodios regresivos de al menos 18 metros de magnitud.
  - Los inicios de la última glaciación (estadio 4) aparecen documentados por abundantes paleoniveles marinos inferiores al actual (entre -12 y -17 metros), cuya cronología va desde 63 a 79 ka B.P.
  - Finalmente, el nivel postglacial del Mediterráneo está representado por numerosos espeleotemas freáticos subactuales —originados en el actual rango de fluctuación de la superficie marina—, así como por un paleonivel de 6,6 ka de antigüedad, situado a +2,1 metros, correlacionable con el piso Flandriense, también denominado Versiliense.

- Centrándonos en el estadio isotópico 5, se pueden individualizar los siguientes eventos de mayor a menor antigüedad:
  - Dentro del subestadio 5e —el óptimo térmico del último interglacial— están documentadas dos pulsaciones transgresivas de un máximo de +2,5 metros, ocurridas en torno a 130 y 117 ka B.P.; entre ambas se intercala un brusco episodio regresivo, de un mínimo de 16 metros de amplitud.
  - El subestadio 5d podría estar representado por un único paleonivel de espeleotemas freáticos, que informaría sobre una pulsación regresiva de al menos 15 metros.
  - Situado alrededor de los 108 ka B.P., el subestadio 5c supone otro evento de carácter cálido, registrado en algunas localidades por medio de cristalizaciones freáticas localizadas a cotas comprendidas entre +1,5 y +2,5 metros.
  - Un nuevo, y tal vez más prolongado, episodio regresivo tiene lugar sobre los 91-98 ka B.P. (subestadio 5b), momento en que el nivel del Mediterráneo desciende al menos 18 metros.
  - Para terminar, el subestadio 5a (83 ka B.P.) representa un pico cálido inmediatamente anterior al estadio 4, el cual marca el inicio del último gran ciclo glacial. Este acontecimiento transgresivo supone un nivel marino próximo a los +2 metros, cuyo descenso hasta -17 metros sucederá en tan sólo algunos miles de años.

- Las abundantes dataciones realizadas, a partir de espeleotemas freáticos recolectados entre las cotas +2,5 y -18 metros, permiten estimar tasas de variación del nivel marino durante las pulsaciones climáticas del último interglacial. Los valores calculados arrojan cifras medias de ascenso o descenso eustático del orden, nada despreciable, de 4 m/ka; entre estas bruscas fluctuaciones del nivel marino, puestas de manifiesto por los presentes datos, por fuerza se han de intercalar momentos de estabilidad de uno o unos pocos miles de años, lapso temporal mínimo necesario para la formación de los paleoniveles muestreados.

- Las dataciones correspondientes al último interglacial demuestran que el nivel del mar, en Mallorca, no ha ascendido por encima de la cota +2,5 metros en los últimos 150 ka. Este dato hace patente la necesidad de afinar la cronología de los yacimientos marinos, atribuidos en sentido amplio al Eutirreniense sobre la base de criterios faunísticos. El alcance cronoestratigráfico de este piso en Mallorca resulta muy poco preciso ya que, además de los niveles típicos con fauna termófila correspondientes al último interglacial, incluye depósitos —situados a cotas incluso superiores a los +12 metros— que sin duda pertenecen al menos al estadio isotópico 7.

- Todo lo expuesto en los puntos precedentes demuestra que los espeleotemas freáticos son una herramienta nueva, muy potente y precisa, para el estudio del Cuaternario. Estos depósitos reflejan la posición del nivel marino en el momento de su formación, atesorando valiosas informaciones paleoclimáticas y cronológicas susceptibles de ser desveladas mediante investigaciones isotópicas.

- Este tipo de cristalizaciones constituye un registro mucho más completo, por lo general, que el derivado del estudio de los yacimientos marinos cuaternarios. Debe ser tenido en consideración que se trata de un registro de carácter aditivo, el cual no suele haber sufrido la eventualidad de su destrucción total o parcial a causa de la erosión epigea, como sucede con las playas fósiles y/o las terrazas de abrasión marina.

- A modo de conclusión final, se puede afirmar que los espeleotemas freáticos son un singular ejemplo de cómo el interés de las investigaciones espeleológicas no se circunscribe a sus aportaciones, del todo incuestionables, al ámbito global de la karstología. Su trascendencia se extiende a otros problemas geológicos —de carácter más general y de mayor relevancia actual— tales como el conocimiento del Cuaternario, el estudio de los abruptos cambios climáticos acontecidos en su decurso, y la reconstrucción de las oscilaciones eustáticas que se derivan de los mismos.

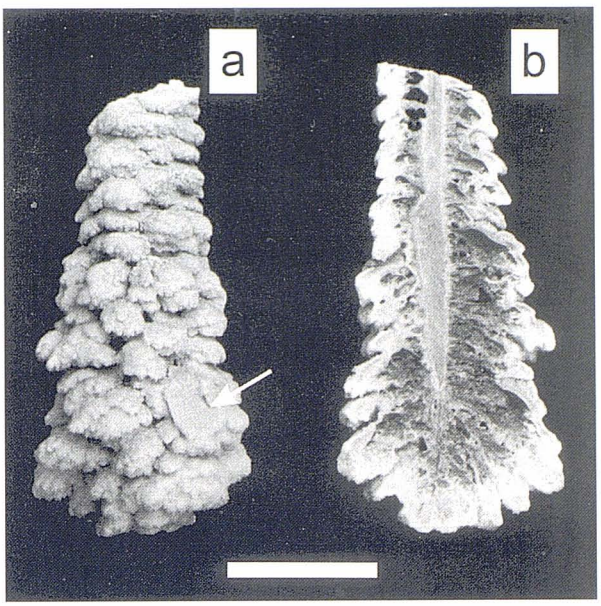


Foto 3: Muestra de espeleotema freático recolectado en la Cova des Drac de Cala Santanyí (Santanyí). Escala gráfica = 5 cm.
a: aspecto externo de la muestra; la flecha indica la presencia de una lámina de calcita flotante, englobada en el sobrecrecimiento freático. **b**: sección del mismo espeleotema; obsérvese la estalactita vadosa que sirve de soporte al revestimiento freático.

Photo 3: A phreatic speleothem sample taken from the Cova des Drac de Cala Santanyí (Santanyí).
***a**: external appearance of the sample: the arrow indicates the presence of a floating calcite plate, embedded in the phreatic overgrowth. **b**: section of the sample: the vadose stalactite that acts as a support for the phreatic coating is clearly visible.*

Agradecimientos

En la vertiente económica, la elaboración de esta tesis se ha beneficiado de dos ayudas concedidas por el *Museu Balear de Ciències Naturals* (Sóller, Mallorca) durante los años 1994 y 1995, así como del acuerdo de colaboración establecido —a partir del curso 1989-90— entre la *Università "Roma Tre"* (Roma, Italia) y la *Universitat de les Illes Balears* (Palma de Mallorca, España). Asimismo, estos trabajos han formado parte de los proyectos de investigación de la DGICYT nº PB94-1175 y de la DGESIC nº PB98-0132.

Los agradecimientos de índole no económica son tan numerosos y extensos que resulta del todo imposible su inclusión en el presente resumen. No obstante dejaré constancia de mi profunda gratitud a todos los amigos y colegas, que de una manera u otra han contribuido al buen término de estas investigaciones.

Referencia bibliográfica de la tesis

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, Universitat de les Illes Balears. 595 págs + 29 láms. Palma de Mallorca.