

# **DATAACIONES Th/U DE ESPELEOTEMAS FREÁTICOS RECOLECTADOS A COTAS INFERIORES AL ACTUAL NIVEL MARINO EN CUEVAS COSTERAS DE MALLORCA (España): APORTACIONES A LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CURVA EUSTÁTICA DETALLADA DE LOS ÚLTIMOS 300 ka PARA EL MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL**

por Paola TUCCIMEI <sup>1,2</sup>, Joaquín GINÉS <sup>3,4</sup>, Cristina DELITALA <sup>1</sup>,  
Laura PAZZELLI <sup>5</sup>, Adriano TADDEUCCI <sup>1</sup>, Bernat CLAMOR <sup>6</sup>,  
Joan J. FORNÓS <sup>4</sup>, Àngel GINÉS <sup>3,7</sup> y Francesc GRÀCIA <sup>6</sup>

## **Resum**

Els espeleotemes freàtics de les coves costaneres de Mallorca són una molt bona font d'informació per al millor coneixement de la història recent del nivell de la mar, tal i com ja s'ha posat de relleu en nombrosos treballs anteriors. Diversos paleonivells marins alts —corresponents a episodis interglacials— es troben enregistrats en coves litorals de la nostra illa, mitjançant espectaculars alineacions d'espeleotemes freàtics. De la mateixa manera, alguns esdeveniments regressius de la Mediterrània apareixen també documentats sota la forma de dipòsits d'aquestes característiques situats a cotes inferiors al present nivell de la mar.

S'han datat un total de 18 mostres d'espeleotemes freàtics, recol·lectats a profunditats compreses entre -1,5 i -23,0 metres, els quals són indicatius d'antigues estabilitzacions marines relacionades amb pulsacions climàtiques de caràcter fred. Les edats obtingudes abracen des de 63,7 fins >350 ka B.P., enregistrant amb bastant detall fluctuacions negatives del nivell marí relacionades bàsicament amb els estadis isotòpics 4, 6 i 8. També es troben ben documentades al manco dues pulsacions regressives menors, ocorregudes durant successius episodis freds dins l'últim i molt complex gran esdeveniment interglacial (estadi 5).

Les dades obtingudes —analitzades en combinació amb les datacions ja disponibles a partir d'investigacions isotòpiques precedents— permeten assajar la reconstrucció d'una corba eustàtica dels últims 300 ka, vàlida per a la Mediterrània Occidental. Aquesta corba resulta especialment detallada entre els 60 i els 150 ka B.P. (estadis isotòpics 4 i 5), posant de manifest l'existència de fluctuacions marines de més de 18 metres d'amplitud succeïdes en lapsos de temps inferiors als 10 ka.

## **Abstract**

Phreatic speleothems from coastal caves on Mallorca, as it has been pointed out in numerous previous publications, are a very good source of information for a better knowledge of recent sea-level history. Several high paleosea-levels —corresponding to interglacial events— are recorded as conspicuous alignments of phreatic speleothems inside littoral caves of the island. In the same way, some regressive episodes of the Mediterranean Sea also appear documented as deposits of these characteristics located at different depths below present sea-level.

Eighteen phreatic speleothems collected between -1.5 and -23.0 metres below present sea-level have been dated. They record past sea-level stabilizations related to cold climatic pulsations. Ages obtained range from 63.7 to more than 350 ka BP, accurately reflecting negative shifts in sea-level that are basically related to isotopic stages 4, 6 and 8. Furthermore, at least two minor regressive pulsations during successive cold substages within the last and complex interglacial period (isotopic stage 5) are well-documented.

The new data obtained —coupled with available datings from previous isotopic based investigations— allow us to attempt the reconstruction of an eustatic curve for the last 300 ka, valid for Western Mediterranean basin. This curve shows a remarkable accuracy between 60 and 150 ka BP (isotopic stages 4 and 5) and reveals the existence of sea-level fluctuations greater than 18 metres in amplitude within time spans of less than 10 ka.

1 Dip. Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", Roma, Italia.

2 C.S. per il Quaternario e l'Evoluzione Ambientale C.N.R., Dip. Scienze della Terra, Università "La Sapienza", Roma, Italia.

3 Grup Espeleològic EST. Palma de Mallorca.

4 Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca.

5 Via Gandiglio 109, Roma, Italia.

6 Grup Nord de Mallorca, Pollença, Mallorca.

7 Museu Balear de Ciències Naturals, Sóller, Mallorca.



## Introducción

El endokarst litoral de Mallorca ofrece unas grandes potencialidades de cara a la realización de investigaciones espeleocronológicas interdisciplinarias (GINÉS & GINÉS, 1986, 1987). Una de sus peculiaridades morfológicas más relevantes radica en la existencia —en numerosas cuevas costeras de la isla— de espeleotemas de origen subacuático, relacionados con antiguas cotas de estabilización de la superficie de las aguas freáticas, cuya posición altimétrica viene a su vez controlada por las oscilaciones del nivel marino durante el Cuaternario.

Estos espeleotemas freáticos suponen un excelente registro de la historia del nivel del Mediterráneo a lo largo del Pleistoceno y Holoceno, tal como se ha ido poniendo de manifiesto en trabajos publicados desde hace ya dos décadas (GINÉS & GINÉS, 1974, 1993a; GINÉS *et al.*, 1981a; POMAR *et al.*, 1987). Los principales aspectos morfológicos, mineralógicos y texturales de estos depósitos han sido suficientemente tratados con anterioridad (POMAR *et al.*, 1976, 1979; GINÉS *et al.*, 1981b; GINÉS, 1995) por lo que no es necesario extenderse ahora sobre estas cuestiones; por otra parte, visiones concisas acerca del contexto morfogenético en el que tienen lugar esos procesos de deposición freática de carbonatos, y sobre el progreso reciente de estas investigaciones, pueden consultarse en GINÉS & GINÉS (1995) y en TUCCIMEI *et al.* (1998).

A partir de 1981 fue posible realizar sucesivas campañas de datación isotópica de los espeleotemas freáticos mallorquines, comenzando por el análisis de las muestras situadas a cotas iguales o superiores al presente nivel marino (HENNIG *et al.*, 1981; GINÉS & GINÉS, 1989, 1993b; TUCCIMEI *et al.*, 1997, 1998; GINÉS *et al.*, 1999; VESICA *et al.*, 1996, 2000). Pero quedaba pendiente el estudio de los espeleotemas freáticos ubicados por debajo del actual nivel marino, labor que se emprende a lo largo de estas páginas. Se trata de una línea de investigación muy prometedora, que aportará informaciones novedosas sobre una faceta desconocida hasta ahora en el Cuaternario de Mallorca: las fluctuaciones marinas regresivas asociadas a pulsaciones climáticas de carácter frío. De esta forma, la relevancia de estas investigaciones sobrepasa el campo estrictamente espeleocronológico, para entrar de lleno en el ámbito del conocimiento cronoestratigráfico del Pleistoceno marino en el Mediterráneo Occidental.

La observación y recolección subacuática de las muestras analizadas ha sido llevada a cabo por dos de los autores (Francesc Gràcia y Bernat Clamor), de modo paralelo a la exploración y topografía de las localidades de procedencia.

## Muestras estudiadas

Se han seleccionado para su datación muestras de 18 espeleotemas freáticos, procedentes de 4 cuevas costeras de la mitad meridional de Mallorca (Figura 1), relacionados todos ellos con antiguas estabilizaciones del Mediterráneo a cotas inferiores al actual nivel marino. La totalidad de las cuevas investigadas se localizan en las calcarenitas del Mioceno superior postorogénico, las cuales configuran el relieve tabular de la región kárstica del Migjorn que se extiende anularmente a lo largo del Sur y Sureste de la isla.

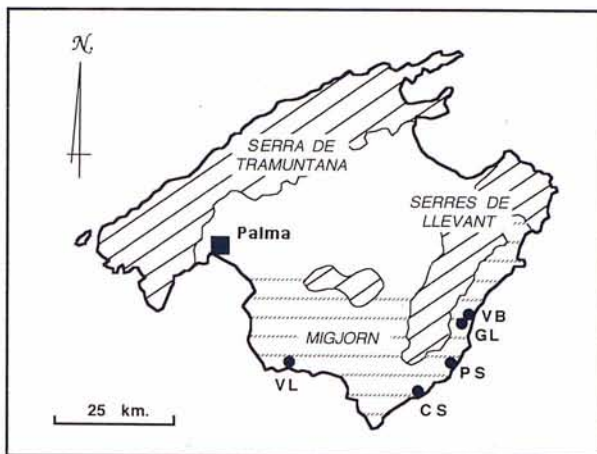


Figura 1: Mapa de localización de las cuevas con espeleotemas freáticos investigadas.

VB: Cova de Cala Varques B, Manacor; GL: Cova de sa Gleda, Manacor; PS: Cova den Passol, Felanitx; CS: Cova des Drac de Cala Santanyi; VL: Cova des Pas de Vallgornera, Lluçmajor.

Figure 1: Location map of the caves containing the investigated phreatic speleothems.

Las localidades muestreadas presentan lagos de aguas salobres, que dan acceso a importantes continuaciones subacuáticas. En estas extensas galerías —anegadas por la subida marina postglacial— han sido reconocidos y muestreados abundantes paleoniveles de espeleotemas freáticos, dispuestos a profundidades que oscilan entre los -1,5 metros (Cova de sa Gleda, Manacor) y los -23,0 metros por debajo del actual nivel del Mediterráneo (Cova den Passol, Felanitx); también se ha estudiado una muestra obtenida en el rango actual de fluctuación de la superficie de estas aguas freáticas litorales (Cova des Pas de Vallgornera, Lluçmajor).

Han resultado particularmente numerosos, en todas las localidades investigadas, los paleoniveles reconocidos y muestreados en torno a los 15 metros de profundidad; este hecho es concordante, en principio, con la abundancia a dicha cota de paleoformas de abrasión marina, reseñadas por GRÀCIA *et al.* (1997) en la costa de Portocolom. En concreto, más de la mitad de las muestras (10 espeleotemas) han sido recogidas entre las cotas -13 y -17 metros bajo el pre-



sente nivel marino, habiéndose datado 4 muestras a cotas cada vez más bajas, próximas o algo superiores a la veintena de metros de profundidad. Los paleoniveles de espeleotemas freáticos detectados a profundidades menores de 13 metros son relativamente escasos, constatándose de momento una ausencia de este tipo de depósitos entre las cotas -1,5 y -8,0 metros. Dos de los paleoniveles marinos negativos registrados en la **Cova de Cala Varques B** (a -13,5 y -21,0 metros) no han podido ser datados, debido a las alteraciones geoquímicas sufridas por las muestras a causa de los intensos procesos de redisolución que les han afectado.

Para complementar este apartado, se incluyen a continuación algunas breves informaciones adicionales tanto sobre las cavidades investigadas como acerca de los espeleotemas objeto de datación. Por otra parte, los datos concernientes a las cuevas estudiadas, las muestras obtenidas, y las alturas de los paleoniveles marinos representados en cada localidad, aparecen reunidos en la Tabla I.

— **Cova de Cala Varques B** (Manacor). Procedentes de esta caverna perteneciente a la importante zona espeleológica de Can Frasquet (TRIAS & MIR, 1977), se han analizado diversas estalactitas recubiertas por sobrecrecimientos freáticos. En las galerías subacuáticas de la cavidad —que han sido exploradas recientemente (GRÀCIA *et al.*, 2000)— se han detectado varios paleoniveles de espeleotemas freáticos a profundidades que oscilan entre -13,5 y -21,0 metros; algunos de ellos han sufrido intensos procesos postdeposicionales de disolución y por lo tanto no ha sido posible datarlos.

*Muestra VB-D3:* revestimiento freático sobre estalactita (cota: -14 m).

*Muestra VB-D5:* revestimiento freático sobre estalactita (cota: -16,5 m).

— **Cova de sa Gleda** (Manacor). La sala principal de esta cavidad se abre al exterior en forma de un

espectacular hundimiento de su bóveda (FORNÓS *et al.*, 1989), el cual interesa en particular los materiales del Complejo Terminal (Messiniense) que cierra la secuencia del Mioceno postorogénico de Mallorca. La exploración, todavía en curso, de extensas galerías subacuáticas ha llevado a la detección y muestreo de cinco paleoniveles negativos de espeleotemas freáticos, situados entre las cotas -1,5 y -17,5 metros bajo el actual nivel del mar (Fotos 1 y 2).

*Muestra GL-D1:* potente revestimiento freático macrocristalino, desarrollado sobre una delgada estalactita (cota: -15 m).

*Muestra GL-D2:* sobrecrecimiento freático macrocristalino sobre estalactita (cota: -14 m).

*Muestra GL-D3:* delicado revestimiento freático macrocristalino sobre estalactita (cota: -17,5 m).

*Muestra GL-D4:* sobrecrecimiento freático macrocristalino sobre estalactita (cota: -1,5 m).

*Muestra GL-D5:* potente revestimiento freático a base de delicadas proyecciones macrocristalinas, desarrolladas sobre una estalactita (cota: -16 m).

— **Cova den Passol** (Felanitx). Se trata de una cavidad típica del Migjorn de Mallorca, que cuenta con importantes continuaciones subacuáticas exploradas y topografiadas hace pocos años (GRÀCIA *et al.*, 1998a). Se han consignado un total de siete paleoniveles de cristalizaciones freáticas, situados a profundidades de entre -8 y -23 metros bajo el presente nivel marino (Foto 3). La mayoría de cristalizaciones han sido recolectadas en el Sifó des Somnis, mientras que tan sólo una de las muestras procede del Sifó des Crancs.

*Muestra PS-D1:* revestimiento freático rugoso sobre estalactita (cota: -8 m).

*Muestra PS-D2:* revestimiento freático rugoso sobre estalactita (cota: -10,5 m).

*Muestra PS-D3:* sobrecrecimiento freático de aspecto coraloide sobre finas estalactitas (cota: -12 m).

Foto 1:

Aspecto de las galerías subacuáticas de la Cova de sa Gleda (Manacor), en las cuales se localizan espléndidos ejemplares de espeleotemas freáticos desarrollados sobre estalactitas y columnas aéreas pre-existentes. La imagen está tomada a una profundidad de -15 metros bajo el nivel del mar. Foto: P. Gracia.

Photo 1:

Subaquatic passages in Cova de sa Gleda (Manacor), containing spectacular phreatic speleothems formed around pre-existing aerial stalactites and columns. The picture is taken at a depth of -15 metres below sea-level.

Photo: P. Gracia.







Foto 2:  
Espeleotemas freáticos pavimentarios observables en la Cova de sa Gleda (Manacor), a una profundidad de -14 metros por debajo del actual nivel marino.  
Foto: P. Gracia.

Photo 2:  
Phreatic speleothems developed on the pavement of a submerged gallery of Cova de sa Gleda (Manacor), at -14 metres below the current sea-level.  
Photo: P. Gracia.

**Muestra PS-D4:** revestimiento freático arborescente sobre estalactita, incorporando abundantes sedimentos arcillosos en sus zonas subverticales (cota: -13,5 m).

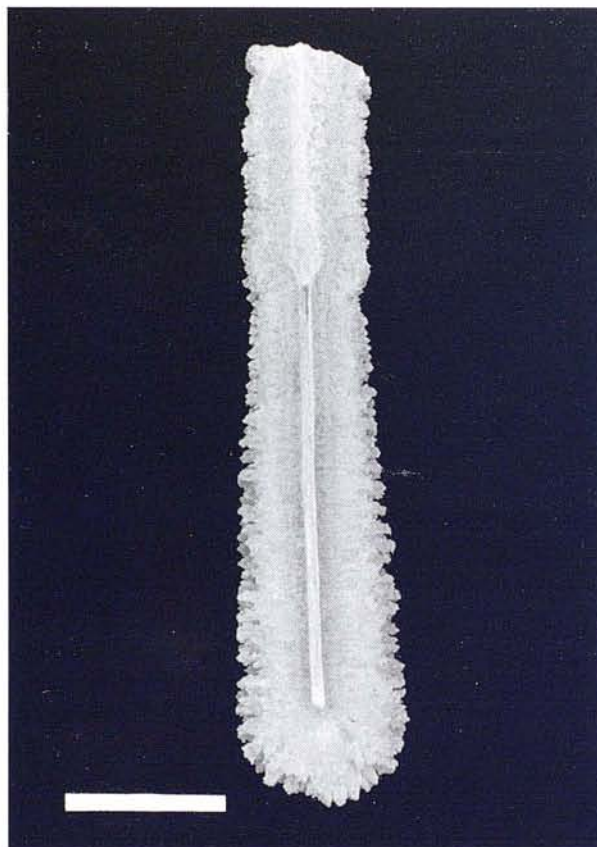


Foto 3: Sección longitudinal de la muestra PS-D5, obtenida en la Cova den Passol (Felanitx) a una cota de -18 metros bajo el presente nivel marino. A destacar la delgada estalactita que sirve de soporte a un sobrecrecimiento freático correspondiente al subestadio isotópico 5b (98 ka BP). Escala gráfica = 8 cm.

Photo 3: Longitudinal cross-section of sample PS-D5, obtained from Cova den Passol (Felanitx) at -18 metres below sea-level. The thin stalactite that serves as support of a phreatic overgrowth corresponding to isotopic substage 5b (98 ka BP) is outstanding. Scale bar = 8 cm.

**Muestra PS-D5:** sobrecrecimiento freático sobre estalactita, de superficie angulosa y con cristales milimétricos muy bien formados (cota: -18 m).

**Muestra PS-D6:** revestimiento freático de aspecto botrioidal desarrollado sobre estalactita (cota: -23 m).

**Muestra PS-D7:** revestimiento freático macrocristalino sobre pequeña estalactita (cota: -15,5 m).

#### — Cova des Drac de Cala Santanyí (Santanyí).

Esta pequeña cavidad, conocida de antiguo, ha alcanzado una nueva dimensión tras las importantes exploraciones subacuáticas efectuadas en los últimos años (GRÀCIA *et al.*, 1998b). En sus galerías inundadas se han observado cuatro paleoniveles de espeleotemas freáticos a profundidades de -13,5 a -19,0 metros por debajo de la actual cota  $\pm 0$ , de los que se han recogido las muestras pertinentes para su eventual datación.

**Muestra CS-D1:** revestimiento freático coraloide sobre estalactita (cota: -13,5 m).

**Muestra CS-D2:** revestimiento freático coraloide sobre estalactita (cota: -15 m).

**Muestra CS-D3:** sobrecrecimiento freático sobre estalactita, de superficie angulosa y con cristales de orden milimétrico muy bien formados (cota: -17 m).

**Muestra CS-D4:** sobrecrecimiento freático de aspecto botrioidal sobre estalactita, con restos de láminas flotantes y depósitos arcillosos en sus zonas subverticales (cota: -19 m).

#### — Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). Es

ésta una cueva destacable, tanto en lo que atañe a sus dimensiones como en lo referente a sus características morfológicas y a su excepcional decoración cristalina (MERINO, 1993, 2000). Aparte de la existencia de algunos paleoniveles de espeleotemas freáticos por encima del actual nivel marino, se ha muestreado el sobrecre-



cimiento desarrollado en el presente rango de fluctuación de los lagos de la caverna (Foto 4).

*Muestra VL-D1:* revestimiento freático aragonítico, de superficie exterior lisa, desarrollado sobre una delgada estalactita (cota:  $\pm 0$  m).

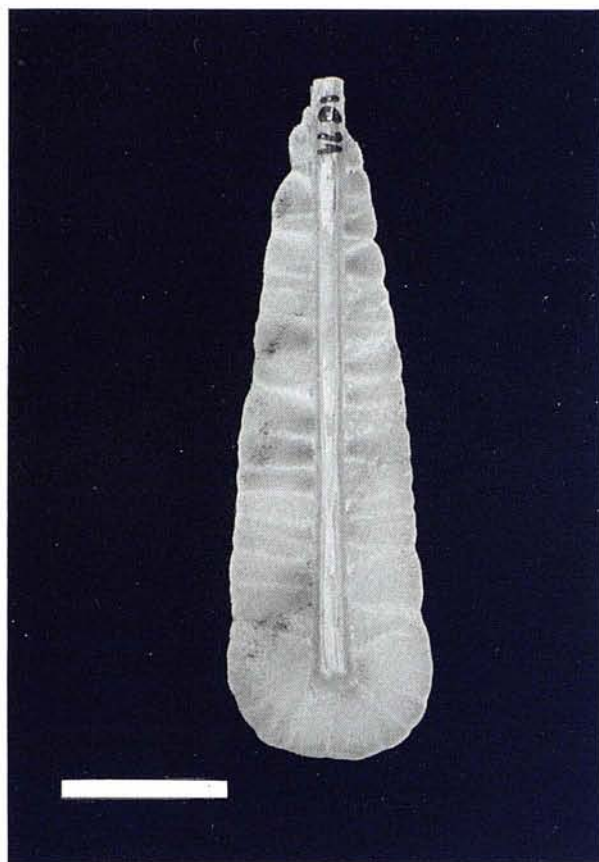


Foto 4: Muestra VL-D1, recolectada en la superficie de los lagos salobres de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). Consiste en una fina estalactita aérea, revestida por un precipitado aragonítico subactual de origen freático. Escala gráfica = 4 cm.

Photo 4: Sample VL-D1, collected at the surface of brackish pools in Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor). It consists in a delicate aerial stalactite, coated by a subactual aragonitic precipitate of phreatic origin. Scale bar = 4 cm.

## Resultados de las dataciones

Las dataciones isotópicas de las muestras recolectadas fueron efectuadas usando la técnica de las series de Uranio (Th/U); los resultados analíticos obtenidos y las edades que dichos datos aportan aparecen recopilados en la Tabla I. Las edades obtenidas oscilan entre los 63,7 ka (estadio isotópico 4) y > 350 ka B.P., cronología que ha de corresponder como mínimo al estadio isotópico 9. Las muestras datadas cuyas edades son inferiores a los 300 ka se corresponderían con estabilizaciones bajas del nivel marino atribuibles, desde el punto de vista cronológico, a los estadios numerados del 4 al 8 por SHACKLETON & OPDYKE (1973). En particular, están bien representados varios paleoniveles

regresivos relacionados con el estadio isotópico 4 (edades entre 63,7 y 79,6 ka), el cual supondría ya la transición hacia unas condiciones climáticas que marcan el inicio de la última glaciación (Würm). También se constatan bastantes dataciones que documentan pulsaciones negativas correspondientes a varios de los subestadios que se distinguen habitualmente dentro del último interglacial (estadio 5).

Los análisis de las series de Uranio realizados han permitido calcular la relación inicial  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  de estos espeleotemas freáticos situados por debajo del nivel marino presente (Tabla I). Ya exponíamos al ocuparnos de los paleoniveles de cotas superiores al  $\pm 0$  actual (VESICA *et al.*, 2000), que esta relación isotópica viene en buena medida determinada por la naturaleza litológica de las rocas donde están enclavadas las cavidades. En el caso de las muestras obtenidas en las cuatro cuevas investigadas, la relación inicial  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  es siempre superior a 1,25 tal como sucedía en las localidades excavadas en las calcarenitas del Mioceno Superior; en este sentido, recordaremos que valores inferiores a 1,25 sólo se obtenían en los espeleotemas procedentes de cavidades localizadas en las calizas y dolomías jurásicas de las Serres de Llevant.

En cuanto al contenido de Uranio de los espeleotemas analizados, éste presenta valores comprendidos entre 80 ppb (muestra GL-D4) y 743 ppb (muestra VB-D5) superando los 200 ppb en la gran mayoría de las muestras. Al referirnos a los espeleotemas freáticos de cotas positivas (VESICA *et al.*, 2000), ya se comentaba el alto contenido en Uranio que presentaban éstos, relacionado con la mayor o menor presencia de agua marina en el sistema hidroquímico. A este respecto, conviene recordar que estas cristalizaciones freáticas alcanzaban contenidos en Uranio incluso del orden del ppm, frente a los 58 ppb medidos para una estalactita vadosa.

En general los espeleotemas freáticos recolectados ponen de manifiesto la existencia de abundantes paleoniveles marinos situados entre las cotas -10 y -20 metros, con un máximo de ellos concentrados entre los 13 y los 17 metros de profundidad, como ya se ha indicado antes; tan sólo unas pocas muestras han sido tomadas por encima y por debajo del mencionado rango de profundidades. A pesar de las numerosas muestras recogidas a cotas coincidentes o muy próximas entre sí (siempre cercanas a los -15 metros), los resultados analíticos no permiten establecer correlaciones geomorfológicas claras de estos depósitos, que hagan posible aventurar su cronología en base a criterios altimétricos. Por ejemplo, dos espeleotemas muestreados a -15 metros (GL-D1 y CS-D2) han arrojado unas edades bien diferenciadas de 76,2 ka y 108 ka B.P. respectivamente (ver Tabla I). Lo mismo sucede con las muestras VB-D3 y GL-D2 (-14 metros ambas) con edades de 125 ka y 147 ka, o las CS-D1 y PS-D4 (-13,5 metros) de cronologías respectivas evaluadas en 260 ka y >350 ka. Queda patente pues la complejidad



localidad	muestra	altura s.n.m. (m)	U (ppb)	234U/ 238U	(234U/ 238U) <sub>0</sub>	230Th/ 232Th	230Th/ 234U	edad (ka ± 1 σ)
Cova de	VB-D3	-14	690 ± 18	1,892 ± 0,034	2,271 ± 0,055	300 ± 77	0,735 ± 0,028	125 ± 8
Cala Varques B	VB-D5	-16,5	743 ± 12	1,613 ± 0,022	1,875 ± 0,032	854 ± 211	0,727 ± 0,014	125,6 ± 4,2
Cova de sa Gleda	GL-D1	-15	409 ± 5	2,021 ± 0,020	2,267 ± 0,025	876 ± 227	0,530 ± 0,009	76,2 ± 1,8
	GL-D2	-14	342 ± 10	1,586 ± 0,040	1,890 ± 0,067	250 ± 80	0,793 ± 0,035	147,4 ± 12
	GL-D3	-17,5	438 ± 6	1,960 ± 0,022	2,244 ± 0,029	42 ± 2	0,602 ± 0,011	91,4 ± 2,4
	GL-D4	-1,5	80 ± 2	1,154 ± 0,038	> 1,554	∞	1,035 ± 0,065	> 350
	GL-D5	-16	380 ± 10	2,105 ± 0,051	2,384 ± 0,065	201 ± 47	0,540 ± 0,018	78 ± 3,6
Cova den Passol	PS-D1	-8	278 ± 6	1,203 ± 0,034	1,359 ± 0,059	139 ± 31	0,877 ± 0,026	201,4 ± 16
	PS-D2	-10,5	210 ± 7	1,630 ± 0,064	1,835 ± 0,085	29 ± 4	0,632 ± 0,028	100 ± 7
	PS-D3	-12	91 ± 3	1,510 ± 0,061	1,612 ± 0,073	10 ± 1	0,456 ± 0,020	63,7 ± 3,7 (*)
	PS-D4	-13,5	354 ± 8	1,173 ± 0,023	> 1,1483	216 ± 34	1,014 ± 0,027	> 350
	PS-D5	-18	155 ± 4	1,708 ± 0,047	1,935 ± 0,063	1948 ± 2168	0,627 ± 0,025	98 ± 6
	PS-D6	-23	278 ± 7	1,594 ± 0,035	2,342 ± 0,170	156 ± 23	1,035 ± 0,030	288 ± 41
	PS-D7	-15,5	138 ± 2	1,902 ± 0,030	2,092 ± 0,037	199 ± 39	0,483 ± 0,010	67,6 ± 1,8
Cova des Drac de Cala Santanyí	CS-D1	-13,5	234 ± 7	1,128 ± 0,044	1,267 ± 0,110	22 ± 3	0,938 ± 0,044	260 ± 90
	CS-D2	-15	187 ± 3	1,297 ± 0,021	1,404 ± 0,029	53 ± 9	0,651 ± 0,019	108,3 ± 5
	CS-D3	-17	292 ± 6	1,337 ± 0,028	1,422 ± 0,035	62 ± 7	0,534 ± 0,014	79,6 ± 3
	CS-D4	-19	283 ± 10	1,271 ± 0,050	1,516 ± 0,110	6,6 ± 0,4	0,925 ± 0,038	< 227 (*)
Cova de Vallgornera	VL-D1	± 0	7386 ± 174	1,514 ± 0,008	1,514 ± 0,008	71 ± 18	0,008 ± 0,003	0
(*) posible presencia de <sup>230</sup> Th no radiogénico								

Tabla 1: Resultados analíticos de las dataciones efectuadas mediante el método Th/U, correspondientes a paleoniveles de espeleotemas freáticos de cota inferior al actual nivel marino.

Table 1: Analytical results of Th/U datings corresponding to paleo-levels of phreatic speleothems lying below present sea-level.

de la historia reciente del nivel del Mediterráneo, desde el momento en que además estos espeleotemas permiten tener acceso a datos referentes a una vertiente del todo inédita de esta cuestión. A continuación se desarrollarán estos temas con detenimiento, siguiendo un orden de antigüedad decreciente para la discusión de las informaciones aportadas por las muestras que han sido objeto de datación.

## Discusión de los resultados

Con la intención de hacer más fácil la exposición de los resultados correspondientes a las dataciones de espeleotemas freáticos situados por debajo del presente nivel marino (Tabla 1), se han representado gráficamente en la Figura 2 las edades de los especímenes analizados. En el mencionado gráfico las muestras aparecen agrupadas por localidades, referenciándolas al registro marino de isótopos de oxígeno para su unívoca ubicación geocronológica.

En lo que concierne a las muestras de mayor antigüedad, dos de ellas (*GL-D4* y *PS-D4*) aportan relaciones isotópicas muy próximas a la unidad, por lo que sólo es factible atribuirles una edad mínima superior a

los 350 ka B.P. (estadio isotópico 9, como mínimo). La altimetría de estas muestras —procedentes de la **Cova de sa Gleda**, en Manacor, y de la **Cova den Passol**, en Felanitx— es de -1,5 y -13,5 metros respectivamente, lo cual supone la existencia de sendas estabilizaciones del nivel marino a dichas cotas negativas, en algún momento no determinado del Pleistoceno Medio o Inferior.

Otros dos de los espeleotemas datados quedan encuadrados a la perfección en el estadio isotópico 8, evento de signo frío al que iría, en principio, asociado un nivel marino en general inferior al presente. Por una parte, la muestra *PS-D6* (288 ka) de la **Cova den Passol** nos documenta una alineación de espeleotemas freáticos formada a -23 metros de profundidad, en relación con el término del estadio 9 y el comienzo del evento frío representado por el estadio 8. Por otro lado la muestra *CS-D1* (260 ka) de la **Cova des Drac de Cala Santanyí**, situada a una cota de -13,5 metros, se correspondería con el final del estadio 8, registrando una estabilización del nivel marino inserta en la tendencia transgresiva que conduciría al óptimo climático del penúltimo interglacial (estadio 7).

Dentro del estadio 7 sólo se ubica con claridad la muestra *PS-D1* (201,4 ka) procedente de la **Cova den**



**Passol.** Este espeleotema, sito a -8 metros, parece susceptible de relacionarse con la regresión marina consecuente a la finalización de las dos pulsaciones cálidas que conforman el estadio 7 (ZAZO, 1999). Atribuible tal vez a este último evento estaría la muestra *CS-D4* de la **Cova des Drac de Cala Santanyí**, para la cual se apunta una cronología de 227 ka; la presencia de  $^{230}\text{Th}$  no radiogénico en esta muestra impide precisar su edad, que necesariamente ha de ser inferior a la cifra mencionada.

El estadio isotópico 6 está representado por un paleonivel freático a -14 metros (muestra *GL-D2*), en la **Cova de sa Gleda**. Su situación en la parte final de dicho estadio de carácter frío, debe relacionarse con el tránsito desde unas condiciones glaciales hacia el acontecimiento interglacial constituido por el estadio 5.

Llegamos así a las muestras pertenecientes al último interglacial, que registran seis estabilizaciones marinas a cotas negativas, asociadas a los distintos subestadios del evento climático 5. Comenzando por los paleoniveles más antiguos, las muestras *VB-D3* y *VB-D5* de la **Cova de Cala Varques B**, en Manacor, nos informan de una pulsación de signo frío situada en torno a los 125 ka, que ha dejado espeleotemas freáticos a las cotas -14,0 y -16,5 metros; este breve acontecimiento regresivo quedaría emplazado en pleno subestadio 5e, corroborando la existencia en dicho subestadio de dos picos de nivel marino alto sobre los 117 ka y los 135 ka B.P., separados por una pulsación descendente puesta ya de manifiesto en áreas geográficas bien diversas (HILLAIRE-MARCEL *et al.*, 1996; NEUMANN & HEARTY, 1996; HEARTY, 1998). La muestra *CS-D2* —de la **Cova des Drac de Cala Santanyí**— aporta una edad de 108,3 ka que permite adscribirla al subestadio 5d, con independencia de que la presencia del subestadio 5c en el Pleistoceno Superior de Mallorca esté o no suficientemente contrastada. Finalmente, tres espeleotemas de la **Cova den Passol** y la **Cova de sa Gleda** (*PS-D2*, *PS-D5* y *GL-D3*) suministran edades comprendidas entre 91,4 ka y 100 ka, cronología que las coloca con bastante seguridad en el subestadio 5b; se trataría de una clara pulsación regresiva, de al menos 18 metros de magnitud, que precedería al pico cálido correspondiente al subestadio 5a (83 ka B.P.).

Asimismo se han datado cinco muestras —procedentes de la **Cova de sa Gleda**, **Cova des Drac de Cala Santanyí** y **Cova den Passol** (*GL-D1*, *GL-D5*, *CS-D3*, *PS-D3* y *PS-D7*)— que registran otros tantos paleoniveles marinos a profundidades de entre -12 y -17 metros. Las edades obtenidas abarcan desde 63,7 ka hasta 79,6 ka, lo cual supone su pertenencia al estadio isotópico 4, que marca el final del último período interglacial. Las muestras pertenecientes a este subestadio presentan, en líneas generales, una tendencia altimétrica ascendente conforme disminuye la edad de los espeleotemas, lo que podría indicar una tónica transgresiva ligada a la suavización termométrica asociada a su creciente proximidad al estadio isotópico 3.

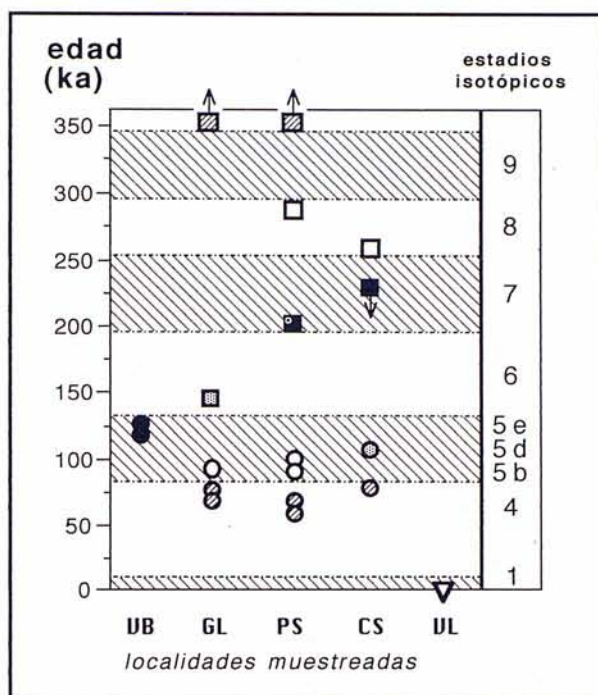


Figura 2: Edades de los espeleotemas freáticos relacionados con estabilizaciones del nivel marino a cotas negativas, obtenidas mediante el método Th/U. Se han representado rayados los estadios isotópicos que implican eventos climáticos de signo cálido.

**Triángulo blanco:** muestra subactual; **círculos rayados:** muestras correspondientes al estadio isotópico 4; **círculos blancos:** muestras pertenecientes al subestadio 5b; **círculo punteado:** muestra atribuida al subestadio 5d; **círculos negros:** muestras pertenecientes al subestadio 5e; **cuadrado punteado:** muestra correspondiente al estadio 6; **cuadrados negros:** muestras atribuidas al estadio 7; **cuadrados blancos:** muestras pertenecientes al estadio 8; **cuadrados rayados:** muestras atribuibles como mínimo al estadio 9. Las flechas ascendentes o descendentes indican edades mínimas o máximas respectivamente.

Las localidades aparecen representadas en el mismo orden que en la Tabla I. **VB:** Cova de Cala Varques B; **GL:** Cova de sa Gleda; **PS:** Cova den Passol; **CS:** Cova des Drac de Cala Santanyí; **VL:** Cova des Pas de Vallgornera.

Figure 2: Th/U ages of phreatic speleothems related to sea-level stabilizations at depths below the present  $\pm 0$  metres. Dashed areas are warm climate isotopic stages.

**White triangle:** subactual sample; **dashed circles:** samples corresponding to isotopic stage 4; **white circles:** samples pertaining to substage 5b; **dotted circle:** sample attributed to substage 5d; **black circles:** samples pertaining to substage 5e; **dotted square:** sample corresponding to stage 6; **black squares:** samples attributed to stage 7; **white squares:** samples pertaining to stage 8; **dashed squares:** samples attributed at least to stage 9. The upward and downward pointing arrows indicate minimum and maximum ages respectively.

The sample locations are shown in the same order as in Table I.

En último término ha sido analizada una muestra de la **Cova des Pas de Vallgornera**, en Llucmajor (*VL-D1*), correspondiente a un recubrimiento aragonítico que tiene lugar en el actual rango de fluctuación del plano de las aguas freáticas. La datación efectuada ha confirmado que se trata de una muestra claramente subactual.



Se ha considerado necesario recopilar las informaciones objeto de la presente discusión, exponiéndolas en una gráfica que recoja de manera más ilustrativa los datos incluidos en la Tabla 1 y en la Figura 2. Para lograr este fin, en la Figura 3 se han situado los distintos paleoniveles de espeleotemas freáticos datados, representando en ordenadas la profundidad a la que se encuentran y en abscisas los estadios isotópicos y su cronología expresada en ka. La simple visualización de esta figura permite distinguir los siguientes aspectos básicos, los cuales acaban de ser discutidos de forma pormenorizada:

- Se constata la presencia de una muestra de cronología inequívocamente subactual, correspondiente al presente nivel del Mediterráneo.
- Cinco dataciones, de tres localidades diferentes, registran diversas estabilizaciones del nivel marino entre -12 y -17 metros, ocurridas en el estadio isotópico 4.

— Un total de seis muestras —procedentes de cuatro cavidades— dan cuenta de varias pulsaciones regresivas, de al menos 18 metros de magnitud, que tuvieron lugar durante el estadio 5 (o sea el último interglacial). Quedan especialmente bien documentados algunos paleoniveles marinos negativos pertenecientes al subestadio 5b, así como un brusco pico regresivo acontecido en pleno subestadio 5e.

— Un solo espeleotema parece corresponder con bastante seguridad al estadio isotópico 6, perteneciente a un paleonivel marino de cota -14 metros.

— Dos muestras, de localidades diferentes, pueden ser adscritas a pulsaciones de signo frío ocurridas durante el estadio 7. De todos modos, una de dichas muestras está afectada por la presencia de  $^{230}\text{Th}$  no radiogénico, por lo que su cronología es bastante inconsistente.

— Otros dos espeleotemas registran estabiliza-

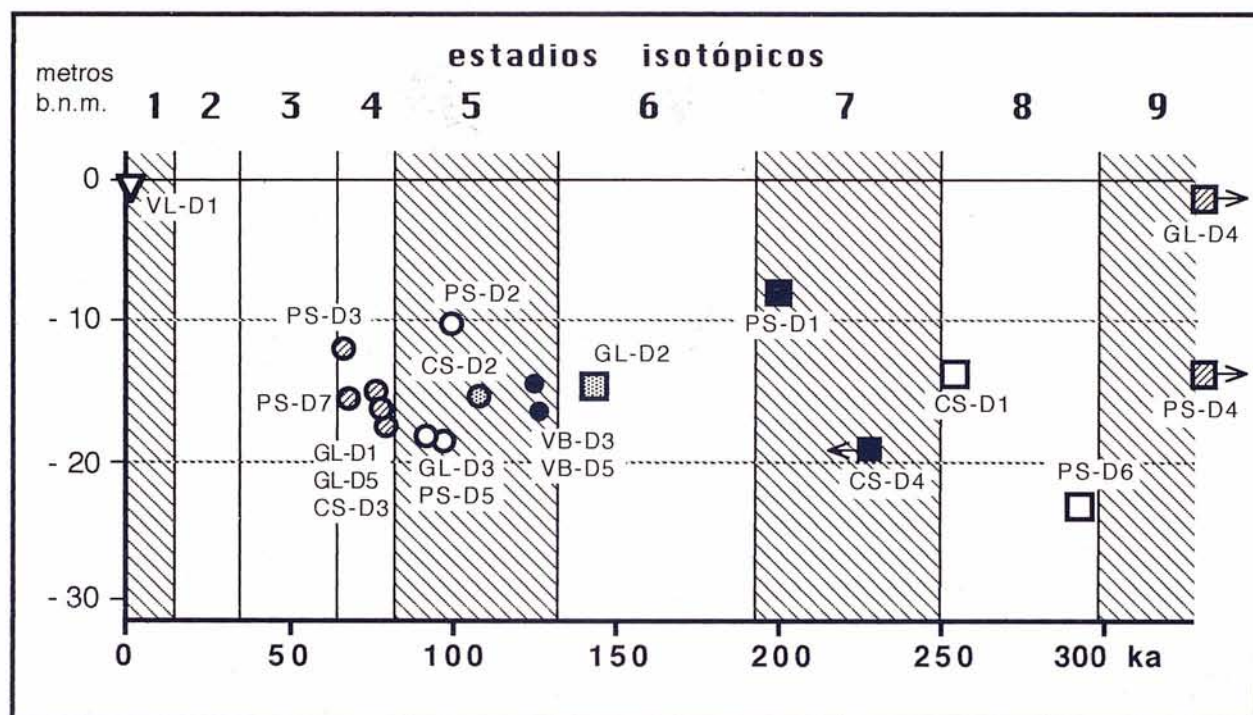


Figura 3: Resultados del programa de dataciones Th/U de espeleotemas freáticos relacionados con estabilizaciones del nivel marino a cotas negativas, referenciados al registro marino de isótopos de oxígeno (ver discusión detallada en el texto).

En ordenadas se recoge la profundidad a la que se encuentran los distintos paleoniveles muestrados. Se han representado rayados los estadios isotópicos que implican eventos climáticos de signo cálido.

**Triángulo blanco:** muestra subactual; **círculos rayados:** muestras correspondientes al estadio isotópico 4; **círculos blancos:** muestras pertenecientes al subestadio 5b; **círculo punteado:** muestra atribuida al subestadio 5d; **círculos negros:** muestras pertenecientes al subestadio 5e; **cuadrado punteado:** muestra correspondiente al estadio 6; **cuadrados negros:** muestras asignadas al estadio 7; **cuadrados blancos:** muestras pertenecientes al estadio 8; **cuadrados rayados:** muestras atribuibles como mínimo al estadio 9. Las flechas a derecha o izquierda indican edades mínimas o máximas respectivamente.

**VB:** Cova de Cala Varques B; **GL:** Cova de sa Gleda; **PS:** Cova den Passol; **CS:** Cova des Drac de Cala Santanyí; **VL:** Cova des Pas de Vallgornera.

Figure 3: Results of the Th/U dating programme of phreatic speleothems related to sea-level stabilizations at negative elevations, cross-referenced with the marine oxygen isotope record (see text for a detailed discussion).

The y-axis represents the depths at which the different paleo-level samples were collected. Dashed areas are warm climate isotopic stages. **White triangle:** subactual sample; **dashed circles:** samples corresponding to isotopic stage 4; **white circles:** samples pertaining to sub-stage 5b; **dotted circle:** sample attributed to substage 5d; **black circles:** samples pertaining to sub-stage 5e; **dotted square:** sample corresponding to stage 6; **black squares:** samples attributed to stage 7; **white squares:** samples pertaining to stage 8; **dashed squares:** samples attributed at least to stage 9. The right and left pointing arrows indicate minimum and maximum ages respectively.



ciones del nivel marino a cotas negativas (-23 y -13,5 metros), atribuibles respectivamente al comienzo y al final del estadio isotópico 8.

— Finalmente, dos muestras recolectadas a -1,5 y -13,5 metros aportan edades mínimas superiores a los 350 ka, cuya cronología debe remontarse cuando menos al estadio isotópico 9.

## Una curva eustática para los últimos 300 ka

Las dataciones Th/U llevadas a cabo sobre paleoniveles de espeleotemas freáticos situados a cotas inferiores a la actual superficie de las aguas marinas, suponen una novedosa fuente de información sobre una vertiente poco conocida de la historia del nivel del mar en el Mediterráneo Occidental. De hecho el registro marino clásico (playas fósiles, plataformas de abrasión...) no es capaz por lo general de suministrar informaciones sobre eventos regresivos, salvo en costas sometidas a intensa elevación tectónica; en litorales tectónicamente estables los restos de estas antiguas líneas de costa, correspondientes a pulsaciones de carácter frío, se hallan sumergidos y, en consecuencia, son de muy difícil estudio por parte del cuaternarista. En el caso de las cuevas kársticas litorales, persiste la dificultad técnica inherente a la observación y recolección de estos espeleotemas freáticos sumergidos pero, en cambio, estas cristalizaciones representan un excelente registro de las vicisitudes sufridas por el nivel marino, ajeno al enmascaramiento o a la interferencia por parte de otros

procesos geodinámicos litorales posteriores. La posibilidad de datar estos depósitos mediante técnicas radiométricas, viene a redondear el potencial cronoestratigráfico de este peculiar registro paleoambiental.

Debe tenerse en cuenta el hecho de que ya se ha mencionado, en diversas ocasiones, la existencia de deformaciones tectónicas recientes en áreas litorales de Mallorca (DEL OLMO & ALVARO, 1984; GELABERT *et al.*, 1992). No obstante, las evidencias suministradas por el estudio de espeleotemas freáticos localizados por encima del nivel marino presente (TUCCIMEI *et al.*, 1998), sugieren basculamientos neotectónicos tan sólo algo superiores al metro de desnivel, para buena parte de la costa oriental de la isla. Este pequeño orden de magnitud —correspondiente a deformaciones de edad Pleistoceno superior y/o Holoceno, ocurridas en el área de estudio— no resta validez a las informaciones sobre la historia del nivel marino que se puedan extraer de estos peculiares depósitos kársticos litorales.

Dentro de esta línea de razonamiento, la integración de todas las informaciones cronológicas suministradas por los espeleotemas freáticos datados hasta la fecha —tanto por encima como por debajo del actual nivel del Mediterráneo— permitirá ensayar la construcción de una detallada curva eustática válida para el Pleistoceno medio y superior de Mallorca. Con este fin, y para lograr un primer acercamiento a la cuestión, se ha confeccionado la Figura 4; ella aglutina los datos altimétricos y cronológicos aportados por todas las muestras estudiadas, ya sea en éste o anteriores programas de datación que hemos llevado a término en cavidades de nuestro litoral oriental (HENNIG *et al.*, 1981; GINÉS & GINÉS, 1993b; TUCCIMEI *et al.*, 1998; GINÉS *et al.*,

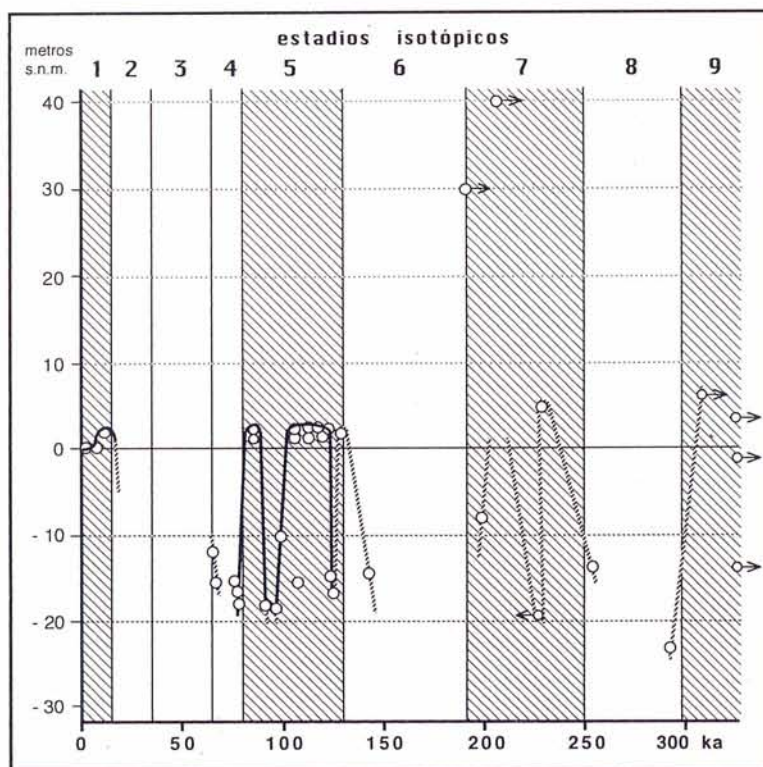
Figura 4:

Curva eustática simplificada del Mediterráneo occidental, correspondiente a los últimos 300 ka, deducida a partir de las dataciones Th/U de espeleotemas freáticos de la costa oriental de Mallorca. Se recogen las tendencias generales del nivel marino, definiendo mediante trazos continuos los eventos documentados por más de una datación; una interpretación en detalle del último interglacial se incluye en la Figura 5. Consultar discusión pormenorizada en el texto. En ordenadas se refleja la altitud a la que se encuentran los distintos paleoniveles muestreados. Las flechas a derecha o izquierda indican edades mínimas o máximas respectivamente. Se han graficado rayados aquellos estadios isotópicos que implican eventos climáticos de signo cálido.

Figure 4:

Simplified eustatic curve of western Mediterranean, corresponding to the last 300 ka, deduced from Th/U datings of phreatic speleothems collected on the eastern coast of Mallorca. The general sea-level trends are reflected, the events documented by means of more than one dating being defined with unbroken lines; a detailed interpretation of last interglacial is included in Figure 5. See text for a detailed discussion.

The y-axis represents the elevations at which the different paleolevel samples were collected. The right and left pointing arrows indicate minimum and maximum ages respectively. Dashed areas are warm climate isotopic stages.





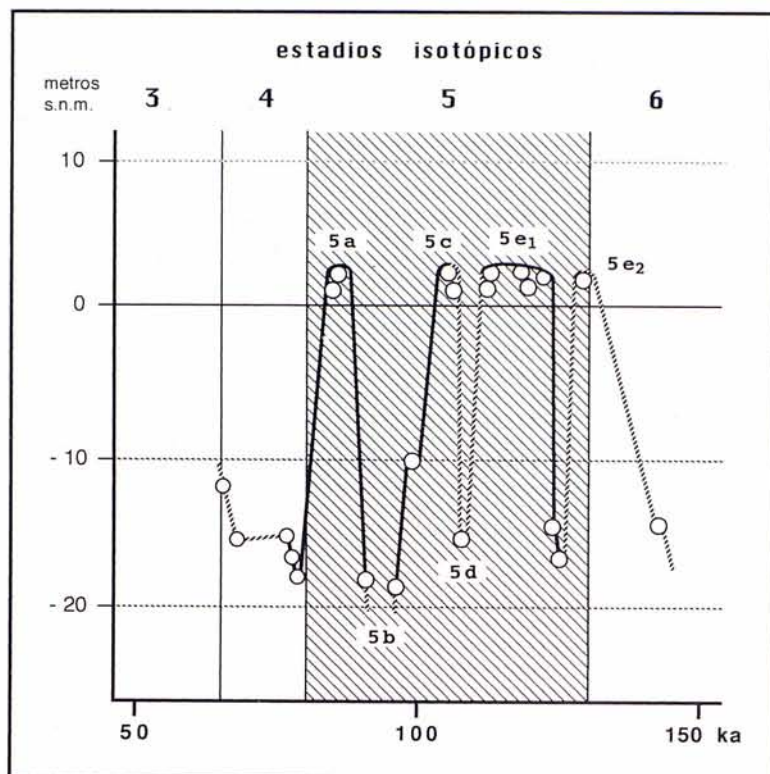


Figura 5:  
Curva eustática para el último interglacial, deducida a partir de las dataciones Th/U de espeleotemas freáticos de cuevas costeras mallorquinas. En trazo continuo se han representado aquellas vicisitudes del nivel marino documentadas por más de una datación. Consultar discusión pormenorizada en el texto. En ordenadas se refleja la altitud a la que se encuentran los distintos paleoniveles muestreados. Se ha grafiado rayado el estadio climático correspondiente al último acontecimiento interglacial.

Figure 5:  
Eustatic curve of the last interglacial period, deduced from Th/U datings of phreatic speleothems from Mallorcan coastal caves. Unbroken lines represent sea-level fluctuations documented by means of more than one dating. See text for a detailed discussion. The y-axis represents the elevations at which the different paleolevel samples were collected. Dashed area corresponds to the last interglacial climatic event.

1999). Esta gráfica pone de manifiesto una complicada sucesión de paleoniveles marinos registrados a cotas negativas, en correspondencia con estadios isotópicos de carácter frío (estadios 4, 6 y 8), alternándose con otros antiguos niveles del mar, a cotas superiores al actual  $\pm 0$ , asociados con acontecimientos climáticos de signo cálido (estadios 1, 5, 7 y 9). Aún así, esta pauta general se ve aderezada por la presencia (en el estadio isotópico 5) de diversas pulsaciones regresivas, relacionadas con diferentes subestadios que hoy en día se distinguen a lo largo del último interglacial. Se describirán a continuación los rasgos destacables de la curva eustática aportada.

Siguiendo un orden de antigüedad creciente, tenemos documentado un nivel del Mediterráneo similar al actual entre 3,9 y 5,4 ka, al que seguiría un máximo postglacial a +2,1 metros en torno a los 6,6 ka B.P.; este máximo se correspondería con la transgresión Versiliense, también conocida como Flandriense (estadio isotópico 1).

De los momentos álgidos de la glaciación más reciente no se dispone de datos, ya que las próximas muestras analizadas se sitúan en el estadio 4, con edades comprendidas entre 63,7 y 79,6 ka y registrando hasta cinco estabilizaciones del mar a diferentes profundidades entre -12 y -17 metros (ver Figura 5). Se llega así al último y complejo gran acontecimiento interglacial (estadio 5), en el que es factible distinguir al menos tres picos transgresivos junto con un mínimo de dos pulsaciones regresivas; este episodio se asociaría con los pisos característicos del Tirreniense, entendido en un sentido amplio que incluiría los depósitos con

fauna termófila del Eutirreniense y Neotirreniense (CUERDA, 1975). Dada la complejidad e interés de este evento climático, nos ocuparemos de él más adelante, procediendo a una discusión en detalle de los subestadios individualizables.

En el estadio 6, que representa un acontecimiento de signo frío, se encuentra documentada una regresión de un mínimo de 14 metros con una edad de 147,4 ka. Esta muestra sería relacionable con la fase final de este evento frío, y su transición a las condiciones climáticas interglaciales propias del subestadio 5e.

El siguiente episodio interglacial (estadio 7) está representado con claridad sólo por una muestra, localizada a +4,9 metros, con una edad de 231,9 ka; esta cronología podría permitir adscribirla a un máximo transgresivo correspondiente al subestadio 7c (ZAZO, 1999). Las otras dos muestras pertenecientes a este estadio isotópico están situadas a cotas inferiores al nivel marino presente, dando informaciones menos consistentes con el carácter cálido de este evento. Por un lado la datación de 201,4 ka seguramente registra el final del subestadio 7a, señalando una tendencia regresiva que dejó un paleonivel a -8 metros; por otra parte, la muestra de 227 ka podría corresponder a una pulsación regresiva ocurrida entre los subestadios 7a y 7c, si bien sus relaciones isotópicas han permitido calcular tan sólo una edad máxima.

Del comienzo y del final del estadio 8 se dispone de dos dataciones a 260 y 288 ka, que denotan cuando menos un episodio regresivo de 23 metros de magnitud que tuvo lugar durante el citado estadio frío.

Las dataciones disponibles, con edades superiores



a los 300 ka, no aportan informaciones consistentes acerca del nivel marino en el estadio isotópico 9 (y más antiguos), el cual sería asimilable al Paleotirreniense de la terminología marina mediterránea. La existencia de seis muestras con relaciones isotópicas próximas a la unidad, para las cuales sólo se puede indicar una edad mínima, impide extraer datos válidos acerca de las estabilizaciones marinas que hubieran tenido lugar con anterioridad al estadio 8. La altimetría de dos de los espeleotemas freáticos analizados (superior a los 30 metros s.n.m.) sugiere que pudiesen estar ligados a paleoniveles del mar alcanzados durante los estadios 9 ó 11, o incluso en tiempos todavía más remotos del Pleistoceno medio.

Conviene ocuparse ahora con mayor detenimiento de las vicisitudes reflejadas por la curva eustática en lo referente al complejo estadio isotópico 5, el cual representa el último gran evento interglacial. En la Figura 5 queda muy bien individualizado un pico transgresivo sobre los 83 ka B.P., y de un máximo de +2 metros con respecto al nivel marino actual, relacionable con el subestadio 5a que equivaldría al piso conocido como Neotirreniense. A dicho pico le habría precedido una regresión de al menos 18 metros, ocurrida entre 90 y 100 ka, atribuible sin problemas al subestadio 5b. Entre los 107 y 124 ka numerosas muestras registran un nivel marino próximo a los +2 metros s.n.m., interrumpido por una posible regresión de 15 metros a 108,3 ka, que cabe asignarla al subestadio 5d y que está documentada por una única datación; de esta manera, las dos muestras de antigüedad menor que la citada pulsación regresiva podrían ser atribuidas al subestadio 5c, mientras que las dataciones de edades mayores a 110 ka entrarían ya en el subestadio 5e, el cual se asocia con el óptimo climático del último interglacial. Dentro de este último episodio (5e), al que se atribuirían muestras con edades comprendidas entre 111 y 130 ka a altitudes máximas de +2,5 metros s.n.m., se constata una pulsación regresiva de 16,5 metros de magnitud acontecida sobre los 125 ka y documentada por dos muestras de la misma localidad. Se trataría de un descenso brusco del nivel marino inserto en pleno subestadio 5e, posibilidad que ya se constataba en el yacimiento marino mallorquín del Campo de Tiro (HILLAIRE-MARCEL *et al.*, 1996) y en otras áreas geográficas (ZAZO, 1999); de esta manera, el subestadio 5e quedaría dividido en dos picos transgresivos (que hemos señalado en la Figura 5 con las etiquetas 5e<sub>1</sub> y 5e<sub>2</sub>) separados por un breve episodio regresivo.

Los resultados obtenidos para el conjunto del estadio isotópico 5 concuerdan con los publicados por ROSE *et al.* (1999) al ocuparse del litoral noroccidental de las montañas de Artà. Estos autores reconocen, en su área de trabajo, niveles marinos superiores al actual durante los subestadios 5a, 5c y 5e, separados por eventos regresivos a los que se asocia un incremento de la actividad fluvial, relacionables con los subestadios 5b y 5d.

Otras informaciones interesantes vienen proporcionadas por las tasas de ascenso o descenso del nivel marino, que es posible calcular en base a las dataciones de los picos transgresivos y regresivos recogidos en la curva eustática detallada de la Figura 5 (ver datos numéricos en la Tabla I). La cuantificación de este parámetro arroja cuantías mínimas de variación del nivel marino del orden de 1,5 m/ka durante las tendencias de ascenso y descenso ligadas a bruscas vicisitudes climáticas, cifra que alcanza valores medios cercanos a los 4 m/ka. Los valores obtenidos significan que oscilaciones del nivel del Mediterráneo de aproximadamente 20 metros de amplitud, deben haber ocurrido en lapsos de tiempo bastante más breves que 10 ka. Estas magnitudes están en concordancia con las calculadas por HARMON (1980; 1985) en las Bermudas, donde se han barajado valores de entre 3,5 y 6 m/ka e incluso superiores. A pesar de la rápida tendencia fluctuante representada por los valores expuestos —que suponen tasas de ascenso-descenso del orden de 4 mm por año— la formación de paleoniveles de espeleotemas freáticos ha de haber significado la estabilización del nivel del mar, en una determinada cota, durante el tiempo suficiente para la deposición de un sobrecrecimiento freático apreciable, lapso que pensamos debe ser al menos de uno o unos pocos miles de años.

Los datos disponibles sobre los estadios 4 y 5 (recogidos en la Figura 5) ilustran muy bien sobre cómo la curva eustática, deducible para el último interglacial, registra cambios paleoambientales radicales y muy abruptos, explicables en base a alternancias climáticas. El buen ajuste que presentan los picos contenidos en la curva eustática citada, en relación con los estadios isotópicos reconocidos en el registro marino profundo (SHACKLETON & OPDYKE, 1973), confirma el carácter glacio-eustático de las oscilaciones detectadas en el nivel del Mediterráneo —entre los 50 y los 150 ka B.P.— a través del estudio de los espeleotemas freáticos mallorquines. A este respecto ROSE *et al.* (1999) señalan diferencias de hasta 11°C en las temperaturas medias anuales, calculadas para los máximos y mínimos térmicos correspondientes a los distintos subestadios del último interglacial.

Para finalizar conviene hacer algunas consideraciones en relación con las peculiaridades de las curvas eustáticas aportadas (Figuras 4 y 5), en comparación con las curvas clásicas del Cuaternario de Mallorca publicadas por autores diversos (BUTZER & CUERDA, 1962; BUTZER, 1975; CUERDA, 1975; POMAR & CUERDA, 1979). Por una parte, no existen discrepancias relevantes en cuanto a la existencia y magnitud de los picos transgresivos Flandriense (postglacial, estadio 1) y Neotirreniense (subestadio 5a). En cambio, en lo que atañe al Eutirreniense existen mayores diferencias entre ambas curvas, que acto seguido se exponen. Los espeleotemas freáticos no han aportado evidencias que sustenten un nivel marino superior a los +2,5 metros en el último interglacial (estadio 5); hay que decir que



CUERDA (1975) y BUTZER (1975) señalan paleoniveles marinos Eutirrenienses a altitudes de hasta +11/+14 metros, circunstancia que no queda refrendada por nuestros datos. En relación con estas cuestiones debe ser tenido en cuenta que, para dichos autores, el Eutirreniense abarcaría un amplio período entre 100 y 230 ka, con lo que incluiría asimismo el estadio isotópico 7 (BUTZER, 1985), evento del cual no disponemos de informaciones suficientes salvo un posible pico transgresivo de +5/+6 metros sobre los 232 ka. Del piso Paleotirreniense, que podría equivaler al estadio 9, las informaciones procedentes de nuestra área de estudio no han logrado arrojar precisiones; no obstante, dataciones de espeleotemas freáticos de otras zonas de la isla (HENNIG *et al.*, 1981; GINÉS & GINÉS, 1993b) registran paleoniveles marinos a altitudes superiores a los +30 metros, atribuibles al estadio isotópico 9, o incluso anteriores.

Las mayores diferencias entre las curvas construidas ahora y el registro clásico del Cuaternario marino de Mallorca, radican en el gran detalle obtenido para las vicisitudes experimentadas por el nivel marino entre 50 y 150 ka B.P. (estadios 4 y 5). Esta curva detallada (Figura 5) nos ofrece una nueva perspectiva del Eutirreniense final y Neotirreniense, con los bruscos cambios paleoambientales que tuvieron lugar, y de la transición hacia unas condiciones climáticas de carácter netamente más frío que marcan el final del último interglacial. Obviamente este mayor detalle, obtenido en la reconstrucción de la historia reciente del nivel del Mediterráneo, se concreta en el conocimiento novedoso de los paleoniveles del mar situados a altitudes inferiores a la presente cota de estabilización de las aguas marinas.

## Conclusiones

Los resultados de estos estudios sobre espeleotemas freáticos situados por debajo del actual nivel del Mediterráneo, se pueden sistematizar como sigue:

- Las edades obtenidas para las muestras analizadas, correspondientes a estabilizaciones del nivel marino a cotas negativas, abarcan desde los 63,7 ka hasta >350 ka B.P.
- Buena parte de los espeleotemas freáticos datados cuyas edades son inferiores a los 300 ka se correlacionan a la perfección con los estadios isotópicos 4, 6 y 8, los cuales representan eventos climáticos de claro signo frío.
- Aparecen muy bien documentados algunos paleoniveles marinos pertenecientes al estadio 4, registrados a profundidades entre -12 y -17 metros, así como diversas pulsaciones regresivas ocurridas dentro del estadio isotópico 5.
- En concreto, la historia del nivel del Mediterráneo durante el último interglacial (estadio 5) se presenta en extremo compleja, evidenciando

una posible sucesión de hasta siete picos transgresivo-regresivos, relacionables con los subestadios habitualmente distinguidos dentro de este gran evento climático. Se han constatado en este estadio fluctuaciones del nivel marino de hasta 20 metros de magnitud, las cuales han tenido lugar en lapsos de tiempo bastante menores que 10 ka.

— El estudio de los espeleotemas freáticos se ratifica como una muy buena herramienta para la investigación precisa de la historia del nivel marino en el Cuaternario. La obtención de datos sobre los depósitos de este tipo, que se hallan hoy en día sumergidos en los lagos de nuestras cuevas costeras, suministra evidencias acerca de las pulsaciones marinas ligadas a acontecimientos climáticos de relativo carácter frío, cuyo conocimiento a escala de Mallorca era hasta el momento insignificante.

— La integración de las informaciones aportadas por los espeleotemas freáticos —datados en sucesivas campañas, y ubicados ya sea tanto por encima como por debajo del presente nivel de las aguas marinas— ha permitido ensayar la reconstrucción de una curva eustática afinada, para el rango de edad de 70 a 150 ka B.P., de validez plausible para la cuenca mediterránea occidental.

## Agradecimientos

Estas investigaciones se han beneficiado del acuerdo de colaboración establecido, a partir del curso 1998-99, entre la *Università "Roma Tre"* (Roma, Italia) y la *Universitat de les Illes Balears* (Palma de Mallorca, España). Asimismo, este trabajo forma parte de los proyectos de investigación de la DGICYT nº PB94-1175 y de la DGESIC nº PB98-0132.

## Bibliografía

- BUTZER, K. W. (1975): Pleistocene littoral-sedimentary cycles of the Mediterranean basin: a Mallorquin view. In: BUTZER, K. W. & ISAAC, G. L. (Ed.): *After the Australopithecines: stratigraphy, ecology and culture change in the Middle Pleistocene*, 25-71. Chicago.
- BUTZER, K. W. (1985): La estratigrafía del nivel marino en Mallorca en una perspectiva mundial. In: *Geomorfología Litoral y Cuaternario. Homenaje a Juan Cuenda*. Universidad de Valencia. 17-33. Valencia.
- BUTZER, K. W. & CUERDA, J. (1962): Coastal stratigraphy of southern Mallorca and its implications for the Pleistocene chronology of the Mediterranean sea. *Journal of Geology*, 70 (4): 398-416. Chicago.
- CUERDA, J. (1975): *Los tiempos cuaternarios en Baleares*. Instituto de Estudios Baleáricos. 304 págs. Palma de Mallorca.
- DEL OLMO, P. & ÁLVARO, M. (1984): Control estructural de la sedimentación neógena y cuaternaria de Mallorca. *I Congreso Español de Geología*, 3: 219-228.
- FORNÓS, J. J.; PRETUS, J. L. & TRIAS, M. (1989): La Cova de sa Gleda (Manacor, Mallorca), aspectes geològics i biològics. *Endins*, 14-15: 53-59. Palma de Mallorca.
- GELABERT, B.; SÀBAT, F. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1992): An structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands). *Tectonophysics*, 203: 167-183.



- GINÉS, A. (1995): Els espeleotemes de les coves de Mallorca / The speleothems of Majorcan caves. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (Ed.): El karst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca. *Endins*, 20 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 87-97. Palma de Mallorca.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1974): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con formaciones marinas del Cuaternario. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 11-28. Palma de Mallorca.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1986): On the interest of speleochronological studies in karstified islands. The case of Mallorca (Spain). *Com. 9<sup>a</sup> Cong. Int. Espeleol.*, 1: 297-300. Barcelona.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1989): Absolute dating of phreatic speleothems from coastal caves of Mallorca (Spain). *Proc. 10th Int. Congress Speleol.*, 1: 191-193. Budapest.
- GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981a): Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleolevels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green.
- GINÉS, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J. J. & TUCCIMEI, P. (1999): Dataciones isotópicas de espeleotemas procedentes de cuevas costeras de Mallorca. Estado actual de las investigaciones. In: ANDREO, B.; CARRASCO, F. & DURÁN, J. J. (Ed.): *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja. 143-152. Nerja (Málaga).
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1987): Datos espeleocronológicos sobre el karst de la isla de Mallorca. *Revista de Ciència*. Institut d'Estudis Balearics. 1: 81-92. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993a): Speleochronological approach to some coastal caves from "Cap Vermell" area in Mallorca island (Spain). *Proc. XI Int. Congress Speleol.*, 56-59. Beijing.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1993b): Dataciones isotópicas de espeleotemas freáticos recolectados en cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 19: 9-15. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1995): Aspectes espeleocronològics del karst de Mallorca / Speleochronological aspects of karst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (Ed.): El karst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca. *Endins*, 20 / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 3: 99-112. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J.; GINÉS, A. & POMAR, L. (1981b): Morphological and mineralogical features of phreatic speleothems occurring in coastal caves of Majorca (Spain). *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 529-532. Bowling Green.
- GRÀCIA, F.; WATKINSON, P.; MONSERRAT, T.; CLARKE, O. & LANDRETH, R. (1997): Les coves de la zona de ses Partions - Portocolom (Felanitx, Mallorca). *Endins*, 21: 5-36. Palma de Mallorca.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B. & WATKINSON, P. (1998a): La Cova d'en Passol i altres cavitats litorals situades entre Cala sa Nau i Cala Mitjana (Felanitx, Mallorca). *Endins*, 22: 5-18. Palma de Mallorca.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; AGUILÓ, C. & WATKINSON, P. (1998b): La Cova des Drac de Cala Santanyí (Santanyí, Mallorca). *Endins*, 22: 55-66. Palma de Mallorca.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B. & LAVERGNE, J.J. (2000): Les coves de Cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 23. Palma de Mallorca.
- HARMON, R. S. (1980): Paleoclimatic information from isotopic studies in speleothems: a review. In: MAHANEY, W. C. (Ed.): *Quaternary Paleoclimate*. Geo Abstracts Ltd. 299-318. Norwich.
- HARMON, R. S. (1985): Late Pleistocene sea level history of Bermuda: a review. In: *Geomorfologia litoral y Cuaternario. Homenaje a Juan Cuerda*. Universidad de Valencia. 53-60. Valencia.
- HEARTY, P. J. (1996): The geology of Eleuthera island, Bahamas: a Rosetta stone of Quaternary stratigraphy and sea-level history. *Quaternary Science Reviews*, 17: 333-355.
- HENNIG, G. J.; GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Avance de los resultados obtenidos mediante datación isotópica de algunos espeleotemas subacuáticos mallorquines. *Endins*, 8: 91-93. Palma de Mallorca.
- HILLAIRES-MARCEL, C.; GARIÉPY, C.; GHALEB, B.; GOY, J. L.; ZAZO, C. & CUERDA, J. (1996): U-Series measurements in Tyrrhenian deposits from Mallorca. Further evidence for two last-interglacial high sea levels in the Balearic islands. *Quaternary Science Reviews*, 15: 53-62.
- MERINO, A. (1993): La Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). *Endins*, 19: 17-23. Palma de Mallorca.
- MERINO, A. (2000): Nuevas extensiones de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). *Endins*, 23. Palma de Mallorca.
- NEUMANN, A. C. & HEARTY, P. J. (1996): Rapid sea-level changes at the close of the last interglacial (substage 5e) recorded in Bahamian island geology. *Geology*, 24 (9): 775-778.
- POMAR, L. & CUERDA, J. (1979): Los depósitos marinos pleistocénicos en Mallorca. *Acta Geológica Hispánica*. Homenatge a Lluís Solé i Sabarís. 14: 505-513. Barcelona.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & FONTARNAU, R. (1976): Las cristalizaciones freáticas. *Endins*, 3: 3-25. Palma de Mallorca.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiaquáticos. *Endins*, 5-6: 3-17. Palma de Mallorca.
- POMAR, L.; RODRÍGUEZ, A.; FORNÓS, J. J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; FONT, A. & MORA, A. (1987): Phreatic speleothems in coastal caves: a new method to determine sea-level fluctuations. In: ZAZO, C. (Ed.): *Late Quaternary sea-level changes in Spain*. Museo Nacional de Ciencias Naturales C.S.I.C. *Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*, 10: 197-224. Madrid.
- ROSE, J.; MENG, X. & WATSON, C. (1999): Palaeoclimate and palaeoenvironmental responses in the western Mediterranean over the last 140 ka: evidence from Mallorca, Spain. *Journal of the Geological Society*, 156: 435-448. Londres.
- SHACKLETON, N. J. & OPDYKE, N. D. (1973): Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10<sup>5</sup> year and 10<sup>6</sup> year scale. *Quaternary Research*, 3: 39-55. Washington.
- TRIAS, M. & MIR, F. (1977): Les coves de la zona de Can Frasquet - Cala Varques. *Endins*, 4: 21-42. Palma de Mallorca.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & FORNÓS, J. J. (1997): Th/U dating of sea level-controlled phreatic speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Proc. 12th Int. Congress Speleol.*, 1: 37-40. La Chaux-de-Fonds.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J. J. & VESICA, P. L. (1998): Dataciones Th/U de espeleotemas freáticos controlados por el nivel marino, procedentes de cuevas costeras de Mallorca (España). *Endins*, 22: 99-107. Palma de Mallorca.
- VESICA, P. L.; TUCCIMEI, P.; TURI, B.; FORNÓS, J. J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1996): Th/U dating and C - O isotope analyses of speleothems from coastal caves in Mallorca (Spain). *30th IGC, Abstracts*, 1: 87. Beijing.
- VESICA, P. L.; TUCCIMEI, P.; TURI, B.; FORNÓS, J. J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2000): Late Pleistocene Paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews* (en prensa).
- ZAZO, C. (1999): Interglacial sea levels. *Quaternary International*, 55: 101-113.