Procesos de karstificación polifásica en las canteras de Crema Marfil (Pinoso, Alicante). Aplicación a la explotación de rocas ornamentales.

Polyphase karstification processes in Crema Marfil quarries (Pinoso, Alicante). Application to exploitation of dimension stones.

J.C. Cañaveras [1,2], M.A. García del Cura [2,3] S. Sánchez-Moral [4], M.C. Muñoz-Cervera [1,2] y S. Ordóñez [1,2]

[1] Dept. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Campus de San Vicente del Raspeig. Ap. 99. E-03080 Alicante
[2] Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada C.S.I.C.-Universidad de Alicante.
[3] Instituto de Geología Económica (C.S.I.C.). Facultad de Ciencias Geológicas. Ciudad Universitaria s/n E-28040 Madrid
[4] Dept. Geología. Museo Nacional de Ciencias Naturales (C.S.I.C.) José Gutiérrez Abascal 2, E-28009 Madrid

ABSTRACT

Complex speleothem networks have been recognised in the quarries of the commercial marble Crema Marfil (Paleogene limestones, Monte Coto Pinoso, Alicante). The characterisation of these speleothems (mineralogy, petrography, stable isotopes) has enable us to discriminate different phases of speleothem formation in terms of paleotemperature or structural control. U/Th dates of some of these phases are 178,7± 15,6 Ka, 34,4±1,7 Ka y 33,7±3,4 Ka. A seismo-tectonic event has been recorded and dated (33-34Ka) by the study of speleothems. The recognition and characterisation of speleothem networks can be considered as a useful tool in the design of exploitation strategies of dimension stones.

***Key words**: karst, speleothem, Crema Marfil, Alicante, Paleogene, stable isotopes,*

Geogaceta, 31 (2002), 31-34
ISSN:0213683X

Introducción

El Monte de Coto Pinoso está constituido básicamente por una formación de calizas marinas paleógenas, con cierto carácter arrecifal (arrecife de fóraminíferos) que forman parte del dominio Prebético Interno Central. En puntos próximos aparecen cabalgadas por formaciones cabonáticas, del dominio subbético, más antiguas, como las calizas jurásicas que constituyen el litotecto del Rojo Alicante y otras calizas liásicas, algunas de las cuales son explotables. En algunos puntos de la base del Monte se pueden observar afloramientos de arcillas triásicas presumiblemente asociadas al "Diapiro de Pinoso" que forma parte de un importante relieve próximo al monte del Coto. Las características morfológicas y estructurales del afloramiento están descritas en Rodríguez *et al.* (2000). Por su interés para este trabajo debemos destacar que las calizas de este afloramiento aparecen plegadas con direcciones NE-SO, y están fracturadas por fallas de dirección N-S, fracturación que se manifiesta en fracturas con desplazamiento y diaclasas. A favor de estas fracturas se ha desarrollado un sistema kárstico polifásico que ha conllevado la formación de rellenos espeleotémicos y arcillosos, que frecuentemente dificultan y disminuyen el rendimiento de la explotación (Fig. 1).

En el año 2000 se extrajeron del Coto Pinoso 318.650 m^3, según datos suministrados por el Ayuntamiento de Pinoso. Se considera que las reservas geológicas del Coto pueden superar los 100 Mm^3 y las reservas extraibles los 30 Mm^3 (Rodríguez *et al.* op.cit.)

En el presente trabajo se estudian las características mineralógicas, petrográficas y geoquímicas de las principales familias de espeleotemas que componen el entramado kárstico observable en las explotaciones de Crema Marfil del Monte Coto Pinoso. Asimismo, se intenta valorar la influencia de los procesos de diagénesis meteórica, en general, y de karstificación, en particular, en las estrategias de explotación y en los criterios de calidad del mármol comercial Crema Marfil.

Métodos

Junto a detalladas observaciones de campo, estereromicroscopio y de microscopía petrográfica se ha realizado un estudio mineralógico por difracción de rayos X sobre muestra pulverizada y utilizando cuarzo como patrón interno con un difractómetro Philips PW 1840. Los valores de % molar de $MgCO_3$ fueron estimados por la medida de la posición relativa del pico d_{104} relativo a un standard, metodología expuesta por Goldsmith *et al.* (1961). el contenido en elementos traza (Mg, Sr, Fe, Cr,...) fue determinado por fluorescencia de rayos X utilizando un equipo philips PW-1480. Los análisis de isótopos estables se realizaron en el Laboratorio GEOTOP de la Universidad de Quebec (UQÀM). Las dataciones por el método U-Th fueron realizadas en el Laboratorio CERAK, Faculté Politechnique de Mons, Belgica, por el Dr. Quinif, empleando la metodología por él descrita (Quinif, 1989)

Roca encajante: mármol comercial Crema Marfil

El Crema Marfil es una caliza fosilífera de foramíniferos, principalmente nummulítidos que ocasionalmente presenta vénulas de calcita esparítica, que pueden llegar a ser abundantes, constituyendo las variedades comercializadas con los nombres de *Crema Marfil Fantasía y Crema Marfil Veta*. Estas vénulas presentan grosores predominantes del orden de 0,2 mm si bien también se observan numerosas vénulas de una pocas decenas de micras de grosor. En referencia al color de las vénulas

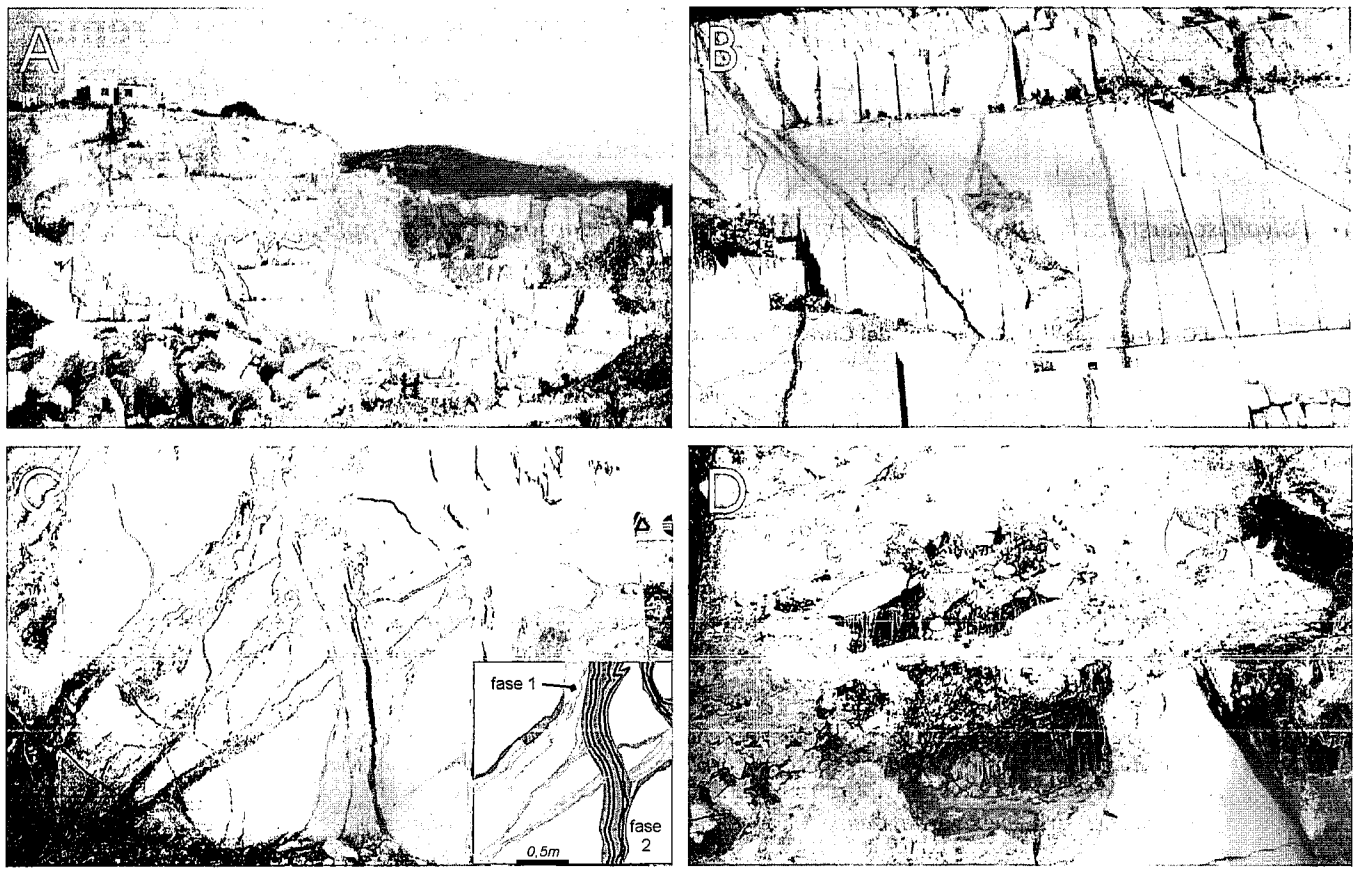

Fig 1.- A. Vista general desde el sur de la cantera de Crema Marfil del Monte Coto Pinoso (Marzo, 1996). B. Detalle de los frentes de la cantera en los que se observa la distribución de los conductos kársticos y sus rellenos (Marzo 1996). C. Red polifásica de espeleotemas (fases 1 y 2, ver texto) en frentes inactivos de la cantera. D. Brecha endokárstica con desarrollo de cavidades y espeleotemas (fase 3, ver texto)

Fig. 1.- A. General view of Crema Marfil commeridal marble quarries at Monte Coto Pinoso (Alicante, Spain) (March 1996). B. Close view of quarry front showing karst and speleothem network (March 1996). C. Polyphase network of speleothems (phases 1 and 2, see text). D. Endokarstic breccia with development of caves and speleothems (phase 3, see text)

calcíticas se han comercializado variedades como *Aguas Claras y Aguas Oscuras* (García del Cura *et al.* 1996).

La proporción de nummulítidos varia dentro del Monte Coto pudiendo otros foramíferos llegar a ser predominantes (v.gr. *Variedad Pintas).* Algunos productores denominan al tipo rocoso en el que predominan los nummulitidos, *«Crema Marfil Grano de Arroz»,* si bien la mayor parte de este tipo petrológico, cuando no presenta vénulas muy abundantes ni estilolitos, es comercializado con la denominación de *«Crema Marfil Primera»* constituyendo el material más representativo del Crema Marfil de Coto Pinoso. Otros tipos de fósiles como equinodermos, algas y briozoos aparecen en diferentes cantidades.

La madurez textural de esta roca es variable, pues si bien predominan las facies esparíticas (grainstones), facies con diferentes porcentajes de micrita (packestones) también están presentes. Los estilolitos, que suelen presentar escasos rellenos, en numerosas ocasiones están abiertos, siendo relativamente frecuente en ellos la precipitación de calcita en cristales cuyo hábito refleja el hecho de haber crecido en una superficie libre.

Espeleotemas

Como se ha mencionado anteriormente, tanto los frentes de la explotación como los distintos afloramientos del Monte Coto Pinoso aparecen atravesados por una compleja red de grietas y rellenos kársticos (principalmente espeleotemas) (Fig. 1B). Las redes de espeleotemas presentan un marcado control estructural, presentándose como un complejo entramado sub-verticalizado de rellenos de anchura variable (0,1 a 3 m) a favor de fracturas, diaclasas y planos de estratificación.

Se han reconocido diferentes fases de espeleogénesis y de formación de espeleotemas, arrojando una edad de 178.000 años los espeleotemas datados mas antiguos.

La tipología de los espelotemas es relativamente variada, dominando las coladas o flowstones parietales bandeados (Fig. 1C). Se han reconocido también coladas pavimentarias, pequeñas estalactitas, estalagmitas y columnas, costras globulíticas, pisolitos y depósitos subacuáticos.

Otros depósitos o formaciones de origen kárstico que se observan en los afloramientos del Monte Coto Pinoso y que en la mayor parte de los casos están relacionados espacialmente con los rellenos espeleotémicos, incluyen: (i) Brechas exokársticas matriz-soportadas (relacionadas con dolinas de escaso desarrollo) que incluyen tanto fragmentos heterométricos de roca encajante como de espeleotemas, en una matriz arcillosa-arenosa de tonos rojizos. (ii) Brechas endokársticas, tanto matriz-soportadas como grano-soportadas que se disponen en cuerpos de tamaño y morfología irregular (en algunos casos delimitando paleocavidades); la naturaleza de los cantos y matriz es semejante a las anteriormente descritas (Fig. 1D). (iii) Rellenos arcillosos con cantos dispersos (encajante y espeleotemas) rellenando cavidades subhorizontales y principalmente grietas subverticales.

El estudio petrográfico y geoquímico de los espeleotemas de Coto Pinoso se ha centrado en ejemplares de coladas parie-

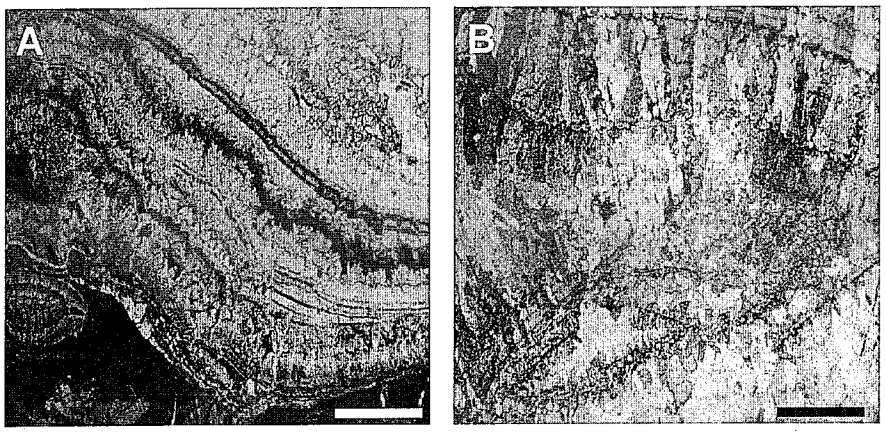

Fig. 2.- Rasgos texturales de los espeleotemas de Coto Pinoso. A. Alternancia de bandas micríticas y esparíticas columnares sobre roca encajante (angulo inferior izquierdo). Colada espeleotémica fase 1 (barra de escala: 0,5 mm; nícoles paralelos). B. Detalle de microbrecha espeleotémica recubierta por empalizada de cristales columnares bandeados diagenéticos de calcita. Colada espeleotémica fase 1 (barra de escala: 0,5 mm; nícoles cruzados)

Fig. 2.- Textural features of Coto Pinoso speleothems. A. Alternation of micrite and columnar coarse-sparite layers on host-rock (left lower corner in the photomicrograph). Flowstone phase 1 (scale bar: 0,5 mm). B. Detail of speleothemic microbreccia covered by a layer composed of secondary (diagenetic) banded columnar calcite crystals. Flowstone phase 1 (scale bar: 0,5 mm; crossed nichols).

tales correspondientes a tres diferentes fases de karstificación, que denominaremos fase 1, 2 y 3 de mayor a menor antigüedad. Dataciones de U/Th han dado valores de 34,4 ± 1,7 m.a. para los espeleotemas de la fase 1 y de 33,7±3,4 m.a. para los de la fase 2 (Fig. 1C). Los espeleotemas de las fases 1 y 2 muestran un mayor desarrollo espacial que los que la fase 3, los cuales se localizan generalmente en los niveles mas superiores del relieve, asociados a depósitos endokársticos (reactivaciones) mas antiguos. El entramado de la red de espeleotemas de la fase 2, a su vez, muestra unos patrones mas verticalizados que los que la fase 1, los cuales localmente se desarrollan a favor de planos de estratificación (Fig. 1C).

Descripción Petrográfica

La fase 1 de espeleotemas está formada principalmente por coladas o flowstones bandeados de tonos grisáceos. La Fase 2, a su vez, está tambien mayoritariamente formada por coladas de tonos mas claros, anaranjado-amarillentos, con un contenido en detríticos sensiblemente menor, y que cortan y desplazan a los depósitos de la fase anterior, aunque aprovechan gran parte de sus conductos. Finalmente los espeleotemas de la fase 3 se encuadran en pequeñas cavidades generadas en cuerpos brechoides poligénicos que engloban, tanto fragmentos de encajante, como fragmentos de espeleotemas de las fases 1, 2 y posiblemente fases aun mas antiguas. Consisten en pequeñas coladas parietales y pavimentarias, estalactitas y estalagmitas.

El estudio microscópico de varios ejemplares de espeleotemas correspondientes a las Fases 1, 2 y 3 revela la existencia de diferencias texturales entre estos tipos.

Las coladas de la fase 1 consisten en la alternancia de bandas claras y oscuras de cristales de calcita. Las bandas oscuras, a su vez, se componen de la alternancia de sub-bandas (50-500 µm) micríticas y esparíticas (generalmente empalizadas de cristales tabulares y/o columnares) (Fig. 2A). Estos cristales son ricos en impurezas (óxidos de hierro, filosilicatos) que se organizan generalmente en bandas de crecimiento de los cristales. En ocasiones se observan pequeños granos de terrígenos y terminaciones cristalinas truncadas a techo de algunas sub-bandas, indicado interrupciones en la formación de estos precipitados (Fig. 2B). Se observan evidencias de recristalización en este tipo de precipitados, consistentes en la existencia de grandes cristales anhedrales y columnares que atraviesan distintos niveles de sub-bandas (Fig. 2B). Las bandas claras, cuyo espesor varia de 2-3 mm a 1-2 cm, están constituidas por empalizadas de cristales columnares de calcita. En el interior de los ejemplares estudiados, especialmente hacia techo de los mismos, se han reconocido huellas de microbrechificación, recementación y cambios en la dirección de crecimiento de los cristales.

Las coladas de las fases 2 y 3 consisten principalmente en la sucesión de bandas de cristales columnares de calcita con la alternancia de finas y escasas bandas micríticas.

Mineralogía y Geoquímica

Todos los espeleotemas estudiados están formados casi exclusivamente por calcita (98-100%). El contenido en magnesio de las calcitas varía entre 1 y 4 mol%$MgCO_3$. La pequeña fracción terrígena restante (<2%) está constituida primordialmente por cuarzo y feldespato.

Los datos geoquímicos de elementos mayores, en concreto el contenido en magnesio, corroboran los datos mineralógicos. Los espeleotemas de las primera y segunda fases presentan un bajo contenido en estroncio, por debajo del nivel de detección de la técnica utilizada; los espeleotemas de la tercera fase presentan un valor medio de 60 ppm. Con respecto al contenido en hierro, los espeleotemas de la primera fase son los que presentan mayor variabilidad (150 a 1800 ppm); los espeleotemas de las otras fases presentan siempre valores menores de 500 ppm. el contenido en otros cationes como Cr, V y Cl es bastante pequeño en todas las fases analizadas, con valores medios que oscilan entre 42 y 72 ppm para el Cr, 175 a 190 ppm para el V y 22 a 60 ppm para el Cl. Las muestras de roca encajante analizadas presentan una composición mineralógica y geoquímica muy semejante con la de los espeleotemas (García del Cura *et al.*, 1997).

Con respecto a su composición isotópica ($\delta^{13}C$ y $\delta^{18}O$) los espeleotemas de las fases 1 y 2 presentan valores semejantes en cuanto al $\delta^{18}O$ (valor medio fase 1:-6,46‰; valor medio fase 2: -6,30‰) y algo mas divergentes en cuanto al $\delta^{13}C$ (valor medio fase 1:-10,37‰; valor medio fase 2: -9,42‰). El material analizado correspondiente a la fase 3 presenta unos valores de -5,74 y -9,18‰, para $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$ respectivamente. La muestras de roca encajante presentan unos valores de $\delta^{18}O$ que oscilan entre -3,10 y -4,04‰, y de $\delta^{13}C$ que oscilan entre -1,65 y -1,81‰. En la figura 3 se ilustra la composición isotópica de las diferentes muestras analizadas.

Discusión

Los valores y rangos obtenidos con respecto al $\delta^{18}O$ reflejan una evidente influencia de aguas meteóricas en la génesis de todos los espeleotemas estudiados (e.g. Andrews *et al*, 1993).

A partir de estos datos se han estimado una serie de paleotemperaturas de formación de los espelotemas en función de las expresiones de Hays y Grossman (1991). Los valores que resultan para la fases 1 y 2 son 14-15°C y 16,3-16,8°C respectivamente. Estos valores marcan unas temperaturas ligeramente mas bajas, sobre todo con res-

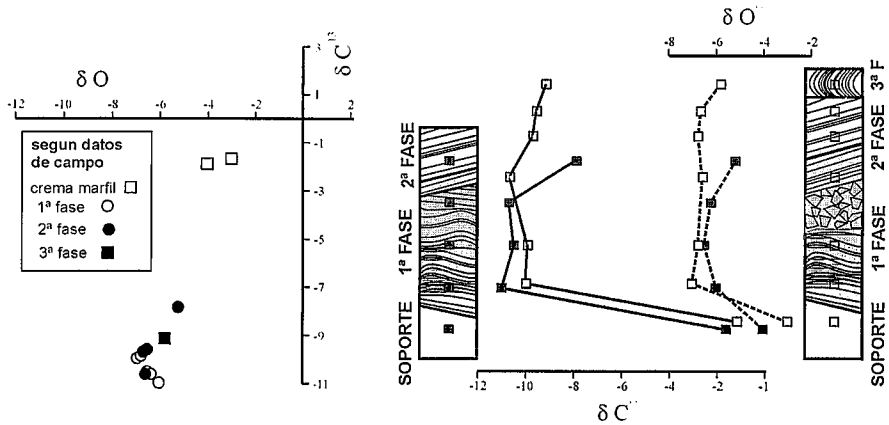

Fig 3.- Diagramas mostrando la composición isotópica de distintas fases de espeleotemas y su roca encajante.

Fig. 3.- Diagrams showing stable isotopic composition of several phases of speleothems and their host-rock.

pecto a la fase 1, que las que se alcanzan en cuevas y cavidades del este y sur peninsular en la actualidad (16-18°C).

Los datos de $\delta^{13}C$ obtenidos reflejan claramente la presencia de carbono derivado de materia orgánica. Partiendo de los valores isotópicos de la roca encajante y asumiendo un valor del $\delta^{13}C$ del CO_2 del suelo de -26‰ (Deines, 1980) y los factores de enriquecimiento del $\delta^{13}C$ entre CO_2 disuelto en el suelo, el HCO_3^- en equilibrio con el CO_2 del suelo y la calcita precipitada (Romanek *et al.*, 1992; Emrich *et al.*, 1970) a las temperaturas calculadas para las fases 1 y 2 de espeleotemas, se puede hacer una aproximación a las tasas de disolución del macizo kárstico en relación con los eventos de formación de espeleotemas. En este sentido, en la segunda fase de espeleotemas se obtiene una mayor influencia de carbono inorgánico en su señal isotópica y unas mayores tasas de solubilidad del encajante. Esto puede traducirse, en una primera aproximación, en una reactivación de procesos espeleogenéticos (de formación de cavidades) posteriormente a la precipitación de la denominada fase 1 y que daría como resultado la precipitación de la fase 2. Esta consideración parece coherente con las observaciones petrográficas y de campo que señalan la existencia de fenómenos de fracturación y/o actividad sísmica desarrollados en un intervalo de tiempo (33-34.000 años aproximadamente) limitado por las dos mencionadas generaciones de espeleotemas. Brechificaciones, roturas y desplazamientos de espeleotemas son considerados excelentes criterios para el registro de eventos sismo-tectónicos (e.g. Quinif, 1996; Quinif y Genty, 1997). En este caso, hemos estudiado y datado uno de estos episodios (33,7-34,4 ka BP), en los afloramientos y cortas de la canteras del Monte Coto Pinoso.

La definición de procesos sedimentológicos, diagenéticos y paleohidrogeológicos y su distribución puede servir, no sólo para establecer parámetros petrográficos de calidad de las rocas ornamentales, sino también para estudiar su variación espacial y su ubicación en cantera, ésto es, para establecer criterios de explotación.

La existencia de grietas y conductos kársticos de amplio desarrollo condiciona el tamaño de los bloques extraibles, e incluso hace peligrosas las tareas de extracción de los mismos; aspecto éste que se hace aún más patente en explotaciones extensivas y de alto desarrollo vertical como las que se dan en el Monte Coto Pinoso en la actualidad. El control de las redes de espeleotemas, de su distribución y naturaleza (especialmente de su relleno), y de su influencia en los parámetros de calidad de los mármoles comerciales, hace del estudio de las mismas una herramienta útil para establecer estrategias de explotación.

Los parámetros de calidad de una roca ornamental básicamente son: (i) estéticos o de aspecto, (ii) propiedades mecánicas y (iii) durabilidad. Los procesos de disolución y cementación, dos de los más importantes en el fenómeno kárstico, van a influir de manera significativa en las propiedades físicas, en la reactividad química y, en definitiva, en la durabilidad y calidad del material.

La presencia de abundante cantidad de cemento freático es en gran parte la causante de las bellas tonalidades claras de este mármol comercial. El ensanchamiento por disolución de planos de discontinuidad como los estilolitos perjudica notablemente las propiedades mecánicas de este material, especialmente en sus valores del módulo de ruptura (García del Cura *et al.*, 1996). Asimismo, en el caso concreto del mármol comercial Crema Marfil,es un factor negativo la existencia de rellenos espeleotémicos, pese a su indudable valor estético intríseco.

Conclusiones

Se han reconocido, caracterizado (mineralógica, petrográfica y geoquimicamente) y, en algunos casos, datado varias fases de espeleotemas en los frentes y afloramientos de las canteras de Crema Marfil del Monte Coto Pinoso. Todos los rellenos espeleotémicos estudiados presentan una mineralogía calcítica y una composición geoquímica que denota un origen meteórico. Se han establecido diferencias entre los distintos eventos de génesis espeleotémica reconocidos en términos de paleotemperaturas, control estructural, grado de impurezas,...etc. Asimismo, se ha identificado y datado un evento sismo-tectónico (33-34 Ka) que afectó a las calizas paleógenas de las que se extrae el mármol comercial objeto de estudio. Por último, se ha puesto de manifiesto el valor del estudio de los procesos kársticos en las explotaciones de mármoles comerciales para el establecimiento de estrategias de explotación, así como su influencia en los parámetros de calidad de estos mármoles.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del Proyecto Internacional de Correlación Geológica nº 448: World Correlation of Karst Ecosystem.

Referencias

Andrews, J.E., Riding, R. y Dennis, P.F. (1993). Sedimentology, 40, 303-314.

Deines, P. (1980) : 329-315. En «Handbook of environmental isotope geochemistry I» (Fritz, P. y Fontes, J.C., Eds.) Elsenier

Emrich, K., Ehhalt, D.H. & Vogel, J.C. (1970). Earth Planet. Sci. Letters, 8, 363-371

García del Cura, M.A., Cañaveras, J.C., Ordóñez, S., Sánchez-Moral, S. y Hoyos, M. (1997). I Cong. Ibérico de Geoquímica Soria: 543.

García del Cura, M.A., Ordóñez, S., Fort, R. y Pina, J.A. (1996). Geogaceta 20(3), 731-734.

Goldsmith, J.R, Graf, D.L. y Heard, H.C. (1961). Amer. Miner. 46, 453-457.

Hays, P.D. y Grossman E.L. (1991). Geology 19, 441-444.

Quinif, Y. (1989). Speleochronos 1, 3-22.

Quinif, Y. (1996). Ann. Soc. Géol. Belgique. 119(1), 1-13

Quinif, Y. y Genty, D. (1997). Aardk. Mededel. 8, 149-152.

Rodríguez, M.A.; García del Cura, M.A.; Bernabeú, A.M.; Cañaveras, J.C. y Ordóñez, S. (2000). 11-26.En «Itienrarios Geológicos por la provincia de Alicante y limítrofes» (Cañaveras, J.C.; García del Cura, M.A. y Meléndez, A., Eds.), Dip. Alicante

Romanek, D.S., Grossman, E.L. y Morse, J.W. (1992). Geochim. Cosmochim. Acta 56: 419-430.