

4 El carst conglomeràtic de Montserrat. Hidrologia actual i carst antic

El karst conglomeràtico de Montserrat. Hidrología actual y karst antiguo

The Montserrat conglomerate karst. Current hydrology and ancient karst

Josep M. Cervelló i Torrella^{1,2}, Antoni Freixes i Perich^{1,2}

¹ Kras, hidrologia experimental (www.kras.cat)

² Societat Catalana d'Hidrologia i Carst (www.kras.cat)

Resum

La carstificació en conglomerats té a Catalunya un dels seus àmbits de recerca més interessants i Montserrat ha estat considerat com l'exemple més paradigmàtic. La dissolució dels conglomerats carbonatats ha modelat un relleu superficial en agulles i canals. Actualment la hidrologia subterrània del massís té la seva expressió a la zona de surgències de Monistrol, a la base del massís. El carst antic ha estat estudiat a les coves de Les Arnes, el Xacó, Gran, Freda i Salnitre. S'han descrit els dipòsits sedimentaris i s'ha estudiat la petrografia dels espeleotemes. Les datacions es van realitzar amb el mètode de les sèries d'urani i van donar edats entre 135-145 ka per a la cova del Xacó, mentre que els espeleotemes de la Cova de les Arnes i del Salnitre van donar edats més enllà dels 660 ka, és a dir que els dipòsits sedimentaris i espeleotemes son de finals del Plistocè Mitjà o més antics.

Resumen

La karstificación en conglomerados tiene en Cataluña uno de sus ámbitos de investigación más interesantes y Montserrat ha sido considerado como el ejemplo más paradigmático. La disolución de los conglomerados carbonatados ha moldeado un relieve superficial en agujas y canales. Actualmente la hidrología subterránea del macizo tiene su expresión en la zona de surgencias de Monistrol, en la base del macizo. Se han descrito los depósitos sedimentarios y se ha estudiado la petrografía de los espeleotemas. Las dataciones se realizaron con el método de las series de uranio y dieron edades entre 135-145 ka para la cueva del Xacó, mientras que los espeleotemas de la Cueva de las Arnes y del Salnitre dieron edades más allá de los 660 ka, es decir que los depósitos sedimentarios y espeleotemas son de finales del Pleistoceno Medio o más antiguos.

Abstract

The karstification in conglomerates has in Catalonia one of its most interesting research areas and Montserrat has been considered as the most paradigmatic example. The dissolution of the carbonate conglomerates has shaped a superficial relief in needles and channels. Currently the subterranean hydrology of the massif has its expression in the Monistrol upwelling zone, at the base of the massif. Sedimentary deposits have been described and the petrography of speleothems has been studied. The dating was carried out using the uranium series method and gave ages between 135-145 ka for the Xacó cave, while the speleothems of the Cova De Les Arnes and Salnitre gave ages beyond 660 ka, that is to say that the sedimentary deposits and speleothems are from the late Middle Pleistocene or older.

Paraules clau: Montserrat, carst, conglomerats, hidrologia, fonts temporals, Mentiroses, cova del Salnitre, registre sedimentari, espeleotema.

Palabras clave: Montserrat, karst, conglomerados, hidrologia, fuentes temporales, Mentiroses, cueva del Salnitre, registro sedimentario, espeleotema.

Key words: Montserrat, karst, conglomerates, hidrology, temporary sources, Mentiroses, Salnitre cave, sedimentary record, speleothem.

MONTSERRAT I L'ORIGINALITAT DEL CARST CONGLOMERÀTIC.

Montserrat, per les seves característiques singulars és prou conegut. La seva posició com a relleu aïllat, d'uns 25 km² i de gran desnivell, el fan visible des de gran part de Catalunya, i fins i tot en dies clars i a la posta del sol, des de la Serra de Tramuntana de Mallorca. La seva localització, prop de Barcelona, ha estat un element clau per a que, des de molt antic, Montserrat hagi estat una fita en els itineraris de descoberta natural de Catalunya. La seva geologia, la composició del seu rocam, el paisatge interior d'agulles, cingleres i canals, la vegetació exuberant que la converteix en un punt de gran biodiversitat, les seves fonts en un entorn habitualment sec i les coves, han estat els punts d'interès de la muntanya (Fig. 1).

La visió dels naturalistes ha hagut de lluitar sovint contra una visió idealitzada de la muntanya, on era presentada com un jardí terrenal a l'alçada dels seus valors espirituals. Daniel Defoe, que va definir Montserrat com un bosc de pedra, l'any 1728, escriu:

«Però el que més em va fascinar, i que vaig observar en diverses ermites, van ser les cascades naturals del mateix element transparent, que en caure d'una roca a una altra, en aquell clima càlid, o més ben dit, calorós, no tan sols resultaven agradables i meravelloses a la vista, sinó refrescants per a la persona. Els rierols a què donaven origen atenuaven l'estrèpit de la caiguda per convertir-se en un agradable murmuri gràcies a la distància, els boscos i les roques veïnes, de manera que era impossible veure'ls o sentir-los sense quedar encisat». Però la circulació d'aigües superficials a Montserrat només es produeix durant i immediatament després de forts episodis de precipitacions i allò que és habitual és l'absència d'aigües corrents superficials i que els únics punts d'aigua siguin les fonts distribuïdes per tota la muntanya, la majoria de cabals molt petits, de raig o de goteig (Soler i Gironès, 2017). De les 114 fonts que hi ha al massís només una dotzena són fonts permanents o temporals amb un cert dinamisme. Les temporals son anomenades «mentiroses» i son sobreixidors en moments de gran descàrrega, quan les permanents no tenen

MONTSERRAT Y LA ORIGINALIDAD DEL KARST CONGLOMERÁTICO.

Montserrat, por sus características singulares es muy conocido. Su posición como relieve aislado, de unos 25 km² de extensión de afloramiento y de gran desnivel, lo hacen visible desde gran parte de Cataluña, e incluso en días claros y en la puesta del sol, desde la Sierra de Tramuntana de Mallorca. Su localización, cerca de Barcelona, ha sido un elemento clave para que, desde muy antiguo, Montserrat haya sido un hito en los itinerarios de descubrimiento natural de Cataluña. Su geología, la composición de su roca, el paisaje interior de agujas, acantilados y canales, la vegetación exuberante que la convierte en un punto de gran biodiversidad, sus manantiales en un entorno habitualmente seco y las cuevas, han

sido los puntos de interés de la montaña (Fig.1)

La visión de los naturalistas ha tenido que luchar a menudo contra una visión idealizada de la montaña, donde se presentaba como un jardín terrenal a la altura de sus valores espirituales. Daniel Defoe, que definió a Montserrat como un bosque de piedra, en 1728, escribe: *«Pero lo que más me fascinó, y que observé en varias ermitas, fueron las cascadas naturales del mismo elemento transparente, que al caer de una roca a otra, en ese clima cálido, o mejor dicho, caluroso, no sólo resultaban agradables y maravillosas a la vista, sino refrescantes para la persona. Los arroyos a los que daban origen atenuaban el estruendo de la caída para convertirse en un agradable susurro gracias a la distancia, los bosques y las rocas vecinas, por lo que era imposible*

prou capacitat d'evacuació. Son les fonts de més grans cabals però de funcionament molt curt en el temps.

Aquesta és una de les principals característiques del carst de Montserrat. Una altra és l'existència d'un carst antic, un paleocarst, que conserva galeries i cavitats verticals que hem de relacionar amb un carst anterior al modelat actual de la muntanya, que conté morfologies i un registre sedimentari dels temps geològics plio-quadernaris. La carstificació en conglomerats presenta unes característiques diferents al carst clàssic en roques calcàries, s'ha volgut fer de l'absència d'elements fonamentals del paisatge del carst clàssic en calcàries, com els camps de rascler o les dolines, un element característic del carst en conglomerats però aquests elements del carst superficial, com a exocarst, es poden donar també en altres espais conglomeràtics, el més proper és un petit aflorament de rascler de canals, meandres i perforacions cilíndriques, talment com el de Garraf, per exemple, als conglomerats de Picancel, propers a Berga, a la localitat de Sant Quirze del Pedret. Els rasclers en els conglomerats semblen estar lligats a una rudita el més homogènia possible, amb còdols de composició monogènica carbonatada, homomètrics, de mida preferentment petita, sense massa matriu, és a dir amb estructura suportada pels clasts. Per altra banda també s'ha discutit si les formes del relleu montserratí



Figura 1. Montserrat, visió general.

Figure 1. Montserrat big picture.

son un exocarst a gran escala i si aquest és el paisatge patró al que han de tendir tots els relleus en conglomerats. Les seves agulles formen un bosc de pedra, en el mateix sentit que Shilin a Xina, com va definir Montserrat Daniel Defoe? Tota discussió sobre el caràcter més o menys càrstic d'aquesta morfologia ha d'estar basada en el paper de la dissolució com a factor morfogenètic fonamental, cosa que els processos de formació de les canals i agulles a partir d'unes costes columnars semblen confirmar. L'interval entre les diàclasis verticals i l'absència de leptoclasses característiques de les calcàries i que la petrologia dels conglomerats no afavoreix, que apareguin les dolines i els camps de rasclers característics de l'espai carstificat clàssic. En tot cas cal tenir en compte un factor fonamental de tipus hidrològic, és a dir el tipus d'infiltració i la distribució

verlos o oírlos sin quedar hechizado». Pero la circulación de aguas superficiales en Montserrat sólo se produce durante e inmediatamente después de fuertes episodios de precipitaciones y lo habitual es la ausencia de aguas corrientes superficiales y que los únicos puntos de agua sean las fuentes distribuidas por toda la montaña, la mayoría de caudales muy pequeños, de chorro o de goteo (Soler i Gironès, 2017). De las 114 fuentes que hay en el macizo sólo una docena son fuentes permanentes o temporales con cierto dinamismo. Las temporales son llamadas «Mentirose» y son aliviaderos en momentos de gran descarga, cuando las permanentes no tienen suficiente capacidad de evacuación. Son los manantiales de mayores caudales pero de funcionamiento muy corto en el tiempo.

Ésta es una de las principales características del karst de Montserrat. Otra es la existencia de un karst antiguo, un paleokarst, que conserva galerías y cavidades verticales que debemos relacionar con un karst anterior al modelado actual de la montaña, que contiene morfologías y un registro sedimentario de los tiempos geológicos plio-quadernarios. La karstificación en conglomerados presenta unas características diferentes al karst clásico en rocas calcáreas. Se ha querido hacer de la ausencia de elementos fundamentales del paisaje del karst, como los campos de lapiaz o las dolinas, un elemento característico del karst en conglomerados. Pero estos elementos del karst superficial, como exokarst, se pueden dar también en otros espacios conglomeráticos, el más cercano es un pequeño afloramiento de lapiaz de canales, meandros y

Figura 1. Montserrat, visió general.



Figura 2. El relleu montserratí: Agulles i canals.

Figure 2. The relief of Montserrat: Needles (monoliths) and channels.

del potencial de carstificació en zones superficials o en profunditat. La infiltració lligada al sistema de diàclasi i la morfologia dels dren estudiats principalment a la cova del Salnitre suggereixen la translació en profunditat del potencial de carstificació. Cada massís en conglomerats té els seus condicionants propis, de tipus de litologia amb més o menys percentatge d'elements carbonatats, d'homogeneïtat estratigràfica o de presència de nivells intercalats impermeables, de fracturació, de relleu amb més o menys desnivell, etc. La majoria dels carsts en conglomerats de Catalunya són sistemes monaris en l'actualitat, encara que no podem obviar que en els moments de més activitat hidrològica, quan els relleus encara no estaven del tot individualitzats respecte els seu entorn immediat, normalment

fàcies distals en relació lateral amb el cos conglomeràtic més proximal, poguessin tenir unes conques d'alimentació binàries. L'únic exemple de carst conglomeràtic binari funcional és el de l'Espluga de Francolí on el relleu no està en els conglomerats sinó en una conca geodiversa on la xarxa superficial és captada pels conglomerats a la seva base amb punts d'infiltració concentrats en els tàlvegs. Montserrat, malgrat el seu desenvolupament morfològic, no és per tant el clímax cap on tendeixen tots els massissos conglomeràtics, encara que hi ha elements comuns, presents en un grau o en un altre en tots aquests àmbits geològics (Fig. 2).

GÈNESI I EVOLUCIÓ DEL CARST DE MONTSERRAT

El pas del riu Llobregat que limita els vessants septentrional del massís de Montserrat, a 1000 m per sota dels cims de Sant Jeroni, és fonamental per a entendre l'evolució del massís, la seva dissimetria i, des del punt de vista del carst, la progressiva disminució del potencial de carstificació, l'evolució del seu nivell de base i la localització actual dels nivells dels dispositius de surgència i el seu esglaonament.

La vall del Llobregat, una de les més grans conques internes drenant cap a la Mediterrània, es configura després de la crisi messiniana, que crea un profund nivell de base en el solc catalano-balear ara fa

Figura 2. El relieve montserratino: Agujas y canales.

perforaciones cilíndricas, como el de Garraf, por ejemplo, en los conglomerados de Picancel, cercanos a Berga, en la localidad de Sant Quirze del Pedret. Los lapiaz en los conglomerados parecen estar ligados a una rudita lo más homogénea posible, con cantos rodados de composición monogénica carbonatada, homométricos, de tamaño preferentemente pequeño, sin demasiada matriz, es decir con estructura soportada por los clastos. Por otra parte, también se ha discutido si las formas del relieve montserratino son un exokarst a gran escala y si éste es el paisaje patrón al que deben tender todos los relieves en conglomerados. ¿Sus agujas forman un bosque de piedra, en el mismo sentido que Shilin en China, cómo definió el paisaje de Montserrat Daniel Defoe? Toda discusión sobre el carácter más o menos kárstico de esta morfología debe estar basada en el

papel de la disolución como factor morfogenético fundamental, algo que los procesos de formación de las canales y agujas a partir de unas cuevas columnares parecen confirmar. El intervalo entre las diaclasa verticales y la ausencia de leptoclasas características de las calizas y que la petrología de los conglomerados no favorece, impide que aparezcan las dolinas y los campos de lapiaz característicos del espacio karstificado clásico. En cualquier caso hay que tener en cuenta un factor fundamental de tipo hidrológico, es decir, el tipo de infiltración y la distribución del potencial de karstificación en zonas superficiales o en profundidad. La infiltración lligada al sistema de diaclasa y la morfología de los drenes estudiados, principalmente en la cueva del Salnitre, sugieren la translación en profundidad del potencial de karstificación.

uns 6 milions d'anys. Durant el Pliocè hi ha una erosió remuntant que arriba a superar la serralada prelitoral i entra dins el que havia estat la conca endorreica de l'Ebre, obrint-la cap a la mar mediterrània. L'erosió, el buidatge, dels materials paleògens de l'actual conca del Bages i la configuració de la xarxa fluvial és un factor de primer ordre en l'aïllament del massís de Montserrat i en la creació d'un relleu per erosió diferencial. L'extensió de la xarxa fluvial remuntant té diverses etapes a partir de l'epigènesi i l'obsequència del seu pas per la serralada prelitoral i pels conglomerats del marge de la depressió de l'Ebre, que crea un cert efecte «engolidor» on convergeixen els diferents cursos que s'estenen en paral·lel a les directrius estratigràfiques, adaptant-se a un relleu en costes, que cabussa cap a l'interior de la conca. S'estableixen així dos tipus de cursos fluvials, el principal obseqüent que talla longitudinalment l'estructura i els secundaris, subseqüents, que penetren transversalment, seguint en paral·lel la direcció de capa general dels materials paleògens del reblliment de la conca. La individualització de Montserrat com a relleu-illa es produeix seguint aquesta evolució geomorfològica,

La carstificació, iniciada damunt els conglomerats, encara en contacte amb materials impermeables de la conca, va configurar un drenatge cap a l'extrem meridional del massís, alçat sobre la depressió prelitoral, que era en aquells moments el nivell

MUNTANYA DE MONTSERRAT
Situació dels fenòmens càrstics i unitats geològiques proposades per Anadón, Marzo i Puigdefabregas, 1985.
Perspectiva aèria des del SSE al NNO.

- UNITATS CONGLOMERÀTIQUES:**
1. Les Bruïses
 2. Pas de la Barra
 3. La Valentina
 4. Mullapans
 5. La Trona
 6. Sant Benet
 7. Santa Creu
 8. Sant Jordi

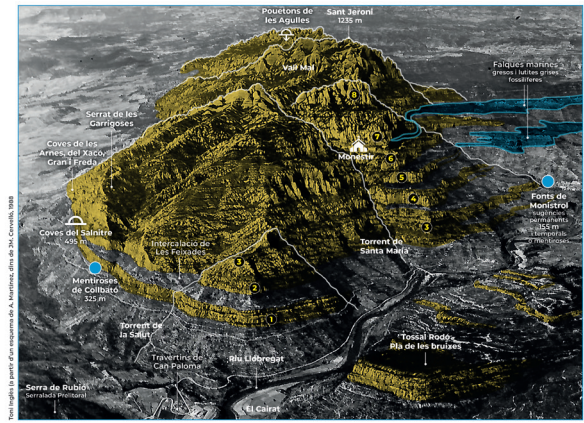


Figura 3. La disposició de les diferents unitats conglomeràtiques carbonatades que configuren el cos geològic de Montserrat i la seva evolució per l'erosió diferencial respecte els materials més distals del cono detrític (gresos i lutites) i dels marins (margues) de l'antiga costa de la Conca Paleògena de l'Ebre, fan emergir Montserrat com un relleu-illa, amb 1000 m de desnivell des dels cims a la vall del riu Llobregat. Aquest és el context de la carstificació actual i pretèrita, que explica la localització dels diferents fenòmens endocàrstics i les àrees de surgències, sempre en relació amb el nivell de base general del massís.

Figure 3. The arrangement of the diferent carbonated conglomerate units that make up the geological body of Montserrat and its evolution due to the differential erosion with respect to the more distal materials of the detrital fan (sands, silts and clays) and of the marine ones (marls) of the old coast of the Ebro Paleogene Basin, they make Montserrat emerge as an island-relief with a 1000 m difference in level from the peaks to the Llobregat valley. This is the context of corrent and past karstification, which explainis the location of the diferent endokarst phenomena and the areas of outcrops, always in relation to the general base level of the massif.

de base del massís. Els sectors de l'extrem nord-occidental (Agulles, Frares Encantats, Els Ecos) i la Vall Mal formaven part de la conca d'alimentació del sistema càrstic que tenia les surgències al peu de la muntanya a la zona de Collbató. El modelat en agulles i canals de les parts superiors del massís és l'expressió de l'exocarst corresponent, on dominava una dissolució preferent al sistema de diàclasis que genera les canals i

Cada macizo en conglomerados tiene sus condicionantes propios, de tipos de litología con mayor o menor porcentaje de elementos carbonatados, de homogeneidad estratigráfica o de presencia de niveles intercalados impermeables, de fracturación, de relieve con mayor o menor desnivel, etc. La mayoría de los karsts en conglomerados de Cataluña son sistemas monarios en la actualidad, aunque no podemos obviar que en el momento de mayor actividad hidrológica, cuando los relieves todavía no estaban del todo individualizados respecto a su entorno inmediato (normalmente facies distales en relación lateral con el cuerpo conglomerático más proximal), pudieran tener unas cuencas de alimentación binarias. El único ejemplo de karst conglomerático binario funcional es el de la Esluga de Francolí donde el relieve no está en los

conglomerados sino en una cuenca geodiversa donde la red superficial es captada por los conglomerados en su base con puntos de infiltración concentrados en los canales. Montserrat, a pesar de su desarrollo morfológico, no es por lo tanto el clímax hacia el que tienden todos los macizos conglomeráticos, aunque existen elementos comunes, presentes en un grado u otro en todos estos ámbitos geológicos (Fig. 2).

GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DEL KARST DE MONTSERRAT

El paso del río Llobregat que limita la vertiente septentrional del macizo de Montserrat, a 1000 m por debajo de las cimas de Sant Jeroni, es fundamental para entender la evolución del macizo, su disimetría y, desde el punto de vista del karst, la progresiva

Figura 3. La disposició de les diferents unitats conglomeràtiques carbonatades que configuren el cos geològic de Montserrat i la seva evolució per l'erosió diferencial respecte a los materiales más distales del cono detrític (areniscas y lutitas) y de los marinos (margas) de la antigua costa de la Cuenca Paleógena del Ebre, hacen emerger Montserrat con un relieve-ista, con 1000 m de desnivel desde las cimas hasta el valle del río Llobregat. Este es el contexto de la karstificación actual y pretèrita, que explica la localización de los diferentes fenomenos endocàrstics y las áreas de surgències, siempre en relación con el nivel de base general del macizo.



Figura 4. Font Gran de Monistrol, surgència permanent.

Figure 4. Font Gran de Monistrol, permanent spring.

fa evolucionar els modelat columnar cap a la formació de pinacles. Llopis & Thomas (1953) descriuen un primitiu relleu en taula que va anar evolucionant per dissolució cap als relleus de canals i agulles, la idea té una certa semblança amb el relleu actual del Montsant, però allà el primitiu relleu «tabular» ha estat transformat per la incisió dels cursos fluvials que flueixen cap el riu Montsant, instal·lat sobre mateix dels conglomerats. El progressiu aïllament del massís i la incisió de la vall del Llobregat en el sector nord-oriental, amb la captura de la vall Mal (Camps, 1968; Ullastre 1983), fa desconnectar els relleus més septentrionals, mentre que l'anterior carst saturat és abandonat i es creen estructures més profundes que ara drenen cap al nou

nivell de base a la zona de Monistrol on els conglomerats passen lateralment a les marges blaves de les falques marines. La disminució del potencial de carstificació fa que l'aquífer passi a ser un aquífer menys organitzat, més de tipus fissurat que no pas càrstic, mantenint però una connexió amb estructures càrstiques pretèrites esglaonades que entren en funcionament quan hi ha un ascens piezomètric en períodes de grans precipitacions, quan les fonts permanents no poden evacuar les crescudes sobtades de cabals i entren en funcionament, les fonts temporals o Mentiroses (Fig. 3).

LA HIDROLOGIA SUBTERRÀNIA I EL CARST A MONTSERRAT

Actualment la descàrrega hídrica subterrània de Montserrat està molt condicionada per la situació del riu Llobregat que limita amb el vessant est i nord-est del massís. En efecte, el riu Llobregat està encaixonat en els materials que constitueixen la depressió de Vacarisses, definint el límit occidental d'aquesta depressió amb el relleu de Montserrat. El riu Llobregat, pel seu paper de nivell de base general, influeix la circulació subterrània del massís i, particularment, la del seu vessant oriental i sud-oriental. Així, la descàrrega subterrània se situa principalment en aquest vessant: la riera de Marganell rep una part de la descàrrega subterrània, però, sobretot, s'ha d'assenyalar a l'extrem SE la

Figura 4. Font Gran de Monistrol, surgència permanent.

disminució del potencial de karstificació, la evolució de su nivel de base y la localización actual de los niveles de los dispositivos de surgencia y su escalonamiento.

El valle del Llobregat, una de las mayores cuencas internas drenante hacia el Mediterráneo, se configura después de la crisis mesiniana, que crea un profundo nivel de base en el surco catalano-balear hace unos 6 millones de años. Durante el Plioceno hay una erosión remontante que llega a superar la cordillera prelitoral y entra dentro de lo que había sido la cuenca endorreica del Ebro, abriéndola hacia el mar mediterráneo. La erosión, el vaciado de los materiales paleógenos de la actual cuenca del Bages y la configuración de la red fluvial es un factor de primer orden en el aislamiento del macizo de

Montserrat y en la creación de un relieve por erosión diferencial. La extensión de la red fluvial remontante tiene varias etapas a partir de la epigénesis y la obsecuencia de su paso por la cordillera prelitoral y por los conglomerados del margen de la depresión del Ebro, que crea un cierto efecto «sumidero» donde convergen los diferentes cursos que se extienden en paralelo a las directrices estratigráficas, adaptándose a un relieve en cuevas, con buzamiento hacia el interior de la cuenca. Se establecen así dos tipos de cursos fluviales, el principal obsecuente que corta longitudinalmente la estructura y los secundarios, subsecuentes, que penetran transversalmente, siguiendo en paralelo la dirección de capa general de los materiales paleógenos del relleno de la cuenca. La individualización de Montserrat como relieve-isla se produce siguiendo esta evolución geomorfológica,

Font Gran de Monistrol com a surgència permanent que desguassa a pocs metres del tàlveg del riu Llobregat i la font temporal de les Mentiroses, que constitueix el seu sobreixidor més important i immediat. La Font Gran ha tingut i té un paper important en el subministrament d'aigua potable a la població de Monistrol de Montserrat. (Galobart, 1994) (Fig. 4).

La Font Gran aporta un cabal màxim estimat de 150.000 l/h (41 l/s) i les Mentiroses de 270 l/s. El cabal de la Font Gran fou avaluat per Llopis & Thomas (1953) entre 25 l/h i 150.000 l/h, aquesta aportació hídrica és significativa en el context que es troba, però, en general, els cabals s'han de considerar com a poc importants; no obstant, tant el cabal de la Font Gran com el de les Mentiroses poden ser significativament més elevats en situació de forta crescuda: la Font Gran podria aportar de l'ordre de 100 l/s i les Mentiroses assolir els 500 l/s; algunes observacions de camp així ho indiquen. També és cert que la zona inundada no deu ser molt important, però tant els cabals com el reservori deuen ser els més notables de la circulació hídrica subterrània de Montserrat.

La Font Gran (170 m) i les Mentiroses (180 m) estan situades al torrent de les Guilleumes, que constitueix un forta incisió en la massa de conglomerats. Aquesta incisió, com Llopis & Thomas (1953) i Tella (1985) assenyalen, facilita la descàrrega dels diferents nivells de



Figura 5 (a, b, c). Mentiroses de Monistrol i de Coll de Vaca en crescuda

Figure 5 (a, b, c). Mentiroses of Monistrol and Coll de Vaca growing.

conglomerats i gresos que anirien de la Font Gran (170 m) el més baix, a la font del Janon (400 m) el situat a major altitud. Així el torrent de les Guilleumes presenta un conjunt de surgències que en situació de recàrrega observen una important resposta hidrològica

La karstificació, iniciada sobre los conglomerados, todavía en contacto con materiales impermeables de la cuenca, configuró un drenaje hacia el extremo meridional del macizo, alzado sobre la depresión prelitoral, que era en esos momentos el nivel de base del macizo. Los sectores del extremo noroccidental (Aguiles, Freres Encantats, Els Ecos) y el Vall Mal formaban parte de la cuenca de alimentación del sistema kárstico que tenía las surgencias al pie de la montaña en la zona de Collbató. El modelado en agujas y canales de las partes superiores del macizo es la expresión del exokarst correspondiente, donde dominaba una disolución preferente en el sistema de diaclasas que genera las canales y hace evolucionar el moldeado columnar hacia la formación de pináculos. Llopis y Thomas (Llopis Lladó & Thomas Casajuana, 1953) describen un primitivo relieve en

mesa que fue evolucionando por disolución hacia los relieves de canales y agujas, la idea tiene cierto parecido con el relieve actual de Montserrat, pero allí el primitivo relieve «tabular» ha sido transformado por la incisión de los cursos fluviales que fluyen hacia el río Montserrat, instalado sobre los mismos conglomerados. El progresivo aislamiento del macizo y la incisión del valle del Llobregat en el sector nororiental, con la captura del Vall Mal (Camps, 1968; Ullastre Martorell, 1983), hace desconectar los relieves más septentrionales, mientras que el anterior karst saturado es abandonado y se crean estructuras más profundas que ahora drenan hacia el nuevo nivel de base en la zona de Monistrol donde los conglomerados pasan lateralmente a las margas azules de las cuñas marinas. La disminución del potencial de karstificación hace que el acuífero

Figura 5 (a, b, c). Mentiroses de Monistrol y de Coll de Vaca en crecida.



Figura 6. Mentirosoes de Collbató.

Figure 6. Mentirosoes of Collbató.

(Font Gran-Mentirosoes, Capellà, Valentina, Fonteta, Graella, Dipòsit, Dipòsit Rodó, Coll de Vaca, Coll Subiró, Masia, Caseta, Pagès, Guilleumes i Janon), pràcticament totes elles estan situades en les proximitats del tàlveg del torrent de les Guilleumes (Fig. 5 a, b, c).

Les fonts de la Graella i les Guilleumes amb uns cabals màxims de 16 i 15 l/s respectivament són les més importants després de la font Gran i les Mentirosoes. I a excepció de les fonts de la Masia (cabal màxim: 9,2 l/s), Pagès (cabal màxim: 4,08 l/s), Capella (cabal màxim: 1,2 l/s) i Dipòsit Rodó (cabal màxim: 1,17 l/s), les restants tenen uns cabals mitjos inferiors a 1 l/s.

A més, aigua amunt del torrent de la Salut hi ha les Mentirosoes de Collbató (a 320 m s.n.m.) amb un cabal màxim d'uns 30 l/s.

La seva entrada en funcionament és més excepcional que el de les fonts temporals de Monistrol i les seves crescudes sempre son posteriors a les del binomi Font Gran-Mentirosoes i Coll de vaca. La relació amb aquestes surgències està en estudi (Fig. 6).

Les dades discretes que es disposa de la temperatura de les diferents surgències indiquen que hi ha respostes tèrmiques amb un cert efecte de descàrrega, així les aportacions hídriques subterrànies estarien en relació amb un cert reservori o zona inundada, és el cas de les fonts de les Guilleumes, Masia i Pagès i, contràriament, a la font de la Graella les respostes tèrmiques no observen efecte de descàrrega, és a dir, l'augment de cabal determina un disminució de la temperatura: indiquen una marcada incidència d'aigües d'infiltració ràpida de menor temperatura i l'absència d'un reservori de consideració. No obstant, s'hauria de disposar de noves dades de control en continu per confirmar les observacions realitzades (Tella, 1985; Freixes, 1986).

També es disposa de dades de la hidrogeoquímica de les diferents surgències del torrent de les Guilleumes. Es tracta d'aigües bicarbonatades càlciques de mineralització moderada. A continuació referirem les dades dels ions bicarbonat i calci de la font Gran i les Mentirosoes que són els que tenen més pes en la mineralització de l'aigua. La font Gran observa unes

Figura 6. Mentirosoes de Collbató.

pase a ser un acuífero menos organizado, más de tipo fisurado que kárstico, manteniendo sin embargo una conexión con estructuras kársticas pretéritas escalonadas que entran en funcionamiento cuando hay un ascenso piezométrico en períodos de grandes precipitaciones, cuando las fuentes permanentes no pueden evacuar las crecidas repentinas de caudales y entran en funcionamiento las fuentes temporales o Mentirosoas. (Fig. 3)

LA HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA Y EL KARST EN MONTSERRAT

Actualmente la descarga hídrica subterránea de Montserrat está muy condicionada por la situación del río Llobregat que limita con la vertiente este y noreste del macizo. En efecto, el río Llobregat

está encajonado en los materiales que constituyen la depresión de Vacarisses, definiendo el límite occidental de esta depresión con el relieve de Montserrat. El río Llobregat, por su papel de nivel de base general, condiciona la circulación subterránea del macizo y, particularmente, la de su vertiente oriental y sudoriental. Así, la descarga subterránea se sitúa principalmente en esta vertiente: la riera de Marganell recibe una parte de la descarga subterránea, pero, sobre todo, debe señalarse en el extremo SE la Font Gran de Monistrol como surgencia permanente que desagua a pocos metros de la vaguada del río Llobregat y la fuente temporal de las Mentirosoas, que constituye su aliviadero más importante e inmediato. La Font Gran ha tenido y tiene un papel importante en el suministro de agua potable a la población de Monistrol de Montserrat

concentracions mitjanes en HCO_3^- de 328,7 mg/l i en Ca^{2+} de 92,25 mg/l, mentre que les Mentiroses tenen unes concentracions mitjanes en HCO_3^- de 357,32 mg/l i en Ca^{2+} de 81,5 mg/l.

En algunes de les surgències l'estudi dels marcadors químics (HCO_3^- , Cl^- ,...) dels episodis de crescuda permet aproximar l'existència o no de reservoris més o menys importants, tal i com succeeix amb l'anàlisi dels esgotaments de les fonts de la Graella, Masia i Pagès que observen petits reservoris, (Tella, 1985) no obstant, és necessari un aprofundiment en l'estudi dels episodis de crescuda, particularment de la Font Gran i les Mentiroses pel seu interès i significació. Quan es tracta de surgències situades a la part superior de la conca de les Guilleumes (Janon, Guilleumes,...) els reservoris són temporals i d'escassa entitat.

També és necessari realitzar un estudi aprofundit del sistema calcocarbònic i en particular de la pCO_2 eq i de ΔpH , que complementi el coneixement de la mineralització i dels processos de dissolució.

Es interessant remarcar que el vessant occidental (i, en part, el meridional-occidental) de Montserrat és a favor de la macroestructura (cabussament general d'uns 5-10° cap el NO), no obstant, actualment la macroestructura no té un paper important, la influència més determinant en el control

de la circulació hídrica subterrània cap a l'est i nord-est l'introdueix el riu Llobregat: els nivells de base del carst actualment se situen a la vall del Llobregat.

En el potencial de carstificació pretèrit, i més si es demostra que la cova del Salnitre, constituïa una important surgència del vessant meridional-occidental, sí que hi podia haver influït la macroestructura, però l'evolució geomorfològica fluvial i la del carst haurien canviat la situació. Ara, en general, el flux subterrani observa el control del riu Llobregat. Altres cavitats situades a la part meridional-occidental o al vessant occidental del massís podrien constituir testimonis, anàlogament a la cova del Salnitre, de la circulació càrstica pretèrita situada a la part occidental i sud-occidental (Xacó, Gran, Freda,...).

Algunes característiques hidrodinàmiques de les manifestacions hidrològiques del torrent de les Guilleumes són comparables amb les observades al Carst Experimental de Rellinars: magnitud dels cabals de les surgència principal (font Gran) i dels sobreeixidors (Mentiroses) i una relativa importància del reservori (o reservoris). (Freixes A., 1986). Les dades i observacions de camp disponibles semblen indicar que la carstificació actual a Montserrat tingui un desenvolupament limitat, tal i com succeeix a Sant Llorenç i l'Obac. Les observacions de

(Galobart i Soler, 1994) (Fig. 4).

La Font Gran aporta un caudal màxim estimat de 150.000 l/h (41 l/s) y Les Mentiroses de 270 l/s. El caudal de la Font Gran fue evaluado por Llopis & Thomas (1953) entre 25 l/h y 150.000 l/h, esta aportación hídrica es significativa en el contexto que se encuentra, pero, en general, los caudales deben considerarse como poco importantes; sin embargo, tanto el caudal de la Font Gran como el de las Mentiroses pueden ser significativamente más elevados en situación de fuerte crecida: la Font Gran podría aportar del orden de 100 l/s y Les Mentiroses alcanzar los 500 l/s; algunas observaciones de campo así lo indican. También es cierto que la zona saturada no será muy importante, pero tanto los caudales como el reservorio serán los más notables

de la circulación hídrica subterránea de Montserrat.

La Font Gran (170 m) y Les Mentiroses (180 m) están situadas en el torrente de las Guilleumes, que constituye una fuerte incisión en la masa de conglomerados. Esta incisión, como Llopis & Thomas (1953) y Tella (1985) señalan, facilita la descarga de los diferentes niveles de conglomerados y areniscas que irían de la Font Gran (170 m) el más bajo, en la fuente del Janon (400 m) el situado a mayor altitud. Así el torrente de las Guilleumes presenta un conjunto de surgencias que en situación de recarga observan una importante respuesta hidrológica (Font Gran-Mentiroses, Capellà, Valentina, Fonteta, Graella, Dipòsit, Dipòsit Rodó, Coll de Vaca, Coll Subiró, Masía, Caseta, Pagès, Guilleumes y Janon), prácticamente todas ellas están situadas en las

recorregut (coves del Salnitre, de quasi 1 km d'extensió en planta) que contenen dins les seves galeries acumulacions importants de sediments detrítics i d'espeleotemes (Fig. 7).

EL REGISTRE SEDIMENTARI

Les característiques litològiques i paleohidrològiques comporten un trànsit de sòlids molt important en aquests sistemes càrstics en conglomerats, això fa que quan els sistemes perden funcionalitat i passen a ser aïllats, quedin retinguts al llarg dels conductes subterranis potents dipòsits sedimentaris, molt sovint granodecreixents, formant seqüències d'assecament, culminades per argiles de decantació i la deposició d'espeleotemes (Fig. 8).

Les coves del Xacó contenen un important dipòsit sedimentari que ocupa totalment fragments d'una galeria subterrània interceptada per l'erosió superficial del torrent de la Font Seca. Es poden observar dues seccions de sediments del mateix conducte, separades per la cinglera del vessant dret de l'estret torrent, una és transversal al conducte i l'altra i més complerta és longitudinal. El conjunt ofereix un perfil de sediments de més de 5 m de gruix, de color vermellós, heteromètric i granodecreixent. El dipòsit sedimentari del Xacó destaca pel seu caràcter detrític, molt diferent al d'altres cavitats properes i situades al mateix nivell



de la muntanya (especialment la cova de les Arnes) on dominen els nivells d'espeleotemes dins les seves estratigrafies, amb planxes de gruixos importants.

El rebliment està dividit en dos complexos detrítics separats per una cicatriu erosiva. L'inferior està constituït per rudites i sorres grolleres on la majoria de clasts, de mida no superior als 5 mm, són silícics, subarrodonits, amb poca matriu i molt cimentats. A l'eix del conducte s'observen estructures acanalades i una discordança erosiva. En els nivells més basals hi ha dues planxes estalagmítiques de poc gruix (2-5 cm) d'aspecte fibrós que se situen directament sobre una base irregular dels conglomerats inferiors, mentre que el seu cim és pla i seguit d'un nivell lutític-argilós.

Figura 8. Coves del Xacó. Rebliment sedimentari.

Figure 8. Xacó Cave. Sedimentary fill.

control en continuo para confirmar las observaciones realizadas (Tella, 1985; Freixes, 1986).

También se dispone de datos de la hidrogeoquímica de las diferentes surgencias del torrente de Les Guilleumes. Se trata de aguas bicarbonatadas cálcicas de mineralización moderada. A continuación referiremos los datos de los iones bicarbonato y calcio de la fuente Gran y Les Mentiroses que son los que tienen más peso en la mineralización del agua. La Font Gran observa unas concentraciones medias en HCO_3^- de 328,7 mg/l y en Ca^{2+} de 92,25 mg/l, mientras que Les Mentiroses tienen unas concentraciones medias en HCO_3^- de 357,32 mg/l y en Ca^{2+} de 81,5 mg/l.

En algunas de las surgencias el estudio de los marcadores químicos (HCO_3^- , Cl^- , ...) de los episodios

de crecida permite aproximar la existencia o no de reservorios más o menos importantes, tal y como sucede con el análisis de los agotamientos, sin embargo, es necesaria una profundización en el estudio de los episodios de crecida, particularmente de la Font Gran y Les Mentiroses por su interés y significación. Cuando se trata de surgencias situadas en la parte superior de la cuenca de las Guilleumes (Janon, Guilleumes, ...) los reservorios son temporales y de escasa entidad.

También es necesario realizar un estudio profundizado del sistema calcocarbónico y en particular de la pCO_2 eq y del ΔpH , que complementa el conocimiento de la mineralización y de los procesos de disolución.

Es interesante remarcar que la vertiente occidental (y, en parte, la meridional-occidental) de Montserrat

Figura 8. Cuevas del Xacó. Relleno sedimentario.

El nivell superior, pel damunt de la discordança erosiva, és més lutític i comença amb una alternança de sorres fines i llims amb estructures encreuades. Cap amunt la mida de gra disminueix fins a nivells de llims i argiles. Tot el conjunt està fortament cimentat.

El conjunt és una seqüència granodecreixent d'asseccament, amb un contacte erosiu entre la unitat més grollera inferior, amb paleocanals i una superior arenosa i lutítica culminada amb espeleotemes que fossilitzen totalment el conducte. Els espeleotemes superiors tenen un gruix d'uns 30 cm, són laminats una mica ondulats, amb textures columnars però domina una fàbrica més microcristal·lina.

La cova del Xacó va ser descrita per Llopis & Thomas (1953) com una cova fòssil reblerta de sediments que l'erosió del vessant fa que s'estenguin a l'aire lliure sota un sostre amb evidents senyals de dissolució sota pressió hidrostàtica. Llopis la defineix com un exemple de carst holofòssil de sedimentació al·lòctona (Llopis Lladó, 1953)

La naturalesa dels sediments indica el caràcter regressiu de les aportacions hídriques, realitzat en tres etapes separades per les discordances erosives i les planxes d'espeleotemes que hem d'assimilar a sols d'exudació dins la cavitat. La primera fase, amb el dipòsit de rudites revela una certa intensitat interrompuda per un període sec

durant el qual es va dipositar la primera planxa estalagmítica. Segueix un període de noves circulacions no tan intenses i acompanyades d'acanalaments a l'eix de la galeria. La sedimentació és de sorres fines interrompudes per la deposició de la segona planxa estalagmítica. La tercera fase és de més gran durada amb disminució progressiva de la intensitat fins el dipòsit per decantació de les argiles superiors cobertes finalment per l'espeleotema.

A la cova del Salnitre trobem dipòsits detrítics distribuïts, especialment, al llarg de les galeries baixes de la cavitat. Trobem nivells fluvials amb conglomerats i sorres i lacustres, amb llims i argiles que presenten laminació paral·lela. No hi ha cap punt on es pugui realitzar una columna estratigràfica completa, però l'associació dels diferents dipòsits amb l'evolució funcional de la cavitat i algunes datacions efectuades, ens permeten d'obtenir una columna ideal que ens dona la visió dels diferents episodis de funcionament interromputs per processos clàstics i formació d'espeleotemes, dins un esquema general granodecreixent d'una virtual seqüència d'asseccament (Fig. 9).

Aquest esquema, basat en les observacions pròpies i en les fases proposades per Llopis & Thomas (1953), permet una síntesi i l'ordenació dels diferents processos i dipòsits sedimentaris al llarg de la cavitat, especialment a les galeries inferiors. Els

está a favor de la macroestructura (buzamiento general de unos 5-10° hacia el NO), sin embargo, actualmente la macroestructura no tiene un papel importante, la influencia más determinante en el control de la circulación hídrica subterránea hacia el este y noreste la introduce el río Llobregat: los niveles de base del karst actualmente se sitúan en el valle del Llobregat.

En el potencial de karstificación pretérito, y más si se demuestra que la cueva del Salnitre, constituía una importante surgencia de la vertiente meridional-occidental, sí podía haber influido la macroestructura, pero la evolución geomorfológica fluvial y la del karst habrían cambiado la situación. Ahora, por lo general, el flujo subterráneo observa el control del río Llobregat. Otras cavidades situadas en la parte

meridional-occidental o en la vertiente occidental del macizo podrían constituir testigos, análogamente en la cueva del Salnitre, de la circulación kárstica pretérita situada en la parte occidental y suroccidental (cuevas Xacó, Gran, Freda,...).

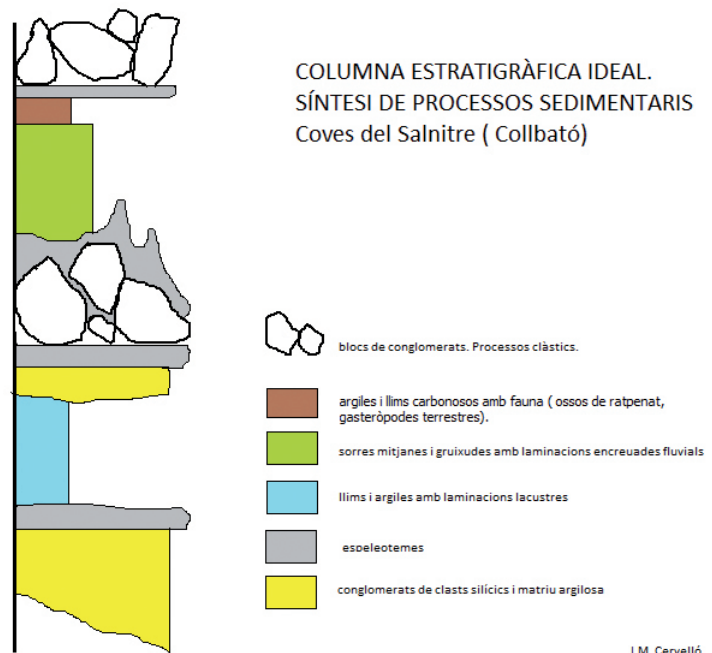
Algunas características hidrodinámicas de las manifestaciones hidrológicas del torrente de las Guilleumes son comparables con las observadas en el Karst Experimental de Rellinars: magnitud de los caudales de las surgencias principal (Font Gran) y de los *trop-pleins* (Mentiroses) y una relativa importancia del reservorio (o reservorios) (Freixes, 1986). Los datos y observaciones de campo disponibles parecen indicar que la karstificación actual en Montserrat tiene un desarrollo limitado, tal y como sucede en Sant Llorenç el Munt y Serra de l'Obac. Las

processos clàstics, el recobriment per espeleotemes i la seva posterior dissolució parcial per inundació marquen el final d'una fase de funcionament a la cavitat. Es d'aquest moment ja no trobarem materials de grava amb argiles i conglomerats que caracteritzen bona part de la columna inferior, especialment la terrassa del sectors Claustre dels Monjos, Cambril, La Campana i Ratpenats. Les sorres fluvials superiors marquen una fase fluvial dins els meandres inferiors de la cavitat i les laminacions lutítico-argiloses caracteritzen episodis lacustres. Els espeleotemes culminen en un cas i en l'altre les diferents fases de funcionament. Podríem definir diferents seqüències incompletes d'asseccament dins una columna estratigràfica general granodecreixent, en relació amb una dinàmica d'episodis de disminució d'energia i de pèrdua de potencial de carstificació, en passar d'un sistema termodinàmic obert a un d'aïllat.

ELS ESPELEOTEMES

La cova del Salnitre presenta al llarg de les seves galeries subterrànies i també en les proximitats dels seus accessos, actualment a l'aire lliure, una gran profusió d'espeleotemes.

Els espeleotemes poden estar intercalats en els dipòsits sedimentaris o formar edificis estalagmítics i recobrir el substrat rocós i els blocs clàstics. La varietat de formes és molt



gran: estalactites, estalagmites, columnes, banderes, planxes, colades, gours, fistuloses i coral·loides. A les parets dels conductes meandrífomes del pis inferior i a l'exterior, en la proximitat de l'entrada de la cova, trobem també nivells de calcita flotant, formada per plaquetes o rafts de calcita acumulades en forma d'«arbre de Nadal» o de «pasta fullada» marcant el nivell d'un paleo-llac. La calcita flotant també conté fragments d'estalactites fistuloses o macarrons (soda straw) caiguts del sostre. A les parets, fins a certa alçada, hi ha espeleotemes coral·loides, d'aerosol o esquitx, en forma de coliflors,

Figura 9. Columna estratigràfica ideal dels farcits sedimentaris de les Coves del Salnitre.

Figure 9. Ideal stratigraphic column of the sedimentary fillings of the Salnitre Caves.

observaciones de campo indican que la karstificación pretérita en Montserrat (cuevas del Salnitre, Xacó, Freda, Gran...) había sido significativamente más importante que la actual.

EL KARST ANTIGUO. EL CONJUNTO DE CAVIDADES DE COLLBATÓ

El endokarst, como paleokarst, está representado ampliamente en el macizo. En las partes más altas, cavidades con las simas, o Pouetons, estructuradas a partir de diaclasas (Pouetons de les Agulles, Pou de Costa Dreta, etc), o pequeñas cavidades subhorizontales en niveles que tienen como base intercalaciones impermeables de areniscas y lutitas rojas dentro de los conglomerados. Algunos canales son formas abiertas evolucionadas de antiguos

conductos endokársticos verticales de la zona de infiltración, como por ejemplo la canal del Xacó en el Serrat de les Garrigoses, muy cercana al sistema de cavidades de las cuevas Gran, Freda y Salnitre, con espeleotemas parietales de percolación (flowstones) al aire libre y a lo largo de su trazado, suspendidos a más de 100 m por encima de las galerías de las cuevas del Salnitre.

El conjunto de cavidades de Collbató, en el margen meridional de la montaña, marca un nivel de antiguas surgencias. Algunas de estas cavidades han quedado del todo fosilizadas por los sedimentos (cuevas del Xacó) y otras constituyen conductos con recorrido (cuevas del Salnitre, de casi 1 km de extensión en planta) que contienen dentro de sus galerías acumulaciones importantes de sedimentos

Figura 9. Columna estratigràfica ideal de los rellenos sedimentaris de las Caves del Salnitre.

on es pot distingir una «popcornline» que assenyalava una estratificació climàtica i higromètrica dins la cavitat.

A la cova del Salnitre els espeleotemes apareixen erosionats per l'acció de l'aigua que va transgredir els conductes i va dissoldre els espeleotemes d'episodis anteriors i l'encaixant rocós al mateix temps. Llopis & Thomas (1953) van veure en la intensitat d'aquesta erosió en la part orientada cap el sud, és a dir l'actual entrada a la cavitat, la prova que la circulació de les aigües era des de l'exterior cap a dintre, és a dir que el conjunt de cavitats del Salnitre eren engolidors i no surgències. Els autors no van tenir en compte que el corrent que va inundar els conductes era de règim turbillonar i que l'erosió no era per efectes mecànics pel fregament amb el corrent hídric, sinó per dissolució i que com en el cas de les empremtes de corrent (scallops) a les parets, el flux es bifurcava en arribar a l'obstacle de l'estalagmita i la dissolució es concentrava a contracorrent.

Algunes estalagmites per efecte de solifluxió estan esquerdades i algunes han estat trencades, inclinades o recolzades en altres i tornades a soldar.

També es pot observar una alteració química de la calcita per la formació de fosfats i una erosió derivada de la colonització de biofilms i vegetals provocada per la il·luminació elèctrica i l'efecte aerosol dels visitants, l'anomenada malaltia verda.

L'aparició de les mineralitzacions de fosfats és conseqüència del metabolisme dels rats penats que en diferents èpoques han format colònies nombroses dins la cavitat. La substitució mineral es fa a partir dels lixiviatos dels excrements dels ratpenats i s'hi troben tres tipus de mineralitzacions fosfatades: a) per reemplaçament de la calcita als espeleotemes, b) en forma de nòduls i nivells estratolligats de color blanc en els sediments argilosos i c) en filons o vetes per infiltració de fluids fosfatats en escletxes. Els fosfats dominants a les argiles vermelles són la francoanellita, i la leucofosfita, formant nivells estratiformes inòduls. El reemplaçament de la calcita dels espeleotemes produeix fosfats càlcics com l'apatita, la brushita o la monetita (Melgarejo, comunicació oral; Queralt i Creus & Riera Vilaró, 2000).

Pel que fa a la malaltia verda, pel fet que estés localitzada prop dels focus lluminosos que introduïen calor i llum amb espectre fotosintètic, va afectar especialment als massissos d'espeleotemes que es volien destacar. Primer es van estendre biofilms amb algues cianofícies (Roldán, 2008; Roldán et al., 2006) però la intensitat de la «lampenflora» va ser tal que van aparèixer briòfits (molses), espermatòfits (falgueres) amb rizomes i finalment algunes plantes vasculares (heures) amb sistemes radicals que van penetrar i van trencar l'estructura ja alterada dels espeleotemes i van disgregar

detrítics y de espeleotemas (Fig. 7)

EL REGISTRO SEDIMENTARIO

Las características litológicas y paleohidrológicas conllevan un tránsito de sólidos muy importante en estos sistemas kársticos en conglomerados, esto hace que cuando los sistemas pierden funcionalidad y pasan a ser aislados, queden retenidos a lo largo de los conductos subterráneos potentes depósitos sedimentarios, a menudo grano-decrecientes, formando secuencias de secado, culminadas por arcillas de decantación y la deposición de espeleotemas (Fig. 8).

Las cuevas del Xacó contienen un importante depósito sedimentario que ocupa totalmente los

fragmentos de una galería subterránea interceptada por la erosión superficial del torrente de la Font Seca. Se pueden observar dos secciones de sedimentos del mismo conducto, separadas por el margen vertical de la vertiente derecha del torrente, una es transversal al conducto y la otra y más completa es longitudinal. El conjunto ofrece un perfil de sedimentos de más de 5 m de espesor, de color rojizo, heterométrico y grano-decreciente. El depósito sedimentario del Xacó destaca por su carácter detrítico, muy diferente al de otras cavidades cercanas y situadas en el mismo nivel de la montaña (especialmente la cueva de las Arnes) donde dominan los niveles de espeleotemas dentro de sus estratigrafías, con planchas de espesores importantes.

El relleno está dividido en dos complejos detrítics

les làmines més superficials de cristalls columnars desprenent-los com una sorra de calcita.

PETROGRAFIA DELS ESPELEOTEMES

L'observació al microscopi òptic de les làmines primes de les diferents mostres obtingudes a les coves del Salnitre, Freda, Gran, Les Arnes i el Xacó va permetre distingir dos tipus principals d'estructures:

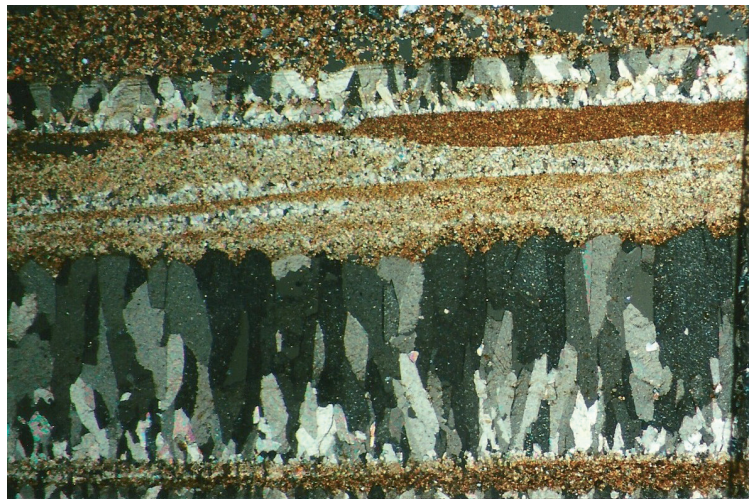
-Estructura laminada, amb làmines de 0,3 a 1 mm,. opaques i translúcides

-Estructura bandejada amb làmines de calcita de morfologia diferents, separades per contaminacions i microestrats argilosos

Distingim entre textura i fàbrica, mentre la fàbrica només es refereix a la morfologia dels cristalls individuals, la textura es refereix a l'agrupament d'orientacions cristal·logràfiques i dona elements d'anàlisi petrogràfica més interessants. Les més corrents son de tipus columnar, de cristalls elongats entre 0,3 i 1 mm. Quan els cristalls formen cristalls equant elongats amb puntes de creixement alineades perpendicularment a la superfície de la làmina, diem que és una textura en palissada (Figs. 10, 11a i 11b).

Trobem també altres textures microsparítiques amb porus i sacaroides amb grans cristalls.

Les contaminacions de l'estructura cristal·lina poden ser intercrystal·lines (que acompanyen les etapes de creixement) o intracrystal·lines



(a partir de dissolucions internes i formació de porus o buits intracrystal·lins).. No hem observats contaminacions orgàniques (pol·len, etc) però abunden les detrítiques (grans de quars, òxids...)

Quan l'estructura és laminada, hi ha làmines opaques de creixement ràpid, coalescents, i translúcides amb feble porositat.

En l'estructura bandejada, les làmines de calcita estan separades per contaminacions detrítiques, argiloses, discordances internes i dissolucions a les puntes de creixement que assenyalen pauses en el creixement cristal·li. Al microscopi catadoluminiscent, les làmines primes no presenten luminiscència en els cristalls primaris, em de suposar l'absència de mol·lècules orgàniques provinents de la vegetació de superfície.

Figura 10. Làmina prima. Mostra CS31. Estructura bandejada. Nivells columnars, detrítics i microcristal·lins.

Figure 10. CS31 Banded structure, Columnar, detrital and microcrystalline levels. Salnitre Caves.

separados por una cicatriz erosiva. El inferior está constituido por ruditas y arenas gruesas donde la mayoría de clastos, de tamaño no superior a 5 mm, son silíceos, sub-redondeados, con poca matriz y muy cementados. En el eje del conducto se observan estructuras acanaladas y una discordancia erosiva. En los niveles más basales existen dos planchas estalagmíticas de poco espesor (2-5 cm) de aspecto fibroso que se sitúan directamente sobre una base irregular de los conglomerados inferiores, mientras que su cumbre es plana y seguido de un nivel lutítico-arcilloso.

El nivel superior, por encima de la discordancia erosiva, es más lutítico y comienza con una alternancia de arenas finas y limos con estructuras cruzadas. Hacia arriba el tamaño de grano disminuye

hasta niveles de limos y arcillas. Todo el conjunto está fuertemente cementado.

El conjunto es una secuencia granodecreciente de desecación, con un contacto erosivo entre la unidad más grosera inferior, con paleocanales y una superior arenosa y lutítica culminada con espeleotemas que fosilizan totalmente el conducto. Los espeleotemas superiores tienen un grosor de unos 30 cm, son laminados, algo ondulados, con texturas columnares pero domina una fàbrica más microcristalina.

La cueva del Xacó fue descrita por Llopis y Thomas (Llopis Lladó & Thomas Casajuana, 1953) como una cueva fósil llena de sedimentos que la erosión de la vertiente hace que se extiendan al aire libre bajo un techo con evidentes señales de disolución bajo presión hidrostática. Llopis la define como un

Figura 10. Lámina delgada. Muestra CS31. Estructura bandeada. Niveles columnares, detríticos y microcristalinos.

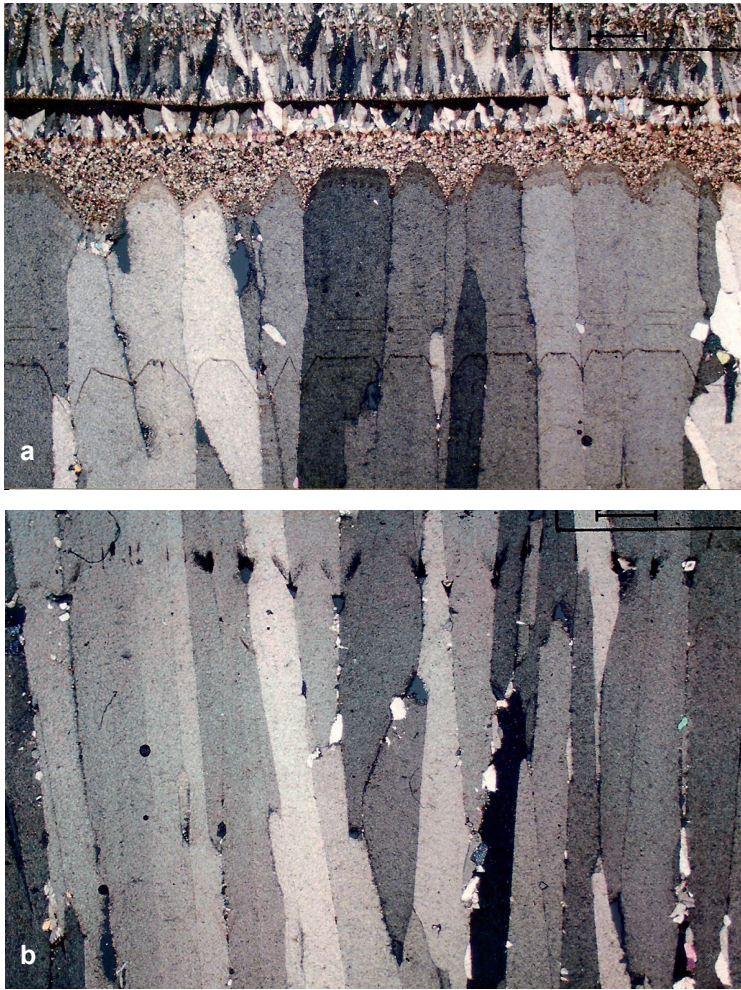


Figura 11. a) Làmina prima. Textura palissàdica. Cova de les Arnes CA12. b) Làmina prima. Mostra CA12. Detall dels cristalls columnars de creixement ràpid (*length-fast calcite*) en completa coalescència.

Figure 11. a) Palisade texture. Arnes Cave CA12. b) CA12. Detail of the length-fast calcite columnar crystals in complete coalescence.

Els espeleotemes tenen un gran interès des del punt de vista geocronològic i paleoambiental quan el sistema cristal·lí forma un sistema químic tancat, però en espeleotemes antics, amb una llarga evolució hi ha també fenòmens de diagènesi que mostren obertures del sistema cristal·lí. Quan això succeeix, cristalls elongats en continuïtat òptica substitueixen antigues textures en palissada de la qual queden els fantasmes de les seves línies serrades de creixement. També són visibles dissolucions en les crestes de les palissades i altres en les línies de coal·lescència dels cristalls columnars, amb formació de cristalls anhedrals o microcristal·lins que presenten luminiscència. La textura palissàdica presenta horitzons amb acumulació de cristalls equant de calcita i alguns microhoritzons de sediments formats per filosilicats i alguns grans de quars de la mida del llim. Per altra banda, també trobem fantasmes de creixement en ventall o botroidals que suggereixen cristallitzacions d'aragonita que han sofert diagènesi a calcita. Per tant no tot el que veiem al microscopi és contemporani ni es pot analitzar dins d'unes úniques condicions ambientals de cristallització i aquest fet condiona les possibilitats de datació de la mostra.

Figura 11. a) Lámina delgada. Textura empalizada. Cueva de les Arnes CA12. b) Lámina delgada. Muestra CA12. Detalle de los cristales columnares de crecimiento rápido (*length-fast calcite*) en completa coalescencia.

ejemplo de karst holofósil de sedimentación alóctona (Llopis Lladó, 1953)

La naturaleza de los sedimentos indica el carácter regresivo de las aportaciones hídricas, realizado en tres etapas separadas por las discordancias erosivas y las planchas de espeleotemas que debemos asimilar a suelos de exudación dentro de la cavidad. La primera fase, con el depósito de ruditas revela una cierta intensidad interrumpida por un período seco durante el cual se depositó la primera plancha estalagmítica. Sigue un período de nuevas circulaciones no tan intensas y acompañadas de acanalamientos en el eje de la galería. La sedimentación es de arenas finas interrumpidas por la deposición de la segunda plancha estalagmítica. La tercera fase es de mayor duración con disminución progresiva de la intensidad

hasta el depósito por decantación de las arcillas superiores cubiertas finalmente por el espeleotema.

En la cueva del Salnitre encontramos depósitos detríticos distribuidos, especialmente, a lo largo de las galerías inferiores de la cavidad. Encontramos niveles fluviales con conglomerados y arenas y lacustres, con limos y arcillas que presentan laminación paralela. No hay ningún punto en el que se pueda realizar una columna estratigráfica completa, pero la asociación de los diferentes depósitos con la evolución funcional de la cavidad y algunas dataciones efectuadas, nos permiten obtener una columna ideal que nos da la visión de los diferentes episodios de funcionamiento interrumpidos por procesos clásticos y formación de espeleotemas, dentro de un esquema general grandecreciente de una virtual secuencia de

DATACIONS PEL MÈTODE DE LES SÈRIES D'U/Th

Hem vist com la petrografia amb làmina prima caracteritza l'estructura i les textures dels espeleotemes, així com la presència de contaminacions, discordances i dissolucions internes. Ha estat la base per a establir els nivells calcítics que s'han mantingut com a sistemes tancats durant la llarga evolució dels espeleotemes antics i que son els més adequats per a fer datacions U/Th, ja que l'estructura bandejada i complexa dels espeleotemes de la cova de les Arnes i de les planxes pavimentàries de la cova del Salnitre pot contribuir a l'envelliment de les mostres si aquestes tenen contaminació de Th detrític.

L'edat d'aquests dipòsits ve determinada per la datació U/Th d'espeleotemes. Les datacions es van efectuar al Musée de l'Homme de Paris, amb la col.laboració de la Dra. Christianne Causse, investigadora del Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement del CNRS. Quan es van fer aquestes datacions les tècniques d'espectrometria de masses d'ionització tèrmica (TIMS) havien substituït en gran mesura els mètodes tradicionals de recompte de desintegració per mesurar els isòtops U i Th, donant com a resultat una millora de la precisió respecte l'espectrometria alfa de més d'un ordre de magnitud, així les datacions es van poder obtenir amb marges d'error de $\pm 2\sigma$.

Es va realitzar un mostreig en funció de la columna ideal interpretada a la cova del Salnitre. Totes les mostres van donar edats més antigues que les possibilitats del mètode. A la cova del Xacó es van datar els dos nivells inferiors, unes planxes estalagmítiques intercalades en el complex inferior detrític. A la cova de les Arnes es van prendre mostres dels espeleotemes que es van prendre com a referència de l'estructura bandejada amb textures columnars que caracteritzen bona part dels espeleotemes montserratins. Només les mostres de la cova del Xacó van poder ser datades en edats compreses entre 135 i 144 ka, tal i com es mostra a la següent taula (Taula I).

Taula I. Datacions d'espeleotemes a les coves del Xacó, de les Arnes i del Salnitre. La relació $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ és superior a 1 en el cas de CA1 i CS3, per tant la seva datació està més enllà de les possibilitats del mètode, és a dir >600 ka. Les mostres X4, X3, en canvi donen edats compreses entre els 135-144 ka.

Table I. Dating of speleothems in the Xacó, les Arnes and Salnitre caves. The $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ratio is greater than 1 in the case of CA1 and CS3, so their dating is beyond the possibilities of the method, i.e. >600 ka. Samples X4, X3, on the other hand, give ages between 135-144 ka.

Mostra	^{238}U ppb	^{232}Th ppb	$(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$	$(^{230}\text{Th}/^{234}\text{Th})$	$(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})$	Edat Ka
X4 $\pm 2\sigma$	163,212 0,838	7,295 0,034	1,064 0,045	0,743 0,033	53,996 0,734	144,3 +7,9/-7,2
X3 $\pm 2\sigma$	185,517 0,438	24,037 0,442	1,108 0,002	0,725 0,019	18,692 0,598	135,8 +3,7/-3,6
CA1 $\pm 2\sigma$	79,263 0,297	5,127 0,017	1,013 0,019	1,004 0,024	48,063 0,756	∞
CS3 $\pm 2\sigma$	107,266 0,324	21,231 0,095	1,008 0,015	1,059 0,039	16,484 0,562	∞

desecación (Fig. 9).

Este esquema, basado en las observaciones propias y en las fases propuestas por Llopis & Thomas (1953), permite una síntesis y la ordenación de los distintos procesos y depósitos sedimentarios a lo largo de la cavidad, especialmente en las galerías inferiores. Los procesos clásticos, el recubrimiento por espeleotemas y su posterior disolución parcial por inundación marcan el final de una fase de funcionamiento en la cavidad. Desde este momento ya no encontraremos materiales de gravas con arcillas y conglomerados que caracterizan a buena parte de la columna inferior, especialmente la terraza de los sectores Claustre dels Monjos, Cambriil, La Campana y Ratpenats. Las arenas fluviales superiores marcan una fase fluvial dentro de los meandros inferiores de la cavidad y las

laminaciones lutítico-arcillosas caracterizan episodios lacustres. Los espeleotemas culminan en uno y otro caso las diferentes fases de funcionamiento. Podríamos definir diferentes secuencias incompletas de desecación dentro de una columna estratigráfica general granodecreciente, en relación con una dinámica de episodios de disminución de energía y de pérdida de potencial de karstificación, al pasar de un sistema termodinámico abierto a uno aislado.

LOS ESPELEOTEMAS

La cueva del Salnitre presenta a lo largo de sus galerías subterráneas y también en las proximidades de sus accesos, actualmente al aire libre, una gran profusión de espeleotemas.

Tabla I. Dataciones de espeleotemas en las cuevas del Xacó, de les Arnes y del Salnitre. La relación $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ es superior a 1 en el caso de CA1 y CS3, por tanto su datación está más allá de las posibilidades del método, es decir >600 ka. Las muestras X4, X3, en cambio dan edades comprendidas entre los 135-144 ka.

Durant les últimes dècades, s'han produït més millores tècniques com a resultat d'un canvi dels mètodes TIMS a tècniques d'espectrometria de masses de plasma acoblat inductivament de múltiples col·lectors. Els estudis actuals estan realitzant un nou mostreig d'espeleotemes en la perspectiva d'aplicació d'aquestes tecnologies i de correlació amb altres mètodes de geocronologia absoluta en els sediments detrítics (termoluminiscència OSL), sempre amb la dificultat de tractar-se de sediments molt antics que poden situar-se en els límits o fora del marge d'aplicació del mètode.

La relació dels espeleotemes de la cova del Xacó amb els sediments fluvials indica que el manteniment d'activitat hidrològica continua en temps més recents que els que plantejava Llopis en els seus treballs.

Des del 144,3 (+7,9/-7,2) ka als 135,8 (+3,7/-3,6) ka, la cova del Xacó enregistra un procés de dessecació i la seva fossilització. L'espeleotema basal X4, una planxa de poc gruix, intercalada en processos fluvials, correspon a una època més freda i amb menys disposició ambiental de CO₂ que no pas l'espeleotema X3, més gruixut i que culmina la sèrie.

Els espeleotemes de la cova del Xacó es relacionen amb les etapes finals del MIS 6, inici de la millora climàtica que portarà al màxim climàtic plistocè del MIS 5e (5,5) (126 ka) i a l'inici del Plistocè Superior.

Es coneix una datació dels travertins de Can Paloma, al peu del massís, propers a la confluència del torrent de la Salut amb el riu Llobregat, i relacionats amb la terrassa alta (T4) a 85-95 m sobre el curs actual (Luque & Julià, 2007). Aquests travertins tenen un gruix d'uns 20 m, estan en correspondència lateral amb els sediments fluvials de la terrassa 4 i estan dipositats sobre les calcàries mesozoiques de la serralada prelitoral. La terrassa 4 (T4) s'atribueix al Plistocè Mitjà. L'edat radiomètrica dels travertins és de 350 ka, però caldria revisar-la ja que està en el límit del mètode d'espectrometria alfa. En tot cas, l'edat dels espeleotemes i del registre sedimentari de les coves del Salnitre és anterior al sistema de terrasses del Llobregat i més antiga del Plistocè Mitjà.

CONCLUSIONS

Montserrat ha estat considerat com l'exemple extrem i més paradigmàtic del massissos conglomeràtics que estan distribuïts al llarg del marge sud-oriental i septentrional de la conca central catalana o Depressió de l'Ebre i dels fronts dels encavalcaments dels Pirineus.

Les formes del relleu montserratí i la seva singularitat son conseqüència de la litologia, la complexitat estratigràfica de medis de transició que tenen nivells massius amb indentacions i canvis laterals i la fracturació.

Los espeleotemas pueden estar intercalados en los depósitos sedimentarios o formar edificios estalagmíticos y recubrir el sustrato rocoso y los bloques clásticos. La variedad de formas es muy grande: estalactitas, estalagmitas, columnas, banderas, planchas, coladas, gours, fistulosas y coraloides. En las paredes de los conductos meandriformes del piso inferior y en el exterior, en la proximidad de la entrada de la cueva, encontramos también niveles de calcita flotante, formada por plaquetas o rafts de calcita acumuladas en forma de «árbol de navidad» o de «hojaldre» marcando el nivel de un paleo-lago. La calcita flotante también contiene fragmentos de estalactitas fistulosas o macarrones (*soda straw*) caídos del techo. En las paredes, hasta cierta altura, hay espeleotemas coraloides, de aerosol o salpicadura, en forma de

coliflores, donde se puede distinguir una «popcorn line» que señala una estratificación climática e higrométrica dentro de la cavidad

En la cueva del Salnitre los espeleotemas aparecen erosionados por la acción del agua que transgredió los conductos y disolvió los espeleotemas de episodios anteriores y el encajante rocoso al mismo tiempo. Llopis & Thomas (1953) vieron en la intensidad de esta erosión en la parte orientada hacia el sur, es decir la actual entrada a la cavidad, la prueba de que la circulación de las aguas era desde el exterior hacia dentro, es a decir que el conjunto de cavidades del Salnitre eran sumideros y no surgencias. Los autores no tuvieron en cuenta que la corriente que inundó los conductos era de régimen turbillonar y que la erosión no era por efectos mecánicos por el rozamiento con

La carstificació és conseqüència de la naturalesa carbonatada dels components del conglomerat i del ciment que els uneix. Una homogeneïtat de la roca afavoreix la carstificació, mentre que els nivells més heteromètrics i poligènics hi posen més resistència.

El relleu d'agulles, costes i canals indica diferents fases d'un modelat per dissolució, son per tant formes d'un exocarst en relació a la infiltració concentrada a la xarxa de diàclasis i a l'evolució del potencial de carstificació.

Pels fonts a la muntanya son de petits cabals, només la Font Gran de Monistrol manté el seu dinamisme durant tot l'any. En crescudes es posen en funcionament fonts temporals esglaonades, anomenades «Mentiroso» i que treuen grans cabals en un període de resposta curt, sovint de dies.

Les dades i d'hidrogeotèrmia i les hidrogeoquímiques obtingudes en diferents surgències no donen una resposta clara a si hi ha un efecte de descàrrega en els episodis de crescuda, que evidenciaria l'existència d'un cert reservori o si domina una infiltració ràpida en absència de reserves. Caldria passar d'observacions discretes a registres en continu durant aquests events a les fonts mentiroso per a tenir més dades experimentals. El que sí que està clar és que el carst actual és poc important

respecte al carst antic que presentava una més gran organització com aquífer.

Hi ha un paleocarst de formes subterrànies heretades i amb un registre sedimentari detrític i d'espeleotemes antic. Els dipòsits sedimentaris tenen una tendència granodecreixent vinculada a una progressiva pèrdua de potencial de carstificació, des dels registres fluvials i lacustres fins a l'assecamment. Els espeleotemes son molt variats i ha estat afectats per dissolució per inundació dels conductes i reemplaçament químic per fosfats causat pels lixiviat del metabolisme de colònies de ratspenats

L'estructura dels espeleotemes és bandejada on alternen nivells de calcita de tipus columnar amb nivells detrítics i microcristal·lins. La textura dominant, pal·lissàdica conté contaminacions i dissolucions internes conseqüència d'una llarga evolució que en ocasions ha obert el sistema cristal·lí original.

La datació U/Th obtinguda en algunes mostres ha de ser objecte de noves revisions. Una part de les mostres de la cova del Salnitre ha donat edats més enllà de les possibilitats del mètode, mentre que les obtingudes a la cova del Xacó, relacionades amb el procés d'assecamment de la cavitat, estan relacionades amb un procés fluvial discontinu a finals de l'estadi isotòpic MIS 6, entre 135 i 145 ka.

la corriente hídrica, sino por disolución y que, como en el caso de las huellas de corriente (*scallops*) en las paredes, el flujo se bifurcaba al llegar al obstáculo de la estalagmita y la disolución se concentraba a contracorriente.

Algunas estalagmitas por efecto de soliflucción están agrietadas y algunas han sido rotas, inclinadas o apoyadas en otras y vueltas a soldar.

También puede observarse una alteración química de la calcita por la formación de fosfatos y una erosión derivada de la colonización de biofilms y vegetales provocada por la iluminación eléctrica y el efecto aerosol de los visitantes, la llamada enfermedad verde.

La aparición de las mineralizaciones de fosfatos es

consecuencia del metabolismo de los murciélagos que en diferentes épocas han formado colonias numerosas dentro de la cavidad. La sustitución mineral se realiza a partir de los lixiviados de las heces de los murciélagos y se encuentran tres tipos de mineralizaciones fosfatadas: a) por reemplazo de la calcita en los espeleotemas, b) en forma de nódulos y niveles estratoligados de color blanco en los sedimentos arcillosos c) en filones o vetas por infiltración de fluidos fosfatados en rendijas

Los fosfatos dominantes en las arcillas rojas son la francoanellita, y la leucofosfita, formando niveles estratiformes y nódulos. El reemplazo de la calcita de los espeleotemas produce fosfatos cálcicos como la apatita, la brushita o la monetita

(Melgarejo, comunicación oral; Queral; Creus &

Riera Vilaró, 2000).

En cuanto a la enfermedad verde, al estar localizada cerca de los focos luminosos que introducían calor y luz con espectro fotosintético, afectó especialmente a los macizos de espeleotemas que querían destacarse. Primero se extendieron biofilms con algas cianofíceas (Roldán, 2008; Roldán et al., 2006) pero la intensidad de la «lampenflora» fue tal que aparecieron briófitos (musgos), espermatofitos (helechos) y finalmente algunas plantas vasculares (hiedras) con sistemas radicales que penetraron y rompieron la estructura ya alterada de los espeleotemas y disgregaron las láminas más superficiales de cristales columnares, desprendiéndolos como una arena de calcita.

PETROGRAFÍA DE LOS ESPELEOTEMAS

La observación en el microscopio óptico de las láminas delgadas de las diferentes muestras obtenidas en las cuevas del Salnitre, Freda, Gran, Les Arnes y el Xacó permitió distinguir dos tipos principales de estructuras:

- Estructura laminada, con láminas de 0,3 a 1 mm, opacas y translúcidas
- Estructura bandeada con láminas de calcita de morfologías diferentes, separadas por contaminaciones y microestratos arcillosos

Distinguimos entre textura y fábrica, mientras que la fábrica sólo se refiere a la morfología de los cristales individuales, la textura se refiere al agrupamiento de orientaciones cristalográficas y da elementos de análisis petrográfico más interesantes. Las más corrientes son de tipo columnar, de cristales elongados entre 0,3 y 1 mm. Cuando los cristales forman cristales equant elongados con puntas de crecimiento alineadas perpendicularmente a la superficie de la lámina, decimos que es una textura en empalizada (Figs. 9, 10, 11). Se encuentran también otras texturas micro-esparíticas con poros y sacaroides con grandes cristales.

Las contaminaciones de la estructura cristalina pueden ser intercrystalinas (que acompañan a las etapas de crecimiento) o intracrystalinas (a partir de disoluciones internas y formación de poros o huecos intracrystalinos). No se han observado contaminaciones orgánicas (polen, etc) pero abundan las detríticas (granos de cuarzo, óxidos...)

Cuando la estructura es laminada, existen láminas opacas de crecimiento rápido, coalescentes, y translúcidas con débil porosidad. En la estructura bandeada, las láminas de calcita están separadas por contaminaciones detríticas, arcillosas, discordancias internas y disoluciones en las puntas de crecimiento que señalan pausas en el crecimiento cristalino. En el microscopio catadoluminiscente, las láminas delgadas no presentan luminiscencia en los cristales primarios, debemos suponer la ausencia de moléculas orgánicas provenientes de la vegetación de superficie.

Los espeleotemas tienen un gran interés desde el punto de vista geocronológico y paleoambiental cuando el sistema cristalino forma un sistema químico cerrado, pero en espeleotemas antiguos, con una larga evolución, existen también fenómenos de diagénesis que muestran aperturas del sistema cristalino. Cuando esto sucede, cristales elongados en continuidad óptica sustituyen antiguas texturas en empalizada de la que quedan los fantasmas de sus líneas en sierra de crecimiento. También son visibles disoluciones en las crestas de las empalizadas y otras en las líneas de coalescencia de los cristales columnares, con formación de cristales anhedrales o microcristalinos que presentan luminiscencia. La

textura en empalizada presenta horizontes con acumulación de cristales equant de calcita y algunos micro-horizontes de sedimentos formados por filosilicatos y algunos granos de cuarzo del tamaño del limo. Por otro lado, también encontramos fantasmas de crecimiento en abanico o botroidales que sugieren cristalizaciones de aragonito que han sufrido diagénesis a calcita. Por lo tanto no todo lo que vemos en el microscopio es contemporáneo ni se puede analizar dentro de unas únicas condiciones ambientales de cristalización y este hecho condiciona las posibilidades de datación de la muestra.

DATACIONES POR EL MÉTODO DE LAS SERIES DE U/Th

Hemos visto cómo la petrografía con lámina delgada caracteriza la estructura y las texturas de los espeleotemas, así como la presencia de contaminaciones, discordancias y disoluciones internas. Ha sido la base para establecer los niveles calcíticos que se han mantenido como sistemas cerrados durante la larga evolución de los espeleotemas antiguos y que son los más adecuados para realizar dataciones U/Th, ya que la estructura bandeada y compleja de los espeleotemas de la cueva de Les Arnes y de las planchas pavimentarias de la cueva del Salnitre puede contribuir al envejecimiento de las muestras si éstas tienen contaminación de Th detrítico.

La edad de estos depósitos viene determinada por la datación U/Th de espeleotemas. Las dataciones se efectuaron en el Musée de l'Homme de París, con la colaboración de la Dra Christianne Causse, investigadora del Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement del CNRS. Cuando se realizaron estas dataciones las técnicas de espectrometría de masas de ionización térmica (TIMS) habían sustituido en gran medida los métodos tradicionales de recuento de desintegración para medir los isótopos U y Th, dando como resultado una mejora de la precisión respecto a espectrometría alfa de más de un orden de magnitud, así las dataciones se pudieron obtener con márgenes de error de $\pm 2\sigma$.

Se realizó un muestreo en función de la columna ideal interpretada en la cueva del Salnitre, todas las muestras dieron edades más antiguas que las posibilidades del método. En la cueva del Xacó se dataron los dos niveles inferiores, unas planchas estalagmíticas intercaladas en el complejo detrítico inferior. En la cueva de les Arnes se tomaron muestras de los espeleotemas que marcaron la referencia de la estructura compleja bandeada con texturas columnares, que caracteriza buena parte de los espeleotemas montserratinos. Sólo las muestras de la cueva del Xacó pudieron ser datadas en edades comprendidas entre 135 y 144 ka, tal y como muestra la siguiente tabla (Tabla I):

Durante las últimas décadas, se han producido más mejoras técnicas como resultado de un cambio de los métodos TIMS a técnicas de espectrometría de masas de plasma ensamblado inductivamente de múltiples colectores. Los estudios actuales están realizando un nuevo muestreo de espeleotemas en la perspectiva de aplicación de estas tecnologías y de correlación con otros métodos de geocronología absoluta en los sedimentos detríticos (termoluminiscencia OSL), siempre con la dificultad de tratarse de sedimentos muy antiguos que pueden ubicarse en los límites, o fuera, del margen de aplicación del método.

La relación de los espeleotemas de la cueva del Xacó con los sedimentos fluviales indica que el mantenimiento de actividad hidrológica sigue en tiempos más recientes que los que planteaba Llopis en sus trabajos.

Desde el 144,3 (+7,9/-7,2) ka a los 135,8 (+3,7/-3,6) ka, la cueva del Xacó registra un proceso de desecación y su fosilización. El espeleotema basal X4, una plancha de poco grosor, intercalada en procesos fluviales, corresponde a una época más fría y con menos disposición ambiental de CO₂ que el espeleotema X3, más grueso y que culmina la serie.

Los espeleotemas de la cueva del Xacó se relacionan con las etapas finales del MIS 6, inicio de la mejora climática que llevará al máximo climático pleistoceno del MIS 5e (5,5) (126 ka) y al inicio del Pleistoceno Superior.

Hay una datación de los travertinos de Can Paloma, al pie del macizo, cercanos a la confluencia del torrente de la Salut con el río Llobregat, y relacionados con la terraza alta (T4) a 85-95 m sobre el curso actual (Luque & Juliá, 2007). Estos travertinos tienen un grosor de unos 20 m, están en correspondencia lateral con los sedimentos fluviales de la terraza 4 y están depositados sobre las calizas mesozoicas de la cordillera prelitoral. La terraza 4 (T4) se atribuye al Pleistoceno Medio. La edad radiométrica de los travertinos es de 350 ka, pero debería revisarse ya que está en el límite del método de espectrometría alfa. En cualquier caso, la edad de los espeleotemas y del registro sedimentario de las cuevas del Salnitre es anterior al sistema de terrazas del Llobregat y más antigua que el Pleistoceno Medio.

CONCLUSIONES

Montserrat ha sido considerado como el ejemplo extremo y más paradigmático de los macizos conglomeráticos que están distribuidos a lo largo del margen sudoriental y septentrional de la cuenca central catalana o Depresión del Ebro y de los frentes de los cabalgamientos de los Pirineos.

Las formas del relieve montserratin y su singularidad son consecuencia de la litología, la complejidad estratigráfica de medios de transición que tienen niveles masivos con indentaciones y cambios laterales y de la fracturación.

La karstificación es consecuencia de la naturaleza carbonatada de los componentes del conglomerado y del cemento que los une. Una homogeneidad de la roca favorece la karstificación, mientras que los niveles más heterométricos y poligénicos ponen mayor resistencia.

El relieve de agujas, cuevas y canales indica diferentes fases de un modelado por disolución, son por tanto formas de un exokarst en relación a la infiltración concentrada en la red de diaclasas y a la evolución del potencial de karstificación.

Las fuentes en la montaña tienen pequeños caudales irregulares, sólo la Font Gran de Monistrol mantiene su dinamismo durante todo el año. En crecidas se ponen en funcionamiento fuentes temporales escalonadas, llamadas «Mentiroses» y que sacan grandes caudales en un período de respuesta corto, a menudo de días.

Los datos de hidrogeotermia y de hidrogeoquímica obtenidos en diferentes surgencias no dan una respuesta clara a si existe un efecto de descarga en los episodios de crecida, que evidenciaría la existencia de un cierto reservorio, o si domina una infiltración rápida en ausencia de reservas. Sería preciso pasar de observaciones discretas a registros en continuo durante estos eventos en las fuentes Mentiroses para tener más datos experimentales. Lo que sí está claro es que el karst actual es poco importante respecto al karst antiguo, que presentaba una mayor organización como acuífero.

Existe un paleokarst de formas subterráneas heredadas y con un registro sedimentario detrítico y de espeleotemas antiguo. Los depósitos sedimentarios tienen una tendencia grano-decreciente vinculada a una progresiva pérdida de potencial de karstificación, desde los registros fluviales y lacustres hasta la desecación. Los espeleotemas son muy variados y han sido afectados por disolución durante la inundación de los conductos y también por reemplazo químico por fosfatos, causado por los lixiviados del metabolismo de colonias de murciélagos.

La estructura de los espeleotemas es laminada y bandeada donde alternan niveles de calcita de tipo columnar con niveles detríticos y microcristalinos. La textura dominante, en empalizada, contiene contaminaciones y disoluciones internas consecuencia de una larga evolución que en ocasiones ha abierto el sistema cristalino original.

La datación U/Th obtenida en algunas muestras debe ser objeto de nuevas revisiones. Una parte de las muestras de la cueva del Salnitre ha dado edades más allá de las posibilidades del método, mientras que las obtenidas en la cueva del Xacó están relacionadas con un proceso fluvial discontinuo a finales del estadio isotópico MIS 6, entre 135 y 145 ka.

BIBLIOGRAFÍA

- Camps, G. M. (1968). *Avencs de Montserrat i altres residus d'erosió càrstica amb algunes indicacions per a la seva localització*, Biblioteca del Monestir de Montserrat, Mecanoscrit inèdit.
- Carreras, A. (1964). *Hidrogeologia de Montserrat. L'avenc Ventós*. Cavernas, (2), 73-80.
- Cervelló, J.M. (1988). *Estudi de les possibilitats d'educació ambiental de la cova del Salnitre a Montserrat*. Servei Geològic de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- Cervelló, J.M. (2000). *Les coves del Salnitre (Collbató). Importància cultural, registre geològic i gestió sostenible del patrimoni*. II Jornades d'Estudi del Patrimoni del Baix Llobregat. Centre d'Estudis del Baix Llobregat. Molins de Rei.
- Cervelló, J.M. (2006). *Les coves del Salnitre i el Montserrat subterrani*. Muntanya, 864, 25-31.
- Cervelló J.M., & Freixes A. (1992). *El domini càrstic dels Països Catalans*. II Volum. Geologia II. Història Natural dels Països Catalans. Enciclopèdia Catalana, 461-513.
- Freixes, A. (1986). *El carst conglomeràtic experimental de Rellinars: un enfocament sistèmic i hidrogeològic en la recerca del medi càrstic*. Simpòsium Internacional sobre el Carst en Conglomerats i Gresos (1986). Servei Geològic de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques.
- Galobart i Soler, J. (1994). *La font Gran de Monistrol de Montserrat*. L'Aixernador Edicions, 144 p.
- Llopis Lladó N. (1953). *Karst holofossile et mérofosile*, I Congr. Intern. de Spéléologie, II, 1, 41-50.
- Llopis Lladó, N., & Masachs, V. (1943). *El problema de los conglomerados del borde meridional de la Depresión del Ebro*. Not. y Com. IGME, 11, 68-102.
- Llopis Lladó, N., & Thomas Casajuana, J.M. (1953). *Estudio hidrogeológico de la vertiente meridional de Montserrat (prov. de Barcelona)*. Speleon (IV), 3-4, 121-192.
- Luque, J., & Julià Brugués, R., (2007). *U/Th dating of Quaternary travertines at the middle River Llobregat (NE Iberian Peninsula, Northwestern Mediterranean). Correlation with sea-level changes*. Geologica Acta, 5 (1), 109-118.
- Monés, N., Salva, M., & Salvador Franch, F. (2014). *Caracterización microclimática de las «Cuevas del Salnitre» (Montserrat, Catalunya)*. Primeros resultados. Cuevatur. Primer Congreso Iberoamericano y Quinto Congreso Español sobre Cuevas Turísticas. In: Calaforra, J.M. y Durán, J.J (eds.) – Aracena. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, 205-214.
- Mor Benedito, J. (1973). *Estudio hidrogeológico de Montserrat*. III Simposium d'Espeleologia. Escola catalana d'Espeleologia, 32-52.
- Mor, J., & Gargallo, R. (1974). *Catàleg Espeleològic de Montserrat (Operació Montserrat -71)*. Recopilació dels treballs realitzats del 1971 al 1974. Speleon (III), 4, 137-146.
- Mor, J., & Gargallo, R. (1974). *Bibliografía espeleológica y geológica de Montserrat*. Addenda al Catàleg Espeleològic de Montserrat (Operació Montserrat-71). Speleon (III), 4, 138-147.
- Morales, J. I., Cebrià, A., Vergès J.M., Bañuls-Cardona, S., Cervelló, J.M., Josep M., Hernando, R., Lombao, D., Marín, J., Marsal, R., Oms, F.X., Rabuñal, J., Rodríguez-Hidalgo, A., Soto, M., & Rosas, A. (2022). *Palaeolithic archaeology in the conglomerate caves of north-eastern Iberia*. Antiquity - Cambridge, 96 (387), 710-718.
- Queralt i Creus, E., & Riera Vilaró, M. (2000). *Els fosfats a les coves del Salnitre (Collbató)*. Butll. Inst. Cat. Hist. Nat., 68, 15-25.
- Roldán Molina, M. (2008). *Caracterització de biofilms fototròfics d'ambients hipogeus*. Tesi presentada a la Facultat de Farmàcia Dept. de Productes Naturals, Biologia Vegetal i Edafologia. Universitat de Barcelona. 294 p.
- Roldán, M., García, M.J., Navarro, A., & Hernández, M. (2006). *Recovery of phototrophic biofilms after biocide treatment in the tourist caves 'Salnitre de Collbató' (Barcelona, Spain)*. The Heritage, Weathering and Conservation (HWC-2006) Conference. Conferencia, 21-24. Madrid.
- Soler i Gironès, J. (2017). *Fonts de Montserrat i indrets amb aigua*. Farell Editors. 112 p.
- Tella, J.M. (1985). *Estudi hidrogeològic de la zona de Monistrol de Montserrat*. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. Inèdit.
- Termes Anglès, F. (1952). *Catálogo espeleológico de los alrededores de Barcelona y catálogo espeleológico del macizo de Montserrat*. Speleon (III), 4, 183-190.
- Ullastre Martorell, J. (1983). *La morfología y el karst de los conglomerados de la Cordillera Prelitoral entre Montserrat y Gallifa (Barcelona)*. Speleon 26-27. CEC, 105-123.
- Ursul, J.I. (1886). *Estudi hidrològic de la muntanya de Montserrat: Obra premiada ab Accessit en lo Certamen obert per la Associació d'Excursions Catalana en 1er. d'agost de 1882, y publicada per acord y expensas de la meteixa*. Butlletí AEC VIII., Impr. dels Successors de N. Ramirez y Companyia, Barcelona. 54 p.