

DATAZIONI DI SPELEOTEMI CARBONATICI: IMPLICAZIONI SPELEOGENETICHE E PALEOCLIMATICHE NELL'AREA DI MONTE MAURO

VERONICA CHIARINI¹, ANDREA COLUMBU², JO DE WAELE³

Riassunto

Nell'ambito di un progetto riguardante l'approfondimento di fenomeni speleogenetici in aree evaporitiche dell'Appennino settentrionale sono stati campionati diversi speleotemi carbonatici nella zona di Monte Mauro, sia in alcune grotte, sia in superficie. Tali concrezioni si sono formate in ambiente sotterraneo grazie alla dissoluzione incongruente. Questo processo consiste nella precipitazione di carbonato di calcio, cui consegue un'ulteriore dissoluzione di gesso, provocata dal raggiungimento degli equilibri chimici relativi alla precipitazione della calcite in una soluzione satura di ioni calcio e solfato. Il processo è reso possibile dall'arricchimento della soluzione in ioni bicarbonato derivanti dall'anidride carbonica presente nel suolo presa in carico dalle acque di infiltrazione. La calcite, che in questi ambienti ipogei forma spesso colate decimetriche, può essere datata con il metodo dell'Uranio/Torio, fornendo indicazioni sull'età minima del vuoto in cui è cresciuta. I risultati delle datazioni dei campioni prelevati hanno permesso di individuare i periodi caldi del Pleistocene Medio-Olocene come i momenti di massima deposizione carbonatica. Il campione più antico, rinvenuto a quota 450 m s.l.m. come ciottolo alluvionale in un'antica ansa fluviale nei pressi della Grotta dei Banditi, ha un'età approssimativa di 580 mila anni. Tali risultati lasciano ipotizzare che le prime grotte nella Vena del Gesso si siano formate nella prima fase fredda precedente alla più antica concrezione trovata, ossia circa 640 mila anni fa, circa 200 mila anni dall'emersione definitiva dal mare (fine della deposizione delle Sabbie Gialle: circa 850 mila anni fa). Le grotte nei gessi dell'Emilia-Romagna si sono quindi potute formare mezzo milione di anni prima di quanto ritenuto in passato (i.e. ultimi 150 mila anni).

Parole chiave: calcite, datazioni, U/Th, speleogenesi, grotte nel gesso.

Abstract

In the framework of a project regarding the speleogenesis in the evaporite areas of the Northern Apennines, several carbonate speleothems have been sampled in the Mt. Mauro area (Vena del Gesso romagnola, Northern Italy), both in caves and at the surface. These speleothems formed in the gypsum caves because of the incongruent dissolution. This process consists in the precipitation of calcium carbonate, triggering further gypsum dissolution, caused by the chemical equilibria that cause calcite to form in a solution saturated in calcium and sulphate. This process is possible because of the enrichment of the solution in carbon dioxide coming from the above lying soils, and brought into the cave by infiltrating waters. Calcite often forms flowstone several decimetres thick, and these can be dated with the U/Th method, giving an idea of the minimum age of the voids in which they grew. The results of the dating of the samples have allowed to define the warm periods of the middle Pleistocene-Holocene during which the speleothems grew. The oldest speleothem, found at 450 m asl as an

¹ Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - vero.ch88@hotmail.it

² Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - andrea.columbu2@unibo.it

^{3,2} Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) / Istituto Italiano di Speleologia, Via Zamboni 67, 40126 Bologna (BO) - jo.dewaele@unibo.it

alluvial pebble in an abandoned meander close to the Banditi Cave, has an age of approximately 580 ka. These results confirm that the first caves in the Vena del Gesso area have formed in the cold period preceding the age of the oldest flowstone, thus around 640 ka ago, only about 200 ka after the entire region emerged from the sea (end of the deposition of the Sabbie Gialle Fm., ca 850 ka). The caves in Emilia-Romagna had thus the possibility to form half a million years earlier than previously thought (i.e. 150 ka ago).

Keywords: Calcite, Dating, U/Th, Speleogenesis, Gypsum Caves.

Introduzione

Negli ultimi quindici anni, lo studio del disequilibrio isotopico nella catena del decadimento dell'uranio in matrici carbonatiche è stato applicato con notevole successo ai depositi secondari di grotta (RICHARDS, DORALE 2003) per il calcolo dell'età assoluta degli speleotemi (DRYSDALE *et alii* 2012b).

L'uranio presente in soluzione nell'acqua di infiltrazione viene inglobato nel lattice cristal-

lino di stalagmiti, stalattiti e colate, ecc. e decade in ^{206}Pb con un tempo di dimezzamento di 320.000 anni. Il ^{230}Th , nuclide figlio del ^{234}U , è il termine intermedio di tale serie radioattiva, avente tempo di dimezzamento di 245.000 anni. Per tale motivo, il limite massimo delle datazioni U-Th è di circa 600.000 anni (HELLSTROM 2003). Il miglioramento delle tecnologie spettrometriche per le analisi dei rapporti $^{238-234}\text{U}/^{232-230}\text{Th}$ permette, al giorno d'oggi, le datazioni su un'esigua quantità di carbonato

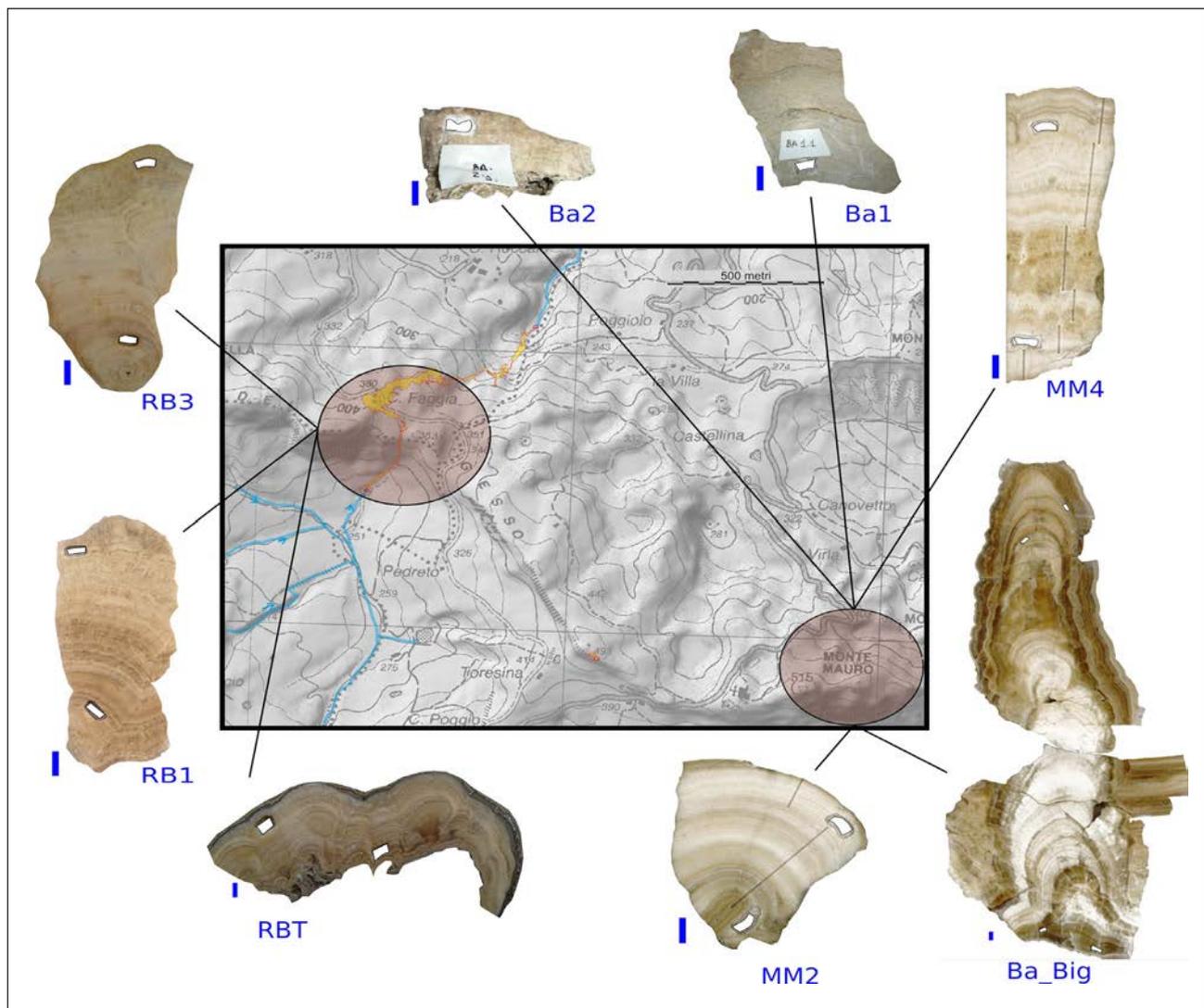


Fig. 1 – Area di studio e speleotemi analizzati. I rettangoli bianchi sugli speleotemi indicano la posizione dei subcampioni estratti per le analisi di U-Th. Le barre verticali corrispondono a 1 cm.

(<100 mg) (HELLSTROM 2006; DRYSDALE *et alii* 2012b).

Dopo aver tagliato e lucidato lo speleotema lungo l'asse di crescita, il carbonato di calcio necessario alla datazione viene prelevato dalle lamine di crescita degli stessi utilizzando un trapano da dentista (DRYSDALE *et alii* 2012a).

Un dato speleotema indica inconfutabilmente che: I) al tempo della sua formazione l'acqua percolante era sovrasatura rispetto al carbonato di calcio (CaCO_3); e II) la formazione della grotta è avvenuta precedentemente rispetto alla formazione dello speleotema (FORD, WILLIAMS 2007).

Nel caso in cui uno speleotema venga ritrovato in ambiente esterno, è verosimile che la grotta che lo ospitava sia stata smantellata nel tempo per opera di processi carsici sotterranei o superficiali (COLUMBU *et alii* 2017a). Nelle grotte formatesi nel gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la deposizione di CaCO_3 è chimicamente possibile per il fenomeno della dissoluzione incongruente (FORTI 1997; CALAFORRA *et alii* 2008). Il gesso è altamente solubile, e l'acqua di infiltrazione è costantemente satura in CaSO_4 (Ca^{2+} e SO_4^{2-} in soluzione ionica). Al contempo, la stessa acqua è ricca in ioni HCO_3^- e CO_3^{2-} per il passaggio nei livelli pedogenetici che, a loro volta, sono ricchi in CO_2 per la presenza della copertura vegetazionale. Questa soluzione, una volta in grotta, precipita in CaCO_3 (calcite) invece di $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gesso), perché la calcite è meno solubile del gesso. Ragionevolmente, la presenza di speleotemi carbonatici in grotte gessose indica anche che, durante la loro formazione, la vegetazione ricopriva i versanti esterni, producendo nei suoli elevate quantità di CO_2 .

Attualmente, nelle grotte in gesso della regione semidesertica di Sorbas (Spagna), la deposizione di carbonato di calcio è resa difficile anche a seguito delle scarse piogge, in quanto non esiste una copertura vegetale efficiente (CALAFORRA *et alii* 2008).

Al contrario, l'Emilia-Romagna è attualmente caratterizzata da un clima favorevole alla deposizione di calcite, condizione verificatasi anche in passato.

Negli ultimi cinque anni sono stati campionati numerosi speleotemi nelle grotte nei gessi dell'Emilia-Romagna (COLUMBU *et alii* 2017a), tra cui otto dall'area di Monte Mauro.

Questi campioni sono stati successivamente datati con il metodo del disequilibrio U/Th. I

risultati sono qui riportati e discussi per quanto riguarda le implicazioni speleogenetiche e paleoambientali.

Area di studio

Nell'area di studio sono presenti varie grotte di notevole interesse: tra esse meritano una citazione il Sistema Rio Stella-Rio Basino, l'Abisso Bentini (F10), il Sistema Colombaia-Pilastrino-SEMPAL, la Grotta dei Banditi, la piccola Grotta sotto Ca' Castellina e tante altre ancora. Non tutte queste grotte sono state oggetto di campionamento di speleotemi di calcite. In questo lavoro vengono riportate età radiometriche relative al Sistema Rio Stella-Rio Basino (160-170 m s.l.m.), alla Grotta dei Banditi (450 m s.l.m) e ad alcuni campioni che provengono dall'esterno: un ciottolo incluso in antiche alluvioni presenti in un'ansa fluviale abbandonata non lontano dalla Grotta dei Banditi e ubicato alla stessa quota e due frammenti di colata rinvenuti lungo le pendici boscate di Monte Mauro a quote comprese tra 480 e 490 m s.l.m.

Speleotemi e metodo di datazione

Per questo studio sono stati campionati otto speleotemi (fig. 1).

Nel sistema carsico Rio Stella-Rio Basino sono state rinvenute tre colate: RBT campionata in superficie a 160 m s.l.m., RB1 e RB3 campionate in grotta a 170 m s.l.m. È stata poi campionata una stalagmite (Ba_Big) all'interno della Grotta dei Banditi (450 m s.l.m.) e due colate (Ba1 e Ba2) all'esterno, in prossimità della stessa grotta. Altre due colate (MM2 e MM4) sono state campionate, sempre all'esterno, ma a quote più elevate rispetto alla Grotta dei Banditi (480-490 m s.l.m.).

Tutti gli speleotemi sono composti da calcite laminata (COLUMBU *et alii* 2017a).

Gli speleotemi sono stati sezionati lungo l'asse verticale utilizzando una sega circolare con lama da 2 mm; la superficie fresca è stata lucidata con abrasivo siliceo per evidenziare al meglio la tessitura carbonatica e scegliere gli *spot* migliori per l'estrazione dei sub-campioni da indirizzare alle analisi U-Th. I sub-campioni, ovvero prismi di calcite $\sim 0.5 \times 0.5 \times 0.3$ mm, sono stati estratti utilizzando un trapa-

Punto di prelievo	Sigla campione	Massa (g)	²³⁸ U (ng/g)	(²³⁰ Th/ ²³⁸ U) _A	2σ	(²³⁴ U/ ²³⁸ U) _A	2σ	(²³² Th/ ²³⁸ U) _A	2σ	(²³⁰ Th/ ²³² Th) _A	Età finale	2σ	% errore
Grotta risorgente del Rio Basino	RBT-b	0.049	1076	0.0588	0.0005	0.893	0.003	0.013927	0.000202	4	4.84	2.64	54.6
	RBT-t	0.052	1102	0.0432	0.0005	0.887	0.003	0.008033	0.000094	5	3.95	1.51	38.19
	RB3-b	0.050	511	0.0252	0.0005	0.937	0.003	0.004679	0.000060	5	2.15	0.83	38.36
	RB3-t	0.050	492	0.0089	0.0004	0.950	0.003	0.003228	0.000060	3	0.47	0.56	120.28
	RB1-b	0.034	569	0.0612	0.0013	0.935	0.002	0.011802	0.000275	5	5.29	2.11	39.83
	RB1-t	0.042	494	0.0282	0.0008	0.953	0.002	0.010104	0.000227	3	1.53	1.77	116.08
Monte Mauro (esterno)	MM2-b	0.039	731	0.9225	0.0042	0.981	0.003	0.019454	0.000541	47	316.17	12.65	4.00
	MM2-t	0.034	1367	0.8783	0.0031	0.990	0.003	0.001359	0.000028	646	239.98	4.46	1.86
	MM4 b	0.021	556	0.9782	0.0062	0.994	0.003	0.001776	0.000010	551	468.00	+130/-42	27.8/9.0
	MM4 t	0.023	393	0.9375	0.0060	0.995	0.003	0.002130	0.000009	440	313.44	14.27	4.55
Grotta dei Banditi	Ba 1.1	0.050	1071	0.9988	0.0051	0.998	0.004	0.111054	0.000331	9	> 580	-	/
	Ba 2.1	0.050	804	0.9569	0.0045	0.991	0.004	0.001508	0.000023	635	378.00	+29/-20	7.7/5.3
	Ba_Big_1	0.075	1837	0.6804	0.0026	0.976	0.004	0.000010	0.000000	69553	131.29	1.46	1.11
	Ba_Big_2	0.069	886	0.6776	0.0030	0.987	0.003	0.000011	0.000001	62589	127.07	1.40	1.10
	Ba_Big_3	0.066	706	0.6563	0.0029	0.990	0.003	0.000039	0.000001	16700	119.01	1.26	1.06
	Ba_Big_4	0.070	979	0.6363	0.0026	0.990	0.003	0.000462	0.000007	1377	112.36	1.09	0.97

Tab. 1 – Risultati delle datazioni U-Th. 2σ indica l'errore (±) relativo per i dati proposti. Le età e gli errori sono espressi in migliaia di anni (ka).

no manuale da dentista con punta di 1 mm di diametro. Tutti gli speleotemi, tranne Ba1 e Ba2, sono stati datati alla base e al tetto, per stabilire il periodo effettivo di crescita. Per i due campioni sopra citati i sub-campioni per le datazioni sono stati prelevati rispettivamente solo alla base (Ba1) e al tetto (Ba2). Questa scelta è dovuta al fatto che la tessitura degli speleotemi nelle vicinanze del tetto (Ba1) e della base (Ba2) non mostrava caratteristiche idonee per una corretta datazione. Per la stalagmite Ba_Big, spesso più di 50 cm, sono stati prelevati due ulteriori sub-campioni interposti fra la base e il tetto, per ottenere un vincolo cronologico più rigido.

La preparazione chimica dei sub-campioni è una condizione *sine qua non* per le datazioni U-Th. L'obiettivo è di estrarre dalla matrice carbonatica la frazione pura di uranio e torio da analizzare in seguito in spettrometria di massa. Per questo studio la preparazione dei sub-campioni e le loro analisi sono state effettuate all'Università di Melbourne (Australia), presso il dipartimento di Geografia e Geologia, seguendo un protocollo testato e implementato in questi laboratori (DRYSDALE *et alii* 2009; GREEN *et alii* 2013; COLUMBU *et alii* 2015; BAJO *et alii* 2016; COLUMBU *et alii* 2017b). I prismi di calcite (20-80 mg) vengono dapprima disciolti in HNO₃, poi equilibrati con una soluzione dove i rapporti ²³⁶U/ ²³³U/²²⁹Th sono

noti. La separazione di uranio e torio avviene tramite colonne di plastica alettica contenente resina a scambio ionico *Eichrom TRU-Spec*, attraverso risciacqui ciclici con HNO₃, HF e HCl. La frazione pura di U-Th, lasciata riposare per più di 12 ore a 80°C e diluita in HNO₃, è immessa nello spettrometro *Nu Plasma multi collector – inductively coupled plasma - mass spectrometer* (MC-ICP-MS) settato come descritto in HELLSTROM 2003 e DRYSDALE *et alii* 2012a. Per il calcolo delle età, i rapporti isotopici risultanti sono stati inseriti nell'equazione 1 di HELLSTROM 2006, usando le costanti di decadimento di uranio e torio di CHENG *et alii* 2013. Le età sono state corrette utilizzando un rapporto di attività iniziale del torio (²³⁰/²³²Th)_{Ai} di 1.5 ± 1.5.

Risultati

Tutti i sub-campioni hanno riportato un'ottima propensione alla datazione U-Th (tab. 1), grazie all'elevato contenuto medio di uranio (848 ng/g) che varia tra un minimo di 393 ng/g e un massimo di 1837 ng/g. Il rapporto di attività (²³⁰Th/²³²Th)_A è invece variabile fra i vari campioni: basso (<10) per quelli del sistema Stella-Basino e generalmente alto per quelli di Monte Mauro (>400), tranne che per MM2-b (43) e Ba1.1 (9). Questo rapporto è uno dei

principali fattori che controlla l'errore relativo per le età finali: un rapporto basso (= alto errore %) è dato da un'elevata abbondanza di torio detritico (^{232}Th) e/o una scarsa presenza di torio autigenico (^{230}Th , campioni giovani). Le età dei campioni e relative incertezze (2 σ e %), come pure i rapporti $^{238-234}\text{U}/^{232-230}\text{Th}$ e relative incertezze, sono riportati in tab. 1.

Discussione

Il primo dato importante desunto da questo studio è l'inaspettata età dei campioni provenienti da Monte Mauro. In particolare, al campione MM2 corrisponde un'età di 316.17 ± 12.65 ka alla base e di 239.98 ± 4.46 al tetto, MM4 presenta invece età di $468.00^{+130}/_{-42}$ ka e 313.44 ± 14.27 , mentre l'età al tetto di Ba2 risulta di $378.00^{+29}/_{-20}$ ka (tab. 1 e fig. 2). In aggiunta, la datazione eseguita alla base di Ba1 è vicina al limite del metodo U-Th (>580 ka). Ne deriva che in quest'areale protogrotte iniziano a formarsi prima di 580 ka. Per migliorare la precisione di questo dato e meglio comprendere il periodo di formazione delle prime grotte nei Gessi di Monte Mauro, e probabilmente, di tutte le cavità gessose emiliano-romagnole, sono necessarie alcune considerazioni:

1) come evidenziato da questo studio (fig. 2) e da precedenti lavori (COLUMBU *et alii* 2017a), gli speleotemi carbonatici si depositano prevalentemente durante i principali periodi climatici caldo-umidi. Oltre alle colate sopraindicate, formatesi durante gli stadi isotopici marini (MIS) 15 (Ba2), MIS 13-9 (MM4), MIS 9-7 (MM2), la stalagmite Ba_Big riporta un'età relativa al picco caldo-umido dell'ultimo interglaciale MIS 5 (131.29 ± 1.46 ka alla base e 112.36 ± 1.09 ka al tetto), mentre le età di tutti i campioni del sistema Rio Stella-Rio Basino sono correlabili all'Olocene (MIS 1), ovvero all'interglaciale attualmente in corso;

2) i livelli suborizzontali delle grotte epigenetiche di tutto il settore pedeappenninico risultano correlati altimetricamente con i depositi di terrazzo fluviale in superficie. Un buon esempio è il sistema del Re Tiberio a Monte Tondo, dove alle quote 170 e 220 m s.l.m. sono bene individuabili i terrazzi fluviali e i tunnel carsici (COLUMBU *et alii* 2015). I terrazzi fluviali costituiscono prove inoppugnabili delle variazioni di quota assunte dal corso d'acqua nel corso del tempo; nell'area appenninica, in-

fatti, la quota di scorrimento dei corsi d'acqua non è fissa nel tempo, poiché la regione è soggetta al sollevamento tettonico (innalzamento graduale delle montagne) che contribuisce alla formazione delle incisioni vallive. Parallelamente, la ciclica alternanza fra fasi climatiche glaciali e interglaciali innesca altresì l'oscillazione del livello di base locale. Considerando che le grotte nei gessi dell'Emilia-Romagna sono prevalentemente classiche condotte suborizzontali che convogliano l'acqua dall'inghiottitoio alla risorgente (KLIMCHOUK *et alii* 2000) e che le risorgenti si trovano solitamente alla stessa quota del livello di base locale, ne consegue che terrazzi fluviali e grotte si sono formati contemporaneamente. Se si considera quindi che i terrazzi fluviali dell'area pedeappenninica sono stati depositati durante fasi climatiche freddo-umide del tardo Quaternario (CYR, GRANGER 2008; PICOTTI, PAZZAGLIA 2008; WEGMANN, PAZZAGLIA 2009) (fig. 2), ne deriva che le grotte epigenetiche emiliano-romagnole (in particolare quelle dell'area di Monte Mauro) possano essere state scavate durante periodi climatici relativamente freddi e secchi;

3) gli strati gessosi che ora ospitano le grotte sotto esame erano originariamente ricoperti da sedimenti marini più o meno profondi. I primi fanno parte della Formazione delle Argille Azzurre, mentre i secondi della Formazione delle Sabbie Gialle (ANTONIAZZI *et alii* 1993; AMOROSI *et alii* 1998), entrambe affioranti nel settore pedeappenninico. La serie deposizionale marina, ovvero il tetto delle Sabbie Gialle, termina con la definitiva regressione del Mare Adriatico circa 820.000 anni fa (fig. 2) (ANTONIAZZI *et alii* 1993; MUTTONI *et alii* 2011). Considerando che le grotte epigenetiche si formano esclusivamente in ambiente continentale superficiale si può concludere che 820 ka marca l'età massima per la loro formazione; inoltre, affinché la speleogenesi possa aver avuto luogo, i sedimenti che ricoprivano i gessi dovevano essere già stati rimossi, portando la vena gessosa alla sua attuale morfologia.

Da quanto esposto sopra, risulta che gli speleotemi nelle grotte dell'area di Monte Mauro si sono depositati durante climi caldo-umidi, mentre le stesse grotte, formatesi precedentemente al concrezionamento, sono state scavate durante climi freddi-secchi. Alla luce di queste considerazioni, e adottando un approccio con-

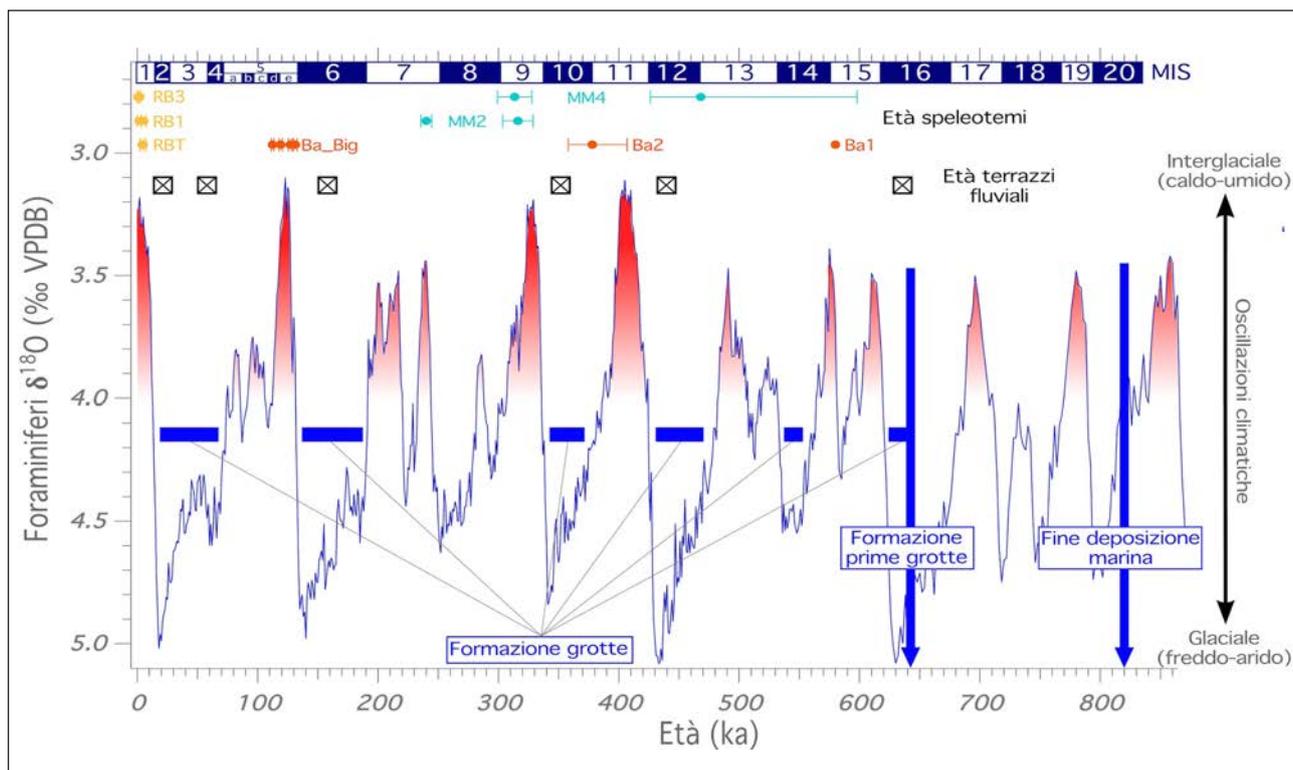


Fig. 2 – Età, speleotemi e variazioni climatiche nel corso degli ultimi ~800 ka. L'età degli speleotemi (pallini colorati e barra d'errore) è correlata a picchi climatici caldo-umidi (sfumature rosse), secondo la curva paleoclimatica globale prodotta da sedimenti oceanici (LISIECKI, RAYMO 2005). Le grotte si formano durante climi relativamente freddi e secchi, in corrispondenza della deposizione dei terrazzi fluviali in superficie. La loro età è stata assegnata al primo stage freddo-secco immediatamente precedente al periodo caldo-umido relativo alla deposizione speleotemica.

servativo, è quindi possibile assegnare l'età di formazione delle grotte al primo periodo freddo-secco immediatamente precedente al periodo caldo-umido relativo alla deposizione degli speleotemi carbonatici (fig. 2).

Le grotte del sistema Rio Stella-Rio Basino (alcune delle quali già smantellate) si sono quindi formate tra 20 e 70 ka, mentre la Grotta dei Banditi, situata a 450 m s.l.m., risale ad almeno 140-190 ka.

A quote superiori rispetto alla Grotta dei Banditi esistevano altri livelli formati almeno 340-370 ka, 430-470 ka e 540-550 ka. In assoluto, secondo questi dati, le prime grotte nei Gessi di Monte Mauro iniziarono a formarsi nello stadio MIS 16, quindi ~640 ka. Se ne deduce che dalla terminazione della deposizione marina alla primissima fase di speleogenesi siano trascorsi almeno 180 ka (fig. 2). Questo lasso temporale appare sufficientemente lungo per l'organizzazione del reticolo idrografico sviluppatosi di pari passo al ritiro del Mare Adriatico, ovvero la rete di proto-drenaggio superficiale che nel tempo si è evoluta in vere e proprie valli, portando alla rimozione di

gran parte dei sedimenti marini che originariamente ricoprivano la successione gessosa (COLUMBU *et alii* 2017a). L'evoluzione idrica superficiale è infatti di primaria importanza per il conseguente drenaggio sotterraneo sia per la formazione di gradienti idrici altitudinali che innescano il movimento gravitazionale dell'acqua e sia per il convogliamento dell'acqua verso punti di raccolta specifici che, per ragioni idriche, geologiche e geomorfologiche, diventeranno gli inghiottitoi dei futuri sistemi carsici.

Conclusioni

Le datazioni U-Th eseguite su otto speleotemi provenienti dall'area di Monte Mauro, inserite nel contesto geologico e climatico tardo Quaternario pedepenninico, hanno permesso di comprendere che le protogrotte in quest'area iniziarono a formarsi almeno 640.000 anni fa. Questo studio riporta un notevole avanzamento dello stato di conoscenza dei processi idrogeologici sotterranei

emiliano-romagnoli, considerando che l'età delle grotte nei gessi è stata sottostimata in passato (DEMARIA 2002; FORTI 2003; PASINI 2012), in quanto a lungo attribuita agli ultimi 150.000 anni.

Bibliografia

- A. AMOROSI, L. CAPORALE, U. CIBIN, M. COLALONGO, G. PASINI, F. RICCI LUCCHI, P. SEVERI, S. VAIANI 1998, *The Pleistocene littoral deposits (Imola Sands) of the northern Apennines foothills*, "Giornale di Geologia" 60, 83, pp. 83-118.
- A. ANTONIAZZI, M. FERRARI, C. PERETTO 1993, *Il giacimento di Ca' Belvedere di Monte Poggiolo del Pleistocene inferiore con industria litica (Forlì)*, "Bullettino di Paleontologia italiana" 84, pp. 1-56.
- P. BAJO, J. HELLSTROM, S. FRISIA, R. DRYSDALE, J. BLACK, J. WOODHEAD, A. BORSATO, G. ZANCHETTA, M.W. WALLACE, E. REGATTIERI 2016, "Cryptic" diagenesis and its implications for speleothem geochronologies, "Quaternary Science Reviews" 148, pp. 17-28.
- J.M. CALAFORRA, P. FORTI, A. FERNANDEZ-CORTES 2008, *Speleothems in gypsum caves and their paleoclimatological significance*, "Environmental Geology" 53, 5, pp. 1099-1105.
- H. CHENG, R. LAWRENCE EDWARDS, C.C. SHEN, V.J. POLYAK, Y. ASMEROM, J. WOODHEAD, J. HELLSTROM, Y. WANG, X. KONG, C. SPÖTL, X. WANG, E. CALVIN ALEXANDER 2013, *Improvements in 230Th dating, 230Th and 234U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry*, "Earth and Planetary Science Letters" 371-372, pp. 82-91.
- A. COLUMBU, J. DE WAELE, P. FORTI, P. MONTAGNA, V. PICOTTI, E. PONS-BRANCHU, J. HELLSTROM, P. BAJO, R. DRYSDALE 2015, *Gypsum caves as indicators of climate-driven river incision and aggradation in a rapidly uplifting region*, "Geology" 43, 6, pp. 539-542.
- A. COLUMBU, V. CHIARINI, J. DE WAELE, R. DRYSDALE, J. WOODHEAD, J. HELLSTROM, P. FORTI 2017a, *Late quaternary speleogenesis and landscape evolution in the northern Apennine evaporite areas*, "Earth Surface Processes and Landforms" 42, 10, pp. 1447-1459.
- A. COLUMBU, R. DRYSDALE, E. CAPRON, J. WOODHEAD, J. DE WAELE, L. SANNA, J. HELLSTROM, P. BAJO 2017b, *Early last glacial intra-interstadial climate variability recorded in a Sardinian speleothem*, "Quaternary Science Reviews" 169, pp. 391-397.
- A.J. CYR, D.E. GRANGER 2008, *Dynamic equilibrium among erosion, river incision, and coastal uplift in the northern and central Apennines, Italy*, "Geology" 36, 2, pp. 103-106.
- D. DEMARIA 2003, *Emilia Romagna*, in G. MADONIA, P. FORTI (a cura di), *Le aree carsiche gessose d'Italia*, (Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, vol. XIV), Bologna, pp. 159-184.
- R. DRYSDALE, J.C. HELLSTROM, G. ZANCHETTA, A.E. FALICK, M.F. SANCHEZ GONI, I. COUCHOUD, J. McDONALD, R. MAAS, G. LOHMANN, I. ISOLA 2009, *Evidence for obliquity forcing of glacial Termination II*, "Science" 325, 5947, pp. 1527-1531.
- R. DRYSDALE, B.T. PAUL, J.C. HELLSTROM, I. COUCHOUD, A. GREIG, P. BAJO, G. ZANCHETTA, I. ISOLA, C. SPÖTL, I. BANESCHI, E. REGATTIERI, J.D. WOODHEAD 2012a, *Precise microsampling of poorly laminated speleothems for U-series dating*, "Quaternary Geochronology" 14, pp. 38-47.
- R. DRYSDALE, C. SPÖTL, J.C. HELLSTROM, D.A. RICHARDS 2012b, *New advances in the dating of speleothems - An introduction*, "Quaternary Geochronology" 14, pp. 1-4.
- D. FORD, P. WILLIAMS 2007, *Karst geomorphology and hydrology*, Chichester.
- P. FORTI 1997, *Speleothems in gypsum caves*, "International Journal of Speleology" 25, pp. 91-104.
- P. FORTI 2003, *I sistemi carsici*, in A. BIANCOTTI, M. MOTTA (a cura di) *Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali*, Genova, pp. 246-251.
- H. GREEN, J. WOODHEAD, J. HELLSTROM, R. PICKERING, R. DRYSDALE 2013, *Re-analysis of key evidence in the case for a hemispherically synchronous response to the Younger Dryas climatic event*, "Journal of Quaternary Science" 28, 1, pp. 8-12.

- K.L. GUNDERSON, F.J. PAZZAGLIA, V. PICOTTI, D.A. ANASTASIO, K.P. KODAMA, T. RITTENOUR, K.F. FRANKEL, A. PONZA, C. BERTI, A. NEGRI 2014, *Unraveling tectonic and climatic controls on synorogenic growth strata (Northern Apennines, Italy)*, "Geological Society of America Bulletin" 126, 3-4, pp. 532-552.
- J. HELLSTROM 2003, *Rapid and accurate U/Th dating using parallel ion-counting multi-collector ICP-MS*, "Journal of Analytical Atomic Spectrometry" 18, pp. 1346-1351.
- J. HELLSTROM 2006, *U-Th dating of speleothems with high initial ^{230}Th using stratigraphical constraint*, "Quaternary Geochronology" 1, 4, pp. 289-295.
- A.B. KLIMCHOUK, D. FORD, A.N. PALMER, W. DREYBRODT 2000, *Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers*, Huntsville (Alabama, USA).
- L.E. LISIECKI, M.E. RAYMO 2005, *A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records*, "Paleoceanography" 20, 1, pp. 1-17.
- G. MUTTONI, G. SCARDIA, D.V. KENT, E. MORSIANI, F. TREMOLADA, M. CREMASCHI, C. PERETTO 2011, *First dated human occupation of Italy at $\sim 0.85\text{Ma}$ during the late Early Pleistocene climate transition*, "Earth and Planetary Science Letters" 307, 3-4, pp. 241-252.
- G. PASINI 2012, *Speleogenesis of the "Buco dei Vinchi" inactive swallow hole (Monte Croara karst sub-area, Bologna, Italy), an outstanding example of antigravitational erosion (or "paragenesis" in selenitic gypsum. An outline of the "post-antigravitational erosion"*, "Acta Carsologica" 41, 1, pp. 15-34.
- V. PICOTTI, F.J. PAZZAGLIA 2008, *A new active tectonic model for the construction of the Northern Apennines mountain front near Bologna (Italy)*, "Journal of Geophysical Research" 113, B8, pp. 1-24.
- D.A. RICHARDS, J.A. DORALE 2003, *Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems*, "Reviews in Mineralogy and Geochemistry" 2, 1, pp. 407-460.
- K.W. WEGMANN, F.J. PAZZAGLIA 2009, *Late Quaternary fluvial terraces of the Romagna and Marche Apennines, Italy: climatic, lithologic, and tectonic controls on terrace genesis in an active orogen*, "Quaternary Science Reviews" 28, 1, pp. 137-165.