

## **GESSO, CALCITE E FANGO: COME RICOSTRUIRE DALLE FORME DI DISSOLUZIONE E SEDIMENTAZIONE UN'EVOLUZIONE PARTICOLARMENTE COMPLESSA NEL SISTEMA CARSIKO DEL RE TIBERIO**

JO DE WAELE<sup>1</sup>, MASSIMO ERCOLANI<sup>2</sup>, PAOLO FORTI<sup>1</sup>, ERMANNIO GALLI<sup>3</sup>, BALDO SANSAVINI<sup>4</sup>

### **Riassunto**

Se l'esplorazione della Grotta del Re Tiberio, la più importante cavità carsica della Vena del Gesso romagnola, può dirsi praticamente conclusa, praticamente nulla è stato ancora fatto per definirne l'evoluzione nel tempo di alcune sue forme e sedimenti peculiari. L'analisi di dettaglio delle forme erosivo-dissolutive e dei sedimenti chimici e fisici presenti in due piccole gallerie relitte all'interno della cava di Monte Tondo e facenti parte del sistema carsico del Re Tiberio, ha permesso di ricostruire la loro storia evolutiva, che ha comportato anche lo sviluppo di alcuni rari speleotemi, tra cui i *poolfinger* di calcite, i cristalli di gesso epitassiali e gli orli di ossidi di ferro e di gesso secondario che bordano i cristalli della matrice gessosa esposti nelle pareti della grotta, nonché la presenza di cristallizzazioni effimere di epsomite.

**Parole chiave:** livelli di base carsici, forme di dissoluzione, plastici di fango, speleotemi di gesso e calcite, grotte in gesso.

### **Abstract**

*Despite the fact that the exploration in the Re Tiberio karst system can be considered as almost concluded, not much is known on its formation and speleogenesis, and especially on the origin of some of the strange sediments and morphologies encountered locally.*

*The detailed analysis of the erosion and dissolution forms and of the chemical and physical deposits in two small branches in the Mt. Tondo underground gypsum quarry, part of the Re Tiberio karst system, has allowed to reconstruct their formation and evolution. Our fieldwork also brought to the discovery of some rare speleothems, such as calcite poolfingers, epitaxial gypsum crystals and the iron oxide and secondary gypsum rims that border the crystals making up the hostrock exposed along the cave walls, and the ephemeral epsomite crystals.*

**Keywords:** Karst Base Levels, Dissolution Forms, Mud Sculptures, Gypsum and Calcite Speleothems, Gypsum Caves.

<sup>1</sup> Istituto Italiano di Speleologia, Alma Mater Studiorum Università di Bologna - jo.dewaele@unibo.it; paolo.forti@unibo.it

<sup>2</sup> Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna / Speleo GAM Mezzano - massimoercolani55@gmail.com

<sup>3</sup> Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze della Terra, Largo S. Eufemia 19, 41100 Modena (MO) - ermannio.galli@unimore.it

<sup>4</sup> Speleo GAM Mezzano

## Introduzione

La Grotta del Re Tiberio, che si apre nella valle del fiume Senio sulle pendici di Monte Tondo, in comune di Riolo Terme, è senza dubbio il fenomeno carsico della Vena del Gesso romagnola più importante e più studiato, almeno relativamente ad alcuni suoi aspetti particolari (LUCCI, ROSSI 2011).

Questa grotta, già conosciuta in tempi antichi, deve molto della sua notorietà alle varie scoperte archeologiche, effettuate già a partire dalla metà del 1800 (SCARBELLI 1851; 1872). Tali ricerche sono proseguite sino ai giorni nostri (MIARI 2007; NEGRINI 2007), e hanno dimostrato una sua frequentazione lungo un arco temporale di oltre 4000 anni.

La parte archeologica, però, riguarda sola-

mente una minima frazione della grotta, limitandosi ai primi 60 metri dell'ingresso storico, mentre il sistema carsico, grazie soprattutto alle esplorazioni effettuate nell'ultimo decennio da parte dello Speleo GAM di Mezzano (ERCOLANI *et alii* 2004; LUCCI, MARABINI 2010; LUCCI, ROSSI 2011) attualmente ha uno sviluppo di oltre 6300 e un dislivello totale di 223 metri.

Recentemente la scoperta e la successiva esplorazione, sempre ad opera del GAM Mezzano, di alcuni frammenti del sistema carsico intercettati e in parte distrutti dalle gallerie di cava (figg. 1-2) ha permesso di mettere in evidenza una complessità morfologica davvero insospettata e una ricchezza di speleotemi del tutto inusuali per le grotte in gesso della nostra regione. Per questo motivo si è deciso di fare un'analisi morfologica di dettaglio di que-



Fig. 1 – L'ingresso a livello di una galleria di cava di una delle porzioni relitte del sistema carsico del Re Tiberio oggetto del presente studio (foto P. Lucci).

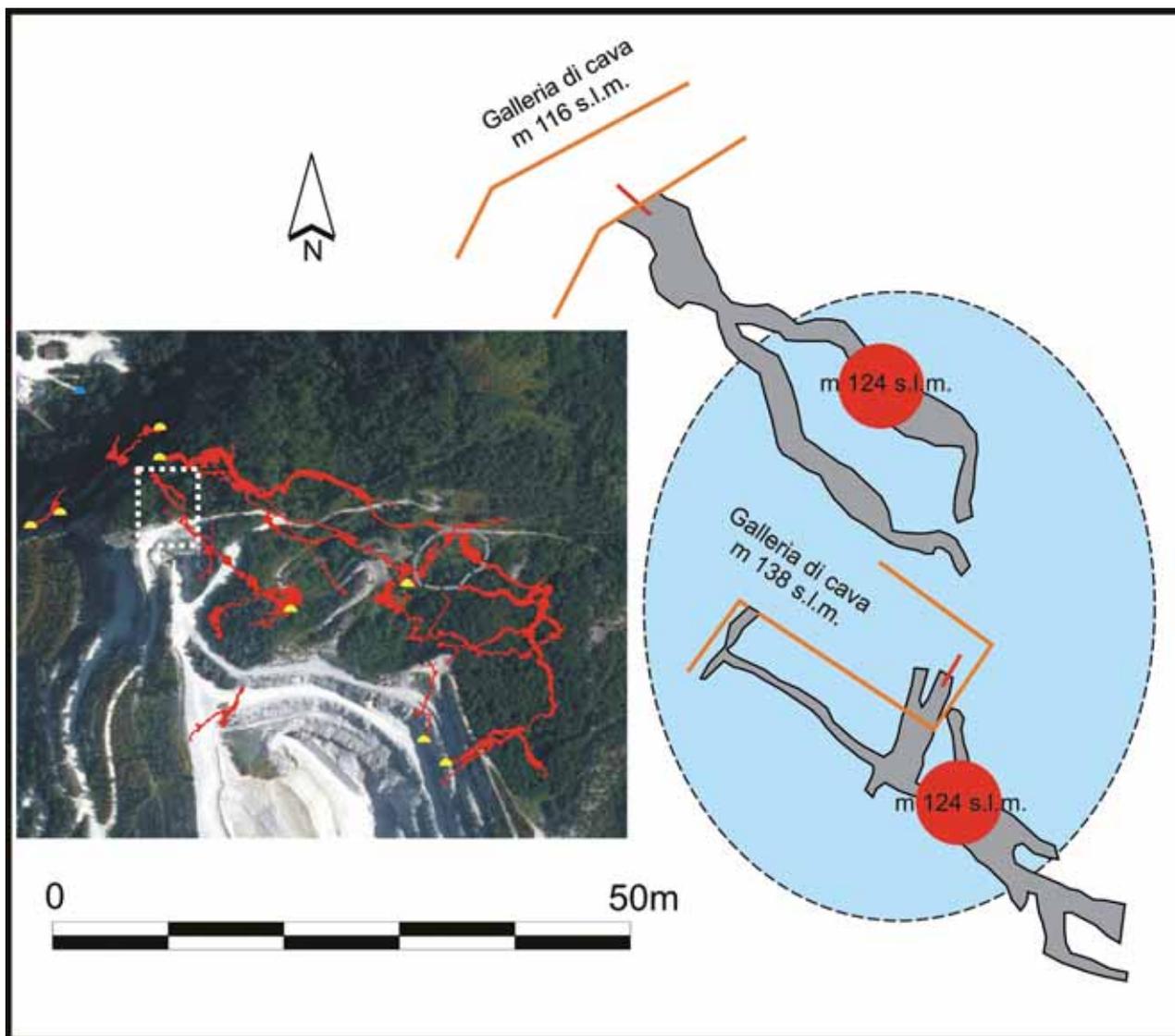


Fig. 2 – Localizzazione delle due gallerie relitte all'interno della cava di Monte Tondo con evidenziati i punti in cui sono state effettuate le osservazioni morfologiche: l'ovale in rosa segna il limite supposto per il lago sotterraneo, che si è sviluppato a quota 124 e che ha permesso l'evoluzione dei *poolfinger* di calcite (da disegni dell'Archivio Speleo GAM Mezzano, modificati).

ste gallerie anche per dimostrare, una volta di più, come da piccoli indizi e semplici osservazioni delle forme di erosione/dissoluzione del gesso e dall'analisi morfologica dei sedimenti fisici e chimici (fango, gesso e calcite) sia ancora possibile ottenere buoni risultati in ambito speleogenetico senza dover necessariamente ricorrere a costose e complesse analisi quantitative.

Per quanto riguarda la geologia, l'evoluzione speleogenetica complessiva e l'idrogeologia dell'area di Monte Tondo, si rimanda ai lavori specifici su questi temi presenti in questo stesso volume (DE WAELE *et alii*, *Evoluzione speleogenetica del sistema carsico del Re Tiberio (Vena*

*del Gesso romagnola)*; intervento di MARABINI, VAI). In questo lavoro infatti vengono solamente discusse in dettaglio le osservazioni morfologiche fatte nelle due gallerie relitte recentemente scoperte.

#### *Le gallerie intercettate dalla cava di gesso e la ricostruzione di dettaglio dei loro stadi evolutivi*

Come accennato nell'introduzione, le esplorazioni dello Speleo GAM Mezzano all'interno del dedalo di gallerie della cava di gesso di Monte Tondo ha portato alla scoperta, in diversi luoghi, di frammenti



Fig. 3 – Canale di volta nella grotta del livello 120 (foto P. Lucci).

di cavità naturali che un tempo erano parte integrante del grande sistema carsico facente capo alla Grotta del Re Tiberio.

Le due porzioni di grotta, che sono oggetto del presente studio, sono state intercettate rispettivamente dalle gallerie a quota 120 la prima e da quelle di quota 140 la seconda.

Attualmente queste due porzioni di grotta non sono direttamente connesse tra di loro: quella di livello 120 lo è con la Grotta del Re Tiberio, mentre quella del livello 140 fa parte della Grotta dei Tre Anelli.

In realtà, però, l'esigua loro distanza in

pianza (circa 40 metri) e l'assoluta somiglianza morfologica dei loro passaggi fa ritenere del tutto plausibile una loro diretta connessione anche se, chiaramente, non direttamente percorribile dall'uomo a causa dei potenti depositi di fango, che obliterano buona parte delle loro zone a quote più basse.

Morfologicamente ambedue queste cavità si presentano come stretti e tortuosi *canyon*, la cui parte inferiore è completamente ricoperta da un deposito di fango più o meno spesso e la parte superiore, quando raggiungibile, rivela evidenti forme di na-

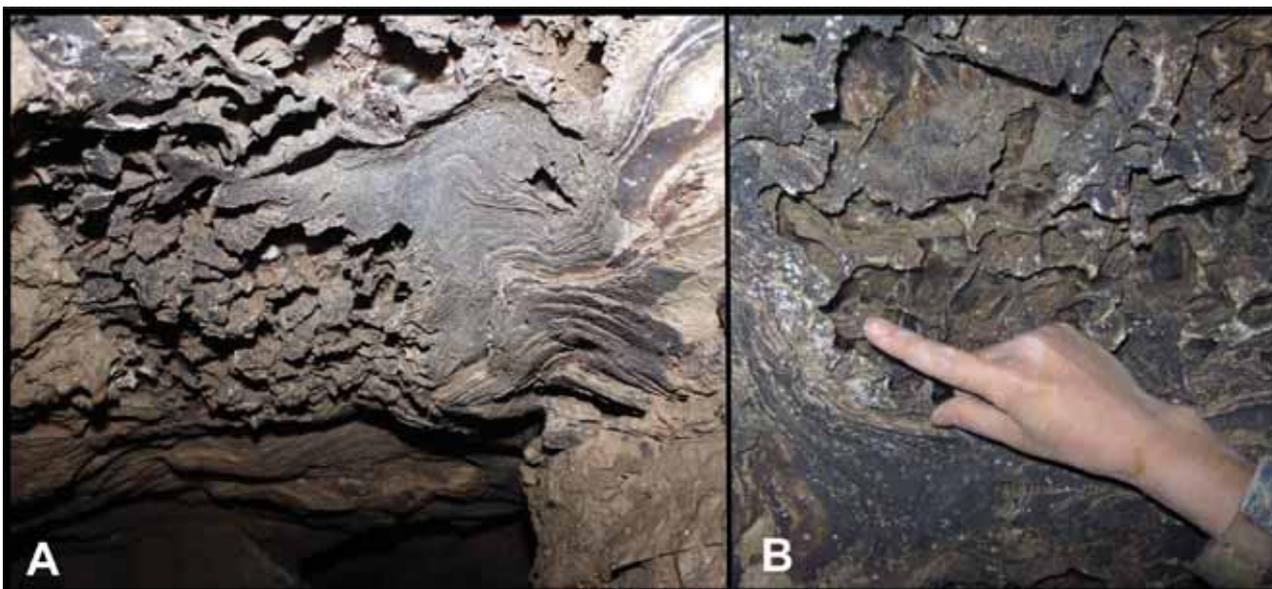


Fig. 4 – *Boxwork* sul soffitto della grotta del livello 138: A) visione generale del soffitto interessato dal fenomeno; B) i cristalli di gesso erosi sono evidenti all'interno di molti dei *boxwork*.

tura antigravitativa (canali di volta) (fig. 3).

La zona intermedia, invece, che è quella lungo cui è possibile una percorrenza quasi agevole, è caratterizzata da un allargamento delle pareti che possono, in rari casi, raggiungere anche i 2-3 metri di distanza tra di loro.

Ma sono i depositi, sia fisici che chimici presenti a rendere estremamente interessanti ambedue le cavità: infatti alcuni di essi sono poco comuni in generale, e rap-

presentano a tutt'oggi un *unicum* per il carsismo nei gessi della regione. Tra questi si devono citare i grandi *boxwork* sviluppatisi a livello di un interstrato marnoso-limoso entro cui si trovavano grandi cristalli di gesso (fig. 4), i *poolfinger* di calcite (fig. 5), presenti in vari tratti delle due gallerie e, infine, i cristalli di gesso secondario sviluppatisi per epitassia su quelli della roccia che costituiva le pareti delle cavità (fig. 6)

Ma molte altre sono le caratteristiche co-

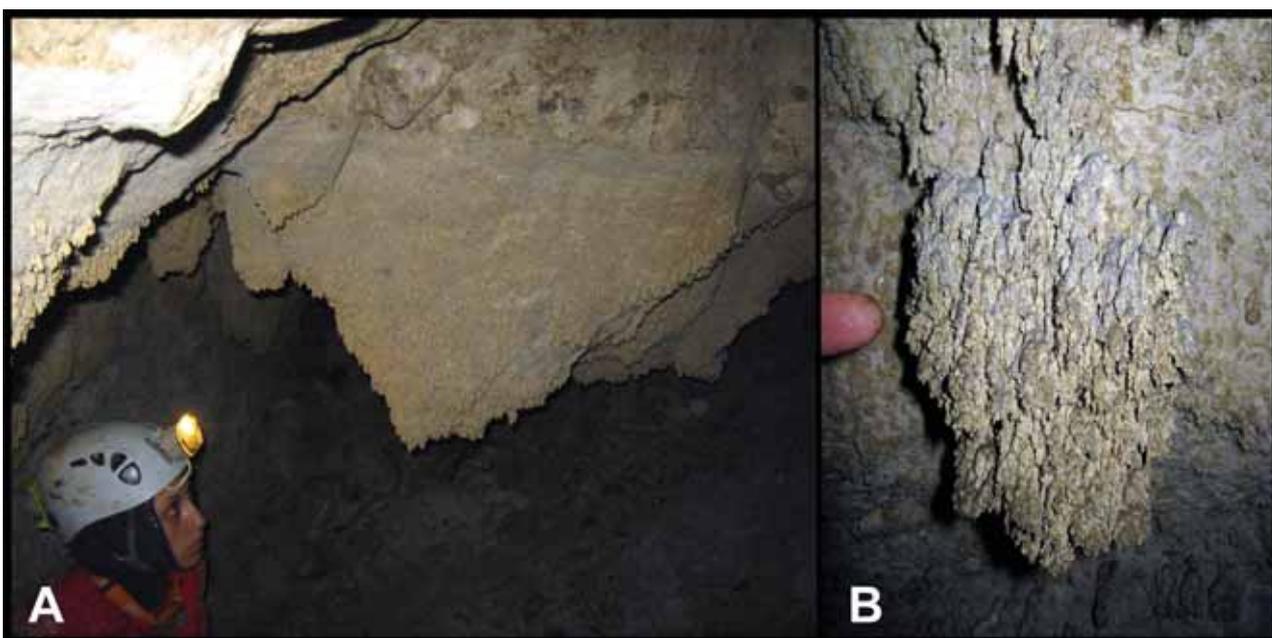


Fig. 5 – *Poolfinger* nella grotta di livello 116: A) visione generale dell'area con evidente il livello di calcite che "marca" la superficie del lago oggi scomparso; B) particolare di uno dei *poolfinger* più sviluppati.



Fig. 6 – Cristalli di gesso sviluppatasi per epittassia nella grotta del livello 116.



Fig. 7 – Plastici di fango fossilizzati da un velo di calcite al di sotto dei *poolfinger* nella grotta di livello 116.



Fig. 8 – Particolare delle infiorescenze di gesso sui plastici di fango nella grotta di livello 138.

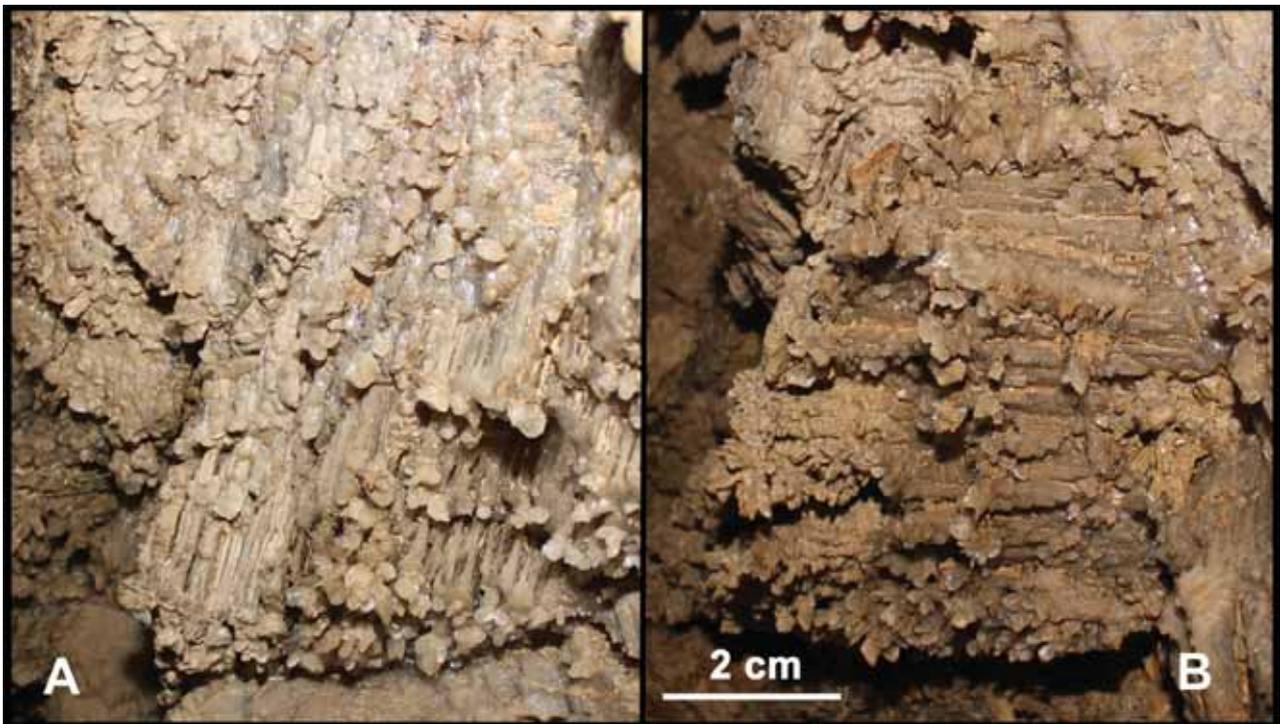


Fig. 9 – Infiorescenze di gesso che si sono sviluppate sui cristalli cresciuti per epitassia dopo che il lago si era prosciugato e i depositi di fango del suo fondo erosi. A) data la verticalità dei cristalli cresciuti per epitassia le nuove infiorescenze di gesso si sono sviluppate dando essenzialmente luogo a dei *gypsum ending*. B) nel caso di cristalli suborizzontali, invece, le infiorescenze sono cresciute su tutti gli orli esterni degli stessi.

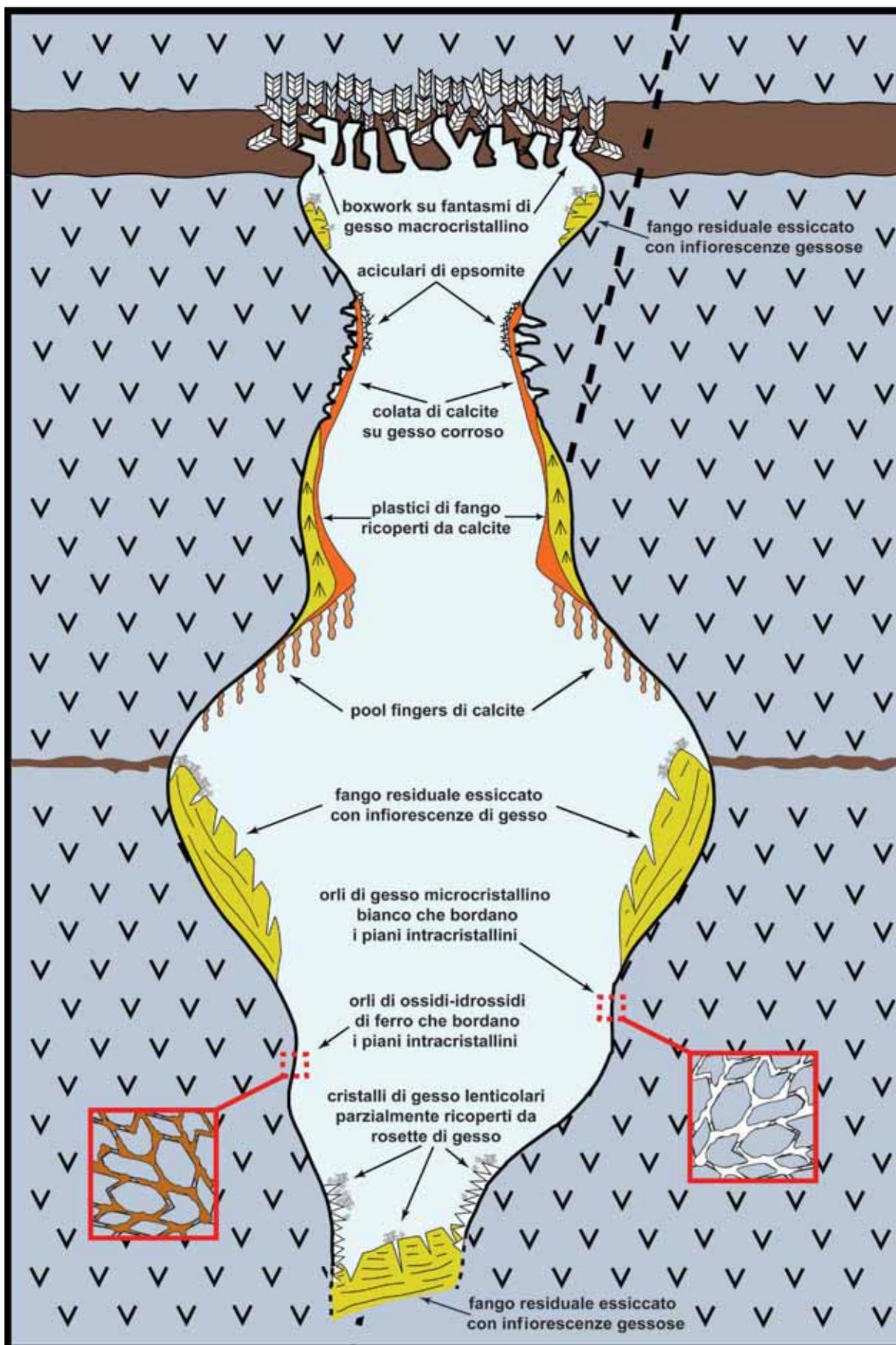


Fig. 10 – Sezione schematica in cui sono raggruppate tutte le principali forme e i depositi sia chimici che fisici osservati nei due *canyon*.

muni delle due gallerie: plastici di fango, a volte fossilizzati da veli di carbonato di calcio (fig. 7), su cui si sono poi sviluppate infiorescenze gessose (fig. 8).

Anche sopra i cristalli cresciuti per epitassia si sono sviluppati fiori di gesso, la cui forma e disposizione è stata controllata dalla orientazione dei cristalli cresciuti per epitassia: se erano infatti sub verticali si sono formati dei *gypsum ending* (fig. 9A); se invece erano sub orizzontali le infiorescenze si sono disposte lungo tutto lo spigolo esterno dei cristalli epitassiali (fig. 9B). O, ancora, minuti e sottilissimi cristalli aciculari di epsomite sopra delle piccole colate di calcite o infine orli di gesso secondario che bordano i contatti dei cristalli di gesso primario nelle pareti.

La somiglianza morfologica e la quasi identica disposizione dei sedimenti sia chimici che fisici dimostra chiaramente che questi due tratti relitti, attualmente “disgiunti”, in realtà sono parte sicuramente dello stesso sistema e hanno subito un’identica storia speleogenetica.

Per questo motivo si è ritenuto sufficiente schematizzare le due condotte con un unico disegno (fig. 10) dove ovviamente tutte le caratteristiche che si trovano “sparse” lungo ciascuno dei due *canyon* sono state raggruppate in una singola sezione.

La presenza in così poco spazio di complesse morfologie erosive-dissolutive, di sedimenti chiaramente di età differente e soprattutto di un gran numero di concrezioni, anche rare, ma caratterizzate da processi evolutivi anche opposti (per esempio freatici, epifreatici o francamente vadosi) ha permesso di ricostruire per grandi linee la storia evolutiva cui sono stati soggetti i due *canyon* dal momento della creazione del primo vacuo embrionale sino alla condizione attuale di relitti all’interno di una cava di gesso attiva.

L’analisi morfologica ha evidenziato la presenza di uno sviluppo in nove stadi successivi da una situazione iniziale di stratificazione gessosa monoclinale debolmente immergente verso Nord e caratterizzata da interstrati marnosi argillosi anche po-

tenti e scarsamente permeabili.

Qui di seguito verranno brevemente esplicitati questi nove stadi evolutivi descrivendone anche le forme e i depositi cui hanno dato luogo.

1. All’inizio del processo di carsificazione, l’infiltrazione dell’acqua meteorica avveniva lungo discontinuità (fratture e/o faglie subverticali): la discesa veniva arrestata a livello di un piccolo interstrato marnoso argilloso, dove il flusso diventava suborizzontale dando luogo a una serie di piccoli dreni a sezione circolare e anastomizzati, in cui l’acqua scorreva con moto laminare (fig. 11A). L’unico processo di carsificazione attivo era quello della dissoluzione. Attualmente, nelle parti residue di questi due *canyon*, non è stato possibile osservare alcuna forma residua di questo primo stadio.

L’impossibilità pratica di avere in ambiente gessoso una carsificazione al di sotto del livello di base tranne che in condizioni di iniezioni basali e/o laterali (DE WAELE *et alii* 2011), mai verificatesi nell’area di Monte Tondo, fornisce la chiave per definire l’inizio dello sviluppo di questi tratti di gallerie. Infatti il livello di base locale, rappresentato dalla valle del fiume Senio, doveva necessariamente essere arrivato al di sotto dei 130 metri sul livello del mare. Questo significa che questi due rami hanno iniziato la loro evoluzione praticamente quando la galleria intermedia del Re Tiberio di quota 150 ha cessato di essere idrologicamente attiva a seguito dell’abbassamento del livello di base avvenuto durante l’acme dell’ultimo glaciale (vedi in questo volume DE WAELE *et alii*, *Evoluzione speleogenetica del sistema carsico del Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola)*).

2. Col procedere del processo dissolutivo, i vari dreni anastomizzati si sono progressivamente trasformati in una singola galleria sempre a pieno carico

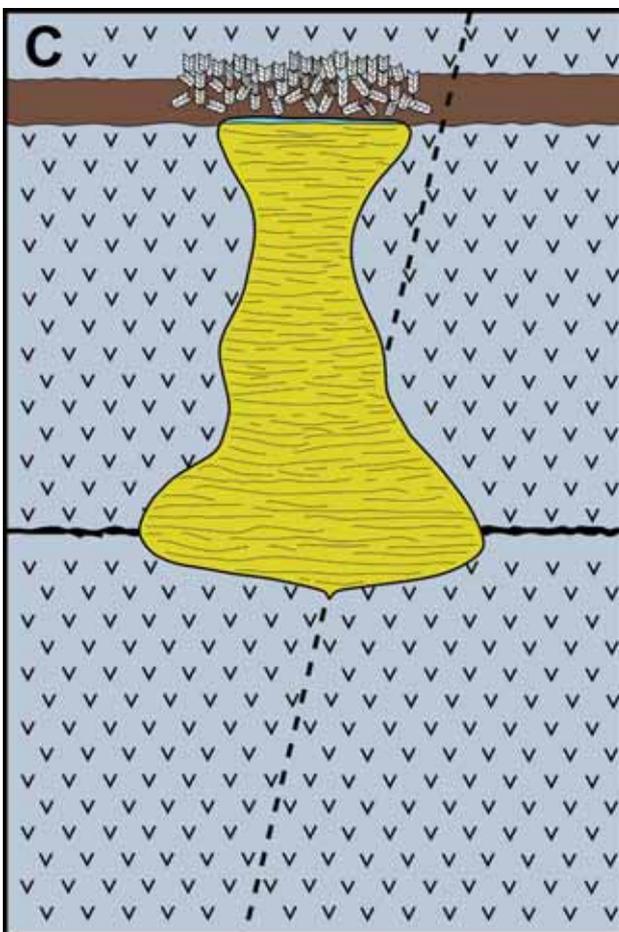
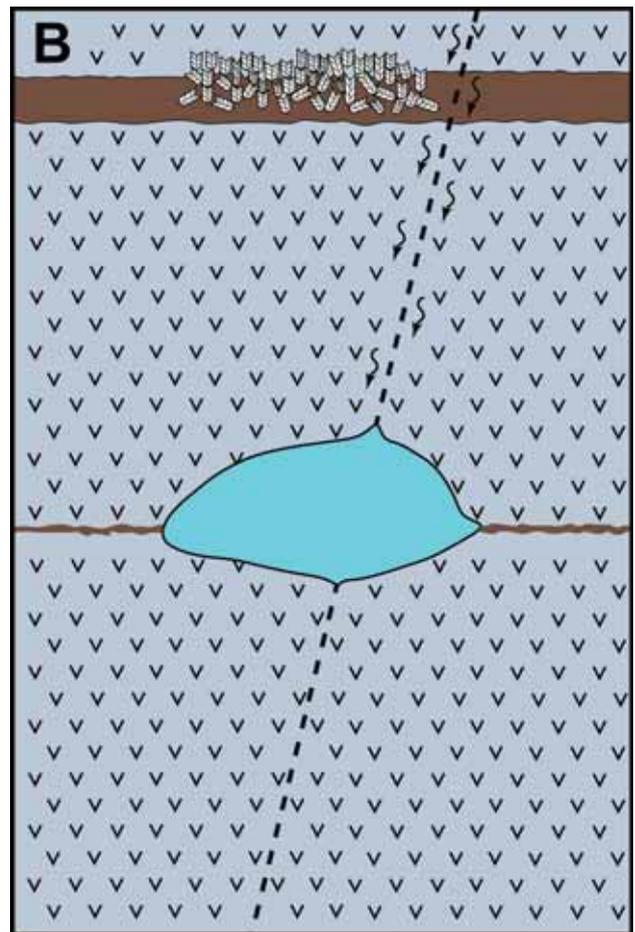
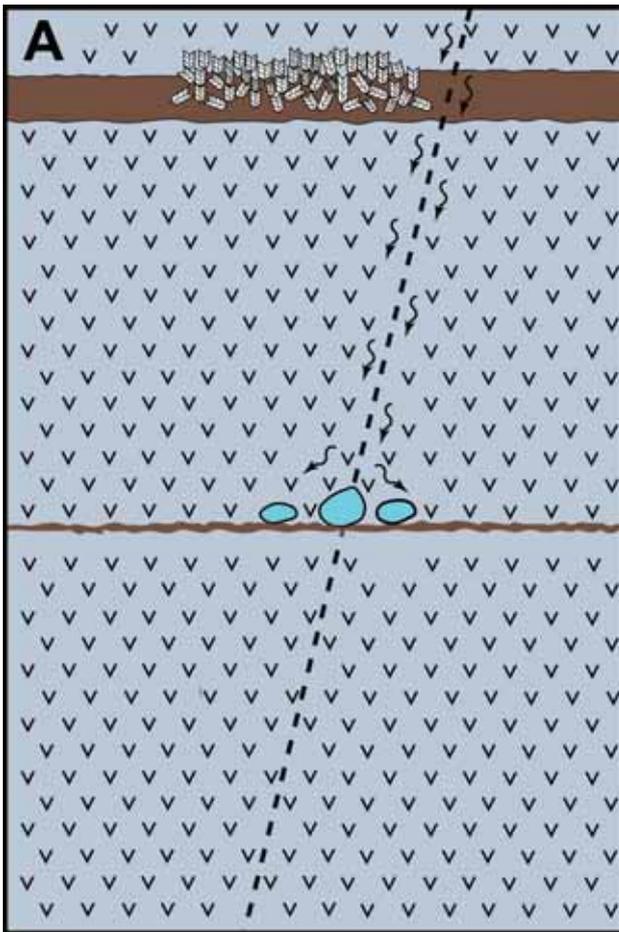
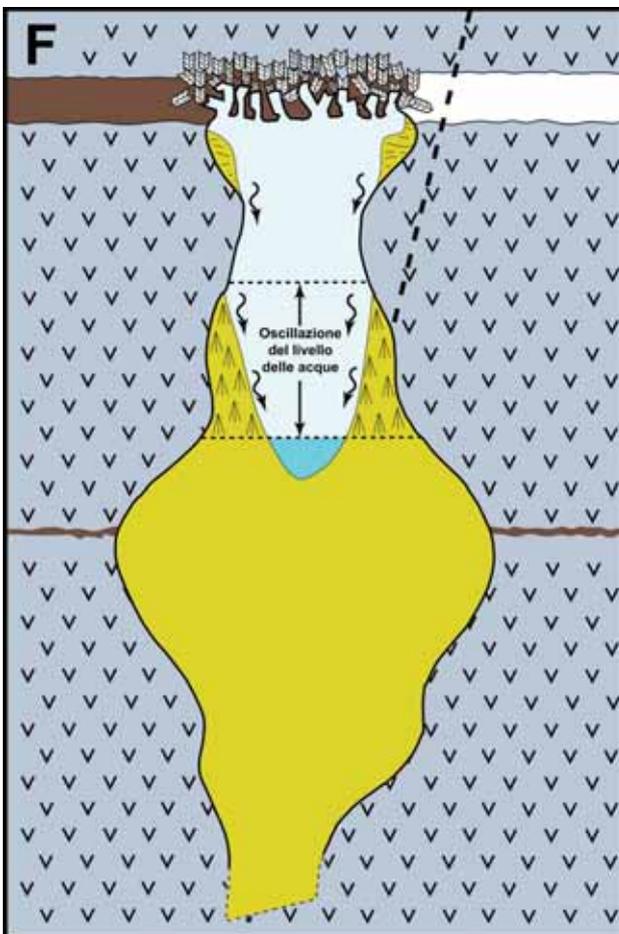
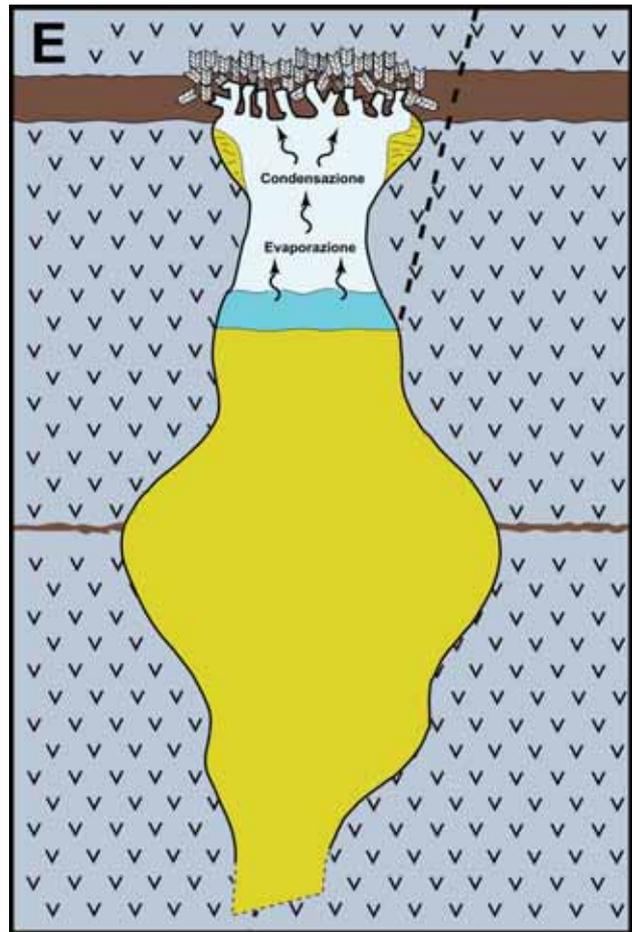
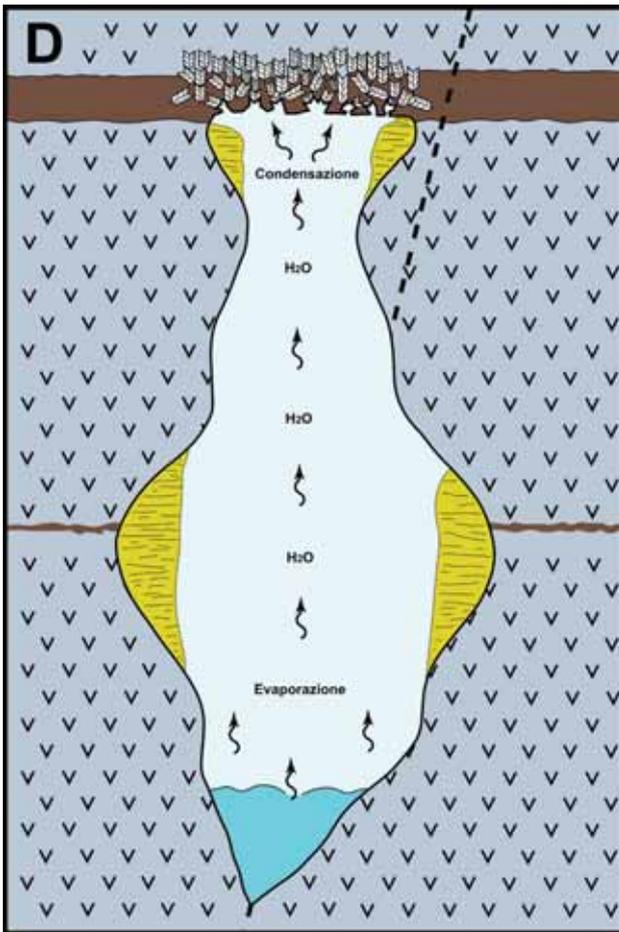


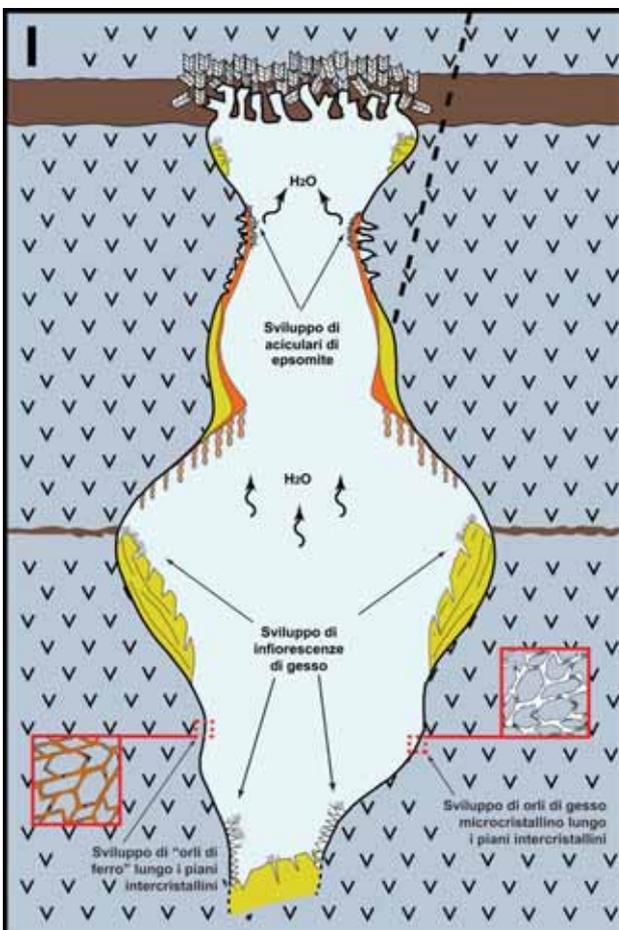
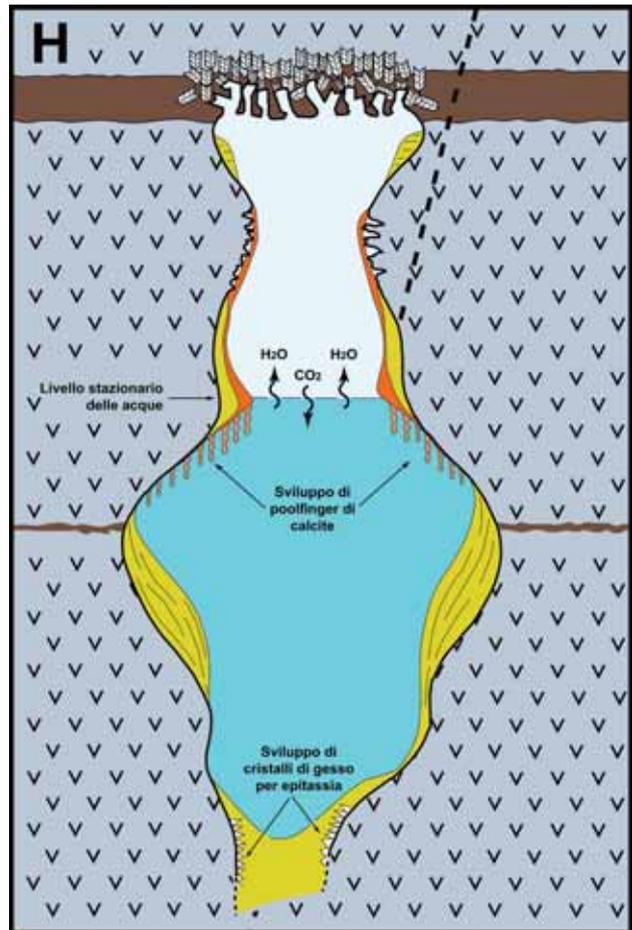
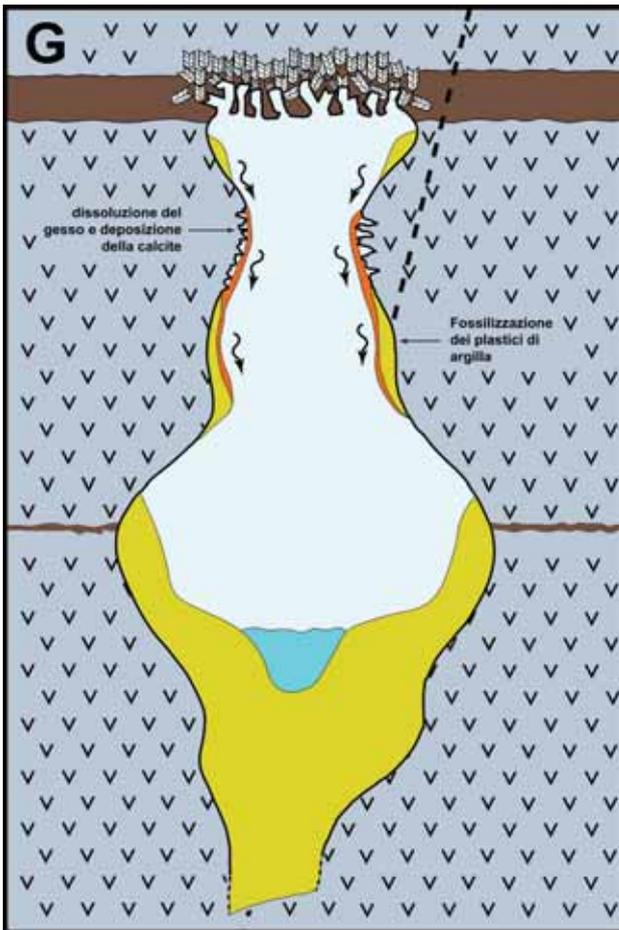
Fig. 11 – Ricostruzione schematica dell'evoluzione subita dalle due gallerie relitte:  
 A - Evoluzione di protocondotti anastomizzati nel punto di intersezione tra una frattura subverticale e un interstrato argilloso-limoso.  
 B - Sviluppo di una galleria drenante a pieno carico.  
 C - Sviluppo di una galleria antigравitativa che, in alcuni punti, ha raggiunto l'interstrato marnoso-argilloso in cui si trovano i macrocristalli di gesso.



D - Le mutate condizioni idrodinamiche permettono l'escavazione pressoché totale dei sedimenti della galleria antigравitativa e la successiva erosione del gesso con formazione di un *canyon* gravitativo a partire dalla galleria a pieno carico. In questo periodo la condensazione sulla volta permette l'inizio della evoluzione dei *boxwork*.

E - Rialluvionamento semi-totale delle gallerie a seguito della diminuzione dell'energia di flusso. Continua l'evoluzione dei *boxwork*.

F - Riprende l'escavazione dei depositi argillosi con formazione nelle aree interessate da oscillazione del livello idrico di plastici di fango.



G - Forte diminuzione dell'apporto idrico: si formano velli di calcite per dissoluzione incongrua del gesso, che ricoprono sia aree di gesso fortemente corrosivo sia anche alcuni *karren* in fango, che vengono così fossilizzati.

H - Formazione di un grande lago stazionario, caratterizzato da una prevalenza del fenomeno di evaporazione. In queste condizioni a causa della diffusione della  $CO_2$  dall'atmosfera di grotta nella soluzione si ha la formazione di *poolfinger* mentre all'interno del fondo fangoso-limoso si sviluppano per epitassia sulle pareti gessose cristalli euedrali di gesso.

I - L'apertura delle gallerie di cava modifica l'ambiente nelle due gallerie, diminuendo l'apporto idrico e aumentando drasticamente l'evaporazione. In queste condizioni si sviluppano, per capillarità ed evaporazione, aghetti di gesso sulle colate di calcite, orli di gesso microcristallino sulle pareti gessose esposte e infine fiori di gesso praticamente in tutte le zone dove l'evaporazione è favorita.

e sempre a livello dell'incrocio tra il piccolo interstrato suborizzontale e la frattura subverticale (fig. 11B). La circolazione idrica al suo interno non era più laminare, come nello stadio precedente, ma turbolento e pertanto l'allargamento della sezione avveniva molto più per erosione che per dissoluzione. L'unica evidenza rimasta di questo secondo periodo è l'allargamento abbastanza accentuato della sezione nella parte mediana dei *canyon*.

3. A un certo punto lo sviluppo della galleria a pieno carico si è esaurita a causa delle modificate condizioni idriche, probabilmente a seguito di una variazione climatica (vedi in questo volume DE WAELE *et alii*, *Evoluzione speleogenetica del sistema carsico del Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola)*): l'apporto di materiale solido a livello della valle del Senio è aumentato al punto da intasarla e quindi causare uno stop nella sua erosione con probabile anche parziale risalita del livello di base carsico. All'interno del massiccio carsico, quindi, si è verificato un netto rallentamento nella velocità di flusso e conseguentemente la galleria si è totalmente obliterata con sedimenti siltosi-argillosi. In queste condizioni si è ripristinato un flusso laminare al contatto con il soffitto che progressivamente andava sciogliendosi mentre continuava la sedimentazione. Si è quindi sviluppata una galleria antigra-vitativa (PASINI 1967; 2009) che in alcuni punti è arrivata al contatto con l'interstrato argilloso-marnoso sovrastante (fig. 11C). Buona parte dei canali di volta originatisi in questo stadio sono ancora ben conservati e visibili sul soffitto di ambedue i *canyon*.
4. Una nuova variazione climatica ha portato alla fine del terzo e all'inizio del quarto stadio: l'erosione è tornata a prevalere svuotando dai sedimenti la valle del Senio e iniziando un nuovo ciclo di erosione del suo letto. Contemporaneamente

la velocità di flusso all'interno delle gallerie è ritornata turbolenta, tanto da permettere la presa in carico dei sedimenti argillosi limosi, che sono stati rapidamente incisi, svuotando così completamente la galleria antigra-vitativa lasciando solo alcuni residui di sedimenti nelle zone non direttamente interessate dal flusso idrico. Il processo erosivo è comunque proseguito ed ha portato all'erosione del pavimento della galleria originale a pieno carico, creando un profondo *canyon* gravitativo (fig. 11D). In questo periodo è iniziato anche lo sviluppo dei *boxwork* nelle zone in cui il canale di volta era giunto in contatto con l'interstrato superiore: la presenza di un'atmosfera ha permesso infatti che si instaurasse un processo di condensazione a livello del soffitto della galleria ove l'acqua (priva di ogni contenuto salino) giungeva direttamente in contatto dei macrocristalli di gesso esposti dai precedenti eventi erosivi, ovvero risaliva capillarmente fino a loro all'interno dell'interstrato, grazie alla porosità, seppur minima, di quest'ultimo. La rapida dissoluzione del gesso portava all'evoluzione di vuoti geometrici, che riproducevano esattamente la forma dei cristalli di gesso, attorno cui rimanevano solamente le porzioni argillose arenacee dell'interstrato. In verità questo processo ha causato anche il distacco di piccole porzioni dell'interstrato, a causa della sua scarsa cementazione e quindi tenacità. Tali collassi, però, non hanno portato alla demolizione totale dei *boxwork* dato che questo processo è stato rapidamente arrestato dal consolidamento degli stessi, operato dalle acque capillari che, una volta arricchitesi in gesso, hanno causato la deposizione di carbonato di calcio tra i granuli, a seguito della ben nota reazione di corrosione ipercarica del gesso (FORTI, RABBI 1981) meglio nota come dissoluzione incongruente (DE WAELE *et alii* 2011). A conferma di questo va notato che attualmente i *boxwork* sono assolutamente

te tenaci ed evidenziano un alto grado di cementazione calcarea. È importante accennare qui che le particolarissime condizioni al contorno che hanno portato alla genesi prima e allo sviluppo poi dei *boxwork* della Grotta del Re Tiberio fanno sì che, allo stato attuale delle conoscenze, questi particolarissimi speleotemi sono assolutamente unici non solo nel panorama delle grotte in gesso italiane ma anche a livello mondiale.

Infine, prima di passare alla descrizione dello stadio successivo, è necessario evidenziare come, sulla base delle semplici osservazioni morfologiche e sedimentologiche disponibili, non è in realtà possibile stabilire con certezza che lo stadio 4 sia semplicemente succeduto al terzo, come appena descritto, e quindi sia iniziato immediatamente lo stadio 5. Infatti il risultato globale descritto potrebbe essere stato la conseguenza non di due soli stadi ma di una loro reiterata alternanza: l'unica cosa certa è che alla fine si è avuto un conclusivo stadio 4.

Considerati i livelli di "attacco" alle gallerie di cava e considerato l'andamento fortemente acclive dei tratti ancora percorribili delle stesse il quarto stadio si deve essere definitivamente concluso quando, circa 5000-6000 anni BP, l'incisione valliva ha abbassato il livello di base carsico a 100 m s.l.m. permettendo così l'evoluzione della Risorgente del Re Tiberio (vedi in questo volume DE WAELLE *et alii*, *Evoluzione speleogenetica del sistema carsico del Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola)*).

5. Il quinto stadio è stato caratterizzato da una circolazione idrica sempre a pelo libero ma con scarsa energia e lunghi periodi di quasi assenza di flusso. Queste condizioni si sono conservate per un tempo sufficientemente lungo da permettere un alluvionamento quasi totale delle gallerie con materiali argillosi (fig. 11E). Tale processo, però, non ha portato mai a condizioni di flusso a pie-

no carico, lasciando quindi in condizioni aerate la parte sommitale della galleria. Infatti, qualora questo non fosse avvenuto, i *boxwork* non avrebbero avuto la possibilità di conservarsi intatti e, come minimo, anche se non erosi, si sarebbero ricoperti di una patina di fango se in parte obliterati dallo stesso. Ora è assolutamente inverosimile che i successivi stadi possano aver asportato del tutto questo fango, senza erodere un minimo i *boxwork* stessi. Al contrario, quindi, essendoci un'atmosfera, il processo di formazione e consolidamento dei *boxwork* è andato avanti anche in tutto questo periodo, con le stesse modalità descritte nel precedente stadio.

Questo stadio evolutivo è stato l'ultimo chiaramente correlabile a eventi generali: infatti i successivi stadi evolutivi (dal 6 al 9) non sono più stati direttamente correlati al drenaggio principale di questa porzione di Monte Tondo, ma riflettono solo condizioni locali e quindi, senza l'ausilio di datazioni assolute, attualmente non disponibili, praticamente impossibili da posizionare cronologicamente, eccetto l'ultimo (il 9) chiaramente indotto da attività antropiche (di cava).

6. Ancora una variazione del regime idrico è stata la responsabile del passaggio dal quinto al sesto stadio. Si è verificato infatti un aumento dell'energia di flusso che ha comportato lo svuotamento parziale dei depositi alluvionali con ripristino di una circolazione idrica, prevalentemente turbolenta, che interessava non solo il dreno principale in quanto tale, ma, durante gli eventi di piena, a causa dell'innalzamento del livello idrico, anche le sue pareti ancora parzialmente ricoperte di limi (fig. 11F). Conseguentemente, l'acqua, scivolando con una certa energia sulle superfici limose-argillose, ha dato luogo a plastici di fango (HILL, FORTI 1997) di cui si sono conservate sino ad oggi praticamente solo le scannellature.

7. Il settimo stadio evolutivo è stato caratterizzato da una forte diminuzione dell'afflusso idrico soprattutto lungo le pareti dei condotti che sono stati parzialmente interessati dal flusso gravitativo laminare di film d'acqua, probabilmente in buona parte se non totalmente derivante dalla condensazione. In queste condizioni si sono formate sottili croste di carbonato di calcio, che nella parte più prossima alla volta dei condotti hanno dato luogo alle croste parzialmente distaccate del substrato gessoso, che veniva contemporaneamente sciolto della reazione di corrosione ipercarsica del gesso di cui si è già parlato nel quinto stadio evolutivo. Più in basso, invece, dove ancora era presente una copertura argilloso-limosa il velo d'acqua che conservava ancora parte del suo potere concrezionante ha "fossilizzato", con un sottilissimo strato di calcite, almeno una parte dei plastici di fango, permettendone la conservazione sino ai giorni nostri (fig. 11G). Proprio il fatto che il flusso idrico sulle pareti non abbia causato la distruzione delle scannellature di fango è la prova che il flusso era di tipo laminare, quindi praticamente senza alcuna possibilità di provocare anche una minima erosione di queste forme, che, quando sono completamente imbevute d'acqua, sono delicatissime.
8. Un blocco totale della funzionalità idrica delle due gallerie ha caratterizzato l'ottavo stadio evolutivo. Tale fatto è stato probabilmente originato dallo scioglimento gravitativo di una grande massa di fango che ha creato una diga naturale e ha permesso la formazione di un lago sotterraneo molto grande. Non è possibile oggi definire in maniera esatta l'estensione di questo lago, ma è certo che esso si estendeva necessariamente ad abbracciare ambedue i *canyon*: infatti in ambedue le gallerie il livello stazionario delle acque (marcato dalla presenza di particolari speleotemi

epifreatici) è posizionato esattamente allo stesso livello. Dato che le due gallerie distano tra loro circa 40-50 metri, mentre alcuni loro diverticoli distano solo pochi metri, è evidente che il lago che si era formato era unico e doveva avere una superficie minima di alcune centinaia di metri quadrati. Questo fatto lo rende di gran lunga il più grande lago sotterraneo che sia mai esistito in tutta la Vena del Gesso romagnola e probabilmente anche in tutte le grotte in gesso italiane. L'alimentazione di questo lago era scarsa e probabilmente dipendeva esclusivamente dall'infiltrazione puntuale e conseguente gocciolamento durante il periodo invernale, mentre per il resto dell'anno prevaleva l'evaporazione (fig. 11H).

Queste particolari condizioni hanno permesso l'evoluzione, in prossimità dell'interfaccia acqua-aria, di concrezioni subacquee di carbonato di calcio (*poolfinger*) (HILL, FORTI 1997). Si tratta infatti della prima segnalazione in assoluto di questi speleotemi in ambiente carsico gessoso a riprova del fatto che il meccanismo che permette il loro sviluppo è assolutamente difficile che possa instaurarsi in grotte in gesso: si tratta infatti di un processo di sovrasaturazione rispetto al carbonato di calcio che si deve realizzare partendo da un volume d'acqua in evaporazione e saturo di gesso. Questo fenomeno era stato osservato e descritto per la prima volta pochi anni addietro all'interno della Grotta della Spipola, nei gessi bolognesi (DALMONTE *et alii* 2004) e la formazione in quel caso di lamine di calcite flottante era stato attribuito alla diffusione della CO<sub>2</sub>, presente nell'atmosfera di grotta, nella soluzione in lenta evaporazione. In questo modo la sovrasaturazione rispetto al carbonato di calcio veniva raggiunta prima di quella relativa al gesso, che quindi non precipitava. Nel caso della Spipola nessun *poolfinger* si era sviluppato, ma solo calcite flottante: questo perché i volumi d'acqua coinvol-

ti nel processo erano infinitamente minori a quelli del lago del Re Tiberio: si trattava infatti di piccole vaschette con un contenuto idrico medio molto inferiore al litro. È evidente infatti che con volumi d'acqua molto maggiori il processo di sovrasaturazione rispetto alla calcite ha avuto la possibilità di espandersi anche al di sotto dell'interfaccia aria-acqua e quindi dare luogo anche a concrezioni subacquee come appunto i *poolfinger*.

All'interno del fango che costituiva il fondo delle vaschette della Spipola era stato poi notato lo sviluppo di cristalli euedrali isolati di gesso secondario di dimensione di qualche millimetro. La loro genesi era stata attribuita alla bassa sovrasaturazione rispetto al solfato di calcio, che poteva realizzarsi, sempre a causa dell'evaporazione, ma in una zona lontana e separata da quella in cui la diffusione dell'anidride carbonica causava la precipitazione della calcite: il fango liquido al fondo delle vaschette. Nelle gallerie relitte del Re Tiberio, al fondo dell'area in cui si sono sviluppati i *poolfinger*, quasi a contatto con l'argilla disseccata, sono stati invece osservati dei cristalli lenticolari di gesso di dimensione centimetrica, chiaramente cresciuti per epitassia sui cristalli della roccia gessosa che costituisce la parete, cristalli che attualmente non sono in accrescimento e probabilmente stanno subendo una leggera ridissoluzione ad opera delle acque di condensazione. Tali cristalli, devono quindi essersi sviluppati durante il periodo di esistenza del lago e, considerando la loro localizzazione, dovevano essere sommersi dal fango al momento del loro sviluppo, data la forte contrazione dello stesso nel successivo stadio evolutivo. La crescita per epitassia è poi sicuramente un elemento che indica una scarsa sovrasaturazione (FORTI, LOMBARDO 1998): pertanto è evidente che le condizioni in cui si sono sviluppati questi cristalli è stata assolutamente analoga a quella

verificata nella Grotta della Spipola ed è quindi ragionevole ritenere che il processo di formazione sia stato lo stesso. La dimensione dei cristalli del Re Tiberio è però molto maggiore di quelli osservati in Spipola, ma anche questo può essere spiegato facilmente considerando che il processo genetico in questo caso è stato sicuramente attivo per un tempo nettamente superiore a quello della Spipola a causa dei volumi di acqua in gioco estremamente più grandi.

9. L'ultimo stadio evolutivo (fig. 11I) è coinciso con l'inizio dell'escavazione delle gallerie di cava, quindi circa alla metà del secolo scorso. I lavori di cava, troncando in varie parti lo sviluppo del sistema carsico e creando condizioni di forte ventilazione e di drastica riduzione dell'afflusso idrico, hanno indotto l'evaporazione della stragrande maggioranza dell'acqua presente in questi due rami relitti: anche quella che impregnava i grandi ammassi limosi argillosi è evaporata quasi totalmente. Questo da un lato ha portato alla forte contrazione degli stessi con sviluppo di profonde crepe al loro interno, ma ha permesso anche lo sviluppo di peculiari speleotemi a seguito della concentrazione salina che si andava realizzando all'interno e soprattutto sulla superficie esterna del fango in essiccazione. I più caratteristici sono certamente i "fiori di gesso", aggregati sferoidali di gesso macrocristallino lenticolare, che si possono osservare ancora in accrescimento essenzialmente, ma non solo, sulle zone più esposte ed elevate dei sedimenti limosi.

Durante quest'ultimo periodo, poi, solo in pochi posti localizzati in generale nei punti più alti del sistema, dove ancora è presente un minimo flusso idrico essenzialmente capillare, si può osservare la formazione di minuti aghetti di gesso secondario, che si sviluppano per evaporazione di piccoli volumi d'acqua al di sopra delle colate di calcite

oramai inattive, o in zone anche più basse, la formazione di orli rilevati di gesso secondario bianchissimo attorno ai cristalli più impuri che compongono la parete della galleria: questi ultimi caratteristici appunto di un ambiente molto arido, in cui la condensazione può avvenire solo all'interno di strettissimi meati, quali appunto i piani intero intracristallini (BADINO *et alii* 2011). La conseguente solubilizzazione di gesso rende questi piccoli volumi d'acqua sovrasaturi rispetto al solfato di calcio che viene precipitato sotto forma di minutissimi cristallini di gesso puro non appena la soluzione affiora per capillarità sulla superficie esterna e inizia quindi ad evaporare nell'ambiente di grotta. In questi stessi luoghi, quando l'umidità relativa diviene particolarmente bassa (essenzialmente durante l'inverno) si possono realizzare le condizioni idonee per la deposizione di epsomite (solfato biidrato di magnesio) che si presenta sotto forma di aghetti sottilissimi binchi traslucidi. A differenza del gesso, però, l'epsomite è destinata a esistere solo per pochi mesi o poche settimane, dato che anche un piccolo

aumento della umidità relativa ne causa l'immediata dissoluzione.

Infine in un unico punto della galleria che parte dal livello 140 si sono sviluppati attorno ai cristalli della matrice gessosa degli orli di ossidi-idrossidi di ferro (fig. 12), la cui forma e struttura è del tutto analoga a quella degli orli di gesso microcristallino. La genesi di questa mineralizzazione è una conseguenza anch'essa delle condizioni di aridità indotte dalle attività di escavazione del gesso: infatti, in un tale contesto, le acque che da lungo tempo erano intrappolate all'interno dei piani intracristallini sono state forzate a risalire all'esterno per capillarità, dove evaporavano. Ora però questo fatto da solo non sarebbe stato sufficiente a creare orli di composti di ferro, ma solo di gesso: per ottenere dunque queste mineralizzazioni era necessario che si verificassero altre due condizioni: la prima che in una zona non lontana esistesse una fonte per questo elemento e la seconda che il ferro potesse essere veicolato in soluzione e quindi ridepositato all'esterno. È noto che gli interstrati argilloso-marnosi e i riempimenti limosi delle fratture del-



Fig. 12 – Gli “orli di ferro” della galleria di livello 140 (foto M. Ercolani).

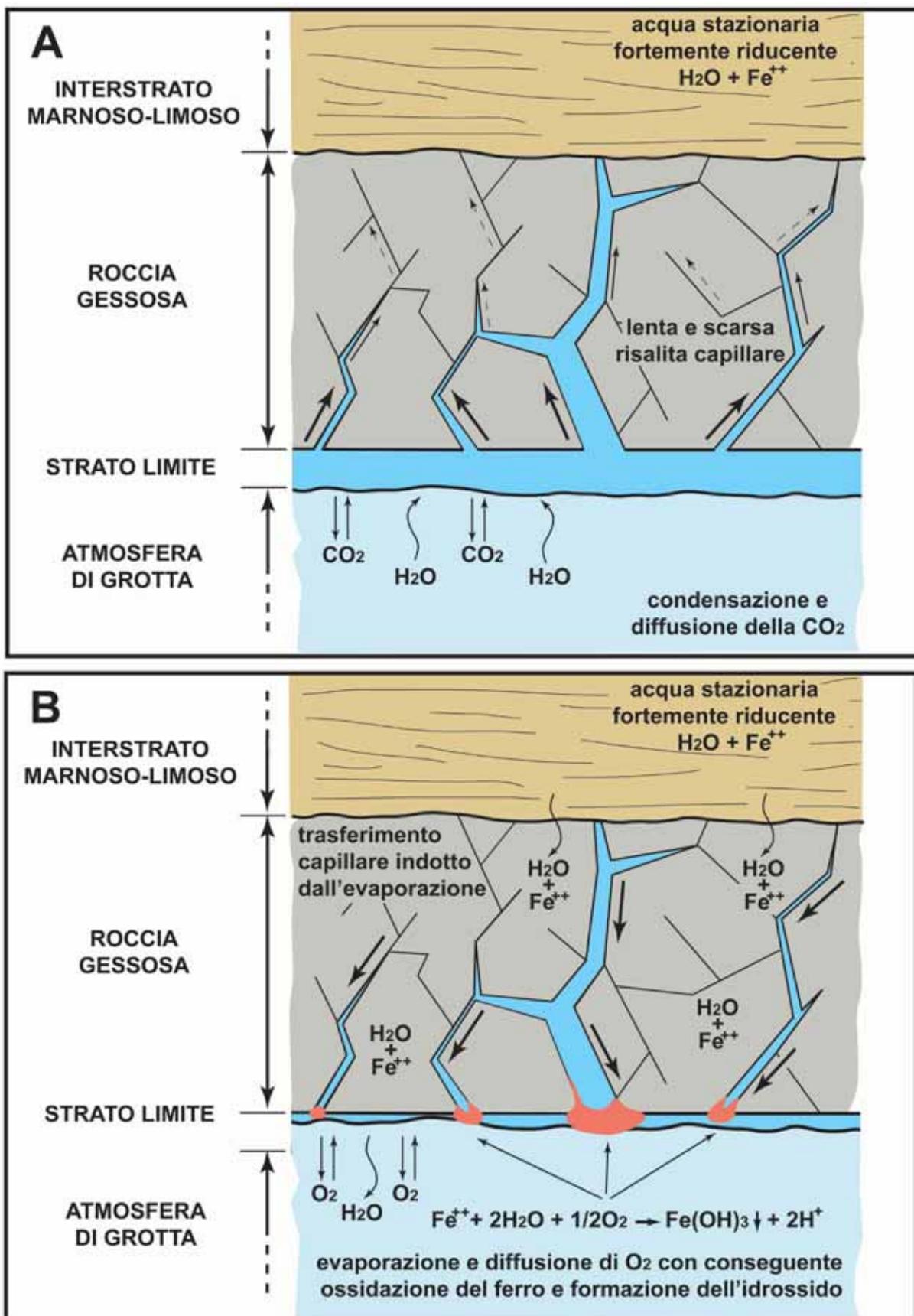


Fig. 13 – Meccanismo genetico che porta allo sviluppo di “orli di ferro”. A) processi chimico-fisici attivi durante i periodi di elevata umidità relativa: l’acqua intrappolata negli interstrati è fortemente ridotta a causa dell’ossidazione del materiale organico e quindi consente la presenza di ioni  $Fe^{++}$  in soluzione. B) processi chimico-fisici attivi durante i periodi di bassa umidità relativa: la migrazione di acqua ricca di  $Fe^{++}$  che affiora dai piani intracristallini porta allo sviluppo degli orli di ferro.

la roccia gessosa possono ospitare una certa quantità di ferro, come dimostrato dalla patina rossiccia di ossidi che spesso ricopre la superficie esterna dei grandi gessi secondari. La veicolazione del ferro, però, può avvenire solo in condizioni riducenti: infatti mentre i composti del  $\text{Fe}^{3+}$  sono del tutto insolubili e quindi non mobilizzabili, al contrario i composti del  $\text{Fe}^{2+}$  sono abbastanza facilmente solubili. È stato già più volte dimostrato che acque intrappolate nei gessi e non in contatto diretto con l'atmosfera, a causa della presenza di materiale organico che si ossida, vengono rapidamente private da tutto l'ossigeno in soluzione diventando pertanto fortemente riducenti (FORTI, ROSSI 1989), consentendo la veicolazione del ferro stesso. Non appena però queste acque arrivano in contatto con l'atmosfera di grotta, o con acque di infiltrazione rapida e quindi ancora ossigenate, immediatamente il ferro precipita dando luogo a speleotemi di ossidi-idrossidi di ferro trivalente. Per tutto quanto detto è evidente che gli "orli di ferro" si sono quindi formati nell'unica zona della galleria che era sufficientemente vicina ad una fonte di questo metallo (interstrato e/o frattura) e la mancanza assoluta di fratture ha fatto sì che la mobilizzazione delle soluzioni potesse avvenire esclusivamente per capillarità lungo i piani intercrystallini (fig. 13). Ma prima dell'inizio dell'attività estrattiva all'interno di questa galleria vi era abbastanza acqua per garantire un'umidità relativa sufficientemente alta da prevenire il richiamo per capillarità di quella intrappolata lungo i piani intracrystallini: è stato infatti dimostrato che è necessario che l'ambiente diventi realmente molto secco perché avvenga un tale fenomeno (FORTI *et alii* 2004). In conclusione, quindi, è stata la brusca variazione climatica indotta dai lavori estrattivi a permettere l'affioramento e la successiva ossigenazione di soluzioni fortemente riducenti intrappolate da

tempo all'interno della massa gessosa, mentre l'assenza di vie preferenziali per il deflusso idrico ha costretto le soluzioni ad affiorare lungo tutto l'insieme dei piani intracrystallini con conseguente precipitazione diffusa degli ossidi-idrossidi di ferro lungo gli stessi con formazione degli "orli di ferro".

### Conclusioni

È importante sottolineare come lo studio morfologico di dettaglio ha permesso di ricostruire la lunga evoluzione nel tempo delle due gallerie relitte e anche di correlarla, almeno parzialmente, all'evoluzione esterna della valle del Senio. In queste gallerie, poi, è stata osservata la formazione di speleotemi rari e a volte del tutto peculiari: il loro studio ha permesso di evidenziare come il breve lasso di tempo occorso a partire dall'intercettazione mineraria è stato quello in cui si sono attivati di gran lunga il maggior numero di processi minerogenetici che, fino a quel punto, erano stati davvero scarsi. Infine è curioso notare come lo stesso studio ha permesso di dimostrare l'esistenza, per un breve periodo della loro evoluzione, di un lago sotterraneo molto grande: lago che SCARABELLI (1851) aveva ipotizzato esistere, anche se erroneamente lo posizionava all'esterno e non all'interno di Monte Tondo.

### Bibliografia

- G. BADINO, J.M. CALAFORRA CHORDI, P. FORTI, P. GAROFALO, L. SANNA 2011, *The present day genesis and evolution of cave minerals inside the Ojo de la Reina cave (Naica Mine, Mexico)* "International Journal of Speleology" 40, 2, pp. 125-131.
- C. DALMONTE, P. FORTI, S. PIANCASTELLI 2004, *The evolution of carbonate speleothems in gypsum caves as indicators of microclimatic variations: new data*

- from the Parco dei Gessi caves (Bologna, Italy), in P. FORTI (Ed.), *Gypsum Karst Areas in the World: their protection and tourist development*, (Mem. Ist. It. Spel., s. II, vol. 16), Bologna, pp. 65-82.
- J. DE WAELE, P. FORTI, A. ROSSI 2011, *Il Carsismo nelle Evaporiti dell'Emilia-Romagna*, in P. LUCCI, A. ROSSI (a cura di), *Speleologia e geositi carsici dell'Emilia-Romagna*, Bologna, pp. 25-59.
- M. ERCOLANI, P. LUCCI, B. SANSAVINI 2004, *Esplorazione dei sistemi carsici del Re Tiberio e dei Crivellari e salvaguardia dell'area di Monte Tondo (Vena del Gesso romagnola) interessata dall'attività di cava*, in P. FORTI (Ed.), *Gypsum Karst Areas in the World: their protection and tourist development*, (Mem. Ist. It. Spel., s. II, vol. 16), Bologna, pp. 143-154.
- F. FABBRI 2011, *Studio sedimentologico dei depositi dell'area archeologica della Grotta del Re Tiberio (Vena del Gesso) e loro significato paleoambientale*, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Tesi di laurea inedita in Scienze Geologiche, A.A. 2010-2011, 51 pp.
- P. FORTI, D. DEMARIA, A. ROSSI 2004, *The last mineralogical finding in the caves of the "Gessi Bolognesi" natural Park: the secondary dolomite*, in P. FORTI (Ed.), *Gypsum Karst Areas in the World: their protection and tourist development*, (Mem. Ist. It. Spel., s. II, vol. 16), Bologna, pp. 87-94.
- P. FORTI, N. LOMBARDO 1998, *I depositi chimici del sistema carsico Grave Grubbo - Risorgente di Vallone Cufalo (Verzino, Calabria)*, "Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia", s. II, vol. 10, pp. 83-92.
- P. FORTI, E. RABBI 1981, *The role of CO<sub>2</sub> in gypsum speleogenesis: I° contribution*, "International Journal of Speleology" 11, pp. 207-218.
- P. FORTI, A. ROSSI 1989, *Genesi ed evoluzione delle concrezioni di ossidi di ferro della grotta Pelagalli al Farneto (Bologna-Italia)*, in *Atti del XV Congresso Nazionale di Speleologia*, Castellana Grotte, pp. 205-228.
- C.A. HILL, P. FORTI 1997, *Cave Minerals of the World*, (National Speleological Society), Huntsville.
- P. LUCCI, S. MARABINI 2010 *Trent'anni di speleologia nella Vena del Gesso*, in S. PIASTRA (a cura di), *Una vita dalla parte della natura. Studi in ricordo di Luciano Bentini*, Faenza, pp. 75-82.
- P. LUCCI, A. ROSSI (a cura di) 2011, *Speleologia e geositi carsici dell'Emilia-Romagna*, Bologna.
- M. MIARI 2007, *L'Eneolitico*, in C. GUARNIERI (a cura di) *Archeologia nell'Appennino romagnolo: il territorio di Riolo Terme*, Imola, pp. 30-33.
- C. NEGRINI 2007, *Re Tiberio*, in C. GUARNIERI (a cura di) *Archeologia nell'Appennino romagnolo: il territorio di Riolo Terme*, Imola, pp. 51-52.
- G. PASINI 1967, *Nota preliminare sul ruolo speleogenetico dell'erosione antigravitativa*, "Le Grotte d'Italia", s. IV, 1, pp. 75-88.
- G. PASINI 2009, *A terminological matter: paragenesis, antigravitative erosion or antigravitational erosion?*, "International Journal of Speleology" 38, 2, pp. 129-138.
- G. SCARABELLI 1851, *Note sur l'existence d'un ancien lac dans la vallée du Senio en Romagne*, "Bulletin de la Société Géologique de France" 2, 8, pp. 239-251.
- G. SCARABELLI 1872, *Notizie sulla caverna del Re Tiberio. Lettera del Senatore G. Scarabelli al Chiarissimo Signor Professore Antonio Stoppani (Nella Seduta del 25 Febbraio 1872)*, "Atti della Società Italiana di Scienze Naturali" XIV, pp. 3-20.

Ringraziamenti: si ringraziano la Saint-Gobain per aver permesso l'accesso alla cava di Monte Tondo e lo Speleo GAM Mezzano per aver messo a disposizione tutto il materiale relativo all'area di studio e avere fornito il supporto durante i sopralluoghi nelle gallerie di cava.