

Studio degli speleotemi degli ipogei artificiali: situazione attuale e prospettive future



Paolo Forti

Istituto Italiano di Speleologia, via Zamboni 67, 40126 Bologna

Riassunto

Nel 1999 è apparso su questa rivista il primo lavoro generale su questo tema, assolutamente poco considerato non solo in Italia ma anche nel resto del mondo.

Da allora le cose sono cambiate solo marginalmente, anche se si sono aperte nuove possibilità di analisi (essenzialmente paleoclimatiche e paleoambientali), basate sullo studio degli speleotemi sviluppatasi in ambiente artificiale.

In questo articolo, basandosi quasi esclusivamente sugli studi effettuati dall'autore, vengono presentati i tre ambiti della ricerca in cui il concrezionamento degli ipogei artificiali può dare i migliori risultati ed esattamente: a) studio morfologico e genetico di speleotemi peculiari, b) analisi paleoclimatiche e paleoambientali e c) meccanismi genetici di mineralizzazioni rare.

Parole Chiave: Speleotemi, cavità artificiali, ricerca scientifica

Abstract

The first general review on this topic rather neglected, not only in Italy but also abroad, was printed in this journal in 1999.

The situation is practically unaltered up to present, even if new researches (mainly related to paleo-climate and paleo-environment) can now be performed by using speleothems hosted within artificial caves.

On the basis of the research performed by the author, the three main research fields, in which chemical deposits from artificial caves can be better utilized, are shortly presented.

The morphology and genetic mechanism of a new type of speleothem (called "antistalactite") is firstly discussed, then two different case studies for paleoclimate and rain regimen are described. Finally the development of giant crystals and new cave minerals within mines and "mine caves" are reported and the growing economic interest of tourism related to them evidenced.

Keywords: Speleothems, artificial caves, scientific research

Introduzione

Nel 1999, per questa stessa rivista, scrivevo il primo articolo generale sul concrezionamento degli ipogei artificiali italiani (Forti, 1999). In quell'articolo, dopo un breve excursus sui principali lavori effettuati in quell'ambito indicavo, come campi di possibile interesse futuro, le gallerie minerarie abbandonate e le grotte di miniera e auspico un aumento generalizzato dell'interesse attorno ai fenomeni di deposizione chimica all'interno delle cavità artificiali, anche al di fuori dei ristretti ambiti nazionali.

Dopo quasi 7 anni la situazione in Italia non è cambiata: infatti, non si può certo affermare che l'interesse per questi particolari fenomeni sia cresciuto di molto.

Se si consultano infatti i principali lavori sulle cavità artificiali usciti in Italia dopo la pubblicazione del mio articolo nel 1999 (Opera Ipogea 1999-2004, Cappa 1999, Gruppo Ricerche e Studi sulle Cavità Artificiali 2002, Padovan 2005), è praticamente impossibile trovare anche un solo articolo dedicato al tema specifico degli speleotemi.

Quanto appena detto viene confermato anche dalla lettura di "Ar-

cheologia del Sottosuolo: lettura e studio delle cavità artificiali", a cura di Gianluca Padovan, pubblicato lo scorso anno. Si tratta di un interessantissimo manuale (a mia conoscenza il primo in assoluto) che intende dare un quadro generale sulle metodologie d'esplorazione, studio, documentazione e catalogazione degli ipogei artificiali. Ebbene, mentre per esempio alla fauna viene dedicato un intero capitolo di una quindicina di pagine, i depositi chimici non vengono assolutamente presi in considerazione, neanche quando si accenna a problemi di paleoclimi o paleosismici-

tà e di datazione radiometrica. L'unico campo dove qualche cosa sembra essersi mosso è quello delle miniere abbandonate, anche e soprattutto per l'interesse sempre crescente per le "grotte di miniera" non solo in Italia, ma anche all'estero, interesse che si è concretizzato con lo svolgimento, alla fine del 2004, del Primo Simposio Internazionale sulle Grotte di Miniera (De Waele & Naseddu, 2005).

Il presente articolo è stato organizzato in tre differenti paragrafi per coprire quelli che a me paiono essere i tre principali campi d'interesse attuale e futuro per gli speleotemi degli ipogei artificiali (nuove forme di concrezionamento, speleotemi e paleoclimi, mineralizzazioni rare). Va detto preliminarmente che nella loro stesura sono stato ancora costretto ad utilizzare, quasi esclusivamente, materiale desunto dalle mie ricerche personali, vista la carenza di altri ricercatori italiani realmente attivi in questo campo.

Nuove forme di concrezionamento

L'interesse e la varietà dei concrezionamenti carbonatici presenti negli ipogei artificiali sono noti da vari anni. In alcuni casi poi, questi speleotemi si sono rivelati essere assolutamente nuovi e peculiari (Forti 1999).

In realtà, se si tiene conto della scarsità di ricerche effettuate in questi ambienti, se paragonate a quelle che vengono effettuate nelle cavità naturali, le grotte artificiali risultano essere oggi forse l'ambiente in cui è più facile imbattersi in concrezioni ancora non descritte geneticamente e/o morfologicamente.

E' il caso, per esempio, delle antistalattiti, nuova forma di concrezionamento appena scoperta nell'Acquedotto Romano della Val di Setta (Forti & Demaria, 2006) e di cui qui riportiamo succintamente la descrizione morfologica ed il meccanismo evolutivo.

Le antistalattiti

L'acquedotto romano della Val di Setta (Bologna) è una struttura

che si sviluppa per oltre 12 chilometri e ospita una vasta gamma di concrezionamenti, essenzialmente carbonatici, alcuni dei quali si erano già dimostrati essere assolutamente peculiari (Forti 1988).

Recentemente il Gruppo Speleologico Bolognese e l'Unione Speleologica Bolognese hanno intrapreso, per conto di HERA uno studio e una documentazione di dettaglio di tutto l'acquedotto romano al fine di un suo reinserimento funzionale nella rete acquedottistica bolognese. In questo contesto è stato possibile studiare in dettaglio alcuni particolari speleotemi presenti esclusivamente in un breve tratto di galleria, che fino ad oggi non era mai stato analizzato da questo punto di vista (Forti & Demaria, 2006).

A prima vista queste concrezioni (fig. 1) potevano rassomigliare a stalagmiti parietali, ma con l'acqua che li alimenta che affiora dalla sommità ove si poteva formare un microgour del diametro tra 0.5 e 2 centimetri.

La sistematica analisi di molte di queste concrezioni ha permesso di appurare come costantemente, al di sotto del gour sommitale, esista un canalicolo largo 6-10 mm che, impostato sull'asse della concrezione, la percorreva per quasi tutta la sua lunghezza.



Figura 1 - Particolare di una antistalattite dell'Acquedotto Romano della Val di Setta: è evidente l'ampio foro di alimentazione e la struttura parietale a microgour.

In pratica questi speleotemi assomigliano abbastanza a stalagmiti cave (Hill & Forti 1997), o a geysermiti (Chromy 1927), ma non possono assolutamente essere inserite in nessuno di questi due tipi di concrezioni. Lo studio di dettaglio di questi speleotemi ha permesso di definirli come un tipo di concrezione del tutto nuovo, che è stato chiamato antistalattite, per il fatto che, come le stalattiti, si sviluppa grazie all'acqua che esce

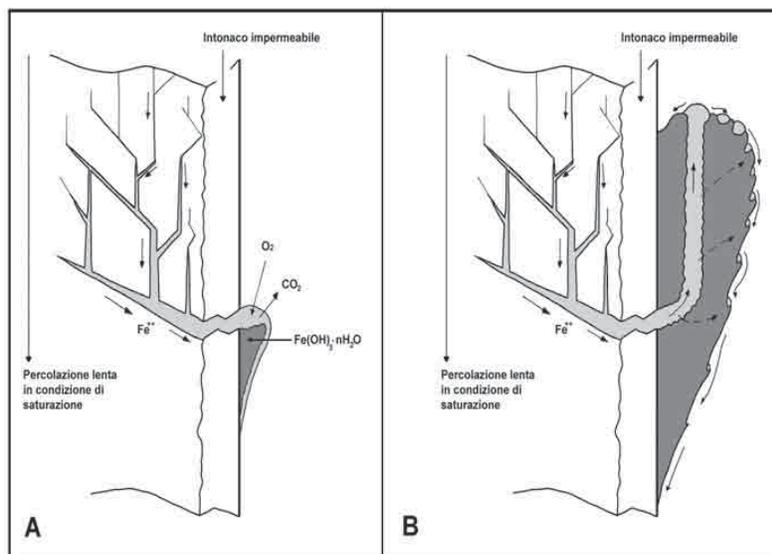


Figura 2 – Evoluzione di una antistalattite: (A) inizialmente l'idrossido idrato di ferro si deposita a valle del foro nella parete, ma l'accumulo di materiale fa rapidamente ruotare il canalicolo interno verso l'alto (B) (da Forti e Demaria 2005).

da un canalicolo di alimentazione centrale, ma, a differenza di queste, il moto dell'acqua nel canalino è ascendente e non discendente.

Infine la stranezza delle antistalattiti dell'acquedotto romano investe l'essenza stessa degli speleotemi che possiedono una consistenza pastosa e un colore da rosso vivo a marrone rossiccio.

L'analisi di laboratorio ha messo in evidenza l'esistenza di bande interne di accrescimento, submillimetriche, chiaramente costituite di due differenti materiali (calcite e idrossido ferrico), che si alternano senza una ben definita frequenza.

In realtà le lamine di calcite, tendono ad infittirsi e ad ispessirsi verso l'esterno della concrezione, mentre procedendo verso l'interno le stesse diventano non solo più rade e sottili ma chiaramente discontinue e, infine, la parte centrale risulta esclusivamente composta da materiale rosso-brunastro, costituito essenzialmente da ossidi-idrossidi idrati di ferro praticamente privi di struttura cristallina.

La formazione delle antistalattiti (fig. 2) è stata possibile grazie a condizioni abbastanza particolari che possono essere così riassunte: 1) percolazione lenta di acqua fortemente riducente in condizioni di saturazione, 2) presenza di intonaco impermeabile che permette la creazione di un certo carico idrodinamico all'interno delle fratture che alimentano le antistalattiti; 3) formazione di un precipitato di idrossido idrato di ferro che favorisce la rotazione verso l'alto del canalicolo di alimentazione.

Rimane comunque da spiegare il perché i livelli carbonatici si infittiscano ed aumentino di spessore verso l'esterno delle concrezioni. La spiegazione della distribuzione non omogenea dei livelli carbonatici dipende strettamente dal particolare meccanismo evolutivo di queste concrezioni.

Infatti il carbonato di calcio non può precipitare contestualmente all'idrossido ferrico, dato concomitantemente si ha un'acidificazione della soluzione e quindi la formazione di una lamina di calcite può iniziare solo quando l'idrossido ferrico ha cessato di precipitare.

Questo avviene essenzialmente quando il flusso idrico è estremamente lento o addirittura si ferma del tutto e la precipitazione della calcite sarà causata essenzialmente da evaporazione ed avverrà quindi sulla superficie esterna dell'antistalattite.

Una volta ripristinate le condizioni normali di flusso idrico lo sviluppo della banda di calcite si arresterà e riprenderà a depositarsi l'idrossido di ferro.

In questo modo si dovrebbero venire a formare una alternanza di lamine di idrossido ferrico e di calcite il cui relativo spessore dovrebbe dipendere solo dalla relativa persistenza di periodi di presenza o di assenza di flusso idrico. In realtà, però le bande di calcite non sono distribuite in maniera omogenea.

Il motivo per cui non vi è questa corrispondenza e le bande di calcite si trovano essenzialmente concentrate verso la superficie esterna con spessori che aumentano verso quest'ultima è la conseguenza di un altro fenomeno che si instaura all'interno dell'acqua immagazzinata nel corpo dell'antistalattite dal momento che non viene più rin-

novata o il rinnovamento è troppo lento l'ossidazione del materiale organico commisto agli ossidi di ferro. Questo processo porta alla formazione di anidride carbonica che migrerà dal centro dell'antistalattite verso l'esterno per effetto della capillarità venendo quindi in contatto con le bande più interne di calcite, che conseguentemente verranno corrose. In questo modo acqua ricca in ioni di calcio e bicarbonato migrerà all'interno dello speleotema fino a raggiungerne la superficie esterna dove la diffusione dell'anidride carbonica nell'atmosfera causerà la precipitazione della calcite (Fig. 3).

Questo meccanismo di corrosione interna e deposizione esterna perfettamente si accorda con le osservazioni sperimentali relative alla distribuzione e lo spessore delle bande di calcite nelle antistalattiti. L'oggettiva difficoltà che tutte queste condizioni, idrodinamiche ed idrochimiche, si realizzino contemporaneamente spiega come mai le antistalattiti siano state osservate solo in piccolissimi tratti dell'acquedotto romano della Val di Setta.

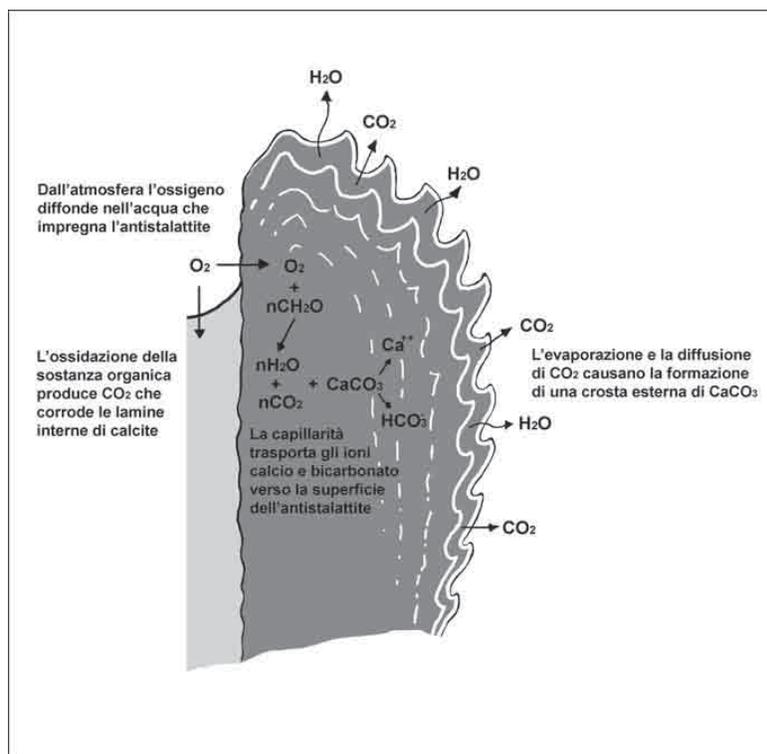


Figura 3 - Meccanismo che permette la formazione di bande esterne di calcite e la concomitante corrosione di quelle preesistenti interne (da Forti e Demaria 2005).



Figura 4 – Visione generale del concrezionamento sviluppatosi al di sopra di un muro di tamponamento costruito durante i lavori di riadattamento funzionale dell'acquedotto terminati nel 1881: al centro in basso sono evidenti i mattoni utilizzati nel 1880.

Speleotemi e paleoclimi

E' noto che gli speleotemi sono divenuti in questi ultimi anni lo strumento di indagine paleoclimatica e paleoambientale più importante in assoluto per il Quaternario recente.

Uno dei problemi che spesso limita questo tipo di studi è la difficoltà di inquadrare con esattezza in un ben determinato lasso temporale lo sviluppo delle concrezioni.

Ora gli ipogei artificiali offrono certamente una possibilità in più, dato che, di norma, la data della loro costruzione è ben conosciuta da fonti storiche e quindi l'inizio del concrezionamento è ovviamente fissato con sicurezza.

Per ricerche relative al passato più recente (da 0 a 2000 anni) le cavità

artificiali sono quindi ideali sia per studi paleoclimatici sia anche e soprattutto per indagini sulle variazioni del regime delle piogge anche a seguito del "global change".

Nonostante questo, solamente nel passato più recente sono apparsi in bibliografia alcuni lavori basati, non come normalmente avviene su speleotemi di grotte naturali, ma bensì sulle concrezioni di cavità artificiali.

Qui di seguito sono riportati brevemente due di questi studi, ambedue relativi all'analisi del rapporto esistente tra precipitazioni e sviluppo delle bande di accrescimento all'interno di speleotemi di ipogei artificiali.



Figura 5– Sezione lucida della concrezione con messa in evidenza delle bande di accrescimento (da Forti e Demaria 2005).

La concrezione sul mattone dell'acquedotto romano della Val di Setta

Durante lo studio e la documentazione di dettaglio di tutto l'acquedotto romano della Val di Setta (Bologna) è stato possibile studiare una piccola colata (Fig. 4) che si era sviluppata al di sopra di un tamponamento di mattoni risalente al lavoro di restauro completato nel 1881 (D'Alfonso 1985)

L'interesse per la concrezione sviluppatasi sul muro di tamponamento del 1880 deriva dal fatto che è univocamente definito il momento di inizio della sua evoluzione e pertanto è abbastanza agevole effettuare studi sulla sua evoluzione in funzione della variazione dei parametri climatici (essenzialmente la piovosità) negli ultimi 125 anni.

All'inizio del 2005 (Forti 2006) è stato prelevato un frammento della colata che ricopriva i mattoni del 1880 facendo attenzione che tutta la concrezione fosse stata campionata.

La sezione lucida (Fig. 5) è stata utilizzata per realizzare una scansione ad alta risoluzione per permettere di ottenere una immagine ad un ingrandimento utile alla misurazione dello spessore delle singole bande.

E' stato così possibile individuare al suo interno oltre 280 bande di accrescimento. Poiché teoricamente ogni singolo anno dà luogo a una coppia di lamine (una chiara e una scura) (Genty & Quinif 1996) è evidente che, sempre teoricamente, le lamine della nostra concrezione avrebbero dovuto essere solamente 248. Il maggior numero di bande è una conseguenza del fatto che in alcuni anni particolari, a seguito di scarse precipitazioni e/o concentrazione delle stesse in 2 o più periodi distanti tra loro, la concrezione si è completamente asciugata interrompendo così l'evoluzione della lamina e causando la genesi di una nuova banda non appena ricominciava l'alimentazione idrica. I dati pluviometrici disponibili sull'intero periodo (1880-2004) sono relativi al valore cumulativo annuale e si riferiscono alla stazione di Bologna centro: in generale nel

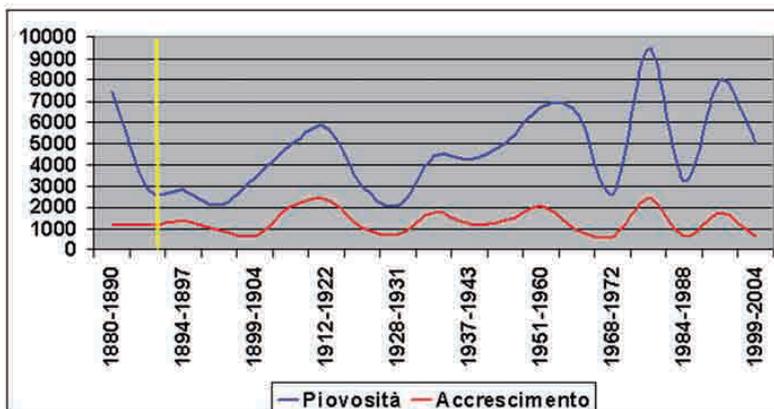


Figura 6 – Evoluzione della concrezione dell'acquedotto romano (in micron) e piovosità cumulativa (in centimetri): è evidente lo stretto controllo esercitato dalle piogge sullo sviluppo dello speleotema. Solo nel primo periodo (1880-1890) a sinistra della linea verticale, l'accrescimento è stato inferiore a causa della porosità del supporto (da Forti 2006).

periodo considerato la quantità di pioggia caduta annualmente è stata molto variabile passando da un minimo di 357 mm nel 1945 ad un massimo 1252 nel 1898 (Fig. 4). La mancanza di dati mensili ha reso oggettivamente impossibile identificare in maniera univoca a quale periodo dovessero essere attribuite singolarmente le bande più sottili, che chiaramente si erano sviluppate in un lasso di tempo inferiore all'annualità.

A questo punto si è proceduto a rappresentare graficamente l'evoluzione della concrezione in funzione della pioggia caduta (Fig. 6): è assolutamente evidente la stretta correlazione esistente tra precipitazioni e accrescimento.

Solamente nel primo pacchetto periodo (1880-1890), infatti, l'accrescimento è risultato indipendente dalla quantità d'acqua caduta. D'altro canto questo è assolutamente logico se si tiene presente il fatto che la concrezione ha dovuto iniziare ad accrescersi su un substrato costituito da mattoni, quindi altamente poroso. In queste condizioni, infatti, nei primi anni una buona parte del materiale che si andava depositando non veniva utilizzato per formare le bande di accrescimento, ma precipitava all'interno della porosità del mattone stesso, in pratica sottraendo materiale per la costruzione della concrezione.

La comparazione di dettaglio delle singole bande di accrescimento con

le relative precipitazioni annuali ha permesso di appurare che gli accrescimenti più marcati (corrispondenti alle lamine più spesse) si sono avuti in periodi in cui le precipitazioni sono state costanti e uniformi.

Nel caso di precipitazioni al di sotto della media, o addirittura scarse, o comunque periodi di prolungata siccità, l'accrescimento della lamina poteva anche arrestarsi a causa dell'essiccamento completo della sua superficie. Un nuovo evento piovoso, ovviamente, faceva ripartire il concrezionamento con la formazione di una seconda lamina, così da avere più lamine molto sottili per un singolo anno: l'aumento del numero delle bande di accrescimento rispetto al totale degli anni di sviluppo della colata è quindi essenzialmente da mettere in relazione con anni particolarmente siccitosi in cui poteva accadere che la superficie della concrezione si asciugasse completamente una o più volte.

All'opposto precipitazioni molto elevate non contribuiscono proporzionalmente allo sviluppo della lamina: infatti anni particolarmente piovosi e/o eventi piovosi eccezionali, hanno dato luogo a lamine proporzionalmente meno spesse di quelle sviluppatesi in anni ideologicamente più "normali". Questo dipende dal fatto che, con un alto flusso di alimentazione, il film d'acqua scorre sulla concrezione ad una velocità tale da impedirgli

di depositare tutto il carico di carbonato di calcio che teoricamente dovrebbe.

Sulla base di questi risultati si può quindi affermare che le concrezioni di carbonato di calcio dell'acquedotto romano della Val di Setta possono essere utilizzate per ricostruzioni delle variazioni del regime delle piogge su intervalli temporali medio lunghi purché si abbiano a disposizione i relativi dati pluviometrici.

Le Pisoliti di aragonite della Miniera Reforma (Messico)

Durante lo studio multidisciplinare effettuato dall'Associazione La Venta (Badino et Al. 2004) all'interno della miniera Reforma (Quattro Cienegas, Coahuila, Mexico), sono state osservate (Forti 2004a) una serie di vaschette concrezionate al cui interno vi erano pisoliti bianchissimi (Fig. 1) di dimensioni variabili da 1-2 mm a oltre 1 cm di diametro.

Tenendo presente che la galleria in cui si sono sviluppati questi speleotemi è stata utilizzata per le attività minerarie fino a circa 50 anni fa, è evidente che l'età di questi speleotemi non può superare il mezzo secolo.

Lo studio delle perle di grotta della Miniera Reforma ha evidenziato che esse presentano una particolarità che le rende in pratica uniche al mondo: al loro interno, infatti, non sono assolutamente distinguibili alcuna banda di accrescimento.

Ora l'assenza delle lamine concentriche può essere indotta esclusivamente da condizioni ambientali particolari che possono essere così riassunte:

- 1- le pisoliti devono essere alimentate in maniera costante per tutto il periodo della loro crescita
- 2- la composizione chimica delle acque di alimentazione deve rimanere invariata nel tempo (non risentendo dell'alternanza delle stagioni)

Queste condizioni all'apparenza semplici sono in realtà di difficilissima realizzazione in natura e questo spiega come mai, sino ad ora, non erano mai state osservate



Figura 7 – Foto delle vaschette con pisoliti di aragonite della Miniera Reforma (a sinistra) e sezione di una pisolite (a destra) in cui è evidente l'assenza delle caratteristiche bande di accrescimento.

concrezioni del tutto prive di bande di accrescimento interne.

Ma è proprio il clima estremamente arido di Quatro Cienegas che ha permesso la loro evoluzione: infatti le scarsissime precipitazioni, la fortissima evapotraspirazione, la permeabilità non certo eccezionale degli affioramenti dell'area della Miniera rendono impossibile che le acque meteoriche (cioè delle piogge) possano garantire una sia pur minima ma continua alimentazione nelle vaschette dove si sono sviluppate le pisoliti.

E' evidente quindi che le acque, che affiorano e gocciolano costantemente nel profondo della miniera di Reforma, non derivano assolutamente dalle acque che si infiltrano a seguito degli eventi piovosi.

Per riuscire a definire la fonte principale delle acque di percolazione al fondo della miniera Reforma, quindi, bisognerà tener presente sia i grandi sbalzi termici giornalieri, che sono caratteristici del clima subarido di Quatro Cienegas sia il fatto che gli scavi minerari hanno interessato grandi volumi a differenti livelli all'interno della montagna tutti collegati direttamente tra loro e che presentano una fortissima inerzia termica. In queste condizioni, infatti, il fenomeno della condensazione è sicuramente molto attivo e tale da giustificare la costanza del gocciolamento in profondità.

D'altro canto il fenomeno della condensazione è in grado di giustificare anche l'assenza di ciclicità nei fenomeni di concrezionamento e quindi, in ultima analisi, l'assen-

za di bande di accrescimento all'interno delle concrezioni. Infatti l'acqua di condensa è necessariamente in equilibrio con l'anidride carbonica presente nell'atmosfera della miniera, ma la concentrazione di quest'ultima è praticamente indipendente dei cicli stagionali esterni, vista la stabilità del sistema e la quasi totale assenza di percolazione da infiltrazione meteorica. Sulla base di tutto quanto detto le pisoliti della miniera Reforma hanno un interesse che travalica lo stretto ambito locale: infatti hanno fornito un metodo per poter, almeno qualitativamente se non quantitativamente, discriminare, sulla base della presenza più o meno accentuata delle lamine di accrescimento all'interno di uno speleotema, la prevalenza delle acque di condensazione su quelle di infiltrazione meteorica.

Mineralizzazioni rare

Parlando in maniera del tutto generale bisogna ammettere che la composizione mineralogica degli speleotemi presenti nella stragrande maggioranza degli ipogei artificiali è ancora meno variabile di quanto avvenga per le grotte naturali, ove circa il 97% di tutti i depositi chimici sono composti da calcite e, subordinatamente, da aragonite (Hill & Forti 1997). In pratica, se si eccettuano i minerali eventualmente correlati al guano e alla ossa (fosfati essenzialmente, ma anche solfati), comunque rari, gli unici concrezionamenti sono di carbonato di calcio.

Discorso assolutamente differente è quello relativo alle miniere abbandonate, che si stanno rivelando degli eccezionali ambienti minero-genetici anche e soprattutto per merito delle "grotte di miniera", cavità naturali prive di accesso naturale, che sono accessibili solo grazie al fatto che sono state intersecate da gallerie minerarie.

Da molti anni appassionati e collezionisti visitano le miniere dismesse essenzialmente con lo scopo di procurarsi campioni mineralogici preziosi o semplicemente rari: infatti all'interno delle gallerie minerarie, e molto di più all'interno delle "grotte di miniera" possono svilupparsi molte reazioni di ossidazione che, nel tempo, portano allo sviluppo di depositi chimici secondari assolutamente peculiari e spesso unici. Purtroppo però lo scopo stesso della ricerca di campioni da collezionare è in contrasto con la pubblicizzazione delle scoperte effettuate, pertanto la bibliografia relativa è decisamente scarsa e lacunosa.

Da ultimo le miniere abbandonate stanno diventando un importante oggetto economico, dato che in questi ultimi anni si va diffondendo sempre più lo sviluppo di un turismo specificamente dedicato alle miniere abbandonate in generale e alle "grotte di miniera" in particolare, in cui ovviamente gli speleotemi sono una parte fondamentale. Per dare un'idea almeno schematica dell'importanza degli speleotemi di miniera, qui di seguito verranno trattati, attraverso esempi specifici, i tre principali aspetti di interesse: la presenza di cristallizzazioni di dimensioni inusuali, quella di mineralizzazioni rare od esclusive e infine le potenzialità turistiche legate a questi ambienti.

I cristalli giganti

Le grotte di miniera hanno dimostrato di essere gli ambienti dove possono essere osservati i più grandi cristalli del mondo (Forti 2004b), che possono arrivare, come nel caso dei gessi della miniera di Naica in Messico a quasi 10 metri di lunghezza e 1.5 metri di diametro (Fig. 8), o nel caso della Geode gigante di Pulpì nella miniera di Pilar de Jaravia



Figura 8 – Cuevas de los Cristales, Miniera di Naica, Messico: i cristalli di gesso più grandi del mondo (Foto Paolo Pettrignani, La Venta).

in Spagna (Calaforra & Garcia-Guinea, 2000) a cristalli sicuramente più piccoli di quelli di Naica (1-2 metri massimo), ma di una perfezione cristallina e di una trasparenza assolutamente impressionante.

Per capire come si siano potuti sviluppare questi enormi cristalli bisogna considerare i processi minerogenetici che ne hanno condizionato lo sviluppo (Badino & Forti 2005).

La bassa o bassissima sovrassaturazione è la premessa fondamentale per avere grandi cristalli: in queste condizioni infatti l'accrescimento è favorito rispetto alla nuova nucleazione.

Un ulteriore impulso a questo processo viene dall'alta solubilità del gesso che, nel caso si arrivi al limite di saturazione (soluzione né aggressiva né concrezionante), rende possibile una rapida "cannibalizzazione" dei germi cristallini più piccoli da parte di quelli maggiori. Una volta chiarito il contesto in cui si possono sviluppare i grandi

cristalli di gesso diviene abbastanza semplice definire le condizioni al contorno necessarie per il loro sviluppo.

In generale essi si saranno formati dove le condizioni ambientali si sono mantenute più costanti possibile per un lungo lasso di tempo in modo da conservare inalterata la sovrassaturazione, seppure molto bassa, rispetto al gesso. Tali condizioni sono quelle caratteristiche di acque profonde, ricche in solfuri, che risalgono lentamente sino ad incontrare un acquifero meteorico, con cui non possono miscelarsi fisicamente, data la loro molto maggiore mineralizzazione e quindi densità, ma con cui possono avere solo scambi ionici attraverso la diffusione: in queste condizioni mancando la miscelazione la temperatura rimane stabilissima.

Ma l'ossigeno presente nell'acquifero meteorico, diffondendo lentamente nel sottostante acquifero termale ossida lo ione solfuro a solfato che, reagendo a sua volta

con gli ioni calcio già presenti nella soluzione, causa una sovrassaturazione molto bassa rispetto al gesso con conseguente lenta precipitazione freatica.

Queste condizioni devono mantenersi per un tempo molto lungo per dare modo ai cristalli di svilupparsi sino a raggiungere dimensioni inusitate.

Ma come mai nella Miniera di Naica più si va verso il profondo e più i cristalli diventano grandi?

Questo dipende dal fatto che aumentando la distanza dall'interfaccia tra l'acquifero termale e quello meteorico i processi di diffusione diventano gradualmente meno efficienti e pertanto la sovrassaturazione tende progressivamente a diminuire. Diminuendo l'energia di cristallizzazione i processi di precipitazione si fanno da un lato più lenti e dall'altro permettono lo sviluppo di minori germi cristallini.

Va comunque detto che continuando ad aumentare la profondità si dovrà necessariamente raggiunge-

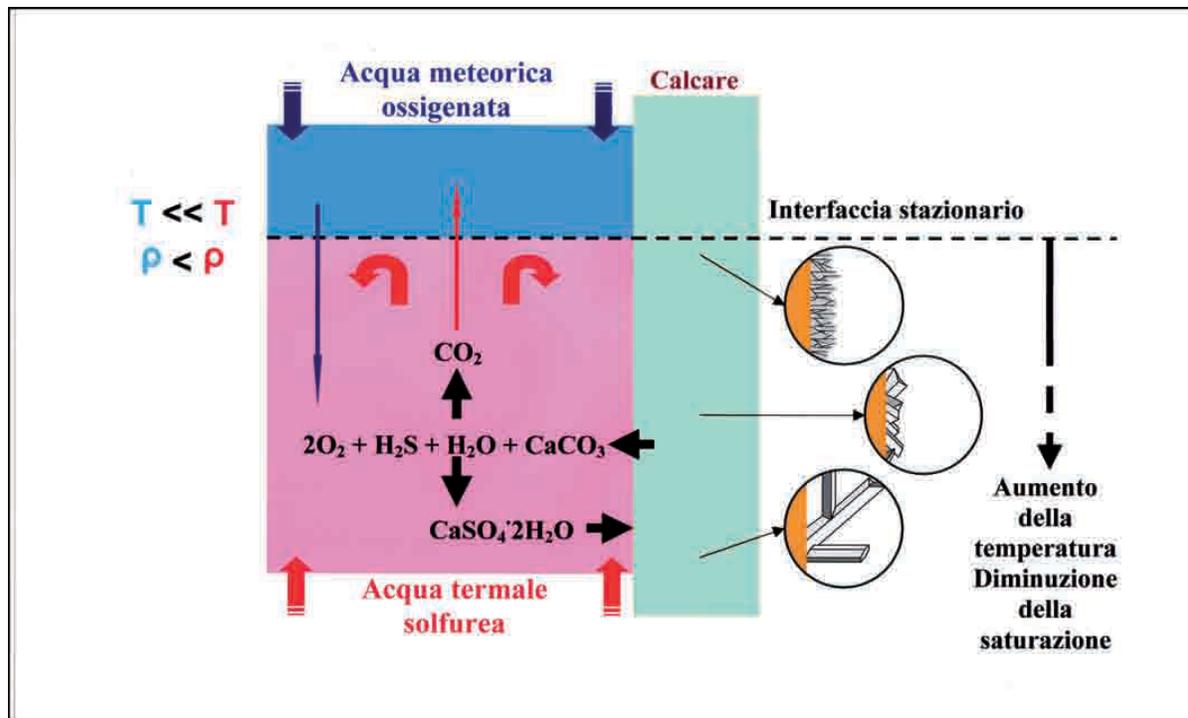


Figura 9 - Schema evolutivo per i grandi cristalli di gesso della miniera di Naica (Messico): la risalita di acque profonde calde e ricche in solfuri, a causa della differenza di densità, si arresta all'interfaccia con l'acquifero meteorico ossigenato; la diffusione dell'ossigeno causa l'ossidazione dello ione solfuro a solfato con conseguente sovrassaturazione rispetto al gesso, che precipita sotto forma di druse di grandi cristalli, la cui dimensione aumenta in maniera inversamente proporzionale alla sovrassaturazione (da Badino & Forti 2005).

re, prima o poi, una zona in cui la precipitazione del gesso non può più avvenire a causa dell'insufficiente diffusione ionica e quindi le eventuali cavità naturali risulteranno completamente spoglie.

I nuovi minerali della Grotta di Santa Barbara

Santa Barbara (Iglesias, Sardegna) è una grotta di miniera tra le più conosciute al mondo anche perché sulle sue pareti si trovano forse i più bei cristalli di barite (Fig. 1) formati all'interno di una cavità naturale (Forti & Perna, 1982; Hill & Forti, 1997; De Waele et al. 2001). Il sistema carsico si è sviluppato esattamente al contatto di un giacimento di polisolfuri (in prevalenza galena) nella miniera di San Giovanni. La grotta ospita grandi concrezionamenti ancora attivi di calcite e/o aragonite che ricoprono parzialmente le druse di barite. Sulle pareti del fornello che collega la galleria mineraria alla grotta è possibile osservare una sequenza di depositi chimici di circa 7 metri di spessore che a grandi

linee può essere suddivisa in quattro parti ed esattamente, dal basso verso l'alto: a) uno speleotema subacqueo tipo cave-clouds composto essenzialmente di calcite; b) un sedimento di aspetto terroso, stratificato, con periodiche brusche variazioni cromatiche dal giallo arancio al nero; c) uno strato di cristalli euedrali di barite di lunghez-

za fino a 7 centimetri, di colore dal giallo mielato al nocciola; d) una concrezione vadosa di calcite e/o aragonite ancora attiva (crostone stalagmitico) che costituisce il pavimento attuale della grotta. Pochi anni dopo la scoperta di questa prima cavità avvenuta nel 1952, è stato effettuato uno studio mineralogico sulle barite che rappresen-

Tab. 1 - Minerali di grotta delle concrezioni del sistema carsico di S.Barbara

Minerale	Formula	Sistema
Aragonite	CaCO ₃	Rombico
Barite	BaSO ₄	Rombico
Calcite	CaCO ₃	Trigonale
Calcofanite	ZnMn ₃ O ₇ •3H ₂ O	Trigonale
Caolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Triclino
Cerussite	PbCO ₃	Rombico
Cesarolite	PbMn ₃ O ₇ •H ₂ O	Esagonale ?
Clorite	(Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Monoclino
Coronadite	PbMn ₈ O ₁₆	Monocl. pseudotetragonale
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	Trigonale
Edifane	Ca ₂ Pb ₃ (AsO ₄) ₃ Cl	Esagonale
Eterolite	ZnMn ₂ O ₄	Tetragonale
Galena	PbS	Cubico
Goethite	-FeO(OH)	Rombico
Idroeterolite	Zn ₂ Mn ₄ O ₈ •H ₂ O	Tetragonale
Illite	K _{0.65} Al _{2.0} 0.65Si _{3.35} O ₁₀ (OH) ₂	Monoclino
Quarzo	SiO ₂	Trigonale
Sfalerite	ZnS	Cubico

tano l'elemento più caratterizzante della grotta di Santa Barbara 1 (Rossetti & Zucchini, 1957). Nel 2002 è iniziata una ricerca multidisciplinare per definire l'evoluzione speleogenetica di questo sistema carsico attraverso lo studio di dettaglio degli speleotemi ospitati (Forti et Al. 2005).

Tali analisi hanno messo in evidenza il notevole interesse compositivo della sequenza sedimentaria rivelatasi ricca di differenti specie mineralogiche, anche rare (Tab. 1). Gli aspetti mineralogicamente più rilevanti nella sequenza deposizionale del sistema carsico di Santa Barbara risultano essere tre e riferibili:

1- alla parte basale dove la messa in posto dei giacimenti ha portato solfuri metallici a depositarsi all'interno di vuoti naturali già parzialmente concrezionati;

2- ai due episodi che nella sequenza hanno favorito la formazione di barite;

3- alla deposizione di ossidi ed idrossidi metallici avvenuta nell'intervallo tra i due eventi di formazione della barite (Figg. 10-11). La presenza di galena all'interno della concrezione e la scarsa alterazione della calcite su cui i solfuri di Pb e Zn si sono depositati dimostrano che tali mineralizzazioni si sono messe in posto quando il sistema carsico era già formato e che la loro genesi è avvenuta ad una termalità tale da non modificare in modo rilevabile i caratteri chimici e fisici della concrezione carbonatica ospite.

In una geode intercettata da una delle carote, associati a bei romboedri di calcite ed a cubetti di galena si possono osservare cristalli anche millimetrici di cerussite, vitrei, semitrasparenti, con perfetto abito prismatico e terminazione bipiramidale. La presenza contemporanea di individui ben cristallizzati di questi minerali ne testimonia una genesi in un ambiente di acque termali.

Dal punto di vista mineralogico, però, i risultati più interessanti sono quelli relativi ai depositi bruno-nerastri presenti nella "tasca" attraversata dal fornello, studiati in dettaglio per la prima volta.

Gli ossidati, concentrati in tasche

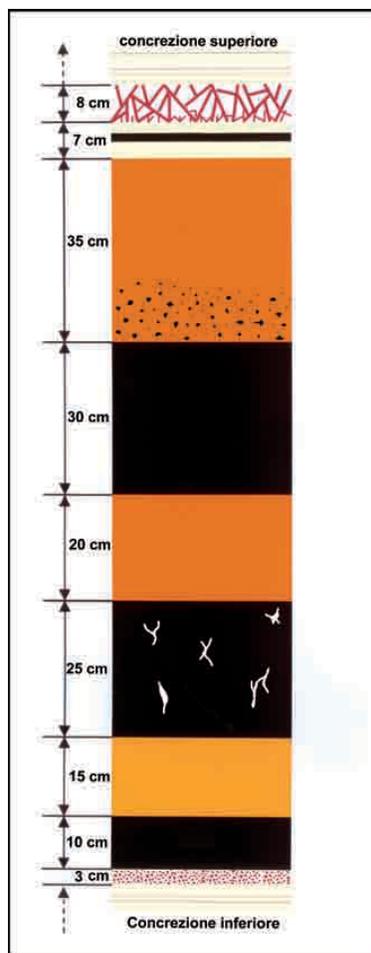


Figura 10 – Sequenza stratigrafica del deposito terroso all'interno della concrezione di Santa Barbara (Iglesias) (da Forti et Al. 2005).

irregolari nel fornello, si presentano sia cementati che in masse incoerenti, da granulari a terroso polverulente, di colore variabile dal giallo ocra al rosso bruno, sino al nero intenso. Le numerose diffrattometrie e le analisi SEM hanno evidenziato trattarsi di ossidi ed idrossidi di Fe, in prevalenza amorfi, con barite, calcite, cerussite, dolomite, galena, goethite, quarzo, e la presenza di fillosilicati in subordine. Particolarmente interessanti sono risultati gli ossidati terrosi di colore nero intenso nei quali le analisi röntgenografiche con camera Gandolfi, con pose superiori alle 36 ore, associate ai dati chimici EDS hanno evidenziato la presenza di minerali di Mn, Zn e Pb del tutto nuovi per l'ambiente di grotta. Tra questi vanno ricordati la cesarolite, che si presenta

sotto forma di granuli subsferici picei, con esfoliazione cipollare, l'edifane, sotto forma di minuti individui prismatici esagonali, singoli o geminati, cavi al loro interno e di colore grigio chiaro, l'eterolite e idroeterolite in aggregati coralloidi di minute sferulette di colore grigio metallico e la calcofanite in frammenti compatti, terrosi, di colore giallo arancio, dispersi nel materiale nero.

Lo studio multidisciplinare del sistema carsico di Santa Barbara, basato anche sulle analisi mineralogiche appena descritte, ha permesso di evidenziarne la complessa evoluzione caratterizzata da uno sviluppo speleogenetico che si è protratto per alcune centinaia di milioni di anni ed è stato contraddistinto da cinque differenti cicli carsici, confermando l'ipotesi che riteneva questa cavità tra le più antiche sino ad ora conosciute.

Uno dei motivi che aveva resa famosa nel mondo la grotta di Santa Barbara, a prescindere dalla sua età, era l'interesse mineralogico suscitato dalla eccezionale presenza dei perfetti cristalli euedrali di barite che ne tappezzavano le pareti. Questo studio ha permesso di verificare, da un lato che, la formazione di questo minerale non è legata ad un unico evento, e, dall'altro, di accertare la presenza di rare fasi cristalline, senza dubbio meno appariscenti dal punto di vista estetico, ma non meno importanti da quello scientifico. Gli ossidati depositatisi tra i due eventi di formazione delle bariti, infatti sono caratterizzati al loro interno dalla presenza di alcuni minerali assolutamente sconosciuti per l'ambiente di grotta. Il complesso di Santa Barbara riveste pertanto una importanza fondamentale non solo dal punto di vista dell'evoluzione carsica, ma anche da quello prettamente mineralogico.

Questo studio ha permesso anche di migliorare le conoscenze sui processi evolutivi che hanno interessato i giacimenti minerali all'interno della Miniera di San Giovanni. Per la prima volta infatti è stata dimostrata una mobilitazione parziale dei solfuri sinsedimentari con deposizione di galena

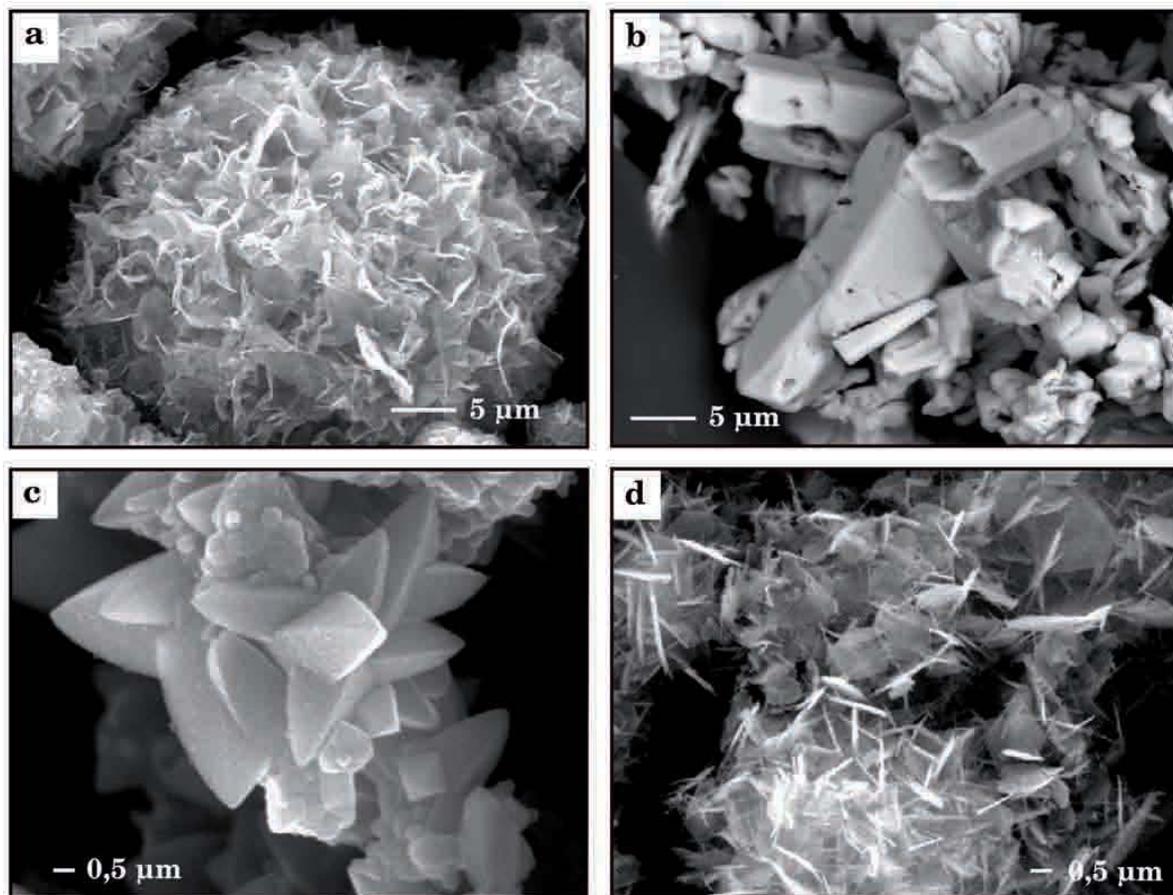


Figura 11 - Immagini al microscopio elettronico dei nuovi minerali scoperti nel deposito terroso di fig. 10: a) particolare di un granulo subsferico di cesarolite; b) cristalli esagonali di edifane internamente cavi; c) cristalli prismatici tetragonali con terminazione piramidale di eteroclite; e) fitto intreccio di cristalli lamellari di calcofanite.

e minerali di neoformazione entro le concrezioni carbonatiche che già avevano iniziato a depositarsi nel complesso di Santa Barbara.

Infine è stato possibile ricostruire, a grandi linee per il passato più remoto, ma con notevole precisione per il quaternario recente, le oscillazioni della falda freatica all'interno della formazione carbonatica di Monte San Giovanni. Gli studi ancora in corso sicuramente potranno migliorare le conoscenze attuali sui meccanismi dell'evoluzione dell'intero sistema carsico, dei fenomeni minerogenetici che l'hanno interessato e delle loro interrelazioni temporali.

Pertanto quello di Santa Barbara si è rivelato essere un complesso ipogeo con importanti specificità scientifiche che si sommano a quelle estetiche e costituirà in futuro un ambiente di riferimento per tutti gli studi relativi alle grot-

te di miniera non solo del Parco Geominerario della Sardegna.

L'incredibile mondo di El Soplao

A circa 60 Km da Santander esisteva una miniera di solfuri misti, detta "Florida", chiusa dal 1979 (Clona J. 2003), che, come tesoro più grande al suo interno conserva una grotta di miniera (El Soplao) lunga ben 12 chilometri: si tratta quindi sicuramente della più grande grotta di miniera (Forti, 2005) oggi conosciuta al mondo!...

La lunga frequentazione mineraria della cavità (scoperta nel 1920) è ancora oggi evidentissima essenzialmente per i camminamenti predisposti all'interno della grotta, che, per lunghi tratti, è stata trasformata in una vera e propria galleria mineraria e per le "discen-

derie", che collegano i vari livelli della cavità naturale..... ma si ferma qui.

Infatti, a differenza di molte delle grotte di miniera italiane e non solo, che sono state completamente depredate da ogni loro concrezione, il Soplao è praticamente una grotta vergine. Pochissimi gli speleotemi rotti e il bianco a volte abbacinante di molte concrezioni è ancora assolutamente integro: niente fango sparso, nessuna scritta deturpante....

Le pareti, la volta ed il pavimento sono ricoperti per massima parte da concrezionamento molto vario anche se la peculiarità è sicuramente rappresentata dalle eccentriche di aragonite, di dimensione e di sviluppo assolutamente inusuale (Fig. 12).

Per dare un'idea della loro diffusione basti pensare che solo nel percorso turistico le aragoniti co-



Figura 12 - Grande ammasso di aragoniti coralloidi della Grotta di El Soplao (Cantabria, Spagna).



Figura 13 - El Soplao: stalattiti dal colore molto scuro a causa della abbondante presenza al loro interno di acidi umici e fulvici, come evidenziato dalla sezione sottile.

ralloidi di un bianco abbagliante si estendono su una superficie che di gran lunga eccede i mille metri quadrati. Ma le eccentriche sono solo uno degli aspetti che rendono la grotta particolarmente bella: vi sono grandi concrezioni, stalattiti, stalagmiti colate spesso con la classica colorazione bianco candida, ma anche gialle, marrone e perfino nere (Fig. 13)...

E poi alcune infiorescenze di aragonite azzurra, qualche vaschetta con pisoliti, piccole druse di cristalli di dolomite, batuffoli di idromagnesite sopra aghi finissimi di aragonite, tozzi limpidissimi cristalli, per ora indeterminati, ma probabilmente di gesso.

Affascinanti poi sono le intersezioni continue tra gallerie naturali e gallerie minerarie, queste ultime a volte difficili da distinguere dalle prime.

Per questo motivo nel luglio del 2005 El Soplao è stato aperto al pubblico e ad oggi i visitatori paganti sono stati oltre 500.000, dato che il turista non solo entra in una grotta splendida ma contemporaneamente visita una miniera, con tutti i suoi macchinari dell'epoca in bella vista.

Per ora il percorso turistico si limita ai primi 2000 metri di grotta. Già dal prossimo anno, comunque, dovrebbe essere funzionante anche un percorso di "turismo avventura" che comprenderà altri 2 chilometri di cavità, che saranno solo parzialmente attrezzati (piccolissimi stretti sentieri, scalette metalliche e solo luci d'emergenza) mentre ulteriori 4 (senza nessun adattamento) dovrebbero essere aperti, subito dopo, per visite "speleologiche".

Nonostante tutto questo, mi sento di affermare che il motivo di maggior interesse della grotta non è quello turistico-estetico, ma sicuramente quello scientifico: infatti, le sue mineralizzazioni, una volta studiate in dettaglio, daranno risultati sicuramente importanti e nuovi.

Conclusioni

Questa sia pur breve carrellata sui principali aspetti di interesse scientifico insiti negli speleote-

mi delle cavità artificiali, necessariamente limitata ai soli studi condotti dal sottoscritto, dimostra comunque, in maniera inequivocabile, l'importanza insita in questi concrezionamenti anche e soprattutto in prospettiva futura.

Non resta quindi che augurarsi che, da ora in avanti, quanti si interessano attivamente di esplorazioni in cavità artificiali prestino maggior attenzione ai depositi chimici che eventualmente incontro-

ranno, documentandoli in maniera oggettiva e dettagliata, base questa indispensabile per ogni altro studio si decidesse di effettuare su di loro. Ovviamente l'attenzione degli esploratori è l'indispensabile premessa ma di per se non è sufficiente: bisogna infatti che anche i ricercatori (mineralogisti innanzi tutto, ma anche geologi ambientali e studiosi del "global change") si convincano dell'importanza di questo tipo di analisi nei loro ri-

spettivi campi di studio.

Qualora queste due condizioni si realizzassero, sono assolutamente sicuro che le analisi sui depositi chimici delle cavità artificiali subiranno un vertiginoso aumento nei prossimi anni e forniranno risultati di grande soddisfazione a tutti coloro i quali vi ci si dedicheranno.

Bibliografia

- BADINO G., FORTI P. 2005 L'eccezionale ambiente della Cueva de los Cristales, miniera di Naica, Messico: problemi genetici ed esplorativi. Mem. Istituto Italiano di Speleologia s. II n.17, p.87-92
- BADINO G., BERNABEI T., DE VIVO T., GIULIVO I., SAVINO G. (Eds.) Under the desert: the mysterious waters of Cuatro Ciénegas Tintoretto (Treviso), 388 pp
- CALAFORRA J.M., GARCIA-GUINEA J. 2000 La geoda gigante di Pulpi. Bol. Soc. Esp. Espeleol. 1, p. 52-53
- CAPPA G. 1999 Speleologia in cavità artificiali SSI- Quaderni Didattici n.4, 20 pp
- CHROMY J. 1927 Zbrazovske aragonitove jeskine Hranice, p. 11-19
- CLONA J. 2003 El Soplao: una cavidad unica. Casa Ediciones, Santander, 134 pp
- D'ALFONSO A. 1985 Immagine e conoscenza storica dell'acquedotto romano Acquedotto 2000, Grafis, Bologna, p.7-10
- DE WAELE J., NASEDDU A. (Ed.) 2005 Le Grotte di Miniera tra economia mineraria ed economia turistica Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia s.II, v. 17, 200 pp
- DE WAELE J., FORTI P., PERNA G. 2001 Hyperkarstic phenomena in the Iglesias mining district (SW-Sardinia). In "Water-Rock Interaction 2001", R. Cidu (Ed.), A.A.Balkema Publishers, Lisse, p. 619-622.
- FORTI P. 1988 A proposito di alcune particolari concrezioni parietali rinvenute nell'acquedotto romano della Val di Setta. Sottoterra n. 79, p.21-28
- FORTI P. 1999 Le Concrezioni e le mineralizzazioni secondarie degli ipogei artificiali italiani. Opera Ipogea n.3 p.3-11
- FORTI P. 2004a Aragonite cave pearls of Reforma Mine in: BADINO G., BERNABEI T., DE VIVO T., GIULIVO I., SAVINO G. (Eds.) Under the desert: the mysterious waters of Cuatro Ciénegas Tintoretto (Treviso), p.236-241
- FORTI P. 2004b I giganti di grotta. Speleologia 50:54-57
- FORTI P., 2005 La Grotta "El Soplao": tesoro nascosto all'interno di una miniera (Cantabria, Spagna) Sottoterra 119, p.64-73
- FORTI P. 2006 Gli speleotemi carbonatici dell'acquedotto romano della Val Di Setta: nuovi dati sul rapporto tra piogge e concrezionamento nel periodo 1880-2004 Sottoterra in stampa
- FORTI P., DEMARIA D. 2005 Un tipo completamente nuovo di concrezione scoperto nell'acquedotto romano della Val di Setta (Bologna): le "antistalattiti" Spelaion in stampa
- FORTI P., PERNA G. 1982 Le cavità naturali dell'Iglesiente Mem.1 s.2 Ist. Ital. Speleol., Bologna: 1-229
- FORTI P., PAGLIARA A., GALLI E., ROSSI A., DE WAELE J., NASEDDU A., PAPINUTO S. 2005 Studio morfologico e mineralogico di dettaglio del concrezionamento del sistema carsico di Santa Barbara (Miniera di San Giovanni) Atti Simposio "Le grotte di miniera tra economia mineraria ed economia turistica", Iglesias 2004, IIS Mem. XVII, s.2, p. 57-68
- GENTY D., QUINIF Y. 1996 Annualy laminated sequences in the internal structure of some Belgium stalagmites - importance for paleoclimatology J.Sedim.Res. v.66, 1, 275-288
- GRUPPO GROTTA CAT - SEZIONE RICERCHE E STUDI SU CAVITA' ARTIFICIALI 2002 Atti V° Convegno Nazionale sulle cavità artificiali Trieste, 504 pp
- HILL C. A., FORTI P. 1997 Cave Minerals of the World National Speleological Society, Huntsville, 464 pp
- PADOVAN G. 2005 Archeologia del Sottosuolo: lettura e studio delle cavità artificiali BAR International Series 1416, 378 pp
- ROSSETTI V., ZUCCHINI A. 1957 Baritina della grotta di Santa Barbara - Rend. Semin. Fac. Sci. Univ. Cagliari 26(3-4): 240-255.