

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/236162287>

Studio morfologico e mineralogico di dettaglio del concrezionamento del sistema carsico di Santa Barbara (Miniera di San Giovanni, Iglesias)

Article · January 2005

CITATIONS

6

READS

271

7 authors, including:



Paolo Forti

University of Bologna

223 PUBLICATIONS 2,294 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jo De Waele

University of Bologna

360 PUBLICATIONS 1,979 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Palaeoclimate variations during the Holocene in the Balkans, from speleothem studies [View project](#)



Bossea cave project [View project](#)

Studio morfologico e mineralogico di dettaglio del concrezionamento del sistema carsico di Santa Barbara (Miniera di San Giovanni, Iglesias)

PAOLO FORTI^{1,2}, ANTONIO PAGLIARA³, ERMANNO GALLI⁴, ANTONIO ROSSI⁴, JO DE WAELE⁵, ANGELO
NASEDDU⁶, SILVESTRO PAPINUTO⁷

Riassunto

Il sistema carsico di Santa Barbara è costituito da due grandi vuoti subverticali (Santa Barbara 1 e Santa Barbara 2) che si aprono al contatto con un filone mineralizzato a solfuri nella Miniera di San Giovanni (Iglesias). Mentre Santa Barbara 1 viene considerata una delle grotte di miniera più famose al mondo per i bei cristalli euedrali di barite che tappezzano le sue pareti, l'intero sistema può essere considerato uno dei più antichi in assoluto avendo iniziato a svilupparsi nel Cambriano. Entrambe le grotte ospitano grandi concrezioni attive di calcite e/o aragonite che in alcuni casi coprono parzialmente i cristalli di barite.

Lungo il fornello che collega la galleria mineraria alla cavità superiore (Grotta di Santa Barbara 1), è stata intercettata una sequenza deposizionale di circa sei metri, costituita, dalla base alla sommità, da : a) una concrezione subacquea (*cave clouds*) di calcite e/o aragonite; b) un sedimento terroso-argilloso suddiviso in varie bande con nette variazioni di colore dal nero al rosso mattone; c) una drusa di cristalli tabulari di barite bruno rosati lunghi sino a 7 cm e d) una crostone stalagmitico di calcite/aragonite che costituisce il pavimento della grotta, tuttora in fase di concrezionamento.

Nel 2002, nell'ambito di una ricerca multidisciplinare finalizzata a definire l'evoluzione speleogenetica dell'intero sistema carsico, è stato intrapreso uno studio di dettaglio sugli speleotemi in esso presenti. A tale scopo sono state prelevate 4 carote, due dalla grotta superiore (Santa Barbara 1) e due da quella inferiore (Santa Barbara 2), su cui sono stati successivamente condotti studi morfologici, mineralogici, petrografici, chimici e tessiturali. La parte superiore di una delle carote di Santa Barbara 2 è stata utilizzata anche per datazioni U/Th, per la determinazione degli isotopi stabili dell'ossigeno e del carbonio e per analisi di luminescenza al fine di ricostruire le variazioni climatiche e/o ambientali che hanno interessato l'area del sistema carsico nell'ultimo milione di anni: questi studi sono al momento ancora in corso.

I principali risultati sino ad ora conseguiti sono i seguenti: 1) le grotte di Santa Barbara 1 e Santa Barbara 2 fanno parte dello stesso *karst* ed hanno avuto un'identica evoluzione dei loro speleotemi; 2) le mineralizzazioni a solfuri si sono messe in posto all'interno del sistema carsico quando il concrezionamento era già iniziato; 3) la deposizione di baritina non è stato un evento isolato, ma si è ripetuto almeno una seconda volta, anche se con caratteristiche diverse; 4) gli ossidati che nel meccanismo di concrezionamento precedono l'evento principale di formazione della baritina si sono rivelati di notevole interesse mineralogico comprendendo ossidi-idrossidi piuttosto rari come eterolite, idroeterolite, calcofanite, cesarolite e coronadite (?) riconosciuti per la prima volta nell'ambiente di grotta; 5) la successione temporale e di dettaglio dei vari eventi speleogenetici avvenuti all'interno del sistema carsico è stata meglio definita.

Parole chiave: speleotemi, minerali di grotta, evoluzione speleogenetica, grotte di miniera, Sardegna

¹Ricerca effettuata nell'ambito del Progetto MIUR 2002 "Studio morfologico e mineralogico di speleotemi per ricostruire particolari ambienti carsici" Resp. Prof. Paolo Forti

² Istituto Italiano di Speleologia, Via Zamboni 67, 40126 BOLOGNA. forti@geomin.unibo.it

³ Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, Via Zamboni 67, 40127 BOLOGNA

⁴ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Modena e Reggio Emilia, Largo S. Eufemia 19, 41100 MODENA

⁵ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Cagliari, Via Trentino 51, 09127 CAGLIARI

⁶ IGEA SpA, Loc. Campo Pisano, 09016 IGLESIAS

⁷ Speleo Club Domusnovas

Abstract

Santa Barbara (Iglesias, Sardinia) is a world renowned mine cave system, because it hosts perhaps the best display of barite crystals developed within natural cavities. The karst system consists of two large subvertical voids (presently not interconnected) developed just in contact with a polysulphide vein in the San Giovanni mine (Iglesias, Sardinia) and it is supposed to be one of the oldest in the world because its development started in the Cambrian age. The caves host huge still active calcite and/or aragonite speleothems partially covering the euhedral barite crystals. Along the vertical shaft connecting the mine gallery with the upper cave a six meters thick depositional sequence has been exposed. It consists from bottom (bedrock) to top of: (a) a calcite-aragonite subaqueous speleothem (cave clouds); (b) an earthy layered sediment with sudden colour changes ranging from black to orange; (c) a layer consisting of honey to hazel-brown barite tabular crystals up to 7 cm high and (d) a calcite-aragonite vadose speleothem (flowstone) which represents the still active cave floor.

In 2002 a multidisciplinary research started with the aim to define the speleogenetic history of the karst system by studying in detail the hosted speleothems: 4 different drillings were done (2 in the upper and 2 in the lower cave) and the obtained cores were used for different purposes (detailed morphological, mineralogical, petrographical, textural analyses). The upper part of a speleothem (corresponding to the last and still developing calcite-aragonite deposit) was also used for luminescence, stable isotope and U/Th analyses to reconstruct the climate and the environmental changes occurred in the cave area in the last 1,000,000 years: all these studies are still in progress.

At the moment the main achieved result may be summarized as: 1) Santa Barbara 1 & 2 caves belong to the same karst system, because their speleothems underwent exactly the same evolution; 2) the sulphide minerals were deposited within the karst system when the carbonate deposition had already started; 3) the barite deposition was not a single event but occurred at least once earlier although with different characteristics; 4) the oxides-hydroxides deposits just in between the two barite events have a noticeable importance from the mineralogical point of view, with the deposition of some very rare minerals, some of which new for the cave environment (heterolite, hydroheterolite, chalcophanite, cesarolite, coronadite(?)); 5) the chronology of the different speleogenetic mechanisms active time by time in the karst system are now better understood and detailed.

Keywords: *speleothems, cave minerals, speleogenetic evolution, mine caves, Sardinia*

Introduzione

Santa Barbara 1 (Iglesias, Sardegna) è una grotta di miniera tra le più conosciute al mondo anche perchè sulle sue pareti si trovano forse i più bei cristalli di barite (Fig.1) formati all'interno di una cavità naturale (Forti & Perna, 1981, 1983; Hill & Forti, 1997). Il sistema carsico consiste in due cavità pressochè sovrapposte (Fig. 2) sviluppatasi esattamente al contatto di un giacimento di polisolfuri (in prevalenza galena) nella miniera di San Giovanni. Le grotte ospitano 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 superiore (Santa Barbara 1) 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 lunghezza fino a 7 centi-

metri, 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 bariti che rappresentano l'elemento più caratterizzante della grotta di Santa Barbara 1 (Rossetti & Zucchini, 1957).

Nei primi anni '80 i lavori di scavo per una discenderia portarono ad intersecare a livello + 50 m s.l.m. un altro grande vuoto naturale parzialmente riempito da sedimenti siltoso-argillosi: questa nuova cavità, vicina alla grotta di Santa Barbara 1, ma ubicata ad una quota inferiore, presentava morfologie e speleotemi assai simili, come ad esempio la presenza diffusa di druse di barite. Per tali analogie i primi esploratori la chiamarono Santa Barbara 2, ipotizzando che facesse parte dello stesso sistema carsico, anche se allora non fu possibile effettuare l'esplorazione completa che si arrestò alla base di un grande pozzo verticale (Fabbri & Forti, 1986). Questa, conclusa solo nel 2004 (Badino & Messina, 2005), ha confer-



Fig. 1 - La barite della grotta di Santa Barbara.

mato l'ipotesi iniziale che riteneva le due cavità appartenenti ad un unico sistema, anche se ancora non è stato possibile individuarne il collegamento diretto, forse nascosto dai grandi spessori di concrezioni e di sedimenti in esse presenti. Vari autori (Forti & Perna, 1982; Perna, 1983; Bini *et al.*, 1988) hanno discusso l'evoluzione speleogenetica di questa struttura carsica sulla base delle evidenze morfologiche mettendola in relazione ai principali eventi che hanno caratterizzato il distretto minerario di Iglesias dal Cambriano in poi. Gli stessi autori concordano nell'ipotizzare che l'intero sistema abbia iniziato a svilupparsi prima della messa in posto dei principali corpi mineralizzati. Pertanto il complesso carsico di Santa Barbara può essere considerato uno dei più antichi al mondo e si ipotizza abbia subito almeno cinque cicli carsici successivi.

Nel 2002 è iniziata una ricerca multidisciplinare per definire l'evoluzione speleogenetica di questo sistema carsico attraverso lo studio di dettaglio degli speleotemi ospitati. Sulle concrezioni campionate sono state condotte analisi morfologiche, petrografiche, mineralogiche, chimiche e tessuturali. La parte sommitale di una delle carote di Santa Barbara 2 (corrispondente alle concrezioni di calcite e/o aragonite più recenti e ancora attualmente in accrescimento) è stata utilizzata per le analisi di luminescenza, la determinazione degli iso-

topi stabili dell'ossigeno e del carbonio ed il rapporto U/Th al fine ricostruire le variazioni climatiche e ambientali che hanno interessato il sistema carsico nell'ultimo milione di anni. Tutti questi studi sono ancora in corso, ma alcuni interessanti risultati sono già stati ottenuti (De Waele *et al.*, 2004a,b; Pagliara 2004). Nel presente studio, dopo aver brevemente riassunto il lavoro sperimentale effettuato all'interno delle cavità e successivamente in laboratorio, vengono descritti i minerali degli speleotemi che tappezzano le due grotte ed infine viene proposto uno schema evolutivo dell'intero complesso in funzione delle nuove conoscenze acquisite.

Parte Sperimentale

Nell'ottobre 2003 è stata eseguita una prima campionatura della successione deposizionale affiorante sulle pareti del fornello di collegamento tra la galleria mineraria e la grotta di Santa Barbara 1; successivamente sono state prelevate 4 carote: due da Santa Barbara 1 e due da Santa Barbara 2 (Figg. 3, 4). Le ultime due hanno rilevato, quasi alla base della concrezione, la presenza di mineralizzazioni a galena con blenda accessoria che in una geode si associano a bei cristalli euedrali di calcite, dolomite e cerussite (Fig. 5).

Le due carote prelevate in Santa Barbara 1, non avendo raggiunto la base del concrezionamen-

to, non hanno incontrato mineralizzazioni a solfuri, ma hanno permesso di mettere in evidenza la grande variabilità di spessore delle diverse bande che costituiscono gli speleotemi. E' tuttavia importante sottolineare che, pur nella diversità dei loro caratteri scalari (spessore delle bande), le quattro carote mostrano una sostanziale analogia dal punto di vista composizionale, morfologico e tessiturale, caratteri questi che confortano l'ipotesi di una loro appartenenza ad un unico sistema carsico.

Mentre dalla parte sommitale di una delle carote di Santa Barbara 2 sono stati preparati provini per le datazioni assolute tramite il metodo U/Th e per le determinazioni degli isotopi stabili di ossigeno e carbonio, da una di quelle di Santa Barbara 1 sono state preparate sezioni di 6 mm di spessore per la determinazione presso l'Università di Sofia (Bulgaria) degli effetti di luminescenza: queste analisi sono attualmente in fase di svolgimento ed i risultati saranno disponibili per la stampa in un prossimo futuro.

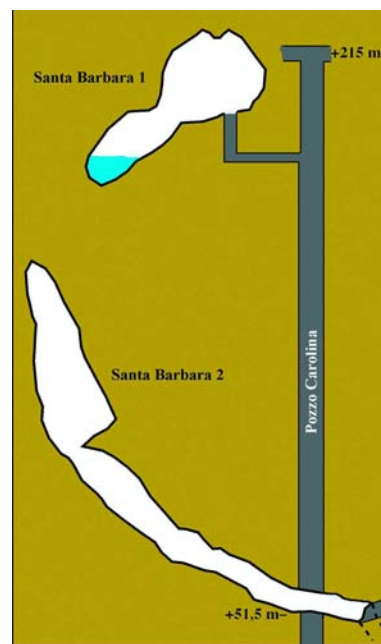
Dalle due carote rimanenti (una di Santa Barbara 1 e l'altra di Santa Barbara 2) sono state ricavate sezioni sottili per uno studio di dettaglio al microscopio polarizzante: la descrizione morfologica, paragenetica e tessiturale è stata corredata anche da una documentazione fotografica dei caratteri collegabili a variazioni di chimismo delle acque concrezionanti. I risultati incrociati delle osservazioni fatte sulle due carote hanno evidenziato una perfetta analogia degli strati fra loro correlabili, anche se di spessore diverso.

Dalle stesse carote sono stati prelevati anche il materiale per le analisi chimiche mediante microsonda elettronica e per gli esami röntgenografici sia diffrattometrici che con camere Gandolfi. Tutti i dati ottenuti hanno messo in evidenza la complessa e peculiare composizione dei livelli di materiale terroso presenti in tutte le carote e, in modo particolare, nella successione deposizionale del fornello di accesso a Santa Barbara 1 dove raggiungono spessori anche metrici.

I minerali delle concrezioni di Santa Barbara 1 e Santa Barbara 2

Le analisi di dettaglio degli speleotemi presenti nel sistema carsico di Santa Barbara hanno messo in evidenza il notevole interesse composizionale della sequenza sedimentaria rivelatasi ricca di differenti specie mineralogiche, anche rare (Tab.1). Gran parte della concrezione è costituita da carbonato di calcio (essenzialmente calcite ma anche aragonite in particolare nella sua parte sommitale); l'importanza di queste presenze al fine della rico-

Fig. 2 - Sezione del sistema carsico di Santa Barbara.



struzione delle condizioni paleoambientali e paleoclimatiche che hanno influito sulla loro formazione non verrà trattata in questo lavoro, in quanto la loro analisi dettagliata è in corso di approfondimento.

Va tuttavia sottolineato che mentre la base delle concrezioni appare costituita da calcite depositatasi da acque termali, in quanto presenta un'intensa e caratteristica fluorescenza di colore rosso vivo se irradiata con raggi UV, quella sommitale presenta una debole fluorescenza di color giallo pallido tipica di un concrezionamento a bassa temperatura da parte di acque meteoriche di percolazione. 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. 6, 7).

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 sezione sottile, infatti, attorno ai cristalli di solfuro, prevalente galena e sfalerite accessoria, sono presenti bande molto sottili di cerussite, la cui



Fig. 3 - Il campionamento delle carote in Santa Barbara 2.

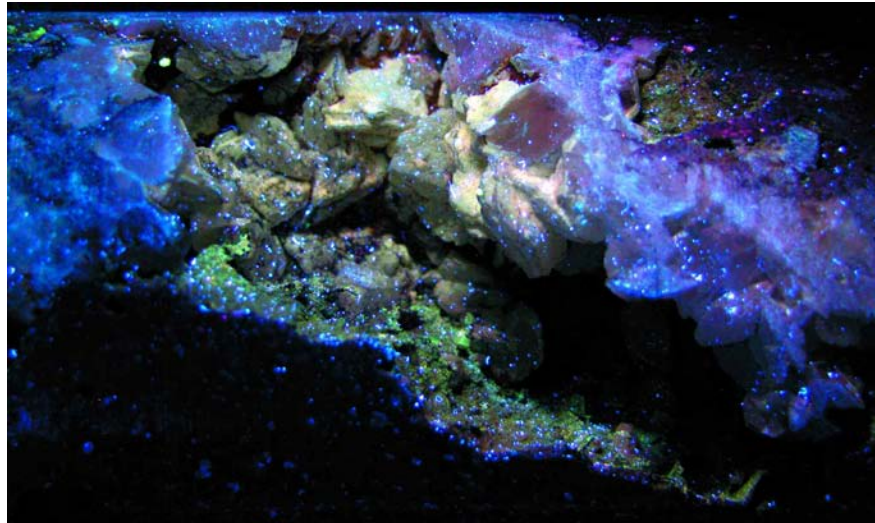


Fig. 5 - Particolare della geode con galena di neoformazione alla base della carota di Santa Barbara 2 illuminato con una luce ultravioletta.

Fig. 4 - Particolare di una carota estratta da Santa Barbara 1 con evidente lo strato di cristalli di barite.

genesi sembra attribuibile più a reazioni chimiche che a cause termiche. Nelle stesse sezioni sono ben riconoscibili perfetti individui rombici di dolomite con colori di interferenza brunacei.

In una geode intercettata da una delle carote di Santa Barbara 2, 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 (Fig. 8 a, b). La presenza contemporanea di individui ben cristallizzati di questi minerali ne testimonia una genesi in un ambiente di acque termali. Per quanto riguarda la barite, già ogget-

to di uno studio precedente (Rossetti & Zucchini, 1957), è qui sufficiente ricordare che in base ai nuovi risultati la sua deposizione non è stato un evento isolato, ma si è ripetuta almeno una seconda volta, anche se in un ambiente con caratteristiche diverse.

Dal punto di vista mineralogico i risultati più interessanti sono quelli relativi agli ossidati presenti o come sottili intercalazioni nelle carote oppure in accumuli di spessore nettamente maggiore nella "tasca" attraversata dal fornello, ora studiati in dettaglio per la prima volta.

La maggior parte dei campioni presi in esame è costituita da concrezioni di calcite in fitte laminazioni sovrapposte di diverso spessore

e colore variabile dal bianco latte al rosato, dal giallo pallido al nocciola. costituite da cristalli allungati secondo la direzione di accrescimento dello speleotema e di dimensioni variabili da submillimetriche a centimetriche. La loro differenza di colore è imputabile a microinclusioni di natura diversa, come evidenziato dalle numerose analisi chimiche effettuate con microsonda elettronica.

Rilevante la presenza di barite (Fig. 8c) sia come un fitto intreccio di bei cristalli tabulari, vitrei, semitrasparenti, associati ad individui di calcite in un livello di spessore centimetrico intercettato dal fornello, sia come minuti ed allungati individui euedrali, orientati parallelamente o con debole inclinazione rispetto alle salbande di un sottile livello di una delle carote di Santa Barbara 1.

A loro volta gli ossidati, concentrati in tasche irregolari nel fornello e in livelli centimetrici nelle carote, si presentano sia cementati che in masse incoerenti, da granulari a terroso polverulenti, di colore variabile dal giallo ocre 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 in subordinate di fillosilicati. 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 (Burkart-Baumann, 1967; Anthony *et al.*, 1997a), che si presenta sotto forma di granuli subsferici picci, con esfoliazione cipollare (Fig. 8d), l'edifane (Rouse *et al.*, 1984 Anthony *et al.*, 2000), sotto forma di minuti individui prismatici esagonali, singoli o geminati, cavi al loro interno e di colore grigio chiaro oppure in frammenti relitti delle stesse impalcature (Figg. 9a, b), l'eterolite (Frondel & Heinrich, 1942; Anthony *et al.*, 1997d) e/o idroeterolite (Frondel & Heinrich, 1942; Mc Andrew, 1956; Anthony *et al.*, 1997e) in aggregati coralloidi di minute sferulette di colore grigio metallico (Fig. 9c) e la calcofanite (Ostwald, 1985; Anthony *et al.*, 1997b) in frammenti compatti, terrosi, di colore giallo arancio, dispersi nel materiale nero (Fig. 9d). Per la sovrapposizione di alcuni riflessi negli spettri di polvere della cesarolite e della coronadite (Frondel & Heinrich, 1942; Anthony *et al.*, 1997c), così come per l'analogia della loro composizione chimica, non si è potuto accertare con sicu-



Fig. 6 - Tasca di materiale terroso lungo il fornello di accesso a Santa Barbara 1.

rezza la presenza del secondo minerale, la cui identificazione potrà essere confermata solo con ulteriori e più approfondite analisi sino ad ora impossibili da effettuare per la estrema scarsità del materiale a disposizione.

L'elenco dei minerali identificati in Santa Barbara 1 è riportato in Tab. I.

Evoluzione geologica del sistema carsico

L'attività carsica nell'Iglesiente è iniziata nel Cambriano durante la deposizione della Formazione di Santa Barbara (dolomia rigata) ed all'inizio di quella di San Giovanni (calcere ceroidi), quando diverse aree, tra le quali anche Monte San Giovanni emersero anche solo per pochi metri, ma per un intervallo di tempo sufficiente per poter essere carsificate (Bechstadt & Boni, 1996). La dissoluzione, laddove è ancora riconoscibile, è rappresentata da piccole tasche carsiche, in seguito riempite di dolomia gialla, recentemente riconosciute anche nel nucleo di alcune concrezioni mammellonari intercettate dal fornello di accesso alla Grotta di Santa Barbara 1. E' plausibile che i primi vuoti da cui ha avuto origine tutto il sistema carsico abbiano incominciato a formarsi durante questo primo ciclo, anche se sarebbe opportuno trovare ulteriori riscontri a questa ipotesi in quanto depositi analoghi si sono formati anche in epoche successive (Carbonifero medio).

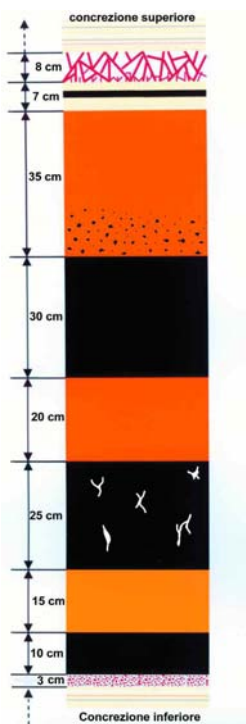


Fig. 7 - Sequenza stratigrafica del deposito terroso.

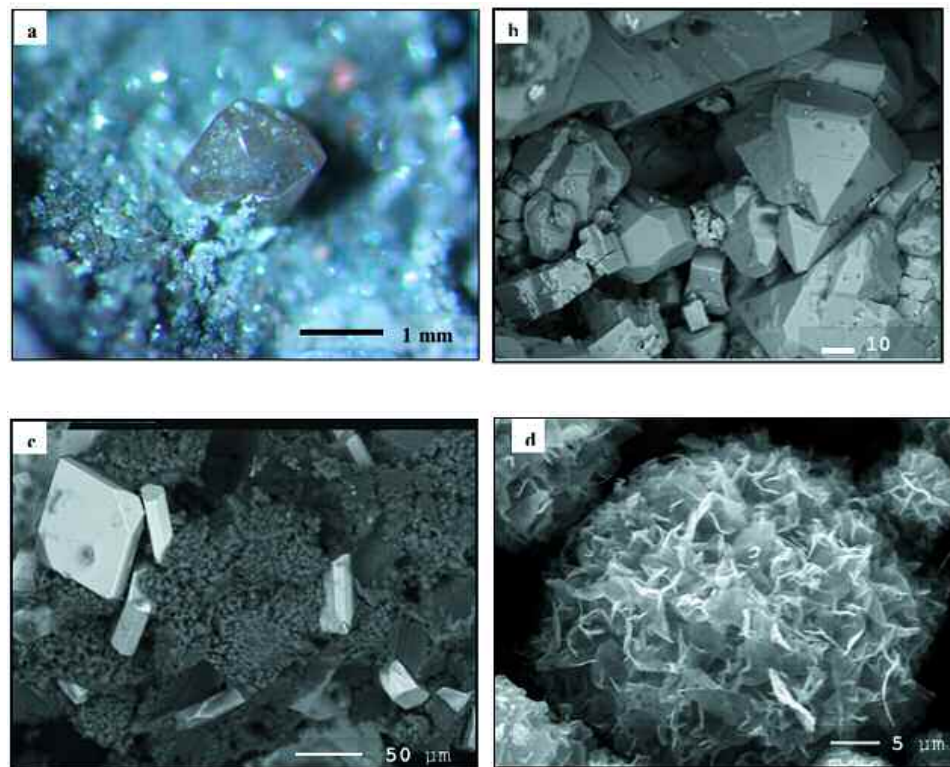


Fig. 8 - Foto allo stereomicroscopio di: a) cristallo bipiramidale, vitreo, trasparente di cerussite nella geode di fig. 5; ed immagini SEM di: b) cristalli bipiramidali di cerussite; c) cristalli tabulari di barite immersi in una matrice goethitica; d) particolare di un granulo subsferico di cesarolite.

La seconda fase carsica risale probabilmente al Cambriano superiore/Ordoviciano inferiore quando buona parte delle formazioni carbonatiche sono emerse dando luogo a fenomeni carsici piuttosto evidenti. Anche il sistema carsico di Santa Barbara si potrebbe far risalire a quel periodo, quando i giacimenti solfurei di origine singenetica, o post-genetica molto precoce, ossidandosi diedero origine a fluidi fortemente aggressivi per la presenza di acido solforico (ipercarsismo) (De Waele *et al.*, 2001). Anche se dai dati in nostro possesso non è possibile valutare quale fosse la sua ampiezza, si può tuttavia affermare che il sistema di Santa Barbara, durante questo ciclo, o non ebbe modo di concrezionarsi, ovvero il suo concrezionamento è andato totalmente perduto. Nell'Ordoviciano medio-superiore il mare tornò ad invadere le terre emerse per un lunghissimo intervallo di tempo. Solo nel Carbonifero medio si reimposta una nuova fase continentale, legata anche all'orogenesi ercinica, durante la quale molte zone dell'isola vengono peneplanate (Carmignani *et al.*, 2001). E' di questo periodo il terzo ciclo speleogenetico che crea grandi vuoti, in alcuni casi poi riempiti da breccie di collasso, da adunamenti di barite e galena ricca in argento e da dolomia gialla. Durante questo ciclo il sistema carsico di Santa

Barbara potrebbe aver raggiunto lo sviluppo attuale come testimoniato, alla base del concrezionamento, da tasche di alterazione riempite di dolomia gialla e di solfuri vari. Nel Trias medio-superiore il mare tornò ad invadere parte delle aree emerse fino a lambire la zona del Monte San Giovanni (Campumari) e si chiuse il terzo ciclo carsico (Forti & Perna 1982; Civita *et al.*, 1983). In quest'area il Terziario risulta caratterizzato da condizioni di continentalità con ambienti fluviali e/o lagunari (carbone eocenico del bacino di Carbonia) e da fasi tettoniche Oligo-Mioceniche legate sia all'orogenesi pirenaica e nord-appenninica, sia alla successiva apertura dei bacini balearico e tirrenico accompagnata da attività vulcanica. In questo periodo il carsismo ritorna di nuovo attivo in particolare lungo le zone di faglia; tuttavia i prodotti di questa azione vengono spesso cancellati dalla tettonica. Nel sistema di Santa Barbara è possibile che il concrezionamento abbia avuto origine ad opera di acque termali in ambiente freatico e che al suo interno sia avvenuto anche un episodio di rimobilizzazione dei giacimenti a solfuri con rideposizione di galena e di altri minerali di neoformazione all'interno delle concrezioni, senza che queste ultime venissero alterate in maniera evidente. E' questo il primo caso in cui una rimobilizzazione parziale

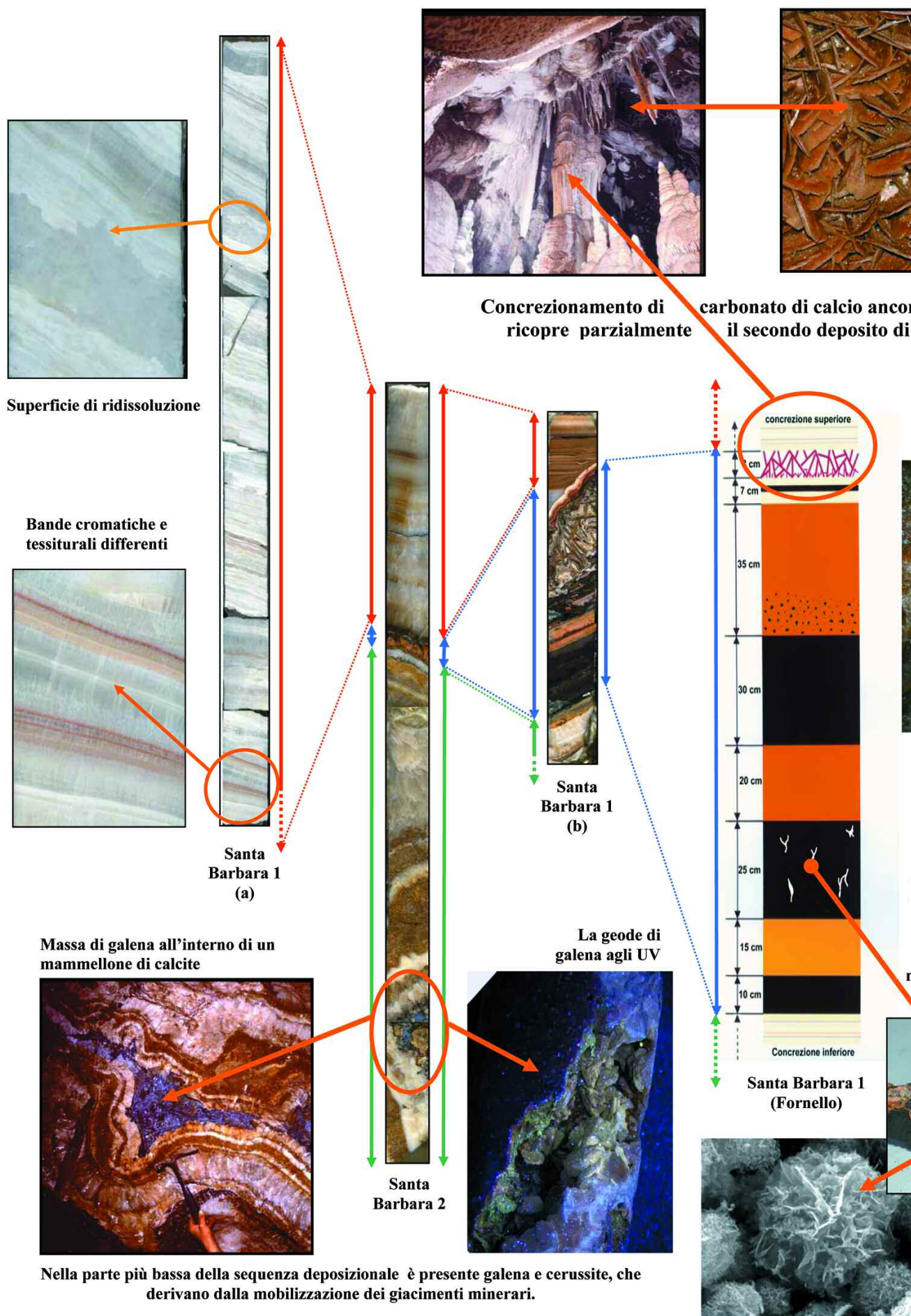


Fig. 10 - Rapporti stratigrafici tra le differenti carote del sistema di S. Barbara e conseguente ipotesi evolutiva.



ra attivo che
baritina.

La tasca terrosa

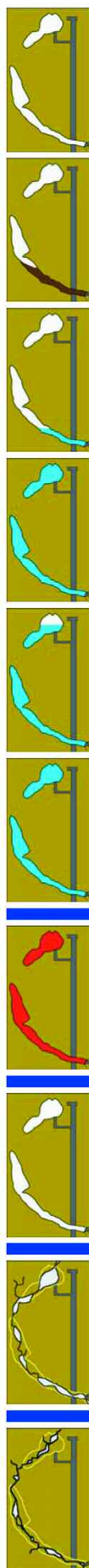


gli strati terrosi sono costituiti da ossidi e idrossidi metallici, in parte cristallini e in parte amorfi: si sono depositati in ambiente epifreatico anche se in un caso la presenza di boxwork di calcite testimonia una loro momentanea emersione



I boxwork di calcite

Cesarolite al SEM



L'eduazione degli ultimi 150 anni drena completamente tutta l'acqua del sistema carsico

200.000-400.000 anni B.P. (??) buona parte di Santa Barbara 2 si riempie di sedimenti con conseguenti fenomeni di corrosione accentuata

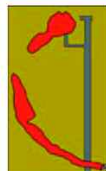
Da 1-1,5 milioni di anni B.P. (??) gli speleotemi gravitazionali indicano l'instaurarsi stabilmente di condizioni areate in quasi tutto il sistema, tranne gli ultimi 30 m di S.Barbara 2

Le condizioni freatiche sono rapidamente ristabilite e l'evoluzione continua in ambiente freatico fino alla deposizione del secondo strato di barite

I boxworks di calcite osservati solo in un livello terroso indicano un breve periodo di parziale condizione vadosa

Il quinto e ultimo ciclo carsico inizia con la formazione di uno strato di barite seguito dalla deposizione di ossidi e idrossidi in ambiente epifreatico

sommersione



Inizia il concrezionamento in ambiente freatico ad opera di acque termali al cui interno si è avuta una mobilizzazione dei giacimenti minerali con deposizione di galena e altri minerali (cerussite) all'interno degli speleotemi.

**Plio-Quaternario
V ciclo carsico**

**Oligo-Miocene
IV ciclo carsico**

sommersione



Si creano grandi vuoti riempiti presto da breccie di collasso e depositi di barite, galena e dolomia gialla. Il sistema carsico di Santa Barbara raggiunge probabilmente le dimensioni attuali.

**Carbonifero
III ciclo carsico**

sommersione



I fenomeni carsici diventano più intensi grazie all'ossidazione dei giacimenti solfurei con conseguenti fenomeni di ipercarsismo legati al ciclo dello zolfo

**Cambro-Ordoviciano
II ciclo carsico**

sommersione



Inizia l'evoluzione del sistema carsico di Santa Barbara: la dissoluzione, dove ancora visibile, ha creato delle piccole tasche carsiche in seguito riempite da dolomia gialla.

**Cambriano
I ciclo carsico**

dei giacimenti minerari dell'Iglesiente viene affermata con sicurezza.

In questa fase il sistema carsico di Santa Barbara raggiunge le dimensioni e le sue peculiarità attuali: grandi cavità con pareti completamente ricoperte da speleotemi.

Il quinto ed ultimo ciclo carsico inizia nel Pliocene-Quaternario ed tuttora attivo: durante questo intervallo di tempo all'interno del sistema si sono impostate condizioni chimico-fisiche favorevoli alla deposizione della barite parietale, degli ossidi-idrossidi metallici ed alla formazione del potente concrezionamento in prevalenza calcitico.

Il meccanismo di deposizione del carbonato di calcio ad opera delle acque termali si interrompe in concomitanza del primo evento di precipitazione della barite, avvenuto con modalità leggermente differenti assai prima di quello noto e già descritto. Ha quindi fatto seguito una deposizione alternata di strati terrosi neri, rossi e gialli, particolarmente ricchi di ossidi e idrossidi metallici, sia amorfi che cristallini, che testimoniano fasi di forte ossidazione delle masse mineralizzate. La presenza di alcuni minerali rari e assolutamente nuovi per l'ambiente di grotta (eterolite, idroeterolite, calcofanite, cesarolite, coronadite (?), edifane) confermano la complessità del chimismo delle acque di percolazione così come la varietà dei meccanismi minerogenetici attivi. Va sottolineato che durante questo periodo, per la prima volta, la parte superiore del sistema carsico (la zona sommitale della grotta di Santa Barbara 1) è venuta a trovarsi per un breve lasso di tempo in condizioni areate, come testimoniano le concrezioni di calcite (*boxworks*) che sigillano alcune fratture di essiccamento presenti all'interno di uno dei livelli di materiale nero. Le condizioni freatiche si sono comunque rapidamente ripristinate, tanto che tutti i livelli terrosi sovrastanti sono privi di queste presenze carbonatiche.

Al termine dell'accumulo degli "ossidati" si è avuto un altro breve periodo di tempo in cui le acque, ancora in condizioni freatiche, hanno di nuovo ripreso a depositare carbonato di calcio che ha impregnato e cementato la parte sommitale dei depositi terrosi. Ha quindi fatto seguito il secondo e maggiore evento di deposizione della barite che si è concluso con un marcato e definitivo passaggio da condizioni ambientali freatiche a vadose. La quasi totalità del sistema carsico viene così a trovarsi areata permettendo lo sviluppo di concrezioni gravitative; solo la parte inferiore di Santa Barbara 2 ha continuato ad essere allagata, come testimoniato dalla continua forma-

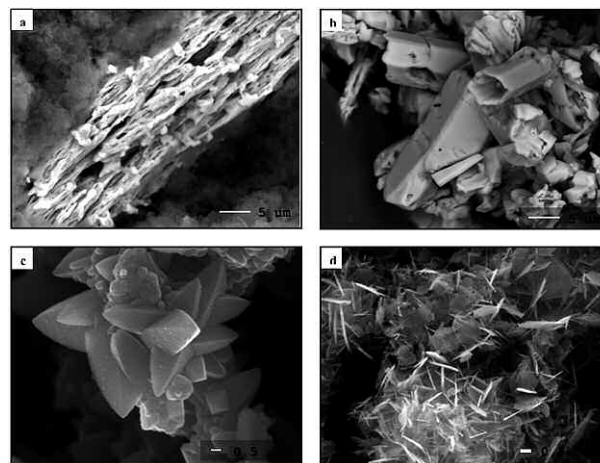


Fig. 9 – Immagini SEM di: a) cristallo relitto di edifane; b) cristalli esagonali internamente cavi di edifane; c) cristalli prismatici tetragonali con terminazione piramidale di eterolite o idroeterolite; d) fitto intreccio di minuti cristalli lamellari di calcofanite.

Tab. I – Minerali di grotta delle concrezioni del sistema carsico di Santa 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	Triclinico
Cerussite	PbCO ₃	Rombico
Cesarolite	PbMn ₃ O ₇ · H ₂ O	Esagonale ?
Clorite	(Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Monoclinico
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	α-FeO(OH)	Rombico
Idroeterolite	Zn ₂ Mn ₄ O ₈ · H ₂ O	Tetragonale
Illite	K _{0.65} Al _{2.07} Si _{3.35} O ₁₀ (OH) ₂	Monoclinico
Quarzo	SiO ₂	Trigonale
Sfalerite	ZnS	Cubico

zione di tipici concrezionamenti subacquei (*cave clouds*).

La sequenza deposizionale successiva alla formazione dei grandi cristalli di barite è costituita da alternanze di calcite e di aragonite ed è al momento ancora attiva. Nonostante brevi e rari episodi di ridissoluzione, l'accrescimento delle concrezioni è stato regolare per un milione di anni o più, come testimonia la regolare successione delle loro perfette laminazioni. Durante questo intervallo di tempo il livello base della grotta si è mantenuto a +70 m s.l.m., come indicato dal passaggio da concrezioni gravitazionali

(stalattiti, vele) a quelle epifreatiche (*cave clouds*).

Più di recente (poche centinaia di migliaia di anni fa) in un periodo di intensa degradazione meteorica delle rocce esterne, il sistema carsico è stato invaso da materiali argilloso-siltosi che hanno completamente occluso la parte più profonda della grotta di Santa Barbara 2. Si è così interrotto lo sviluppo non solo delle concrezioni gluteiformi ma anche di parte di quelle subaeree fino ad un'altezza di 30-40 metri al di sopra della galleria della miniera che ha intersecato questo tratto del sistema carsico, come indicano le tracce di corrosione sulle pareti e le tasche di sedimenti ancora presenti.

L'eduazione forzata delle acque dai livelli più bassi della miniera, iniziata poco più di un secolo addietro, ha poi definitivamente prosciugato l'intero sistema, dando luogo ad un progressivo processo di compattazione e di parziale asporto dei depositi di fango presenti in Santa Barbara 2.

Infine nei primi anni '80 un'altra galleria ha intersecato la stessa grotta a +50 m s.l.m.: i vuoti carsici al di sotto di questa quota furono subito riempiti dai minatori con materiale di risulta prima ancora che si potesse procedere al loro studio. Il fango semiliquido presente nella parte superiore della cavità iniziò a colare nella galleria artificiale dalla quale in seguito fu parzialmente rimosso. Quello rimasto in loco continuò ad essere asportato dal flusso delle acque di stillicidio. Attualmente questi depositi sono in fase di lento essiccamento a causa della circolazione d'aria indotta dallo stesso scavo della galleria.

I principali stadi dell'evoluzione del sistema carsico di Santa Barbara sono schematizzati in Fig. 10.

Conclusioni

Lo studio multidisciplinare del sistema carsico di Santa Barbara, seppure lungi dall'essere completato, 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 tappezzano 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, in quanto sono molto poche le grotte sino ad ora conosciute con caratteristiche simile a questa cavità dell'Iglesiente.

Questo studio ha permesso anche di migliorare le conoscenze sui processi evolutivi che hanno interessato i giacimenti minerari 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 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 grotte di miniera non solo del Parco Geominerario della Sardegna.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'IGEA s.p.a. per la collaborazione fornita durante i campionamenti all'interno delle grotte di Santa Barbara 1 e Santa Barbara 2. ed i dott. P.L. Fabbri e M.Tonelli del Centro Interdipartimentale Grandi Strumenti (CIGS) dell'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia per l'aiuto fornito al microscopio elettronico.

Bibliografia

ANTHONY J.W., BIDEAUX R.A., BLADH K.W., NICHOLS M.C., 1997 - *Handbook of Mineralogy. Vol. III, Halides, Hydroxides, Oxides*. Mineral Data

- Publishing , Tucson, Arizona: a) 109; b) 112; c) 138; d) 244; e) 257.
- ANTHONY J.W., BIDEAUX R.A., BLADH K.W., NICHOLS M.C., 2000 - *Handbook of Mineralogy. Vol. IV, Arsenates, Phosphates, Vanadates*. Mineral Data Publishing , Tucson, Arizona: 236.
- BADINO G., MESSINA M., 2005 - *L'esplorazione della Grotta di Santa Barbara 2*. Atti Simposio "Le grotte di miniera tra economia mineraria ed economia turistica", Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, Serie II, 17, pp. 93-98
- BECHSTADT T., BONI M., 1996 - *Sedimentological, stratigraphical and ore deposits field guide of the autochthonous Cambro-Ordovician of Southwestern Sardinia*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia 48: 390 pp.
- BINI A., CREMASCHI M., FORTI P., PERNA G., 1988 - *Paleokarstic fills in Iglesias (Sardinia, Italy): sedimentary processes and age*. Ann. Soc. Géol. Belgique 111, pp. 149-161.
- BURKART-BAUMANN I., OTTEMANN J., NICOLINI P., 1967 - *Mineralogische Untersuchungen an Jordani, Semseyt und Cesarolith von drei tunesischen Blei-Zink-Lagerstätten*. Chemische Erde, 26, pp. 256-270.
- CARMIGNANI L., OGGIANO G., BARCA S., CONTI P., SALVADORI I., ELTRUDIS A., FUNEDDA A., PASCIS S., 2001 - *Geologia della Sardegna. Note illustrative della Carta Geologica della Sardegna a scala 1:200.000*. Mem. Descr. Carta Geol. d'Italia 60, 283 p.
- CIVITA M., COCOZZA T., FORTI P., PERNA G., TURI B., 1983 - *L'idrogeologia del bacino minerario dell'Iglesiente*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, Serie 2, 2, 137 pp.
- DE WAELE J., FORTI P., PERNA G., 2001 - *Hyperkarstic phenomena in the Iglesias mining district (SW-Sardinia)*. In R. CIDU (Ed.): "Water-Rock Interaction 2001", A.A.Balkema Publishers, Lisse, pp. 619-622.
- DE WAELE J., FORTI P., FRAU F., GALLI E., NASEDDU A., ROSSI A., 2004b - *Le grotte di miniera del Monte San Giovanni (Iglesiente, Sardegna sud-occidentale): una risorsa scientifica e turistica di inestimabile valore*. Atti II Conv. Naz. "Geologia e Turismo", Bologna 3-4 novembre 2004, pp. 106-108.
- DE WAELE J., FRAU F., FORTI P., GALLI E., ROSSI A., 2004a - *The scientific and didactic importance of the mine caves of Mount San Giovanni (Southwest Sardinia, Italy)*. 32nd Int. Geol. Congr., Florence august 20-28, 2004, abs. vol. part 2: p. 1015.
- FABBRI M., FORTI P., 1986 - *Recenti esplorazioni nelle miniere dell'Iglesiente (Sardegna sud occidentale)*. Sottoterra 74, pp. 20-28.
- FORTI P., PERNA G., 1981 - *La turisticizzazione della Grotta di Santa Barbara nella Miniera di San Giovanni e la creazione di un Museo Minerario ad essa connesso (Iglesias - Sardegna sud occidentale)*. Le Grotte d'Italia 4(10), pp. 181-187.
- FORTI P., PERNA G., 1982 - *Le cavità naturali dell'Iglesiente*, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, Serie 2, 1, 229 p.
- FORTI P., PERNA G., 1983 - *Concrezioni e cristallizzazioni nei karst dell'Iglesiente (Sardegna SW)*. Atti XIV Congr. Naz. Spel. Bologna, Le Grotte d'Italia 4 (11), pp. 421-430.
- FRONDEL C., HEINRICH E. WM., 1942 - *New data on hetaerolite, hydrohetaerolite, coronadite, and hollandite*. Amer. Mineral., 27, pp. 48-56.
- HILL C., FORTI P., 1997 - *Cave minerals of the World*. Nat. Spel. Soc., Huntsville, Alabama (USA), 463 p.
- MC ANDREW J., 1956 - *Observations on hydrohetaerolite*. Amer. Mineral., 41, pp. 268-275.
- OSTWALD J., 1985 - *Some observations on the chemical composition of chalcophanite*. Mineral. Magazine 49, pp. 752-755.
- PAGLIARA A., 2004 - *Descrizione morfologica e mineralogica delle concrezioni complesse del sistema carsico di Santa Barbara (Iglesias, Sardegna)* - Tesi di Laurea, Univ. Studi Bologna, A.A. 2003-2004, 86 p.
- PERNA G., 1983 - *I più antichi cicli carsici*. Speleologia 9, p. 44.
- ROSSETTI V., ZUCCHINI A., 1957 - *Baritina della grotta di Santa Barbara*. Rend. Sem. Fac. Sci. Univ. Cagliari 26(3-4), pp. 240-255.
- ROUSE R.C., DUNN P.J., PEACOR D.R., 1984 - *Hedyphane from Franklin, New Jersey and Langban, Sweden: cation ordering in an arsenate apatite*. Amer. Mineral. 69, pp. 920-927.