

BOSSEA MMIII

CONVEGNO NAZIONALE

L'AMBIENTE CARSICO E L'UOMO

**MANIFESTAZIONE CELEBRATIVA UFFICIALE DEL CAI
PER IL "2003: ANNO INTERNAZIONALE DELL'ACQUA DOLCE"**

**LABORATORIO DIDATTICO DEL COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE DEL CAI
LABORATORIO CARSOLOGICO SOTTERRANEO
GROTTE DI BOSSEA (FRABOSA SOPRANA- CN) 5-8 SETTEMBRE 2003**

ATTI

**STAZIONE SCIENTIFICA DI BOSSEA - CAI CUNEO
PROVINCIA DI CUNEO**

LE MINERALIZZAZIONI DELLA GROTTA DI SANTA LUCIA INFERIORE (TOIRANO, SV) E LA LORO INTERPRETAZIONE NEL QUADRO DELL'EVOLUZIONE PALEOAMBIENTALE DELL'IPOGEO

Sergio G. Martini

G.E.A. Geology-Environment-Archaeology Snc - La Cerreta di Pian d'Ordì, Varese Ligure (Sp)

Laboratori per la Liguria Occidentale - Corso Nizza, 107 - 18039 Latte di Ventimiglia (Im)

Gruppo Speleologico C.A.I. Genova Bolzaneto - Via C. Reta, 16100 Genova

RIASSUNTO

Vengono di seguito presentate le risultanze degli studi mineralogici ottenutisi sulla base di rilevamenti diretti compiuti nella grotta "Santa Lucia Inferiore" (Li-59SV) a Toirano (Sv) e dell'attività di laboratorio finalizzata a caratterizzare i campioni prelevati in specifiche aree della stessa; scopo principale delle indagini, svolte su incarico della Soprintendenza Archeologica della Liguria, è stato quello di esplorare la possibilità di valutare gli effetti dovuti all'impatto antropico sulla stabilità dei cristalli di aragonite presenti nell'ipogeo, ovvero se detta fase minerale (per natura metastabile) sia soggetta a forme di deterioramento riconducibili a mutate condizioni ambientali.

Da quanto di seguito descritto si può apprezzare come la mappatura degli speleotemi nella grotta in questione abbia permesso di individuarne la stratigrafia morfogenetica minerale e da questa inferire dati paleoambientali utili a comprendere come la dinamica circolatoria della cavità sia mutata nel corso del tempo e, almeno in un segmento della cavità, risulti invertita. E' stato inoltre possibile identificare due specie minerali magnesiache di importante significato ambientale: l'huntite e la magnesite.

Si è ribadito come la trasformazione delle forme cristalline da fase aragonite a fase calcite sia del tutto naturale e non possa essere accelerata dal flusso dei visitatori; si è sottolineato infine come la formazione di mondmilch huntitico-magnesiaco sia compatibile con un ambiente caratterizzato da un'elevata pressione parziale della CO₂ in seno all'atmosfera ipogea, da un aumento della temperatura interna e da una forte evaporazione delle acque endocarsiche, fattori che contribuiscono in diversa misura a condurre a valori del rapporto Mg/Ca sempre più elevati.

METODOLOGIA DI INDAGINE

L'indagine di laboratorio è stata preceduta da un'attività preliminare di campagna volta al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- 1 - Mappatura generale degli speleotemi della grotta, necessaria all'identificazione esaustiva delle mineralogie caratterizzanti e alla loro differenziazione morfologica (fattori rispondenti alle condizioni ambientali della cavità e quindi alla sua evoluzione).
- 2 - Mappatura morfoscopica: numerosi accrescimenti cristallini risultano spiccatamente isorientati e questo costituisce una traccia di estrema importanza nella ricostruzione della paleocircolazione dell'aria nella cavità.
- 3 - In base ai dati ricavati dalle prime due fasi, definizione delle aree-campione su cui eseguire i controlli ed i prelievamenti minerali.
- 4 - Campionamento delle forme minerali.

Si provvedeva quindi all'esecuzione dell'attività di analisi, ovvero:

- 5 - Determinazione delle fasi minerali campionate.
- 6 - Analisi della stabilità delle fasi alle condizioni ambientali attualmente rilevate.
- 7 - Estrapolazione a condizioni ambientali originarie.
- 8 - Analisi del condizionamento ambientale sulle forme minerali.

La determinazione dei minerali e la differenziazione tra aragonite e calcite è stata eseguita sia in posto (aree-campione) che in laboratorio (sui campioni prelevati dalle stesse aree) con metodi ottici, osservazione agli UV, metodi chimici (reazione all'acido cloridrico, determinazione del peso specifico relativo rispetto al bromoformio e reazione al rosso congo) e diffrattogrammetria-X (presso i laboratori della Sezione di Petrografia e Mineralogia del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Genova).

MAPPATURA GENERALE DEGLI SPELEOTEMI

La mappatura è stata realizzata mediante la compilazione di una scheda dedicata per ogni ambiente della grotta: dai dati ricavati si può concludere come le manifestazioni minerali più interessanti ed abbondanti di "Santa Lucia Inferiore" (a prescindere dai classici *dripstone* e *flowstone*) siano le *coralloidi popcorn* e *globularitiche* seguite dalle *anthoditi frostwork*, dal *mondmilch* e dalle *helictiti eccentriche*. Vi sono comunque altri speleotemi molto importanti ed utilizzabili come "stretti" indicatori paleoambientali: tra questi i *bordi* e le concrezioni tipo *shelfstone*.

Descrizione degli speleotemi

La grotta di "Santa Lucia Inferiore" è stata idealmente suddivisa in cinque zone corrispondenti ai suoi ambienti principali: "Cristalli I", "Cristalli II", "Pozzo dell'Ade", "Pantheon", "Capitelli" e "Tanone". In tutte le aree sono presenti speleotemi e le tipologie più frequenti sono ovviamente quelle standard, ovvero *coperture*, *croste*, *stalattiti*, *stalagmiti*, *colonne*, *flowstone* e *drappaggi*: queste sono comuni a tutti gli ambienti descritti con l'eccezione del "Tanone" (tratto terminale) che, a parte pochi residui di stalattiti e stalagmiti fossili e quasi completamente erose, ne risulta completamente depauperato.

I "Cristalli I" & "II", il "Pozzo dell'Ade" ed il "Pantheon" sono gli ambienti maggiormente caratterizzati dalla presenza di *anthoditi* e *coralloidi*, sia a tipologia calcitica che aragonitica: predominano le *anthoditi* di tipo *frostwork* che si generano a partire da un substrato costituito da *coralloidi* tipo *popcorn* e *globularitico*; queste, a loro volta, emergono sempre da *coperture* e *croste primarie* o, a loro volta, ricoprenti *flowstone*, *stalattiti* e *stalagmiti*. Diversamente, le *anthoditi* tipo *flos ferri* (minoritarie rispetto al *frostwork*) emergono direttamente da *coperture* parietali e *flowstone*.

Cristalli I

E' l'area maggiormente caratterizzata dalla presenza di *anthoditi* tipo *frostwork* (foto 2) e, secondariamente, di tipo *flos ferri*: il primo è essenzialmente aragonitico, mentre il secondo, pure a prevalenza aragonitica, presenta anche la fase calcite. Le "efflorescenze" aciculari tipiche del *frostwork* aragonitico risultano sempre insediate su sporgenze e spigoli caratterizzati da precedenti speleotemi e, in particolare, da stalattiti e stalagmiti a loro volta colonizzate da *coralloidi* dei tipi *popcorn*, *globulariti* e *grappoli* (foto 3); la sequenza genetica degli speleotemi appare quindi essere: 1) *copertura* (e/o *crosta*); 2) *stalattite* (e *stalagmite*); 3) *popcorn* (e/o *globularite*, e/o *grappolo*); 4) *frostwork*.

Vi sono eccezioni e variazioni locali, quali l'emergere diretto di *flos ferri* (e/o di *helictiti* tipo *eccentrica*) dalle *coperture* carbonatiche (e/o dalle *croste*).

Le *stalattiti* risultano quasi del tutto eclissate dagli speleotemi che su di esse si sono insediati: quelle che maggiormente risaltano, quindi, sono le più recenti, ovvero la tipologia *cannula*, presente sia nella forma normale (calcitica) che nel sottotipo *spatite* (aragonitica).

Le *stalattiti* facilmente identificabili sono raramente del tipo normale: più facilmente appartengono alle tipologie *bulbosa* ed a *salsiccia* e, per quanto appaiano normalmente costituite da carbonato di calcio in fase calcite, sono altresì spesso caratterizzate da una sottile *copertura* "recente" di aragonite.

Sono stati identificati numerosi basamenti di *stalattiti* rotte (non è chiaro se questo sia da attribuirsi ad eventi naturali o ad azione antropica) presentanti il canalicolo interno intasato da argille: queste estrudono dal basamento e costituiscono un parziale calco del canale stalattitico. Alcune *cannule* presenta-

no un completo riempimento di argille, altre ancora ne hanno assunto solo la colorazione sulla superficie esteriore e presentano all'estremità segni di continuazione nell'accrescimento cristallino; riteniamo che le argille siano il prodotto della rielaborazione del materiale derivato dall'erosione selettiva che ha originato numerosi *boxworks* parietali: questi presentano spesso deboli patine rosse e giallastre che, nel quadro di futuro approfondimento conoscitivo della grotta, al pari delle argille sarebbe importante e interessante caratterizzare mineralogicamente.

Le *stalagmiti*, ancor più delle *stalattiti*, risultano totalmente coperte da altri speleotemi e sono quasi sempre trasformate nella tipologia albero di natale; su di essi risultano infine insediate *anthoditi* tipo *frostwork*, presentanti localmente tracce di *mondmilch*. Rispetto agli altri speleotemi sono state individuate poche colonne, ma completamente ricoperte da *coralloidi* del tipo *popcorn* e *globularitico*.

Le *coperture pavimentali* (di tipo normale) risultano insediate da *coralloidi* dei tipi *popcorn* ed a *grappoli* e talvolta del tipo a *globulariti*; questi speleotemi, spesso caratterizzati da tappeti di cristalli di neoformazione, inglobano livelli di distruzione a *stalattiti* e *stalagmiti* abbattute, segno evidente del loro costituire la parte finale di un ciclo deposizionale successivo alla genesi, distruzione (naturale) ed occlusione di speleotemi precedenti.

Le *coralloidi* di tipo *globularitico* ed a *grappolo* sono spesso localizzate alla base delle *stalagmiti* di tipo *albero di natale* e costituiscono un continuum che va raccordandosi alla *copertura* pavimentale, ove prevalgono le tipologie *globularitiche* su cui si insediano, successivamente, quelle *popcorn*; viene quindi confermata la sequenza degli accrescimenti che, nel caso particolare, diviene: 1) *stalattite* /*stalagmite*; 2) *globularite* (e/o *grappolo*); 3) *popcorn*; 4) *frostwork*; 5) *mondmilch*. La fase a *frostwork* è marcatamente "fototropica".

Globulariti e *grappoli* sono costituiti da calcite: i *popcorn* sono prevalentemente calcitici, ma ne sono stati individuati anche di aragonitici.

Nel ramo dei "Cristalli I" sono presenti ingenti quantità di *mondmilch* di fase secca (dry) nella forma prevalente di *croste* piane e *croste* convolute anche di notevole spessore (fino a 20 cm) alternate a livelli argillosi, limo-argillosi e coperture carbonatiche. Appare nettamente minoritario (raro) il *mondmilch* nella fase umida (wet). Scaglie e blocchi di *mondmilch* secco e polverulento risultano caoticamente accatastati in tratti localizzati della superficie pavimentale, spesso lungo i bordi delle pareti: non è chiaro se questi depositi siano naturali o correlabili all'attività di esplorazione della grotta e, quindi, di allargamento dei rami non facilmente percorribili.

Cristalli II

La situazione rispecchia quella già definita nel precedente paragrafo, con l'aggiunta della presenza di speleotemi del tipo dighe (nella forma di *microgours*) in tratti della copertura pavimentale, *anthoditi* in forma non così estensiva e massiccia come ai "Cristalli I" e *mondmilch* sporadico in fase dry.

La presenza di *microgours* è rappresentativa di una fase paleoambientale caratterizzata dalla presenza di acque a flusso basso-laminare.

Pozzo dell'Ade

Corrisponde alla parte più bassa della grotta ed è prevalentemente caratterizzata dalla presenza di un tappeto *anthoditico* parietale tipo *frostwork*, più o meno omogeneo, con cristalli aciculari di dimensione nettamente inferiore (ca. 1 cm) rispetto ai "Cristalli I" e "II"; nonostante l'abito cristallino, non tutti gli elementi di questo tipo si sono rivelati essere costituiti da carbonato di calcio in fase aragonite: la presenza di calcite induce a ritenere che siano in corso fenomeni di paramorfosi.

La colorazione tendente al giallastro ed al giallo-rugginoso di vasti lembi di tappeto cristallino può essere attribuita ad ossidi derivati da infiltrazioni limo-argillose ben individuabili nella parte sommitale della cavità e non è comunque un fenomeno sconosciuto nella mineralogia delle aragoniti (ancor meno per la calcite). L'opacità e la torbidità dei cristalli sembra invece caratterizzare le paramorfosi a calcite rispetto all'originale aragonite.

La “polverizzazione” cui alcune aree del tappeto cristallino sono soggette riguarda sia i termini calcitici che quelli aragonitici e non è quindi relazionabile (e non avrebbe senso lo fosse) a trasformazioni tra le due fasi, quanto invece alla genesi di nuove fasi minerali costituenti il *mondmilch*: l'huntite e la magnesite; il fenomeno è però di entità così lieve da non essere rilevabile come speleotema a sé stante (in quest'area non è presente *mondmilch*) e viene quindi avvertito erroneamente come diretto prodotto di un qualche fattore di deterioramento dei cristalli stessi.

I cristalli aragonitici e calcitici interessanti l'area pavimentale sono talora organizzati in piccole strutture stalagmitiche del tipo *albero di natale*, alte non più di 5 cm (quindi ben diverse da quelle interessanti il ramo dei “Cristalli I” che superano i 30 cm) e formanti eterogenei tappeti cristallini; quelli che caratterizzano quest'area sono identici agli analoghi rilevati nei “Rami Nuovi” (al di sotto del “Ramo del Fascio” nella “Grotta della Basura”).

Non vi sono forme anthoditiche del tipo *flos ferri*; risaltano invece, per quantità, gli speleotemi coralloidi del tipo *corallo s.s.* e del sottotipo *knobstone*; sono comunque presenti, in forma minore, le *coralloidi* tipo *popcorn* e le *globulariti*.

Tutte queste manifestazioni minerali risultano essere costituite da calcite ed emergono da precedenti coperture carbonatiche, *croste* pavimentali, *stalattiti*, *stalagmiti* e *colonne*; non si rilevano, lungo il percorso turistico e negli immediati dintorni, *stalattiti* del tipo *cannula* o del tipo *spatite*.

Sono invece presenti *coperture* pluristratificate e *shelfstone* del tipo *coke table*.

Sullo strato esterno di alcune *stalattiti*, *stalagmiti* e *flowstone* si evidenzia desquamazione e polverizzazione: il fenomeno interessa incipientemente aree limitate degli speleotemi e non è quindi riconducibile alla genesi di nuove fasi minerali, quanto all'azione di processi decarbonatanti di origine non immediatamente identificabile ma, abbastanza verosimilmente, batterica.

Pantheon

E' un'area del percorso turistico fortemente caratterizzata dalla presenza di diverse morfologie e fasi cristalline, costituente quindi buon termine di paragone rispetto a quanto rilevato nel ramo non turisticizzato dei “Cristalli I”.

Stalattiti, *stalagmiti* e *colonne* sono presenti in tutto il settore e, con l'eccezione di quelle di dimensione “monumentale”, risultano spesso eclissate dalle formazioni successive; il fenomeno è particolarmente apprezzabile contro parete, dove alcune “finestre” tra gli agglomerati minerali permettono di vedere come la parete stessa sia costituita da intreccio e sovrapposizione di speleotemi successivi. Tra questi sono evidenti *stalattiti* (s.s. e tipo *cannula*) parzialmente ricoperte da *flowstone* e *coperture*; sul pavimento sono presenti *croste* e ristrette zone a *microgours*.

Sono altresì presenti, nel tratto che conduce verso “I Capitelli”, *shields* di tipo *dischi s.s.*

Stalattiti, *stalagmiti*, *coperture*, *croste* e *flowstone* risultano estensivamente ricoperte da *coralloidi* del tipo *popcorn* di svariate dimensioni (da millimetrici a decimetrici) oltreché da *coralloidi* del tipo *grappolo* e *globularitico*, sia a composizione calcitica che aragonitica. Alcuni *popcorn* presentano strutture riconducibili a *cave blisters* ma non è chiaro se si tratti propriamente di questo speleotema o di successivi fenomeni di erosione selettiva (peraltro difficilmente inquadrabile) sugli stessi. Alla fase di concrezionamento coralloide ha fatto seguito la genesi di *anthoditi* aragonitiche e calcitiche, nella forma di *frostwork s.s.* e di *frostwork parietale*: quest'ultimo appare spesso di formazione recente e si può notare come i cristalli aciculari inizino la struttura anthoditica solo ed esclusivamente sulle sommità dei bulbi dei *popcorn*. Sembra esistere una correlazione tra fase minerale e substrato: le *anthoditi* aragonitiche tendono a formarsi sui *popcorn* aragonitici e non su quelli calcitici; ulteriori dati elaborati su base statistica potranno confermare il fenomeno che, su basi cristallografiche, appare molto credibile.

Le *anthoditi* tipo *frostwork s.s.*, similmente a quanto rilevato ai “Cristalli I” e “Cristalli II”, prediligono spigoli e propaggini parietali; quindi, ricoprono spesso le *stalattiti* più esterne e le *stalagmiti*, che assumono conseguentemente una tipologia *ad albero di natale*: gli accrescimenti cristallini, però, manifestano morfologie e dimensioni tipiche del *frostwork parietale* e non raggiungono mai le dimensioni, la lucentezza e la bellezza delle tipologie rilevate nei rami non turistici.

Non sono presenti anthoditi tipo *flos ferri*; sono state invece rinvenute alcune *helictiti*, sia del tipo *eccentrica* che del tipo *beaded*; si tratta comunque di termini minoritari e l'unico elemento campionato ha rivelato composizione aragonitica.

Lo speleotema che più caratterizza il "Pantheon" è sicuramente il *mondmilch* in fase umida (*wet*); questi è presente talvolta nella forma di patine e colature che scendono per gravità giù dalle coperture parietali in densi rigagnoli, ma più generalmente nella forma di addensamenti plastici tra i cristalli aciculari delle aragoniti, in posizioni che comportano necessariamente un accrescimento diretto (foto 4).

La quasi totalità del *mondmilch* rinvenuto è del tipo *wet*, ma ne sono comunque presenti, sul pavimento costeggiante i bordi delle pareti, frammenti del tipo *dry* con morfologie superficiali da essiccamento a *crosta di pane* (foto 5).

Le aree in cui sono presenti i maggiori addensamenti di *mondmilch* corrispondono alla parte basale delle pareti dell'anfiteatro del "Pantheon", in direzione del "Pozzo dell'Ade", per un'altezza di non più di un metro (foto 1); in questa zona la morfologia parietale sembra indicare come gli speleotemi abbiano eclissato uno *shelfstone* del tipo *bordo s.s.* (indicatore della passata presenza di un lago).

L'analisi diffrattogrammetrica del *mondmilch* ha indicato questi essere costituiti da una miscela di carbonati di calcio e magnesio, in particolare da huntite (prevalente) e magnesite (minoritaria); non sono presenti né calcite né aragonite (fig. 1).

I Capitelli

L'area dei "Capitelli" presenta speleotemi e morfologie di notevole importanza nel quadro della comprensione del paleoambiente ipogeo e delle sue modificazioni.

Si rilevano *coperture* varicolori e *croste* pavimentali; la parte basale delle pareti è però caratterizzata da mantellature di tipo *mammellonare*, rappresentative di ambienti deposizionali sommersi.

Shelfstone del tipo *bordi* (su due livelli prossimali separati da *coralloidi* del tipo *popcorn*) sono presenti nel corridoio di accesso ai Capitelli dove, oltre ad un altro *bordo s.s.* (molto alto sulla parete) si rinviene (in prossimità del pavimento attuale) la tipologia *coke table*, presentante al suo interno depositi argillo-limosi dal potenziale non esplorato.

Lo speleotema *shelfstone* maggiormente caratterizzante l'area dei "Capitelli" è quello che, insieme alle stalattiti del tipo *lavabottiglie*, dà nome all'area stessa, ovvero la tipologia a *candelieri*; queste si sono generate a partire da strutture che, seppur spesso erroneamente definite "stalagmiti", sono in realtà *rafts* di tipo *coni*, ovvero speleotemi subacquei.

Le superfici dei *coni* e quelle degli *shelfstone* che risultavano sommerse sono coperte da *coralloidi* del tipo *clusteriti*, *botroidi* e *grapefruit*. Al di sopra di queste strutture, talvolta ulteriormente caratterizzate da *coperture* (tra le quali la tipologia *aerosol sinter*) e *croste*, si sono insediati *coralloidi* di ambiente subaereo quali *popcorn*, *grappoli*, *globulariti* e *coralli s.s.* Come precedentemente accennato, una copertura di *popcorn* è a tetto del livello più basso dello *shelfstone* tipo *bordo s.s.*, ma risulta immediatamente eclissata da un successivo *shelfstone* dello stesso tipo: questa piccola sequenza è rappresentativa di una fase concrezionante con acque a pelo libero seguita da una fase deposizionale secca, nuovamente eclissata da una successiva fase concrezionante con acque a pelo libero a livello leggermente superiore a quello precedente.

La sommità dei *coni* presenta talora *vaschette d'erosione* derivanti dallo stillicidio di acque "inacidite". Una formazione lineare inclinata ed interessante una zona della parete apparentemente priva di discontinuità morfologiche può essere attribuita ad un *bordo s.s.* di genesi eolica ipogea (d.d.p.). Non vi è traccia alcuna di *mondmilch* e non sono evidenti speleotemi di altra tipologia.

Tanone

Il "Tanone" non presenta alcuno speleotema (neppure *coperture* e/o *croste*) fatta eccezione per pochissime stalattiti e stalagmiti quasi completamente consunte dalla presumibile azione corrosiva delle acque di condensa endocarsica.

MAPPATURA MORFOSCOPICA PER CARATTERIZZAZIONE PALEOAMBIENTALE ENDOGENA

In alcuni ambienti di "Santa Lucia Inferiore" sono presenti *anthoditi* e *coralloidi* isorientate accresciutesi su *coperture*, *croste*, *stalattiti*, *stalagmiti* e *colonne*. In ragione dei più recenti studi relativi alla genesi di questi elementi cristallini si è provveduto all'esecuzione di una mappatura della loro direzione di accrescimento preferenziale, essendo questa in stretta relazione con il paleosistema di circolazione d'aria della cavità (COLLIGNON, 1988).

Tra gli speleotemi il cui sviluppo è strettamente legato al trasporto dei germi di accrescimento in seno alle correnti d'aria abbiamo le *anthoditi* di tipo *frostwork*, le *coperture* di tipo *aerosol sinter* ed i *bordi s.s.* Per altri speleotemi la direzionalità è invece semplicemente influenzata dalle correnti d'aria: *stalattiti a pipa* e *coralloidi tipo popcorn*, *grappoli*, *globulariti* e *coralli* (in questi ultimi può esservi una sinergia tra accrescimento per acque di infiltrazione, pellicole superficiali, vettore vento e trasporto dei germi cristallini nella corrente d'aria). In particolare, lo sviluppo delle *anthoditi frostwork* aragonitiche, diversamente dalle eccentriche, è caratteristico delle gallerie fortemente aerate ed il loro modello genetico è stato ben esplicito, dal punto di vista chimico-fisico, per i domini dolomitici (ROQUES, 1965). In "Santa Lucia Inferiore" risalta altresì la presenza di numerosi speleotemi caratteristici di ambienti di acque a pelo libero (*stalattiti* di tipo *lavabottiglie*, *shelfstone* di tipo *bordi s.s.* e/o *candelieri* e/o *coke table*, *dighe s.s.* o di tipo *microgours*) e di ambienti sommersi (*rafts* di tipo *coni*, *coralloidi* di tipo *coralli* sottotipo *knobstone* e/o di tipo *clusteriti*, *botroidi* e *grapefruit*, *coperture* e *croste* di tipo *mammellonare*) rappresentativi di quei paleoambienti in cui l'evaporazione delle soluzioni acquose dei laghi sotterranei conduceva alla formazione di salamoie essenziali alla genesi delle mineralogie rinvenute, in particolare delle aragoniti (ROQUES, 1965).

Morfoscopia degli speleotemi di Santa Lucia Inferiore

Cristalli I

Morfoscopia degli speleotemi di Santa Lucia Inferiore: Cristalli I		
Speleotema	Ambiente di formazione	direzionalità
Coperture s.s.	subaereo (pellicole idriche superficiali, p.w.s.)	assente
Croste s.s.	subaereo (disseccamento)	assente
Croste convolute	subaereo (gravità e disseccamento)	assente
Stalattiti cannula/spatite	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalattiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalattiti bulbose	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalattiti a salsiccia	subaereo (gocciolamento + p.w.s.)	caotica
Stalattiti a pipa	subaereo (gocciolamento deviato)	verso Pozzo dell'Ade
Stalagmiti albero di natale	subaereo	assente
Colonne s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Anthoditi frostwork s.s.	subaereo (condensa endogena + corr. d'aria)	caotica
Anthoditi frostwork orientato	subaereo (corrente d'aria)	verso Pozzo dell'Ade
Anthoditi flos ferri	subaereo (infiltrazione)	assente
Coralloidi popcorn s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi popcorn orientato	subaereo (p.w.s., corrente d'aria)	verso Pozzo dell'Ade
Coralloidi grappoli s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi globulariti s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Mondmilch	subaereo (condensa, p.w.s., correnti d'aria?)	assente
Cave blisters s.s.	subaereo (infiltrazione)	assente
Boxworks s.s.	subaereo (erosione selettiva)	assente

Da quanto descritto si può apprezzare come nel ramo dei “Cristalli I” siano unicamente presenti speleotemi di ambiente subaereo e come, tra questi, ve ne siano tre che costituiscono un chiaro indicatore della direzionalità di paleocorrenti d’aria: *stalattiti deviate (a pipa)*, *anthoditi frostwork* e *coralloidi popcorn* orientati. Le *stalattiti a pipa* hanno il corpo principale con direzione concorde all’asse longitudinale del ramo ipogeo ed indicano un flusso d’aria “ad uscire” dal ramo, ovvero verso il “Pozzo dell’Ade”. Considerando che il collegamento tra il ramo principale di “Santa Lucia Inferiore” ed i “Cristalli I” è stato prevalentemente scavato mediante la realizzazione di un tunnel intersecante ambienti di piccole dimensioni, si può ipotizzare che questa forte corrente d’aria fluisse non orizzontalmente, bensì, con una forte componente verticale, verso un ambiente soggiacente all’attuale ramo dei “Cristalli I”, attraverso una diaclasi ora eclissata da coperture detritiche e da argille residuali. Le *anthoditi frostwork* presentano spiccata direzionalità, ma con verso contrastante; da un lato troviamo infatti delle formazioni con verso di accrescimento opposto a quello delle *stalattiti a pipa*, fenomeno che indica un consistente flusso di aria (trasportante un aerosol ricco di germi cristallini) “entrante nel” ramo dei “Cristalli I”, ovvero proveniente dall’area dei bacini idrici interni alla grotta di “Santa Lucia Inferiore”; dall’altro lato troviamo *anthoditi* aragonitiche “recenti” sviluppatesi assecondando un flusso di aria fuoriuscente dal ramo dei “Cristalli I”, quindi concordi allo sviluppo delle *stalattiti a pipa*; considerando che queste ultime formazioni sono completamente ricoperte da *coralloidi popcorn* ed *anthoditi frostwork*, si può anche ipotizzare che il loro corpo sia totalmente costituito da questi due speleotemi dalla spiccata direzionalità, ovvero che non si tratti, in realtà, di *stalattiti a pipa*: in questo caso il loro verso di accrescimento sarebbe concorde a quello dei *frostwork* più antichi e compatibile con una corrente d’aria fluente nel ramo dei “Cristalli I” dal corpo principale della cavità; non è possibile risolvere questo problema senza campionare (cioè distruggere) una *stalattite a pipa*, operazione che non risulta compatibile con la necessità di preservare questi importanti speleotemi. Per i *coralloidi* tipo *popcorn* (su cui si sono spesso accresciute le *anthoditi frostwork*) si notano concentrazioni rappresentative di flussi d’aria con direzionalità concorde a quella dei *frostwork* descritti. Ne consegue che sono documentate almeno due paleocorrenti d’aria e che in tempi relativamente recenti si è avuta l’inversione del flusso: la più antica fluiva “per” il ramo dei “Cristalli I” e la più recente fluiva “dal” ramo dei “Cristalli I”; quest’ultima è forse ancora latentemente attiva e può essere responsabile delle più recenti formazioni di *mondmilch* nel ramo dei “Cristalli I”.

Cristalli II

Valgono le stesse considerazioni espresse nel precedente paragrafo, con l’unica variante dell’assenza delle *stalattiti a pipa*; la direzionalità delle *anthoditi* tipo *frostwork* e dei *coralloidi* tipo *popcorn* è compatibile con un flusso d’aria fuoriuscente dal ramo dei “Cristalli II”, cioè fluente verso il corpo principale della grotta.

Pozzo dell’Ade

Morfoscopia degli speleotemi: Pozzo dell’Ade

Speleotema	Ambiente di formazione	direzionalità
Coperture s.s.	subaereo (pellicole idriche superficiali = p.w.s.)	assente
Croste s.s.	subaereo (disseccamento)	assente
Stalattiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalagmiti albero di natale	subaereo	assente
Colonne s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Drappeggi s.s.	subaereo (gocciolamento e p.w.s.)	assente
Anthoditi frostwork parietali	subaereo (condensa endogena + corr. d’aria)	caotica
Coralloidi popcorn s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi grappoli s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi globulariti s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi coralli (knobstone?)	subacqueo?	assente
Shelfstone bordi coke table	subaereo (acque a pelo libero)	assente
Mondmilch?	subaereo (condensa, p.w.s., correnti d’aria?)	assente

La quasi totalità degli speleotemi rispecchia un paleoambiente subaereo, con l'eccezione dei *coralloidi* di tipo *coralli* sottotipo *knobstone* che potrebbero testimoniare una condizione subacquea: la loro determinazione è in realtà problematica in quanto le variazioni tra i sottotipi *coralli s.s.* e *coralli knobstone* non sono sempre così chiare, anche in ragione della possibile sovrapposizione di fasi erosive dovute ad acque di condensa endocarsica.

Risultano assenti gli speleotemi indicatori di direzionalità delle paleocorrenti d'aria, per quanto le *anthoditi* generanti *frostwork* a tappeto cristallino rispecchino nella loro caoticità condizioni di flusso d'aria parietale turbolento. Si può quindi immaginare l'esistenza di una paleocorrente d'aria ricca di germi cristallini (proveniente quindi da zone caratterizzate dalla presenza di salamoie) che lambiva le pareti del "Pozzo dell'Ade": questi avrà funzionato come trappola fredda in estate e come trappola calda (o come area occlusa) in inverno; condizioni analoghe sono state rilevate sulle pareti dei "Rami Nuovi".

Pantheon

Morfoscopia degli speleotemi: Pantheon		
Speleotema	Ambiente di formazione	direzionalità
Coperture s.s.	subaereo (pellicole idriche superficiali = p.w.s.)	assente
Croste s.s.	subaereo (disseccamento)	assente
Dighe microgours	subaereo (p.w.s.)	assente
Flowstone sheeting s.s.	subaereo (p.w.s.)	assente
Stalattiti cannula	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalattiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalagmiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalagmiti albero di natale	subaereo	assente
Colonne s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Drappeggi s.s.	subaereo (gocciolamento e p.w.s.)	assente
Anthoditi frostwork s.s.	subaereo (condensa endogena + corr. d'aria)	caotica
Anthoditi frostwork parietale	subaereo (condensa endogena + corr. d'aria)	parietale
Coralloidi popcorn s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi grappoli s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi globulariti s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Cave blisters s.s.	subaereo (infiltrazione)	assente
Helictiti eccentrica s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	caotica
Helictiti beaded s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	caotica
Shelfstone bordi s.s.	subaereo (acque a pelo libero)	assente
Mondmilch?	subaereo (condensa, p.w.s., correnti d'aria?)	assente

Il "Pantheon" rispecchia, per certi aspetti, condizioni comparabili a quelle dei "Cristalli I" e costituisce un buon termine di riferimento nel tentativo di determinare l'impatto antropico sugli speleotemi della grotta. Anche nel "Pantheon" sono esclusivamente presenti formazioni di genesi subaerea ma, diversamente dai "Cristalli I", non sono spiccatamente evidenti condizioni di direzionalità nella paleocorrente d'aria, per quanto esistano *anthoditi* tipo *frostwork* abbastanza ben sviluppate (senza giungere però alle dimensioni rilevate nei "Cristalli I").

L'assenza di direzionalità può essere imputata alla vastità dell'area e quindi alla mancanza delle condizioni (specifiche differenze di pressione) necessarie affinché il flusso preferenziale si verifichi. La situazione rispecchia quindi, almeno nelle linee generali, quella descritta nel precedente paragrafo: sono infatti evidenti le condizioni di flusso parietale turbolento (tappeto di cristalli caotico) che riconducono ad una paleocorrente d'aria proveniente dall'alto (specie in estate) e fluente poi verso il "Pozzo dell'Ade".

Il "Pantheon" avrà quindi funzionato da trappola fredda e questa situazione dà ora ragione della presenza del *mondmilch* proprio sulle pareti dell'anello basale del "Pantheon" stesso, cioè in corrispondenza degli accrescimenti aciculari delle *anthoditi* aragonitiche (già corrispondenti agli accrescimenti direzionali dei *popcorn* e delle altre *coralloidi*).

I Capitelli

Morfoscopia degli speleotemi: Capitelli		
Speleotema	Ambiente di formazione	direzionalità
Coperture s.s.	subaereo (pellicole idriche superficiali = p.w.s.)	assente
Coperture sinter	subaereo (corrente d'aria)	dal Tanone
Coperture mammellonari	subaqueo (zona sommersa)	assente
Croste s.s.	subaereo (disseccamento)	assente
Bordi s.s.	subaereo (corrente d'aria laminare)	indeterminabile
Stalattiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalattiti lavabottiglie	subaereo (acque a pelo libero)	assente
Stalagmiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Colonne s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Rafts coni s.s.	subaqueo (deposizione in zona sommersa)	assente
Coralloidi popcorn s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi grappoli s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi globulariti s.s.	subaereo (condensa endogena, p.w.s.)	assente
Coralloidi coralli s.s.	subaereo (condensa endogena, aria)	caotica
Coralloidi clusteriti s.s.	subaqueo (infiltrazione in zona sommersa)	assente
Coralloidi botroidi s.s.	subaqueo (infiltrazione in zona sommersa)	assente
Coralloidi grapefruit s.s.	subaqueo (infiltrazione in zona sommersa)	assente
Shelfstone bordi s.s.	subaereo (acque a pelo libero)	assente
Shelfstone bordi candelieri	subaereo (acque a pelo libero)	assente
Shelfstone bordi coke table	subaereo (acque a pelo libero)	assente

L'area dei "Capitelli" presenta speleotemi spiccatamente caratterizzanti ambienti sommersi e di acque fluenti a pelo libero e di laghi sotterranei.

Sono altresì presenti indicatori di correnti d'aria, anche direzionali: al di sopra dei *rafts* tipo coni s.s. sono presenti accrescimenti asimmetrici di *coralloidi* tipo *popcorn* e di tipo *coralli s.s.*, chiari indicatori di un flusso d'aria fluente dal "Tanone" verso il "Pantheon".

A conferma di questo fatto si ritrovano sottili coperture asimmetriche tipo *aerosol sinter* sui *coni* stessi e sulle coperture mammellonari, nonché un *bordo s.s.* inclinato di 45° sulla parete del corridoio di accesso al "Pantheon", rappresentativo della fascia di transizione tra flusso d'aria in regime laminare e regime turbolento.

Ne consegue che nell'area dei "Capitelli" è possibile individuare due paleoambienti nettamente differenziati: uno, a più cicli, riconducibile a condizioni vadose (zone sommerse, quindi acque correnti a pelo libero ed infine bacino chiuso) ed un altro, successivo al prosciugamento del lago sotterraneo, caratterizzato da corrente d'aria fluente verso il "Pantheon" e trasportante germi cristallini responsabili degli accrescimenti differenziati delle coralloidi e della deposizione di *bordi s.s.* e dell'*aerosol sinter*.

La stessa corrente d'aria, arricchitasi localmente dalle salamoie residue, è forse responsabile dell'accrescimento delle *anthoditi* del "Pantheon" e del "Pozzo dell'Ade".

Tanone

Morfoscopia degli speleotemi: Tanone		
Speleotema	Ambiente di formazione	direzionalità
Stalattiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente
Stalagmiti s.s.	subaereo (gocciolamento)	assente

Il "Tanone" è completamente depauperato da qualsiasi speleotema e presenta direttamente le nude pareti dolomitiche interne, con rare *stalattiti* e *stalagmiti* residue.

In prossimità del pavimento, per un'altezza variabile tra i 5 ed i 25 cm, si ha spesso uno strato di inversione termica che può anche generare delle suggestive nebbie; nel caso in cui mancasse la porta "blindata" che dà accesso alla parte interna della grotta (a partire dall'ingresso alla zona dei "Capitelli"), quindi, una massa di aria fredda si riverserebbe al suo interno in estate, innescando le correnti precedentemente descritte (a prescindere dall'assenza di bacini acquiferi).

Ricostruzione della paleocircolazione dell'aria

Da quanto precedentemente descritto è possibile ricostruire indicativamente il sistema circolatorio dell'aria che ha interessato la cavità nel passato (fig. 3).

La morfologia degli speleotemi e le loro particolari forme-guida indicano come l'area dei "Capitelli" fosse inizialmente caratterizzata da un bacino idrico e successivamente soggetta ad un flusso di aria procedente verso l'interno, in direzione del "Pantheon"; questo flusso può essere stato innescato da una differenza di pressione generata dallo svuotamento delle acque del bacino, in ragione del naturale abbassamento del livello di falda e del ringiovanimento carsico.

Il flusso d'aria era abbastanza consistente da lambire le pareti in regime laminare, avere transizione a regime turbolento e fluire, in queste condizioni, giù per le pareti del "Pantheon" verso il "Pozzo dell'Ade": entrambe le aree sono quindi caratterizzate da tipici tappeti cristallini parietali.

La genesi delle aragoniti può quindi essere riconducibile, in queste condizioni, al trasporto di germi cristallini dalle salamoie dell'area dei "Capitelli", ove il rapporto Mg/Ca, a seguito della continua evaporazione favorita dalla corrente d'aria, raggiungeva livelli compatibili con la deposizione dell'aragonite al posto della calcite.

Il "Pozzo dell'Ade" corrisponde presumibilmente ad un punto di accesso ai livelli inferiori del sistema carsico, dalla cui occlusione risulta conseguentemente bloccata anche la circolazione atmosferica ipogea. Dai "Cristalli II" l'aria fluiva verso il "Pozzo dell'Ade" e valgono quindi le stesse considerazioni già espresse per il ramo principale della grotta.

La situazione ai "Cristalli I" risulta invece più complessa in ragione dell'inversione della circolazione dell'aria; il "motore principale" di questa, evidentemente, era ancora il "Pozzo dell'Ade", ma la quantità di aragonite presente richiede di postulare l'esistenza di bacini idrici sotterranei (e quindi di salamoie) attualmente non conosciuti; la direzionalità dei flussi d'aria, peraltro, richiede pure l'esistenza di un altro ingresso alla cavità, o quantomeno di un collegamento diretto di questa con "Santa Lucia Superiore".

STUDIO CHIMICO-FISICO, MINERALOGICO E PETROGRAFICO DEGLI SPELEOTEMI DELLA GROTTA DI "SANTA LUCIA INFERIORE", CON SPECIFICO RIFERIMENTO ALLA STABILITÀ DELLE FASI "CALCITE - ARAGONITE" DELLE MINERALIZZAZIONI A CARBONATO DI CALCIO

In base ai dati dei monitoraggi preliminari della grotta (eseguiti nel 1993 e nel 1994) ed a valutazioni immediate di condizioni di presumibile deterioramento (sfarinamenti, ingiallimenti, desquamazioni), sono state definite tre aree da cui prelevare i campioni: il "Ramo dei Cristalli" (non turistico), il "Pozzo dell'Ade" (turistico - adiacente al percorso) ed il "Pantheon" (turistico - lontano dal percorso).

Si ritiene che questi punti, per ricchezza e varietà di esemplari, costituiscano le maggiori e più belle concentrazioni di *anthoditi* e *coralloidi* di tutta la grotta; le loro posizioni rispetto al passaggio dei turisti li rendevano idonei a confronti incrociati e valutazioni di impatto ambientale.

Campionamento delle forme minerali e risultati delle analisi

Seguendo un approccio di minimo impatto ambientale, finalizzato alla preservazione delle testimonianze naturali custodite nella grotta, sono stati prelevati un totale di 39 campioni di speleotemi, non impiegati ad esaurimento per le analisi; sono state infatti eseguite complessivamente 40 analisi chimi-

co-fisiche e mineralogiche su 32 campioni; i prelievi di codice TOIR94C01a, TOIR97A05b, TOIR97C02, TOIR98A14b e TOIR98C02 (*mondmilch* tipo wet), TOIR97C01, TOIR98A05a, TOIR98A06, TOIR98A07, TOIR98A08 e TOIR98A09 (*mondmilch* tipo dry), TOIR97B02b e TOIR98B02b (*mondmilch* tipo dust) riguardano la stessa tipologia, la cui caratterizzazione chimica è inadeguata e la cui determinazione per via ottica è impossibile; per questo motivo si è provveduto all'analisi per diffrattogrammetria-X, che ha permesso di individuare le fasi minerali huntite (predominante) e magnesite (fig. 1).

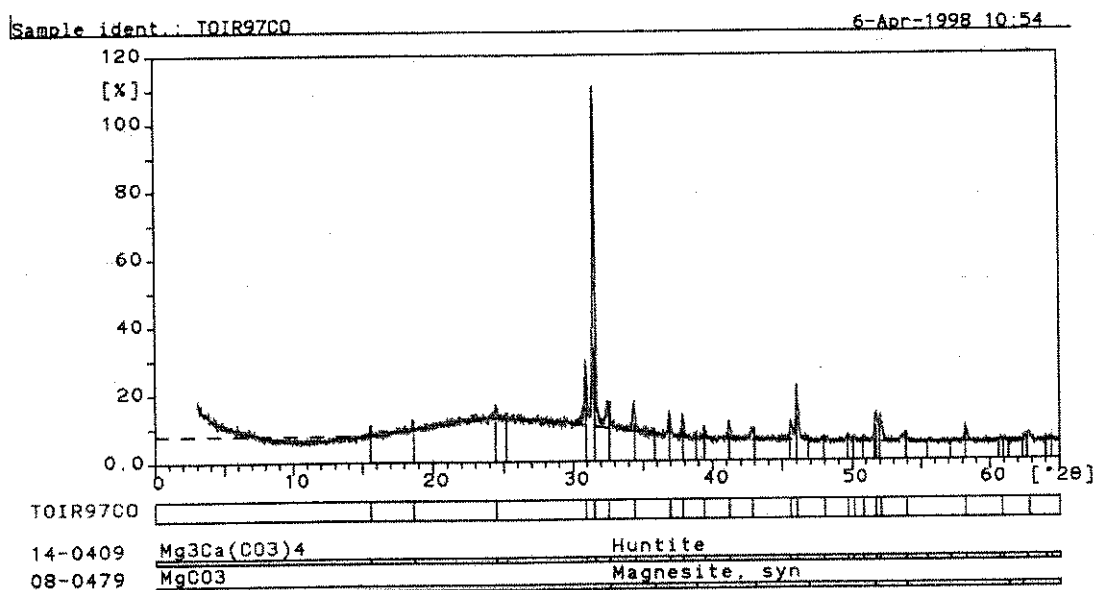


Fig. 1 - Fasi minerali costituenti il *mondmilch* della grotta di Santa Lucia Inferiore, Toirano (Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova).

SIGNIFICATIVITA' AMBIENTALE E PALEOAMBIENTALE DEGLI SPELEOTEMI E DELLE FASI MINERALI RILEVATE A SANTA LUCIA INFERIORE

Gli speleotemi ed i minerali individuati in "Santa Lucia Inferiore" sono interpretabili in relazione alla dinamica ambientale di questo dominio ipogeo ed alla sua evoluzione trascorsa.

E' ben noto come i meccanismi tramite il quale i minerali carbonati vengono dissolti, trasportati e depositati dalle acque sotterranee siano compresi nell'evoluzione chimica delle acque carsiche, suddivisa negli stadi (HOLLAND, 1964): carbonatazione (del suolo); dissoluzione (del carbonato di calcio); equilibrio (con l'ambiente ipogeo). Viceversa, lo scambio di anidride carbonica è il meccanismo dominante della deposizione dei carbonati nella maggior parte degli ipogei.

Anche l'evaporazione delle soluzioni acquose sotterranee può causare supersaturazione e deposizione del soluto: dato che nelle grotte l'umidità è molto alta (approssimandosi al 100 %) si tratta in genere di un meccanismo di importanza minore rispetto al rilascio di CO₂; fanno eccezione le grotte in climi freddi e aridi.

Nelle grotte alpine (per esempio alla "Castelguard Cave") l'evaporazione può essere alta nelle zone in cui l'input di acque vadoze non è sufficiente a compensare l'asciugamento prodotto dall'aria fredda entrante nel sistema: questo modello può essere significativo anche per "Santa Lucia Inferiore", specie a seguito dell'approfondimento della falda conseguente, da un lato, all'evoluzione naturale del sistema e, dall'altro lato, all'attività di esplorazione finalizzata alla turistizzazione della grotta (svuotamento del bacino dell' "Antro di Cibelet").

I polimorfi del carbonato di calcio e le aragoniti di “Santa Lucia Inferiore”: considerazioni

Tra i polimorfi del carbonato di calcio (calcite, aragonite e vaterite) mentre la presenza in grotta della calcite non ha mai destato particolari domande (essendo caratterizzata da condizioni termodinamiche perfettamente compatibili con gli ambienti relativi alla superficie terrestre), l'occorrenza dell'aragonite è stata per molto tempo un puzzle e certi suoi aspetti sembrano non essere ancora del tutto chiari.

L'aragonite delle grotte cristallizza tipicamente in abito aciculare e la calcite nelle forme romboedriche o a “dente di cane”. E' ben noto che l'aragonite, essendo una struttura di più alta energia rispetto alla calcite, è metastabile e, con il passare del tempo tende a riorganizzarsi nella forma di minima energia, cambiando quindi la sua struttura cristallina in quella della calcite stessa: la velocità di trasformazione è estremamente bassa e si velocizza solo alla temperatura di circa 550K-600K, termini ovviamente non interessanti gli ambienti carsici.

La trasformazione, inoltre, avviene di norma mantenendo l'abito aciculare dell'aragonite, assecondando così un tipico fenomeno naturale noto come *paramorfosi*.

La temperatura e la pressione tipiche degli ambienti ipogei cadono completamente al di fuori dal campo di stabilità dell'aragonite e ben all'interno, invece, del campo di stabilità della calcite.

Inoltre, l'aragonite è del 16 % più solubile della calcite (alla temperatura ed alla pressione ambiente) quindi teoricamente la calcite dovrebbe precipitare sempre prima dell'aragonite, ma i fatti contraddicono questi dati: l'aragonite si forma frequentemente nelle grotte, anche in quelle di alta quota, dove la temperatura dell'atmosfera ipogea può raggiungere lo zero.

La letteratura sull'argomento è molto consistente e si rilevano le seguenti costanti nella presenza delle aragoniti in grotta:

- quando è presente, lo è prevalentemente nelle cavità di origine più recente;
- quando è presente in cavità di origine antica, è quasi sempre il prodotto di processi minerogenetici esplicatisi in fasi piuttosto recenti dell'evoluzione della cavità stessa;
- vi sono stalattiti con nucleo aragonitico e shell esterno calcitico;
- vi sono fenomeni di paramorfosi (calcite ad abito aragonitico).

Da quanto espresso sembrerebbe di poter concludere che nelle cavità più antiche l'aragonite si dovrebbe essere trasformata tutta (o quasi tutta) in calcite e che questa sia la progressione naturale del fenomeno.

La formazione di aragonite anziché di calcite primaria per precipitazione diretta da una soluzione incrostante e concrezionante di carbonato di calcio in acqua è un problema molto dibattuto e viene considerato come il prodotto di diversi fattori influenzanti la stabilità e l'equilibrio delle due fasi polimorfe.

La presenza di cationi bivalenti Mg^{2+} (magnesio) nella soluzione è generalmente accettato come il primo fattore influenzante la deposizione dell'aragonite in preferenza a quella della calcite: la loro presenza in una soluzione soprassatura rispetto alle soglie di soprassaturazione della calcite e dell'aragonite favoriscono la precipitazione della fase aragonite. Questo è stato dimostrato da molti ricercatori in grotte dell'Australia, dell'Austria, della Francia, del Giappone, del Sud Africa e degli Stati Uniti e riveste quindi notevole interesse relativamente alla “Grotta di Santa Lucia Inferiore” e di tutte le altre grotte che si aprono nella formazione delle “Dolomie di San Pietro ai Monti”, ovvero in un *carbonato doppio di calcio e magnesio*; ciò non spiegherebbe l'assenza di mineralizzazioni aragonitiche in altre grotte appartenenti nel medesimo litotipo.

Ne consegue che la carsificazione delle dolomie può essere condizione necessaria ma non sufficiente alla genesi di manifestazioni aragonitiche nelle grotte.

Quando il rapporto Mg/Ca (ioni magnesio/ioni calcio) giunge circa a 2.9, l'aragonite è il principale minerale carbonato di calcio che precipita e, quando il rapporto giunge a 4.4, l'aragonite è l'unico minerale carbonato di calcio che si forma. L'evaporazione (più che il rilascio di anidride carbonica) ha un grande effetto su questo fattore; con l'evaporazione, infatti, c'è un forte e rapido aumento nel rapporto Mg/Ca e questo incremento causa la precipitazione sequenziale di calcite, calcite-magnesiaca, aragonite e quindi dei minerali carbonati magnesiaci, quali l'huntite e l'idromagnesite.

Ne consegue che un elevato valore del rapporto ionico Mg/Ca nella soluzione acquosa è condizione necessaria e sufficiente alla genesi di manifestazioni aragonitiche nelle grotte.

E' stato a lungo un enigma la comprensione di come lo ione magnesio, che è escluso dalla struttura cristallina dell'aragonite, possa agire per promuovere l'accrescimento dell'aragonite stessa: un'ipotesi è che lo ione magnesio inquina ed impedisca l'accrescimento cristallino della calcite, permettendo al livello di supersaturazione della soluzione di crescere fino al punto in cui l'aragonite può precipitare direttamente. Se l'accrescimento della calcite è inibito, l'aragonite può nucleare e crescere abbastanza facilmente allorché viene raggiunto il necessario livello di supersaturazione.

Il grado di supersaturazione della soluzione e la rapidità del rilascio dell'anidride carbonica, dopo il magnesio, è il fattore probabilmente più influenzante la precipitazione dell'aragonite e la velocità di precipitazione: essendo l'aragonite più solubile della calcite, si può pensare che da una soluzione che ha raggiunto la soglia della soprassaturazione della calcite deve precipitare carbonato di calcio e cristallizzare (prima) la calcite; allorché si raggiunge un valore di soprassaturazione coincidente con la soglia di precipitazione della aragonite, smette di cristallizzare la calcite; precipita carbonato di calcio ma cristallizza aragonite. In realtà accade che condizioni secche promuovono rapidi rilasci dell'anidride carbonica e supersaturazione: questi fattori possono influenzare fortemente la cinetica della nucleazione e l'abito dei cristalli in accrescimento; condizioni secche causano anche un aumento nella velocità di evaporazione e quindi incrementano il rapporto Mg/Ca promuovendo la precipitazione dell'aragonite.

La temperatura è un fattore particolarmente discusso e diversamente considerato: in base a studi effettuati su depositi naturali si è spesso ritenuto che la formazione dell'aragonite sia favorita (o quantomeno condizionata) da temperature relativamente più elevate; siccome l'aragonite è un polimorfo d'alta temperatura del carbonato di calcio (l'altro è la vaterite) nel 1956 Moore propose che la sua presenza in grotte attualmente fredde fosse indicatore di passati climi caldi in quelle regioni, e quindi che l'aragonite fosse un indicatore paleoclimatico molto preciso. Sulla base di questa idea e sulla distribuzione delle grotte con aragonite negli Stati Uniti centrali ed occidentali fu anche costruita un'isoterma relativa alla temperatura al suolo di 15.6 °C, a Nord della quale dovrebbe essere stabile la calcite ed a Sud della quale dovrebbe essere stabile l'aragonite. Quest'ipotesi è stata probabilmente superata dai dati raccolti negli ultimi 42 anni, dai quali si è ottenuto una migliore descrizione della distribuzione dell'aragonite nelle grotte. L'aragonite è stata trovata in accrescimento in grotte molto fredde quali la "Groaning Cave" e la "Timpanagos Cave" degli Stati Uniti, nonché nella grotta "Erzberg" in Austria. Inoltre, non sembra esserci quella grande abbondanza di aragonite che invece ci si aspetterebbe nelle grotte tropicali, quali quelle Giamaicane, dello Yucatan o del Messico; al contrario, calcite massiva e travertino sembrano la norma per le grotte in climi caldi. Se ne può concludere che la temperatura non è un fattore di controllo nella precipitazione dell'aragonite; questo ha importanti conseguenze anche per la grotta di "Santa Lucia Inferiore", dove alcuni ricercatori avrebbero voluto vedere nella genesi dei *frostwork* aragonitici l'imprinting di climi tropicali o di condizioni endogene di alta temperatura (dovute a cosa?).

In uno studio petrografico degli speleotemi di grotte del Missouri è stato dimostrato (HILL-FORTI, 1986) come l'accrescimento degli strati aragonitici sia facilitato dalla presenza di particelle clastiche e superfici di corrosione negli speleotemi.

La composizione del substrato, infine, è un importante fattore di controllo sulla deposizione dell'aragonite o della calcite (MURRAY, 1954) e questo ha importanti conseguenze anche a "Santa Lucia Inferiore", ove (specie ai "Cristalli I") il definitivo passaggio tra deposizioni carbonatiche calcitiche ed aragonitiche è sottolineato da consistenti livelli detritici e da argille residuali.

Occorrenza e significato di altri minerali carbonati

I carbonati di magnesio ed i carbonati di calcio e magnesio, dolomite, huntite, idromagnesite e magnesite, si presentano in grotta nella forma di polvere biancastra a granulometria estremamente fine.

Questi minerali sono derivati dalla dissoluzione delle rocce dolomitiche e la loro deposizione è influenzata sia dall'evaporazione che dal rilascio dell'anidride carbonica.

Il campo di stabilità della dolomite vede le specie minerali incrementarsi assecondando il rilascio di anidride carbonica ed il tasso di evaporazione: questo è in perfetto accordo con quanto si è potuto rilevare a "Santa Lucia Inferiore", sia per gli aspetti termodinamici caratterizzanti attualmente l'ipogeo, sia per quanto è relativo alle "stratigrafie morfologiche" degli speleotemi ed alle sequenze minerali.

Allorché le acque di percolazione entrano nell'ambiente ipogeo, rilasciano CO_2 e dalla soluzione viene a precipitare calcite; ne consegue che gli ioni magnesio si incrementano relativamente agli ioni calcio. Con ciò comincia a precipitare anche calcite con alta concentrazione di magnesio (calcite magnesiaca, o Mg-calcite), quindi aragonite, poi huntite ed infine idromagnesite e magnesite, divenendo gli ioni magnesio via e via più concentrati nella soluzione residua allorché la precipitazione prosegue (si è formata una "salamoia"). Quando il rapporto Mg/Ca della salamoia raggiunge il valore di 2.9, l'aragonite è il principale minerale carbonato di calcio a precipitare; quando il rapporto Mg/Ca raggiunge il valore di 4.4 l'aragonite è l'unica fase minerale a precipitare (FISCHBECK, 1971).

Ad Eibengrotte (Germania) la sequenza deposizionale riportata è: calcite, Mg-calcite, aragonite, monoidrocalcite, idromagnesite e nesquehonite (HILL-FORTI, 1986).

A Pestera Fagului (Romania) la sequenza è: calcite, aragonite, huntite e idromagnesite (DIACONU, 1977). Nelle grotte della Guadalupe Mountains (New Mexico) la sequenza è: calcite, aragonite, idromagnesite (HILL-FORTI, 1986).

Anche piccole variazioni nell'entità dell'evaporazione possono causare trasformazioni nella mineralogia: per esempio, il calore prodotto da una lampadina nelle Grotte di Castellana (Bari) è stato sufficiente affinché nelle vicinanze si depositasse aragonite invece che calcite (FORTI, 1980).

E' opinione diffusa e confermata dai dati di "Santa Lucia Inferiore" che l'huntite può depositarsi (non come minerale di sostituzione) in un ambiente in cui l'evaporazione ha favorito la formazione di salamoie caratterizzate da un elevato rapporto Mg/Ca (KINSMAN, 1967); l'idromagnesite e la magnesite, poi, sono i prodotti finali dell'evaporazione in una sequenza minerale ricca di magnesio.

Alla temperatura di una grotta tipica (tra i 10°C ed i 15°C) l'idromagnesite è la fase minerale stabile per alti valori del rapporto Mg/Ca finché, per una qualsiasi ragione, la pressione parziale di CO_2 è molto alta, dopodiché diviene stabile la nesquehonite; si è speculato che siano necessari rapporti Mg/Ca maggiori di 16 prima che l'idromagnesite possa precipitare.

Sequenza deposizionale e matrix degli accrescimenti

Da quanto descritto nei precedenti paragrafi è possibile desumere una precisa sequenza stratigrafica nell'accrescimento e nella deposizione degli speleotemi, sia per quanto riguarda la loro tipologia morfologica che per la loro mineralogia; la validità della prima è estensibile a tutta la grotta, mentre la seconda si differenzia a seconda che si abbia a che fare con gli ambienti più interni e profondi di "Santa Lucia Inferiore" ("Cristalli" e "Pozzo dell'Ade") o quelli più esterni ("Capitelli" e "Tanone").

Sulla dolomia costituente le pareti originarie della cavità troviamo *coperture* carbonatiche e *croste* seguite da *dripstones* tipo *cannule*, *stalattiti*, *stalagmiti*, *drappaggi* e *flowstones*; su questi ultimi speleotemi troviamo le *coralloidi* tipo *popcorn* e sui *popcorn* le *anthoditi* tipo *frostwork*; le *anthoditi* tipo *flos ferri*, le *helictiti* e le coralloidi tipo *corallo s.s.* e *knobstone* emergono sempre e solo da coperture e *flowstones*, mai da altri speleotemi.

Shelftone, *dighe*, *coperture mammellonari* e *rafts* non risultano mai essere sede di ulteriori mineralizzazioni. Il *mondmilch wet* segue sempre e solo le *anthoditi frostwork*, quello dry risulta presente (spesso come deposito non primario) in aree ad alta concentrazione di anthoditi (e talvolta le ingloba); il *mondmilch dust* è moderatamente presente sui coralloidi.

La stratigrafia morfologica qui individuata corrisponde ad una stratigrafia minerale che segue la sequenza: calcite $\rightarrow$ aragonite $\rightarrow$ huntite $\rightarrow$ magnesite. Il *mondmilch* (huntite + magnesite) è infatti presente solo sull'aragonite e mai nelle aree a copertura calcitica.

L'aragonite *frostwork* si accresce a partire da speleotemi già aragonitici (preferenzialmente) o calcitici, mai direttamente dal substrato roccioso o da speleotemi caratterizzati dalla presenza di ossidi o croste non carbonatiche.

I *coralloidi* o altri speleotemi calcitici non seguono mai a concrezioni aragonitiche. Le zone indicanti permanenza di bacini idrici non presentano mineralizzazioni che vadano oltre la calcite. Da quanto sommariamente descritto (e discusso nel paragrafo seguente) si può definire il matrix degli accrescimenti (fig.2).

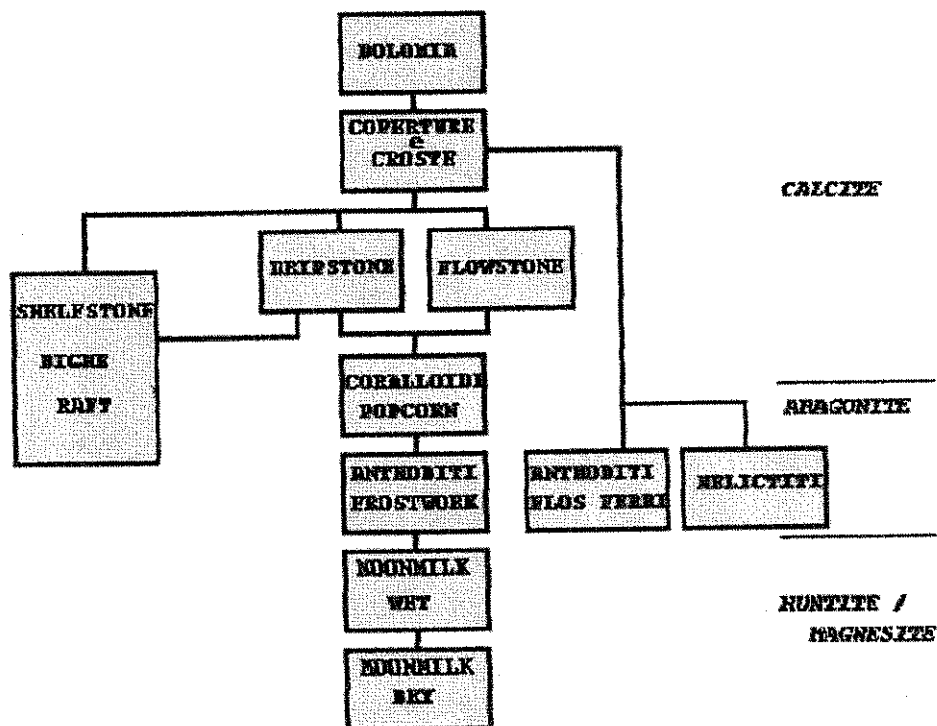


Fig. 2 - Matrix degli accrescimenti minerali di Santa Lucia Inferiore (Gea806DRW).

L'evoluzione paleoambientale della grotta di Santa Lucia Inferiore

L'analisi degli speleotemi e delle mineralogie degli ambienti precedentemente descritti ne caratterizza la storia evolutiva differenziandoli leggermente gli uni dagli altri: da queste variazioni locali è possibile desumere, nelle linee generali, l'evoluzione paleoambientale della cavità (fig. 3).

L'area a mineralizzazione aragonitica interessa solo i "Cristalli I" & "II", il "Pozzo dell'Ade" ed il "Pantheon"; immediatamente al di sopra del *Pantheon* termina il dominio aragonitico e si ha solo carbonato di calcio in fase calcite.

Il *frostwork* aragonitico ben sviluppato interessa solo i "Cristalli" (e poco il "Pantheon") mentre i tappeti cristallini parietali sono caratteristica del "Pozzo dell'Ade" e del "Pantheon" stesso.

Il *mondmilch* dry (secco) è presente solo ai "Cristalli I" (moderatamente al "Pantheon") e quello wet (umido) solo al "Pantheon" (moderatamente ai "Cristalli I"): sono quindi da considerarsi due fasi distinte, una "antica" (Cristalli I) ed una attuale (Pantheon).

Chiari indicatori di ambienti sommersi e di laghi sotterranei (*drafts*, *shelfstones*, *coperture mammellonari*, *grapefruits*) sono presenti solo ai Capitelli.

Indicatori di flussi d'aria esistono dappertutto nella grotta, ma condizioni di turbolenza parietale sono indicate solo al "Pozzo dell'Ade" ed al "Pantheon", transizione da regime laminare a turbolento solo tra il "Pantheon" ed i "Capitelli" e forte direzionalità solo ai "Cristalli" ed ai "Capitelli".

Dripstones e *flowstones* sono presenti ovunque e segnano diverse fasi di concrezionamento; chiare indicazioni di blocco dei drenaggi per argille residuali (*stalattiti bulbose*, *concrezioni-calco*, *vaschette erosive stalagmitico-sommitali*) e quindi di manifestazioni dissolutive, sono nuovamente presenti ovunque, ma specie ai "Cristalli I" (dove sembrano indicare il punto di svolta tra deposizione calcitica ed aragonitica) e tra il "Pozzo dell'Ade" ed il "Pantheon".

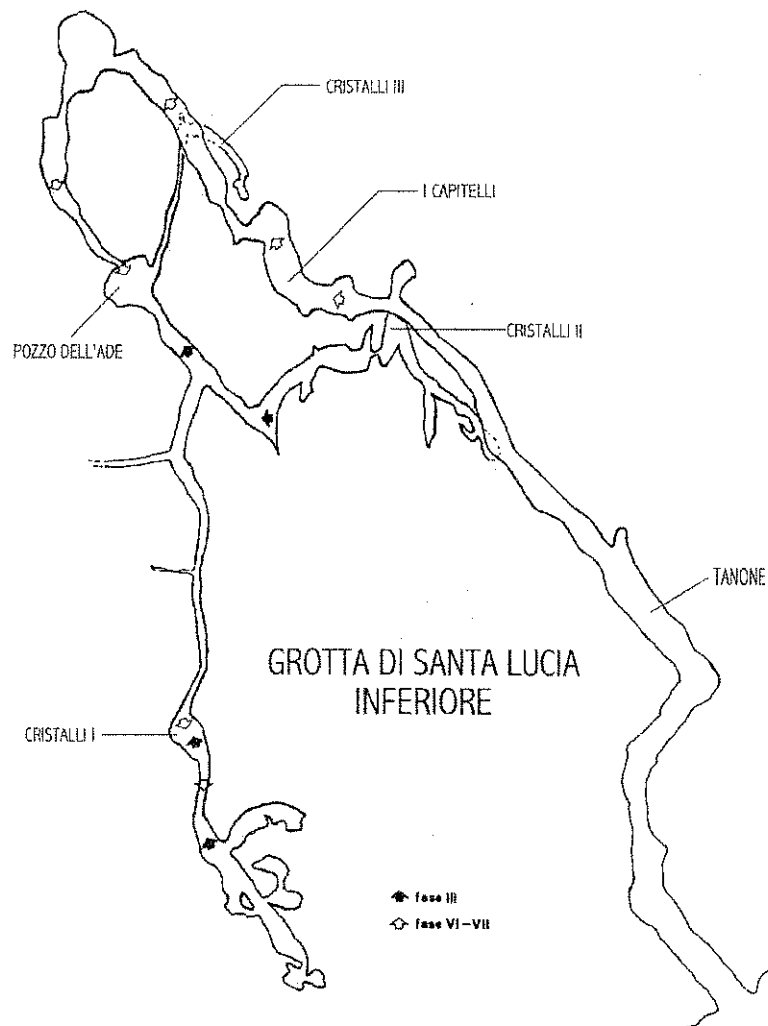


Fig. 3 - Ipotesi di ricostruzione della paleocircolazione dell'aria in Santa Lucia Inferiore (Gea807DRW) da originale del Gruppo Speleologico Cynus di Toirano).

Speleotemi dovuti ad acque di infiltrazione sotto pressione (*coralloidi* tipo *flos ferri* ed *eccentriche*) sono presenti in percentuali significative unicamente ai "Cristalli I" e, minoritariamente, al "Pozzo dell'Ade".

Da quanto descritto, quindi, è possibile immaginare una Fase I di deposizioni carbonatiche parietali e pavimentali (*coperture*) interessanti il substrato dolomitico sovrapposta e seguita da una Fase II di "concrezionamenti I" segnata da deposizioni carbonatiche tipo *dripstones* (*cannule*, *stalattiti*, *stalagmiti* e *colonne*) e *flowstones* (*drappeggi* e *organi*) a fase calcitica interessanti la parte più alta del sistema carsico (Fase IIa), e da *anthoditi* tipo *flos ferri* a fase aragonitica (in ragione dell'aumento del rapporto Mg/Ca delle acque via via depauperate di Ca^{++} nel loro fluire e depositare) nelle parti più profonde del sistema carsico (Fase IIb), caratterizzato dall'aumento della pressione delle acque di infiltrazione trattenute sotto alle coperture parietali. L'approfondimento del sistema carsico ("Pozzo dell'Ade", "Rami Nuovi" e lineazione tettonica che interessa i "Cristalli I") e la migrazione delle acque verso il basso con conseguente diminuzione della pressione della "seeping water" portava anche ai "Cristalli I & II" ed al "Pozzo dell'Ade" una Fase IIc di "concrezionamenti II" aragonitico-calcitici, sovrapposta all'isocrona Fase IId a dominanza calcitica che, in cicli successivi e con varie stasi e manifestazioni erosive, interessava comunque tutta la grotta nelle sue varie sub-unità, caratterizzate anche da tratti vadosi ed ambienti freatici (i "Capitelli"): il settore ormai fossile del sistema carsico era costituito dai rami sommitali, quali "Santa Lucia Superiore" e la "Grotta del Colombo"; variazioni di livel-

lo delle acque nell'area dei "Capitelli" hanno lasciato testimonianza nelle varie morfologie *shelfstones*, ascrivibili anch'esse a vari episodi intercorrenti tra i "concrezionamenti I & II" della "Fase II". Il ramo dei "Cristalli I" era in continuità con il settore superiore del sistema carsico e quindi con un'apertura esterna; l'aria fluiva per i "Cristalli I" transitando per salamoie calcio-magnesiache, con direzione "Pozzo dell'Ade": il collegamento tra questi settori non coincide necessariamente con i tratti attualmente realizzati per diretta escavazione, ma è ad essi direttamente concorde per direzione e verso; è possibile che risultasse connesso con livelli inferiori dell'ipogeo (pari al "Pozzo dell'Ade") attualmente eclissati da coperture detritiche.

In questo modo si sono depositati (Fase III) nei "Cristalli I" mineralogie coralloidi e *anthoditi frostwork* a fase aragonitica.

L'evoluzione del sistema ai "Cristalli I" ha visto quindi la diminuzione ed il parziale blocco della circolazione dell'aria nel sistema (forse per occlusione carbonatica) e la trasformazione del ramo in "trappola ad anidride carbonica": l'aumento della pressione parziale della CO₂ e l'aumento conseguente della temperatura hanno condotto alla successiva deposizione (Fase IV) di *mondmilch* costituito dalle fasi minerali huntite e magnesite (preceduta presumibilmente da Mg-calcite e comprensiva di idromagnesite); a questa fase è ascrivibile anche l'azione di dissoluzione operata dalle acque di infiltrazione, inacidite dalla CO₂, che in altri settori della grotta ha portato alla genesi delle forme di erosione selettiva già descritte.

Il depauperamento delle salamoie calcio-magnesiache ha condotto a termine le formazioni a *mondmilch* e la loro trasformazione in fase "secca" costituente croste pavimentali e detriti eterogenei e caotici (Fase Va).

Nel frattempo la dissoluzione delle rocce carbonatiche relative alle coperture sommitali ed ai rami superiori della grotta ha condotto alle deposizioni di argille residuali ed al parziale blocco di molti speleotemi con formazioni tipo *stalattiti bulbose* e *stalattiti calco*.

Queste argille residuali si sono parzialmente alternate alle deposizioni a *mondmilch* (Fase Vb).

La diminuzione del livello di base ha condotto allo sblocco (Fase VI) dei sifoni nell'area dei "Capitelli" e la differenza di pressione che si è conseguentemente generata nel sistema carsico ha innescato una nuova circolazione ipogea dell'aria: questa fluiva dai "Capitelli" verso il "Pozzo dell'Ade" (aria fredda, più densa) ed attraverso i "Cristalli I", tramite diaclasi e fessure, verso la parte alta della grotta, se non verso un'uscita od un'interconnessione con "Santa Lucia Superiore" (aria calda, più leggera).

Il flusso d'aria induceva la deposizione orientata dei *coralloidi popcorn* calcitici e delle coperture *aerosol sinter* nei "Capitelli", quindi la sua transizione da regime laminare a turbolento veniva segnata dalla deposizione del *bordo s.s.* tra i "Capitelli" ed il corridoio di accesso alla zona sommitale al "Pantheon"; infine il flusso parietale turbolento scendeva per il pozzo del "Pantheon" e per quello dell'"Ade", arricchito di germi cristallini dalle salamoie della zona dei "Capitelli", e vi depositava tappeti cristallini aragonitici e speleotemi aragonitici orientati (Fase VII); il rapporto Mg/Ca era massimo nel ramo dei "Cristalli I", ove la corrente d'aria in risalita originava *anthoditi frostwork* spiccatamente orientate, ma con verso opposto rispetto a quelle della Fase III.

L'ulteriore evoluzione del dominio ipogeo e la chiusura di alcuni settori chiave in ragione di colate stalattitiche (*flowstone*) conduceva nuovamente al blocco del sistema circolatorio ed alla genesi di formazioni *dripstone*, *flowstone* e da acque di infiltrazione (Fase VIII): ma il rapporto Mg/Ca comunque alto favoriva l'accrescimento di speleotemi aragonitici (*cannule spatitiche*, *coralloidi ed helictiti*) specie dove il substrato era già aragonitico ("Cristalli", "Pozzo dell'Ade" e "Pantheon").

La scoperta delle "Grotte di Toirano" portava alla loro turistizzazione e quindi a modificazioni di corto periodo dell'ambiente ipogeo ed in particolare del sistema circolatorio dell'aria (Fase IX), fino alla posa delle "porte blindate" che avrebbero dovuto ripristinare una situazione come "da natura", senza tenere però in debito conto della complessa evoluzione del sistema carsico e del fatto che un "sistema chiuso" non è più in equilibrio se al suo interno vi si pone una "sorgente" di energia (i turisti); l'aumento della pressione parziale di anidride carbonica nel sistema, presumibile conseguenza della turistizzazione, ed il suo ristagno nei punti di minimo topografico dell'ipogeo, hanno portato nuovamente alla genesi di *mondmilch* huntitico-magnesiaco (Fase X).

Analisi della stabilità delle fasi minerali alle condizioni ambientali attuali

L'aragonite cristallizza in una struttura di maggior energia (e quindi di disordine) rispetto alla calcite e tende a riordinarsi naturalmente nel suo polimorfo di minor energia, appunto la calcite: la trasformazione, che può avvenire in tempi variabili da 10^3 a 10^6 anni, è improcrastinabile ed irreversibile, per l'appunto "naturale".

Tutte le aragoniti, comprese quelle delle "Grotte di Toirano", quindi, sono destinate a trasformarsi in calcite e questo avverrà presumibilmente mantenendo l'abito aciculare tipico dell'aragonite stessa (paramorfosi); è chiaro però che il fenomeno, essendo caratterizzato da tempi "geologici", non può certo destare motivo di preoccupazione per la gestione delle grotte: in questo senso l'aragonite delle "Grotte di Toirano" è stabile, rispetto ai tempi umani.

Il discorso cambia per quello che riguarda l'impatto della turistizzazione sull'ambiente ipogeo, in quanto la velocità delle manifestazioni umane è certo in grado di produrre effetti a breve termine sull'ambiente stesso.

La possibilità che l'inquinamento antropico possa indurre "decadimento" del carbonato di calcio dalla fase aragonite alla fase calcite può venire escluso da semplici considerazioni termodinamiche: perché ciò accada è necessario sottrarre energia al sistema, mentre la frequentazione umana non fa che aumentare l'energia del sistema (cessione di CO_2 ed incremento della temperatura - che abbiano o non abbiano effetti sul sistema generale delle grotte).

L'inquinamento antropico può invece manifestarsi in effetti primari e secondari che, a loro volta, sono evidenziabili come deterioramento fisico delle strutture minerali e, in questo caso, costituiscono danneggiamento irreversibile degli speleotemi più "massicci" (*stalattiti, stalagmiti, colonne, coperture e flowstones*) e polverizzano le forme cristalline più delicate (*anthoditi ed helictiti*): sono effetti primari quelli prodotti dall'azione diretta dei turisti che, toccando le concrezioni, le "ingrassano" impedendone l'ulteriore accrescimento (il carbonato di calcio non si deposita più su questi speleotemi, "scivolando" sulla pellicola organica); sono effetti secondari (ma ancora peggiori) quelli indotti dalla dissoluzione degli speleotemi causata dalle acque di condensa endocarsica rese aggressive dall'elevata pressione parziale di anidride carbonica immessa nel sistema dalla respirazione dei turisti e quelli causati dall'azione della flora batterica introdotta nella grotta, ancora una volta, dai visitatori.

Tutto questo sembra verificarsi nei tratti intercomunicanti tra il "Pozzo dell'Ade" ed il "Pantheon" e tra il "Pantheon" ed i "Capitelli", specie nella parte sommitale del "Pantheon". Qui le concrezioni *dripstone* manifestano desquamazioni superficiali e polverizzazioni che sembrerebbero proprio quelle tipiche dell'effetto devastante di flore batteriche; sottoterra, infatti, qualora i microrganismi eterotrofi vengano a contatto con delle concrezioni, provocheranno una fermentazione con conseguente corrosione (JASINSKI, 1966). Il ruolo sostenuto dai batteri nitrificanti, in questo complesso meccanismo, è assai importante.

Il controllo del pH delle acque di stillicidio, infatti, non ha permesso di rilevare attualmente livelli di attività degli ioni idrogeno tali da indurre fenomeni di dissoluzione sugli speleotemi.

Il fattore più interessante e significativo individuato nel corso dei lavori a "Santa Lucia Inferiore" si è rivelato essere la miscela minerale costituente il *mondmilch* di neoformazione al "Pantheon", ovvero l'*huntite* e la *magnesite*.

Questo fatto, a livello generale, è risultato estremamente importante in quanto ha permesso di confermare chiaramente la genesi di almeno un tipo di *mondmilch*, speleotema alquanto enigmatico, fornendone altresì una chiave interpretativa molto forte in relazione alle condizioni ambientali della grotta e, presumibilmente, di relazionarla con l'impatto antropico.

Come già visto, infatti, calcite e magnesite possono considerarsi come gli end-members di una sequenza di minerali carbonati la cui deposizione è strettamente dipendente dal progressivo aumento del rapporto ionico Mg/Ca (dovuto alla continua evaporazione di bacini idrici sotterranei ed alla loro trasformazione in salamoie magnesiache) e dal progressivo aumento della pressione parziale di anidride carbonica nell'atmosfera ipogea.

La sequenza inizia con la deposizione di calcite, quindi di Mg-calcite, poi di aragonite, di huntite ed infine di magnesite: a seconda delle condizioni ambientali possono depositarsi anche nesquehonite ed hydromagnesite.

La formazione di huntite significa che la pressione parziale della CO_2 nell'atmosfera della grotta è compatibile con la deposizione di questa fase minerale; mantendosi queste condizioni ambientali, continuerà a depositarsi huntite; la formazione di magnesite può essere indicatrice del fatto che, almeno stagionalmente, l'evaporazione delle soluzioni acquose (presenti nella cavità sotto forma di condensa endocarsica) porta il rapporto Mg/Ca a livelli così elevati da condurre alla precipitazione della sola magnesite.

La magnesite, infine, può essere prodotto di alterazione della stessa huntite, minerale raro e dalle condizioni di stabilità termodinamiche molto limitate (costituisce in effetti un termogrometro minerale ideale).

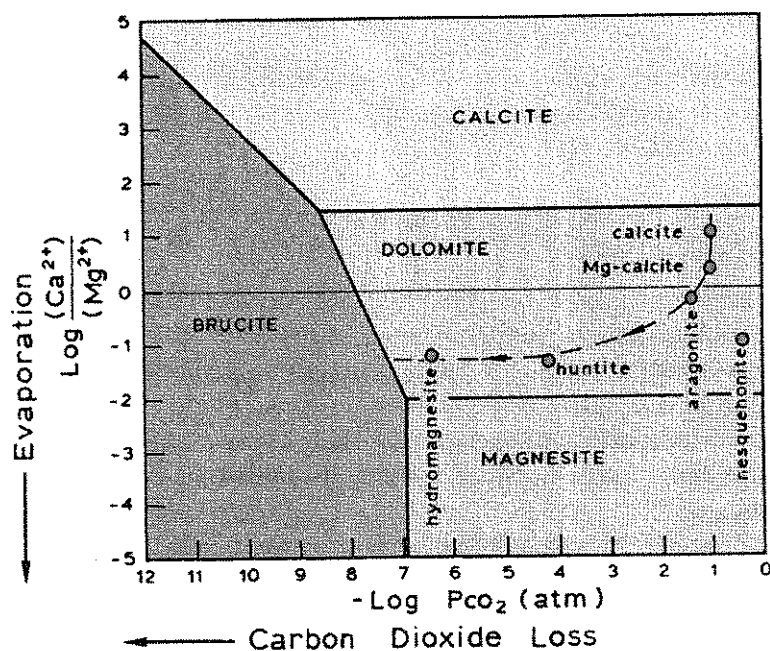


Fig. 4 - Deposizione delle varie fasi minerali di carbonato di calcio e magnesio al variare della pressione parziale della CO_2 e del rapporto ionico Mg/Ca (HILL - FORTI, 1986).

Considerazioni sulla posizione del *mondmilch* di neoformazione in "S. Lucia Inferiore"

Il *mondmilch* wet (di neoformazione) è stato rinvenuto prevalentemente (si potrebbe dire "unicamente") alla base dell'anfiteatro naturale del "Pantheon", già caratterizzato da *anthoditi frostwork* tipo "tappeto cristallino parietale" e da modeste *anthoditi frostwork* orientate.

La posizione assunta da questo speleotema è caratteristica, trovandosi prevalentemente insediato tra i cristalli aciculari delle *anthoditi frostwork*, fino al momento in cui l'agglomerato plastico non raggiunge dimensioni (e massa) tali da provocarne, per gravità, lo sgocciolamento e/o la caduta diretta sul pavimento; alcune colature di *mondmilch* rigagnolano sulla copertura parietale fuoriuscendo da sue piccole fessure, ma si tratta di manifestazione nettamente minoritaria rispetto agli insediamenti intercristallini.

L'altezza sulla parete fino alla quale sono presenti questi speleotemi plastici non supera i 2.5 metri ed entro un'altezza di circa 1 - 1.5 metri (segnata da una specie di "cordone" di *mondmilch*) è presente la sua massima concentrazione.

Questa disposizione e morfologia è compatibile con l'esistenza di una leggera corrente d'aria parietale che continua a depositare germi cristallini dove già si sono accresciute le aragoniti (ragione per cui il *mondmilch* si forma tra gli aghi delle *anthoditi*) e la sua stretta correlazione con la pressione parziale della CO_2 è indicata proprio dal livello basale in corrispondenza del quale il *mondmilch* si deposita: l'anidride carbonica, più pesante dell'aria, tende a raccogliersi nei minimi topografici, per esempio alla base del "Pantheon".

Da quanto espresso si può concludere che l'huntite e la magnesite si depositano in ragione dell'elevata pressione parziale di anidride carbonica presente in determinate zone della grotta e dell'elevata evaporazione cui l'ambiente è soggetto (con conseguente aumento del rapporto Mg/Ca), non mediata da nuovi input di acqua che ripristinino quella persa per l'evaporazione stessa. E' altamente verosimile, ma non scontato, che la sorgente a cui imputare l'aumento nella concentrazione dell'anidride carbonica sia costituita dai turisti frequentanti l'ipogeo.

Anche nell'area dei "Cristalli I" sono stati verificati modesti accrescimenti di *mondmilch* wet tra le *anthoditi frostwork*, ma si tratta di entità puntiformi ed assolutamente trascurabili rispetto a quanto rilevabile al "Pantheon"; è presumibile che queste formazioni non siano state rilevate al "Pozzo dell'Ade" in ragione del fatto che l'anidride carbonica, precipitando per gravità, scenderà il pozzo accumulandosi verso il suo fondo.

Infine, è importante sottolineare come la quantità di *mondmilch* wet rilevato nel corso dei campionamenti del 1998 risulti visivamente superiore rispetto a quanto non fosse stato rilevato nel 1994, segno che la formazione si sta accrescendo.

Similitudini con altri sistemi ipogei

Esistono delle similitudini tra la grotta di "Santa Lucia Inferiore" ed altre cavità della Liguria, sia per quanto riguarda la morfologia degli speleotemi che per le mineralizzazioni aragonitiche che le caratterizzano: nonostante questi ipogei non siano stati oggetto di studi mineralogici e petrografici approfonditi, anche solo da attività ricognitive è possibile trarre qualche informazione utile a sottolineare la sostanziale correttezza delle conclusioni dedotte per "Santa Lucia Inferiore".

Le grotte di cui si parla, similmente a quelle di Toirano, si aprono tutte nella formazione delle Dolomie di San Pietro ai Monti.

La Grotta degli Scogli Neri (Giustenice, SV) è l'ipogeo più esteso della Liguria e le sue formazioni aragonitiche sono (cioè erano - prima di venire devastate da vandali e pseudocollezionisti di minerali -) tra le più belle in Europa: queste aragoniti sono attive e ciò sembra strettamente legato all'interazione tra la dinamica atmosferica endogena e la circolazione delle acque nel sistema: gli alti tassi di evaporazione sono reintegrati da massive quantità di acque centrate su di un bacino profondo interessante l'area detta "Grande Voragine".

La Grotta del Treno (Bergeggi, SV) fu scoperta nel corso della realizzazione della linea ferroviaria: l'intercettazione dell'ipogeo innescò nel sistema una forte corrente d'aria che causò, negli anni a venire, la completa evaporazione del lago che era originariamente presente al suo interno; come conseguenza, le aragoniti che caratterizzano le sue pareti, originariamente "traslucide e vive", risultano ora coperte e localmente eclissate da materiale polverulento e dall'aspetto gessoso, probabilmente mondmilch dry costituito dai carbonati di calcio e magnesio tipo huntite e magnesite che abbiamo incontrato a "Santa Lucia Inferiore".

OSSERVAZIONI E CONCLUSIONI

Osservazioni

1 - La mappatura degli speleotemi nella "Grotta di Santa Lucia Inferiore" ha permesso di individuarne la stratigrafia ed il significato paleoambientale, consentendo di ricostruire la paleocircolazione dell'aria nella cavità e indicando come questa sia stata, nel passato, notevolmente intensa e di fondamentale importanza nella genesi degli speleotemi tipo *coralloidi* e *anthoditi*, in qualità di mezzo di trasporto dei germi cristallini.

1.1 - La dinamica circolatoria della cavità è mutata nel tempo ed in almeno un tratto si è invertita: questo può essere messo in relazione solo ed esclusivamente con lo svuotamento di sifoni interni e con l'esistenza di collegamenti con l'esterno o con altre parti del sistema ipogeo in numero maggiore dei due attualmente noti ("Santa Lucia Inferiore" e "Grotta della Basura").

2 - La formazione delle aragoniti è legata al rapporto Mg/Ca delle acque sotterranee ed in particolare all'inibizione della precipitazione della fase calcite dovuta all'incompatibilità del suo reticolo cristallino con gli ioni Mg^{++} , fino al raggiungimento delle condizioni di supersaturazione compatibili con la precipitazione diretta della fase aragonite.

2.1 - Gli accrescimenti degli speleotemi tipo *anthoditi frostwork* orientate e/o a tappeto cristallino parietale, entrambi a fase aragonitica, sono legati alla presenza di una corrente d'aria che favorisce l'evaporazione delle acque endocarsiche (aumentando via via il rapporto Mg/Ca) trasportando la "soluzione nutritiva" ed i germi cristallini nella forma di aerosol: mancando questa corrente d'aria si interrompe la crescita di questi speleotemi.

2.1.1 - Attualmente, la presenza delle porte di separazione tra i vari settori dell'ipogeo non impedisce un modesto flusso locale di aria prevalentemente parietale (osservazione deducibile dalla presenza del *mondmilch* huntitico-magnesiaco tra i cristalli aciculari delle aragoniti), ma ne impedisce la circolazione generale e quindi la direzionalità.

2.2 - L'input di acqua della grotta non è sufficiente a rimpiazzare quella persa per evaporazione, per cui il rapporto Mg/Ca tende ad essere sempre più elevato.

3 - L'osservazione microscopica del *mondmilch* ha permesso di individuare, nella fase acquosa, la presenza di batteri; è ipotizzabile, ma non certo, che questi abbiano un qualche ruolo (non determinante) nella deposizione del *mondmilch* stesso.

3.1 - E' invece altamente probabile che solo alla flora batterica sia imputabile il deterioramento tipo desquamazione e polverizzazione di *dripstone* e *flowstone*.

Conclusioni

1 - Le osservazioni 1 ed 1.1 portano a ritenere che il ramo dei "Cristalli" fosse direttamente connesso con l'esterno e che il fondo del "Pozzo dell'Ade" presentasse una prosecuzione della cavità verso i livelli inferiori (presumibilmente semiattivi) della grotta.

2 - La trasformazione delle mineralogie del carbonato di calcio a fase aragonitica in quella a fase calcitica è naturale, avviene in tempi talmente lunghi da non risultare problematica per la gestione turistica delle grotte e non è (e non può essere) accelerata dal flusso di visitatori.

3 - La formazione del *mondmilch* huntitico-magnesiaco del Pantheon è compatibile con un ambiente caratterizzato da un'elevata pressione parziale della CO_2 in seno all'atmosfera, da un aumento della temperatura e da una forte evaporazione delle acque endocarsiche (non rimpiazzate da equivalenti input) che conduce a valori del rapporto Mg/Ca sempre più elevati.

3.1 - Nel passato geologico della grotta di "Santa Lucia Inferiore" si è già verificata una condizione simile a quella descritta al punto precedente, ma limitatamente al ramo dei "Cristalli I" e attribuibile all'evoluzione naturale del sistema stesso.

3.1.1 - Le condizioni attualmente rilevate sono invece riconducibili all'unica sorgente di energia, di anidride carbonica e di fauna batterica nota nell'ipogeo, ovvero alla frequentazione turistica; dati gli obiettivi del presente studio, però, non può risultare definibile alcuna correlazione diretta tra "visitatori" e " CO_2 " e questa può essere quindi individuabile solo attraverso monitoraggi dedicati.

3.2 - Se la pressione parziale della CO_2 nell'atmosfera ipogea diminuisse e se gli input idrici esterni controbilanciassero la forte evaporazione endocarsica, proseguirebbe l'accrescimento delle aragoniti a detrimento della deposizione di *mondmilch*.

3.2.1 - Perdurando queste condizioni proseguirà la deposizione del *mondmilch* che tenderà ad inglobare i cristalli di aragonite e, consolidandosi, li oblitererà.

4 - Il ripristino di una pressione parziale della CO₂ compatibile con un ritorno alla precipitazione dell'aragonite rispetto agli altri carbonati di calcio e/o calcio-magnesiaci (huntite, magnesite, idromagnesite, nesquehonite) è legato a) all'eliminazione della sorgente di CO₂ o, b) al ripristino di una corrente d'aria che ne impedisca la concentrazione in punti critici (quali il "Pantheon").

6 - L'esecuzione di ulteriori studi sulle mineralizzazioni non carbonatiche (patine, croste, argille, riempimenti) e su quelle carbonatiche di speleotemi massivi tipo *flowstone* e *dripstone* potrà essere molto utile nell'effettuazione di una ricostruzione paleoambientale della cavità e dei suoi cicli; ciò, come corollario, consentirebbe (date le condizioni isoterme degli ipogei) di ricostruire le curve delle paleotemperature esterne all'ipogeo e sarebbe quindi anche di rilievo nell'effettuazione di studi paleoclimatici più generali.

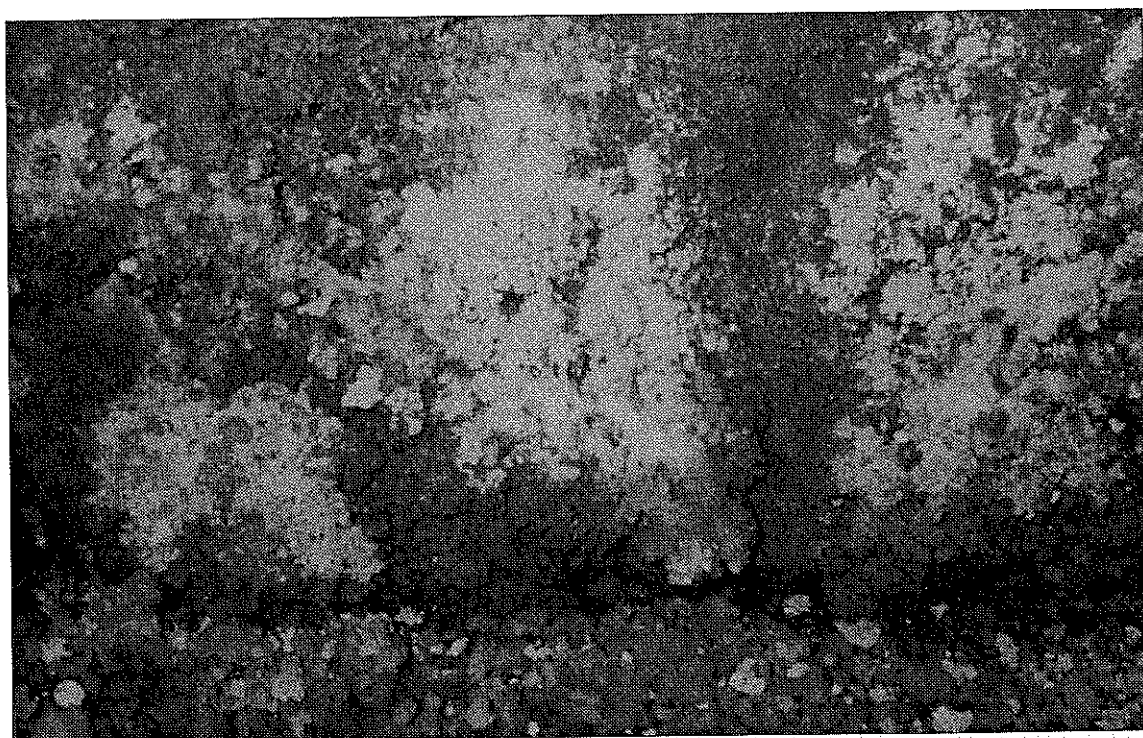
RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse dell'Università degli Studi di Genova, nella persona del prof. Luciano Cortesogno, per la preziosa assistenza tecnica e scientifica. Si ringrazia inoltre, il dott. Furio Bazzan, della G.E.A.Snc, per la gentile collaborazione prestata nella lettura critica del manoscritto.

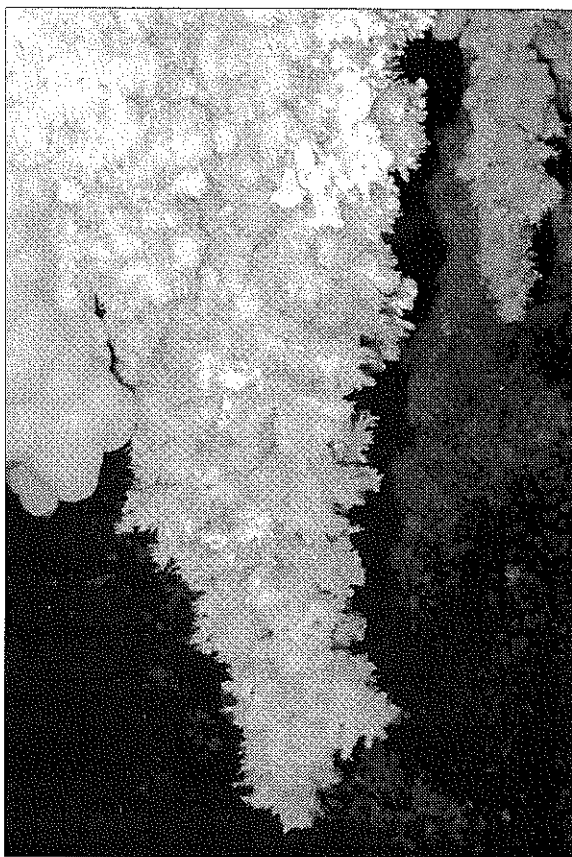
BIBLIOGRAFIA

- BERNASCONI, 1961: R.Bernasconi, *L'évolution physico-chimique du mondmilch*, Atti del Simposio Internazionale di Speleologia, Varenna, Rassegna Speleologica Italiana, Memorie, Vol.2, n.5, pp.75-100.
- BOSELLINI, 1989: A.Bosellini, E.Mutti, F.Ricci Lucchi, *Rocce e successioni sedimentarie*, UTET, Torino.
- CAUMARTIN, 1958: V.Caumartin & P.Renault, *La corrosion biochimique dans un réseau karstique et la genèse du mondmilch*, Notes Biospéléologiques, Vol.13, n.2, pp.87-109.
- CIPRIANI, 1987: C.Cipriani, C.Garavelli, Carobbi, *Mineralogia 2: cristallografia chimica e mineralogia speciale*, USES Edizioni Scientifiche, Firenze 1987.
- COLIGNON, 1988: B.Colignon, *Spéléologie: approches scientifiques*, Edisud, Aix-en-Provence, 1988.
- DIACONU, 1977: G.Diaconu, A.Medesan, I.Viehmman, *Une nouvelle paragenèse minéralogique dans la grotte "Pestera Fagului", Département de Bihor (huntite, hydromagnesite, aragonite, calcite)*, Travaux de l'Institut Spéléologique "E.Racovitza", Vol.16, 1977, pp.203-216.
- FISCHBECK, 1971: R.Fischbeck & G.Muller, *Monohydrocalcite, hydromagnesite, nesquehonite, dolomite, aragonite and calcite in speleothems of the Frankische Schweiz, Western Germany*, Contr. of Miner. Petr., Vol.33, 1971, pp.87-92.
- FORTI, 1980: P.Forti, *Formazione di aragonite nella Grotta di Castellana: un esempio di modificazione indotta dalla turistizzazione*, Grotte d'Italia, Serie 4, n.8, pp.5-9.
- HILL-FORTI, 1986: C.A.Hill, P.Forti, *Cave minerals of the world*, National Speleological Society, Huntsville, Alabama, U.S.A.
- HOLLAND, 1964: H.D.Holland, T.W.Kirsipu, J.S.Huebner, U.M.Oxburgh, *On some aspects of the chemical evolution of cave waters*, Journal of Geology, Vol.72, 1964, pp.36-67.
- HSU, 1989: K.J.Hsu, *Physical principles of sedimentology*, Springer-Verlag, Berlino, 1989.
- JASINSKI, 1966: M.Jasinski, *Speleologie*, Western Publishing International, Genève
- KENDALL, 1977: A.C.Kendall & P.L.Broughton, *Discussion: Calcite and Aragonite fabrics, Carlsbad Caverns*, by R.L.Folks & R.Assereto, (Jour. Sed. Petrol., Vol.46, p.486-496), Journal of Sedimentary Petrology, Vol.47, n.3, 1977, pp.1397-1400.
- KINSMANN, 1964: D.J.J.Kinsmann, *Huntite from a carbonate-evaporite environment*, American Mineralogist, Vol.52, pp.1332-1340.
- MARTINI, 1994: S.Martini & C.Ottomano, *Rilevamenti ambientali nelle grotte turistiche della Basura e di Santa Lucia Inferiore: analisi e discussione dei risultati preliminari*, relazione per la Soprintendenza Archeologica della Liguria.

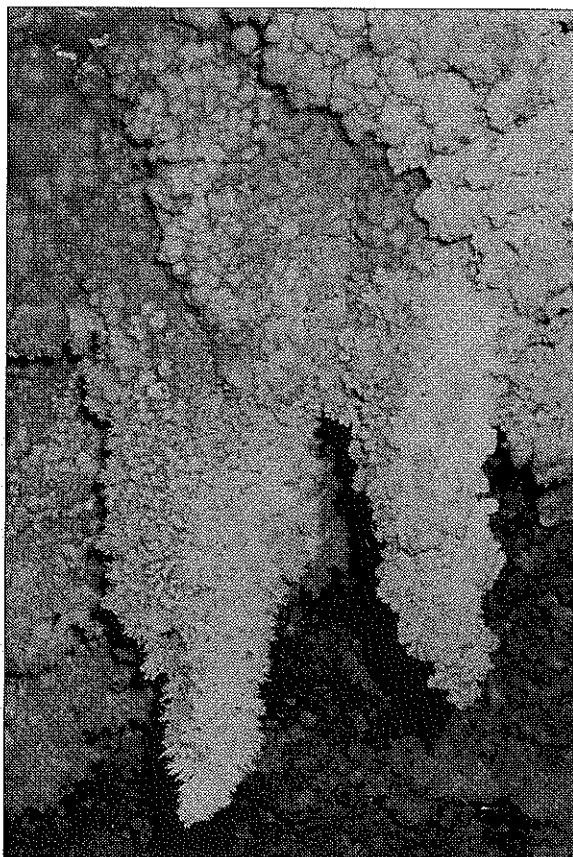
- MARTINI, 1995: S.Martini, *Grotte turistiche di Toirano (Sv) e monitoraggio ambientale: rilevabilità degli effetti dell'impatto antropico e complessità naturale*, in: Bossea MCMXCV, Atti del Simposio Internazionale: Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale, Frabosa Soprana (CN), 1995, "Tipografia Saviglionese", 1996, pp.73-86.
- MELEGARI, 1984: G.E.Melegari, *Speleologia scientifica e esplorativa*, Calderini, Bologna.
- MOORE, 1961: G.W.Moore, *Dolomite speleothems*, National Speleological Society News, Vol.19, p.82.
- MOORE, 1964: G.W.Moore & N.G.Sullivan, *Speleology, the study of caves*, Heath & Co., 1964, Boston D.C., U.S.A.
- MURRAY, 1954: J.W.Murray, *The deposition of calcite and aragonite in caves*, Journal of Geology, Vol.62, 1954, pp.481-482.
- PALACHE, 1951: C.Palache, H.Berman, C.Fronde, *Dana's system of mineralogy*, John Wiley, New York, 1951.
- RICCI LUCCHI, 1980: F.Ricci Lucchi, *Sedimentologia, Parte III: ambienti sedimentari e facies*, CLUEB, Bologna.
- ROQUES, 1965: H.Roques, *Sur la gènèse des formations aragonitiques naturelles*, Annales de Spèléologie, XX, 1, pp.47-53.
- SUH, 1978: M.S.Suh & N.Kashima, *Preliminary study on some secondary cave minerals in Korea*, Journal of Applied Geography, Vol.4, pp.27-31.
- S.S.I., 1987: Società Speleologica Italiana, *Le nostre grotte: guida speleologica ligure*, SAGEP Editrice, Genova 1987.
- THRAILKILL, 1953: J.V.Thrailkill, *Manhole Cave, New Mexico*, Colorado Grotto News Notes, Vol.2, n.11, pp.13-15.
- THRAILKILL, 1968: J.V.Thrailkill, *Dolomite cave deposits from Carlsbad Caverns*, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.38, n.1, 1969, pp.141-145.
- THRAILKILL, 1971: J.V.Thrailkill, *Carbonate deposition in Carlsbad Caverns*, Journal of Geology, Vol.79, pp.683-695.
- TIETZ, 1981: G.F.Tietz, *Recent formations of carbonate minerals association in dolomite caves, Franconia, West Germany*, VIII Int. Congr. Speleol. Proc., Bowling Green, pp.364-365
- TROMBE, 1952: F. Trombe, *Traité de Spèlèologie*, Payot, Parigi, 1952.



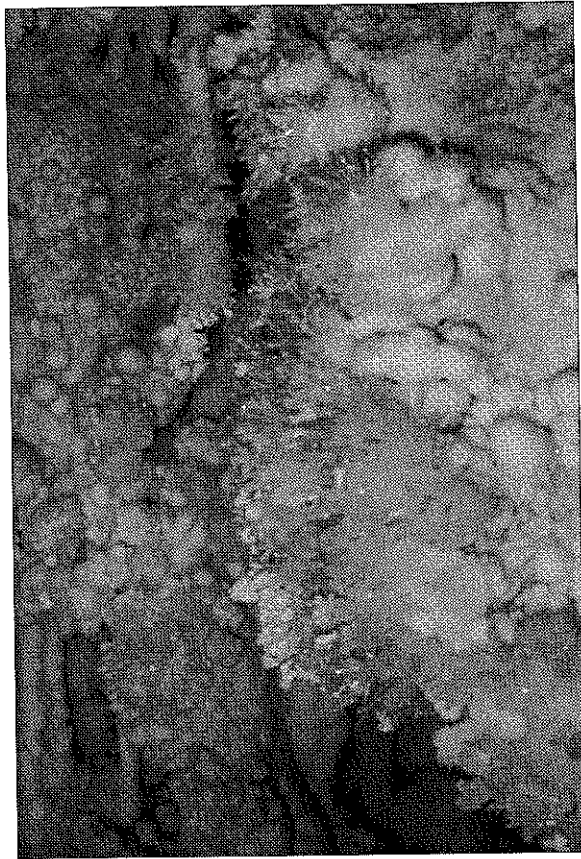
▲ Foto 1
accrescimenti e colate di mondmlch wet nel primo metro di altezza delle pareti del Pantheon (Gea0134P).



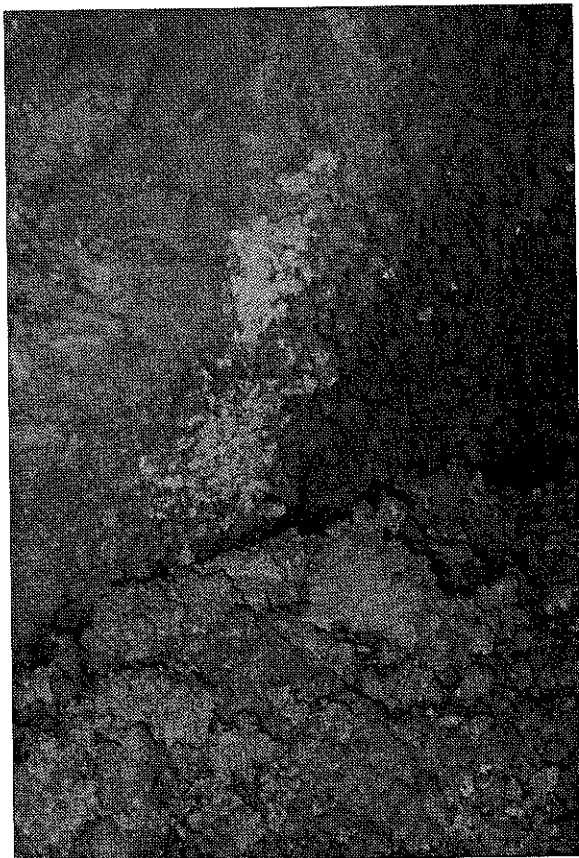
◀ Foto 2
Anthoditi frostwork e coralloidi globulariti-
ci su stalattiti nei Cristalli I (Gea0136P)



◀ Foto 3
Stalattiti colonizzate da coralloidi del tipo
popcorn, globulariti, e anthoditi frostwork
nei Cristalli I (Gea0260P).



◀ Foto 4
Accrescimenti di mondmilch wet tra gli
aghi di anthoditi frostwork in posizione
sottosquadro nel Pantheon (Gea0144P).



◀ Foto 5
Accrescimenti e colate di mondmilch wet
sulla parete e frammenti secchi al suolo
con morfologie superficiali da essicca-
mento, a crosta di pane, nel Pantheon
(Gea0138P).