

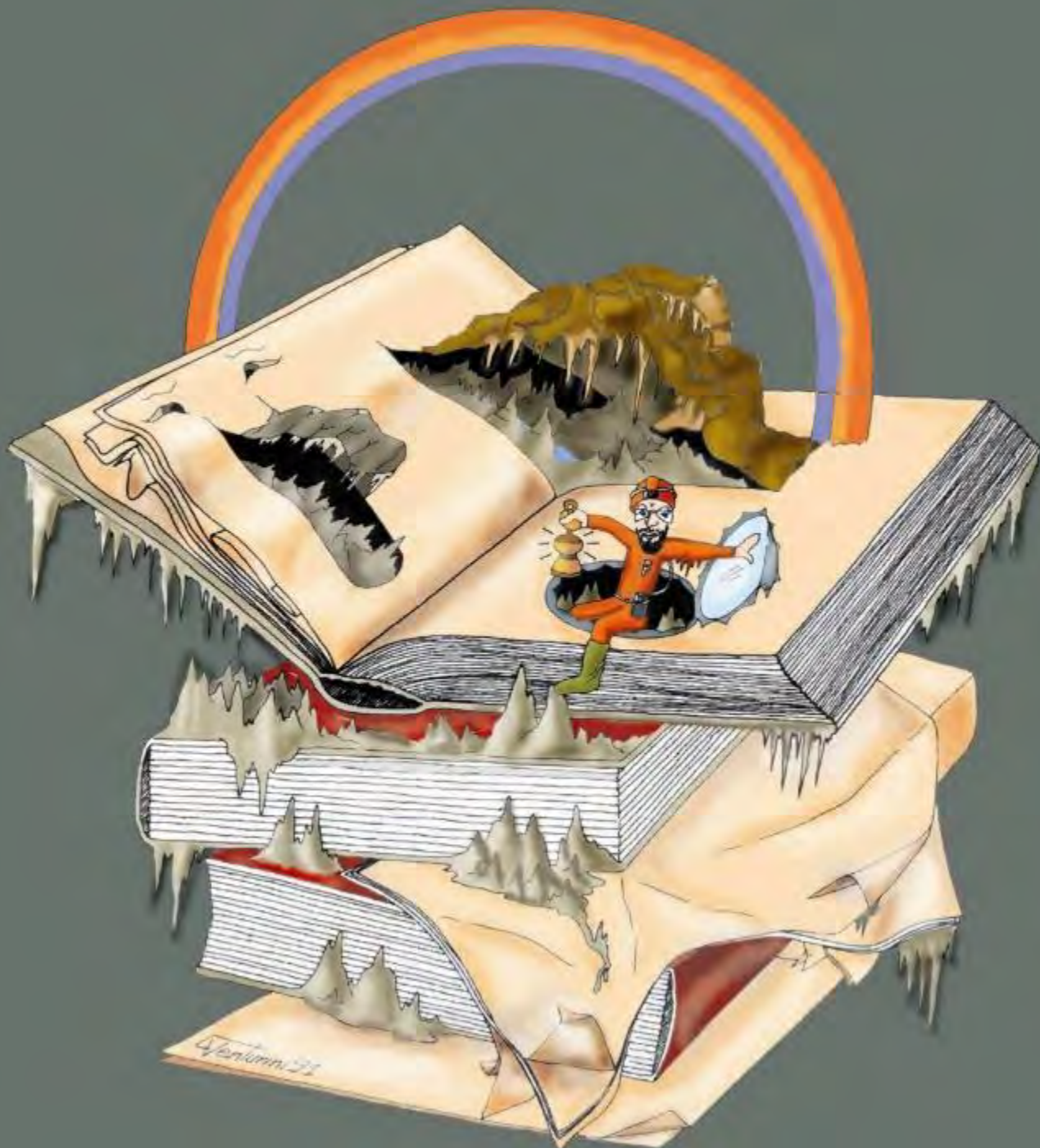


# IL LIBRO DI PIETRA

La storia scritta negli  
speleotemi

Paolo Forti

Dipartimento di Scienze  
della Terra e Geologico-  
Ambientali







Tutti sanno che l'aspetto estetico più importante delle grotte è rappresentato dalle **CONCREZIONI**

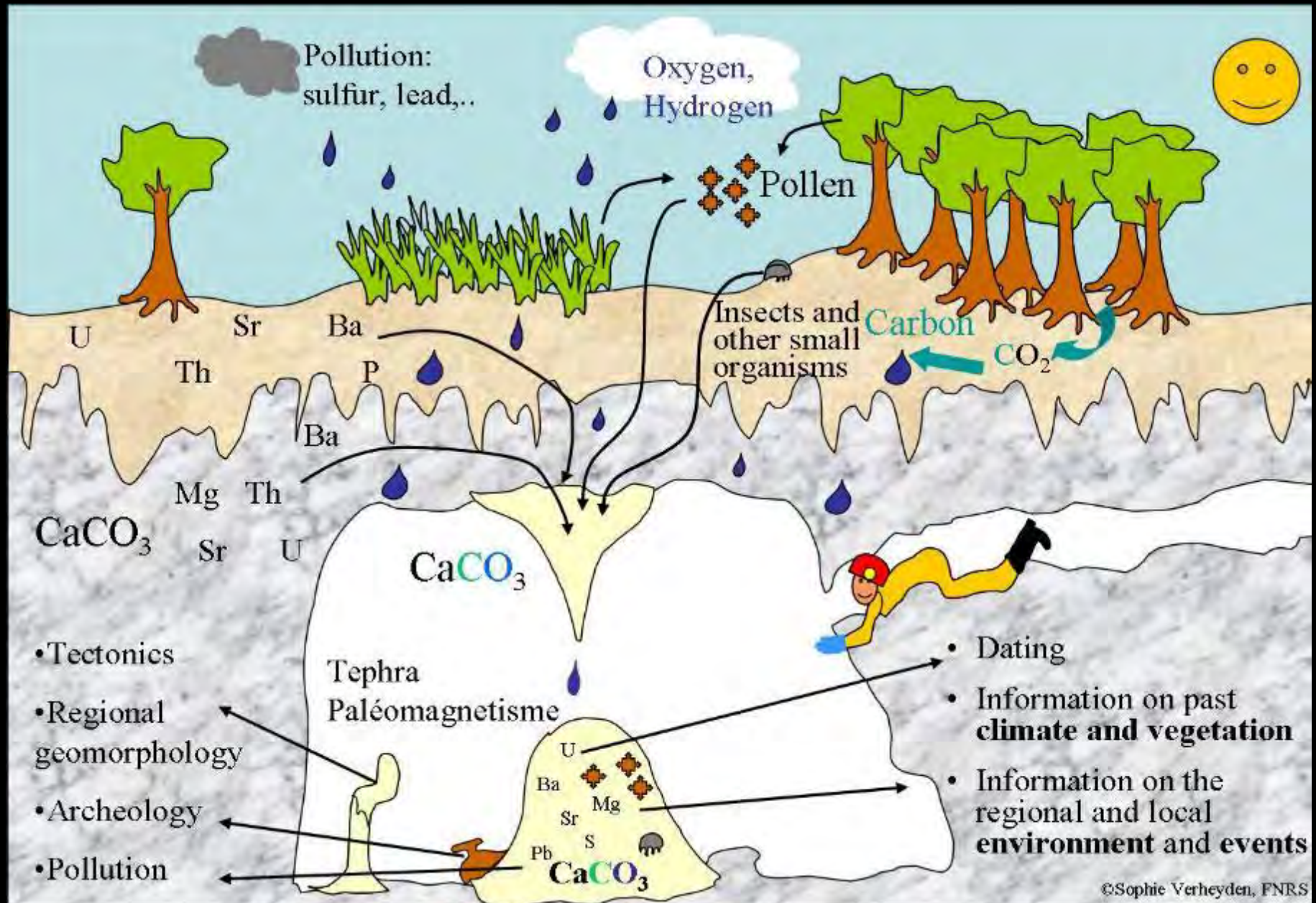


Molti non sanno che le **CONCREZIONI** sono il più dettagliato e vasto archivio naturale





# Tutto quello che accade in un'area viene puntualmente REGISTRATO all'interno degli SPELEOTEMI



# SPELEOTEMI & RICERCA

*Le concrezioni sono il più  
dettagliato archivio per il  
**Quaternario***

Possono essere  
utilizzate per studiare:

- il clima
- gli ambienti
- i terremoti

Permettendo anche una  
loro datazione assoluta

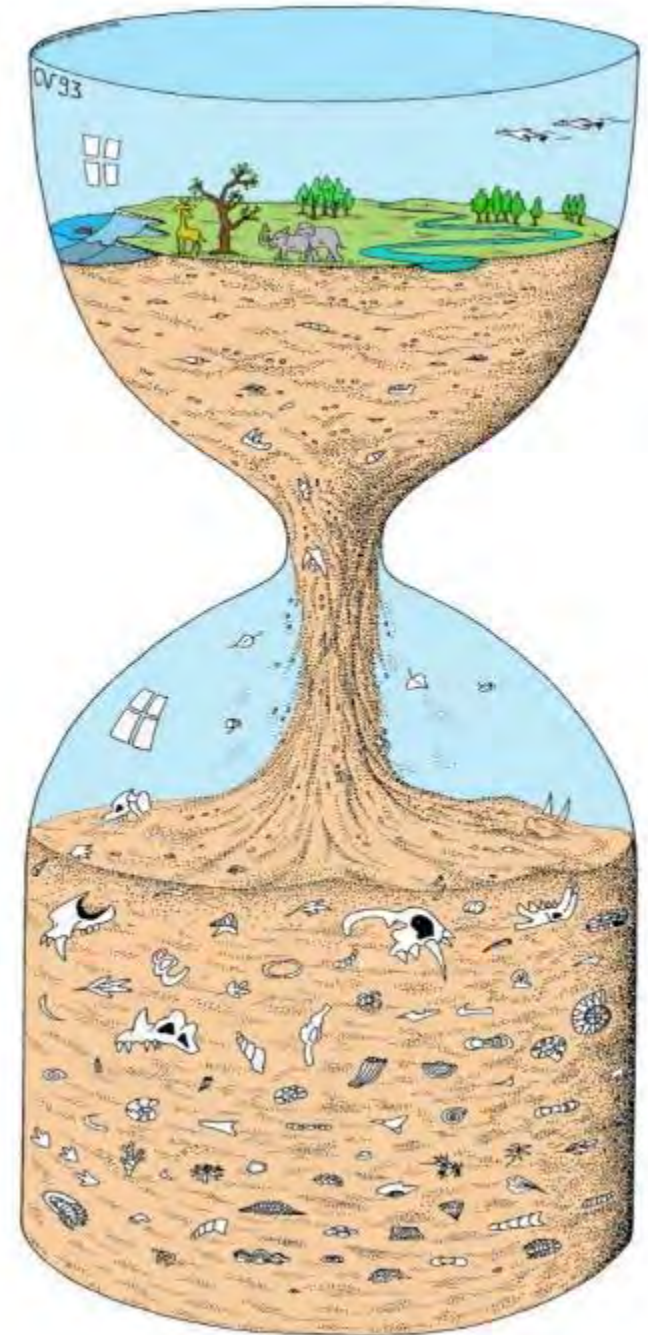
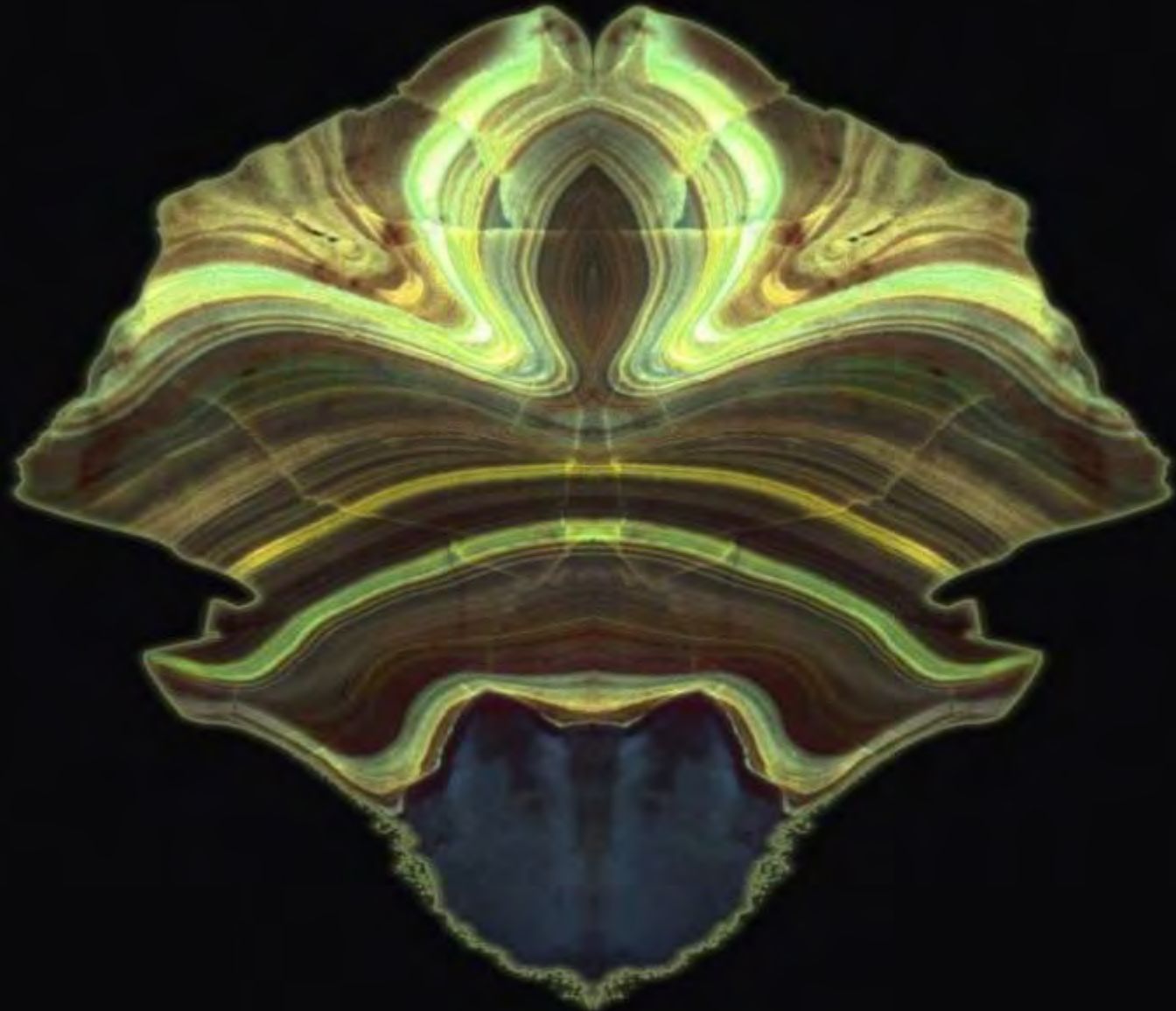






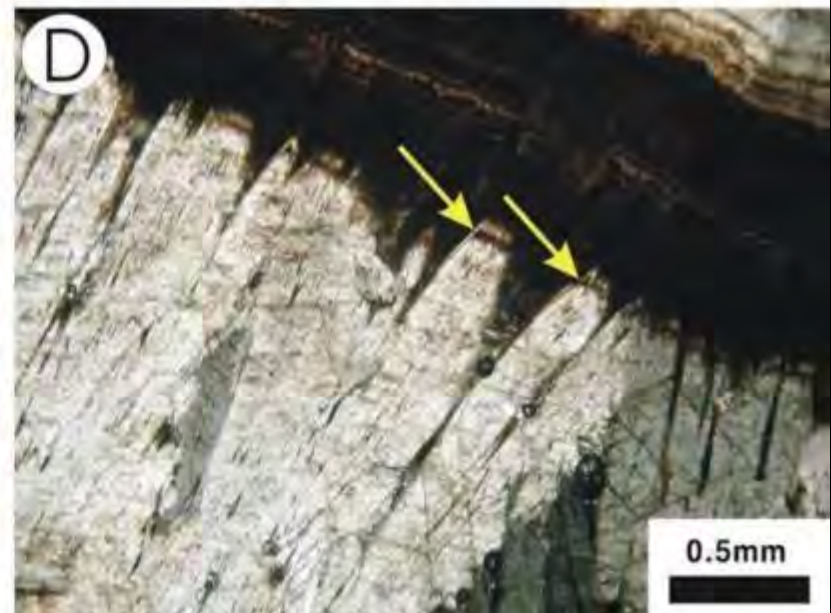
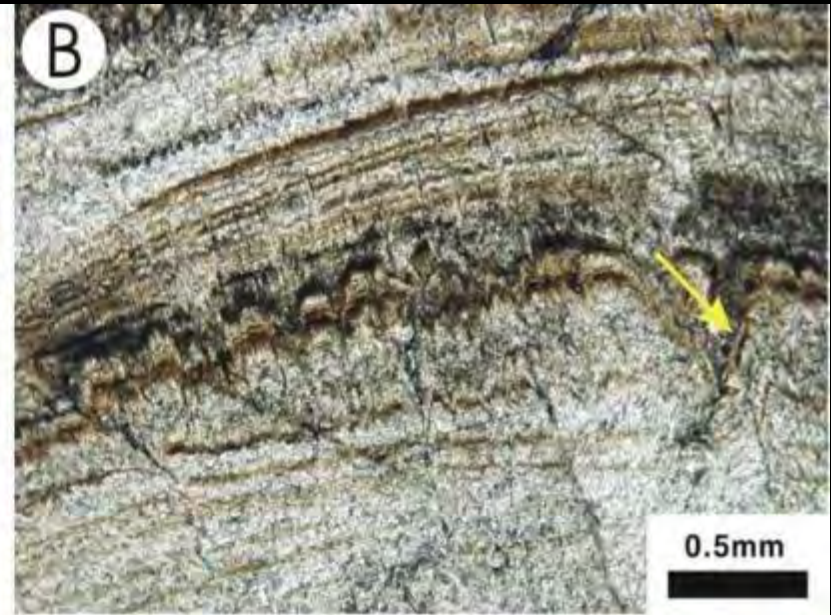
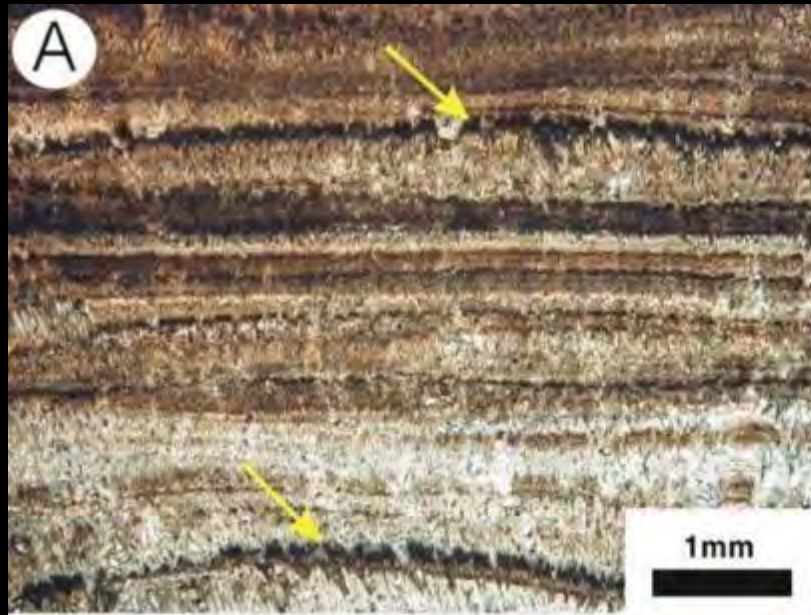
Ma come facciamo a **ESTRARRE** i dati?

La maggior parte delle informazioni è registrata nelle **bande di accrescimento degli speleotemi**





I dati ambientali sono ricavati attraverso analisi ad alta risoluzione della loro morfologia, tessitura, composizione chimica e/o isotopica





# SPELEOTEMI & DATAZIONI

Le bande di accrescimento permettono di definire automaticamente una cronologia relativa perchè:

Le bande più esterne sono sempre più giovani

Spesso a ogni banda corrisponde un anno ma è impossibile trasformare direttamente una cronologia relativa in una datazione assoluta



**2 mm**





I principali motivi per cui **non si può** automaticamente passare da una cronologia relativa ad una assoluta sono:

- **Mancanza di chiare bande**
- **Stop nel concrezionamento**
- **Periodi di ridissoluzione**
- **Bande intra-annuali**



Comunque gli speleotemi sono facilmente databili con varie altre metodologie



# SPELEOTEMI & DATAZIONI

Per trasformare una cronologia *relativa* in una *assoluta* si deve usare uno dei seguenti metodi:

Paleomagnetismo

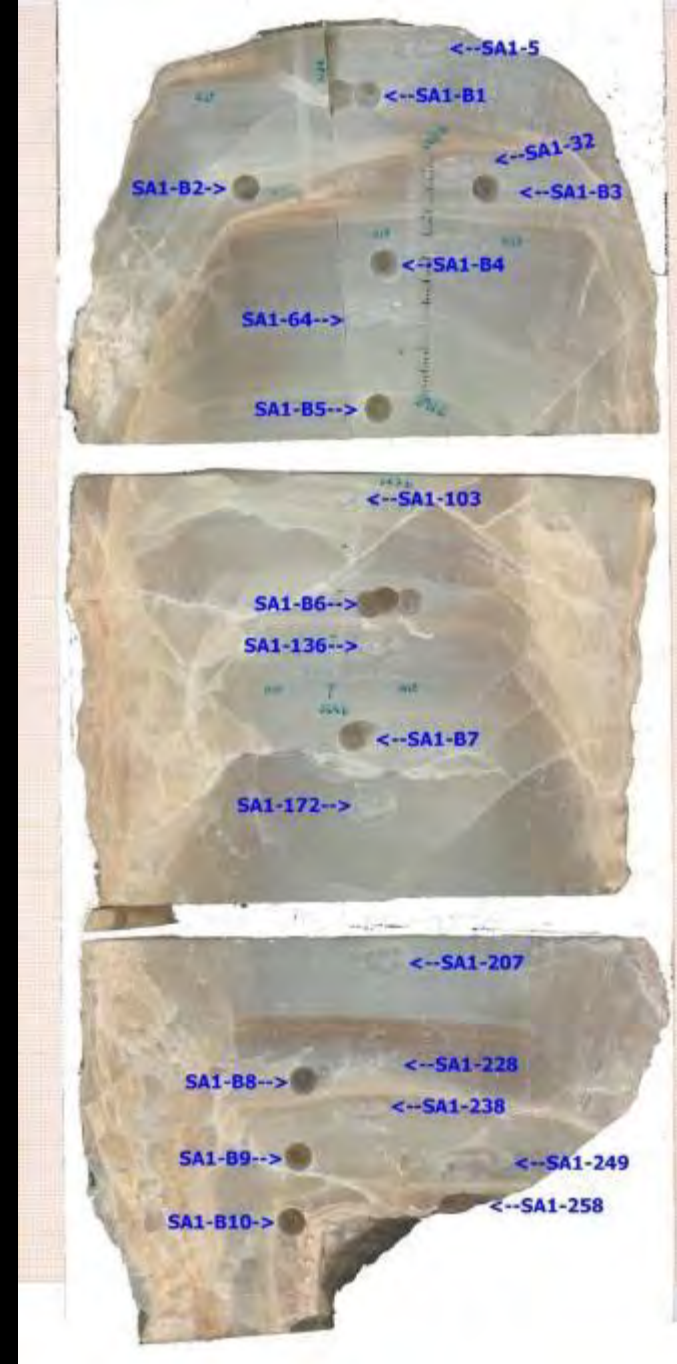
$^{14}\text{C}$

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

Risonanza di Spin Elettronico

Luminescenza

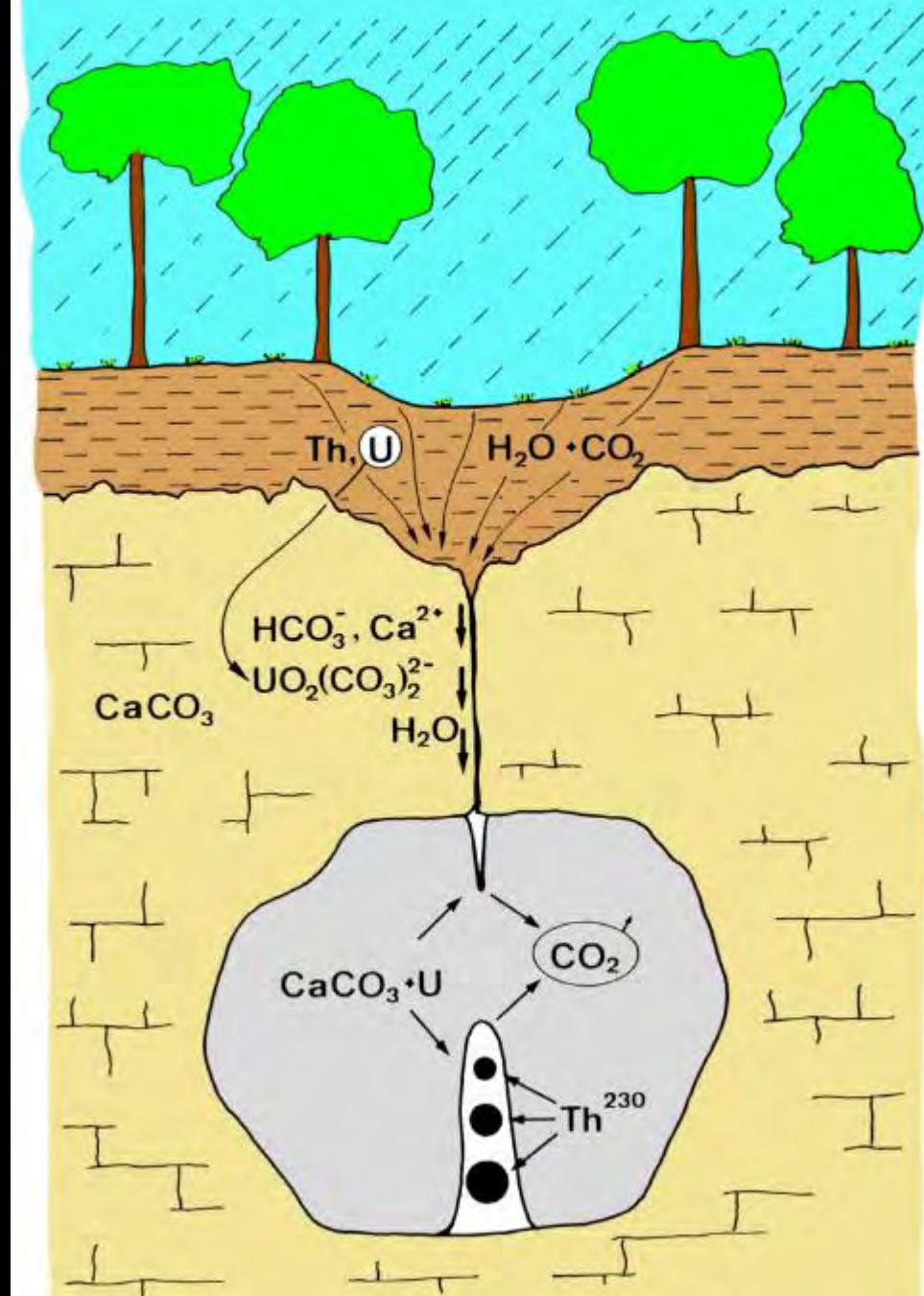
**Ciascun metodo ha i suoi specifici problemi e/o limiti**





# IL METODO $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$

- Limite temporale di 6-700.000 anni
- Il sistema geochimico può essere stato riaperto
- L'errore può variare da decine a decine di migliaia di anni





# LA LUMINESCENZA

Il fenomeno è indotto dalla presenza di acidi **fulvici** e **umici** nella struttura degli speleotemi

La loro concentrazione dipende **dall'attività batterica** nel suolo, che a sua volta è controllata **dell'irraggiamento solare** e dalla temperatura



# LUMINESCENZA & DATAZIONI

Attivando la luminescenza con luce UV, o meglio con un laser, è possibile risalire **dall'intensità relativa** delle singole bande alla concentrazione degli acidi umici e fulvici in ognuna di esse.

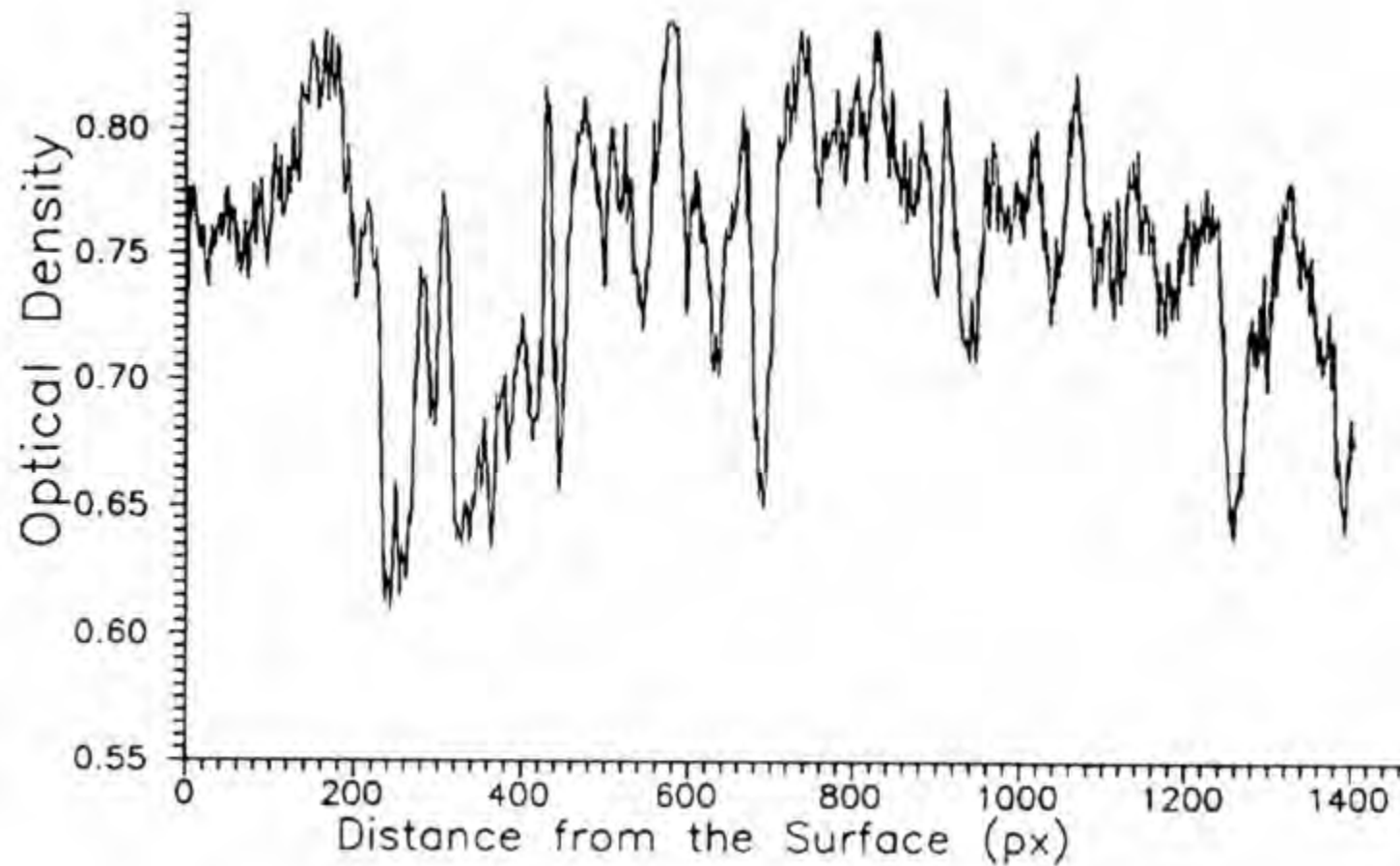
**Sulla base dei cicli solari e delle** temperature medie annue è quindi possibile ricostruire in dettaglio la cronologia **dello speleotema**





# POSSIBILITA' & LIMITI

La sensibilità  
teorica di  
questo metodo  
permette  
datazioni entro  
le 24 ore



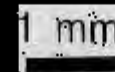
Spettro di luminescenza di uno speleotema della Rat Nest Cave (Canada) relativo agli ultimi 1400 anni con risoluzione 1 anno (Shopov 2006)

In realtà vi sono moltissimi fattori che impediscono praticamente di raggiungere tale precisione su lassi di tempo ampi

Frequenza delle **bande di accrescimento** come conseguenza del microclima della cavità

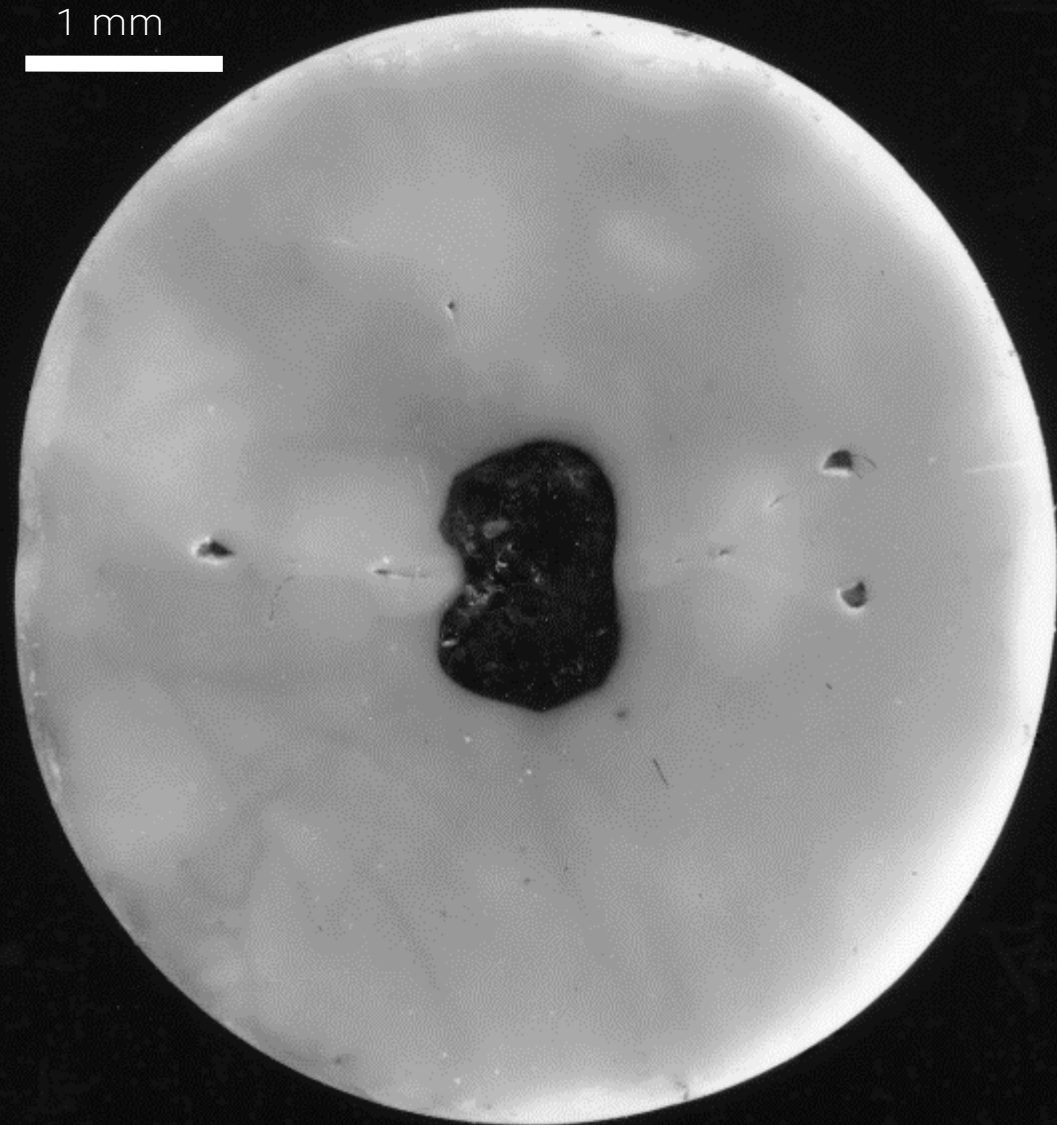
La **frequenza annuale** è molto comune, ma a volte una singola banda può corrispondere a un periodo molto minore, anche a un **singolo giorno di pioggia**

Uno speleotema di 25 anni della Grotta Acquafredda (Bologna, Italia) con oltre 500 bande di accrescimento





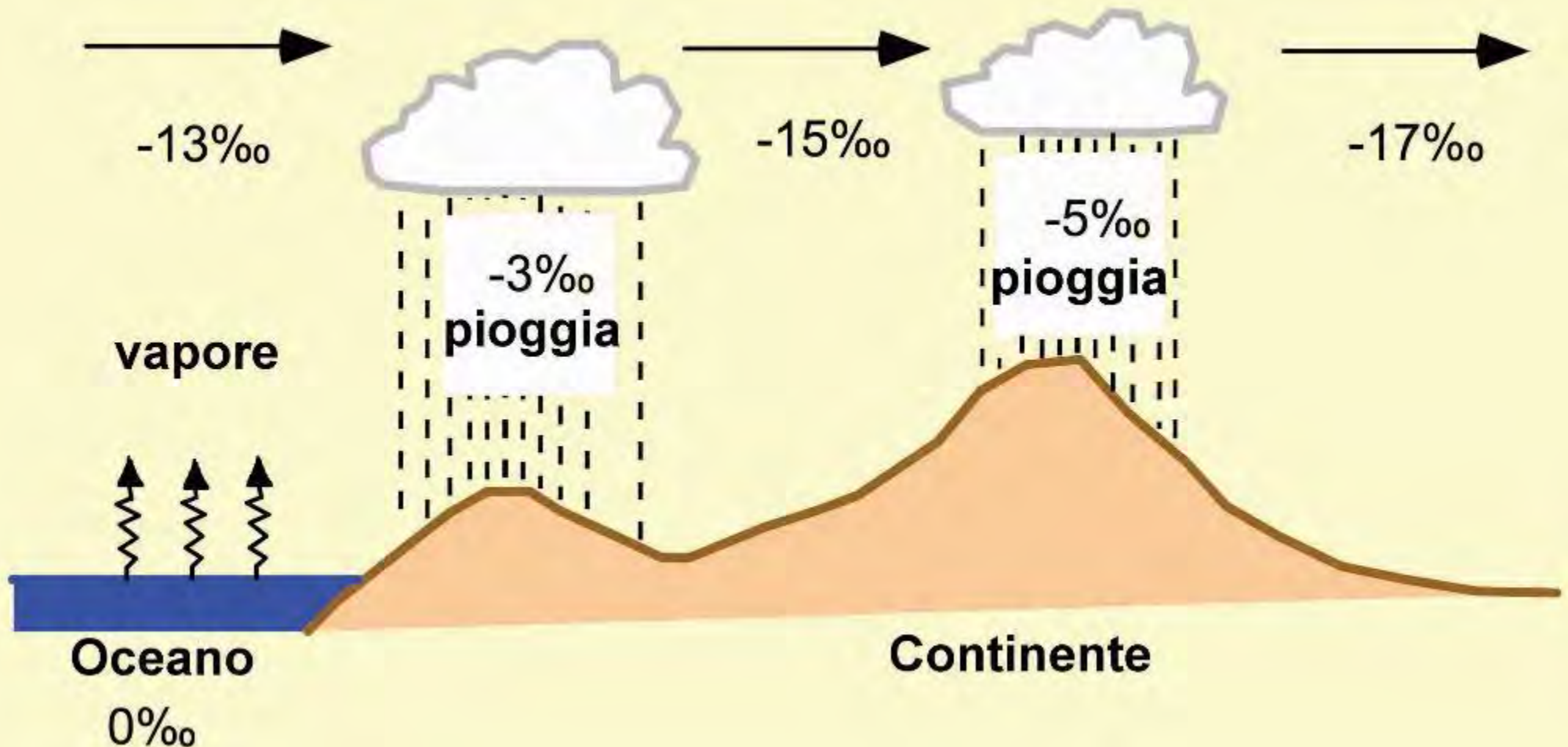
L'assenza totale di bande  
è assolutamente rara,  
realizzandosi solamente se  
tutta l'acqua di alimentazione  
deriva da **condensa**



Una pisolite di 55 anni dalla Miniera Reforma  
(deserto di 4C, Mexico)

# GLI ISOTOPI STABILI

Nella trasformazione da liquido a gas  $H_2O$  si arricchisce di  $^{16}O$  ( $\delta$  più negativo). Nella trasformazione opposta si arricchisce di  $^{18}O$  ( $\delta$  meno negativo)

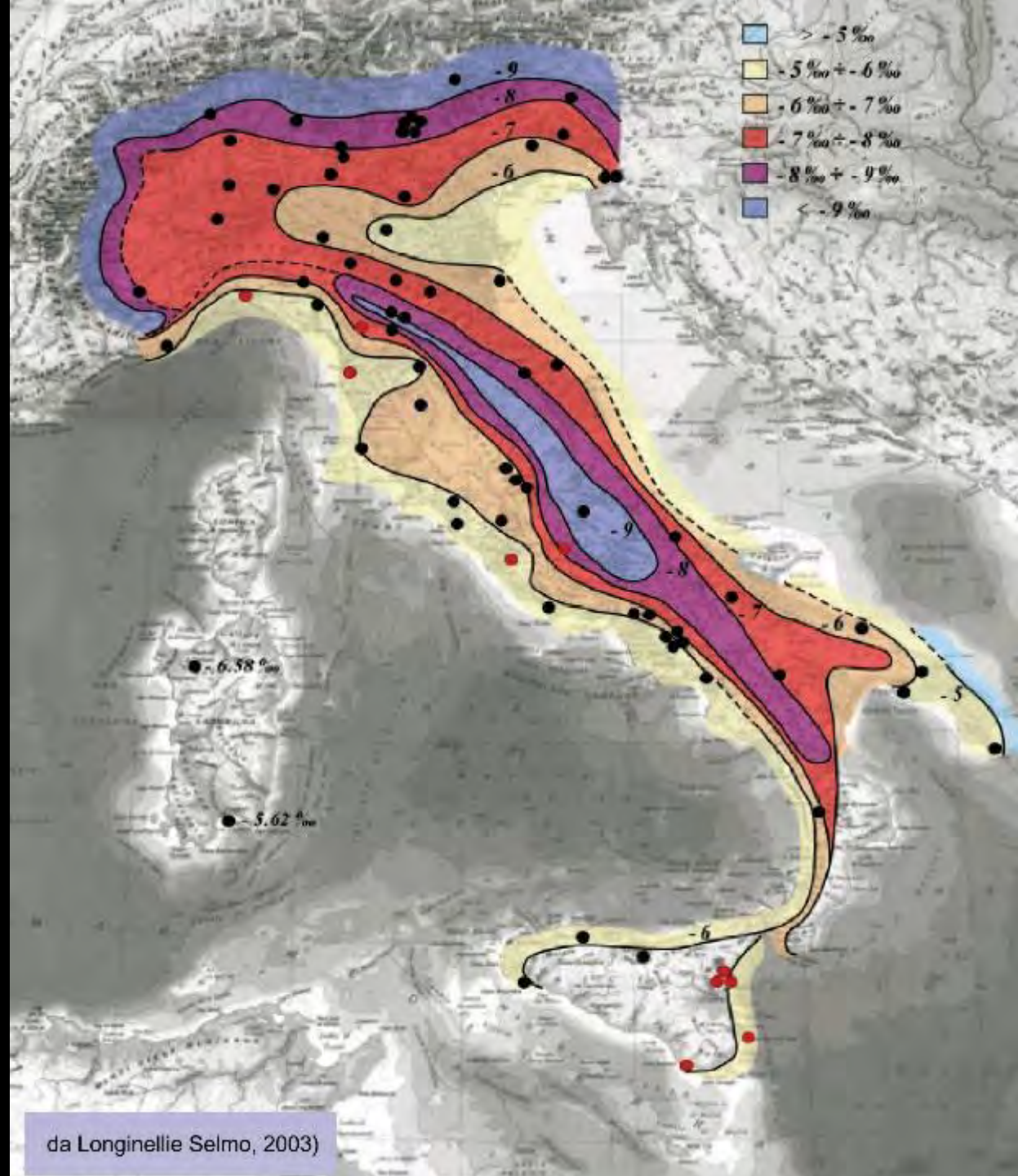




# E COSA CI POSSONO DIRE?

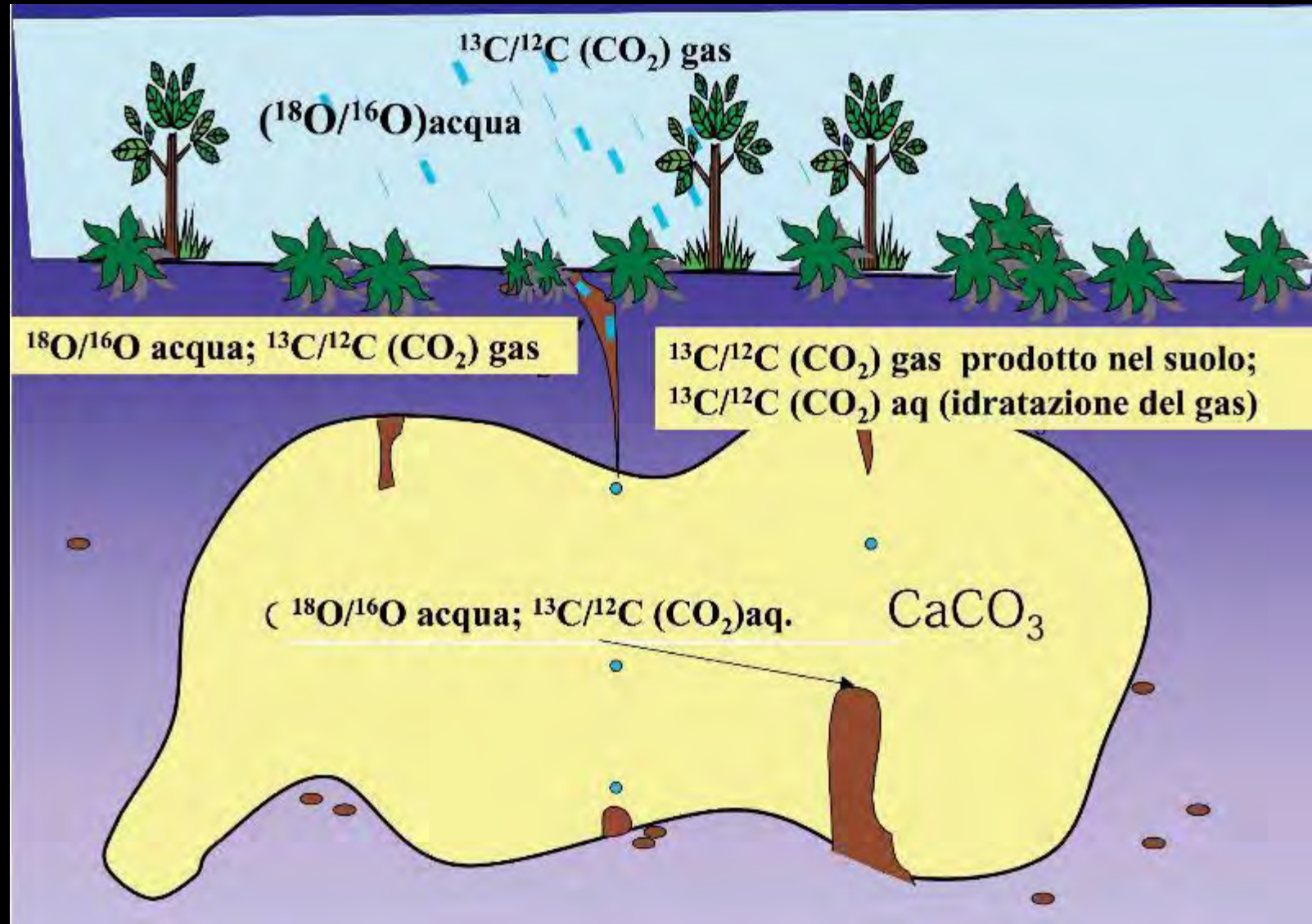
Le acque di infiltrazione "ricordano" l'ambiente in cui sono avvenute le precipitazioni....

Quindi il rapporto isotopico che misuriamo ci da informazioni sul **bacino di ricarica** di un dato acquifero



# Le analisi degli isotopi stabili sono fondamentali nello studio degli speleotemi

E' possibile avere informazioni non solo sulla temperatura di deposizione, ma anche sapere se il processo è stato di tipo evaporativo o diffusivo





# SPELEOTEMI E LIVELLO DEL MARE

La presenza di concrezioni gravitative sommerse, o la presenza di fori di litodomi su concrezioni subaeree è una evidenza diretta della variazione del livello marino



# GLACIAZIONI REGISTRATE NELLA STRUTTURA DI UNA STALATTITE

Improvvisi alternanze di materiale argilloso-siltoso e di calcite all'interno della stalattite possono evidenziare una forte erosione superficiale alla fine di una

glaciazione

Comunque lo stesso effetto può essere indotto dalla denudazione del suolo dovuto ad altre cause naturali e/o antropogeniche

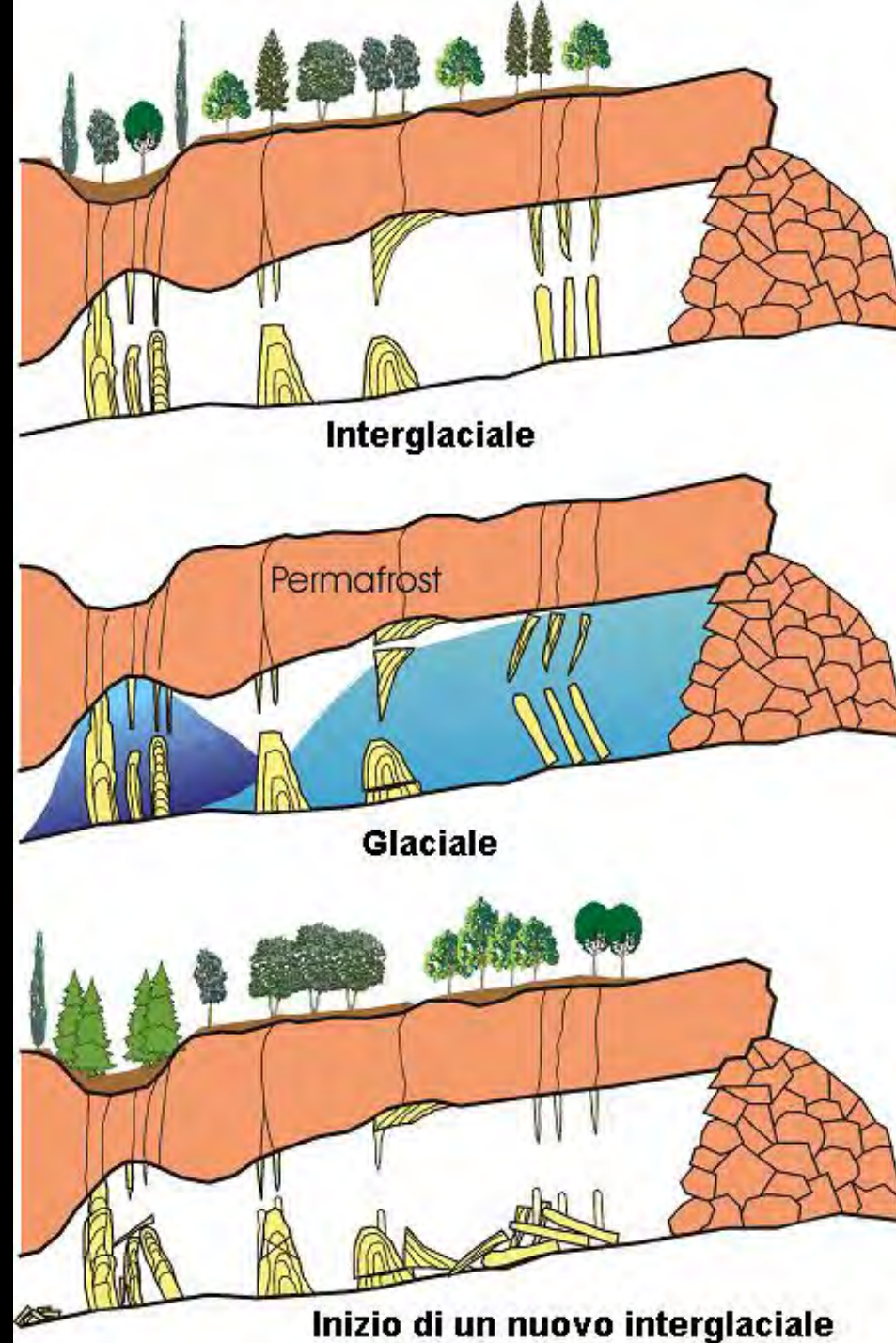
Una stalattite "telescopica" (da Jakucs, 1977)





# POSSIBILI EVIDENZE DI SPELEOTEMI ROTTI DA GHIACCIO DI GROTTA

- Assenza di concrezionamento più antico sul soffitto
- frammenti di stalattiti depositate sulla cima di altre concrezioni
- Stalagmiti rotte
- Stalagmiti coniche frammentate
- Stalagmiti ruotate e disassate
- Accumuli di tipo morenico di concrezioni rotte



# SPELEOTEMI & TERREMOTI

**Le concrezioni possono registrare i seguenti dati:**

Localizzazione **dell'epicentro** di forti terremoti

Valutazione della magnitudo di tali eventi

Datazione relativa ed assoluta fino a 600.000 anni

Valutazione accurata del rischio sismico

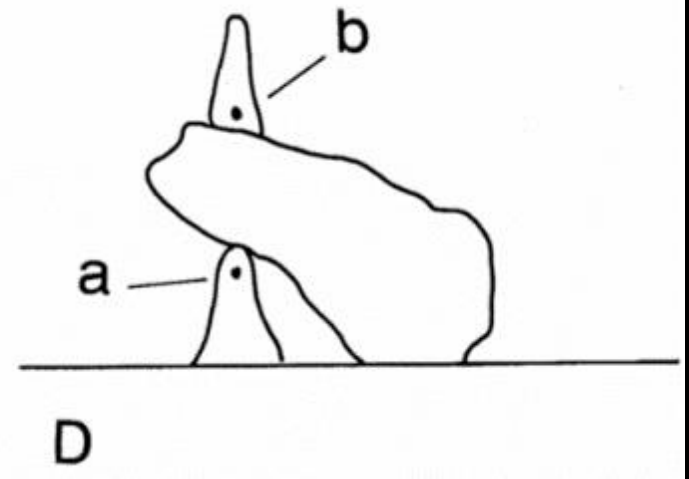
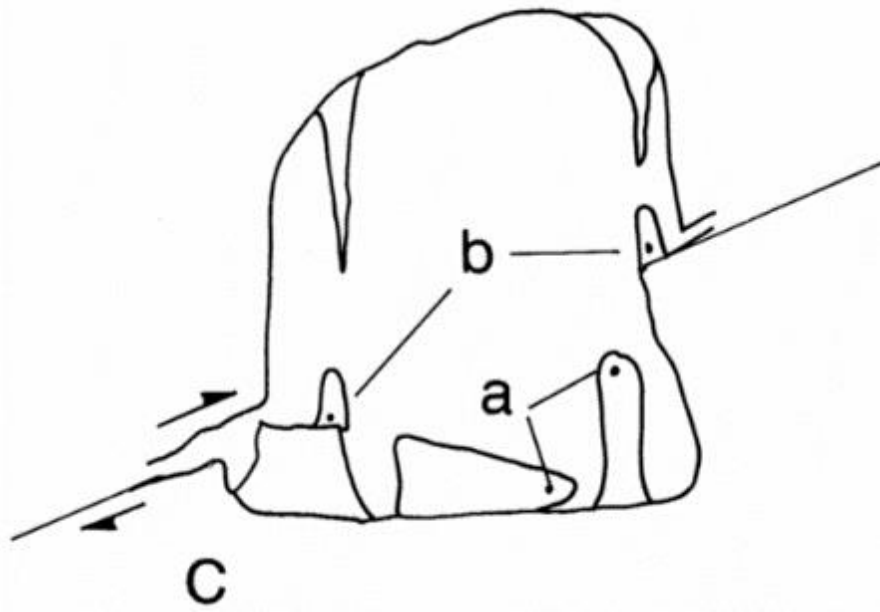
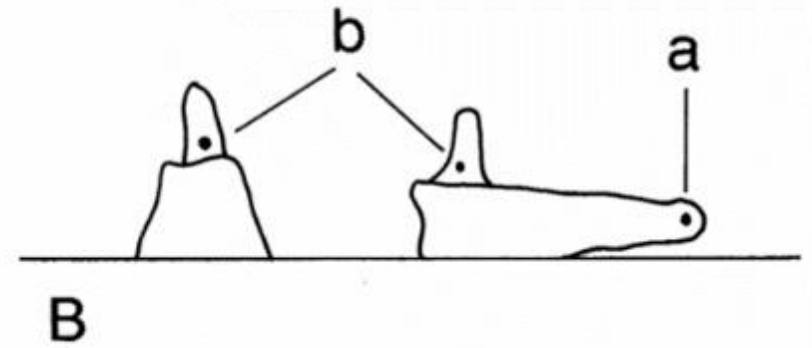
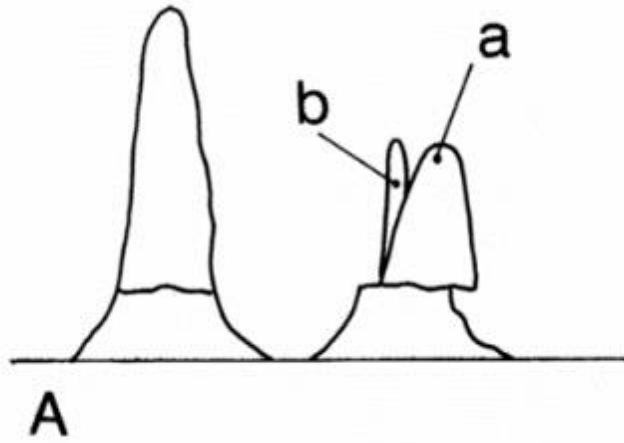
**Questi dati si ottengono da:**

Concrezioni rotte  
Stalagmiti ancora in posto

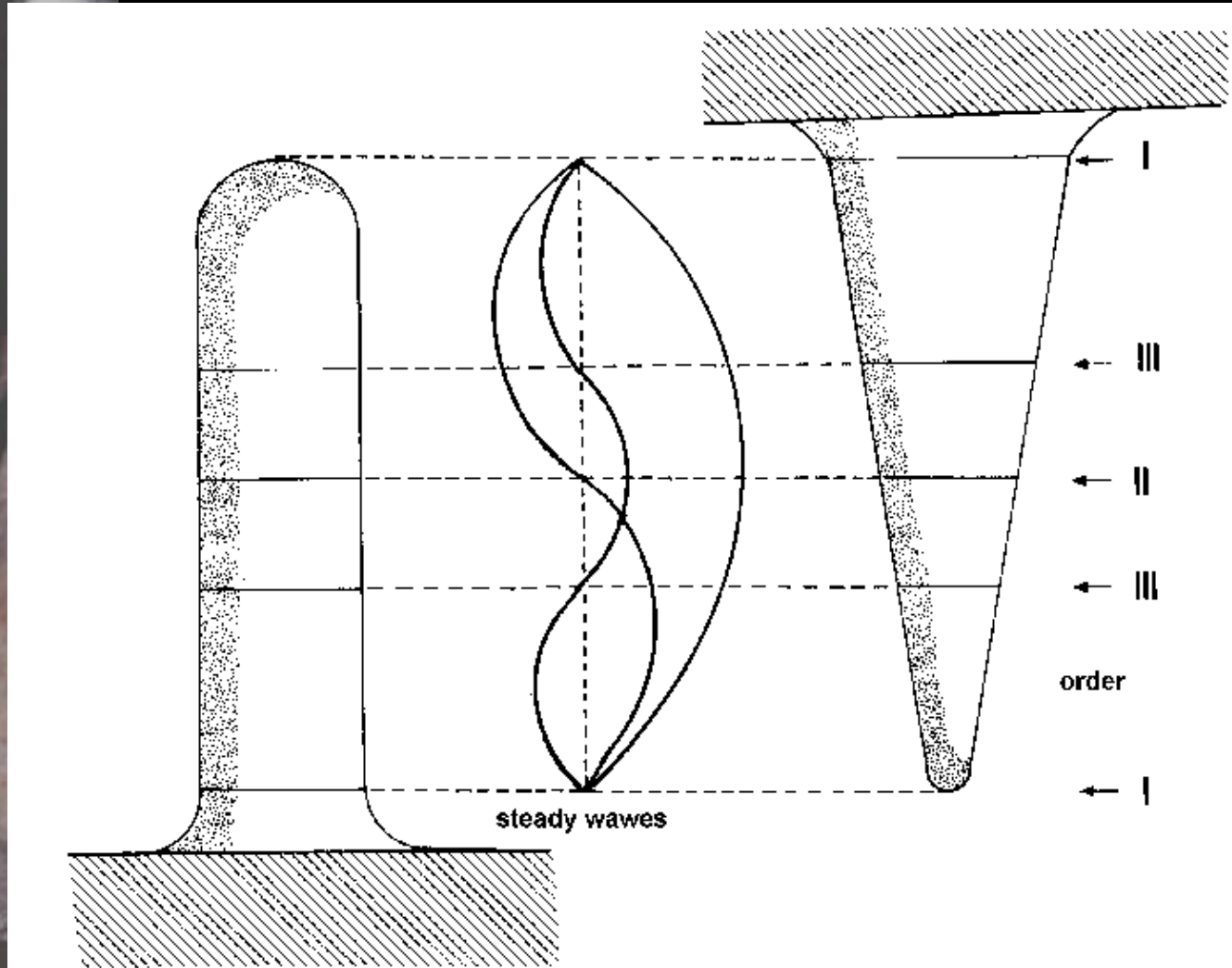
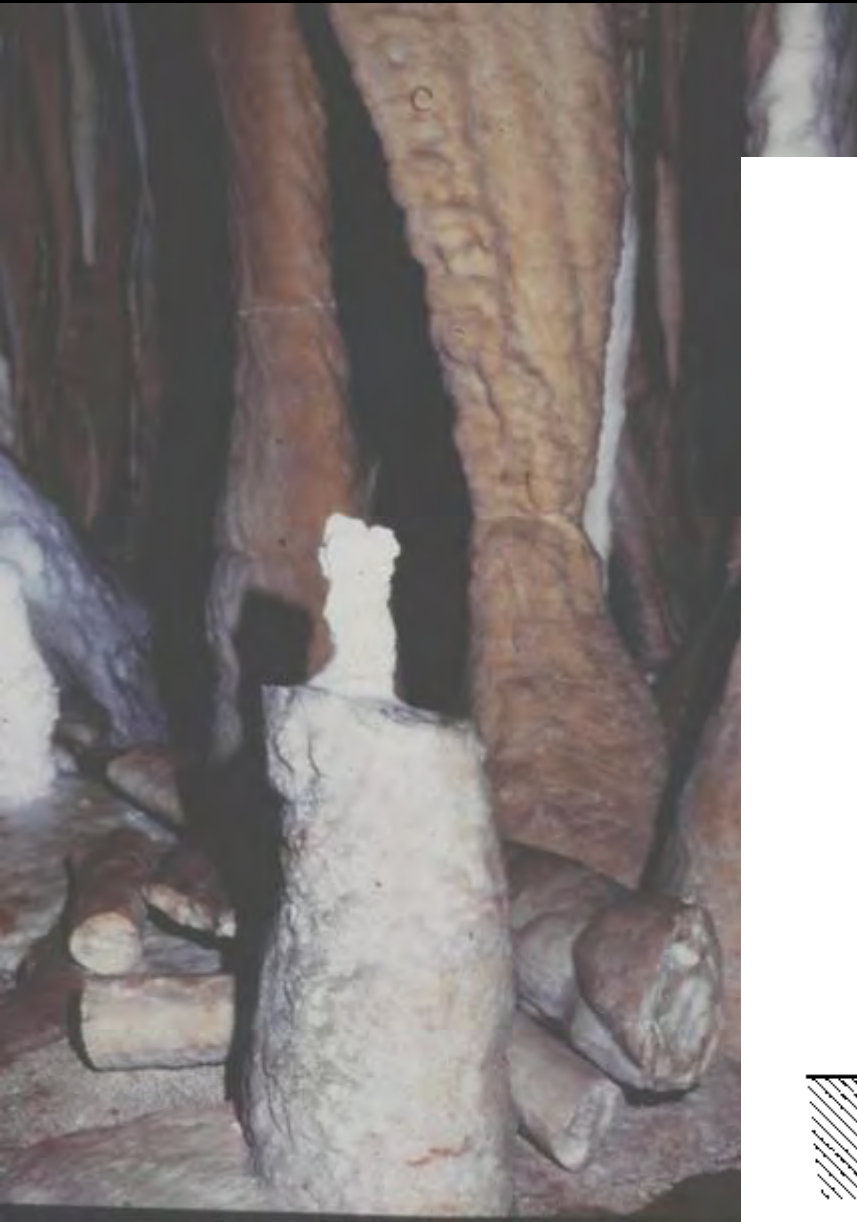




# TIPICHE ROTTURE DA SHOCK SISMICI



# ROTTURA DI CONCREZIONI DOVUTE A RISONANZA INDOTTA



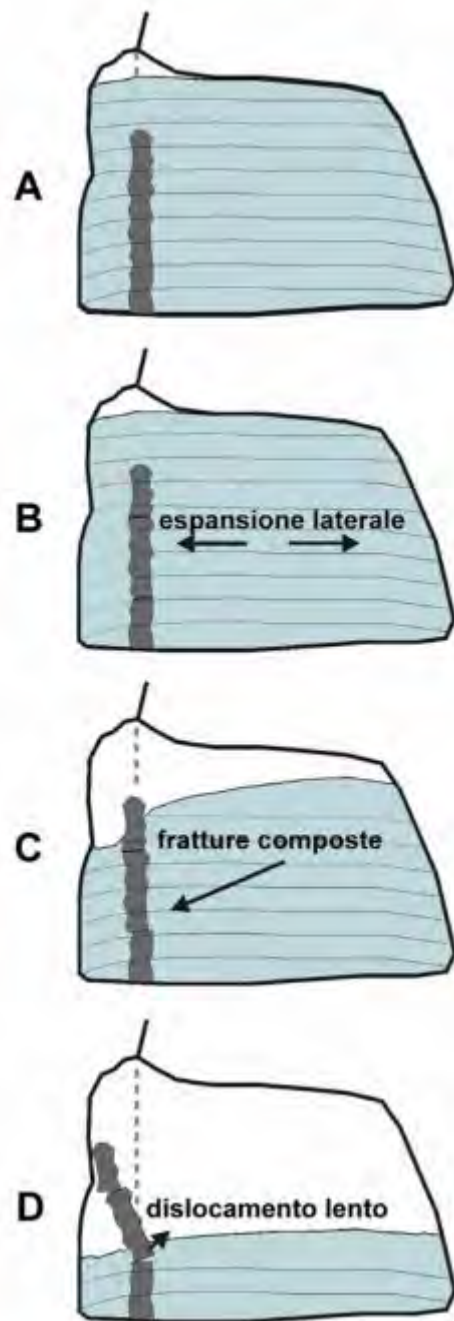


LE GLACIAZIONI & I TERREMOTI POSSONO  
DARE LUOGO A ROTTURE IDENTICHE?



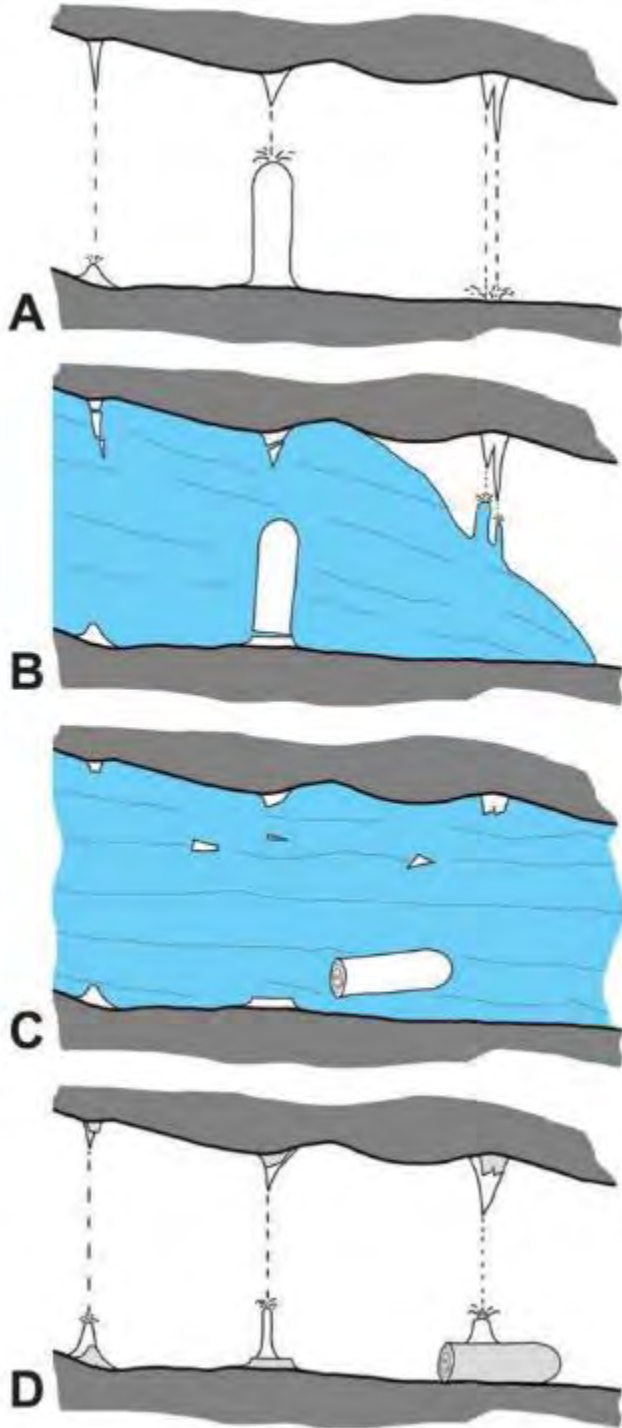
La rottura di **grandi speleotemi** può essere definita sulla base del loro eventuale **spostamento**

Frammenti di concrezioni in equilibrio instabile **non sono compatibili** con shock sismici: queste rotture devono essere state causate da **glaciazioni**



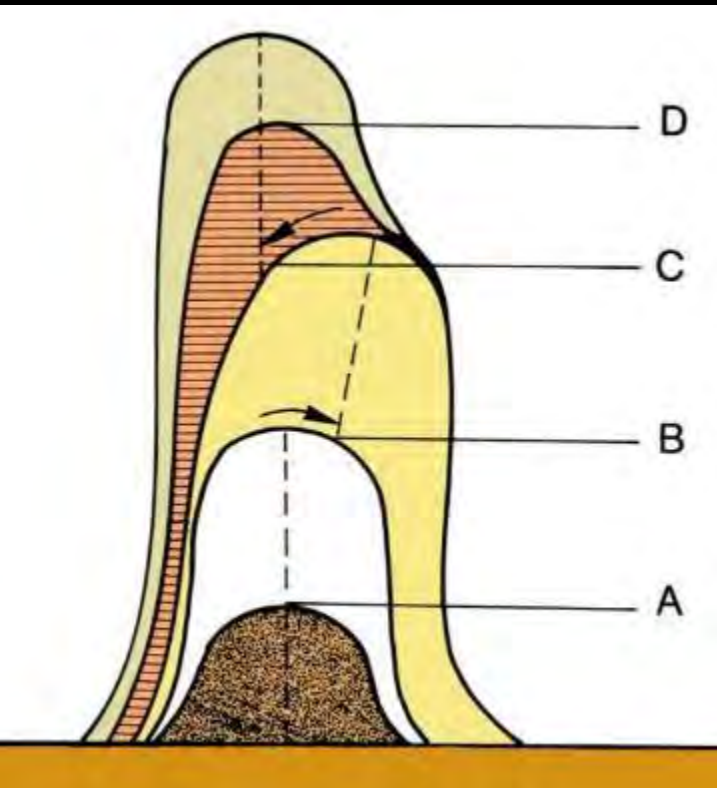


Uno **shock sismico** causa nessun altro spostamento se non quello dovuto a scivolamento per gravità

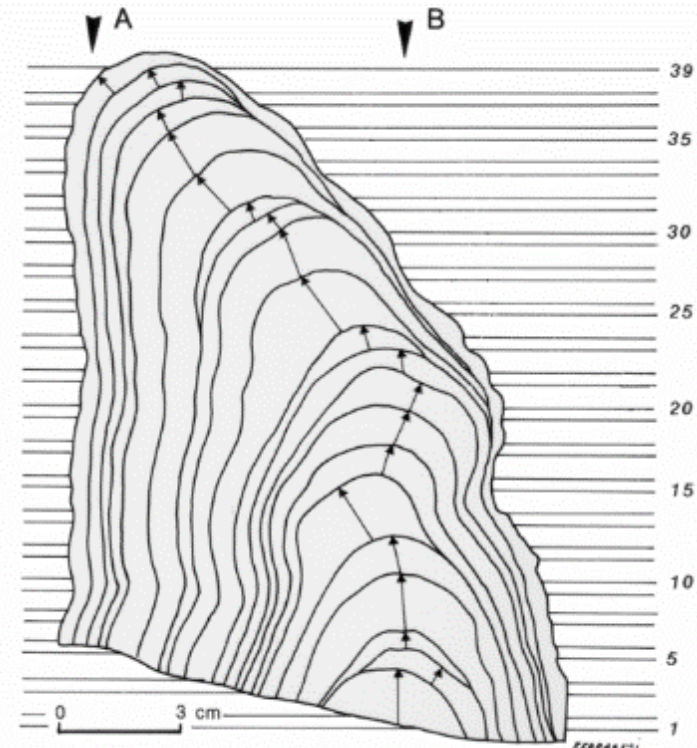


Una **lingua di ghiaccio** muovendosi dentro una grotta causerà sempre uno spostamento coerente **con la sua direzione di flusso**

# EVIDENZE DI TERREMOTI NELLA STRUTTURA DELLE STALAGMITI



improvvisi e netti cambi di verticalità nell'asse di accrescimento e/o variazioni nette nella tessitura, colore e composizione chimica possono essere la conseguenza di shock sismici



Sezione longitudinale di una stalagmite e sua restituzione grafica



# SPELEOTEMI & PALEOCLIMI

Dati ricavabili da analisi morfologiche di stalagmiti

Il diametro di equilibrio di una stalagmite (Franke, 1965):

$$d = 2\sqrt{\frac{c_0 \cdot q}{\pi \cdot v}}$$

$c_0$  = materiale depositato dalla unità di volume di soluzione

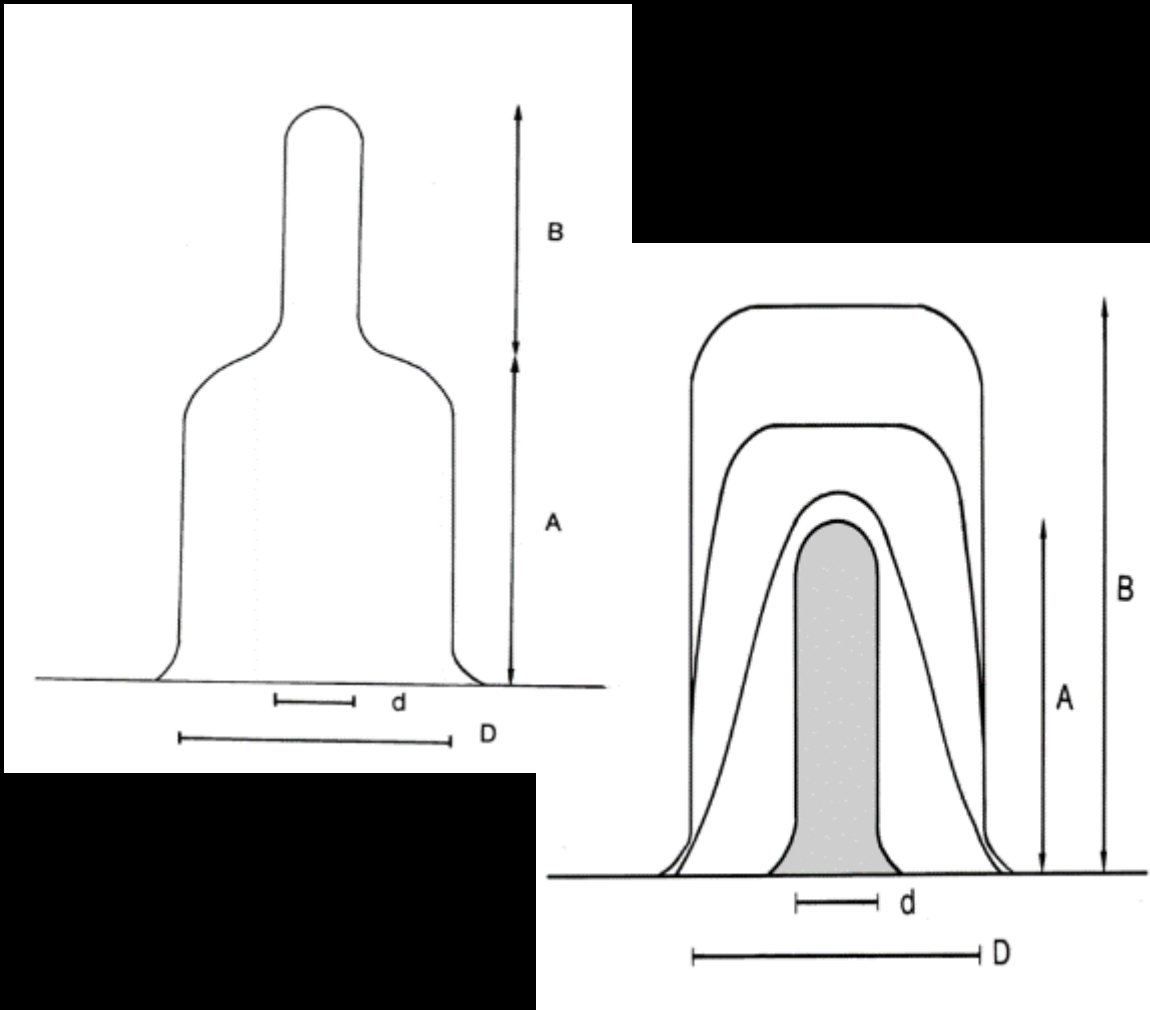
$q$  = quantità d'acqua che cade nell'unità di tempo

$v$  = velocità di accrescimento apicale

$\pi$  = 3,14.....



Improvvisi e/o progressive variazioni nel gocciolamento sono registrate all'interno della struttura della stalagmite

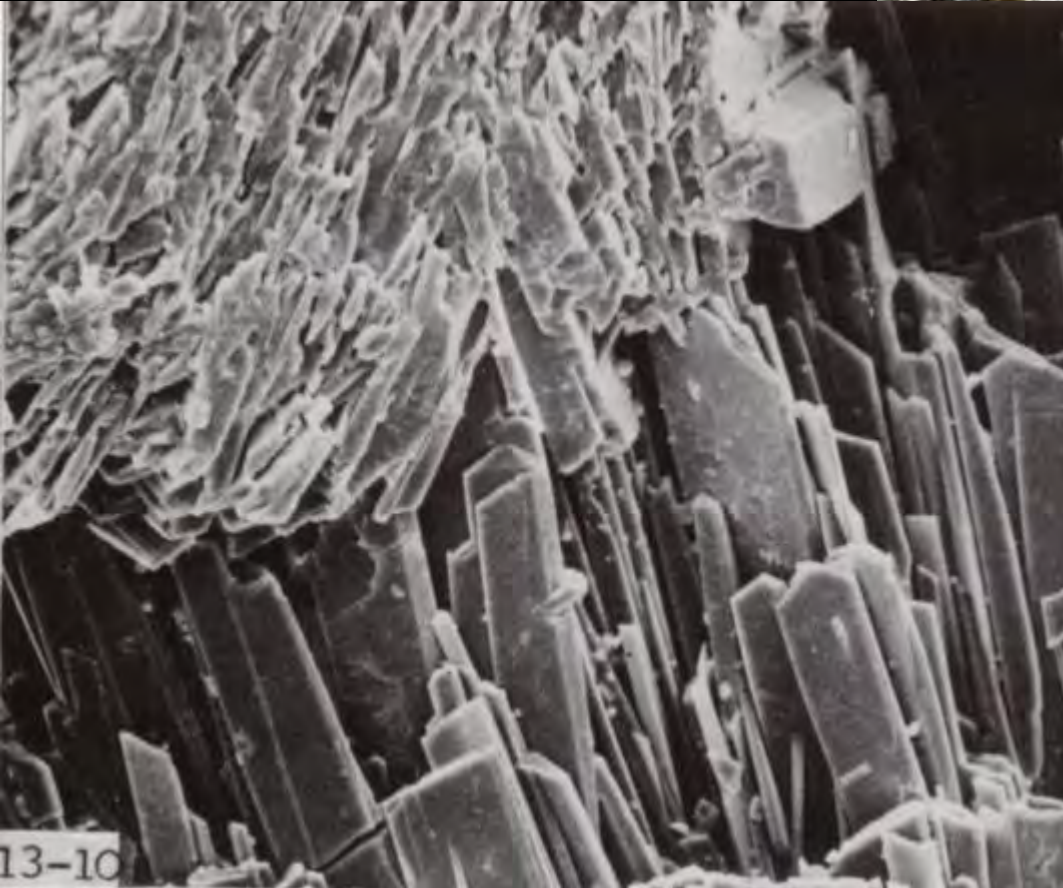
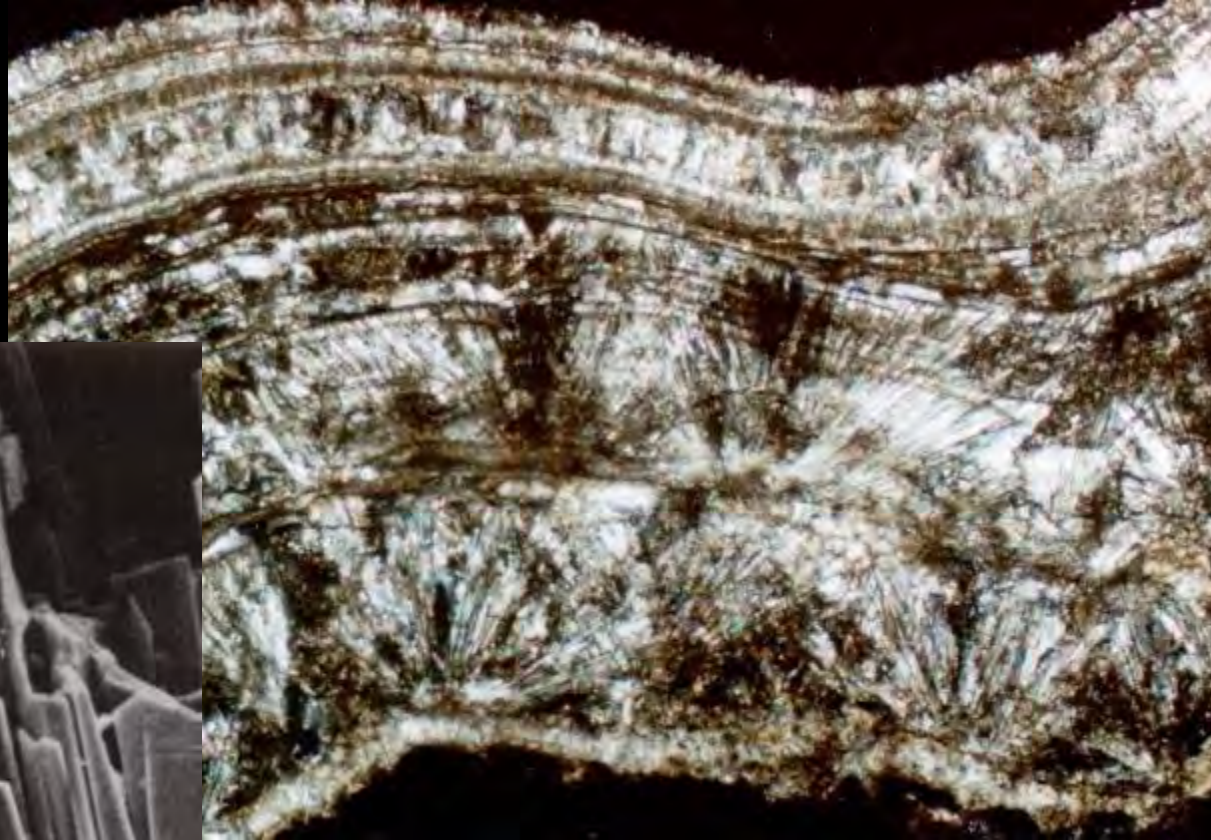


Quando l'effetto è "globale" indica una variazione climatica



# MINERALI DI GROTTA & PALEOAMBIENTI

Fino ad oggi solamente **calcite** & **aragonite** sono stati ampiamente utilizzati per ottenere dati e/o informazioni



Le ricostruzioni paleoambientali sono possibili attraverso lo studio della loro morfologia, tessitura e elementi in traccia

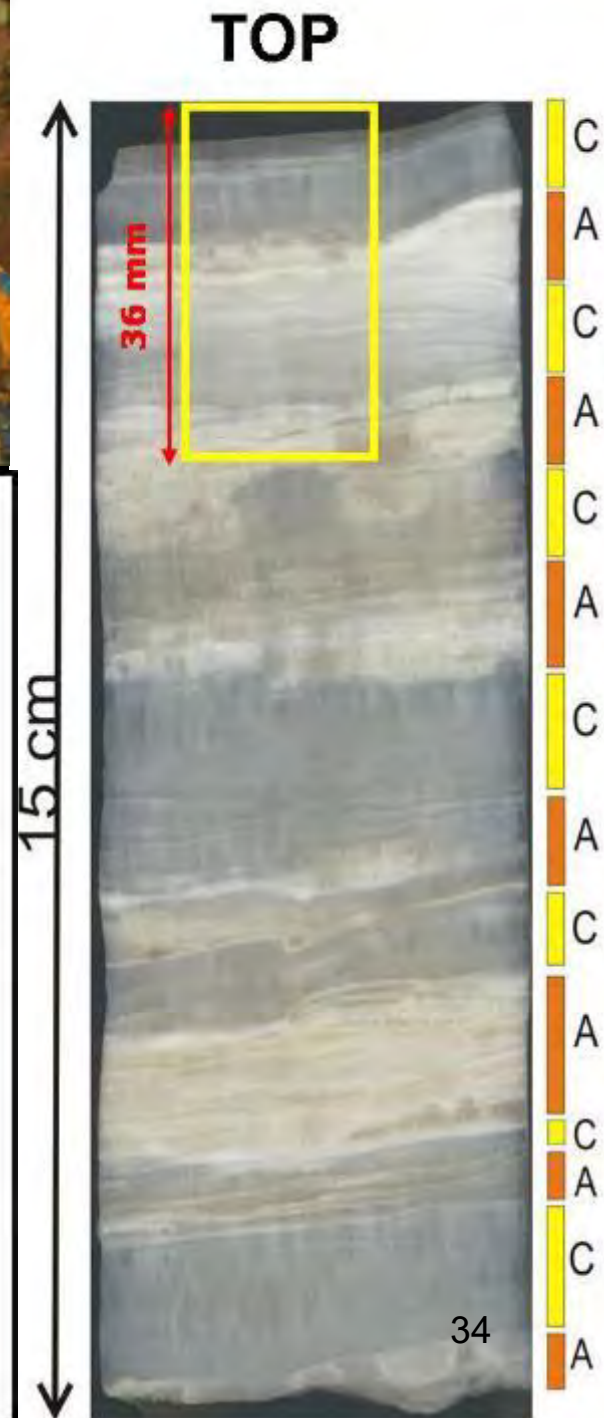
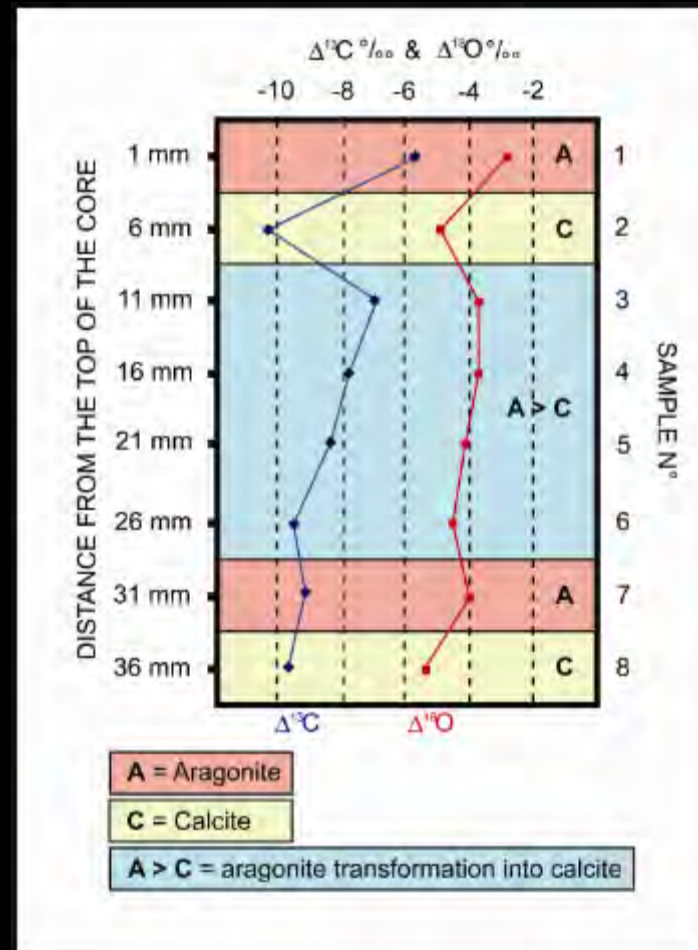
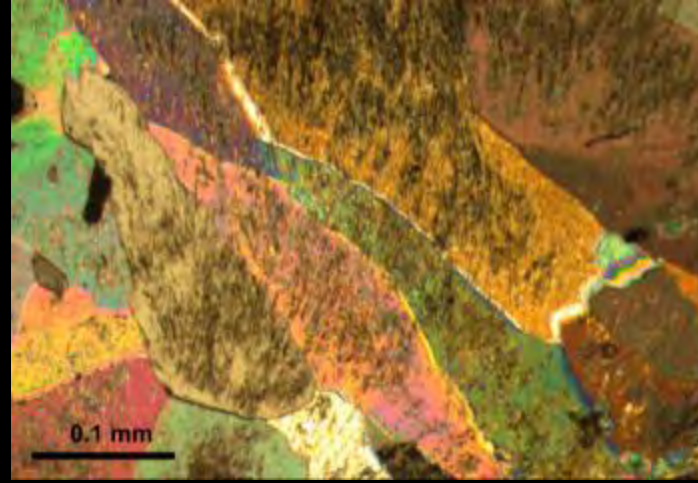


Il miglior metodo per ottenere buoni campioni è quello di prelevare una CAROTA dalla concrezione da analizzare



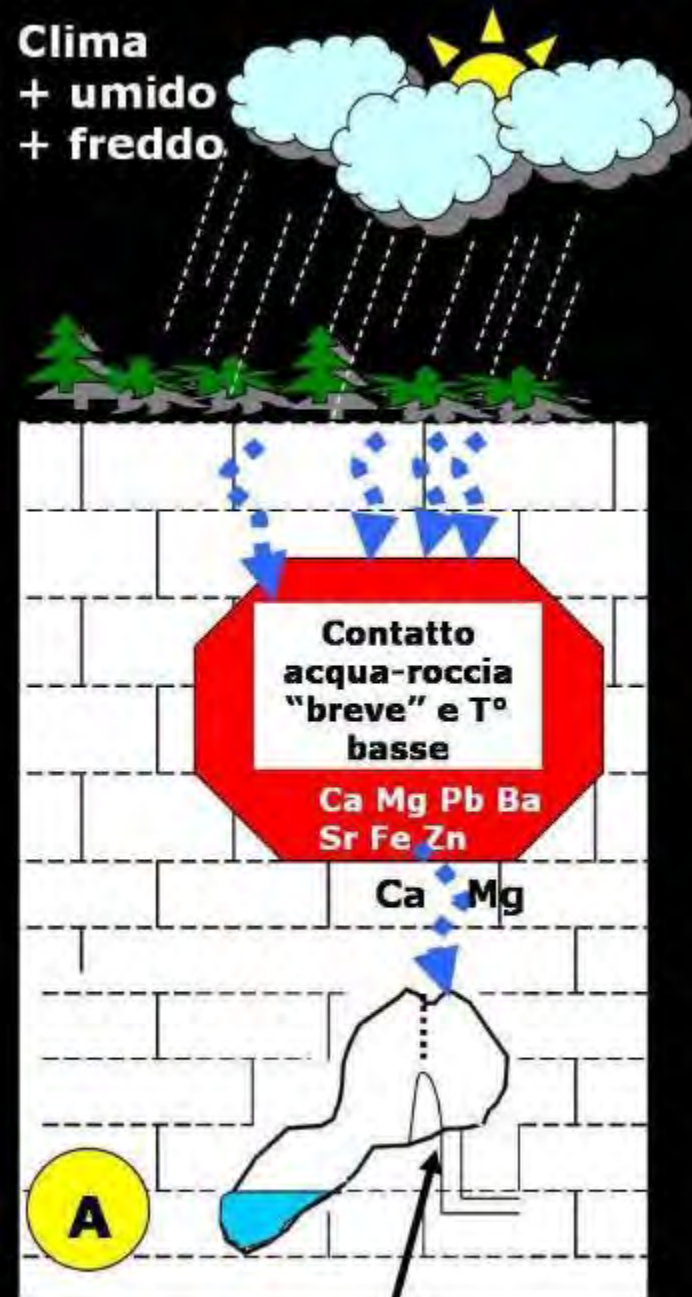


# La Grotta di Santa Barbara



Dalla carota si è ricavata una sequenza continua di sezioni sottili che coprono tutto lo sviluppo della carota stessa

L'analisi morfologica, tessiturale e mineralogica ha permesso di determinare con esattezza i posti dove l'aragonite e la calcite si erano depositate e dove l'aragonite si era parzialmente trasformata in calcite



**Calcite**

RISULTATO

Vi è stata  
un'alternanza  
climatica negli  
ultimi 30-  
40.000 anni BP.

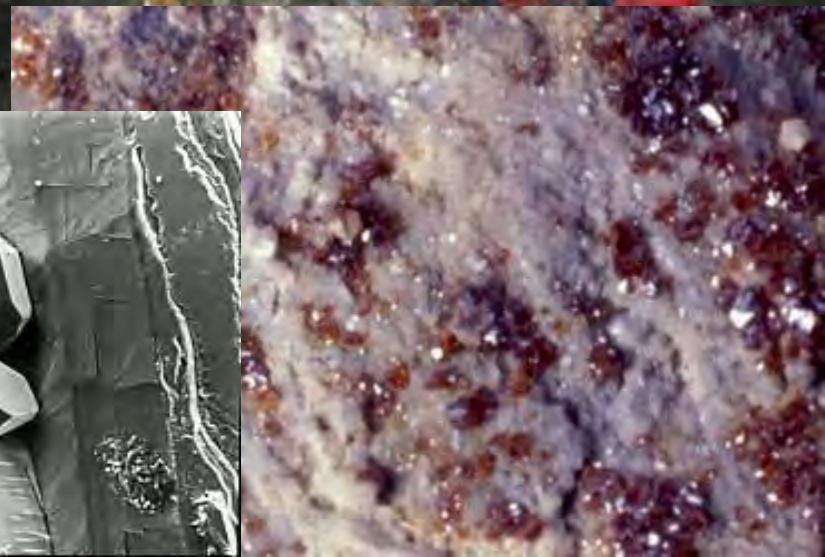
Durante i **periodi più umidi** si depositava **calcite** e l'aragonite si trasformava parzialmente in calcite



**Aragonite**



Gli altri minerali di grotta sono stati considerati sino ad oggi **inutili** per tali studi



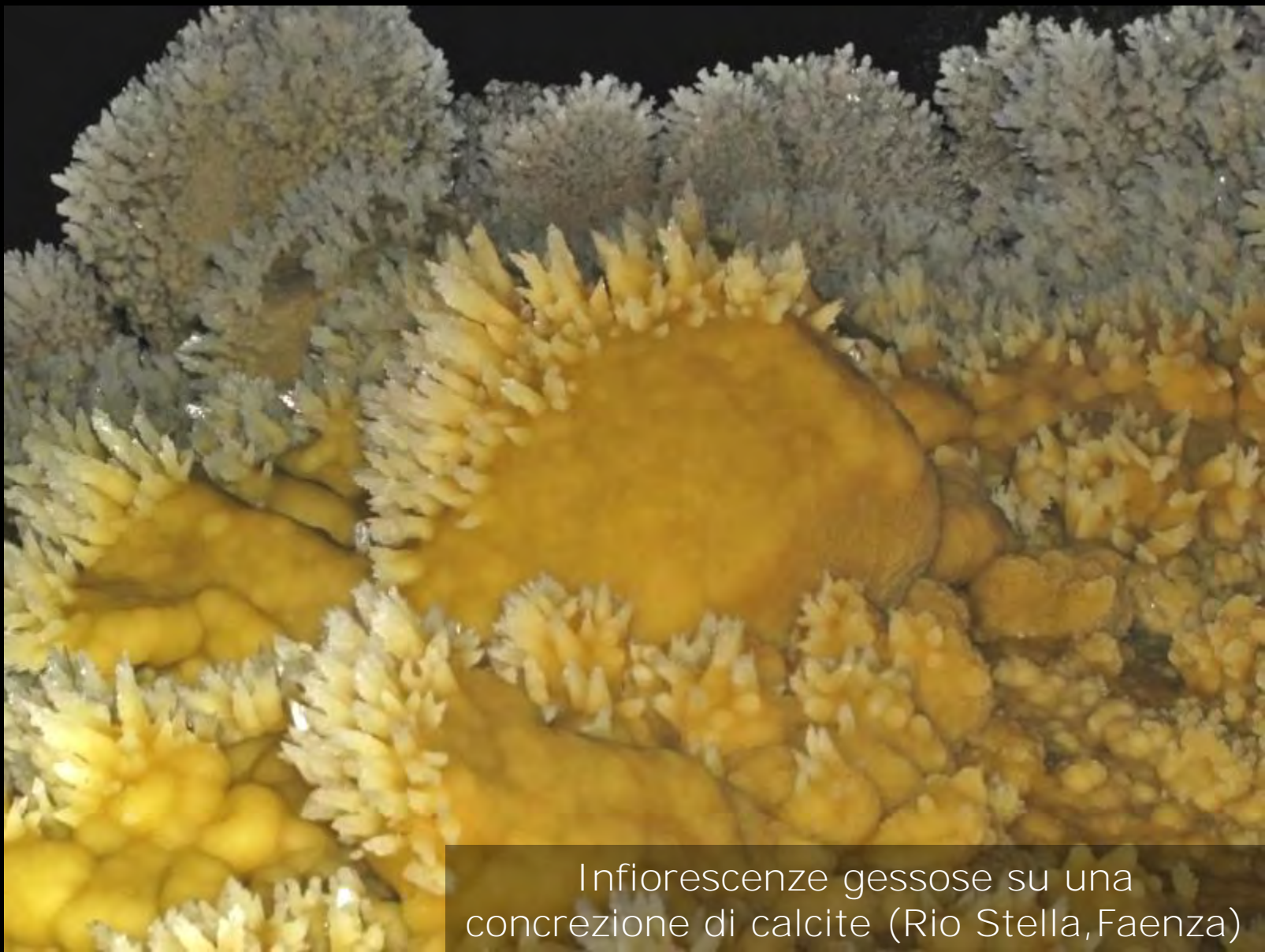
Negli ultimi anni alcuni di essi si sono dimostrati **sensibili indicatori** delle variazioni avvenute nell'ambiente carsico





# CALCITE - GESSO & VARIAZIONI CLIMATICHE

I sistemi carsici in gesso forniscono i migliori esempi di tali cambiamenti



Infiorescenze gessose su una concrezione di calcite (Rio Stella, Faenza)

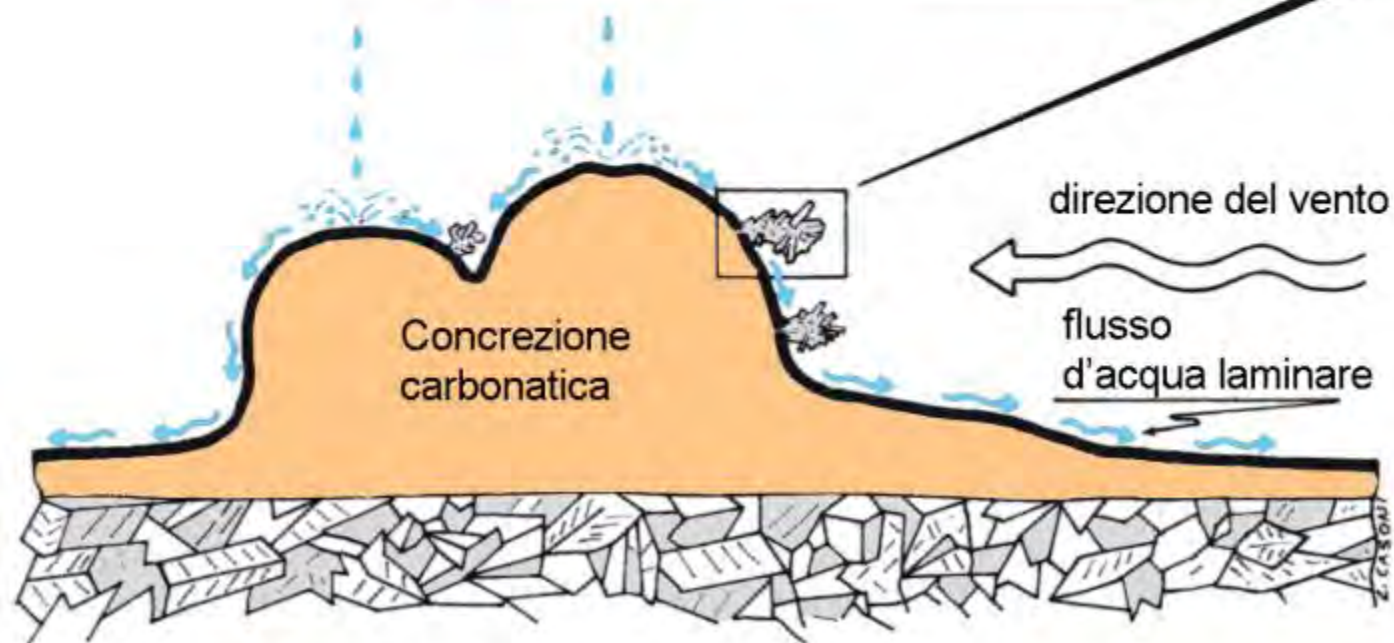


Il tipo di deposito è **totalmente controllato** dal clima

la **DIFFUSIONE CO<sub>2</sub>** controlla la deposizione di calcite

**L'EVAPORAZIONE** controlla la deposizione del gesso

**La Calcite** prevale nei climi umidi.  
**Il Gesso** prevale nei climi secchi



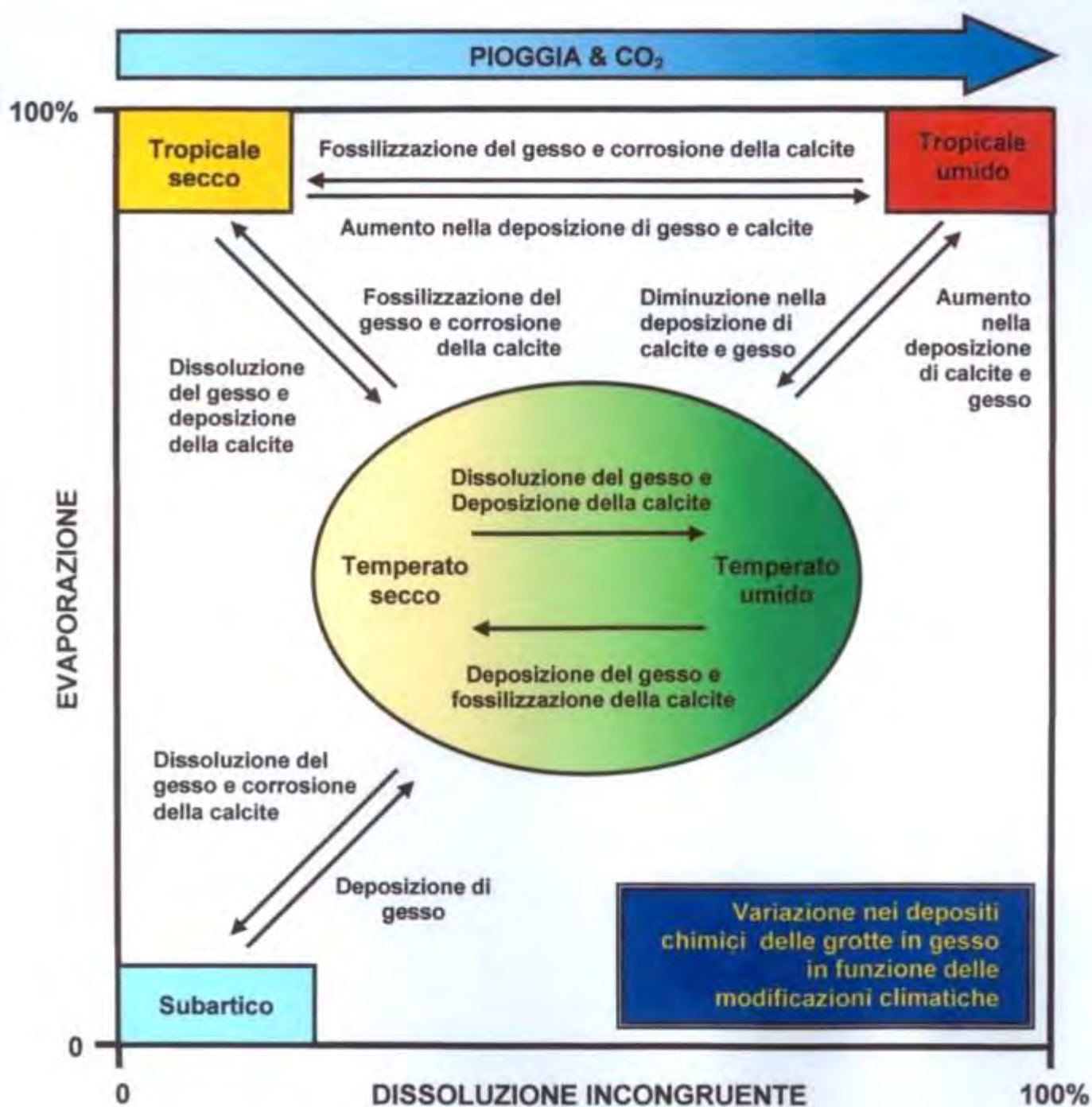
Una **variazione climatica** può causare la variazione progressiva, o anche improvvisa, del **deposito chimico** che si forma in una grotta in gesso



Una galleria con il pavimento di calcite in una grotta ghiacciata di gesso a Pinega (Russia del Nord)

Gesso che si accresce sopra una colata di calcite nella grotta di gesso di Entella (Sicilia)



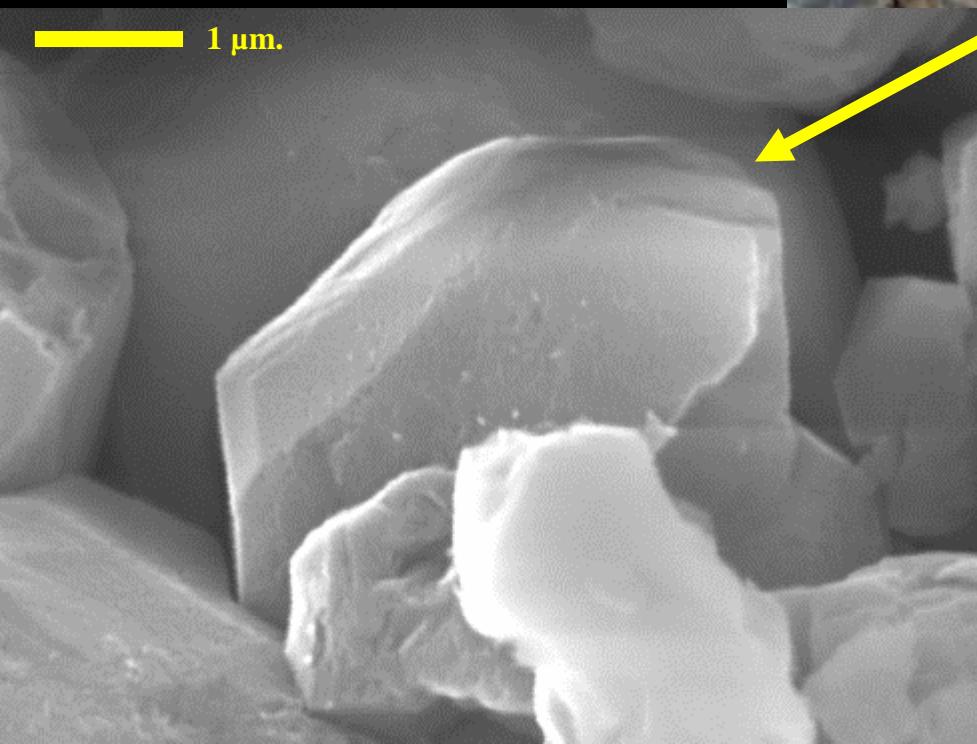


# LA RISPOSTA DEI SISTEMI CARSIICI IN GESSO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Altri minerali di grotta  
(quali la **dolomite**) hanno  
dimostrato di essere  
**registratori sensibili e  
veloci** delle variazioni del  
microclima delle grotte in  
gesso indotte dal **global  
change**



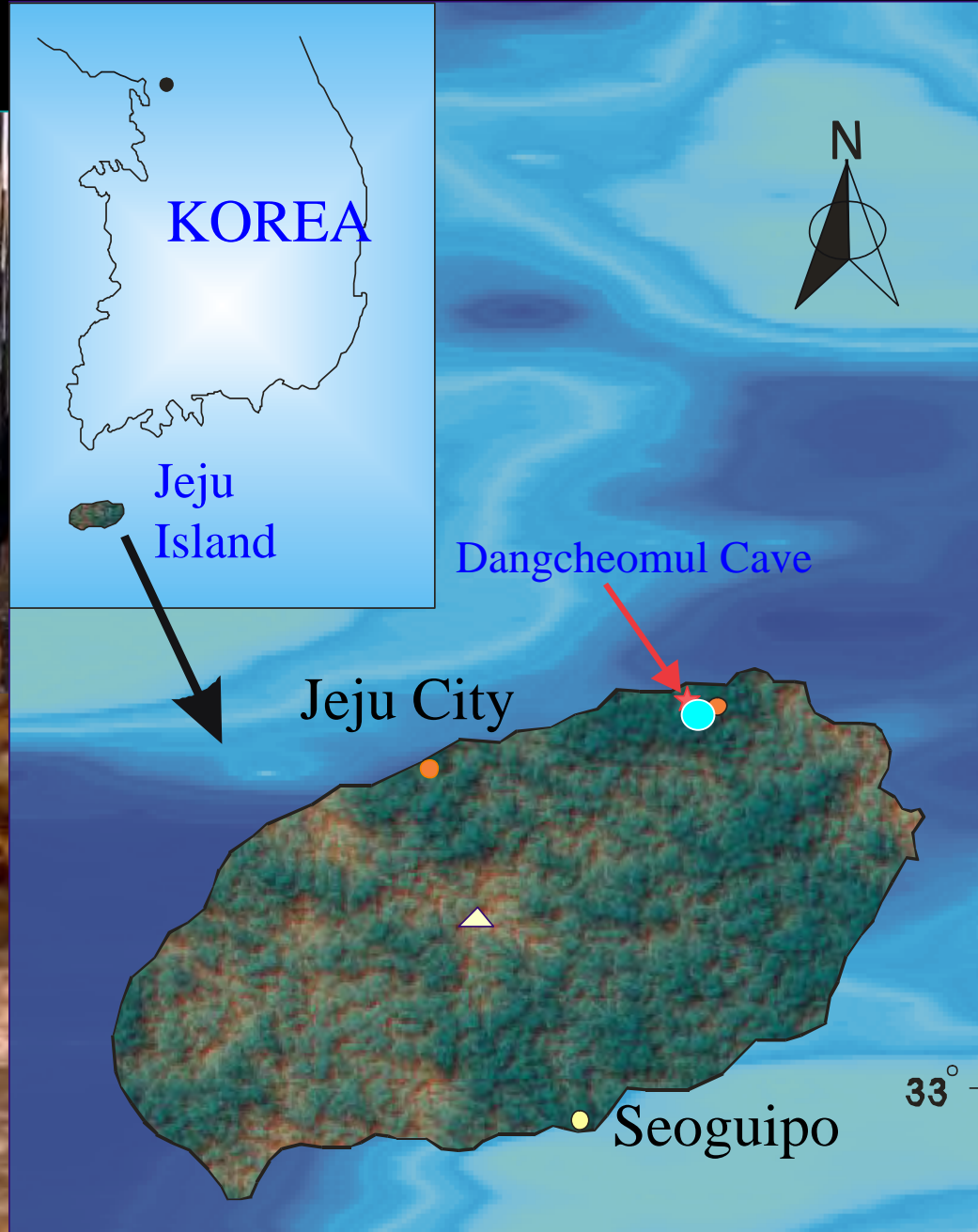
1  $\mu\text{m}$ .



**moonmilk dolomitico che si è formato in  
Spipola dopo un periodo di siccità di 90  
giorni**



# GROTTE LAVICHE CON CONCREZIONAMENTO CALCAREO



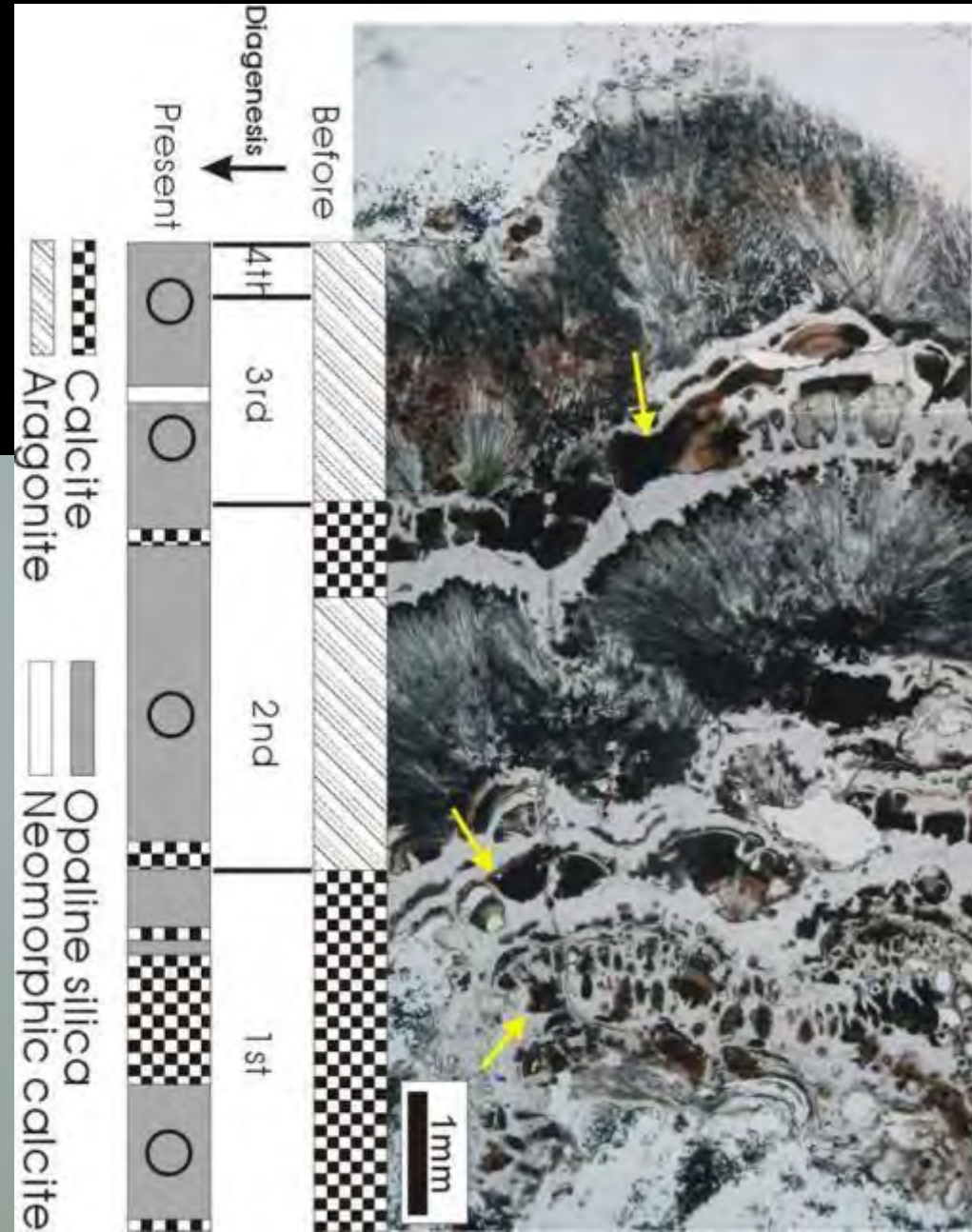
# SPELEOTEMI & REGIME DELLE PIOGGE

Dati da analisi Mineralogiche

NELLE GROTTA LAVICHE KOREANE

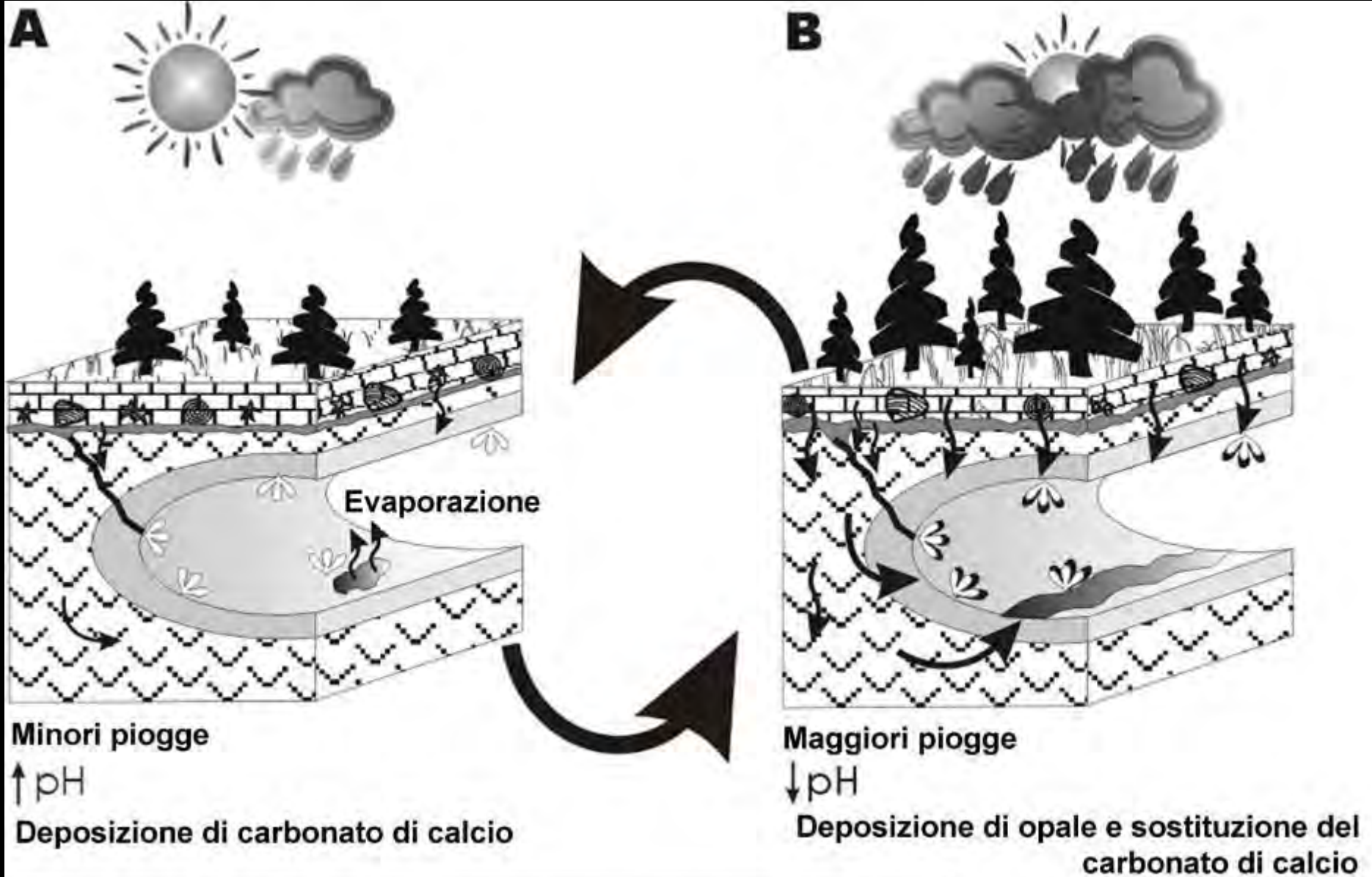
La Calcite prevale nei periodi secchi

L'Opale prevale nei periodi piovosi





# RICOSTRUZIONE PALEOCLIMATICA



sedimenti calcarei

orizzonte basaltico alterato

Basalto

# SPELEOTEMI & PALEOAMBIENTI

I materiali inglobati dagli speleotemi sono fonti di dati **paleoambientali e paleoclimatici**

Attraverso studi:

SULLE INCLUSIONI FLUIDE

SULLE INCLUSIONI SOLIDE:

→ pollini

→ minerali di neoformazione





# LE INCLUSIONI FLUIDE

E' parte dell'acqua da cui si sono formati gli speleotemi, che è rimasta intrappolata al loro interno, spesso sono **bifasiche** ( acqua e gas)



Cueva de las Espadas (Naica, Mexico)

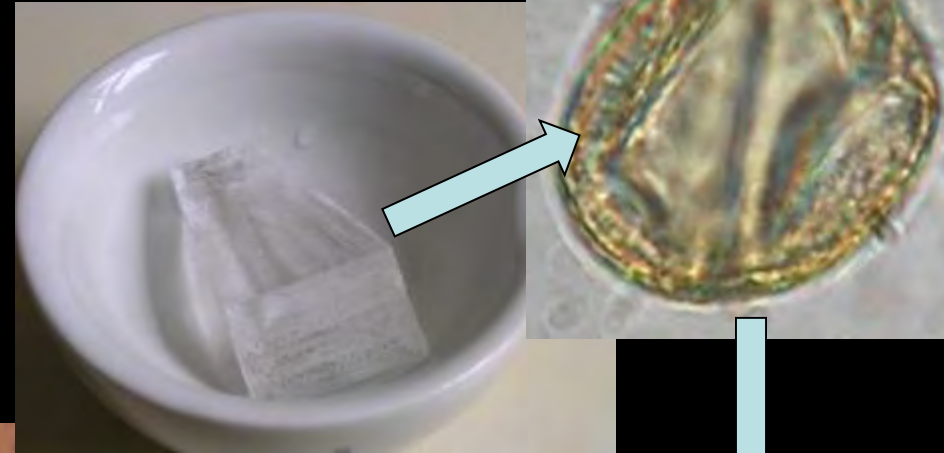
1 cm

*La loro composizione isotopica fornisce dati sul clima nella zona di ricarica*

*Mentre la loro chimica permette di definire l'evoluzione idrologica dell'acquifero*

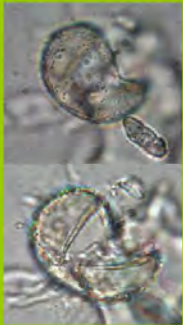
# POLLINI & AMBIENTI

Lo studio dei **pollini** eventualmente intrappolati ci dà informazioni sulla **vegetazione** di superficie e quindi dei **climi esistenti nell'area** quando gli speleotemi erano in formazione



sample A State of preservation

Most pollen has a good state of preservation



*Taxus*



*Pinus*



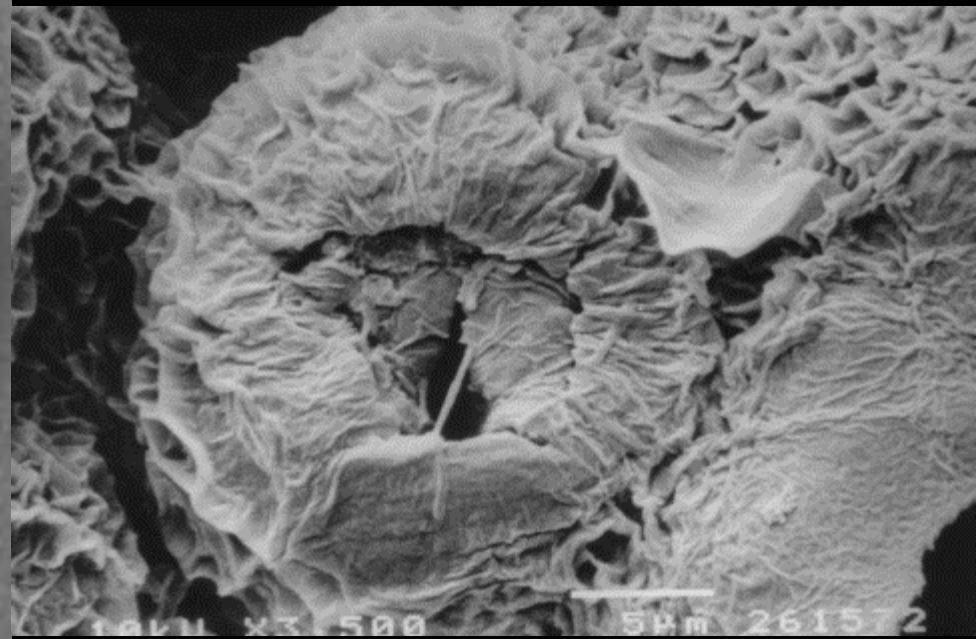
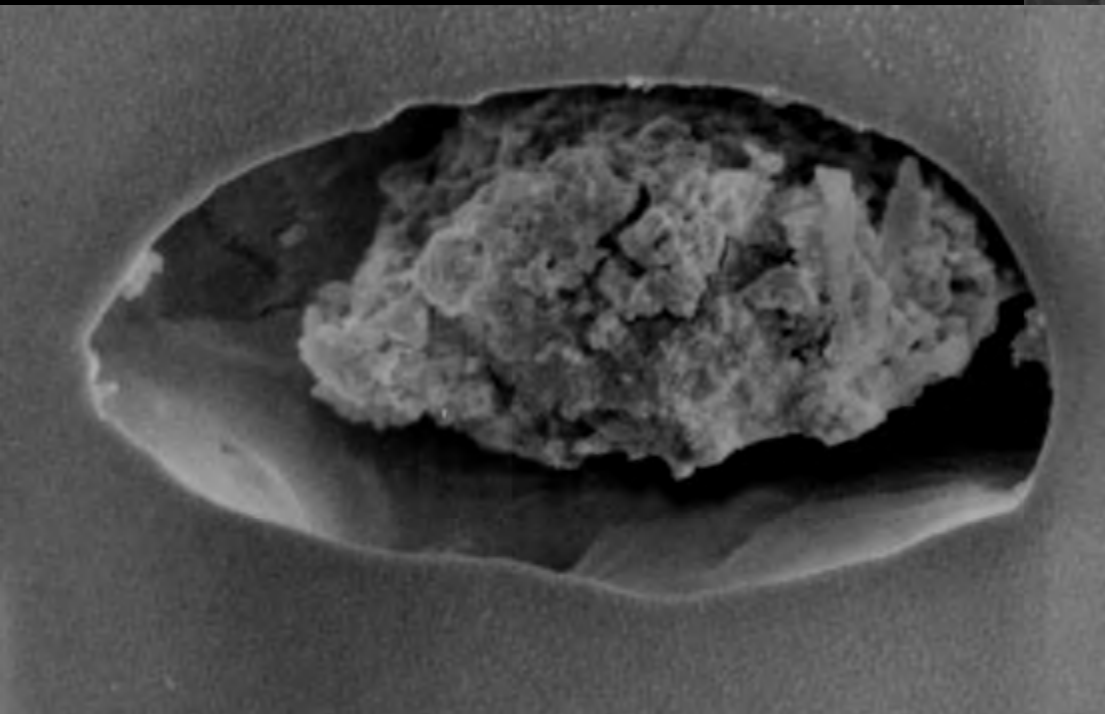
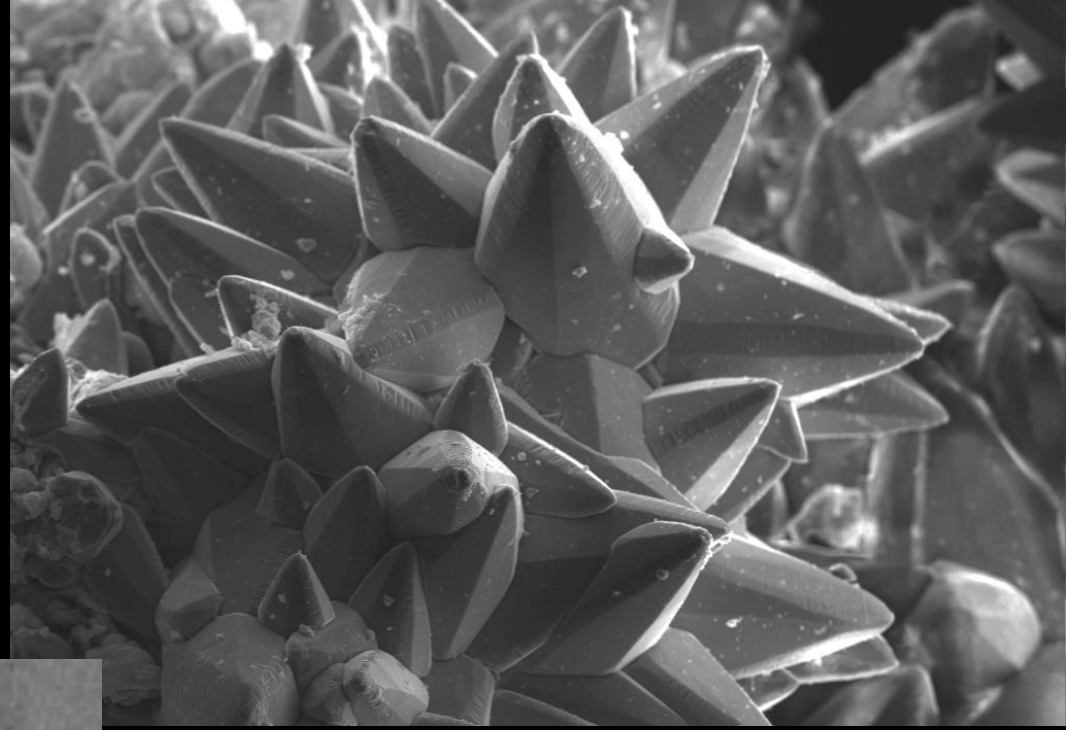
Il primo polline estratto da un cristallo della Cueva de los Cristales Naica (Messico)

La presenza di ***Quercus garryana***, ***Lithocarpus densiflora***, ***Taxus***, ***Plantago***, ***Poaceae*** e ***Lycopodium***, dimostra che circa 35.000 anni addietro il clima di Naica era analogo a quello attuale di San Francisco (circa 1500 km più a Nord)



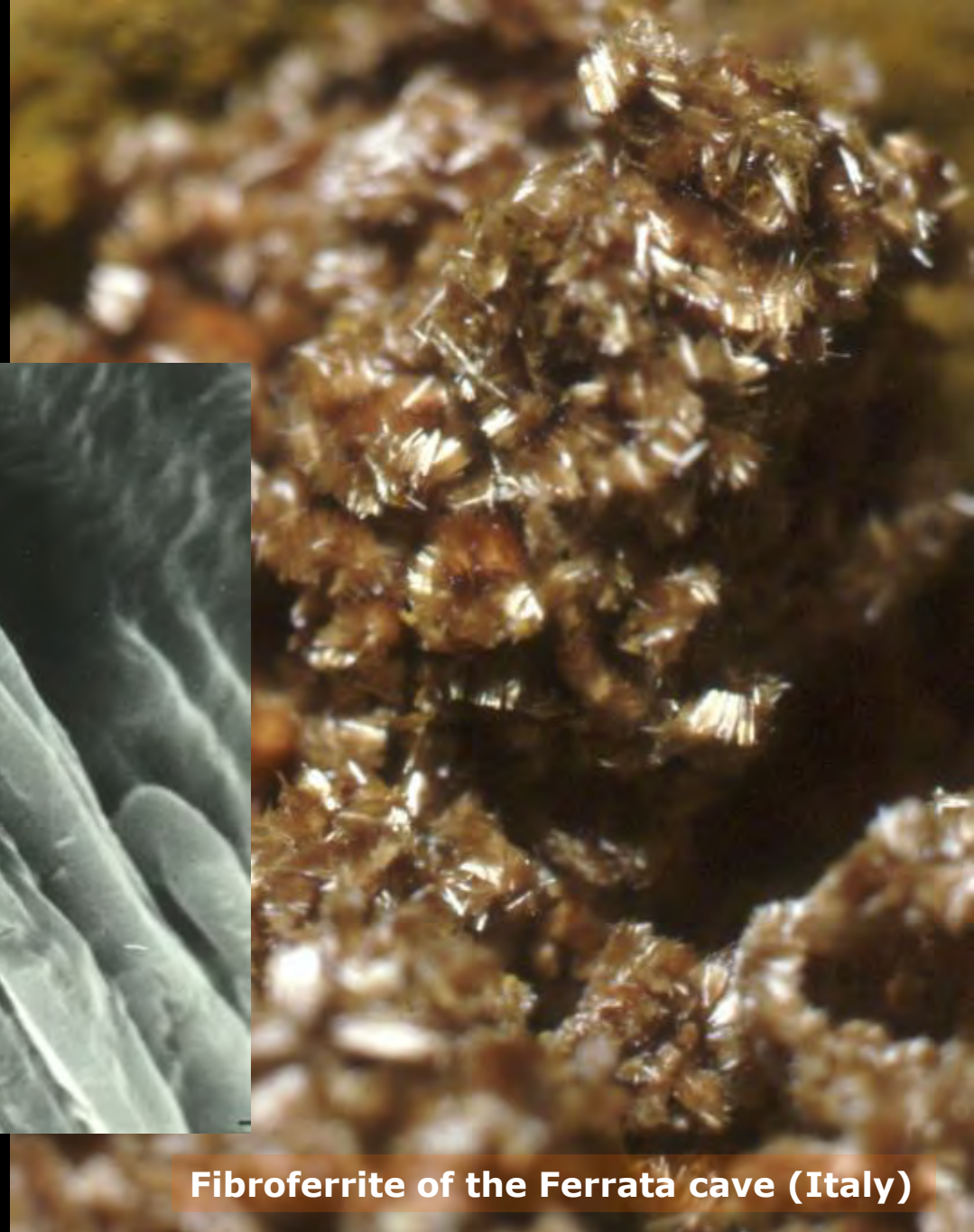
# INCLUSIONI SOLIDE & PALEOAMBIENTI

I minerali di neoformazione definiscono **l'ambiente geochimico** al momento della loro deposizione



# CHIMICA DELLE ACQUE DI PERCOLAZIONE E MINERALI DI GROTTA

Le grotte sono  
normalmente  
ambienti  
tamponati,  
comunque in  
alcuni  
particolari casi  
ambienti  
fortemente  
acidi ( $\text{pH} < 1$ )  
possono  
essere  
osservati in  
grotte  
calcaree



**Fibroferrite of the Ferrata cave (Italy)**



# GESSO-ZOLFO & RICOSTRUZIONI PALEOAMBIENTALI

Il Gesso è il prodotto normale della reazione tra l'acido solforico sul calcare, però in alcuni casi si osservano grandi speleotemi di zolfo con l'interno costituito da gesso



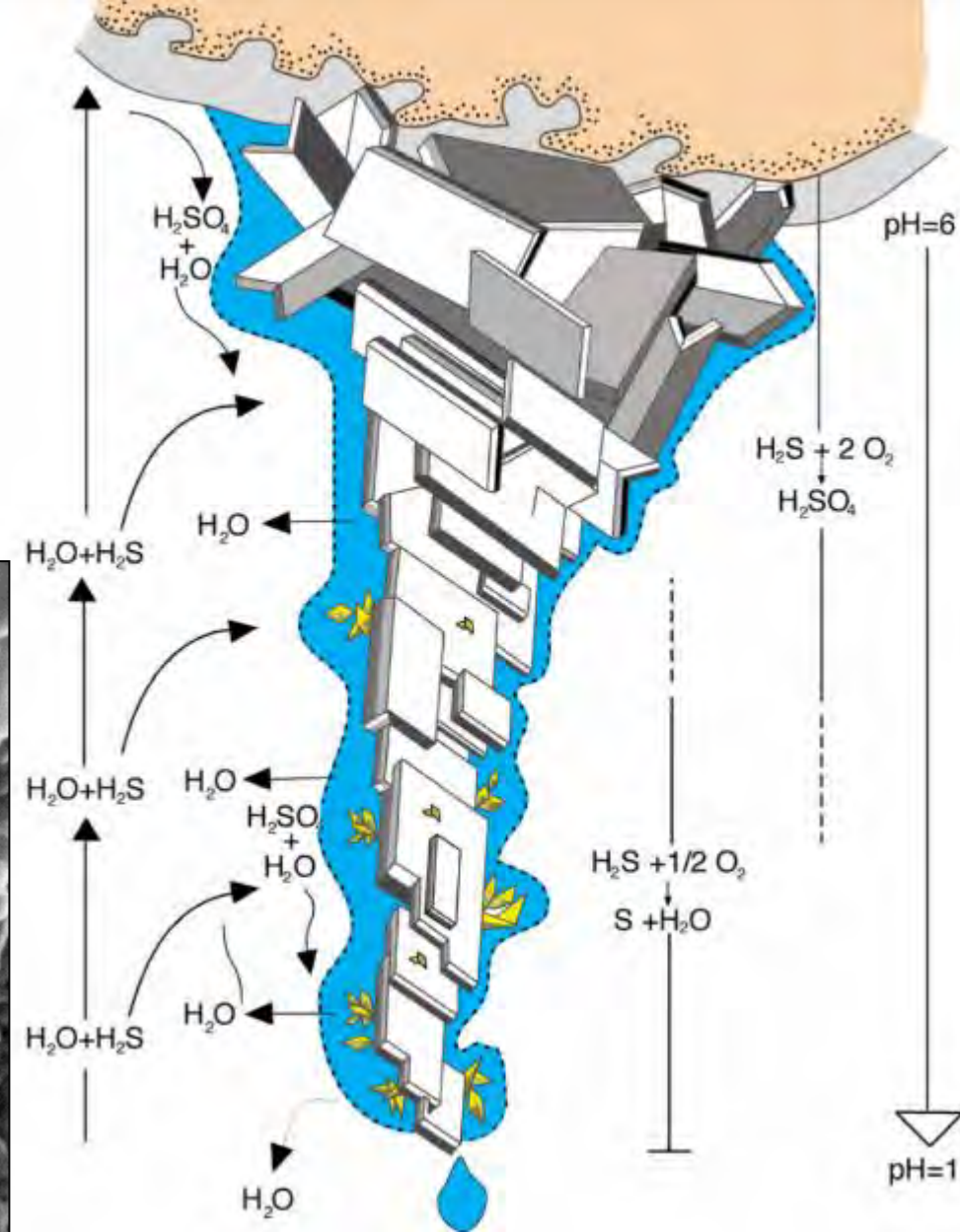
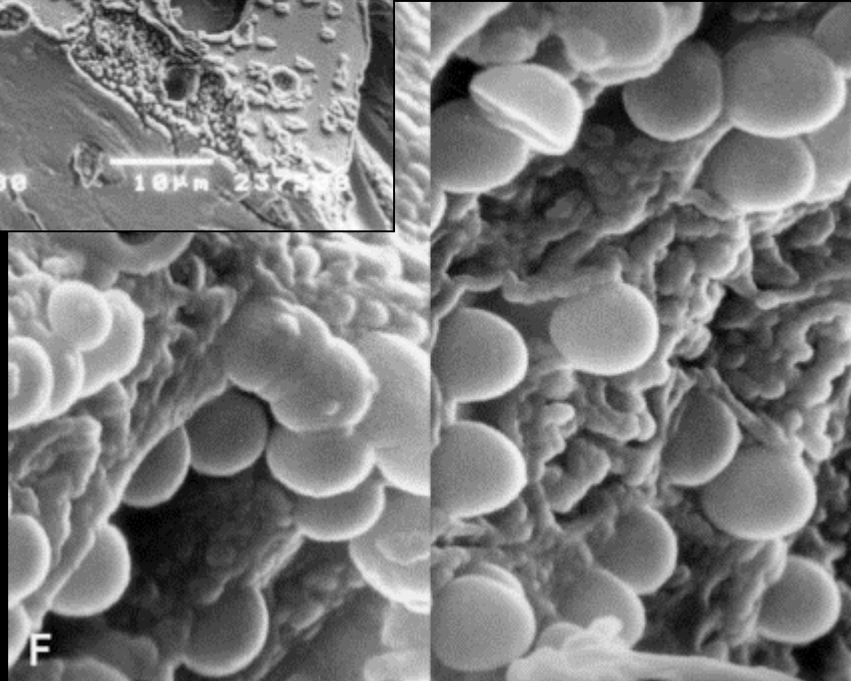
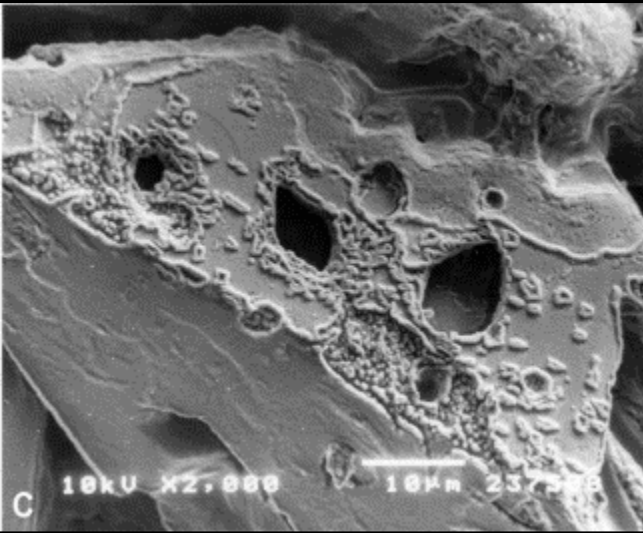
Grotta di Pulpì ( Spagna)



Grotta di Cala Fetente (Italia)



La deposizione di zolfo sul gesso è indotta dalla presenza di **miro-organismi**



Ma è anche sempre controllata dalla **quantità di  $\text{H}_2\text{S}$**  nelle acque affioranti



La presenza di un deposito di zolfo **all'interno** di una grotta è la conseguenza di condizioni (paleo-)ambientali non comuni  
consequence, che si possono schematizzare come:

→ Concentrazione molto alta di  $H_2S$

→ Condensazione molto veloce

→ pH molto basso

Questo accade normalmente **molto vicino** alle scaturigini della acque connate e/o termali



# DIMENSIONE DEI CRISTALLI & PALEOAMBIENTI

Raramente l'ambiente di grotta permette lo sviluppo di **grandi cristalli**



Cueva de los Cristales (Miniera di Naica, Mexico)

Perché questo avvenga bisogna che vi siano particolari condizioni al contorno quali:

**Bassissima sovrasaturazione**

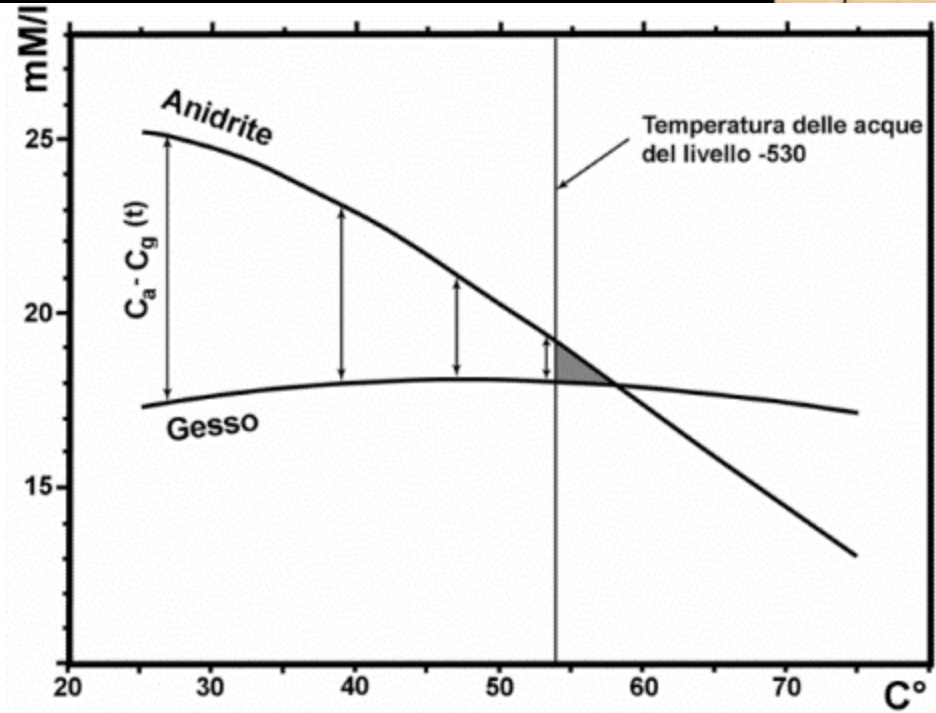
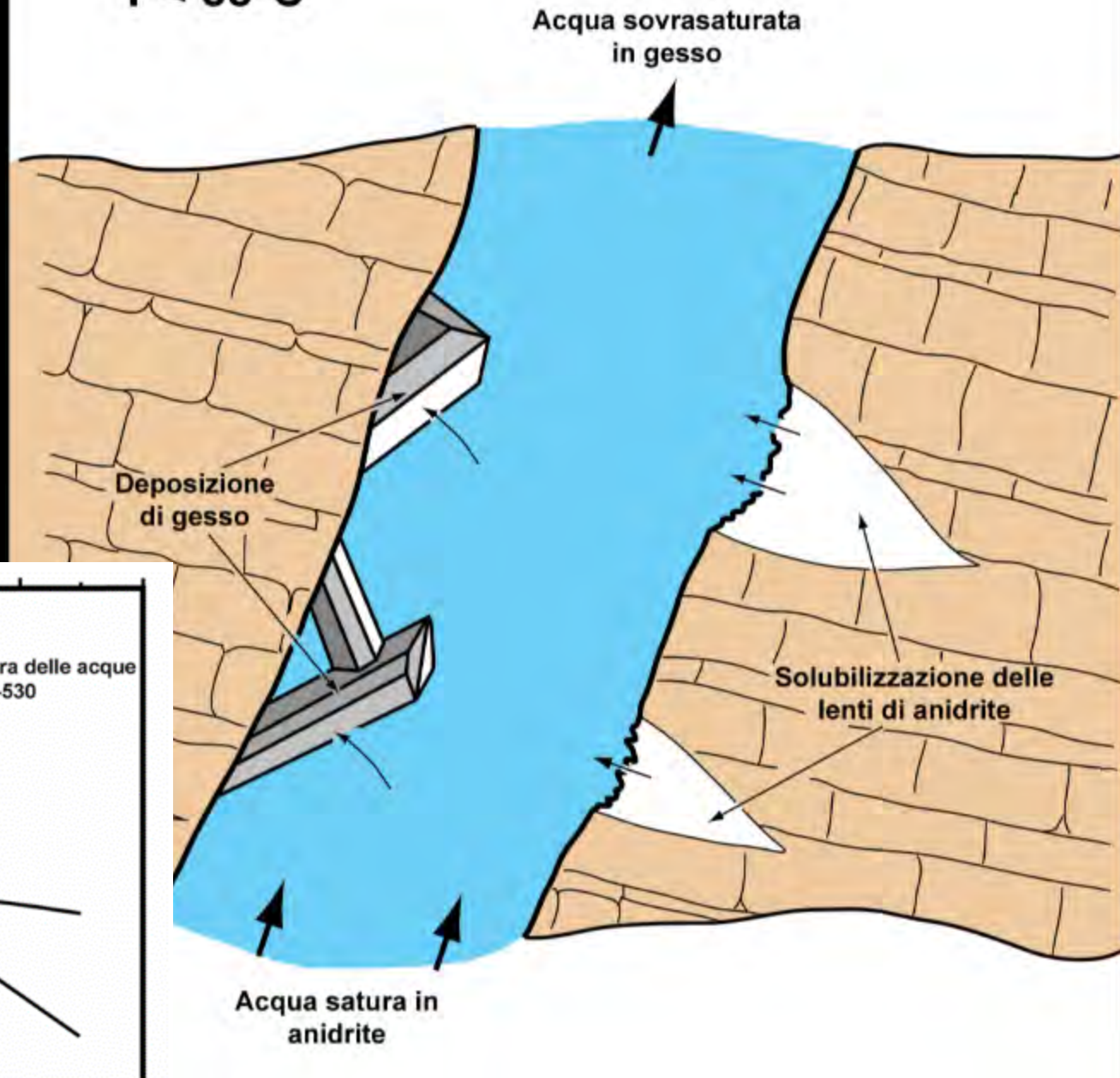
Superficie piezometrica stabile

**Costanza di tutti i parametri su un lungo periodo di tempo**



Il meccanismo genetico più attivo si basa sulla differenza di solubilità tra gesso e anidrite a temperatura costante

$T < 58^{\circ}\text{C}$



# MINERALI E STADI EVOLUTIVI

Nella Cueva de las Velas (Naica) lo studio dei minerali depositatisi sotto i cristalli di gesso giganti, ha permesso di definirne la sequenza deposizionale

Sono stati identificati oltre 15 minerali, alcuni dei quali nuovi per **l'ambiente di grotta**

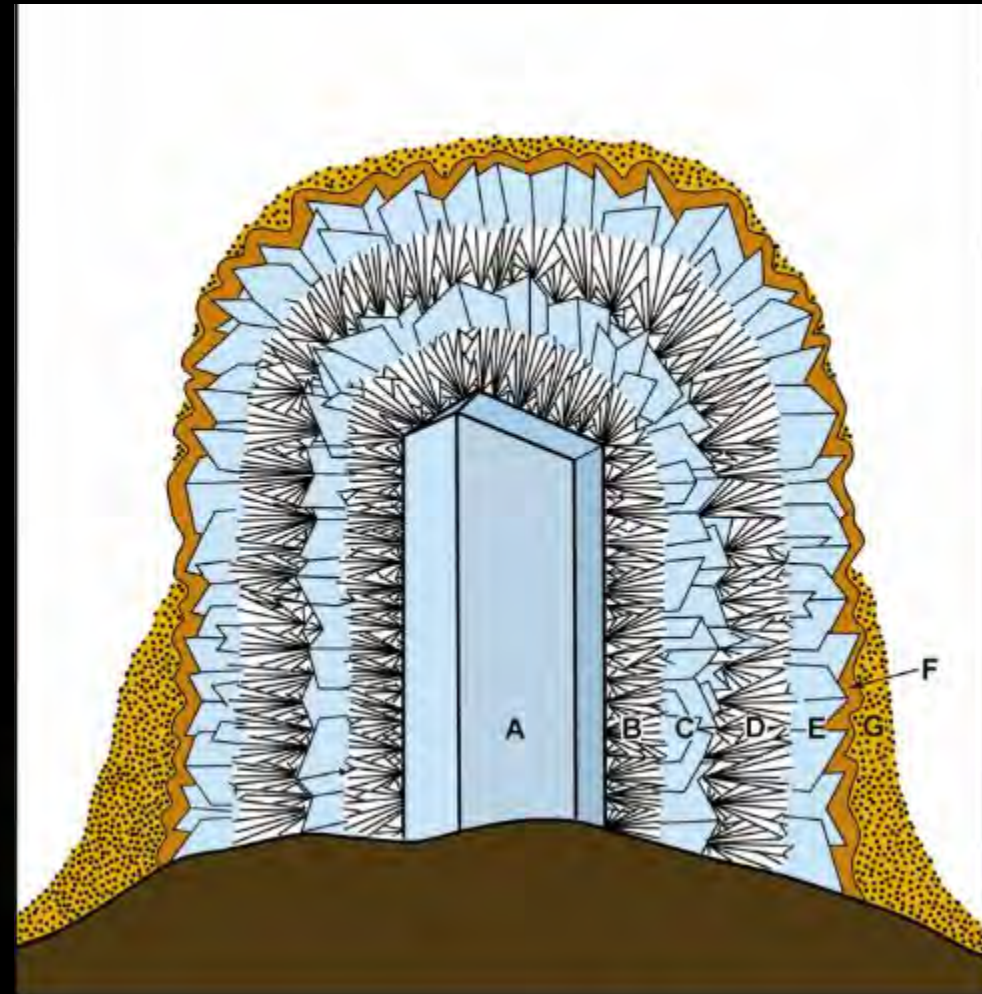


HV	Mag	Det	WD	Spot	100.0µm
20.0 kV	1500x	SSD	10.9 mm	3.5	Queva de las Espadas

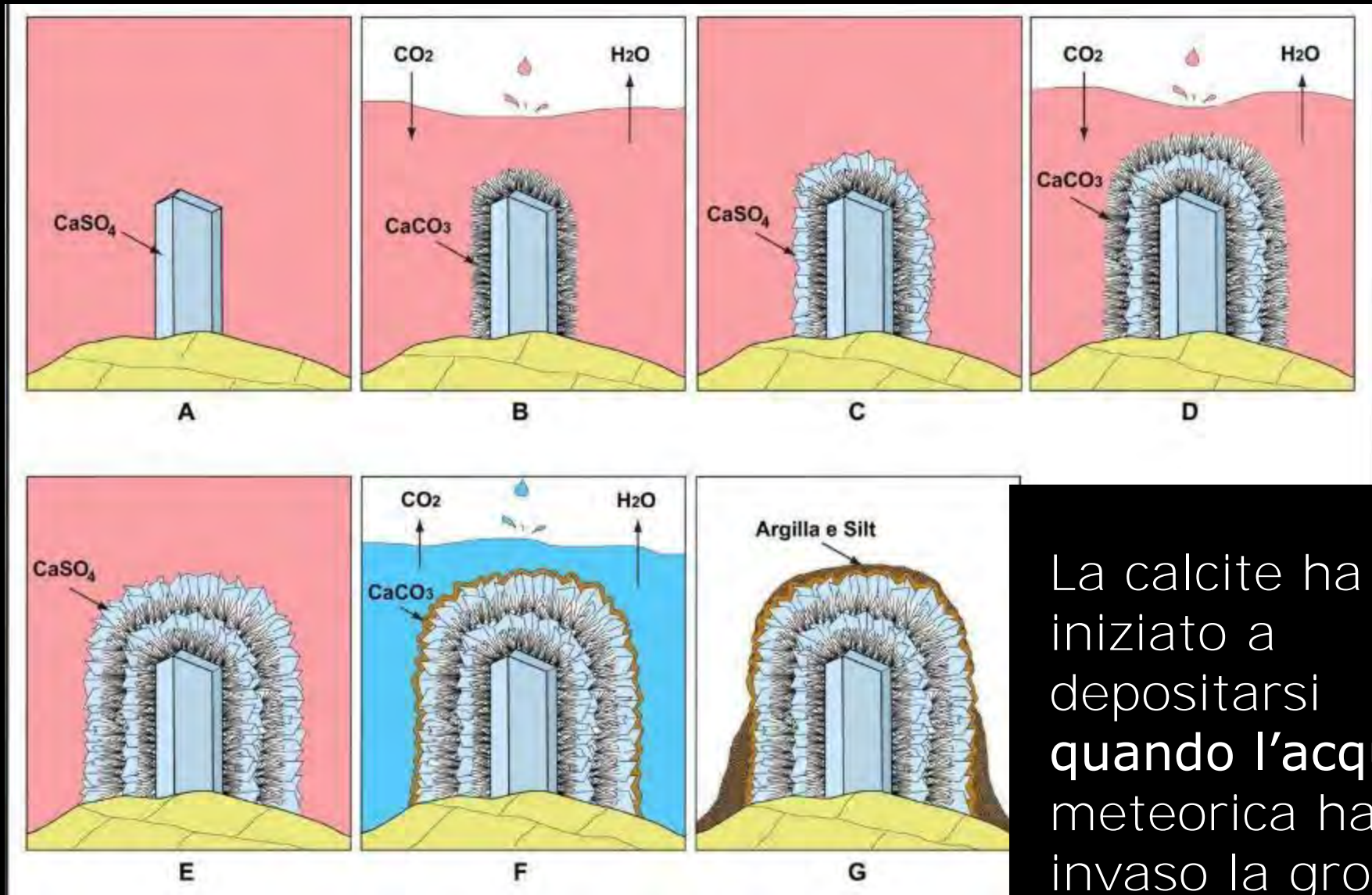


# MINERALI E OSCILLAZIONE DELLA FALDA FREATICA

Nel laghetto fossile della Cueva de las Espadas vi sono alcune stalagmiti che presentano un'alternanza di bande gesso e di aragonite



L'aragonite si depositava quando la cavità non era completamente allagata con acqua termale

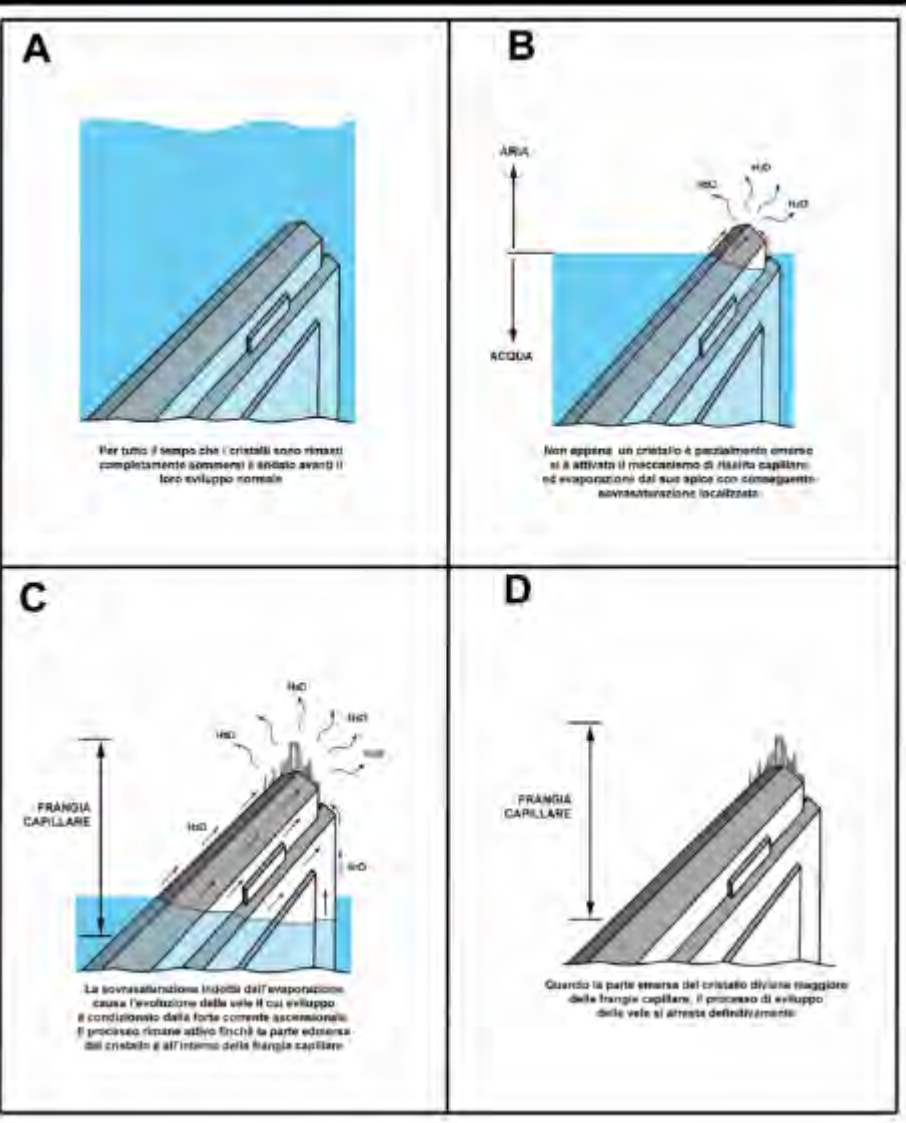


La calcite ha iniziato a depositarsi quando l'acqua meteorica ha invaso la grotta



# IMPATTO ANTROPICO E FORMA CRISTALLINA

Lo sviluppo di queste particolarissime forme cristalline è dovuta all'eduazione mineraria



Le vele della Grotta delle Vele (Naica)

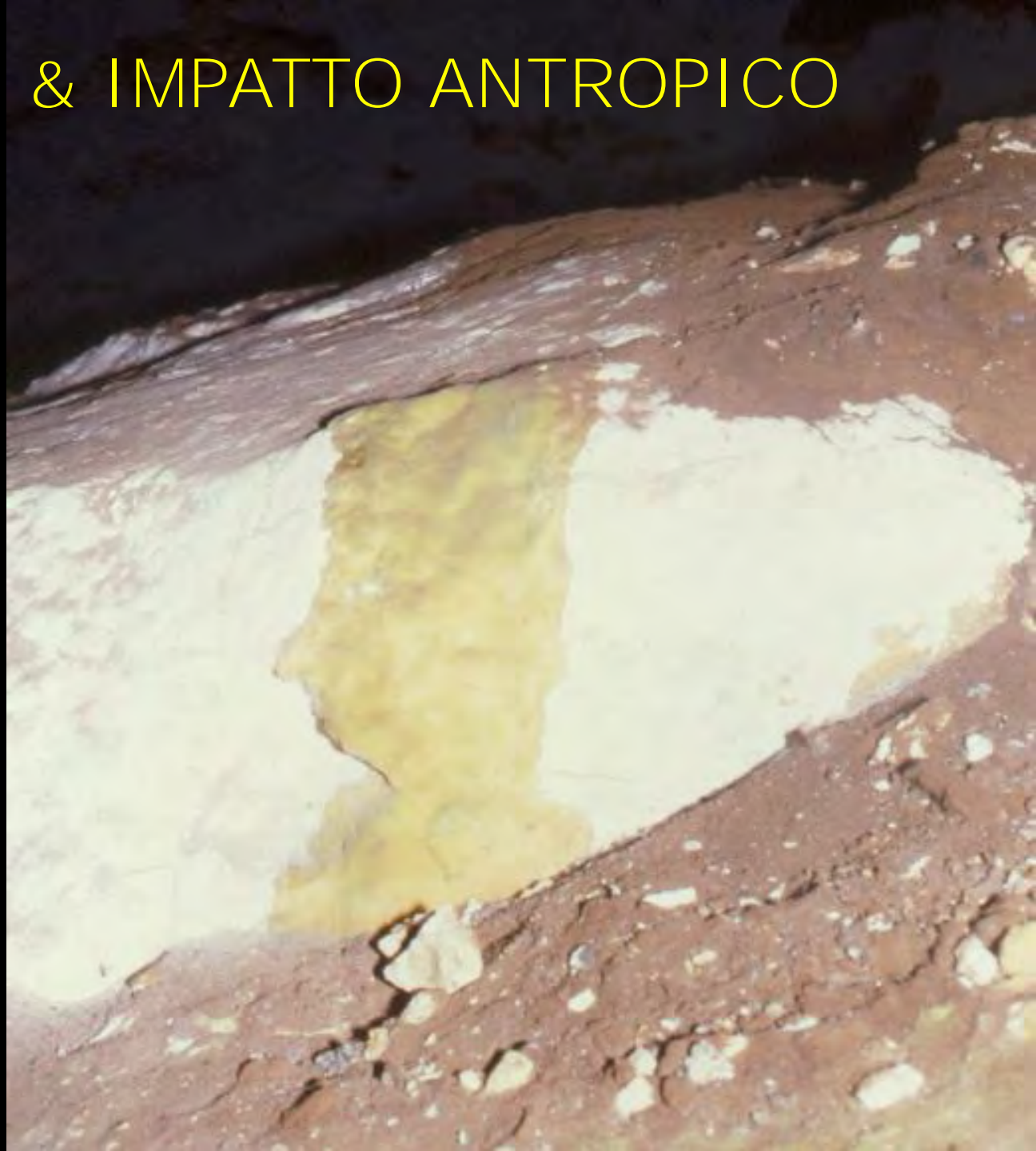
# SPELEOTEMI & IMPATTO ANTROPICO

Concrezione di  
**MELLITE**



Dalla Grotta Romanelli  
(Puglia, Italia)

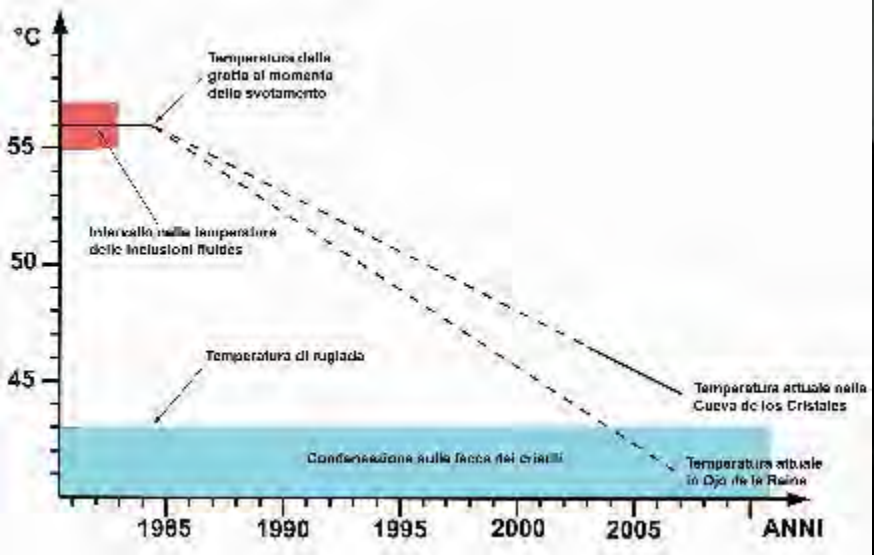
La Mellite si è  
svilupata dove i  
nostri antenati  
cuocevano i loro cibi  
su un letto di terra  
rossa





# MINERALI E MICROCLIMA

A Naica il raffreddamento dei cristalli di gesso ha innescato la condensazione che, attualmente, avviene essenzialmente lungo i piani di sfaldamento principali dando luogo a concrezioni di calcite



# SPELEOTEMI & TURISMO

A volte la **variazione** dei parametri ambientali causata dalla turisticizzazione è così elevata da portare alla deposizione di **nuovi minerali**

Eccentriche di aragonite che si sono **sviluppate all'apice di una stalattite** monocristallina di calcite a seguito del posizionamento di una potente lampada





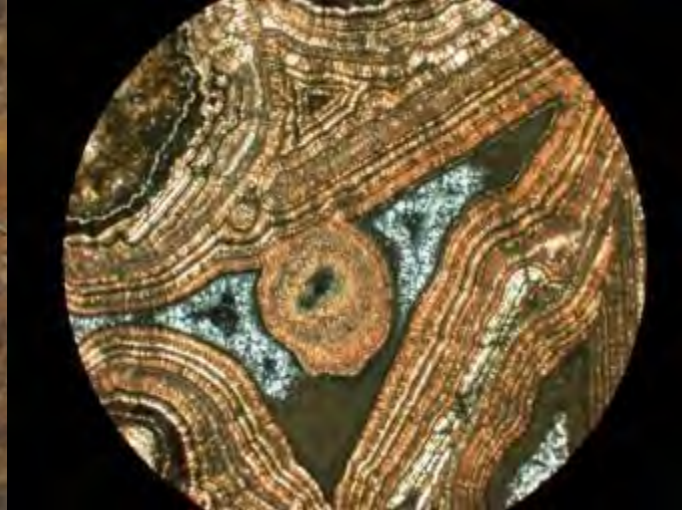
# IL FUTURO PROSSIMO



In grotta vi sono ancora molti ambienti minerogenetici che non siamo ancora in grado di leggere dal punto di vista paleo-ambientale

Il più complesso di tutti è il guano in cui possono svilupparsi decine di minerali con campo di stabilità molto ristretto



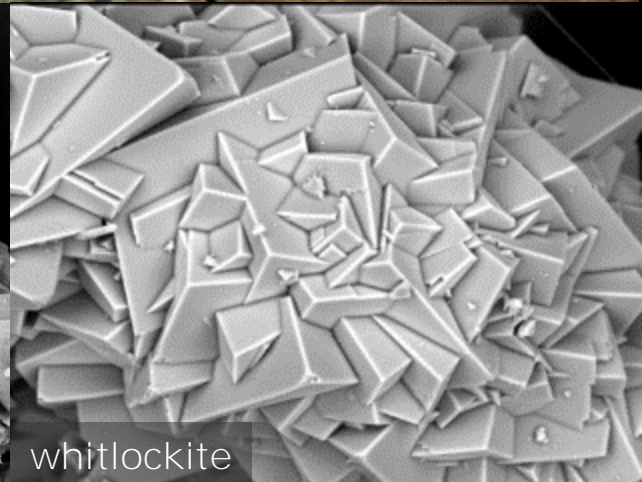


Grande concrezione fosfatica nella Rossillo cave (Mexico)

Quando sapremo  
"leggere" le  
concrezioni di fosfati  
potremo ricostruire  
in dettaglio i  
paleoambienti in un  
arco temporale  
anche lungo



kingsmountite



whitlockite



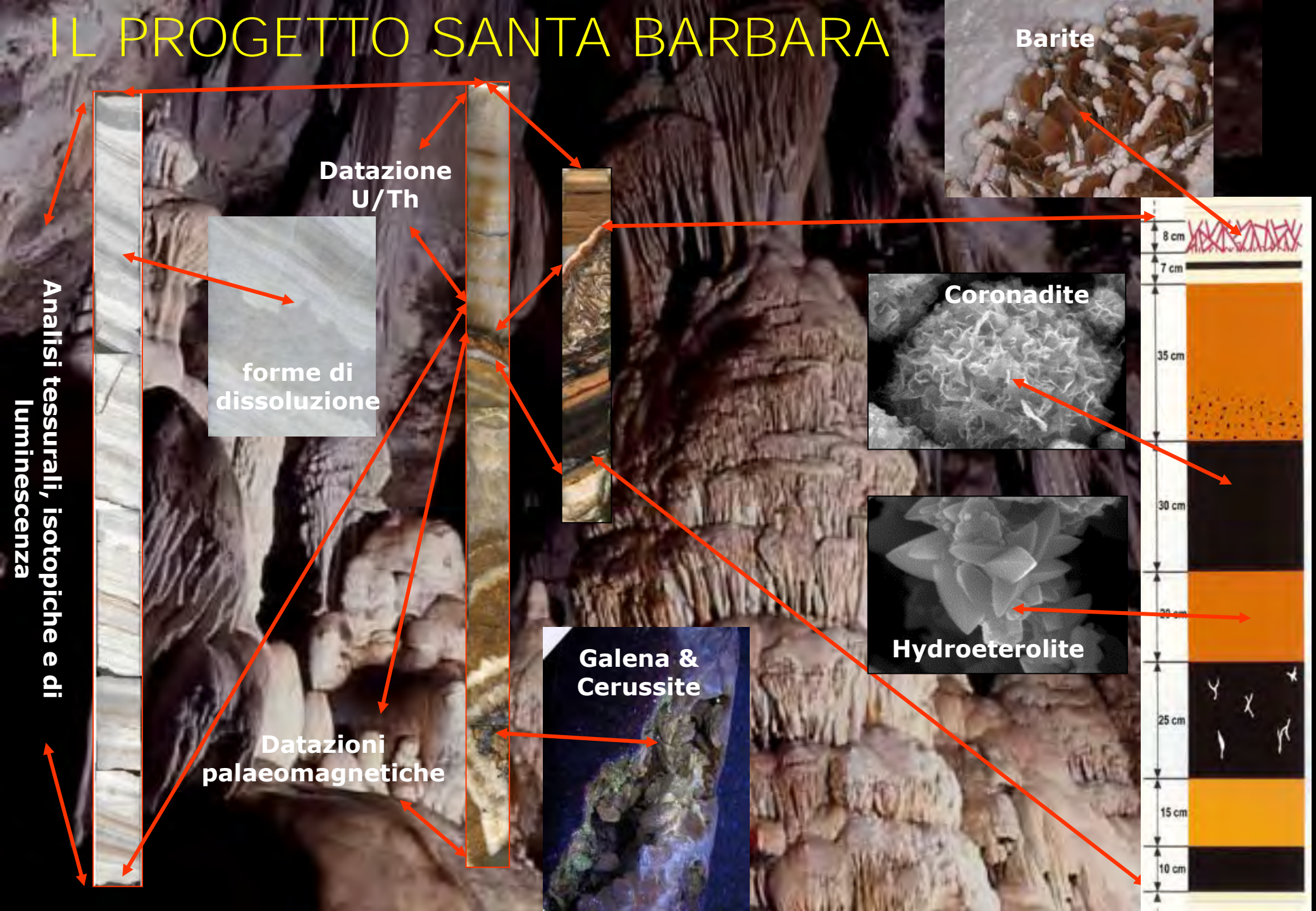
# IL PASSATO PIU' REMOTO

I depositi chimici di grotta possono contenere dati sulle variazioni ambientali su intervalli di **decine** o anche **centinaia** di milioni di anni





# IL PROGETTO SANTA BARBARA



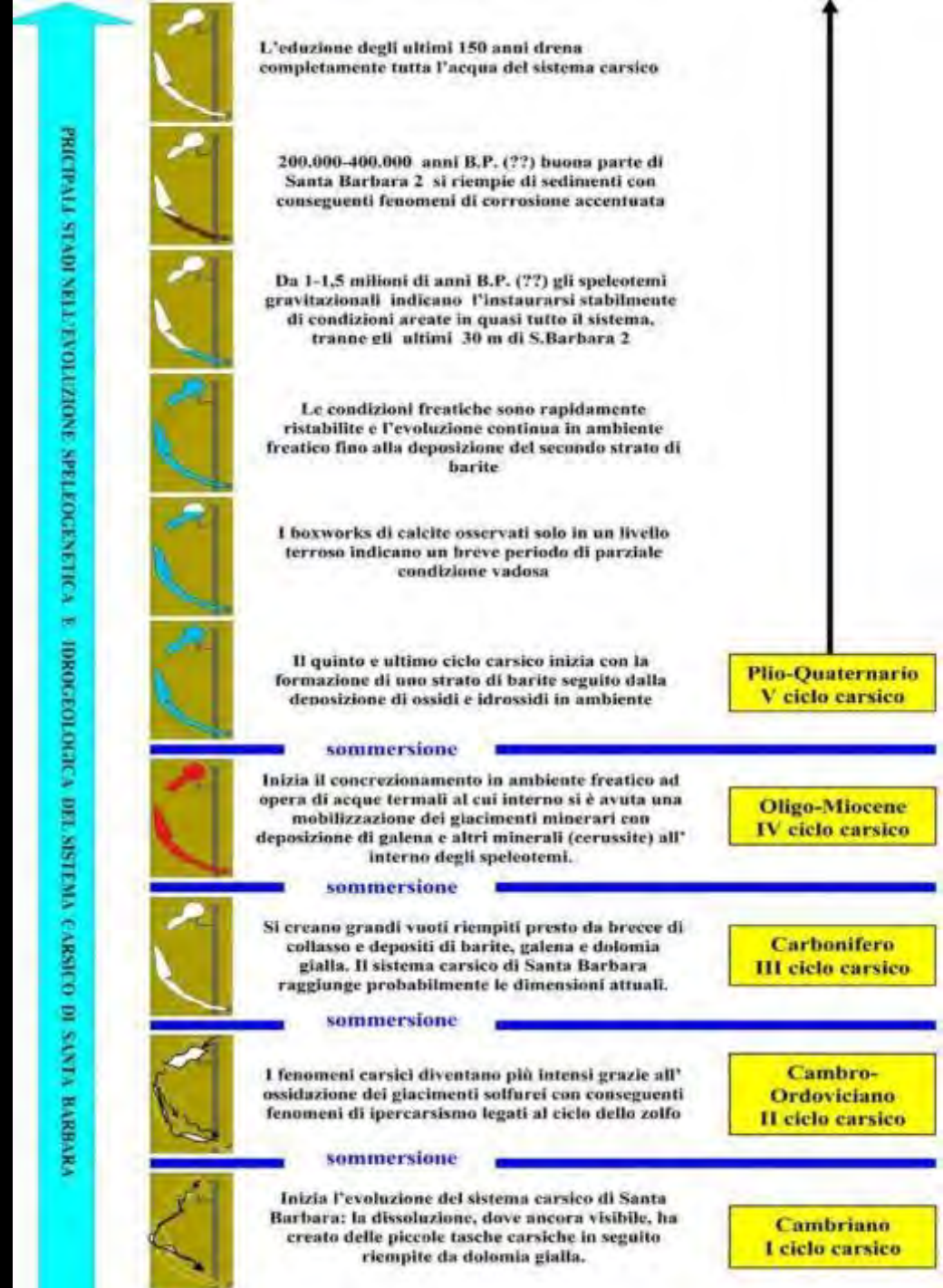


# GLI STADI EVOLUTIVI

La ricerca è ancora in atto ma è già stato possibile ottenere risultati interessanti

Si sono ricostruiti i 5 principali cicli carsici che coprono un intervallo di tempo dal Cambriano ai giorni nostri

Per l'ultimo ciclo è stato possibile anche operare una ulteriore suddivisione in 5 stadi successivi



# CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Negli ultimi anni le grotte si sono  
dimostrate essere

Tra i più interessanti e dettagliati

**ARCHIVI GEOLOGICO-  
AMBIENTALI**

Nel prossimo futuro

**l'importanza degli speleotemi**

**aumenterà moltissimo** in

campi come la

biomineralogia, e come

**"marker" ambientali negli**

studi climatici, paleoclimatici

e paleosismici





# SALVAGUARDIA DEGLI SPELEOTEMI



*I depositi chimici appartengono alla grotta che li ospita e debbono pertanto rimanere al suo interno*

- nessun prelievo di materiale, anche se già rotto, per collezionismo o peggio commercio
- i prelievi a scopi scientifici devono essere comunque minimizzati in modo da non compromettere lo speleotema
- se lo studio vuol dire distruggere uno speleotema unico, la scelta deve essere quella di non studiarlo



# PER SAPERNE DI PIU'

HILL C., FORTI P. 1997 *Cave minerals of the World* Nat. Spel. Soc. 464 pp

BORSATO A., FORTI P. 2005 *Ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali da concrezioni di grotta*. Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica, 80 (2003), p.55-63

J. GUNN (ed.) 2004 *Encyclopedia of Caves and Cave Sciences*. Fitzroy Dearborn, New York, 902 pp



Centro Italiano di  
Documentazione  
Speleologica  
**Franco Anelli**  
[www.cds.speleo.it](http://www.cds.speleo.it)



