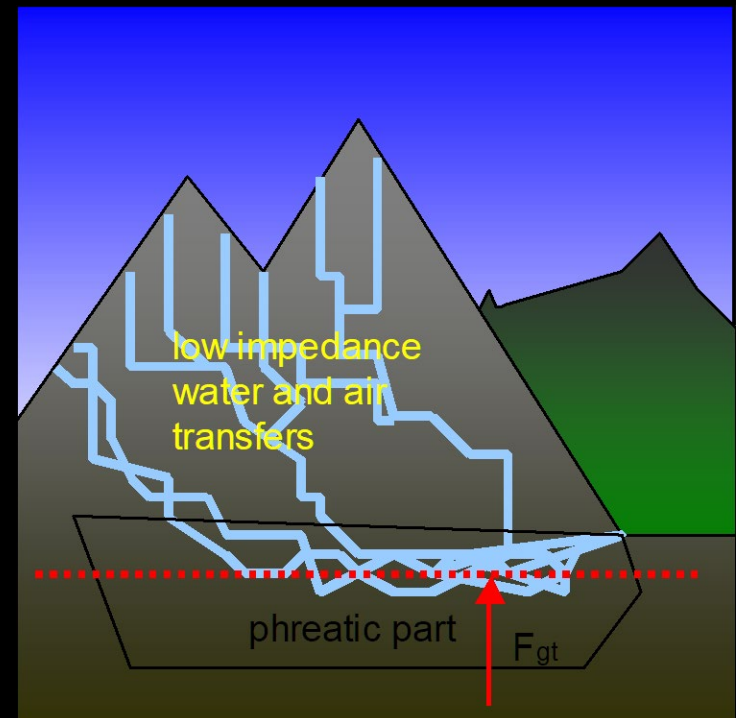


IL CALORE GEOTERMICO

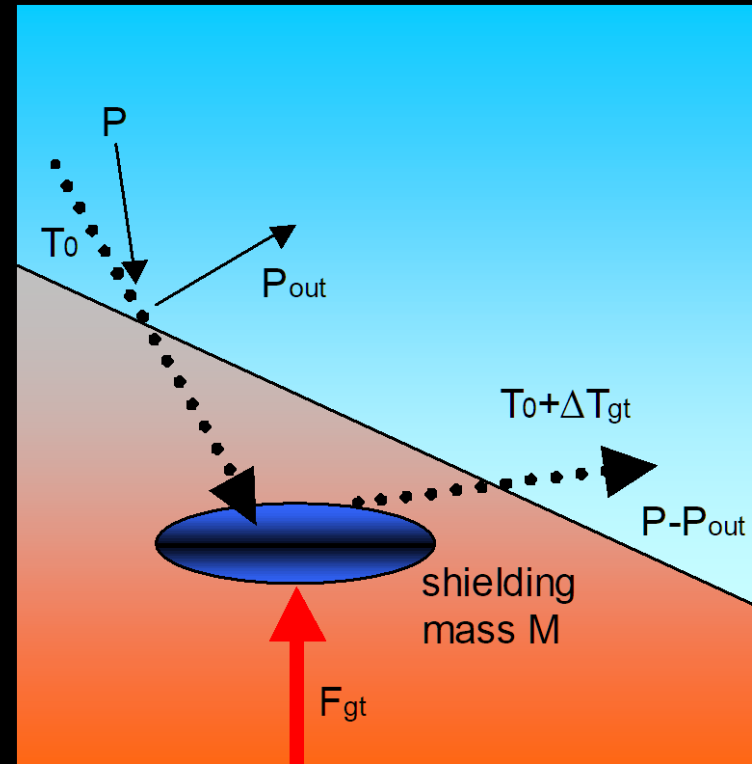
- Dalle profondità della Terra sale un flusso di energia termica di 0.06 W/m^2 .
- Nel tempo, rende ha reso calde tutte le rocce profonde.
 - Il flusso geotermico in grotta è impercettibile, perché le montagne in cui sono scavate sono all'equilibrio coi flussi d'acqua esterni, che le hanno raffreddate da gran tempo.
- Il flusso che sale viene intercettato dall'acquifero alla base del monte ed espulso alle sorgenti.



IL CALORE GEOTERMICO

- Ne risulta che fra il fondo grotta e la sorgente l'acqua viene scaldata di un ΔT_{gt} dato dalla formula sotto.
- P^* è l'infiltrazione.
- Nel carso alpino P^* si aggira su 1000 mm/a e quindi l'incremento di temperatura è intorno a 0.5°C .
- Non è molto, ma forse è misurabile.

$$\Delta T_{gt} = \frac{500}{P^*} [^\circ\text{C}]$$



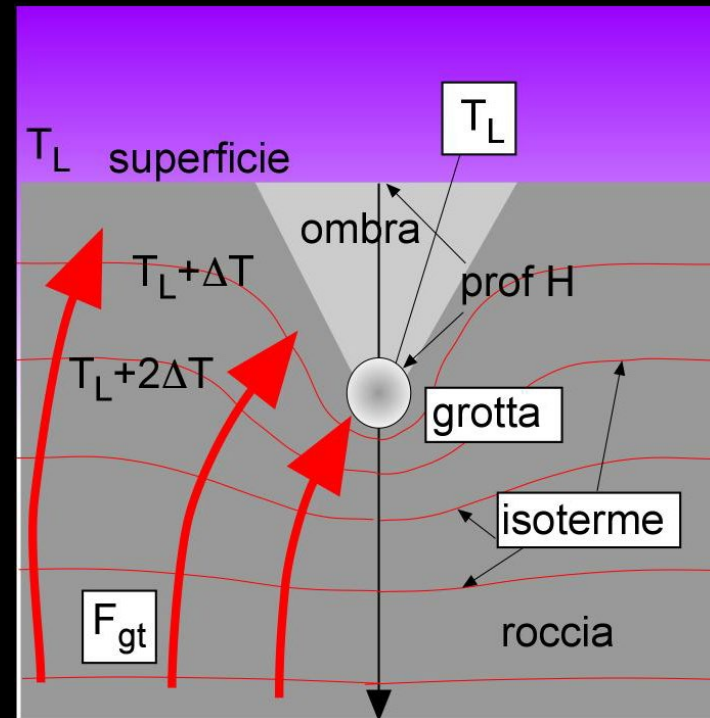
IL CALORE GEOTERMICO

- Ma è vero? L'idea di un acquifero piatto ed omogeneo che nelle profondità delle montagne carsiche schermi il flusso geotermico non è plausibile.
 - Sappiamo benissimo che l'acqua si sposta lungo una rete di gallerie o persino in singole condotte.



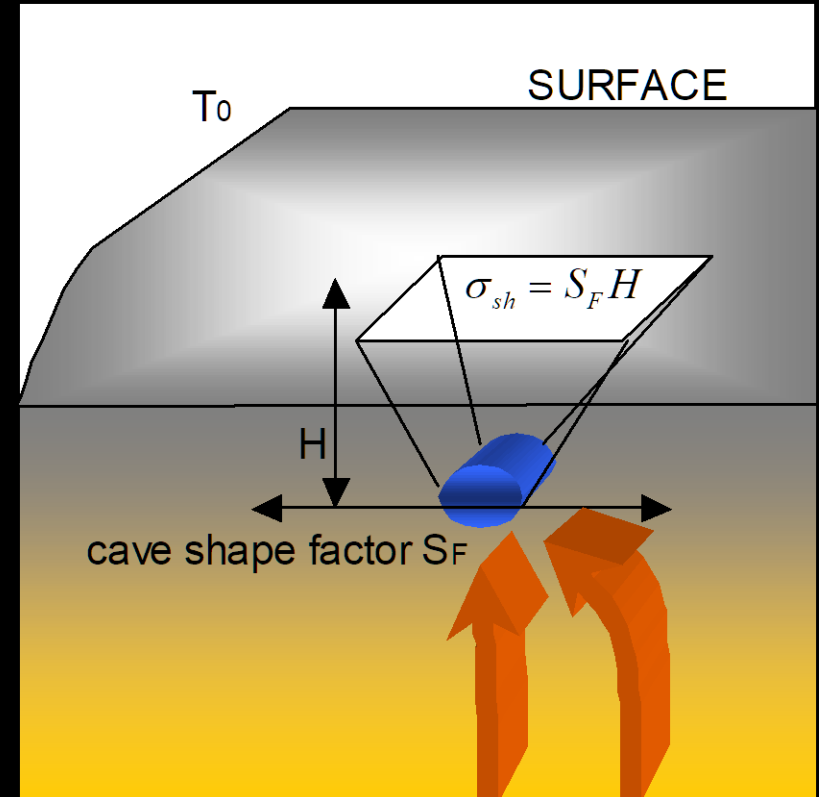
IL CALORE GEOTERMICO

- Il risultato sorprendente è che tutto questo non importa.
- Una condotta focalizza su sé stessa il flusso geotermico, creando una zona d'ombra nelle rocce sovrastanti su una superficie molto più ampia della condotta stessa.
 - E' come se l'acquifero fosse esteso per centinaia di metri intorno alla condotta.



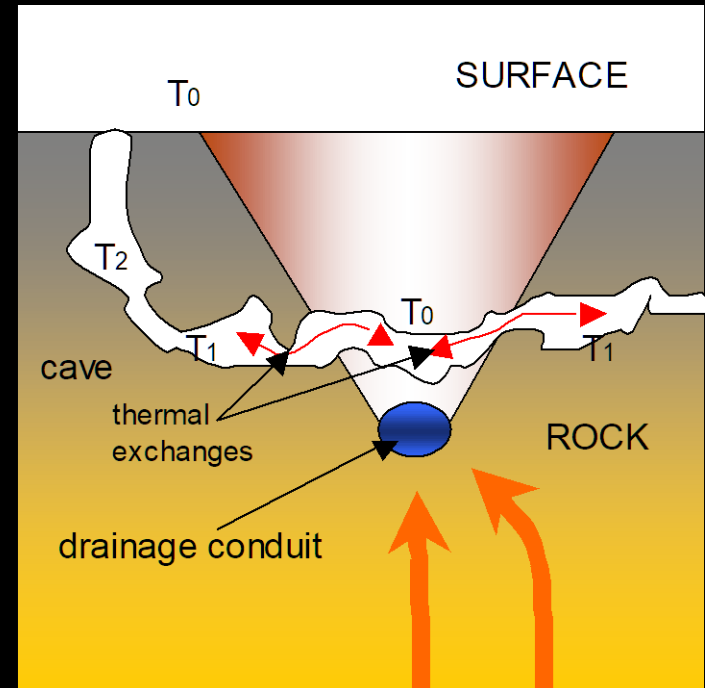
IL CALORE GEOTERMICO

- In pratica le condotte di base intercettano il calore geotermico su una superficie molto più grande della loro.
- Le dimensioni della superficie schermata sono dell'ordine della **profondità della condotta**, non del suo diametro...
 - E' probabile che il riscaldamento conseguente abbia importanti nell'evoluzione dei sistemi freatici.



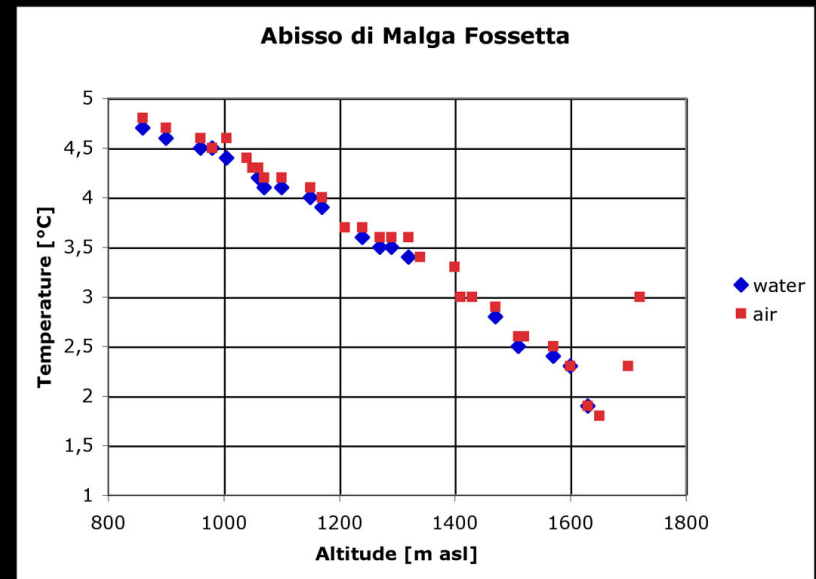
IL CALORE GEOTERMICO

- Quindi una grotta può avere locali sbilanci termici per le diverse capacità di schermatura delle condotte profonde.
 - Anche questi processi possono avere un ruolo genetico perché creano condensazioni, ma sono di ampiezza limitata.
- Allo stato attuale delle conoscenze si può ammettere che il flusso geotermico **non giochi nessun ruolo nel fissare la temperatura** di una grotta.



I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Abbiamo visto che la TL esterna varia con la quota.
- Diminuisce di $6.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$.
 - Questo valore è il gradiente medio atmosferico.
- Anche in grotta le T variano con la quota, ma in un modo diverso, che dipende dal tipo di grotta.
- In genere, comunque, la T diminuisce di $3\text{-}4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$, cioè molto meno che all'esterno.
- Vediamo meglio.



I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Consideriamo una condotta ben isolata termicamente, in cui l'acqua scende di cascata in cascata, senza mai acquistare velocità.
- La sua T va crescendo, perché l'energia potenziale iniziale va trasformandosi in calore, di salto in salto.
- Il suo guadagno di T è $G_w = 2.34 \text{ }^\circ\text{C/km}$
- E' il "gradiente adiabatico idrico", molto importante perché quanto più le grotte sono attive, tanto più il loro gradiente gli è vicino.



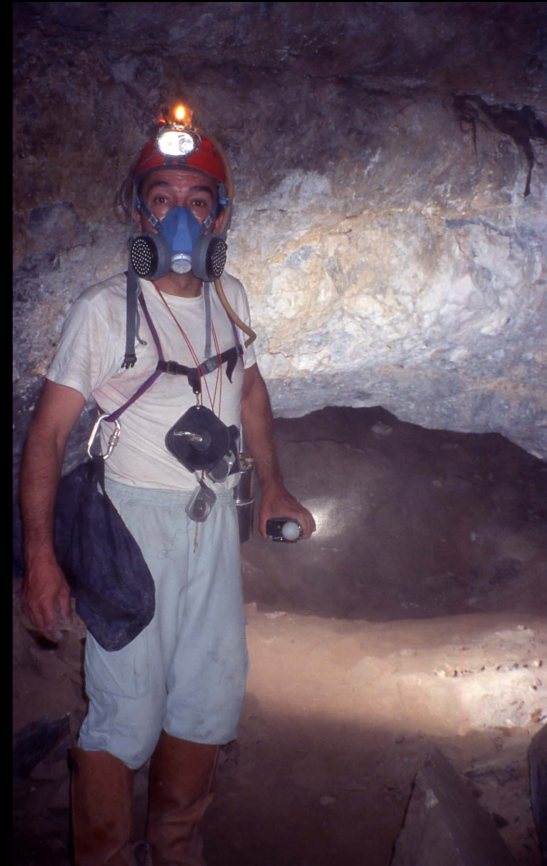
I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- L'aria ha un comportamento più complicato perché:
 - 1) è comprimibile;
 - 2) in genere è umida.
- L'aria si muove sia verso l'alto che verso il basso.
- Nel caso dell'aria secca questo crea semplicemente un'inversione temporale.
- Ma questa simmetria si rompe a causa dei processi di condensazione e al rilascio di energia dovuti all'attrito.



I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Se l'aria è secca, o lontana dal 100% di umidità relativa, la sua T aumenta scendendo con la quota di
- $G_{as} = 9.7 \text{ °C/km}$
 - Questo in meteorologia si chiama “gradiente adiabatico secco”.



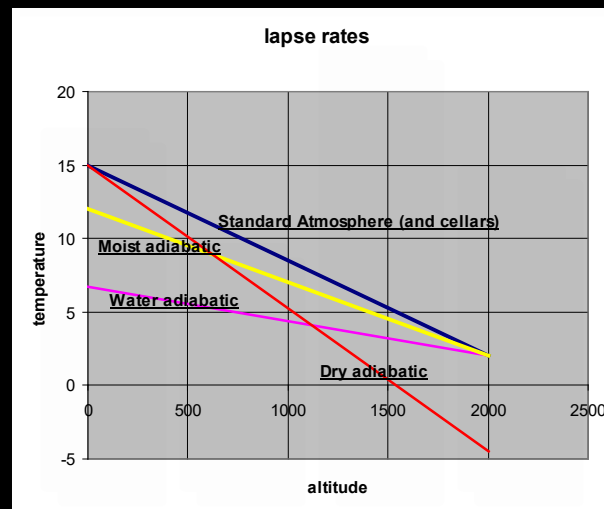
I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Ma in generale ci sono vaste superfici di acqua libera nelle grotte, e l'aria rimane umida.
- Quindi l'aria si scalda scendendo, ma con questo essa fa evaporare dell'acqua.
- Però, per farlo, deve spendere energia.
- Il risultato è che si scalda meno che se non ci fosse acqua.

Altitude [m]	100	1000	2000	3000	4000
T=0°C	6.58	6.38	6.14	5.91	5.70
5°C	5.90	5.70	5.50	5.25	
10°C	5.32	5.11	4.89	4.68	
15°C	4.80	4.60	4.40	4.20	
20°C	4.35	4.17	3.98	3.80	
25°C	3.95	3.80	3.65		
30°C	3.63	3.49	3.35		

I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Ad esempio. Una grotta inizia a 1500 m slm con $T=T_L=6\text{ °C}$.
- La T aumenta scendendo di quota a seconda di cosa la attraversa:
 - solo da aria secca: 9.7 °C/km
 - solo da aria umida: 6 °C/km
 - solo dall'acqua: 2.34 °C/km
 - in media nei complessi sotterranei di tipo alpino: 3.5 °C/km
- E quindi alle gallerie a quota 500 m slm misuriamo delle T che sono rispettivamente: 16, 11, 8.5, 9.5 °C.
- Lungo ciascuna linea interna di moto dei fluidi si ha un gradiente di T che dipende dal peso relativo di acqua e aria.



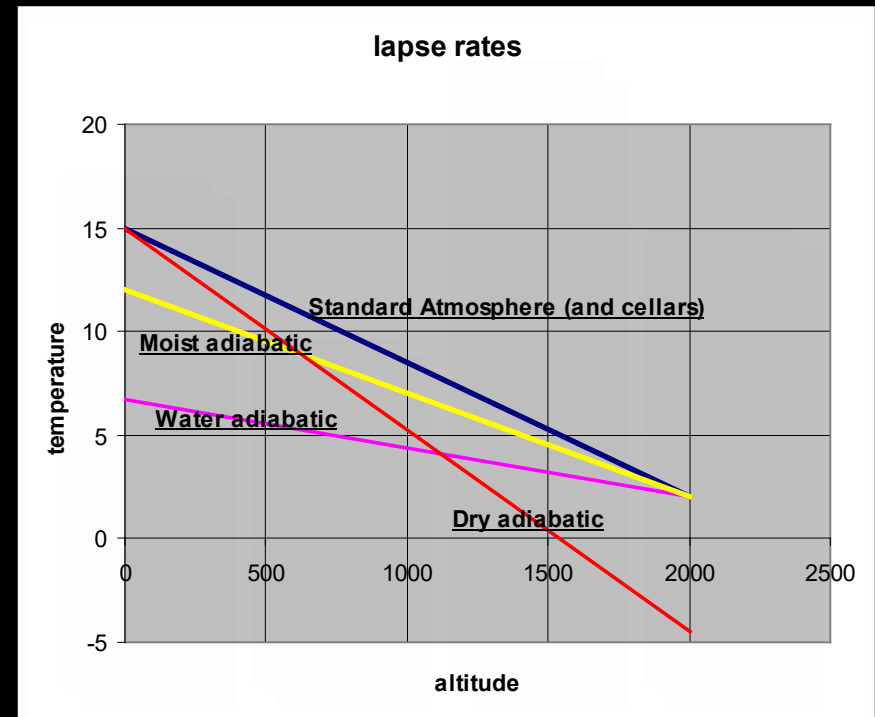
I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Nella pratica le grotte reali sono una miscela di arie umide e acque, e a seconda del prevalere di una o dell'altra il gradiente si sposterà verso i 2.5 (acqua dominante) o verso i 5 (aria dominante).
- Ripetiamo: **la gran parte dei grandi abissi ha gradiente intorno a 3-3.5 °C/km.**



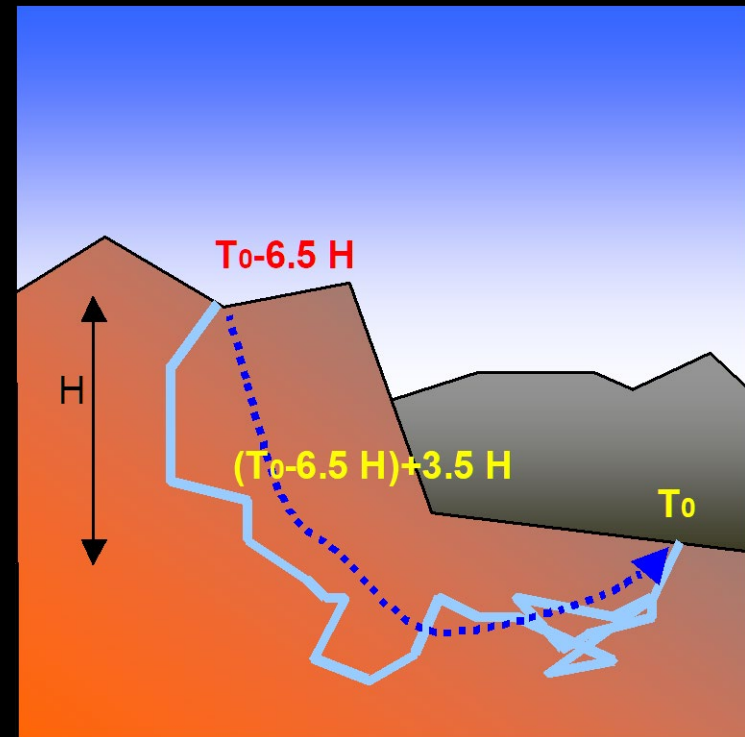
I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Ma una grotta in genere prende acque da vari posti, a diverse quote, quindi ognuna con:
 - sua T di infiltrazione
 - suo gradiente di discesa
- **Quindi quando si mescolano non sono in equilibrio.**
- Inoltre questa miscela tende a confondere il gradiente complessivo della grotta.



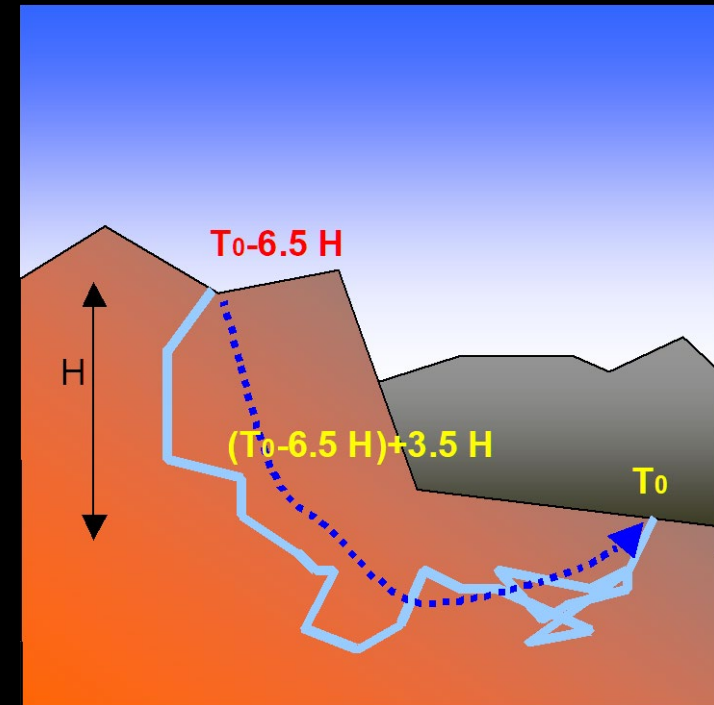
I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- In particolare se si ha $T=TL$ ad una certa quota, non sarà più vero più in basso, infatti:
 - La TL esterna diminuisce di $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$.
 - La T delle grotte di soli $3\text{-}3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$.
- Ad esempio, poniamo che a quota 0 la TL sia $T_0=12\text{ }^{\circ}\text{C}$, e che $H=1\text{ km}$.
- Quindi a quota H la TL è $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Le acque si infiltrano lassù, a quella T, e scendendo acquistano $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- Perciò escono a $5.5+3.5=9$ °C, ben 3 °C in meno della TL alla quota della sorgente.
- Possiamo capire che esiste un sistema carsico profondo dal fatto che le sorgenti e le gallerie di bassa quota sono molto più fredde del TL.
- In pratica, asserire che la T di una grotta è circa TL non è vero per i grandi sistemi carsici con forte sviluppo verticale.
 - La loro T è sempre minore della TL alla stessa quota.



I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- C'è di più.
- Abbiamo visto che se l'acqua fluisce in una condotta isolata, si scalda di $2.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni chilometro di caduta.
- Ma nel carso profondo, essa si scalda di $3\text{-}3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$.
- L'acqua quindi esce dalle montagne un poco più calda di quanto dovrebbe.
- **Perciò, in generale, l'acqua, che fissa la temperatura della grotta, sottrae energia alla montagna.**

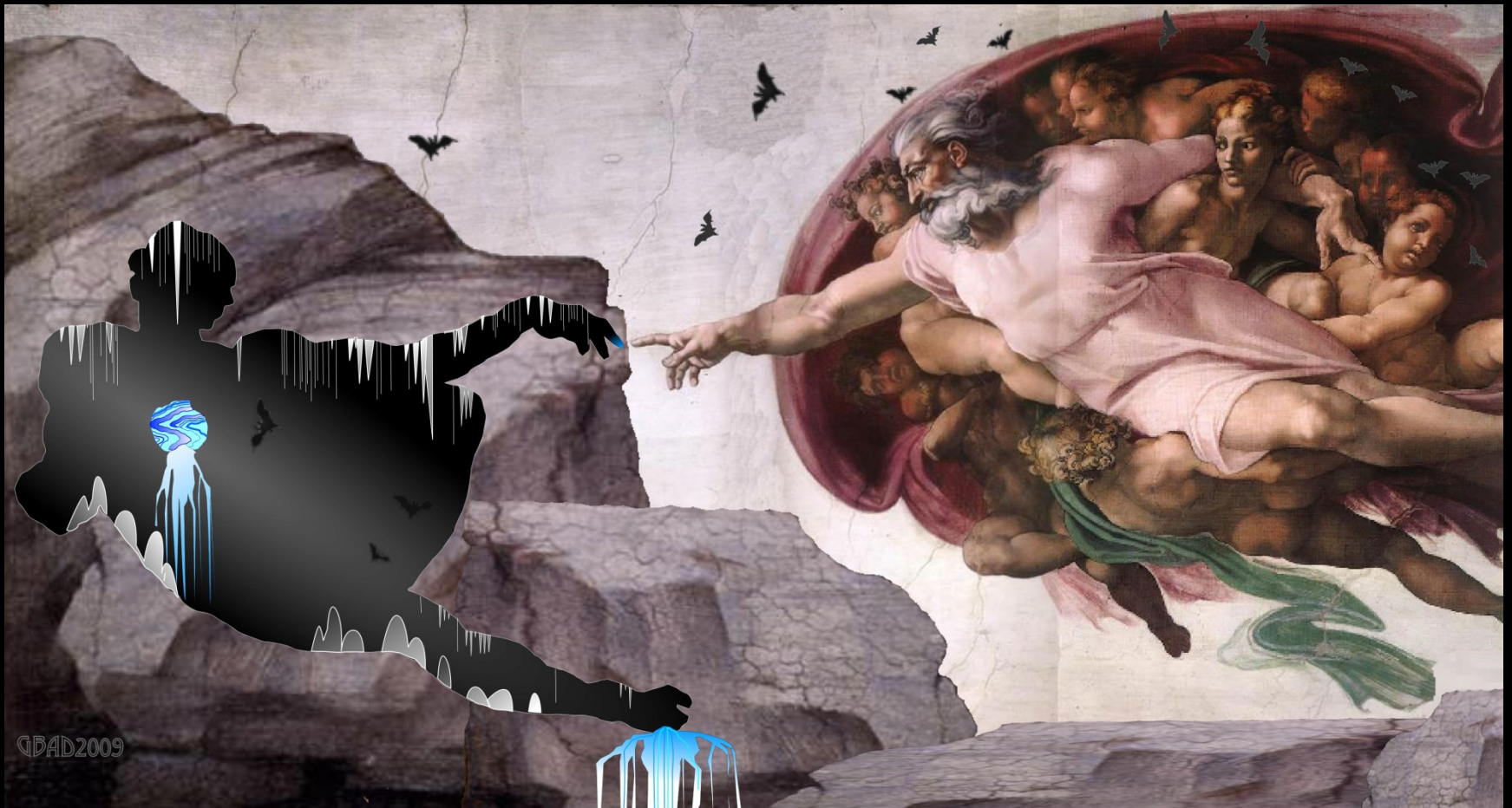


I GRADIENTI TEMPERATURA-QUOTA

- E chi dà energia alla montagna?
- La dà il fluido che esce più freddo di quel che dovrebbe.
- Quindi: l'aria.
- L'acqua fissa la T della grotta.
- L'aria le dà energia.
- Quindi nella speleogenesi:
 - l'acqua è lo scalpello
 - l'aria il martello.

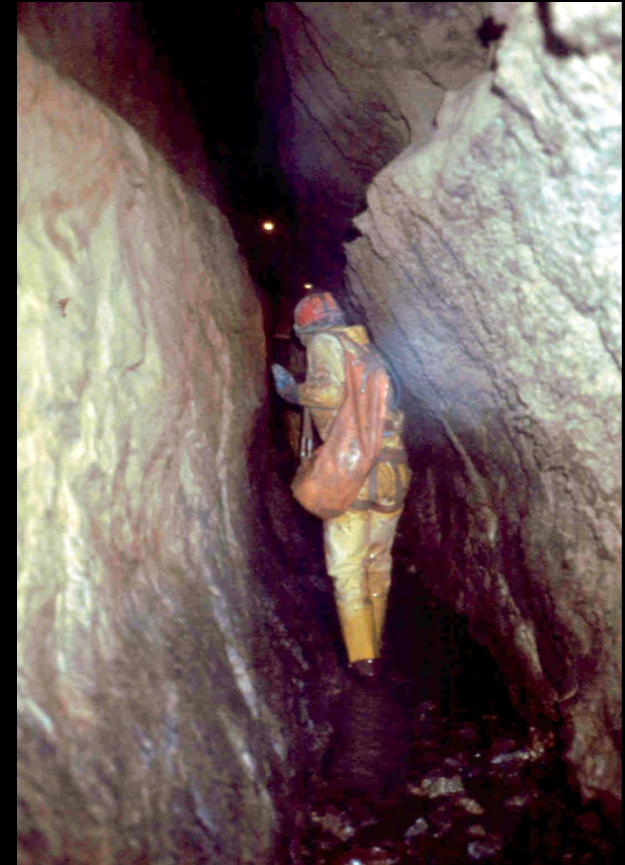


3. MISURE



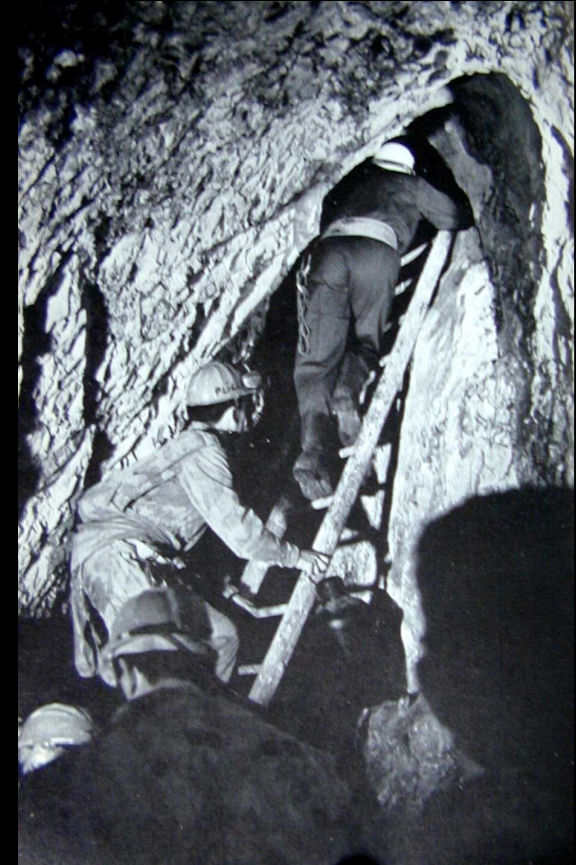
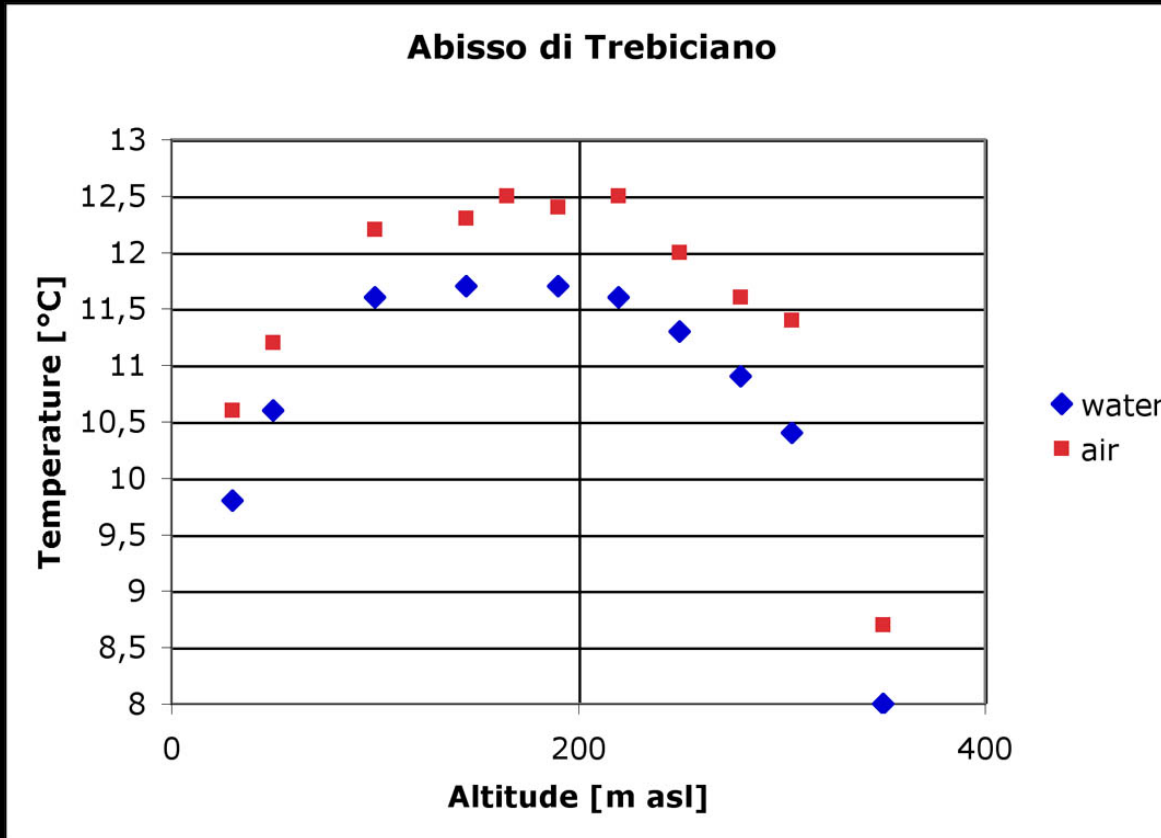
MISURE

- Ora passiamo alle grotte.
- Guarderemo come varia la T con la quota.
- Ci sarà sempre una zona “disturbata” vicino alle entrate, dove i fluidi entranti non sono ancora in equilibrio con l’ambiente.
- Dopo di che aria, acqua e roccia vanno in equilibrio.
 - Anzi: in quasi-equilibrio.
 - Si vedrà che per apprezzare bene la regolarità dei gradienti bisogna misurare su grandi dislivelli, oltre almeno i 500 m.



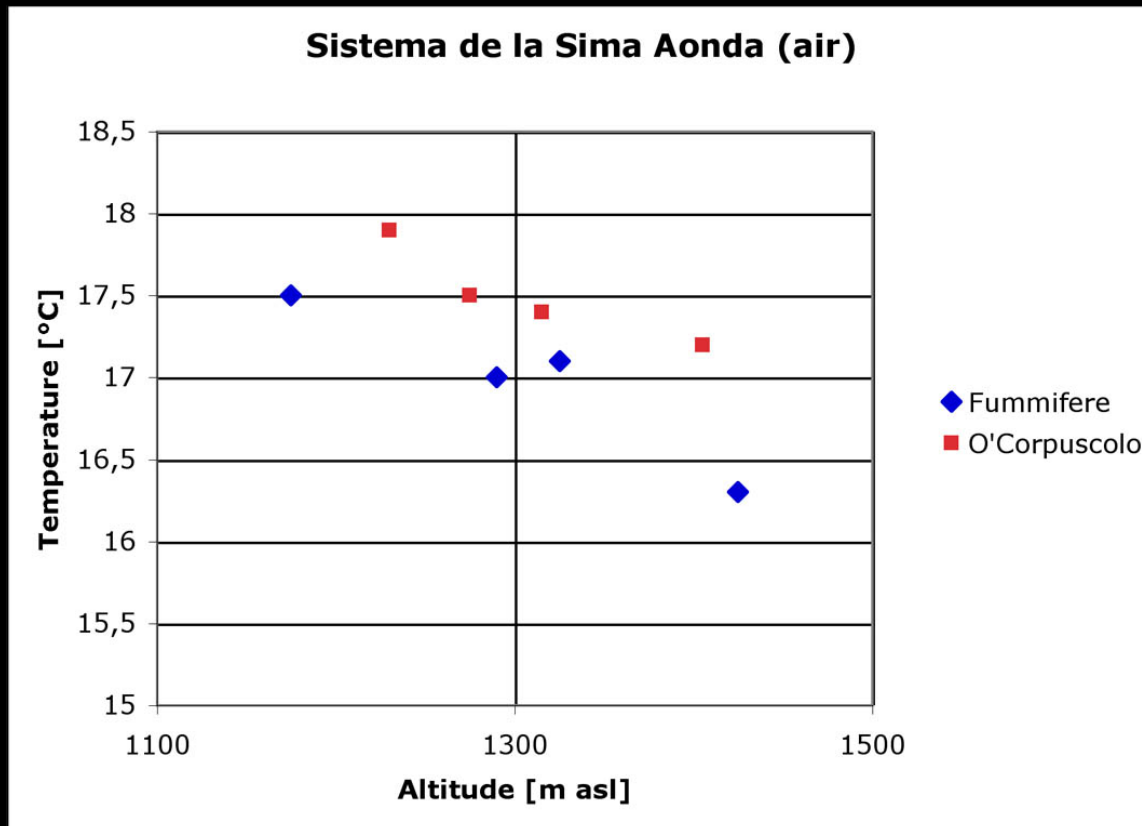
GRADIENTI TERMICI

- Abisso di Trebiciano – Venezia Giulia



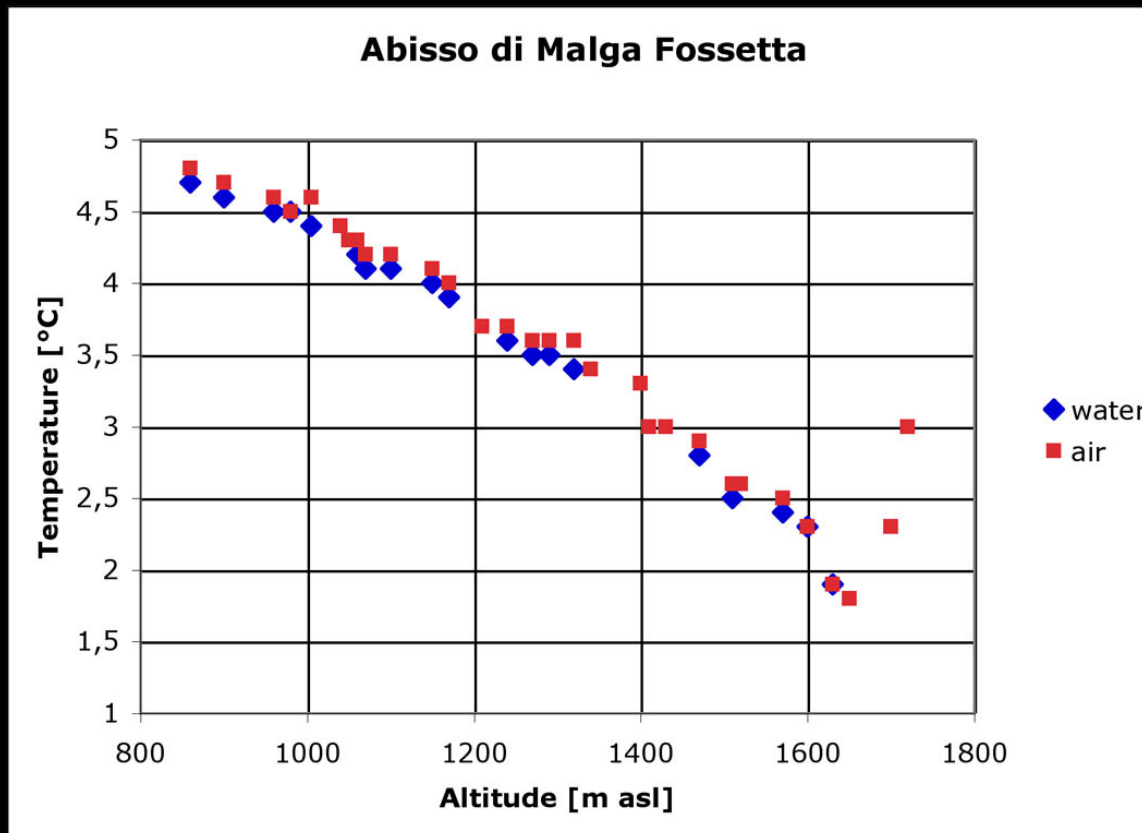
GRADIENTI TERMICI

- Fummiere Acque - Venezuela



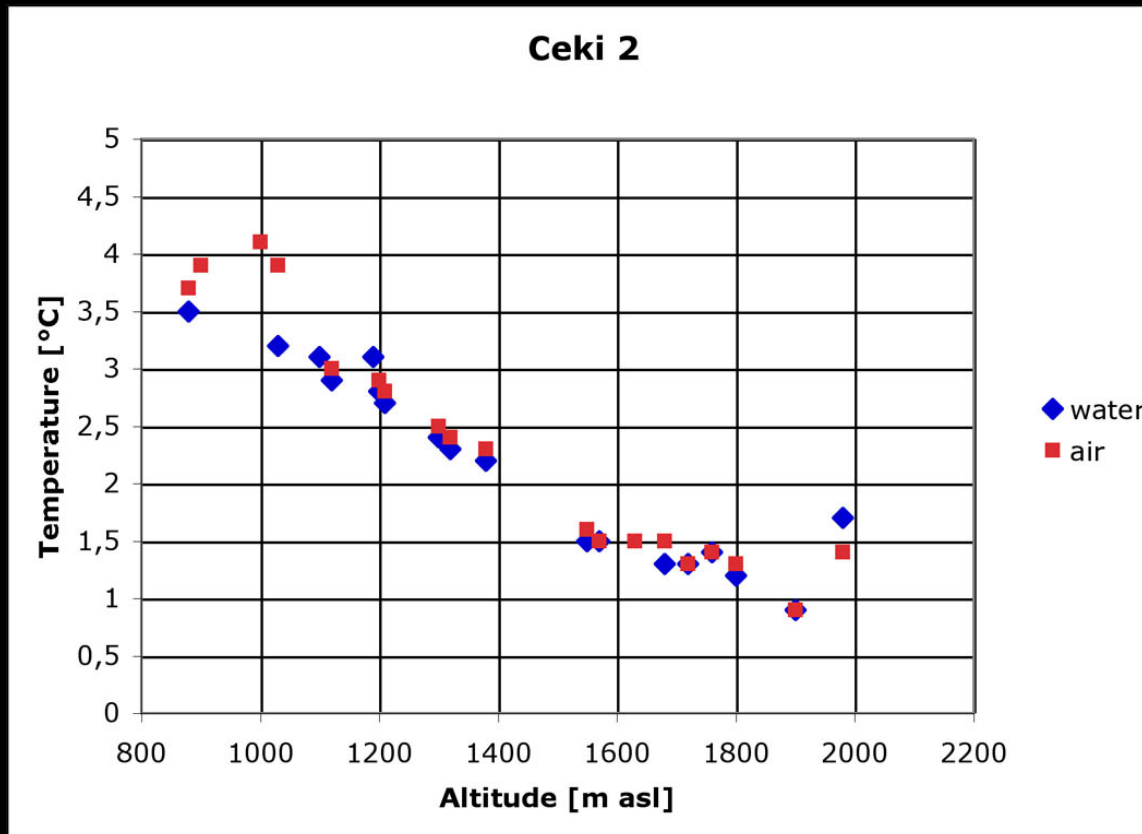
GRADIENTI TERMICI

- Abisso Malga Fossetta - Veneto



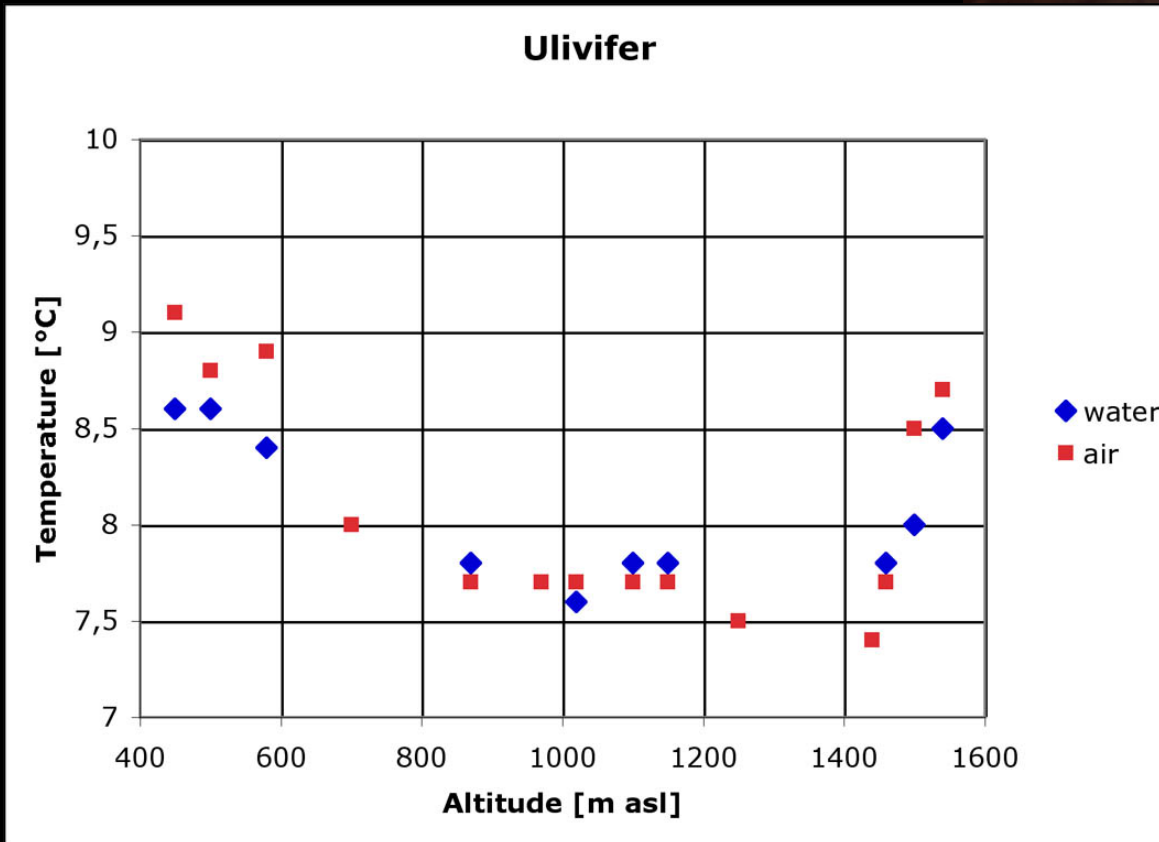
GRADIENTI TERMICI

- Abisso Ceki 2 - Slovenia



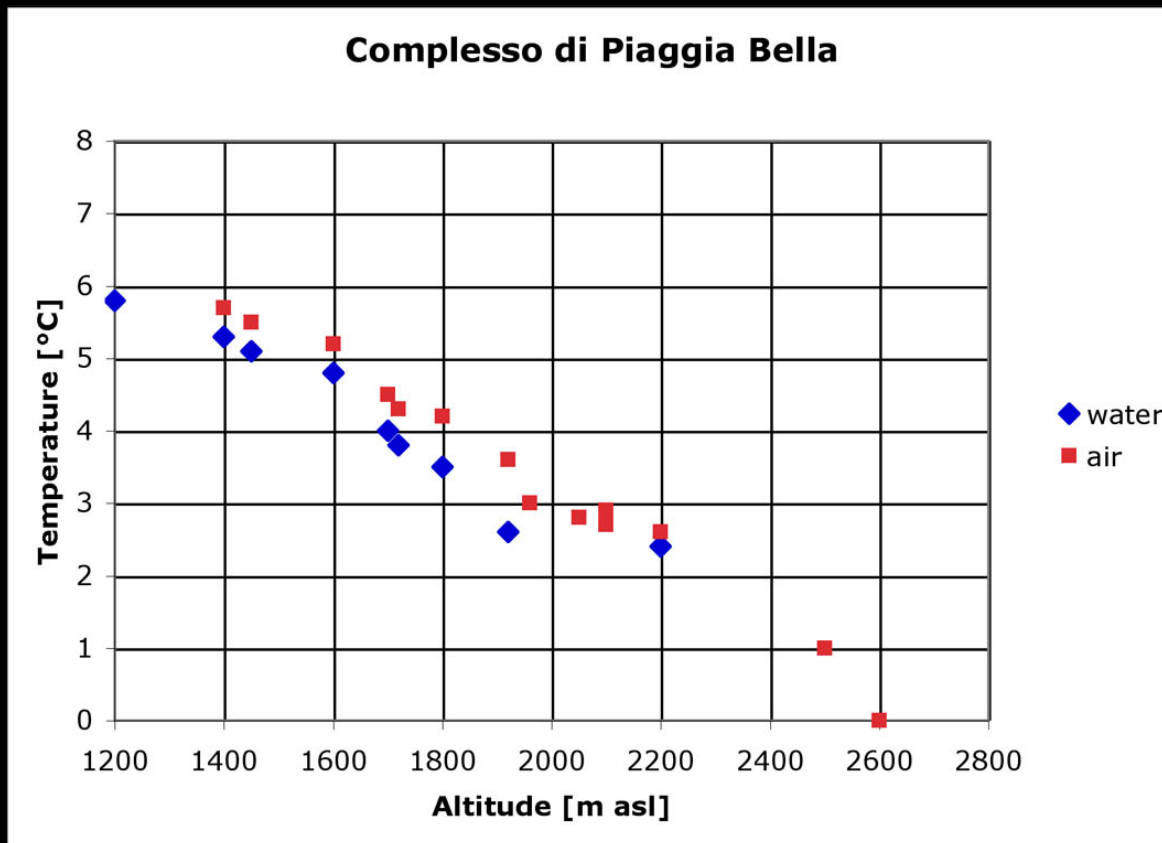
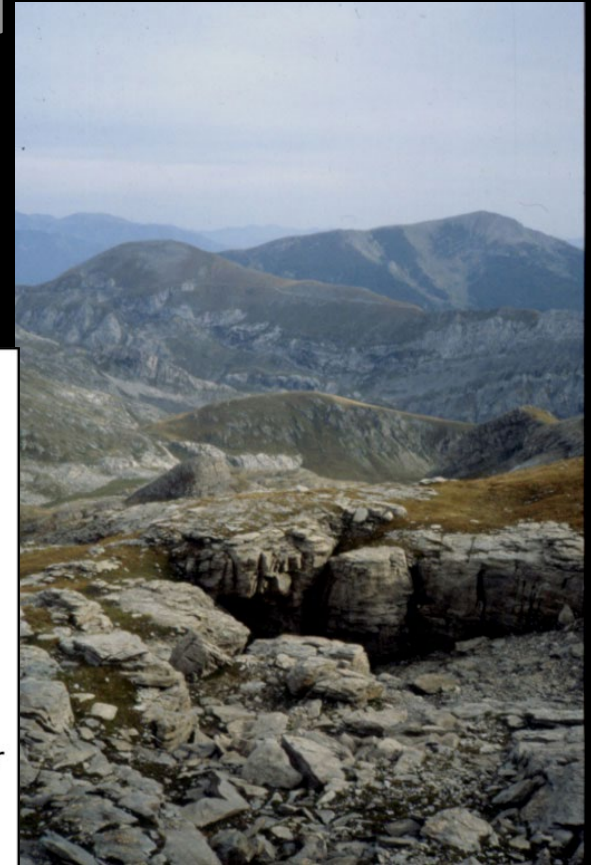
GRADIENTI TERMICI

- Abisso Ulivifer - Toscana



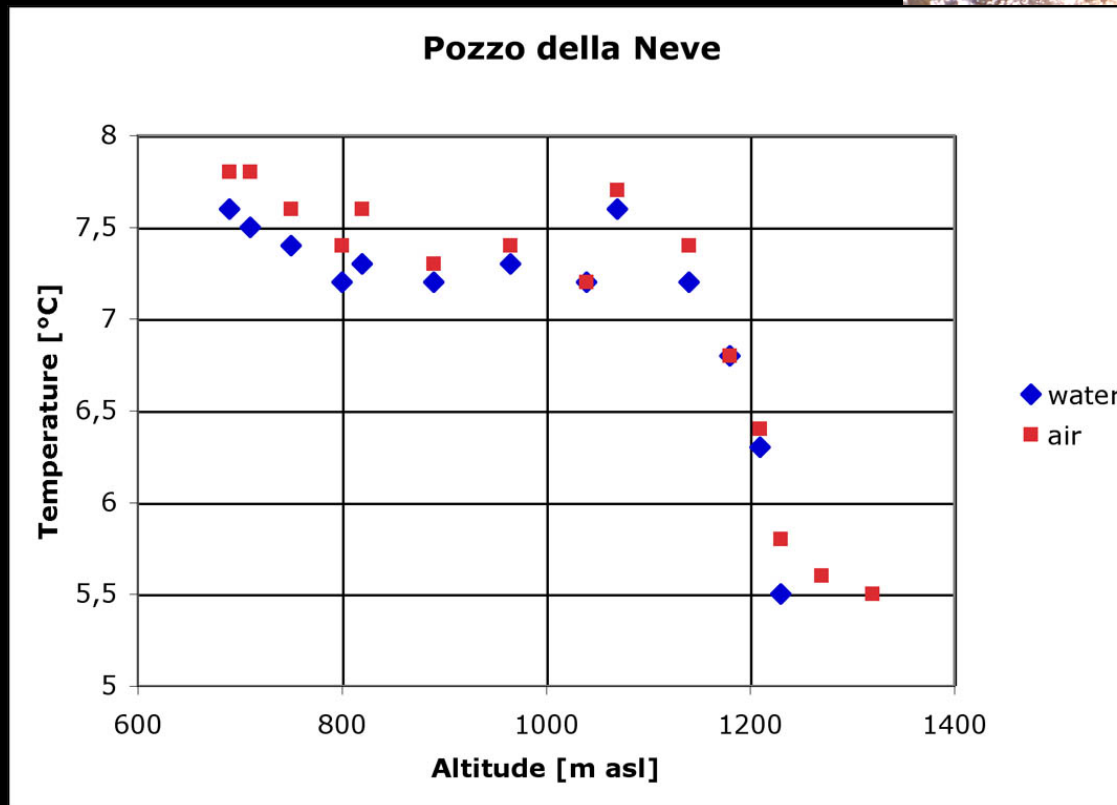
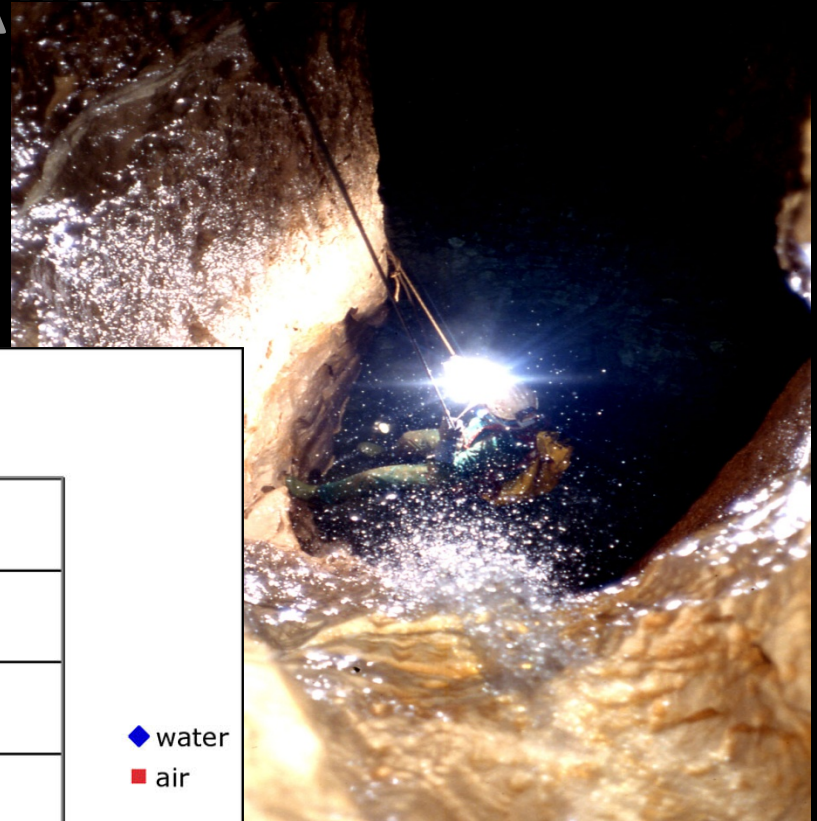
GRADIENTI TERMICI

- Complesso di Piaggia Bella - Piemonte



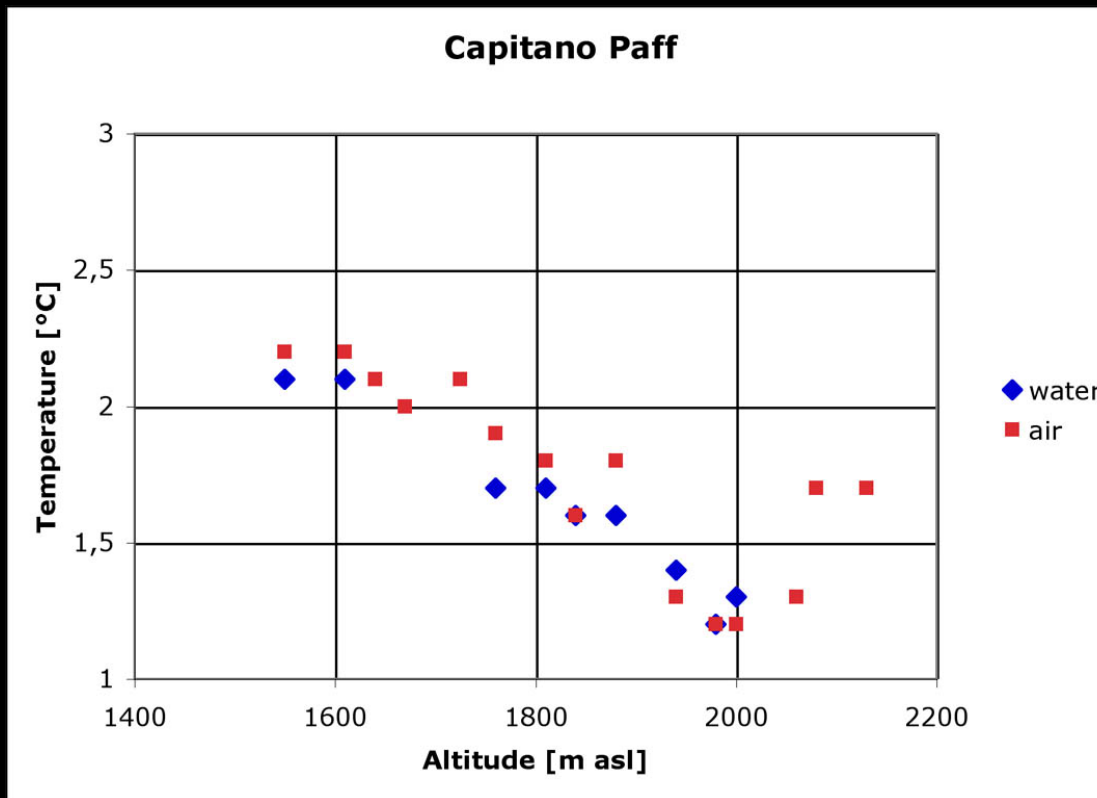
GRADIENTI TERMICI

- Pozzo della Neve - Molise



GRADIENTI TERMICI

- Capitano Paff - Lombardia

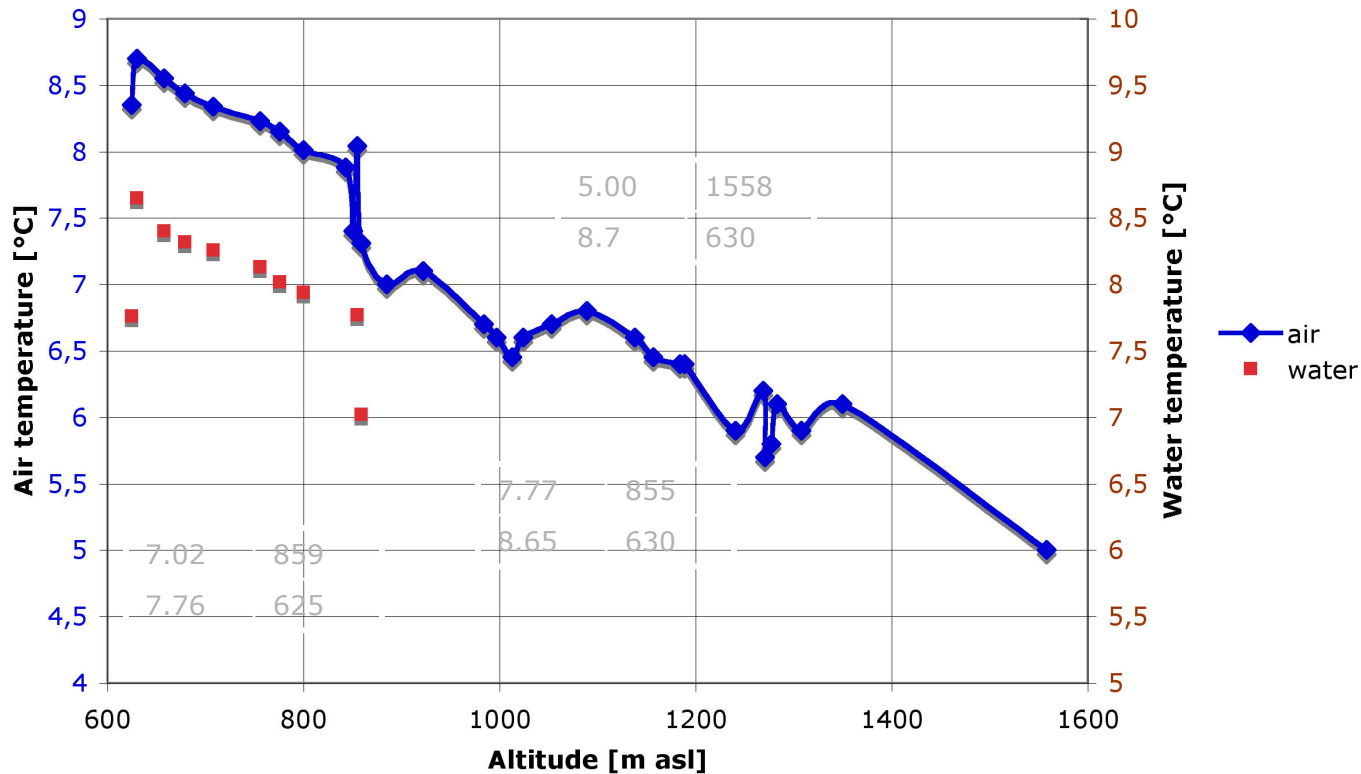


GRADIENT

- Corchia - Toscana

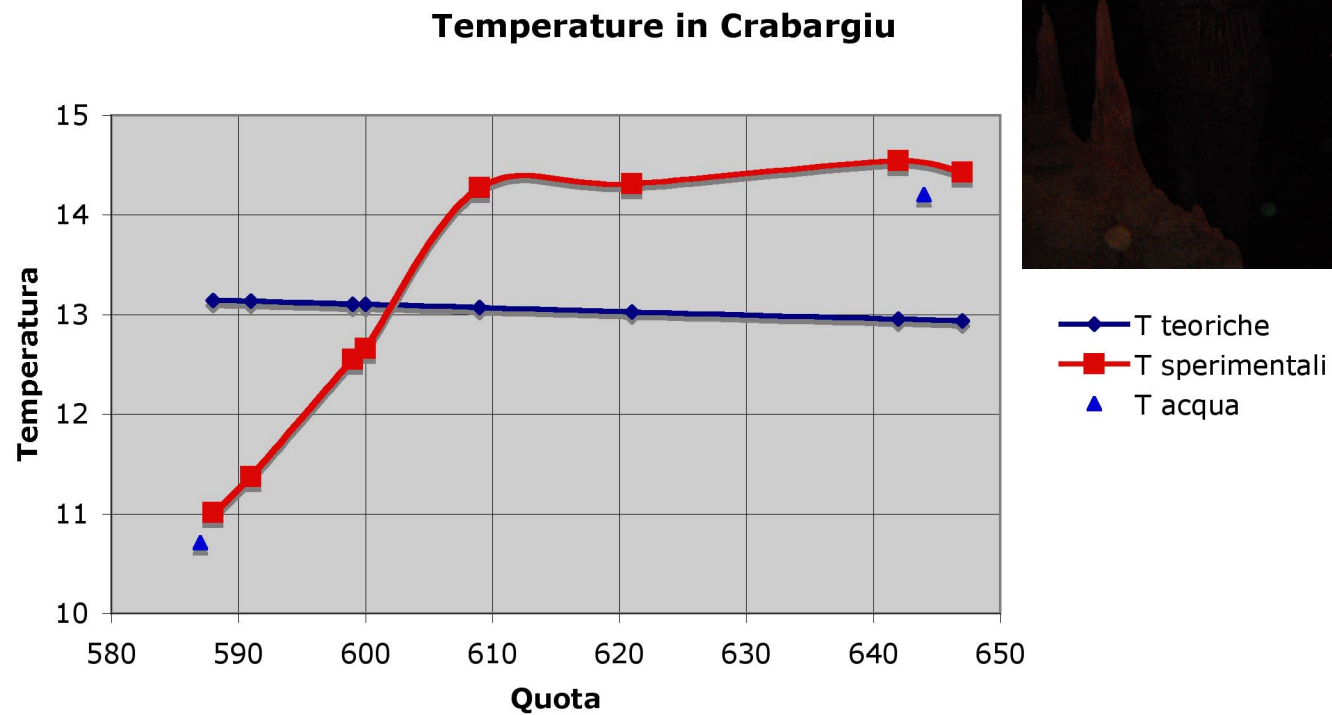
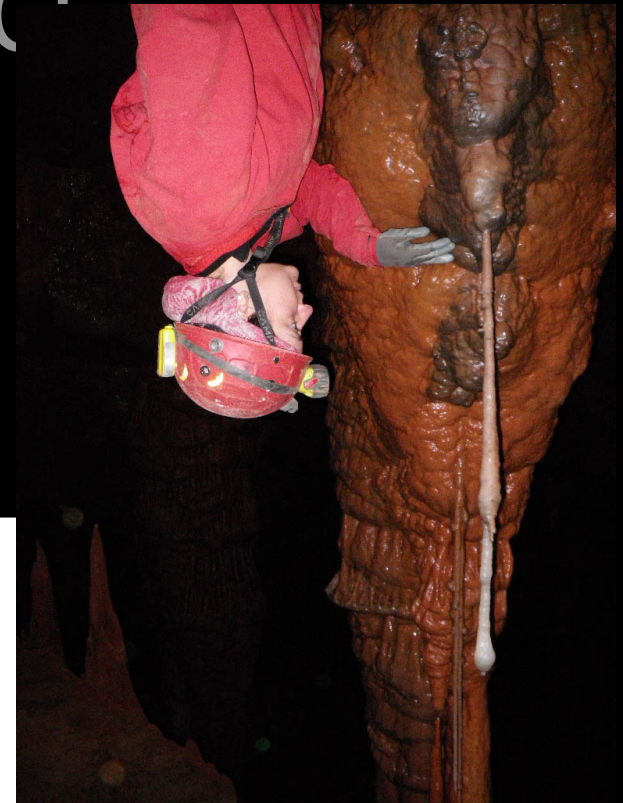


Corchia: Temperatures vs Altitude



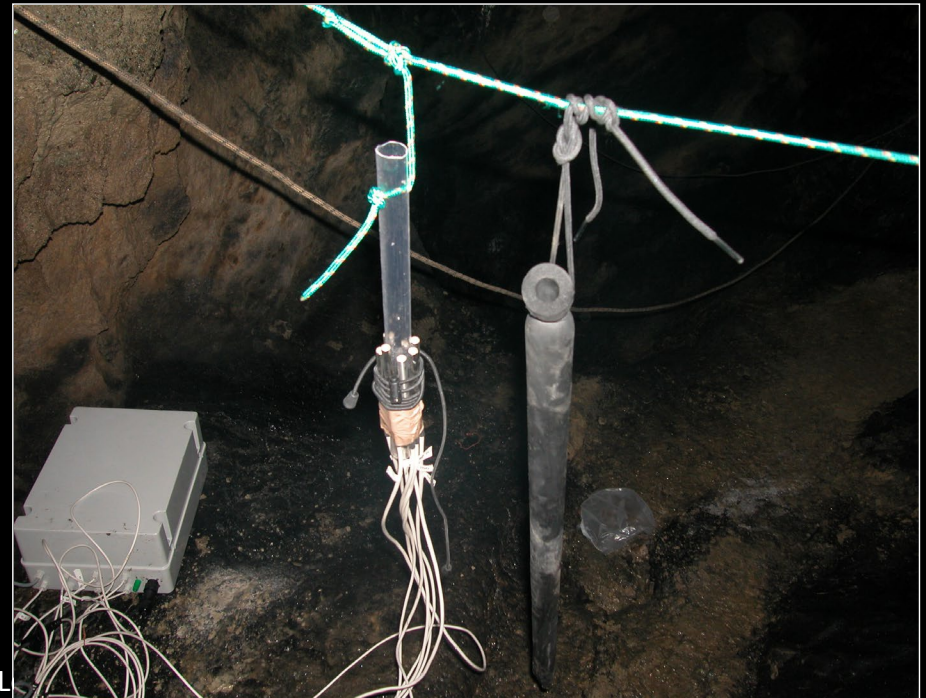
GRADIENTI TERMICI

- Crabargiu - Sardegna



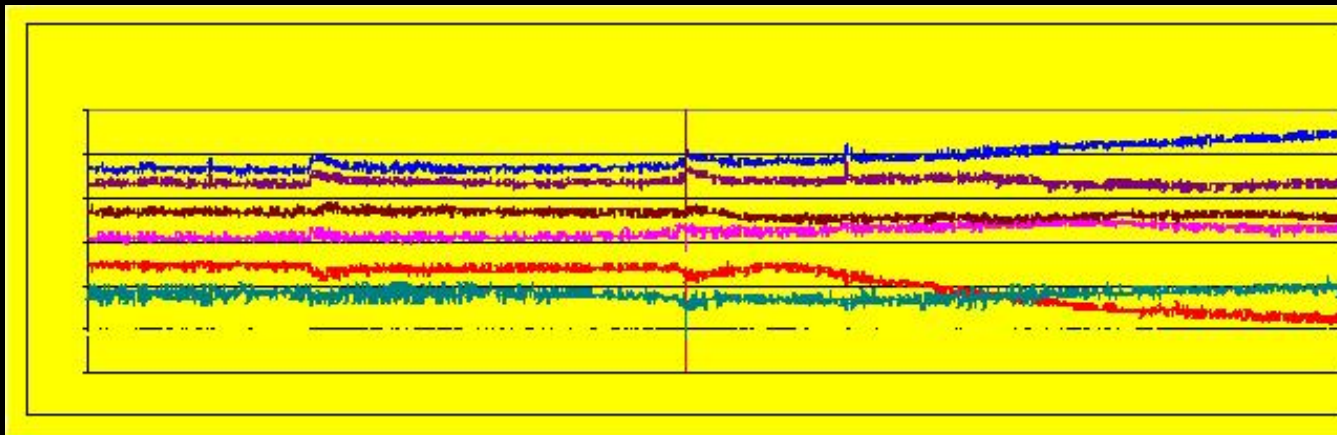
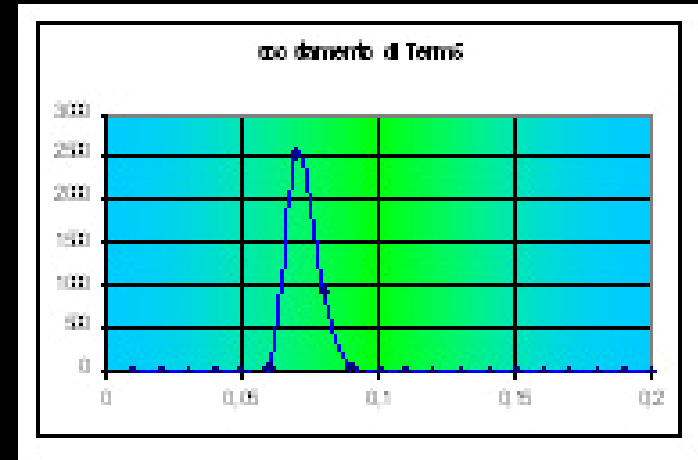
VARIAZIONI LOCALI

- Il concetto di temperatura è definito per sistemi all'equilibrio.
- Fuori dall'equilibrio il significato di "temperatura" è largamente convenzionale.
- Le grotte sono molto prossime all'equilibrio, quindi possiamo fare di meglio che all'esterno...



VARIAZIONI LOCALI

- L'acquisizione della temperatura è fatta da molti sensori PT100.



- **Sensori "cattivi":**
- **una deriva di 0.05 °C in 4 mesi...**

VARIAZIONI LOCALI

- Viene prima calcolata la media d'insieme Tm_0 , poi le fluttuazioni di ciascun sensore attorno ad essa.
- Con questo si ottiene l'accuratezza intrinseca del sensore.
- Diventa così possibile rivelare derive strumentali o sensori cattivi.
- Si calcola poi Tm_1 , escludendo i sensori cattivi.
- L'accuratezza complessiva della misura arriva a 3 mK.

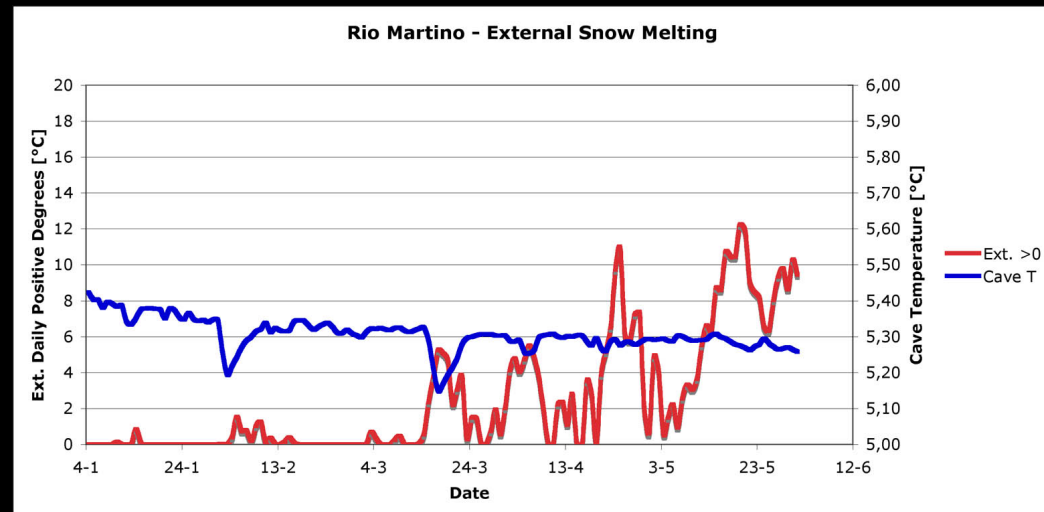


Ricerche sulle caratteristiche di gruppi. Ogni illustrazione mostra un'immagine media ottenuta con la sovrapposizione delle fotografie di 14 studenti svedesi (di 24 anni gli uomini, di 23 le donne) di uno stesso gruppo (D. Katz, *Studien zur experimentellen Psychologie*, Basilea, 1953).



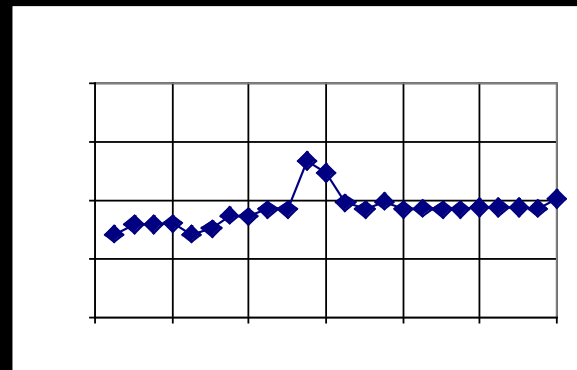
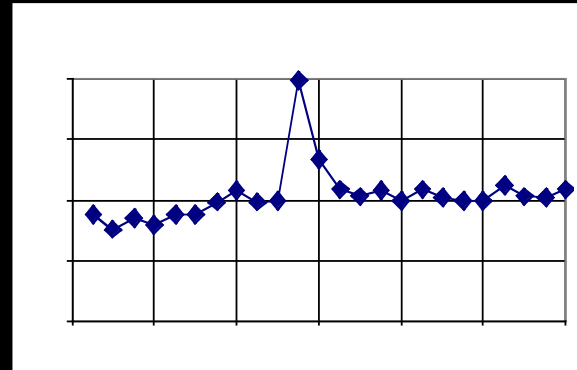
VARIAZIONI LOCALI

- Con un'accuratezza simile è possibile rivelare eventi meteorologici sotterranei e correlarli con quelli esterni.
- Questo implica la possibilità di capire la sensibilità della grotta e il modo con cui essa immagazzina informazioni del clima esterno.



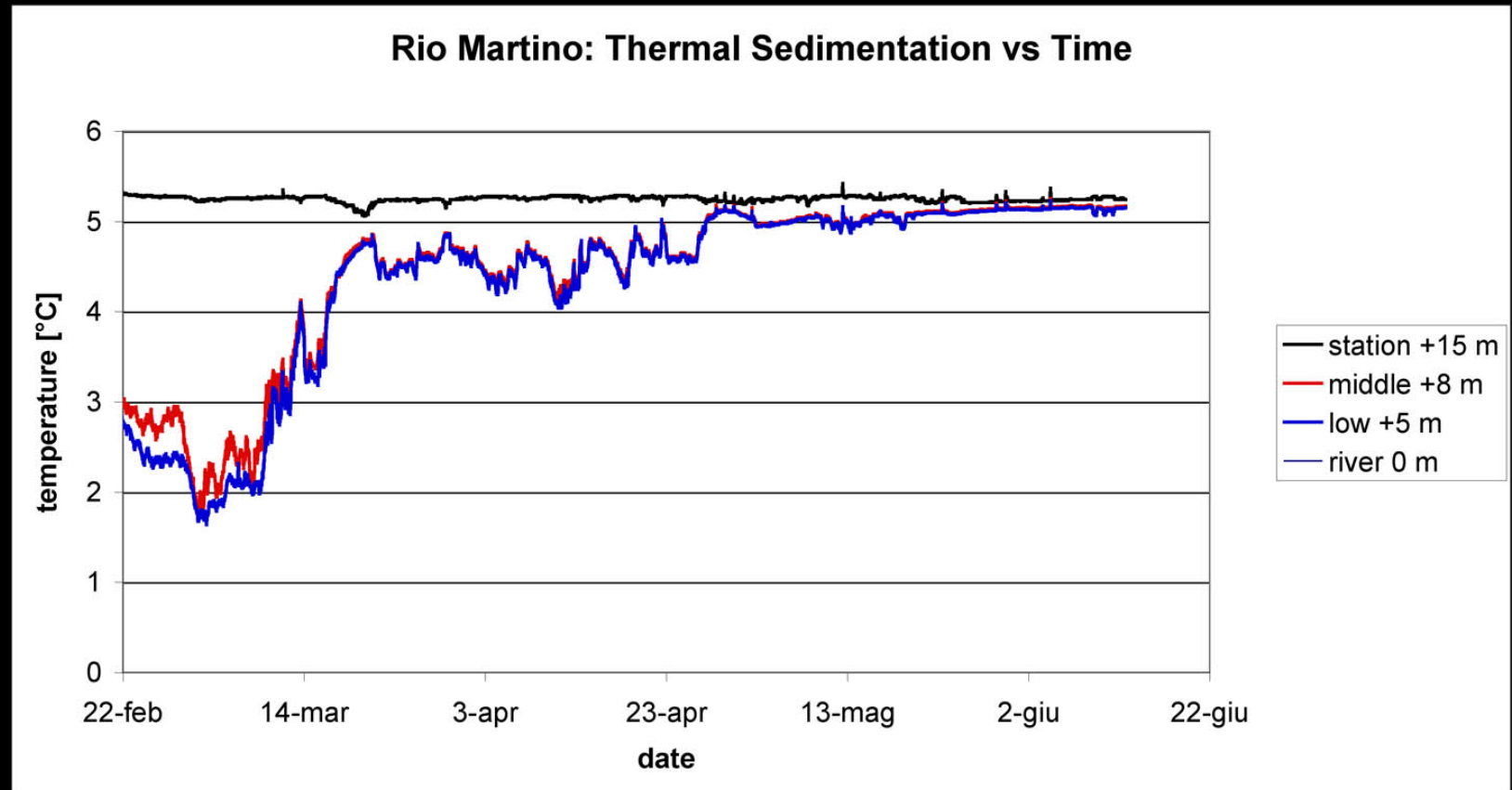
VARIAZIONI LOCALI

- Con un'accuratezza simile è possibile, è possibile misurare il riscaldamento indotto dai visitatori.
- Diventa possibile stimare il tempo di recupero e la "capacità termica" della grotta.



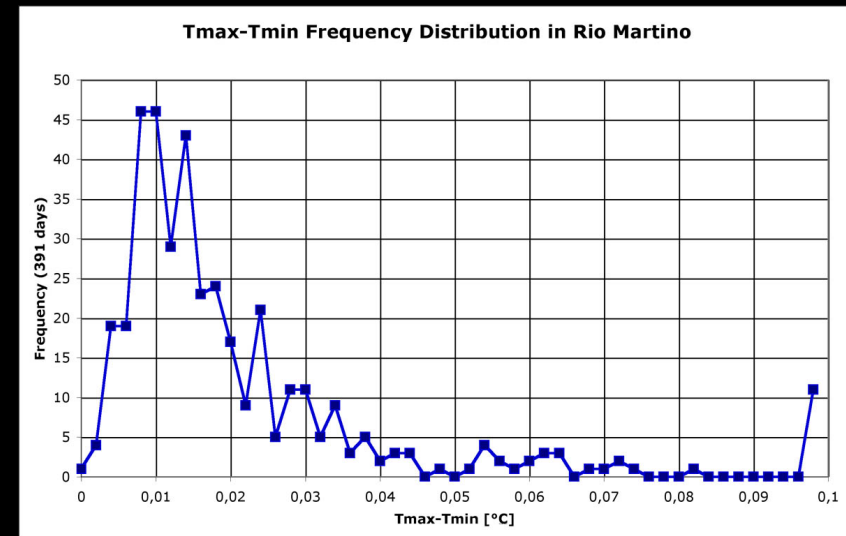
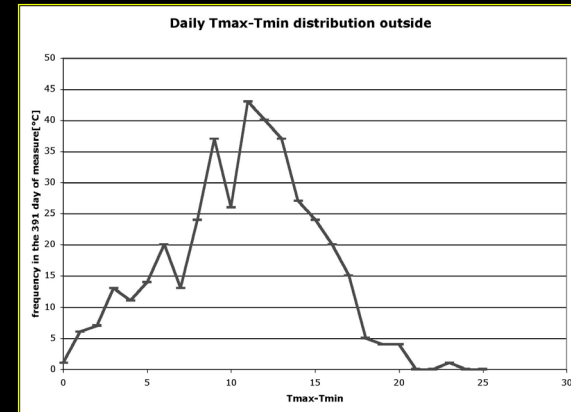
VARIAZIONI LOCALI

- Diventa possibile rivelare sedimentazioni termiche e gli scambi interni di vapor d'acqua ed energia termica.



VARIAZIONI LOCALI

- Diventa possibile misurare l'escursione termica giornaliera.
- L'escursione termica giornaliera all'esterno varia da 5 °C in climi oceanici sino a 15 °C in continentali.
- Nelle grotte essa varia da 1 °C a 0.01 °C.
- E' probabilmente una chiave per capire la formazione di strutture complesse.



CONCLUSIONI

- La temperatura di una grotta è una delle sue caratteristiche principali, ma spesso viene percepita come semplice sfondo ostile che si oppone alle esplorazioni.
- Essa è invece il risultato dell'interazione fra la forma della grotta e l'esterno.
- Lungi dall'essere semplicemente ostile, la temperatura di una grotta ci racconta la forma del monte e le vicende climatiche dell'esterno.



L'umidità



meteore sotterranee

- Le fluttuazioni esterne di temperatura formano le nuvole.
- E sottoterra?



SPELEOGENESIS  
and Evolution of Karst Aquifers *Online Scientific Journal* 

ISSARY | ARCHIVE | BIBLIOGRAPHY | NEW PUBLICATIONS | THESIS | MEETINGS | ABOUT

ional
ss of
LOGY
2009

VOLUME 2 , ISSUE 2

Badino G.
2004
Clouds in caves

Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 2 (2), www.speleogenesis.info
Reference: Badino G. 2004. Clouds in caves / Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 2 (2), www.speleogenesis.info, 8 pages.

Abstract: This paper considers the different processes that can create vapour pressure above the equilibrium in the cave atmosphere: ascending air parcels, pressure drop behind bottlenecks, mixing of saturated air parcels at different temperatures and water flow fragmentation. These processes are essentially the same as those leading to clouds forming in the open atmosphere, always connected

meteore sotterranee

- Anche sottoterra si formano nuvole, ma sono difficili da vedere.
- L'umidità delle grotte è quasi sempre all'equilibrio, $u_r=100\%$.
- Le nuvole sotterranee sono visibili come foschia in grandi sale e come film d'acqua sulle pareti.
- Giocano sicuramente un ruolo decisivo nella speleogenesi.



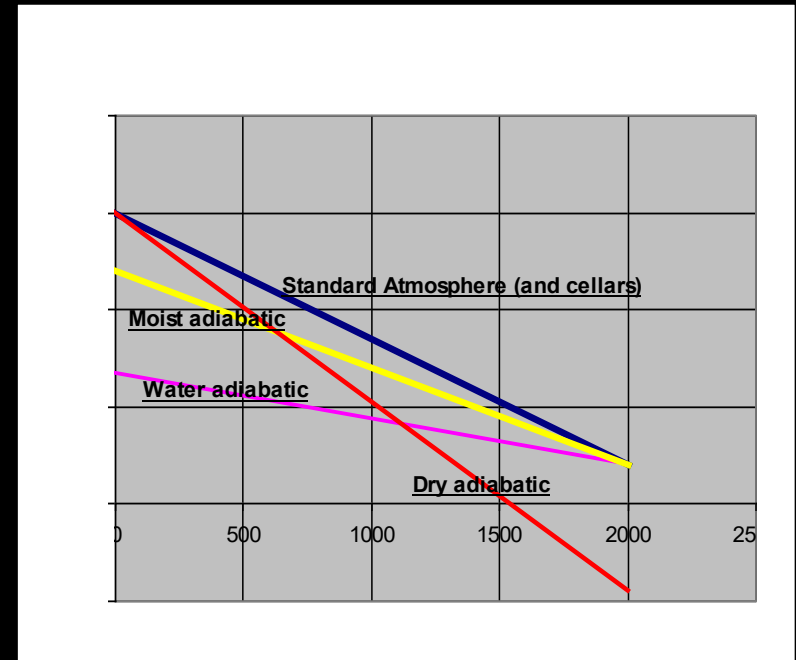
meteore sotterranee

- Perché si formano?
- Per gli stessi motivi per cui si formano all'esterno.
- La ragione principale è l'ascesa di particelle d'aria, che all'esterno si raffreddano di 6 °C/km .
- E sottoterra? Di quando si raffreddano le grotte in verticale?
- Rispondere a questa domanda non è stato semplice.



meteore sotterranee

- I gradienti termici principali sono:
- 1) ISA: $-6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$
- 2) adiabatico umido: $-5/-6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$
- 3) adiabatico idrico: $-2.341 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$
- 4) adiabatico secco: $-9.7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$
- 5) carsico profondo: $-3/-4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$



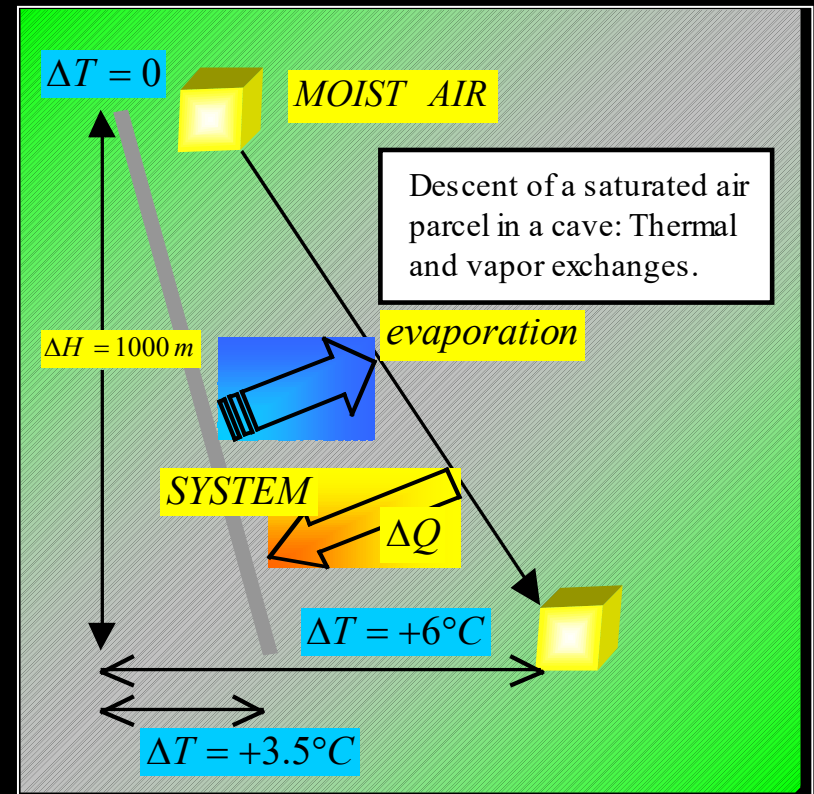
meteore sotterranee

- Abbiamo dimostrato che il gradiente interno nelle grotte è -3.5 °C/km, molto minore di quello esterno.
- Ma molto più grande di quello adiabatico idrico, -2.341 °C/km.
- Questo significa che l'acqua esce dalle grotte più calda che se subisse una trasformazione adiabatica.



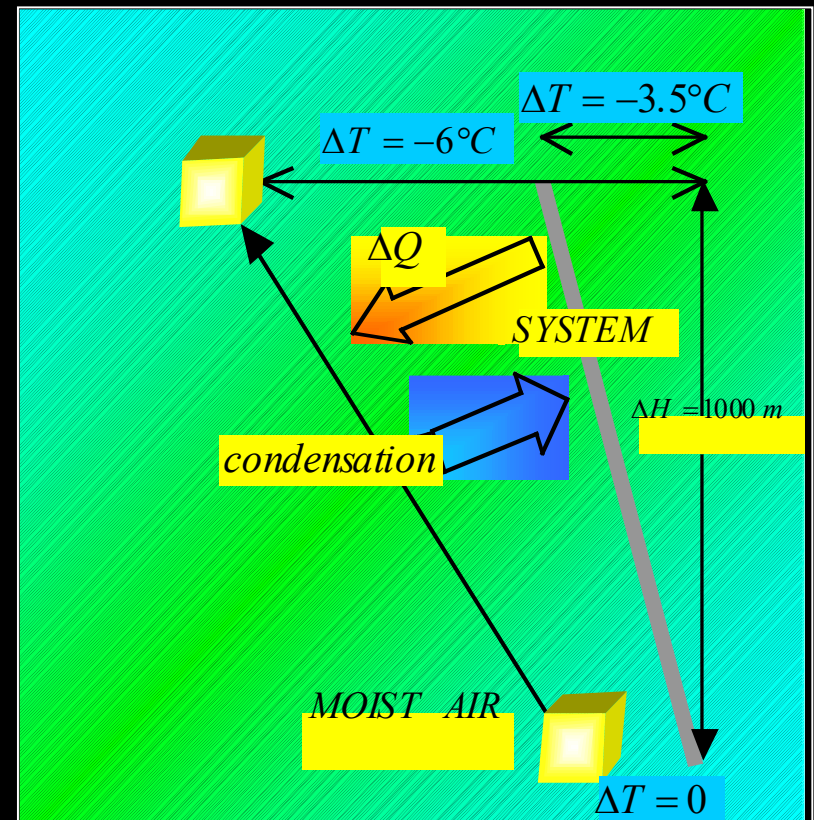
meteore sotterranee

- Lungo la discesa di una particella d'aria c'è un rilascio di energia dall'aria alla roccia e all'acqua, ed evaporazione.
- Le nuvole spariscono.



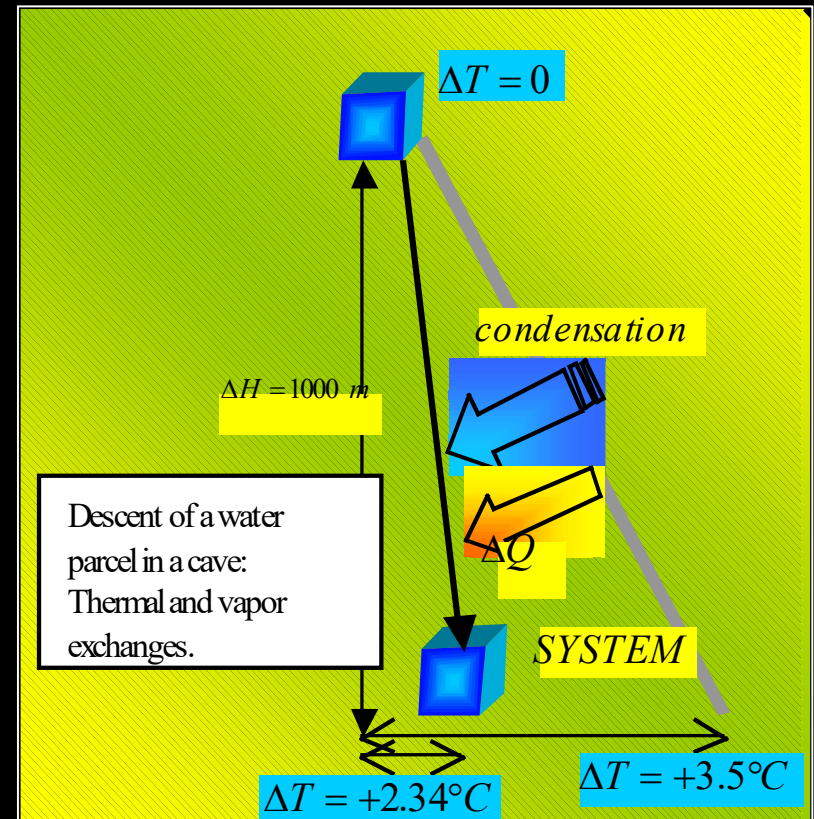
meteore sotterranee

- Durante l'ascesa c'è rilascio di energia da roccia e acqua verso l'aria e condensazione.
- Appaiono le nuvole.



meteore sotterranee

- L'acqua che scende è sempre fredda al confronto con l'ambiente, quindi essa *sottrae* energia alla montagna.



meteore sotterranee

- Ci sono altri processi minori che creano nuvole sotterranee.



meteore sotterranee

- 1) espansione adiabatica in strettoie
 - nuvole a bandiera



meteore sotterranee

- 2) sovrassaturazione dovuta a frammentazione di gocce



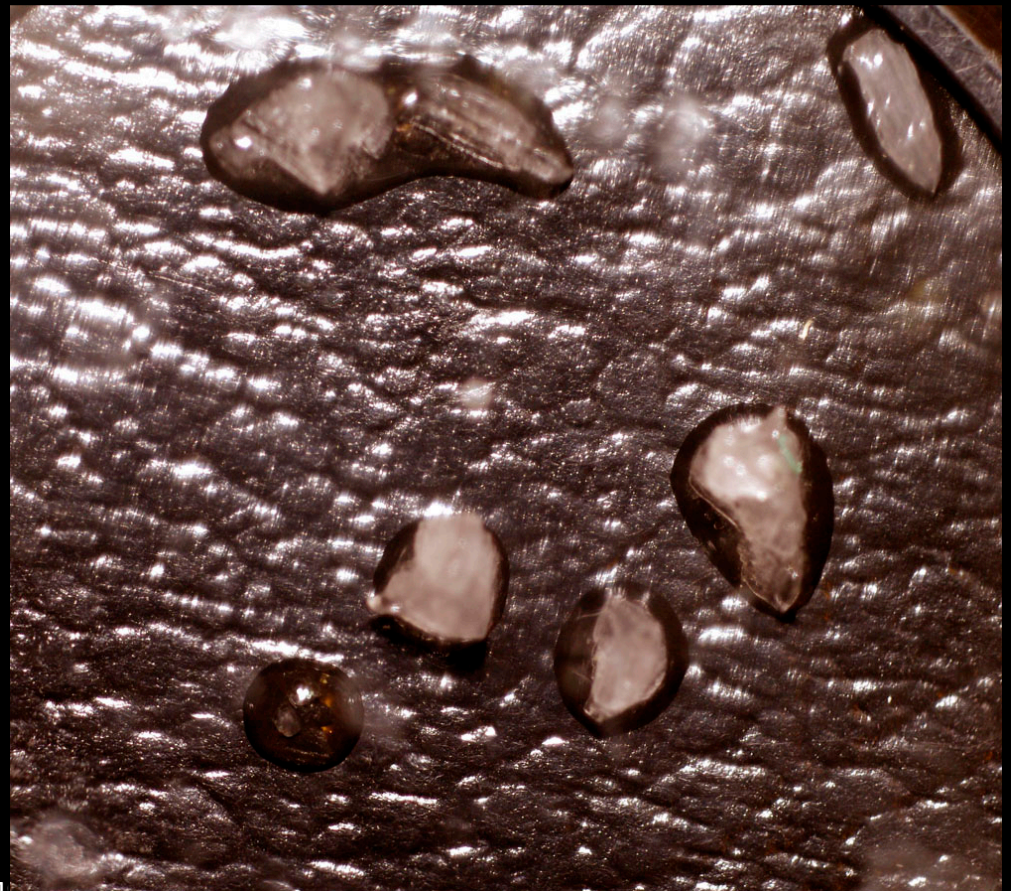
meteore sotterranee

- 3) miscela di arie umide a diverse temperature
 - nuvole da mescolamento



meteore sotterranee

- 4) processi di Raoult



meteore sotterranee

- Tutti questi processi, ancora poco chiari, sono molto importanti perché la condensazione sulle pareti gioca sicuramente un ruolo chiave nell'allargare le grotte e i canyon.

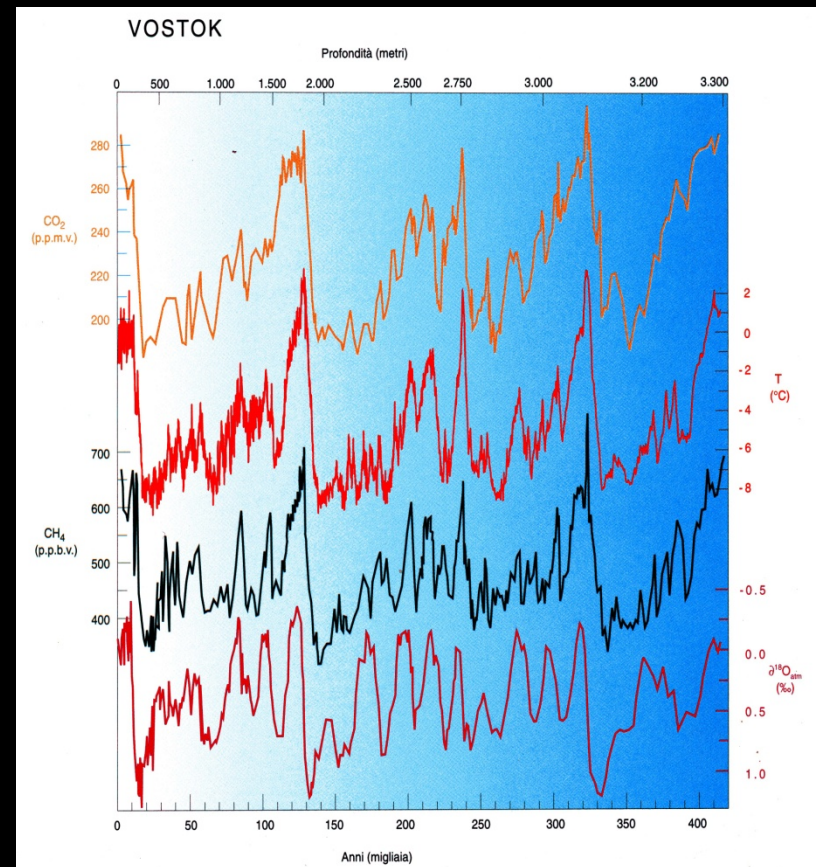


5. Cambiamenti climatici globali

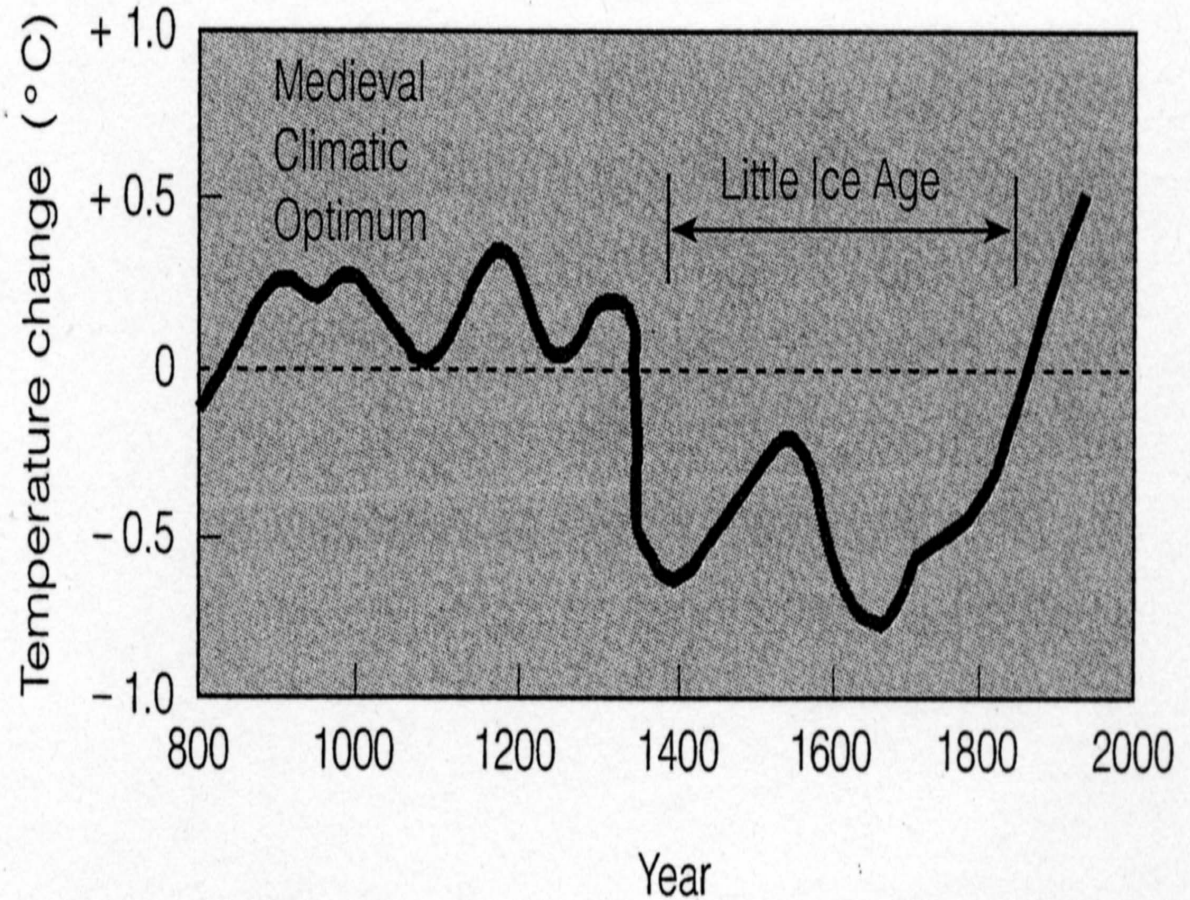
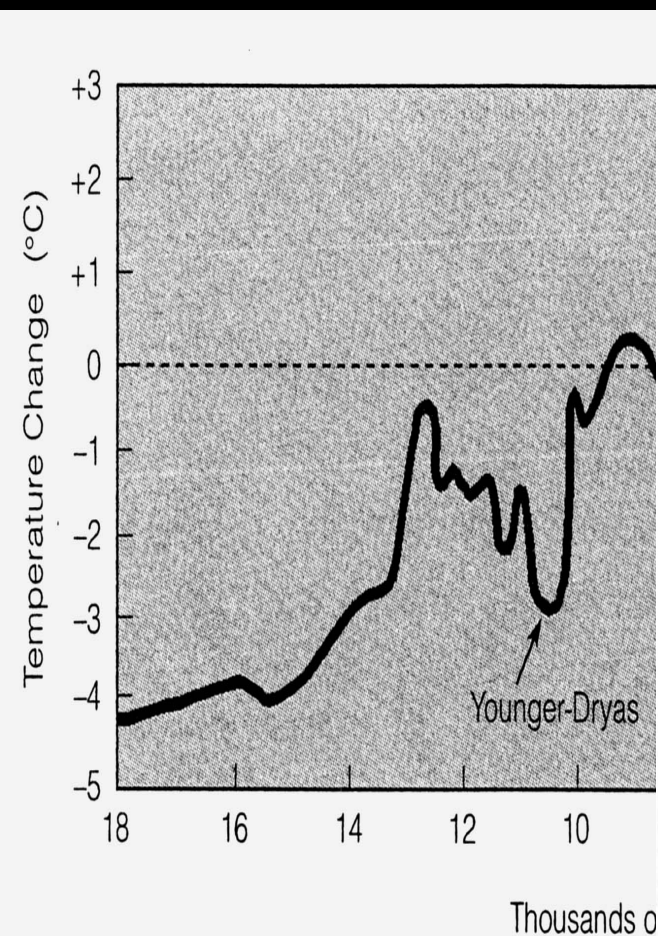
- **Abbiamo supposto una costanza delle condizioni.**
- **Questo ha senso su tempi brevi, ma se abbiamo a che fare con tempi lunghi dobbiamo includere nei calcoli i cambiamenti climatici generali.**

GCC – Lungo periodo

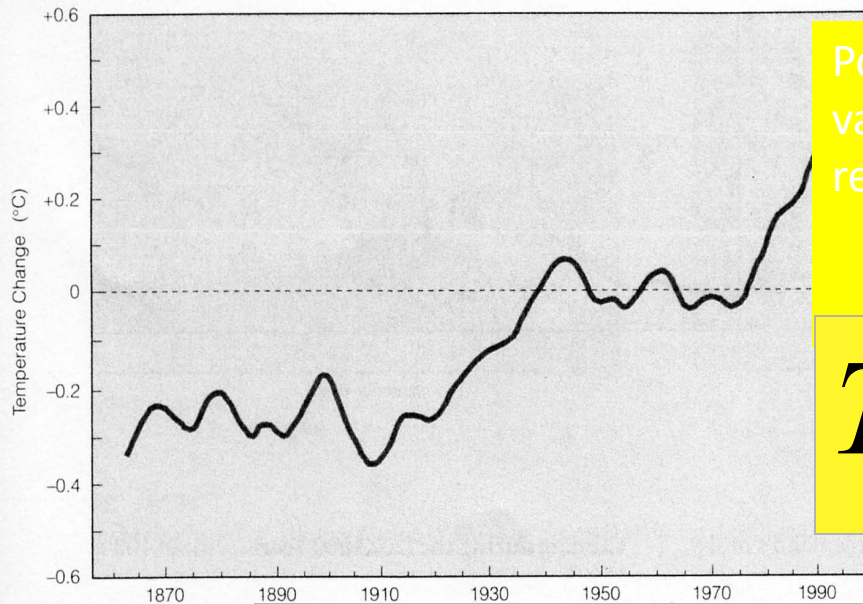
- Le trivellazioni in Antartide e Groenlandia hanno dato il clima terrestre nell'ultimo mezzo milione di anni.
- Ci sono variazioni di quasi 10 °C in periodi dell'ordine di 105 a.



GCC – Medio periodo



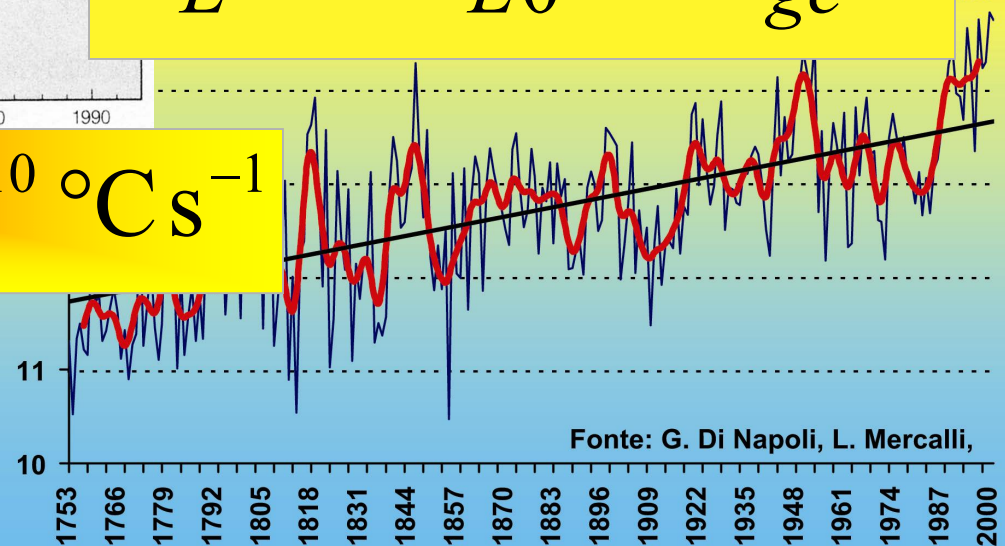
GCC – Breve periodo



Possiamo sempre approssimare la variazione di temperatura con una linea retta, cioè

$$T_L = T_{L0} + r_{gc} t$$

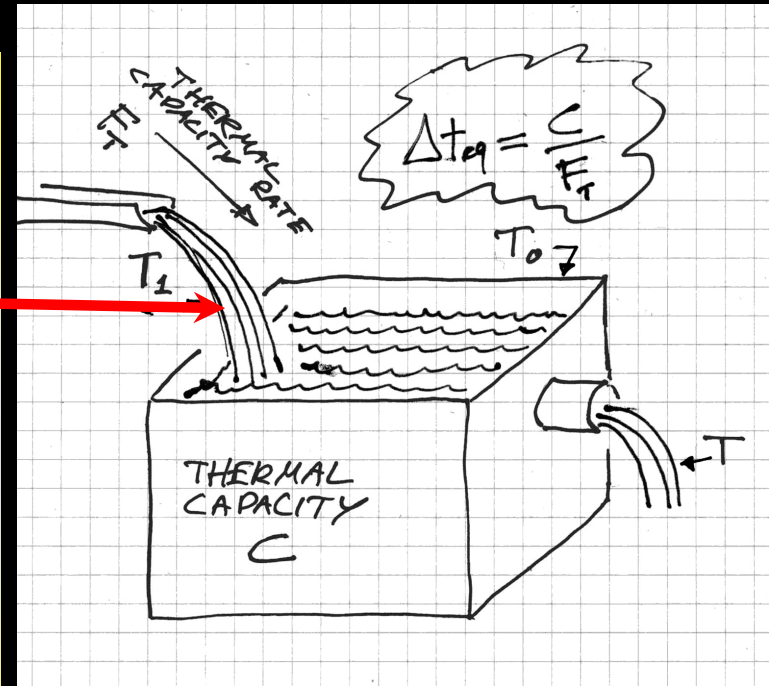
$$r_{gc} = 4 \times 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C s}^{-1}$$



Cambio climatico in grotta

- Nell'esempio iniziale della grotta come filtro, abbiamo che la temperatura in ingresso è $T_L = T_{L0} + r t$
- Se assumiamo che a $t=0$ la grotta sia in equilibrio con l'ambiente $T_{L0} = T_0$

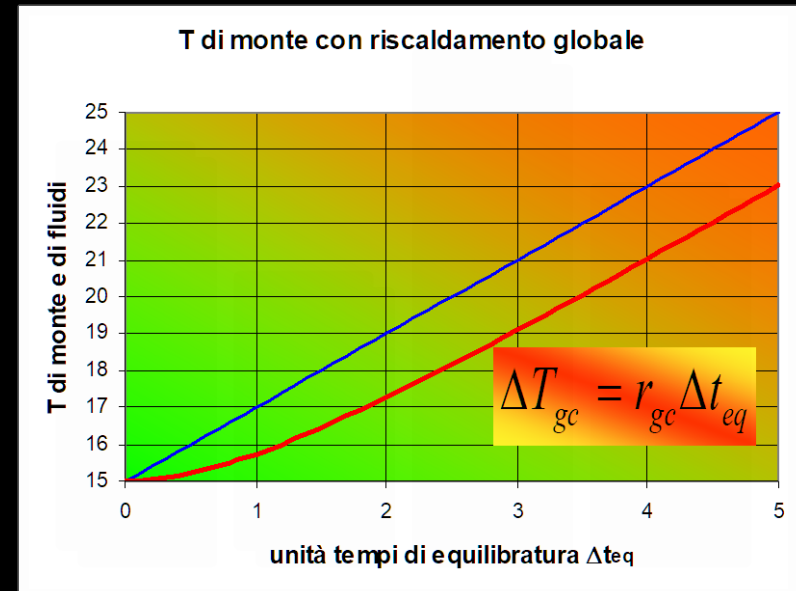
$$T - (T_{L0} + r_{gc} t) = r_{gc} \Delta t_{eq} \left[\exp\left(-\frac{t}{\Delta t_{eq}}\right) - 1 \right]$$



$$\Delta T_{gc} = r_{gc} \Delta t_{eq}$$

L'equilibrio irraggiungibile

- E' la differenza di temperatura fra montagna ed atmosfera per GCC.
- La capacità termica intermedia impedisce che i due sistemi rimangano in equilibrio termico.



Conclusioni

- Le grotte causano l'inclusione delle montagne carsiche nell'atmosfera terrestre.
- Le montagne con carsismo profondo hanno essenzialmente la temperatura media locale dell'atmosfera.
- Le loro enormi capacità termiche le fanno agire come filtri passa-basso coi fluidi in transito e creano un ritardo nei processi di equilibratura fra l'atmosfera e la montagna.
- Questi ritardi impediscono alle montagne di seguire in modo sincrono i cambiamenti climatici e mantengono un disequilibrio termico che causa grossi flussi di energia fra le grotte e l'atmosfera.

