

Caratteristiche geologiche e microclimatiche della “Grotta che Fuma” nei Monti di Gubbio (233 U/PG)

MARCO MENICHETTI¹, STEFANO TOSTI²

Riassunto

La Grotta che Fuma è una piccola cavità di alcuni metri di lunghezza localizzata nel Preappennino umbro in Italia centrale a circa 6 km a NW della città di Gubbio. La grotta si sviluppa nei calcari del Cretaceo, lungo una frattura orientata E-W. Tutta la valle è interessata da deformazioni gravitative profonde in roccia, la cui morfologia è controllata da faglie e da un intenso sistema di fratture.

La registrazione oraria continua della temperatura dell'aria interna ed esterna della grotta, protratta per quattro cicli stagionali, ha permesso di descrivere il comportamento del flusso dell'aria attraverso la grotta. La circolazione dell'aria avviene con un meccanismo noto come “effetto camino” o “tubi di vento”. Nel periodo invernale, quando l'aria esterna ha una temperatura inferiore a 12,4 °C, la grotta soffia aria calda satura di umidità, con una temperatura che progressivamente si raffredda da circa 18 °C in autunno fino a 12,4 °C in primavera. Nel periodo estivo la circolazione dell'aria avviene in senso opposto e la grotta aspira aria esterna. Il flusso è controllato in direzione ed intensità dalla differenza tra la densità dell'aria interna ed esterna che raggiunge le molte decine di Pa. I dati acquisiti permettono di schematizzare il sistema come un semplice scambiatore di calore con un tubo cilindrico in roccia all'interno del quale fluisce aria. Uno dei parametri fondamentali di questo meccanismo, la superficie di scambio termico, è stata stimata in oltre 10⁴ m², che è ben rappresentata dal sistema di fratture esistenti.

Parole chiave: meteorologia ipogea - effetto camino - tubo di vento - Preappennino umbro Italia.

Abstract

The Grotta che Fuma (smoking cave) is a small cave of few meters, located in the Umbrian Preappennines in Central Italy, about 6km NW of Gubbio town. The cave develops in the Cretaceous limestone along a E-W oriented fractures. The whole valley is affected by deep seated rock-slide where the unstable area is controlled by faults and intense fractures systems. A continuous hourly record of air temperature inside and outside of the cave for four seasonal cycles permit to describes the behaviour of the air flow through the cave. The air circulation pattern in the cave is related to the “chimney effect” or “wind tube” behaviour. In the winter period, when the external air temperature is below 12,4 °C, the cave blow out saturated warm air, with a temperature that progressively colder from 18 °C in autumn, to 12.4 °C in the spring time. In the summer time the air circulation is opposite and the cave breath the external warm air. The flow is controlled in the direction and in the inten-

¹ menichetti@uniurb.it - Istituto di Scienze della Terra - Università di Urbino - Urbino

² tosti_stefano@yahoo.it - Speleo Club Gubbio - Gubbio

sity by the difference, of many tents of P_a , of the air density inside and out side the cave. The acquired data permit to model the system as a heat exchanger where flow the air inside a simple tube inside the rock. The estimate exchange surface, of more than 10^4 m^2 , is easily provided by the fracture systems. **Keywords:** cave microclimate - chimney effect - wind tube - Umbrian Preappennines Italy.

Introduzione

Nella valle del T. Assino, situata circa 6 km a NW della città di Gubbio, è nota da sempre agli abitanti del luogo una piccola cavità dalla quale nei mesi invernali esce un pennacchio di “fumo” costituito da una colonna d’aria in condensazione. Questa

cavità è conosciuta con il suggestivo nome di “Grotta che Fuma” e registrata al catasto speleologico dell’Umbria con la sigla 233U/PG. Dal 1974 lo Speleo Club di Gubbio si occupa dello studio di questa grotta effettuando numerose campagne di misure della temperatura interna del-

l’aria in diverse stagioni (Menichetti, 1981).

Il movimento di masse d’aria all’interno di cavità nel sottosuolo è un fenomeno abbastanza comune soprattutto in aree carsiche dove sono presenti importanti sistemi sotterranei (Crestati & Anelli, 1939; Cigna, 1978; Choppy, 1986; Lismonde, 2002a). La differente densità dell’aria sotterranea rispetto a quella esterna fa sì che si formi un flusso interno/esterno che viene indicato da diversi Autori come “effetto camino” (Choppy, 1986), “circolazione a tubi di vento” (Cigna, 1978), oppure “circolazione convettiva” (Badino, 1995). Tale meccanismo di flusso è noto anche nell’ingegneria del condizionamento dell’aria di edifici. In questo campo infatti sono stati elaborati numerosi modelli basati soprattutto sulla differenza di temperatura tra esterno ed interno (Webb & Kim, 2005).

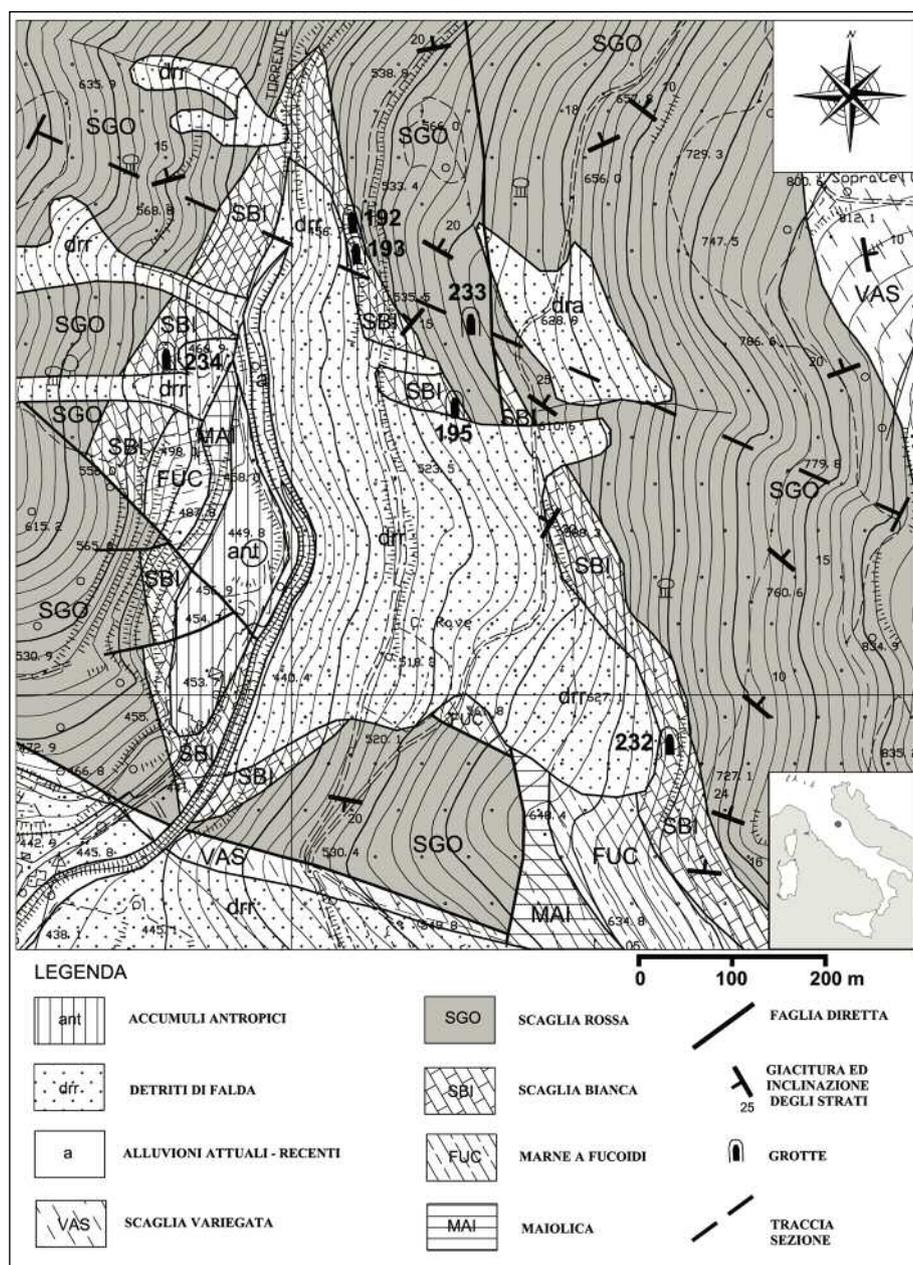


Fig. 1 - Carta geologica dell'area con ubicazione delle grotte

La dinamica dei movimenti di masse d'aria all'interno di complessi sistemi carsici che hanno aperture localizzate a quote molto diverse è nota solo parzialmente attraverso studi teorici (Cigna 1978; Badino, 1995), misure occasionali (Saar, 1955; Bakalowicz, 1972) oppure le conoscenze sono limitate a sistemi carsici dotati di reti di monitoraggio complesse (Renault, 1961; Wigley, 1967; Andrieux, 1972; De Freitas *et al.*, 1982; Massen, 1997; Lismonde, 2002a, 2002b; Galdenzi & Menichetti, 2002). L'installazione di alcuni sensori remoti nella "Grotta che Fuma" ha permesso recentemente di acquisire serie storiche temporali significative su un arco di quattro stagioni. La temperatura all'interno della grotta e simultaneamente all'esterno è stata rilevata a cadenza oraria per oltre tre anni ed ha permesso di raccogliere circa 30.000 misure. L'analisi di questa serie temporale consente di riconoscere la dinamica della circolazione sotterranea dell'aria di questa piccola cavità e permette l'elaborazione di un modello sul microclima sotterraneo dell'area carsica.

Il clima dell'area

La grotta è ubicata in sinistra orografica nella valle percorsa dal Torrente Assino orientata circa nord-sud, compresa tra la il versante nord-occidentale del Monteieto (945 m s.l.m.) e il versante sud-orientale del M. di Loreto (774 m s.l.m.) (Menichetti, 1981) (Fig. 1). L'area montuosa che geograficamente appartiene al Preappennino umbro, ha un'altitudine media di 650 m s.l.d.m. ed è sita a circa 6 km a NW del centro storico della città di Gubbio. Tutta la valle è disabitata, l'utilizzo del suolo è di tipo prevalentemente agricolo con uliveti e vigneti nella fascia pedemontana. Bosco ceduo, lecceta e rimboschimenti a conifere sono presenti lungo i versanti a diverse quote, fino al prato-pascolo delle parti sommitali dei rilievi. Numerosi sono gli interventi antropici che hanno nel tempo modificato la morfologia dell'area: agricoltura, disboscamenti, rimboschimenti, cave e strade. Il regime climatico della regione può essere classificato del tipo *sub-continentale*, tipico della montagna appenninica, anche se è influenzato da fattori locali, legati all'assetto orografico complessivo delle vallate e dei gruppi montuosi principali circostanti.

La caratterizzazione del regime climatico è stata

ottenuta mediante un climogramma derivato dalle serie storiche di oltre 50 anni, relative alle stazioni meteorologiche di Gubbio e di San Benedetto, situate a qualche km di distanza (Regione Umbria, 2006). Il confronto piogge/temperature medie, mostra una buona correlazione stagionale nei valori, dalla quale si evidenzia come nei mesi di giugno, luglio, agosto e settembre si possano raggiungere nell'area, condizioni di aridità, mentre nel mese di gennaio si hanno periodi freddi prossimi al gelo (media di 3 giorni/anno con $T_{max} < 0^{\circ}C$) (Fig. 2).

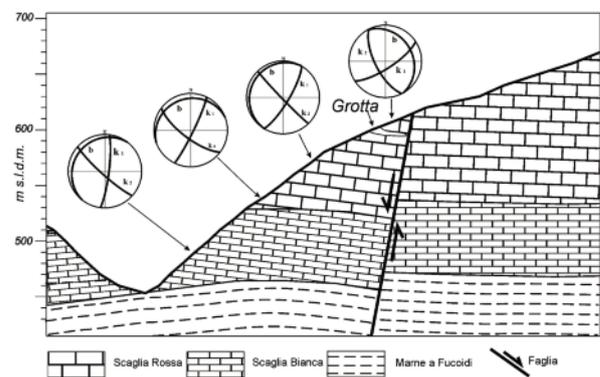


Fig. 2 - Sezione geologica con riportati gli stereogrammi (Reticolo di Schmidt emisfero inferiore) delle principali discontinuità (k1, k2) e della stratificazione (b).

L'andamento medio annuale della pioggia, negli ultimi 30 anni (Fig. 2), relativo al pluviometro situato nei pressi della città di Gubbio indica un valore medio di 1011 mm. Nel computo si è tenuto conto anche delle precipitazioni nevose che si hanno in media 4 giorni l'anno, mentre la persistenza del manto nevoso al suolo è in media di 5 giorni l'anno. I mesi autunnali sono quelli con maggiori apporti, con massimi di nel mese di novembre, mentre precipitazioni significative si hanno anche nel periodo primaverile. Il periodo più siccitoso è ovviamente quello estivo, con minimi nel mese luglio.

La temperatura media annua dell'aria riferita alla stazione di Gubbio è di $13.1^{\circ}C$ con modeste variazioni annue, mentre l'andamento medio mensile ricalca il ciclo stagionale, con i mesi più freddi in inverno, e la temperatura media mensile più bassa in gennaio, mentre i mesi più caldi in estate hanno i loro massimi in luglio ed agosto (Menichetti, 1999). Il regime anemometrico è di

difficile definizione in quanto mancano misure eseguite in stazioni prossime alla zona in esame. I venti principali soffiano da SW e da NE. I primi, più frequenti e più caldi, portano piogge, mentre i secondi, provenienti dai quadranti settentrionali, sono freddi e secchi. Il regime dei venti e la presenza di brezze sono influenzati in maniera significativa dall'orientamento della valle e dall'orografia dell'area in genere (Menichetti, 1999).

Geologia dell'area

La valle in cui si trova la "Grotta che Fuma" si apre nella parte nord-occidentale della struttura anticlinale dei monti di Gubbio. Questa grande piega è caratterizzata dalla presenza nel suo fianco occidentale di una faglia diretta che ha ribassato la parte SW dell'anticlinale di oltre 1000 m formando una depressione occupata oggi dalla pianura eugubina. La struttura plicativa originale è il risultato prodotto da un campo di sforzi regionali di tipo compressivo che è iniziato nel Miocene sup.. Successivamente tale struttura è stata dislocata ad opera di una tettonica tensionale Plio-pleistocenica (Menichetti & Pialli, 1986). Questa fase tettonica, tutt'ora attiva, ha ribassato velocemente i livelli di base dei corsi d'acqua, come appunto il T. Assino innescando fenomeni di erosione accelerata, con arretramento delle testate delle valli trasversali e conseguente cattura degli alvei dei torrenti paralleli alla struttura compressiva. Il risultato visibile oggi è la presenza di valli profonde e in alcuni tratti incassate che attraversano trasversalmente la struttura calcarea come appunto la valle del T. Assino. Quest'ultima presenta una distanza massima tra gli spartiacque di circa 1 km e taglia la catena montuosa per una lunghezza di circa 2 km in direzione nord-sud. Il dislivello lungo l'alveo è di 30 m e supera i 400 m sui versanti che sono generalmente ripidi e a tratti scoscesi. Sono presenti pareti di roccia sub-verticali, con inclinazioni medie che vanno dai 30° in sinistra orografica ai 36° in destra orografica (Fig.1).

L'attuale assetto morfologico del versante in cui si apre la grotta è condizionato dalla litologia e dalla tettonica. Nelle zone di affioramento dei litotipi calcarei e calcareo-marnosi più competenti la morfologia è più aspra con faccette triangolari, pareti verticali coincidenti spesso con superfici di faglia e lineazioni tettoniche secondarie. Nei tratti

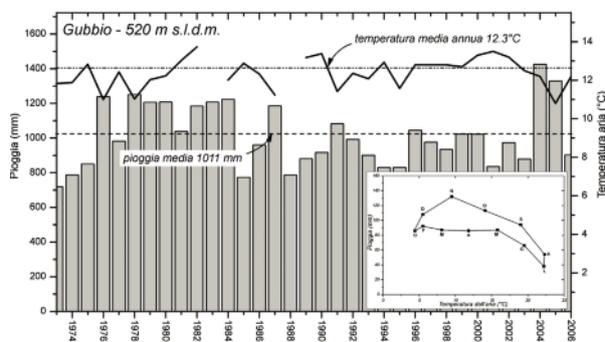


Fig. 3 - Piogge e temperature alla stazione meteorologica di Gubbio dal 1973-2006. Nel riquadro interno, climogramma della zona di Gubbio costruito sulla base di dati degli ultimi 60 anni.

dove affiorano le formazioni marnose e marnoso-arenacee il modellato superficiale è più dolce con cime arrotondate e versanti poco inclinati.

La stratificazione nei calcari rosati della Scaglia è netta e nei dintorni della grotta, i piani di strato sempre poco inclinati, immergono verso nord-est per effetto di trascinamento dovuto alla vicinanza di una faglia diretta (Fig.1 e Fig.2). Allontanandosi la stratificazione immerge sempre più verso nord-ovest con inclinazione crescente, trattandosi di una terminazione periclinale.

Tutta la parte medio bassa del versante del Monteieto, in cui si apre la grotta, è interessata da fenomeni gravitativi e a sud della cavità è ben visibile la presenza di un vasto movimento franoso quiescente ricoperto da detrito di versante. Allo stesso modo lungo la strada comunale che attraversa la valle sono ben visibili fratture riempite di detrito e anche in parte beanti che seguono le principali lineazioni tettoniche (Fig. 1).

Il bacino idrografico del T. Assino che percorre la valle tra le quote 470 e 440 m s.l.d.m. si estende invece per alcuni km nel settore nord-orientale, comprendendo anche la fascia preappenninica. Il corso d'acqua ha un andamento subrettilineo con alveo in roccia condizionato dalla fitta rete di fratture. Il reticolo idrografico è inesistente all'interno della struttura calcarea a causa della sua alta permeabilità, mentre più a nord dove affiorano terreni marnosi poco permeabili, presenta un pattern dendritico gerarchizzato. Il regime del corso d'acqua è strettamente legato alle precipitazioni con periodi anche prolungati di mancanza d'acqua. In occasione di periodi piovosi di una certa entità si osservano anche apporti di sub-alveo. La Grotta

che Fuma si apre nel membro inferiore con selce dei calcari rosati del Cretaceo medio (Fig. 1) (Menichetti, 1981). Nella zona affiorano i terreni appartenenti alla Successione stratigrafica umbromarchigiana compresa tra la parte alta del Calcarea Maiolica di età Cretaceo inferiore ed i sedimenti marnosi della Scaglia Cinerea dell'Oligocene. Quest'ultima è costituita da litofacies marnoso-calcaree e subordinatamente calcareao-micritiche, nella parte basale, marne argillose in quella superiore, in strati mal definiti e dello spessore di 10-30 cm. La colorazione tipica è grigio cenere o grigio verdastro, mentre la parte inferiore assume toni rossastri simili a quelli della sottostante Scaglia Variegata. La potenza osservabile è di circa 80 m ed affiora nel versante NE del M. di Loreto e del Monteieto. In continuità stratigrafica si ha la Scaglia Variegata la cui età si estende dall'Eocene medio p.p. alla base dell'Eocene superiore. E' costituita da alternanze policrome di calcari marnosi, marne calcaree in strati da 5 a 25 cm. La potenza è variabile e mediamente è di 40 m ed affiora con continuità lungo una stretta fascia caratterizzata da strati subverticali nelle parte nord-orientale del M. di Loreto e del Monteieto (Fig. 1). La Grotta che Fuma si sviluppa all'interno della Scaglia Rosata costituita da strati calcarei, calcareao-marnosi e marnoso-calcarei di età compresa tra il Turoniano e l'Eocene medio p.p.. La stratificazione è netta in strati di spessore variabile da 15 a 50 cm con una potenza complessiva di circa 250 m. Il colore è rosso mattone con zone a toni biancastri o grigi. Questa unità è suddivisibile in tre membri di cui quelli inferiore e superiore con prevalente componente calcarea, associata a liste e noduli di selce rossa e quello centrale decisamente più marnoso e senza selce. Le cavità della Valle dell'Assino si sviluppano all'interno di questa formazione. Al di sotto è presente la Scaglia Bianca di età Cenomaniano medio-Turoniano medio, che giace in continuità stratigrafica sulle sottostanti Marne a Fucoidi. E' costituita da calcari e calcari marnosi di colore biancastro in strati di 15-35 cm., intercalati da liste e noduli di selce nera con uno spessore complessivo di circa 60 m. Le Marne a Fucoidi sono costituite da quasi 100 m di marne e marne argillose policrome e da marne calcaree e calcari marnosi di età compresa tra l'Aptiano p.p. e il Cenomaniano p.p.. Esse costitui-

scono un livello a bassa permeabilità che rappresenta un importante acquicludo tra l'acquifero della Maiolica e quello della Scaglia. La Formazione della Maiolica di età compresa tra il Titonico superiore e l'Aptiano inferiore è costituita da calcari micritici bianco avorio, a frattura concoide, con liste e noduli di selce grigia e scura. La stratificazione è piuttosto netta e gli strati hanno uno spessore medio di 30-40 cm, ma in alcuni casi possono raggiungere il metro, mentre la potenza complessiva è di circa 250 m. All'interno di questa formazione si sviluppano molti sistemi carsici nei Monti di Gubbio e in tutto l'Appennino in generale. Al di sopra di questi sedimenti di origine marina, sono presenti depositi continentali legati soprattutto al continuo smantellamento degli affioramenti rocciosi ad opera degli agenti esogeni, azione favorita dalle condizioni litostratigrafiche e tettoniche presenti. Il detrito di falda è presente con estese coperture alla base di tutte le pareti rocciose lungo la valle del T. Assino. È costituito da una ghiaia poligenica formata da clasti calcarei e calcareao-marnosi, a spigoli vivi, eterometrici, immersi in una matrice sabbioso-argillosa rossastra con sorting basso e una distribuzione con andamento polimodale con classi granulometriche più rappresentate comprese tra 0.5 e 5 cm. Le principali discontinuità tettoniche sono costituite da piani di taglio diretti legati a strutture estensionali immergenti a SW che tagliano strutture compressive inclinate verso NE. Piani di taglio a direzione N-S ed E-W sono ricollegabili alle faglie minori trascorrenti rispettivamente destre e sinistre presenti lungo la Valle dell'Assino. L'analisi della fratturazione nell'area della Grotta che Fuma ha mostrato la presenza di due sistemi di joints subverticali (k1 e k2 - Fig. 2) allineati lungo la direzione NW-SE e NE-SW (Fig. 2). La loro frequenza è direttamente legata sia allo spessore della stratificazione che alla prossimità di faglie importanti. Questi sistemi di fratture costituiscono anche le direttrici principali del drenaggio sotterraneo. L'apertura delle singole fratture, che condiziona poi la conducibilità idraulica della massa rocciosa, è legata negli strati calcarei all'impostazione di una certa corrosione carsica lungo i lati della frattura, mentre nei livelli più marnosi le fratture tendono ad essere parzialmente riempite da argille.

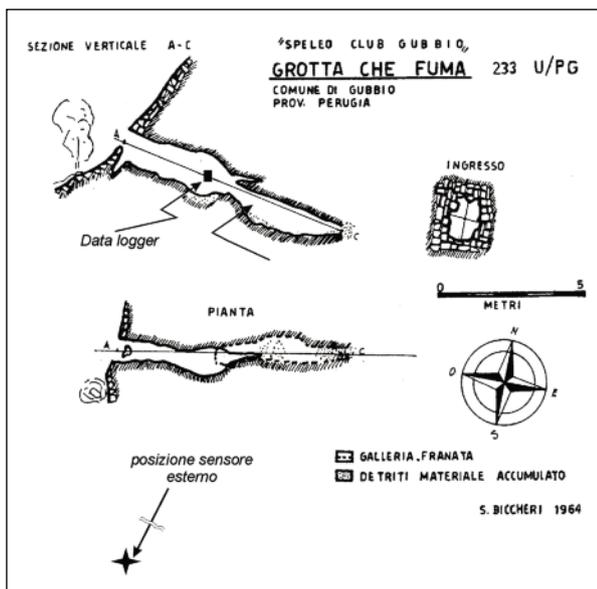


Fig. 4 - Rilievo della grotta con ubicazione del posizionamento dei sensori termometrici.

La grotta

La Grotta che Fuma è nota da sempre agli abitanti del luogo ed è registrata al Catasto Speleologico dell'Umbria con il numero 233 U/PG (Fig. 4). Si apre sul versante ovest del Monteieto a circa 605 metri s.l.m. alla base di una piccola parete di roccia di circa 5 metri di altezza, nei pressi della strada sterrata che dall'abitato di Monteieto, conduce a C. Monte Sopra Celle (Menichetti, 1981). L'ingresso, di forma quasi rettangolare, ha un'altezza di circa 1,5 metri ed una larghezza di 0,7 m. Tutta la zona intorno all'ingresso della grotta è ricoperta da vegetazione costituita soprattutto da muschio che maschera dei grossi massi instabili presenti sulla volta. Superato l'ingresso, il pavimento, costituito di terriccio rosso come i calcari delle pareti, si presenta in discesa abbastanza ripida per poi terminare dopo circa 7 metri tra massi crollati. Intorno alla grotta e alla base della parete rocciosa la zona è interessata da fratture beanti e massi di crollo.

Nei mesi invernali, dall'ingresso esce aria calda ed umida e nelle mattinate con temperature nettamente sotto lo zero, dalla cavità si diparte un tenue pennacchio di condensazione e tutta l'area è avvolta da una sottile nebbiolina. In occasione di precipitazione nevose, nell'area della cavità, su una superficie di circa 50 metri di diametro, la neve viene fusa rapidamente. Nei mesi estivi invece varcato l'ingresso, non si avvertono variazioni nette

di temperatura come succede solitamente entrando in un ambiente sotterraneo.

Nella valle del T. Assino sono note altre grotte, sempre di modeste dimensioni, connesse alle principali faglie e fratture. Vanno segnalate tra l'altro la I° e la II° Grotta dell'Assino (192 e 193 U/PG), cavità di qualche decina di metri di sviluppo, localizzate su una frattura che corre lungo il versante poco al di sotto della Grotta che Fuma (Fig. 1). Queste due grotte non presentano al loro interno una circolazione di aria apprezzabile.

Nel versante opposto del M. di Loreto si apre la Grotta delle Capre (234 U/PG), una condotta di una decina di metri, che rappresenta probabilmente una paleo-risorgente.

Misure

La cavità era stata esplorata dallo Speleo Club Gubbio nel 1964 che ne aveva anche curato il rilievo (Fig. 4). Successivamente tra l'estate 1973 e l'inverno 1974, in una rivisitazione fu notata la presenza nei mesi invernali di aria calda che usciva dall'ingresso. Le misure di temperatura effettuate a varie distanze dall'ingresso e ripetute in diverse stagioni avevano messo in evidenza come la circolazione dell'aria all'interno della cavità fosse influenzata da variazioni della temperatura esterna nelle diverse stagioni (Menichetti, 1981).

A partire dal luglio del 1994 è stato installato nella grotta un acquirente automatico (data-logger) di temperatura, provvisto di due sensori. Il primo è stato posizionato quasi al fondo della cavità tra i massi crollati da dove sembra provenire il flusso d'aria maggiore. Il secondo sensore è stato posto all'esterno a circa 10 metri dall'ingresso verso est, montato su un'asta a due metri d'altezza dal suolo all'interno di un piccolo alloggiamento debitamente schermato per la pioggia e il sole (Fig. 4). Il data-logger è stato poi programmato per acquisire misure simultanee di temperatura dai due sensori esterno/interno ad intervalli orari. L'intento era quello di verificare l'andamento della temperatura interna rispetto a quello di quella esterna ed eventuali relazioni tra le due. La stazione è stata fatta funzionare per circa tre anni e mezzo ed ha acquisito 29.148 misure di temperatura in continuo (Fig. 5). La temperatura media esterna dell'aria nel periodo studiato è stata di 12,5°C, mentre quella della grotta è di 16,2°C. Quest'ultimo valore

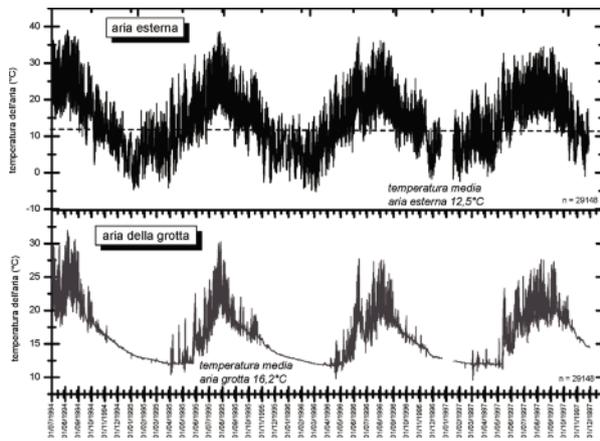


Fig. 5 - Temperature dell'aria esterna e della Grotta registrate con cadenza oraria dal 1994 al 1997.

ovviamente risente delle temperature dell'aria in entrata durante l'estate, mentre nel periodo invernale la temperatura varia tra i 18°C e i 12°C, con una media di circa 15°C (Fig. 7). Il grafico della temperatura dell'aria all'esterno della cavità mostra un tipico andamento sinusoidale a scala annuale dovuto all'alternanza delle stagioni estate-inverno. In dettaglio si osservano oscillazioni a scala giornaliera dovute all'alternanza notte-giorno o a variazioni a scala giornaliera delle condizioni meteorologiche. La temperatura dell'aria all'interno della cavità mostra in estate un andamento che ricalca quasi perfettamente quello della temperatura dell'aria esterna indicando chiaramente che la grotta aspira durante questa stagione. In inverno l'aria che esce dalla grotta, a temperatura maggiore di quella esterna, tende a diminuire progressivamente la sua temperatura secondo una curva di decadenza esponenziale. Questo processo di raffreddamento va avanti fino a quando si raggiunge il valore di circa 12.5°C, che coincide con la temperatura media dell'aria esterna nella zona della grotta. Quindi schematizzando la grotta aspira aria dall'esterno in estate riscaldando la galleria di accesso, mentre in inverno il processo si inverte e soffia aria fuori raffreddandosi (Fig. 5).

Analizzando diversi periodi in dettaglio, si nota anche che l'inversione del flusso d'aria all'interno della cavità avviene nei mesi di ottobre ed in aprile. Infatti, quando in primavera la temperatura media giornaliera esterna sale oscillando intorno ai 12.4°C, la grotta inverte il flusso (Fig.7). Stessa cosa succede in autunno quando all'esterno la temperatura media scende sotto ai 12.4 °C l'aria

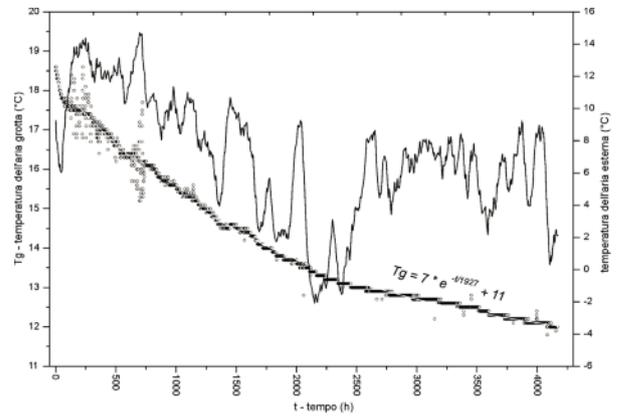


Fig. 6 - Temperatura dell'aria esterna ed interna della Grotta durante la primavera 1995 quando si ha inversione della circolazione

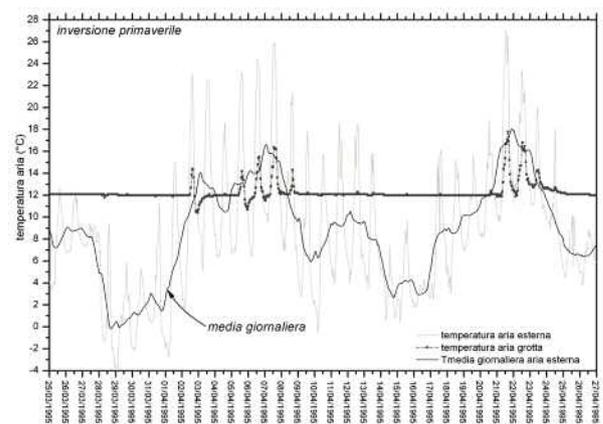


Fig. 7 - Variazione oraria della temperatura dell'aria in uscita dalla Grotta nel periodo invernale (cerchi) e media giornaliera della temperatura dell'aria esterna (linea tratteggiata). È riportata la curva di correlazione esponenziale ($r^2=0.99$) del raffreddamento dell'aria in uscita.

inizia ad uscire dalla cavità provocando quel progressivo raffreddamento delle pareti che si concluderà la primavera successiva quando la grotta ricomincerà ad aspirare aria calda dall'esterno. Va notato anche che la grotta reagisce molto velocemente alla variazione della temperatura media esterna. Difatti durante irruzioni fredde di breve durata, tipiche del clima primaverile appenninico, avvengono veloci inversioni del flusso d'aria all'interno della cavità nell'arco di poche ore (Fig.7). La velocità di flusso misurata in diversi periodi invernali indica valori medi di circa 1.0 m/s che corrispondono ad una portata di poco superiore al m³/sec. L'aria in uscita dalla grotta presenta una composizione simile a quella dell'aria esterna con concentrazione di O₂ di circa 21% e di CO₂ di circa 0.04%.

Modello di circolazione dell'aria

Sia il motore del movimento dell'aria all'interno di un sistema carsico con ingressi situati a quote differenti che gli scambi con l'esterno, sono direttamente controllati dalle diverse densità delle masse d'aria (Choppy, 1986; Lismode, 2002b). Questa differenza controlla sia la direzione di flusso che la sua intensità attraverso una relazione del tipo:

$$h = \rho_i - \rho_e \quad [1]$$

dove h è la pressione motrice dell'aria (misurata in Pascal) che potrà essere positiva o negativa a seconda dei valori di densità dell'aria interna ρ_i ed esterna ρ_e , cioè si avrà flusso in una direzione o in un'altra (Wigley & Brown, 1976). Il valore di h dell'aria può essere calcolato attraverso la relazione generale (Massen, 1997):

$$\rho = \Delta Z * M * T / T + t \quad [2]$$

dove ΔZ è la differenza di quota tra i due ingressi, M è la massa di volume dell'aria, T è la temperatura assoluta e t la temperatura interna o esterna considerata (Choppy, 1986).

I dati forniti dal monitoraggio della Grotta che Fuma, sembrano indicare che la cavità si comporta come ingresso alto in un sistema carsico con circolazione d'aria "a camino" o a "tubo di vento" (Choppy, 1986; Cigna, 1978). Infatti la cavità aspira aria nei mesi caldi e la espelle durante i periodi freddi. La temperatura all'aria in uscita dalla Grotta che Fuma in inverno non può essere riferita alla sola cessione di calore da parte della roccia. Il gradiente geotermico nella zona è di circa 25°C/km, mentre i valori di temperatura delle roccia a poche decine di metri di profondità stimati da quelli delle acque delle sorgenti, sono di circa 13°C (Zito *et al.*, 1993; Menichetti, 1993). Durante tutto il periodo la differenza di temperatura esterno/interno raggiunge anche i 18°C nelle giornate più fredde (Fig. 7). All'inizio del periodo invernale, quando il flusso si inverte l'aria che inizia ad uscire ha una temperatura più elevata di 4-5 °C in più rispetto all'aria esterna (Fig. 6). Questo sembra essere possibile solo considerando che il sistema, la massa rocciosa del versante, nel periodo estivo tenda ad accumulare calore che viene rilasciato poi durante la stagione fredda. Va inoltre considerato che l'aria in uscita dal sistema in inverno ha un'umidità relativa del 100%. Tale saturazione avviene sia per variazione della pressione lungo

il percorso, che attraverso il rilascio dell'acqua sotterranea presente lungo le pareti.

È possibile stimare, per il periodo invernale, la pressione motrice h all'interno del sistema carsico, calcolando i valori di densità attraverso la relazione [1]. Ipotizzando un dislivello ΔZ tra la Grotta che Fuma e la base del versante uguale a 200 m; la massa di volume d'aria della grotta che ha una temperatura di 15°C ed è satura di umidità, $M_i = 1,22 \text{ kg/m}^3$, mentre per l'aria esterna che ha una temperatura di 5 °C ed una umidità relativa del 60%, $M_e = 1,27 \text{ kg/m}^3$. La densità dell'aria interna varrà $\rho_i = 230,9 \text{ kg/m}^3$ mentre per quella esterna $\rho_e = 248,84 \text{ kg/m}^3$. La pressione motrice h dalla [1] varrà quindi -175 Pascal. Se applichiamo le stesse condizioni in estate con una temperatura esterna di 20 °C e una umidità relativa del 40% otteniamo una pressione motrice $h = + 71$ Pascal. Questa analisi da una prima indicazione sull'entità di alcune delle grandezze fisiche coinvolte nel fenomeno che in realtà molto più complesso e soprattutto non è stazionario. La densità dell'aria all'esterno varia durante l'arco della giornata anche a causa della fluttuazione della temperatura, mentre quella dell'interno rimane pressoché costante. L'andamento della pressione motrice sarà quindi estremamente variabile nel corso di tutta una giornata. Questo sarà in parte dovuto alle oscillazioni della pressione atmosferica, anche a scala locale, date dal vento e dal movimento di piccole masse d'aria lungo il versante. Infine vanno considerate anche le perdite di carico lungo le condotte sotterranee ed altri fenomeni termodinamici che interessano il flusso l'aria stessa.

Se esaminiamo la variazione della temperatura dell'aria in uscita dalla grotta in tutto il periodo invernale (Fig. 6) si nota come il sistema carsico tenda a riscaldare l'aria che vi entra e che questa a sua volta nel corso del tempo tenda a raffreddare il sistema stesso.

Il complesso carsico può essere visto come un semplice scambiatore di calore (Webb & Kim, 2005) aria/roccia dove la prima viene riscaldata nel corso del tempo (in inverno quando $T_e < 12,5$ °C) seguendo un andamento del tipo esponenziale che è funzione oltre che delle T_i e T_e anche della superficie di scambio (la roccia) attraverso la relazione:

$$T_i = A * e^{-t/B} + C \quad [3]$$

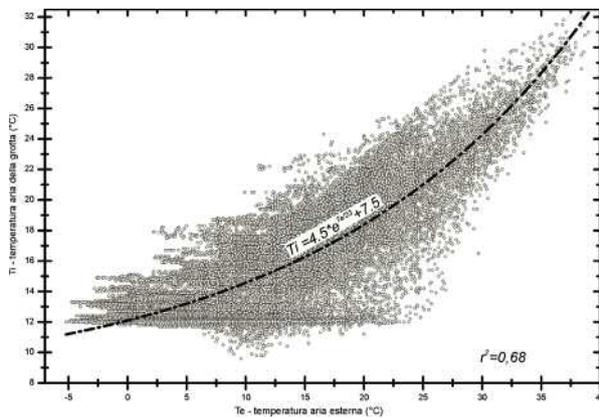


Fig. 8 - Correlazione tra la temperatura dell'aria interna ed esterna . È riportata la curva di correlazione esponenziale ($r^2=0.68$) . Vedi il testo per ulteriori commenti.

Dove: il coefficiente A dipende dal flusso termico globale che include anche la superficie di scambio; B vale il calore specifico e la portata del fluido; C è funzione della differenza di temperatura interno/esterno (Fig. 6). È possibile correlare tra loro i valori delle temperature dell'aria interna T_i con quella esterna T_e registrati nel corso delle diverse stagioni (Fig. 8). Si ottiene una relazione simile alla [3] che approssima molto bene l'equazione dello scambio termico (Webb & Kim, 2005). Ovviamente in quest'ultimo caso, il numeratore dell'esponente della [3] va sostituito con il valore della T_e in ingresso nel sistema.

È possibile quindi realizzare un modello molto semplice di questo sistema, costituito da una galleria in roccia all'interno della quale fluisce dell'aria e determinarne la geometria di scambio. La quantità di calore q scambiata attraverso questo sistema può essere descritta :

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad [4]$$

dove : U è la conduttanza termica globale, A è la superficie di scambio termico e ΔT è la differenza di temperatura in ingresso ed in uscita dal sistema (Webb & Kim, 2005). I termini $U \cdot A$ rappresentano la resistenza termica complessiva del sistema R , che è una funzione complessa, funzione tra l'altro sia della geometria delle superfici di scambio, del regime di flusso che delle modalità di trasferimento termico. Nel nostro caso le osservazioni geologiche e speleologiche dell'area indicano che questo modello è costituito da un articolato sistema di fratture che permettono un'alta efficienza nello scambio termico aria/roccia (Fig. 9). Il valore della

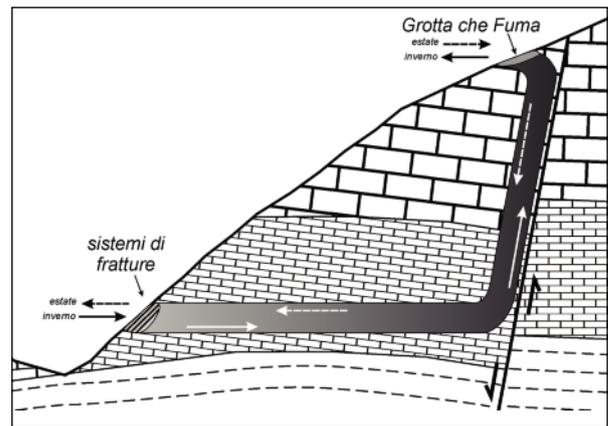


Fig. 9 - Modello di circolazione dell'aria. Legenda come in Fig. 2.

superficie A sarà quindi la sommatoria dell'area di ciascuna frattura, mentre l'efficienza dello scambio termico potrà valutarsi attraverso un coefficiente η . Esistono numerose soluzioni numeriche, più o meno complesse, utilizzate in ingegneria per dimensionare uno scambiatore di calore di questo tipo (Kuppan, 2000). Possiamo adottare una geometria cilindrica a correnti incrociate attraverso la quale sia ha un flusso di aria saturata, in regime turbolento di circa 1 m/sec, con una temperatura in ingresso di 5 °C e in uscita di 15 °C (valori medi da Fig. 7). Ponendo che il trasferimento termico avvenga principalmente per convezione, si ottiene una superficie di scambio equivalente di oltre 10⁴ m² (Anderson, 1989; Kuppan, 2000; Webb & Kim, 2005). Tale valore che sembra elevato rispetto alle dimensioni della grotta, in realtà si realizza abbastanza facilmente immaginando un sistema di fratture ad alta densità come quello presente nel versante in cui si apre la cavità.

Conclusioni

La Grotta che Fuma è un ingresso alto di un sistema di fratture carsificate che si sviluppa lungo il versante sinistro della valle del T. Assino alcuni km a NW di Gubbio.

La grotta è interessata da una circolazione d'aria "a camino", che nella stagione invernale soffia aria calda e in estate aspira aria dall'esterno. Le due condizioni di espirazione/aspirazione si realizzano quando la temperatura esterna scende al di sotto dei 12 °C circa. Condizioni che possono verificarsi anche nell'arco di poche ore, indicando una bassa inerzia complessiva del sistema. La

Grotta costituisce quindi l'ingresso a quota più elevata di un sistema carsico complesso con un accesso ubicato a quota inferiore. Da quest'ultimo, nel periodo invernale dovrebbe entrare aria fredda, che riscaldata e saturata in umidità, esce in alto dalla Grotta che Fuma. Il flusso dell'aria nella cavità in direzione ed intensità è direttamente connesso alla differenza di temperatura dell'aria esterna/interna e quindi ai diversi valori di densità delle due masse d'aria. Questo contrasto di densità è la pressione motrice del flusso e controlla tutta l'aerodinamica sotterranea stimata in alcune centinaia di Pascal. Nel periodo invernale l'aria che esce dal sistema, tende a raffreddarsi passando da oltre 18 °C fino a circa 12 °C. È possibile simulare questo andamento della temperatura, attraverso lo scambio termico aria/roccia su di una superficie di molte migliaia di m².

Lo sviluppo della Grotta che Fuma sembra essere collegato ad un sistema di fratture orientate NW-SE, presumibilmente legate ad una deformazione gravitativa profonda che interessa tutto il versante del Monteieto. Lungo questa rete di discontinuità, si sono sviluppate altre modeste cavità, connesse tra loro da fratture beanti che consentono il flusso e lo scambio termico aria/roccia all'interno del versante.

Il modello proposto, pur nella sua semplicità risulta essere consistente con i dati acquisiti e ulteriori contributi alla conoscenza della geometria del sistema sotterraneo, potranno derivare da misure quantitative continue di flusso dell'aria e di variazioni barometriche.

Bibliografia

ANDERSON H.L. (1989) - *A physicist's desk reference*. Am. Inst. Phys., N.Y.: 1-356.
 ANDRIEUX C. (1972) - *Contribution a l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques. V - Les bilans climatiques*. Ann. Spel., 26 (2): 367-386.
 BADINO G. (1995) - *I gradienti di temperatura nei monti: un indicatore esplorativo*. Talp-FST, 21: 72-80.
 BAKALOWICZ M. (1972) - *La rivière souterraine de Pinargözü (Taurus, Turquie)*. Ann. de Speleologie, 27 (1): 93-103.
 CHOPPY J. (1986) - *Dynamique de l'air. Phenomenes karstiques: processus climatiques*. Syntheses karstiques, 1: 1-72.
 CHOPPY J. (1986) - *Microclimats. Phenomenes karstiques: processus climatiques*. Syntheses karstiques, 4: 1-67.
 CIGNA A.A. (1971) - *An analytical study of air circulation in*

cave. Int. J. Spel, 3 (1-2): 41-54.

CIGNA A.A. (1978) - *Meteorologia ipogea*. In: Aa.Vv. "Manuale di speleologia". Longanesi Ed., Milano: 341-367.
 CRESTANI G., ANELLI F. (1939) - *Ricerche di meteorologia ipogea nelle Grotte di Postumia*. Mem. Ist. It. Spel., II: 1-161.

DE FREITAS C.R., LITTLEJOHN R.N., CLARKSON T.S., KRISTAMENT I.S. (1982) - *Cave climate: assessment of airflow and ventilation*. Journ. Clim., 2: 383-397.

LISMONDE B. (2002a) - *Vent des Ténèbres*. Vol. I, CDS Isère: 1-168.

LISMONDE B. (2002b) - *Aéologie des systèmes karstiques*. Vol. II, CDS Isère: 1-362.

GALDENZI S., MENICHETTI M. (2002) - *Il monitoraggio nelle Grotte di Frasassi: struttura della rete e nuove indicazioni sul microclima*. Le Grotte d'Italia, V, 3: 87-111.

KUPPAN T. (2000) - *Heat exchanger design handbook*. Dekker Ed., New York: 1-1119.

MASSEN F. (1997) - *The Moestroff Cave. A study on the Geology and Climate of Luxembourg's Largest Maze Cave*. Centre de Rec. Univ. Luxembourg: 1-79.

MENICHETTI M. (1981) - *Le grotte della valle dell'Assino*. Speleologia Umbra, II (1): 36-41.

MENICHETTI M., PIALLI G. (1986) - *Geologia strutturale del preappennino umbro tra i Monti di Gubbio e la catena del M. Petrano, M. Cucco (Appennino umbro - marchigiano)*. Mem. Soc. Geol. It., 35: 371-388.

MENICHETTI M. (1996) - *Bilancio energetico di una grotta turistica: la Grotta Grande del Vento a Frasassi (An)*. Proceeding of the International Symposium "Show caves and Environmental Monitoring", Cuneo: 211-223.

MENICHETTI M. (1999) - *Rapporto sulla concessione mineraria S. Donato*. Società Italiana Acque Minerali, Gubbio, Perugia: 1-126.

REGIONE UMBRIA (2006) - *Dati meteorologici stazione di Gubbio*. www.ambiente.regione.umbria.it

RENAULT P. (1961) - *Première étude météorologique de la grotte de Mouluis (Ariège)*. Ann. Spel., 16 (1): 39-45.

SAAR R. (1955) - *Die Dachstein-Rieseneishöhle nachst Overtraun und ihre Funktion als dynamische Wetterhöhle*. Jahrb. Oberösterreichischen Musealverein, 100: 264-319.

WEBB R.L., KIM N. (2005) - *Principles of Enhanced Heat Transfer*. Taylor & Francis Ed., NY: 1-795.

WIGLEY T.M.L. (1967) - *Non steady flow through a porous medium and cave breathing*. J. Geophys. Res., 72: 3199-3205.

WIGLEY T.M.L., BROWN M.C. (1976) - *The physics of caves*. In: Ford T.D. & Cullingford C.H.D. (Eds.). "The Science of Speleology". Academic Press, London: 329-358.

ZITO G., MONGELLI F., LODDO M. (1993) - *Temperature dependence of the thermal parameters of some rocks*. Boll. Geof. Teor. App., 35, 140: 437-445.