

Lo studio delle grotte

Esplorare le grotte

Molte sono le motivazioni che spingono alcuni uomini e donne verso la speleologia: per alcuni è l'aspetto sportivo, o tecnico, per altri il desiderio di avventure e di emozioni "forti", curiosità di sapere "cosa c'è oltre", ricerca scientifica, molto spesso una giusta miscela di tutto questo, e altro ancora. In ogni caso, lo scopo dello speleologo non è quasi mai soltanto la visita di un ambiente sotterraneo, sia subaereo, sia allagato, ma l'esplorazione di nuovi condotti e gallerie, la congiunzione di grotte tra loro, per ricostruire un unico, grande sistema carsico, sempre più esteso e sempre più profondo, la comprensione di come queste grotte si siano formate ed evolute, la conoscenza delle potenzialità del sistema e di quanto questo potrà divenire grande e profondo.

L'uomo, tuttavia, non è adattato all'ambiente di grotta, per cui per esplorarlo occorre conoscere alcune **tecniche particolari** ed **equipaggiarsi in modo adeguato**. Poiché non siamo in grado di muoverci al buio, occorrono almeno due **fonti di illuminazione**, di cui la principale è di solito costituita da un impianto ad acetilene. E' necessario proteggersi dal freddo e dal fango, utilizzando indumenti in pile e apposite tute. A volte è necessario anche l'utilizzo di una muta subacquea, per percorrere tratti molto bagnati senza incorrere nel pericolo dell'ipotermia. Ai piedi, in genere, stivali o scarponcini da montagna, e guanti di gomma per proteggere le mani dall'abrasione della roccia e delle corde. Per affrontare i tratti verticali, si utilizzano **corde statiche** da 10 o 9 mm di diametro, un imbragatura (simile, con qualche modifica, a quelle utilizzate in alpinismo) e appositi **attrezzi** per salire e scendere.

I pericoli nell'esplorare una grotta sono molti, ma tutti, in realtà prevedibili e superabili con la giusta preparazione tecnica e le giuste attrezzature: non è possibile improvvisarsi speleologi!

Contrariamente a quanto comunemente si pensa, nessuno speleologo è mai morto incastrato in una strettoia o per il crollo del soffitto di una grotta (cosa che invece può avvenire in una miniera, dove il vuoto è di origine artificiale, e quindi instabile): i pericoli maggiori sono rappresentati dalla **caduta di pietre** (sempre provocata dal passaggio degli esploratori) e dell'acqua. Poiché la propagazione delle piene in un sistema carsico può essere a volte molto rapida, è possibile che, in concomitanza con eventi piovosi in superficie, gallerie normalmente asciutte vengano **allagate**, anche totalmente: questa è una delle più frequenti cause di intrappolamento in grotta di incauti speleologi (quasi sempre alla prime armi e con scarsa conoscenza del sistema sotterraneo), che richiede l'intervento di squadre di soccorso speleosubacqueo e arricchisce la letteratura di aneddoti talora raccapriccianti, anche se, fortunatamente, per la maggior parte a lieto fine (come l'incidente alla grotta francese della Vittarelle, dove alcuni speleologi sono rimasti bloccati per giorni a bordo di un canottino, in una sala che si andava trasformando in un lago: la risalita delle acque si è arrestata quando il canotto si trovava ormai a un paio di metri dalla volta...). In grotta, comunque, il passaggio dell'acqua lascia tracce inequivocabili ed evidenti, per cui chi normalmente frequenta questo tipo di grotte ne conosce il comportamento e lo prevede facilmente: è inutile dire che prima di avventurarsi in cavità complesse, specie se in prossimità di sorgenti, è indispensabile raccogliere informazioni presso i gruppi grotte locali.

Studiare il percorso delle acque

A volte, l'appartenenza di una grotta e di una sorgente al medesimo sistema è di immediata intuizione, soprattutto nel caso dei cosiddetti trafori idrogeologici, dove il percorso delle acque sotterranee può essere fisicamente seguito dagli speleologi dall'inghiottitoio alla sorgente. Altre volte, invece, non ci sono evidenze dirette delle relazioni di una grotta con sorgenti carsiche, anzi, può capitare che le sorgenti più vicine, e logicamente più probabili candidate ad essere in connessione con un sistema carsico, non appartengano in realtà a quest'ultimo. Non bisogna dimenticare che, mentre in superficie la topografia permette di individuare facilmente gli spartiacque tra bacini idrografici diversi, in profondità la dipendenza dei sistemi carsici dalla struttura geologica può creare spartiacque sotterranei, difficilmente intuibili dall'esterno, a meno di non conoscere bene la geologia dell'area.

Il metodo più semplice e sicuro per stabilire la connessione tra grotte e sorgenti è **iltracciamento delle acque**.

L'operazione è semplicissima: si immette un tracciante nell'acqua, in un punto qualsiasi di un sistema, all'ingresso, ma anche all'interno, nelle parti più profonde, e se ne rileva poi la presenza alle sorgenti. Il ritrovamento del tracciante nelle

sorgenti è prova inequivocabile della connessione tra punto di immissione e punto di controllo. Non solo: l'analisi dei tempi di arrivo del tracciante, la diluizione che questo ha subito, correlati con le portate della sorgente, e, magari, con un'analisi chimica delle acque, permettono di ricavare importanti informazioni sull'acquifero carsico, sulle sue riserve idriche, sulle velocità di movimento dell'acqua, addirittura sullo spessore della zona satura e sulla presenza di grandi condotte di drenaggio sotterraneo.

I traccianti normalmente usati sono **sostanze coloranti** come la fluoresceina (che dà una colorazione verde), o gli sbiancanti ottici, come il Tinopal (la sostanza che conferisce al nostro bucato il "bianco più bianco"), che, oltre alla bassissima tossicità anche nei confronti degli organismi più delicati, hanno il vantaggio di poter essere rilevabili con metodi semplici anche a basse concentrazioni, invisibili a occhio nudo, il che rende possibile utilizzarne modesti quantitativi.

In passato sono state utilizzate sostanze diverse, tra cui alcune particolarmente curiose, entrate ormai a far parte della letteratura, come le leggendarie anguille usate per "tracciare" le acque del Timavo, paglia, segatura, spore, elementi radioattivi, sale da cucina. Alcune colorazioni sono state del tutto involontarie, come in occasione del rovesciamento di un'autobotte carica di Pernod nel Sud della Francia, che ha permesso di stabilire la connessione tra un piccolo corso d'acqua a lato della strada e un importante sistema carsico nelle vicinanze, per la gioia degli speleologi presenti in grotta al momento del passaggio del "tracciante"... Semplici in teoria, le operazioni di tracciamento delle acque richiedono, in realtà, una serie di precauzioni per evitare inquinamenti e falsi risultati positivi, e sono operazioni riservate agli specialisti del settore... pena incidenti a metà tra il tragico e il comico, come la grande macchia verde misteriosamente apparsa, negli anni '80, di fronte a Nesso, sul lago di Como, o le decine di km² di risaie fluorescenti in Filippine, ad opera di una spedizione italiana, costretta poi a berne l'acqua per dimostrare agli infuriati abitanti, capitanati da alcuni anziani tagliatori di teste, la non tossicità della sostanza... gli effetti collaterali di un bicchiere di acqua di risaia sono sicuramente di maggior entità della tossicità della fluoresceina utilizzata....

L'età delle grotte

I depositi chimici delle grotte offrono una straordinaria possibilità di studio ai ricercatori che si occupano di ricostruire la storia geologica del passato.

Possono, infatti, essere facilmente datati, con un metodo basato sul decadimento di alcuni isotopi della "famiglia" radioattiva dell'²³⁸U.

Quest'ultimo, infatti, decade in una serie di elementi: ²³⁴Th, ²³⁴Pa, ²³⁴U, ²³⁰Th, fino a ²⁰⁶Pb, che è stabile.

Le concrezioni di grotta contengono uranio, che sostituisce il calcio nel reticolo cristallino della calcite, ma non contengono torio. Dal momento della formazione della concrezione, ²³⁸U inizia a decadere trasformandosi in ²³⁰Th. La misura della concentrazione di ²³⁰Th nella concrezione è quindi una misura del tempo trascorso dalla sua formazione. Misurando, quindi, il rapporto ²³⁰Th/²³⁴U e ²³⁴U/²³⁸U (²³⁴U è un altro discendente di ²³⁸U) è possibile ricavare l'età della concrezione.

Il metodo di datazione U/Th è molto efficace, ma permette di datare soltanto concrezioni molto giovani, non più vecchie di 350.000 anni. Utilizzando ²³⁴U/²³⁸U è possibile estendere il limite fino a 1.5 milioni di anni.

Si è recentemente scoperto che la maggior parte delle concrezioni è molto più antica di 1.5 milioni di anni, e quindi attualmente sono allo studio altri metodi, come il metodo U/Pb (che funziona bene su depositi molto antichi) o metodi paleomagnetici.

Per lo studio di sedimenti che contengono ciottoli portati dall'esterno, si sta recentemente sperimentando il metodo dei cosiddetti isotopi cosmogenici.

L'irraggiamento da raggi cosmici (da qui il nome del metodo) produce ¹⁰Be, ²⁶Al e altri isotopi, oltre al più noto ¹⁴C, nel reticolo di alcuni minerali (per esempio il quarzo) quando questi vengono esposti in superficie.

Quando i sedimenti vengono sepolti fuori dall'influenza dei raggi cosmici (per esempio, in grotta a profondità superiori ai 30 m), gli isotopi cosmogenici iniziano a decadere ed è possibile determinare, in modo analogo al metodo U/Th, il momento del seppellimento, ovvero l'età del deposito, per date che vanno da 100.000 a 5 milioni di anni.

Le grotte ricordano il passato

Quando il livello di base di abbassa, per l'erosione continua delle valli, le gallerie singenetiche si trovano sospese al di sopra del livello di base, e lentamente si svuotano, mentre iniziano ad allargarsi nuove gallerie più in profondità. I sistemi carsici tendono sempre a mettersi in equilibrio con il livello di base, ma se le variazioni di quest'ultimo sono rapide, o, meglio, più rapide della capacità di adeguamento delle grotte, si può registrare un certo disequilibrio, con la presenza di sorgenti di troppo pieno o sorgenti sospese, e di tratti allagati anche al di sopra del livello di base. Il risultato finale è, però, con l'andar del tempo (geologico), uno svuotamento delle gallerie singenetiche, che entrano così a far parte della zona vadosa, dove lo scorrimento delle acque è a pelo libero, con velocità maggiori e dove prevalgono quindi i processi erosivi, con forme simili a quelle dei corsi d'acqua superficiali. Quando il livello dell'acqua in una galleria singenetica si abbassa, l'acqua comincia a scorrere soltanto sul pavimento, che viene approfondito, mentre le pareti e il soffitto restano intatti: si formano così gallerie a "buco di serratura", che conservano ancora tracce della primitiva sezione circolare, fornendo preziose indicazioni sull'origine della galleria. Se l'erosione continua, invece, la galleria si approfondisce, divenendo un meandro alto e stretto, spesso con andamento sinuoso, e le tracce delle forme originarie vengono completamente cancellate.

A tutto ciò si aggiungono i fenomeni di crollo che interessano le volte e le pareti di pozzi e gallerie e sono in genere responsabili della formazione degli ambienti sotterranei più vasti, le sale: i crolli avvengono sempre lungo fratture e conferiscono quindi una tipica sezione squadrata ai vuoti, con pareti e soffitti lisci e rettilinei, con inclinazioni variabili secondo l'andamento delle fratture che originano i crolli. La maggior parte dei crolli avviene quando le gallerie singenetiche vengono abbandonate dall'acqua. Poiché sono di origine antica, le grotte sono in gran parte strutture relativamente stabili, molto più di quanto si creda: il pericolo di crolli è in realtà legato per la maggior parte alla disattenzione di chi cammina, magari sull'orlo di un pozzo, su cumuli di massi di crollo, resi instabili dal movimento dell'incauto visitatore. I vuoti sotterranei possono essere talvolta di dimensioni enormi: è difficile immaginarsi l'effetto di ambienti di simili dimensioni, quando l'unica fonte di illuminazione è una lampada ad acetilene o una torcia subacquea...

L'evoluzione di una grotta

Le grotte si formano progressivamente, in tempi geologici relativamente lunghi e sono in continua evoluzione: la loro storia dipende da molti fattori, tra cui la quantità d'acqua (che dipende in gran parte dal clima), le modalità con cui questa entra nel sistema, le variazioni del livello di base e della topografia superficiale, le cui modificazioni possono variare l'alimentazione idrica di una grotta, causando, per esempio, passaggio da condotte sature a condotte vadose, o variando la posizione e il funzionamento delle sorgenti, e molto altro ancora: ogni modificazione di quanto circonda la grotta, come movimenti tettonici, variazioni climatiche, modificazioni della topografia provoca modifiche all'interno dei sistemi carsici, che tendono a rimettersi in equilibrio con la nuova situazione.

Le grotte non sono quindi qualcosa di stabile e immutabile nel tempo e nello spazio e occorre tenere sempre presente che si sono formate in situazione topografiche e climatiche ben diverse dall'attuale (per esempio, le grotte delle Prealpi Lombarde hanno iniziato a formarsi poco meno di 30 milioni di anni fa, quando ancora non esisteva la valle attualmente occupata dal Lago di Como e, in condizioni di clima tropicale, tutta l'area era coperta da una densa foresta pluviale). Tutte le variazioni sono puntualmente registrate all'interno delle grotte, sia come forme originatesi in condizioni diverse dall'attuale, sia come depositi, di minerali e di sedimenti, che variano in funzione della quantità di acqua o del clima (per esempio, in molte grotte nel Nord Italia è possibile rinvenire sedimenti legati all'avanzata dei grandi ghiacciai che, nel corso degli ultimi 2 milioni di anni, sono a più riprese scesi dalle Alpi). Poiché in superficie l'erosione spesso provoca la scomparsa di ogni traccia della storia geologica di una regione, le grotte, che sono, al contrario, un ambiente molto conservativo, sono spesso un importante archivio di preziosi dati geologici: agli speleologi, unici frequentatori di questo ambiente, viene spesso demandato il compito di portare alla luce questi dati. E' importante, quindi, che gli speleologi abbiano qualche nozione di geologia e sappiano riconoscere le principali forme carsiche, per poter collaborare efficacemente con chi si occupa di ricerche in questo campo.

Evoluzione del paesaggio

In generale, l'evoluzione dei sistemi carsici segue quella del rilievo del massiccio montuoso in cui si trovano. La tendenza generale è di un graduale approfondimento dei sistemi di grotte, a seguito dell'approfondimento del livello di base delle vallate. Ma non è sempre così: il livello di base può anche innalzarsi, venendo così a determinare l'invasione di acqua in gallerie precedentemente fossilizzate. Questo è accaduto, per esempio a tutte le grotte in aree costiere, dove, nel corso degli ultimi 2 milioni di anni, le **glaciazioni** continentali hanno determinato fluttuazioni del livello marino. La formazione di grandi ghiacciai continentali provoca infatti l'intrappolamento sulla terraferma di enormi quantità di acqua: ne deriva che ad ogni glaciazione l'espansione dei ghiacciai ha provocato un abbassamento del livello medio del mare, e quindi un abbassamento del livello di base di circa 100-120 m. Ne è derivata, quindi, la formazione di grotte continentali a quote attualmente al di sotto del livello del mare. Nei periodi caldi interglaciali, invece, le acque liberate dalla fusione dei ghiacci hanno causato la risalita del livello marino, e conseguente allagamento delle grotte "terrestri" precedentemente formate. Come conseguenza dell'ultima glaciazione, negli ultimi 10.000 anni, il livello medio del Mediterraneo si è alzato, appunto, di circa 100-120 m, mentre 125.000 anni fa, poco prima dell'ultima glaciazione, era 8 m più alto di oggi (come testimoniano antichi solchi di battente e resti di grotte marine).

Naturalmente, la realtà non è così semplice: variazioni del livello marino si possono anche verificare per altre cause, tra cui, per esempio, l'attività tettonica, che può innalzare o sprofondare territori, e l'isostasia, che fa innalzare aree glacializzate quando viene rimosso il peso dei ghiacciai che le coprivano, come accade, per esempio, in Scandinavia: queste variazioni possono amplificare o contrastare le variazioni eustatiche del livello marino, i cui effetti sono perciò diversi da luogo a luogo.

In generale, però, tutto questo fa sì che la maggior parte delle grotte marine oggi esplorabili sulle nostre coste non abbia in realtà un'origine marina, ma sia il risultato dell'invasione di acqua marina in grotte continentali. La riprova di ciò è data dallo studio delle morfologie, che sono tipiche di grotte carsiche continentali e non di grotte marine. Il ritrovamento di concrezioni, in particolare, è la testimonianza di questo fatto, ed è un preziosissimo elemento per la ricostruzione della storia delle grotte e dell'evoluzione climatica. Le concrezioni, infatti, si possono datare e lo studio delle forme e dei minerali che le costituiscono permette a volte ricostruzioni di sorprendente dettaglio: stalagmiti prelevate a 20-30 m di profondità in grotte "marine" nel Sud Italia hanno permesso di osservare, per esempio, successioni di depositi di minerali di ambiente continentale e depositi di organismi marini, a volte perfino con fori di litodomi, in un'alternanza ciclica che segue le avanzate e i ritiri dei ghiacciai continentali. Lo speleosubacqueo è, per il geologo, un preziosissimo alleato! Le **fluttuazioni del livello marino**, in particolare, la risalita degli ultimi 10.000 anni, hanno creato vastissimi sistemi di grotte allagate: gli esempi più belli sono i cenotes dello Yucatan, antichi sistemi di grotte subaeree ora allagati dalla risalita della falda acquifera a pochi metri di profondità, o i blue hole delle Bahamas o del Belize, dove un'antica pianura ricca di sistemi carsici è stata completamente sommersa dalla risalita del livello del mare.

Il clima del passato

Lo studio dei sedimenti trasportati all'interno delle grotte, con le loro caratteristiche, la loro composizione, il loro contenuto fossilifero permette di ricostruire le variazioni dell'ambiente e del clima della superficie: in particolare, sono interessanti resti di suoli formati in clima tropicale, oppure sedimenti legati a clima freddo, come materiale proveniente da depositi glaciali o periglaciali. Le concrezioni, invece, si formano prevalentemente in clima caldo e sono quindi dei marker climatici molto importanti.

In modo analogo alle carote di ghiaccio, l'analisi isotopica del rapporto $16O/18O$ permette di determinare le temperature al momento della formazione della calcite che le costituisce. La struttura a lamine sovrapposte e la possibilità di datare la calcite permettono una ricostruzione a volte molto dettagliata delle temperature del passato. Le curve di oscillazione climatica del passato ricostruite sulla base delle analisi di concrezioni di grotta si correlano molto bene. Con i dati paleoclimatici determinati da altre fonti, come, per esempio, l'analisi isotopica sui foraminiferi, organismi marini a guscio calcareo) o l'analisi pollinica.

Un esempio vicino in Italia

Anche le grotte in prossimità dei grandi laghi prealpini (Maggiore, Como, Garda) hanno subito un'analogia evoluzione: il Lago di Como, per esempio, è impostato su un profondo canyon, la cui formazione risale a più di 5 milioni di anni fa, e non è quindi di origine glaciale (così come i suoi fratelli Maggiore, Iseo e Garda): il lago è attualmente profondo 400 m, vale a dire che il suo fondo si trova 200 m al di sotto del livello del mare, ma il fondo del canyon, riempito di sedimenti, è 700 m più in basso. Circondato com'è da rocce altamente carsificabili, è molto probabile che vi si siano sviluppati sistemi carsici assai profondi e complessi, in equilibrio con l'antico livello di base sul fondo del canyon; successivamente, poco più di 2 milioni di anni fa, il mare ha invaso i margini delle Prealpi lombarde, come testimoniato da antiche valli riempite da argille contenenti fossili di organismi marini, e quindi anche le grotte profonde sul fondo del canyon sono state allagate, riempite di sedimenti e colonizzate da organismi marini. Il mare si è poi ritirato, svuotando nuovamente le cavità, e il canyon si è riempito di sedimenti alluvionali, marini e poi glaciali e fluvioglaciali, quando il grande ghiacciaio dell'Adda è avanzato a più riprese lungo la valle ora occupata dal lago. Lungo le ripide pareti sommerse del lago devono quindi esistere grandi gallerie allagate. La testimonianza di questo è data dalle sorgenti dei più importanti sistemi carsici del Pian del Tivano e della Grigna Settentrionale. Le sorgenti visibili in superficie sono soltanto delle sorgenti di troppo pieno, di portata molto esigua rispetto alle grandi quantità di acqua che entrano nei sistemi dalla zona di assorbimento: le sorgenti principali, quindi, si devono trovare al di sotto del livello del lago, ma fino ad ora non sono state trovate. Tutto questo, semplicemente, per dire che l'origine delle grotte è in genere molto antica, e che la loro evoluzione è spesso complessa e strettamente legata alle vicende geologiche dell'area: gli speleologi e gli speleosub hanno a portata di mano le chiavi per aprire i potenti archivi di dati geologici contenuti nelle oscurità delle grotte. Ma questi dati, a loro volta, possono dare importanti suggerimenti per nuove esplorazioni!