

GROTTE

Indice

Introduzione

Conoscere le grotte

I processi per formare un vuoto

Prima il vuoto, poi la roccia

Prima la roccia, poi il vuoto

Come si formano

Anidride carbonica, un'alleata

Le rocce più adatte

Le acque dal sottosuolo

Acque calde, acque fredde

Acque aggressive e sovrassature

Un po' di geologia

Depositi chimici

Depositi fisici

Il paesaggio carsico

Il paesaggio carsico in superficie

Il paesaggio sotterraneo

Il livello di base

Le grotte hanno forma

Diverse zone, diverse forme

Lo studio delle grotte

Studiare il percorso delle acque

L'età delle grotte

Le grotte ricordano il passato

L'evoluzione di una grotta

Evoluzione del paesaggio

Il clima del passato

Un esempio vicino in Italia

Le grotte e l'acqua

Immense riserve

Le sorgenti

Il movimento dell'acqua

Gli acquiferi carsici

Gli abitanti delle grotte

Inquilini temporanei e non

Un ambiente particolare

Gli adattamenti

Tigri in miniatura

Stili di vita

Piccoli diavoli da proteggere

Storie di draghi

Il proteo

GROTTE

Introduzione

Interessanti paesaggi non li possiamo osservare solo sulla superficie terrestre, ma anche nelle profondità della Terra. Parliamo di cavità sotterranee, di grotte, molto importanti per diversi aspetti. 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 da quelle attuali. 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. Gli acquiferi carsici rappresentano un'importantissima risorsa idrica in moltissime regioni della Terra: le zone carsiche, infatti, sono, per loro stessa natura, prive di acque superficiali e tutta la circolazione idrica avviene in profondità. Si tratta, però, di risorse molto delicate da utilizzare e da proteggere. Gli acquiferi carsici, infatti, per alcune loro caratteristiche, sono particolarmente vulnerabili agli inquinamenti e all'eccessivo sfruttamento.

Conoscere le grotte

La maggior parte delle rocce possiede, al proprio interno, pori e cavità, ma in genere questi non sono percorribili dall'uomo. Le grotte sono delle cavità, dei vuoti all'interno di un ammasso roccioso che possono essere percorsi dall'uomo. Esistono molti tipi di grotte, che si formano per processi diversi: alcune sono di piccole dimensioni, nelle quali l'uomo difficilmente può penetrare, altre invece si snodano nel sottosuolo per decine e centinaia di chilometri, raggiungendo profondità superiori ai 2000 m. I processi di formazione condizionano l'estensione, lo sviluppo, le forme delle grotte, e anche le difficoltà esplorative che vi si incontrano.

La maggior parte delle grotte di più grande sviluppo non è una cavità isolata, ma è costituita da un sistema, a volte anche molto complesso, di sale, pozzi, cunicoli, meandri e gallerie intercomunicanti, che si organizzano a formare un sistema, o complesso carsico.

Attraverso i sistemi carsici si muovono grandi quantità di acque sotterranee: le grotte possono quindi essere sub-aeree, cioè occupate da aria, completamente asciutte, o possono essere percorse da corsi d'acqua, essere saltuariamente allagate, o permanentemente invase da acque sia dolci che salate.

I processi per formare un vuoto

Molti sono i meccanismi che portano alla formazione di cavità e vuoti sotterranei. Alcune grotte sono "primarie", poiché si generano contemporaneamente alla roccia che le contiene, altre, invece, si formano successivamente, per processi di alterazione della roccia, che ne modificano le caratteristiche originarie.

GROTTE PRIMARIE

- grotte biocostruite (di scogliera corallina)
- grotte laviche
- grotte da raffreddamento

GROTTE SECONDARIE

- grotte eoliche
- grotte marine
- grotte tettoniche
- grotte carsiche

Prima il vuoto, poi la roccia

Grotte biocostruite. Tra le grotte primarie, le più diffuse sono le grotte che si formano a opera di organismi costruttori, come i coralli e le alghe incrostanti di scogliere coralline: la crescita di questi organismi, tutt'altro che uniforme e omogenea, crea vuoti di varie forme e dimensioni, che spesso sono abbastanza grandi da poter essere visitati dall'uomo. Chiunque abbia fatto immersioni su una barriera corallina ha avuto modo di osservare queste grotte: per la maggior parte si tratta di anfratti e rientranze, a volte si sviluppano piccoli camini o gallerie dalla forma irregolare, che sovente permettono di attraversare la scogliera da parte a parte, con ingressi a quote differenti (appartiene a questa categoria, per esempio, il celebre Blue Hole di Dahab, nel Mar Rosso): raramente, lo sviluppo di queste cavità supera le poche decine di metri. Il rinvenimento di cavità di grandi dimensioni in scogliere fossili, quindi in ambiente subaereo, continentale, è molto raro: durante la trasformazione della scogliera in roccia, infatti, le cavità primarie sono generalmente riempite di sedimenti che le fossilizzano completamente.

Grotte vulcaniche. Grotte primarie si possono creare durante il raffreddamento di colate di lava. Le grotte vulcaniche si formano quando una colata lavica, in genere di lave basaltiche, molto fluide, si raffredda in superficie, formando una "crosta" solida al di sotto della quale la lava fluida continua a scorrere: all'esaurirsi dell'eruzione e della fuoriuscita di lava, le ultime emissioni scorrono al di sotto della crosta solidificata e fuoriescono alla base della colata lasciando all'interno della lava ormai solida dei condotti, veri e propri tunnel a sezione circolare o ellittica. I **tunnel di lava** possono raggiungere lunghezze notevoli, come la Kazumura Cave, alle Hawaii, lunga più di 60 km, con un dislivello che supera i 1100 m: sono grotte prevalentemente orizzontali, con pendenze molto modeste, che, però, protratte su lunghe distanze, possono dare notevoli dislivelli complessivi.

La roccia è in genere molto scura, di aspetto vetroso per il rapido raffreddamento; lungo le pareti si osservano caratteristici gradini, dovuti alla sovraescavazione operata dalla lava sul pavimento della grotta e si osservano forme simili a stalattiti e stalagmiti, dovute al gocciolamento di lava in via di raffreddamento: sul soffitto, infatti, il calore liberato dalla colata provoca la rifusione della roccia, che gocciola verso il basso, solidificandosi in forme simili a stalattiti (ma di origine

completamente diversa), mentre le gocce che cadono sul pavimento formano curiose "stalagmiti" sottili e contorte (simili alle torri che i bambini costruiscono sulla spiaggia, lasciando cadere gocce di sabbia impregnata di acqua). Sono grotte che, per il particolare meccanismo che le origina, si formano sempre molto vicino alla superficie: il soffitto è spesso soggetto a fenomeni di crollo, per cui i tunnel di lava sono costellati di aperture verso l'esterno, sotto forma di piccoli pozzi, spesso a sezione circolare, chiamati sky-light (luce dal cielo). Questo tipo di grotte si forma sempre in ambiente continentale, quindi in condizioni sub-aeree: se una colata lavica giunge a contatto con acqua marina, il violento raffreddamento che ne consegue dà luogo a esplosioni che frantumano la roccia, e la formazione di tunnel di lava si arresta. Per cause diverse, però, il mare può successivamente invadere parte di queste grotte, quando queste si sviluppano vicino alla costa, come accade, per esempio alle Canarie, sull'isola di Lanzarote, nel complesso sistema di Atlantida, che presenta una parte sommersa lunga più di 1600 m: in questo caso, la pressione esercitata dall'acqua che occupa le gallerie contribuisce a preservare i condotti, che, in superficie, per via dell'esiguo spessore del tetto, sono molto fragili e soggetti a rapido degrado per crolli della volta.

Grotte da raffreddamento. Cavità primarie in rocce vulcaniche di dimensioni nettamente inferiori si possono anche sviluppare in particolari rocce effusive, i basalti, quando il rapido raffreddamento crea una struttura "colonnare", con formazione di grandi colonne, alte parecchi metri, a sezione esagonale: i crolli lungo le fratture da raffreddamento possono dare origine a suggestive cavità, specie in prossimità della costa, dove i crolli sono facilitati dall'azione delle onde: un esempio molto noto è la celebre grotta di Fingal, sull'isola di Staffa, in Scozia.

Prima la roccia, poi il vuoto

A differenza delle grotte primarie, che si formano contemporaneamente alla roccia in cui si trovano, le grotte di origine secondaria implicano processi diversi che agiscono su rocce già esistenti, a volte anche molti milioni, o decine di milioni di anni dopo la formazione della roccia stessa.

Grotte eoliche. Grotte di estensione ridotta, non più di pochi metri, si formano per l'azione abrasiva del vento e per particolari processi di alterazione in zone aride e desertiche o in prossimità di coste, su rocce tenere e facilmente sfaldabili, come le arenarie, o su rocce, come i graniti, che sono particolarmente soggette a processi di alterazione per idrolisi (che altera i minerali feldspatici formando argille e trasformando la roccia in una sabbia di cristalli di quarzo). Cavità di questa categoria sono, per esempio, i celebri "tafoni" della Sardegna. Sono grotte che, per la loro origine e per la natura delle rocce che le contengono, hanno in genere vita breve e non sono di grande interesse per gli speleologi.

Grotte tettoniche. Moltissime grotte secondarie sono di origine tettonica, legate a crolli lungo fratture o faglie che indeboliscono una roccia. Faglie e fratture si formano per effetto delle deformazioni tettoniche delle rocce in profondità nella crosta terrestre: quando le rocce vengono portate allo scoperto dall'erosione, la presenza di grandi vuoti o di alte pareti determina

l'apertura delle superfici di rottura, con conseguenti crolli di blocchi di dimensioni anche notevoli. Questo processo può portare alla formazione di ambienti anche di grandi dimensioni, ma raramente di grande profondità e sviluppo. Queste grotte mostrano tipiche forme "squadrate", lungo le superfici di frattura o di faglia che hanno determinato i crolli, con grandi ammassi di materiale di crollo sul pavimento; gli ambienti sono spesso grandi sale alte e strette. Non si formano in ambiente subacqueo, dove la pressione dell'acqua riduce le possibilità di crolli e distacchi di blocchi, ma è comune rinvenire questo tipo di cavità in prossimità di grandi pareti, spesso alla base di falesie lungo la costa, dove l'azione delle onde può contribuire ai processi di crollo e l'acqua può facilmente erodere e allontanare il materiale dal pavimento. Si possono formare in qualunque tipo di roccia e in genere non sono di grande interesse speleologico.

Grotte marine. Grotte secondarie sono tutte le grotte marine: occorre precisare che le grotte di origine marina sono relativamente poche e in genere di sviluppo assai ridotto, che non supera le poche decine di metri di lunghezza, e dislivelli assai modesti, non superiori a qualche metro. Grotte occupate da acque marine, ma con sviluppi complessi e profondità importanti sono, come si vedrà in seguito, di altra origine, anche se il mare che le invade può contribuire a modificarle in vario modo. Le grotte marine in senso stretto sono create dall'azione meccanica delle onde, che disgregano la roccia con la forza d'urto e con l'erosione dei detriti che possono trascinare, e, soprattutto, dall'azione di corrosione chimica che le acque marine, specie se mescolate con acque meteoriche, possono esercitare sulla roccia, insieme dall'azione biologica operata da organismi marini. Sono in genere cavità di pochi metri o decine di metri di sviluppo, anche se possono aprirsi, a volte, con ampi portali; l'andamento è suborizzontale e si formano pochi metri al di sopra o al di sotto del pelo dell'acqua. Di origine simile alle grotte marine, e spesso in continuità con esse, è una tipica forma costiera, il solco di battente, spesso ben visibile come una marcata rientranza alla base di pareti e falesie, proprio sul pelo dell'acqua. Il ritrovamento di grotte marine a quote diverse dell'attuale livello del mare può essere un prezioso strumento per ricostruire l'evoluzione delle oscillazioni del livello del mare. Grotte marine di questo tipo possono svilupparsi su diversi tipi di roccia, ma raggiungono dimensioni di un certo interesse soltanto in rocce particolarmente sensibili all'azione corrosiva delle acque marine, come le rocce carbonatiche: anche le grotte marine rientrano in realtà nella grande categoria delle grotte carsiche.

Come si formano

La maggior parte delle grotte più lunghe e più profonde si sviluppa per processi di corrosione chimica in rocce che, per le loro caratteristiche e per i minerali che le costituiscono, sono particolarmente solubili in acqua. L'insieme di questi processi di dissoluzione prende il nome di **carsismo**.

L'acqua e la roccia. Tutti i minerali sono più o meno solubili in acqua, ma alcuni lo sono in misura molto maggiore, e in tempi molto brevi (in senso geologico, naturalmente), mentre altri necessitano di tempi molto lunghi, e sono, quindi, considerati praticamente insolubili. Le rocce costituite dai minerali più solubili sono quelle che più facilmente vanno incontro allo sviluppo di forme carsiche, anche se, in realtà, il carsismo è un processo complesso, dove la composizione della roccia è soltanto uno dei tanti fattori che concorrono al fenomeno.

Studiando la **solubilità** dei principali minerali che costituiscono le rocce più diffuse sulla superficie terrestre, si può osservare come la solubilità dei diversi minerali differisca di vari ordini di grandezza. Per questo motivo, rocce come il salgemma, costituite da cloruro di sodio (NaCl, il comune sale da cucina), uno dei minerali più solubili in acqua, sono praticamente assenti in climi umidi, poiché rapidamente disciolte, mentre in rocce come le quarziti, costituite da quarzo (SiO₂), uno dei minerali più resistenti all'alterazione, si possono sviluppare forme carsiche solo in condizioni climatiche particolari e in aree dove le acque abbiano avuto a disposizione tempi molto lunghi, nell'ordine dei milioni di anni, per disciogliere la roccia (per esempio, i sistemi di cavità nelle quarziti dei Tepuy amazzonici).

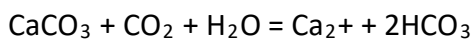
Non solo acqua. In natura, però, le cose non sono così semplici: le acque naturali, infatti, non sono mai acque pure, ma sono delle soluzioni acquose che contengono disciolte sostanze diverse che possono incrementarne l'aggressività e il potere corrosivo su alcuni tipi di rocce, complicando la semplice reazione di dissoluzione. Il processo è ben noto a chi si occupa della pulizia dei bagni in una casa: per rimuovere le incrostazioni di "calcare" che deturpano i nostri sanitari (geologicamente parlando, si tratta di cristalli di carbonato di calcio, CaCO₃, calcite; calcare è il nome che si dà a una roccia composta prevalentemente di calcite), ci si serve di soluzioni acquose arricchite di acidi in grado di aumentarne il potere corrosivo, come l'acido cloridrico (noto alle casalinghe come acido muriatico) o l'acido acetico, presenti in molti prodotti per la pulizia della casa. Queste sostanze rendono facile la rimozione delle incrostazioni in due modi: da una parte aumentano la solubilità della calcite, dall'altra accelerano grandemente la velocità di reazione (che è molto rapida e violenta, come testimoniano le bolle gassose che si liberano durante l'utilizzo). Anche la semplice acqua potrebbe ottenere lo stesso risultato, ma in tempi decisamente oltre la scala di osservazione umana... e al di là della pazienza della casalinga! Le acque naturali si comportano, infatti, allo stesso modo dei detersivi, soltanto, poiché si tratta di soluzioni acide molto più diluite e con acidi molto più deboli, le reazioni sono molto più lente, per lo meno alla scala dell'osservazione umana. La natura, al contrario della casalinga, non ha alcuna fretta, ma i risultati sono anche più spettacolari!

Anidride carbonica, un'alleata

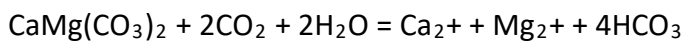
Tra le sostanze in grado di aumentare il potere corrosivo delle acque naturali, l'**anidride carbonica** (o biossido di carbonio, CO₂) è quella che gioca il ruolo più importante. Essa è già presente nelle acque meteoriche, essendo uno dei gas che compone l'atmosfera, con percentuali, però, molto basse (0,03 atm), ma la sua concentrazione aumenta moltissimo nelle

acque che attraversano spessi strati di suoli coperti da abbondante vegetazione. L'arricchimento in CO_2 e in altri acidi organici prodotti dalla vegetazione e dall'attività biologica nelle acque che vengono a contatto con la roccia può far aumentare di diversi ordini di grandezza la solubilità di minerali come la calcite (carbonato di calcio, CaCO_3) e la dolomite (carbonato di calcio e magnesio, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), che passa da 10-12 mg/l a 200-400 mg/l. Altri minerali, come il quarzo o il salgemma, invece, sono del tutto insensibili alla presenza di CO_2 nelle acque con cui vengono a contatto, e la solubilità resta quindi immutata.

La reazione di dissoluzione del carbonato di calcio, responsabile della formazione della maggior parte delle grotte, è:



Per la dolomite, la reazione è molto simile:



Le rocce più adatte

Calcite e **dolomite** (rispettivamente, carbonato di calcio e carbonato di calcio e magnesio) sono minerali molto abbondanti sulla superficie terrestre e sono i costituenti principali di particolari rocce sedimentarie, che prendono il nome di rocce carbonatiche, come i calcari e le dolomie. Queste non sono le rocce **più carsificabili** in assoluto (gessi e salgemma lo sono molto di più), ma sono, tra le rocce carsificabili, le più diffuse e quelle che presentano corpi di maggiori dimensioni e di maggiori spessori: per questo motivo le grotte più lunghe e più profonde del pianeta si trovano in questo tipo di rocce. Nella dolomia, in realtà, che pure presenta una solubilità pari a quella della calcite, la reazione di dissoluzione è molto più lenta e la roccia tende a produrre, come residuo della reazione, una sabbia che riempie le fratture in cui l'acqua si muove e finisce per rallentare la carsificazione: le rocce dolomitiche, quindi, sono di fatto molto meno carsificabili delle rocce calcaree.

Le acque dal sottosuolo

Le acque che più comunemente circolano nel sottosuolo, e che possono quindi dare origine alle grotte, sono per lo più acque di origine meteorica, ma a queste possono aggiungersi, a volte mescolandosi in vario modo tra loro, acque "connate", cioè antiche acque rimaste intrappolate nelle rocce sedimentarie al momento della loro formazione, in genere ricchissime di sali, e quindi potenzialmente molto aggressive, e acque profonde, dette **juvenili**, prodotte da attività magmatica, spesso molto calde e anch'esse aggressive, o ancora acque meteoriche portate in profondità e qui riscaldate e arricchite di sali e acidi e che ritornano a giorno attraverso faglie, in genere con caratteristiche di acque idrotermali. Si tratta quasi sempre di acque molto aggressive e in genere a temperatura elevata: il contatto di queste acque profonde con la roccia origina processi di dissoluzione molto rapidi e intensi, detti ipercarsici, che creano particolari grotte, chiamate ipogeniche (cioè generate dal profondo) (per esempio, la Grotta Giusti, vicino a Pistoia).

Acque calde, acque fredde

L'aggressività delle acque nei confronti della roccia con cui vengono a contatto dipende quindi dalla composizione chimica delle acque e dai minerali che costituiscono la roccia stessa, ma altri fattori intervengono a complicare le reazioni.

In particolare, la **temperatura** è un fattore fondamentale, che agisce in due modi, apparentemente contrastanti tra loro. Dalla temperatura, infatti, dipende la quantità di CO₂ che può sciogliersi in acqua: tanto **più è bassa** la temperatura, tanto maggiore è la quantità di CO₂ che (a parità di pressione) può essere sciolta (anche la pressione è importante, ma, potendo subire variazioni relativamente piccole, nelle normali condizioni ambientali, viene, per semplicità, trascurata). Del ruolo della temperatura nell'influire sulla quantità di CO₂ disciolta in acqua ci si può rendere facilmente conto osservando ciò che accade stappando una bottiglia di acqua minerale gassata: l'operazione avviene in modo tranquillo se l'acqua è stata appena tolta dal frigo, ma può avere esiti esplosivi se viene effettuata sulla medesima bottiglia lasciata in auto al sole. **L'acqua calda**, infatti, non può contenere la medesima quantità di CO₂ di quella fredda, e si libera della quantità in eccesso sotto forma di grosse bolle, non appena ne ha la possibilità (cioè, quando togliamo il tappo, diminuendo la pressione). Questo fatto tenderebbe, in teoria, a favorire i processi carsici in zone di alta montagna, dove le acque hanno temperature basse e quindi possono contenere un maggior quantitativo di CO₂.

Tuttavia, occorre considerare altri due fattori contrari: in primo luogo, la **velocità di reazione** è tanto più elevata quanto più alta è la temperatura, e, in secondo luogo, a temperature elevate la copertura vegetale e, di conseguenza, la produzione di CO₂ nel suolo sono molto maggiori, cosa che rende di fatto le acque calde molto più aggressive di quelle fredde (inoltre, il contenuto di CO₂ atmosferico diminuisce con la quota, quindi le acque in montagna, nonostante siano più fredde, hanno un tenore di CO₂ comunque più basso).

Ancora una volta, i noiosi lavori domestici ci forniscono occasione di un esperimento: se riscaldiamo i prodotti per la pulizia, la reazione, e quindi la rimozione del "calcare", è ancora più veloce (l'operazione è, in realtà, sconsigliata, perché i detersivi utilizzati contengono anche altre sostanze, che, se riscaldate, possono rilasciare vapori tossici e irritanti... al massimo, si può tentare l'esperimento con un bicchiere di aceto caldo, come facevano le nostre sagge nonne!). Di fondamentale importanza per lo studio dei processi di carsismo è la conoscenza del diagramma che mostra la solubilità della calcite a diverse temperature e con diversi quantitativi di CO₂ disciolta.

In conseguenza di questo, quindi, le zone più favorevoli alla carsificazione sono quelle dove siano presenti in abbondanza, oltre alle **rocce carbonatiche**, **grandi quantità di acqua ricca di CO₂** e a **temperatura elevata**: queste condizioni si verificano nella **fascia intertropicale**. La maggior parte delle cavità che si trovano in Italia sono, in effetti, i relitti di grotte formatesi quando il clima era di tipo caldo-umido tropicale anche alle nostre latitudini.

Reazioni complicate. Un altro fattore in grado di innalzare l'aggressività delle acque è la presenza di ioni particolari, come, per esempio, cloro e magnesio, oppure solfuri o solfati: per questo, le

acque marine e ancor più le acque marine mescolate con acque dolci sono una miscela fortemente aggressiva. Anche il mescolarsi di acque a chimismo differente dà origine a miscele aggressive. La corrosione per miscela di acque, o effetto Boegli, dal nome dello scopritore, è responsabile della formazione di condotti e gallerie in profondità: è in grado, infatti, di “rinnovare” l’aggressività delle acque, che tenderebbe a esaurirsi a mano a mano che l’acqua corrode la roccia e si arricchisce di carbonato di calcio. Di questo effetto sono testimoni privilegiati gli speleosub, quando, penetrando in condotti carsici allagati da acque marine, osservano il graduale allargarsi dei condotti in prossimità della zona di mescolamento tra acque dolci e marine, oppure quando, in acque dolci, osservano improvvisi allargamenti e forme particolari di corrosione, come le cupole, in corrispondenza di gallerie che si innestano una nell’altra, portando acque a chimismo differente. Per attivare questo meccanismo, non sono necessarie grandi quantità di acqua: forme di corrosione per miscela di acque si osservano, sulle pareti o sulle volte delle gallerie, in corrispondenza di piccolissimi condotti, a volte semplici fratture (le cupole per corrosione da miscela di acque si riconoscono da altre cupole, create dall’erosione meccanica, per il fatto che si restringono in profondità e sono sempre in corrispondenza di condotti o fratture, anche di piccolo diametro).

Acque aggressive e sovrassature

L’acqua che viene a contatto con la roccia è inizialmente sottosatura, cioè è in grado di sciogliere i minerali della roccia arricchendosi progressivamente di ioni liberati dalla reazione di dissoluzione, fino a raggiungere le condizioni di saturazione, cioè di soluzione acquosa che contiene la massima quantità possibile di un particolare ione per determinate condizioni di temperatura, pressione atmosferica o contenuto in altri acidi. Raggiunta questa condizione di saturazione, le acque non hanno più effetti chimici sulla roccia, che possono attaccare soltanto con processi meccanici di erosione (come accade per le acque dei fiumi in superficie).

Se intervengono variazioni di temperatura, di contenuto in CO₂ o di concentrazione della soluzione (per esempio, per evaporazione), le acque sature divengono sovrassature, cioè si trovano a contenere un quantitativo di carbonato di calcio disciolto in eccesso, e quindi se ne liberano depositandolo, sotto forma di **crystalli di calcite**, a formare le **concrezioni**, tra le quali stalattiti e stalagmiti sono le forme più note, ma che possono presentarsi con una vasta gamma di forme e colori, talvolta bizzarre e curiose (proprio l’evaporazione di gocce d’acqua incautamente sgocciolate sui nostri lavandini è la responsabile della formazione dell’odiato “calcare” sugli stessi che è, in sostanza, una forma di concrezione).

Un po’ di geologia

Gli ingredienti fondamentali per produrre i processi carsici sono acqua abbondante e ricca di CO₂ e acidi organici, e rocce di tipo adatto, ma per avere sistemi di grotte lunghe e profonde non sono sufficienti.

Pori e fratture. Le rocce carbonatiche, quelle più favorevoli alla carsificazione, sono in genere rocce molto compatte, con i granuli che le costituiscono molto addensate tra loro: i meccanismi di formazione fanno sì che queste rocce abbiano una porosità (cioè una percentuale di vuoti) e una permeabilità (cioè una percentuale di vuoti intercomunicanti, che possano permettere il passaggio dell'acqua) molto basse: sono, praticamente, quasi impermeabili (la porosità primaria di un calcare varia, in genere, tra l'1 e il 20%; soltanto i calcari di scogliera possono presentare porosità primaria più elevata). In queste condizioni, i processi di carsificazione possono agire soltanto sulla superficie della roccia, creando forme di carsismo superficiale, come i karren (solchi e piccole depressioni creati dalla dissoluzione della roccia): le acque non hanno alcuna possibilità di infiltrarsi nel sottosuolo, condizione, invece, indispensabile perché possano formarsi grotte in profondità.

Per avere **carsismo profondo** è necessario che la roccia presenti delle discontinuità, al suo interno, lungo le quali l'acqua possa infiltrarsi e cominciare a percolare nel sottosuolo.

Discontinuità. molto utili a questo scopo sono i piani di stratificazione, che spesso caratterizzano i calcari (le dolomie, invece, sono più spesso massive, cioè prive di stratificazione), che si formano al momento della sedimentazione; tuttavia, la maggior parte delle discontinuità nelle rocce carbonatiche è secondaria, di origine tettonica: le rocce carbonatiche sono infatti molto fragili e si fratturano facilmente se sottoposte a sollecitazioni meccaniche. I piani di strato sono inizialmente orizzontali, ma deformazioni tettoniche successive possono inclinarli e piegarli in vario modo.

Strutture geologiche: una guida per le grotte. Normalmente, mentre una roccia viene piegata, si formano anche fratture e faglie associate al piegamento: l'insieme di piani di stratificazione e di sistemi di fratture e di faglie e la loro disposizione nello spazio definisce quella che viene detta struttura geologica. La struttura geologica di un massiccio montuoso ha una grandissima influenza sullo sviluppo e sulla disposizione nello spazio di un sistema carsico. Esistono vari tipi di strutture: per esempio, strutture tabulari, con gli strati orizzontali, strutture monoclinali, con gli strati uniformemente e regolarmente inclinati, o strutture a pieghe, sia sinclinali, che formano una sorta di "catino", sia anticlinali, che formano una sorta di "duomo". I sistemi carsici più lunghi e profondi sono sviluppati in gran parte in strutture sinclinali, particolarmente favorevoli alla formazione di complessi sistemi.

Le fratture in una roccia non sono mai disposte a caso, ma si organizzano in sistemi, o famiglie, di fratture che presentano un andamento nello spazio tra loro parallelo: l'intersecarsi di diversi sistemi di fratture e dei piani di strato crea un complesso reticolo di superfici di discontinuità, più o meno aperte e più o meno favorevoli al passaggio dell'acqua. Attraverso le fratture più aperte, le acque possono percolare nel sottosuolo e iniziare ad allargare per dissoluzione le discontinuità lungo cui si muovono. Con il progressivo allargamento delle iniziali discontinuità, i vuoti aumentano di dimensioni e si organizzano in un reticolo di condotte di drenaggio sotterraneo.

Poiché le acque seguono **piani di strato e superfici di frattura**, l'andamento nello spazio del sistema di grotte e condotte dipenderà strettamente dalla struttura geologica: la conoscenza di

quest'ultima permette perciò di fare ipotesi sulla disposizione delle gallerie, sull'andamento prevalentemente orizzontale o marcatamente verticale del sistema carsico, sulle direzioni di drenaggio sotterraneo, sulla presenza o meno di tratti allagati, sul potenziale carsico, cioè lo sviluppo verticale del sistema.

In poche parole, prima di iniziare l'esplorazione di un'area, una buona conoscenza della geologia permette di prevedere in certa misura ciò che gli speleologi possono attendersi, risparmiando inutili tentativi in aree poco promettenti, o, al contrario, incoraggiando ulteriori esplorazioni in luoghi difficili, con la promessa di grotte lunghe e profonde al di là di ostacoli di fronte ai quali si sarebbe tentati di desistere.

Depositi chimici

Tutte le grotte sono occupate in misura più o meno importante da depositi chimici, le concrezioni, e depositi fisici, sedimenti di vario tipo per lo più trasportati dall'acqua all'interno delle grotte. Questi, che nel loro complesso prendono il nome di speleotemi, costituiscono un preziosissimo archivio di dati sull'evoluzione geologica, ambientale e, soprattutto, climatica del passato.

I sedimenti chimici si formano quando le acque sature di carbonato di calcio subiscono delle variazioni di temperatura o di contenuto in CO_2 , o si concentrano per evaporazione, divenendo così sovrassature: il carbonato in eccesso si deposita, quindi, sotto forma di **concrezioni**, che prendono forme diverse a seconda del punto in cui si formano, delle modalità di precipitazione dei minerali, ecc. La maggior parte delle concrezioni è costituita da calcite, il minerale di grotta sicuramente più diffuso. Quasi tutte le concrezioni si formano in ambiente subaereo, ma in condizioni particolari, come in piccoli bacini chiusi con acque sovrassature, possono formarsi anche concrezioni subacquee. La maggior parte delle concrezioni osservabili nelle grotte allagate è costituita da concrezioni formatesi in zona subaerea, e successivamente portate nella zona satura per l'allagamento dei condotti, con acqua dolce o salata, conseguente a un successivo innalzamento del livello di base.

Le concrezioni si formano più rapidamente e più abbondantemente in climi caldi. La crescita avviene in genere in lamine concentriche, la cui composizione chimica (in particolare per quanto riguarda gli isotopi dell'ossigeno) rispecchia quella dell'acqua e dell'atmosfera in cui si formano: sono quindi un importante archivio di dati sul clima del passato.

Depositi fisici

I depositi fisici comprendono una grande varietà di materiali che si accumulano in grotta per **effetto della gravità** (massi di crollo) o **per trasporto** da parte dell'acqua. I **sedimenti** possono essere autoctoni, prodotti all'interno della grotta (come i massi di crollo, o l'argilla formata dai minerali insolubili contenuti nel calcare), o alloctoni, trasportati all'interno delle grotte da agenti diversi, in genere dall'acqua. Il materiale trasportato dall'acqua si distingue per il grado di

arrotondamento, tanto maggiore quanto più lungo è stato il trasporto e tanto più è tenero il materiale.

La capacità di **trasporto** dell'acqua, o competenza, dipende dall'energia dell'acqua, in particolare dalla sua velocità e dalla sua densità, e, naturalmente, dalla densità e dal peso del materiale da trasportare. Poiché la maggior parte delle rocce ha densità intorno a $2,7 \text{ g/cm}^3$, quindi uguale per tutti i tipi di roccia, la si può ritenere un parametro costante, e, invece del peso, si può considerare il diametro medio dei granuli o ciottoli del materiale da trasportare, cioè quella che viene chiamata granulometria. Tanto maggiore è la **velocità** dell'acqua, tanto maggiori saranno le dimensioni delle particelle che potrà trascinare con sé. Le dimensioni delle particelle variano da millimetriche a metriche, nel caso di forti piene con acque cariche di sedimenti. In grotta, il trasporto di materiale di grandi dimensioni è raro, poiché, anche se mai le acque potessero raggiungere competenze tali da trascinare grossi blocchi, il trasporto verrebbe rapidamente arrestato dalla dimensione dei condotti: il materiale più diffuso è in genere costituito da **ghiaie e sabbie**.

Quando la **velocità della corrente diminuisce**, diminuisce anche la competenza, e l'acqua abbandona il materiale più grossolano, effettuando, così, una classazione granulometrica del materiale, cioè una separazione in base alle dimensioni delle particelle. Rinvenire in un condotto allagato materiale grossolano significa che la corrente può avere velocità elevate. Poiché l'acqua è in continuo movimento e con velocità molto variabili, non è raro osservare un continuo riorganizzarsi e mutare di forma e di granulometria dei depositi sul fondo di una galleria: la visita di una galleria ben conosciuta subito dopo un evento di piena può riservare sorprese, non sempre gradite, come, per esempio, occlusione di passaggi stretti e di piccole dimensioni, che devono essere riaperti con difficili operazioni di scavo, o la presenza, soprattutto in corrispondenza di inghiottitoi, di materiale trascinato dalla corrente ed estraneo alla grotta, come grossi tronchi o detriti vegetali. Queste modifiche dei depositi possono anche creare degli sbarramenti al deflusso nella zona vadosa, dando origine alla formazione di laghi o di sifoni.

La presenza di **materiale fine sul soffitto e sulle pareti di una cavità subaerea**, specie dove il materiale appare umido e "fresco", non polveroso o secco, può indicare che la galleria può subire allagamenti totali, e quindi è necessario fare attenzione durante le esplorazioni in periodi particolarmente piovosi.

I depositi fisici, soprattutto quando provengono dall'esterno, possono fornire preziose informazioni sull'evoluzione della regione: possono, infatti, contenere resti di formazioni rocciose ora completamente smantellate dall'erosione, oppure testimonianze del passaggio di ghiacciai, documentare l'alternanza di periodi caldi e periodi freddi. Uno studio dettagliato dei depositi chimici e fisici di una grotta è di fondamentale importanza per la ricostruzione della storia geologica e climatica più recente.

Il paesaggio carsico

Moltissimi sono i fattori che influenzano la formazione di sistemi di grotte: fattori chimici e climatici controllano la capacità di dissoluzione delle acque, fattori geologici controllano il tipo di roccia, la struttura geologica e lo stato di fratturazione, che a loro volta condizionano la circolazione delle acque sotterranee e lo sviluppo e l'andamento nello spazio delle grotte, e fattori topografici, come l'energia del rilievo, i dislivelli, la presenza di valli profonde, controllano lo sviluppo prevalentemente verticale o orizzontale dei sistemi carsici.

Le grotte, quindi, mostrano caratteristiche diverse a seconda delle condizioni e del luogo in cui si sono formate.

Grotte tropicali. In ambiente tropicale, le grotte mostrano caratteristiche simili. Sono spesso organizzate in vastissimi sistemi sotterranei, in genere a prevalente sviluppo orizzontale, spesso percorsi da veri e propri fiumi sotterranei, con ambienti di grandi dimensioni e ricchissimi di concrezioni: la velocità di reazione elevata, infatti, fa sì che le acque che si infiltrano nel sottosuolo, molto aggressive per la presenza di CO₂ e acidi organici che derivano dalla fitta copertura vegetale, dissolvano rapidamente grandi quantità di calcare in prossimità della superficie, per divenire presto sature o sovrassature, e formare quindi grandi quantità di concrezioni.

Grotte d'alta montagna. All'estremo opposto, le grotte in ambiente di alta montagna mostrano andamento prevalentemente verticale, a causa del potenziale energetico dovuto ai grandi dislivelli e a una struttura geologica in genere complessa, con grandi pozzi, spesso molto profondi (anche più di 600 m): a causa della velocità di dissoluzione più lenta per le basse temperature, le acque che si infiltrano possono rimanere aggressive anche in profondità, formando così sistemi profondi e verticali. Le concrezioni, invece, a causa delle basse temperature, sono molto scarse. In superficie si osservano spesso pozzi verticali, la cui formazione è spesso legata all'azione congiunta di processi di carsismo e processi legati alla presenza di ghiaccio e neve.

Il paesaggio carsico in superficie

Il paesaggio carsico ha due caratteristiche peculiari, che lo rendono immediatamente riconoscibile anche dove le rocce sono coperte da suoli e vegetazione: particolari **forme di dissoluzione in superficie** e **l'assenza pressoché totale di corsi d'acqua superficiali**, poiché tutta l'acqua, o buona parte di essa, viene rapidamente portata in profondità.

Questa caratteristica rende il lavoro degli speleologi particolarmente importante, poiché le aree carsiche sono in genere caratterizzate da problemi di approvvigionamento idrico: l'individuazione di riserve d'acqua sotterranee, la loro localizzazione e lo studio di possibilità di sfruttamento sono un contributo importantissimo al benessere delle popolazioni locali, specie in zone aride di Paesi in via di sviluppo.

Tra le forme carsiche più particolari, oltre ai già citati **karren**, o lapiez, che sono forme a piccola scala, le **doline** sono sicuramente quelle più note e appariscenti. Possono essere di diversa origine, ma per gli speleologi quelle più interessanti sono sicuramente le doline di crollo, che

spesso permettono l'accesso a sistemi di grotte. Le **doline di crollo** spesso si presentano come pozzi, sovente a sezione subcircolare, a volte molto profondi (come i famosi sótanos messicani, di cui il Sótano de las Golondrinas è il rappresentante più noto, profondo 370 m). A volte forme di questo tipo permettono di affacciarsi direttamente su sistemi allagati: è il caso dei cenotes (di cui quelli dello Yucatan sono i più famosi, ma ne esistono in moltissime aree costiere in zone tropicali).

Forme più complesse e di grandi dimensioni sono i **polja** (polje al singolare), che sono caratterizzati da cavità, i ponor, che possono funzionare alternativamente, da **inghiottitoi** in periodo di secca, o da **sorgenti** in periodi fortemente piovosi: quando la quantità d'acqua all'interno del sistema carsico è maggiore della capacità di smaltimento, questa risale fino agli inghiottitoi, da cui fuoriesce, sovente formando **laghi temporanei** (per esempio, i polja nei pressi delle grotte di Postumia, in Slovenia).

Le zone tropicali sono caratterizzate da forme particolari del paesaggio, modellato da **carso a coni** e **carso a torri** (famoso il carso a torri del sud della Cina, o della Thailandia).

La formazione di sistemi di drenaggio sotterraneo causa spesso la cattura di corsi d'acqua superficiali, attraverso inghiottitoi che lasciano "a secco" la valle: si formano così le valli secche, dove il corso d'acqua è privato dell'acqua, le valli cieche, dove il corso d'acqua scompare nel sottosuolo, spesso attraverso imponenti portali, e le valli chiuse, dove, al contrario, una valle nasce "dal nulla", spesso alla base di una parete, in corrispondenza di grandi **sorgenti carsiche** (per esempio, la celeberrima Fontaine de Vaucluse, in Francia).

Il paesaggio sotterraneo

Osservando uno spaccato verticale di un sistema carsico, si osservano diverse zone, in funzione di come l'acqua vi è presente e vi si muove.

La zona di assorbimento. La zona di assorbimento è la zona più superficiale, dove le acque di superficie e meteoriche si infiltrano in profondità. L'assorbimento può avvenire attraverso sistemi di innumerevoli fratture, in modo diffuso, che non dà molte evidenze in superficie, oppure in punti di assorbimento concentrato, come le doline, depressioni che raccolgono e concentrano le acque superficiali: in questo modo l'azione corrosiva dell'acqua si concentra su un piccolo numero di fratture, che vengono quindi allargate in modo preferenziale conducendo rapidamente allo sviluppo di forme carsiche sotterranee. A volte l'ingresso delle acque di superficie in profondità prende forme ancor più spettacolari: corsi d'acqua che scorrono su rocce impermeabili e non carsificabili, al contatto con rocce carsificabili, come calcari e dolomie, vengono letteralmente inghiottiti nel sottosuolo, a volte con piccole perdite che asciugano gradatamente la portata del fiume, fino a farlo scomparire, lasciando una valle secca, a volte con spettacolari inghiottitoi che catturano totalmente la portata del corso d'acqua: un esempio particolarmente spettacolare è la cattura del fiume Reka, in Slovenia, che, attraverso le grotte di San Canziano, viene inghiottito e scompare per riapparire 40 km più a valle, da risorgenti vicino a Trieste, con il nome di Timavo.

La zona di trasferimento, o zona vadosa. Al di sotto della zona di assorbimento, si sviluppa la zona di trasferimento verticale, dove l'acqua scorre per lo più verso il basso, e le grotte presentano un andamento prevalentemente verticale. Il progressivo unirsi e concentrarsi degli scorrimenti idrici sotterranei fa sì che dalla zona di trasferimento verticale si passi gradatamente alla zona di trasferimento orizzontale, dove l'acqua si organizza in veri e propri corsi d'acqua che, in modo del tutto simile a quanto accade in superficie, scavano ed erodono canyon, forre, meandri, caratterizzati da una serie di forme di erosione come marmitte e calderoni alla base dei pozzi. L'acqua ha qui in genere una forte energia e una velocità elevata, così che i fenomeni di erosione prevalgono su quelli di corrosione.

Tutta questa zona appartiene alla cosiddetta zona vadosa, termine che indica la **presenza di vuoti contemporaneamente riempiti di aria e acqua**, con acqua che vi scorre a pelo libero. Nella zona di trasferimento verticale sono rari i tratti di gallerie o condotte completamente allagate, mentre nella zona di trasferimento orizzontale si possono trovare laghi sotterranei, dove ostacoli al deflusso dell'acqua ne rallentano il passaggio e provocano la formazione di piccoli bacini, spesso temporanei. A volte il livello dell'acqua può superare il tetto della galleria, e allora il lago si trasforma in un sifone, cioè una porzione di galleria completamente allagata, dove la volta si immerge sotto al pelo dell'acqua: normalmente, nella zona di scorrimento orizzontale il superamento di un sifone permette di proseguire le esplorazioni in zona subaerea. Sifoni di questo tipo non sono in genere molto profondi. Una delle principali cause di formazione di laghi e sifoni è la presenza di depressioni con il fondo reso impermeabile da depositi di argilla. Il livello dell'acqua nei laghi e nei sifoni, inoltre, può variare notevolmente in funzione dell'alimentazione esterna (precipitazioni), per cui in periodi molto piovosi gallerie normalmente asciutte possono divenire completamente allagate e viceversa. Sono noti casi in cui il livello delle acque all'interno di un sistema carsico risale, in periodi particolarmente piovosi, di più di 100 m allagando, ovviamente, tutte le gallerie che si trovano al di sotto di questa quota.

La zona satura. Al di sotto della zona di scorrimento orizzontale, si trova la zona satura (spesso chiamata anche, con termine un po' improprio, zona freatica), cioè la zona dove tutte le cavità, condotti, gallerie, sale, fratture, di qualsiasi forma e dimensione, sono completamente allagate: è questa la zona che interessa gli speleosubaquei. Questo si verifica, in prossimità della costa, a livello del mare, o, in aree più distanti, a livello dei principali fondivalle, in corrispondenza del cosiddetto livello di base, cioè il livello al di sotto del quale tutti i vuoti sono completamente pieni di acqua.

Il livello di base

Tutte le grotte sono occupate in misura più o meno importante da depositi chimici, le concrezioni, e depositi fisici, sedimenti di vario tipo per lo più trasportati dall'acqua all'interno delle grotte. Questi, che nel loro complesso prendono il nome di speleotemi, costituiscono un preziosissimo archivio di dati sull'evoluzione geologica, ambientale e, soprattutto, climatica del passato.

I sedimenti chimici si formano quando le acque saturate di carbonato di calcio subiscono delle variazioni di temperatura o di contenuto in CO₂, o si concentrano per evaporazione, divenendo così sovrassature: il carbonato in eccesso si deposita, quindi, sotto forma di **concrezioni**, che prendono forme diverse a seconda del punto in cui si formano, delle modalità di precipitazione dei minerali, ecc. La maggior parte delle concrezioni è costituita da calcite, il minerale di grotta sicuramente più diffuso. Quasi tutte le concrezioni si formano in ambiente subaereo, ma in condizioni particolari, come in piccoli bacini chiusi con acque sovrassature, possono formarsi anche concrezioni subacquee. La maggior parte delle concrezioni osservabili nelle grotte allagate è costituita da concrezioni formatesi in zona subaerea, e successivamente portate nella zona satura per l'allagamento dei condotti, con acqua dolce o salata, conseguente a un successivo innalzamento del livello di base.

Le concrezioni si formano più rapidamente e più abbondantemente in climi caldi. La crescita avviene in genere in lamine concentriche, la cui composizione chimica (in particolare per quanto riguarda gli isotopi dell'ossigeno) rispecchia quella dell'acqua e dell'atmosfera in cui si formano: sono quindi un importante archivio di dati sul clima del passato.

Le grotte hanno forma

Le morfologie di grotta sono spesso complesse e difficili da descrivere; tuttavia, possono in genere essere ricondotte a poche forme elementari: gallerie, pozzi, meandri, sale.

Le **gallerie** sono i tratti ad andamento prevalentemente orizzontale o poco inclinato, in genere di grandi dimensioni (se le dimensioni sono piccole, si parla di cunicoli, ma questa è una definizione esclusivamente speleologica e non geologica: dal punto di vista dell'origine, non c'è alcuna differenza tra un cunicolo e una galleria). I diametri delle gallerie possono essere impressionanti: la galleria più grande al mondo si trova nella Deer Cave, in Sarawak, e ha un diametro medio di più di 80 m.

I **meandri** sono tratti orizzontali caratterizzati dall'essere molto alti e stretti: si tratta di un termine improprio, poiché, in realtà, sono dei veri e propri canyon sotterranei, del tutto simili a quelli scavati dai corsi d'acqua in superficie. Sono, spesso, i tratti più difficili da esplorare, perché di frequente sono molto stretti alla base o sono percorsi sul fondo da corsi d'acqua anche impetuosi, per cui devono essere percorsi a mezza altezza, con una progressione delicata e faticosa.

I **pozzi** sono invece i tratti ad andamento verticale: possono essere tubi perfettamente cilindrici, con le pareti lisce e verticali (come i pozzi formati in zona satura o, in alta montagna, per la presenza di neve o ghiaccio), oppure presentare un andamento scalinato, a gradini, con marmitte di erosione sul fondo, come nel caso dei pozzi cascata, originati, come nei corsi d'acqua in superficie, dall'arretramento per erosione di una cascata. Possono raggiungere altezze impressionanti, come il pozzo di Vritiglavica (Slovenia), profondo più di 643 m, con una verticale assoluta di 500 m.

Le **sale** si formano invece per crolli dove pozzi e gallerie si incontrano. Le dimensioni delle sale sotterranee sono a volte immense: la sala più grande del mondo è la Sarawak Chamber, nella grotta Lubang Nasib Bagus, nel complesso sotterraneo di Mulu, in Sarawak, e misura 700 x 430 m, con un'altezza di 120 m: è ancora un mistero come un simile vuoto sotterraneo possa esistere senza crollare.

Diverse zone, diverse forme

Le morfologie di grotta rispecchiano la zona in cui si sono formate: nella zona vadosa prevalgono forme di erosione meccanica (come forre e meandri e pozzi cascata) e di crollo, come le sale, mentre nella zona satura prevalgono forme di corrosione.

Il ritrovamento di forme tipiche di zona satura in una zona vadosa (o, più raramente, viceversa) è un prezioso indizio per ricostruire l'evoluzione e la storia geologica della grotta.

La maggior parte delle cavità sotterranee si forma nella zona satura, in particolare al tetto di questa (in prossimità di quella che viene, un po' impropriamente, chiamata superficie piezometrica), dove le gallerie sono permanentemente allagate, ma dove ci sia anche un certo rimescolamento delle acque e una miscelazione con acque meteoriche, che "rinnovano" periodicamente la capacità corrosiva. Le grotte non si formano quindi a partire dalla superficie, ma dall'interno, poiché è necessario che i flussi d'acqua si concentrino, per poter dare gallerie e condotti di una certa dimensione.

Le forme delle gallerie e dei condotti della zona satura sono particolari: la presenza di acqua che occupa uniformemente tutta la sezione della galleria fa sì che la corrosione avvenga su tutta la superficie, dando origine a **condotti a sezione circolare** (sia verticali che orizzontali). Se sono presenti orizzonti più facilmente corrodibili, come piani di strato, o piani di particolare debolezza della roccia, la sezione può allungarsi in questa direzione, dando origine a **gallerie a sezione ellittica, o più complessa**. Gallerie di questo tipo si dicono gallerie singenetiche, o, con termine meno corretto, freatiche, e rappresentano le prime fasi nella nascita e evoluzione di una grotta. Se il flusso dell'acqua è molto lento, sul fondo dei condotti si possono accumulare sedimenti fini che "proteggono" la roccia dalla corrosione: in questo caso la dissoluzione avviene solo sulla volta, e si formano gallerie dette paragenetiche, di solito caratterizzate da un soffitto piatto.

Forme di corrosione a piccola scala si accompagnano alla morfologia singenetica, e, quando vengono ritrovate, sono indizi preziosi nella ricostruzione della storia di una grotta. Si possono osservare, per esempio, **canali di volta** (resti delle più antiche condotte di un sistema carsico, che si osservano serpeggiare sulla volta di gallerie più grandi), **cupole** per miscela di acque (alla confluenza di condotti che portano acque a chimismo differente), oppure **scallops**. Questi ultimi sono piccole concavità asimmetriche, con un'estremità allungata a indicare il verso della corrente, dovute alla formazione di vortici e turbolenze nel flusso idrico. A volte si conservano anche in grotte fossili e possono essere osservate dagli speleologi. Sono preziosissimi indizi sulla circolazione idrica del passato: non soltanto permettono, infatti, di riconoscere il verso della corrente, ma le dimensioni possono aiutare a valutare la velocità del flusso in condizioni di piena;

queste, infatti, sono inversamente proporzionali alla velocità: forme piccole e ravvicinate indicano un flusso veloce, forme grandi e ben distanziate indicano flussi lenti.

Lo studio delle 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. È 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 a 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 il **tracciamento 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 nelle Filippine, a 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 del 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 si 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, il 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 situazioni 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. È 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 a 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 e il loro contenuto fossilifero, permette di ricostruire le variazioni dell'ambiente e del clima della superficie: in particolare, sono interessanti i resti di suoli formati in clima tropicale, oppure i sedimenti legati al 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 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 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 evolutiva: 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 a 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!

Le grotte e l'acqua

Le acque normalmente presenti in rocce porose, come sabbie o ghiaie, occupano in modo continuo tutti i vuoti presenti, ma in rocce carsificate queste si organizzano in corsi d'acqua, a volte veri e propri fiumi sotterranei, che percorrono enormi gallerie di parecchi metri di diametro e diversi chilometri di sviluppo. Le acque dei corsi sotterranei si muovono con le stesse modalità dei corsi d'acqua superficiali: come questi, sono soggette a piene causate da precipitazioni in superficie (che in grotta giungono con un certo ritardo, dovuto alla lentezza dell'infiltrazione), e sono in grado di scavare ed erodere la roccia con processi meccanici di abrasione, possono trasportare sedimenti di varia granulometria e possono creare depositi alluvionali all'interno delle grotte.

Immense riserve

La zona satura di un sistema carsico presenta uno sviluppo e una profondità che dipendono dalla struttura geologica: a volte la zona satura può essere di spessore molto piccolo, o assente, come nei sistemi carsici "sospesi" sul livello di base, a volte può avere spessore di centinaia di metri, e costituire un'immensa e preziosa riserva idrica.

La zona più superficiale della zona satura, detta zona epifreatica, subisce delle variazioni stagionali e può risalire anche di parecchie decine di metri nei periodi più piovosi: è una zona importantissima per la formazione delle grotte, perché, grazie all'effetto Boegli dovuto al

mescolamento di acque a composizione chimica differente (le acque meteoriche e le acque profonde) è qui che si formano, in gran parte, le gallerie di maggiori dimensioni.

Al di sotto della zona epifreatica, le acque della zona satura si muovono molto lentamente e possono rimanere all'interno dell'acquifero carsico per decine o centinaia di anni, prima di rivedere la luce nelle sorgenti.

Questo fa sì che le acque carsiche siano molto vulnerabili sia all'inquinamento (un inquinante potrebbe rimanere per decine di anni all'interno della falda acquifera), sia allo sfruttamento eccessivo (lo svuotamento della zona satura potrebbe richiedere decenni per la ricostituzione del primitivo livello delle acque): si tratta quindi di riserve preziose, ma da proteggere e sfruttare con grande oculatezza.

Le sorgenti

Le fuoriuscite di acque sotterranee in superficie prendono il nome di sorgenti se l'origine dell'acqua è sconosciuta o proviene da assorbimento diffuso, e di risorgenti se sono invece la venuta a giorno di corsi d'acqua inghiottiti più a monte, come il già citato caso del Timavo. Le sorgenti possono essere classificate in vario modo, in funzione della portata, della costanza del flusso o delle caratteristiche geologiche che ne determinano la formazione.

Molte sorgenti hanno un flusso perenne, anche se le variazioni di portata possono essere notevoli, in funzione delle precipitazioni; altre sorgenti, come le già citate sorgenti di troppo pieno, possono avere un deflusso temporaneo. Dal nome della celebre Fontaine de Vaucluse (Francia), sorgenti caratterizzate da andamento verticale e grandissima profondità (in molti casi superiore ai 300 m) vengono dette sorgenti vauclusiane. Alcune, per la particolare conformazione delle gallerie d'uscita, possono avere deflusso intermittente. Un deflusso regolarmente intermittente può essere osservato anche per sorgenti in prossimità del mare, dove può essere sensibile l'influenza delle maree. La direzione della corrente è in genere diretta dall'interno della grotta verso l'esterno e rimane in genere costante, ma, in alcuni casi, il flusso può invertirsi. Alcune sorgenti, infatti, possono alternativamente funzionare come sorgenti o come inghiottitoi. Questo può accadere in funzione delle precipitazioni, con scadenza stagionale, come nei già citati ponor, o, in prossimità della costa, per effetto delle maree, come nei katavothre (per esempio, quelli dell'isola di Cefalonia) o nelle sorgenti sottomarine dette estavelles. In alcuni tipi particolari di sorgenti sottomarine, le vrulja, le portate delle acque dolci che arrivano alla sorgente attraverso condotti carsici sono tali da contrastare la pressione dell'acqua marina, che, in alcuni punti può addirittura essere superata, dando origine al fenomeno del ribollimento delle acque, ben noto lungo le coste greche e dalmate, e un tempo sfruttato dai naviganti per l'approvvigionamento di acqua potabile. Le velocità delle correnti in questi punti possono essere impressionanti, tanto che in passato hanno spesso alimentato leggende di mostri sottomarini.

Il movimento dell'acqua

Le sorgenti carsiche presentano una forte dipendenza dagli eventi piovosi esterni per diversi motivi. La velocità delle acque della zona vadosa è elevata, paragonabile a quella dei corsi d'acqua esterni, ma non solo: l'aumento del carico idraulico conseguente all'entrata in grotta di grandi quantità di acqua può esercitare una forte pressione sulle acque della zona satura, che vengono letteralmente spinte all'esterno, con un effetto detto di pistonaggio, termine che rende bene l'idea del meccanismo. Mentre un'onda di piena conseguente all'arrivo delle acque di infiltrazione arriverà dopo un certo tempo, necessario al trasporto fisico delle acque infiltrate, l'effetto pistone fa sì che l'onda di piena si propaghi non come onda di materia, ma di energia: la velocità di propagazione dell'onda di piena è quindi molto maggiore della velocità di flusso delle acque, e si ritiene essere pari alla velocità del suono: in certi casi, quindi, la propagazione dell'onda di piena è praticamente istantanea. Questo significa che un evento piovoso in superficie si può tradurre, alla sorgente, in una piena pressoché immediata, che segue l'evento piovoso di poche ore, o di pochi minuti. L'arrivo di piene di questo tipo è rapido e senza segni premonitori, come un progressivo innalzarsi del livello dell'acqua o della velocità della corrente. Sono note cavità situate in prossimità della zona satura che si riempiono in pochi minuti in caso di acquazzoni anche di modesta entità (es. la grotta di Peyrejal, nel sud della Francia): per l'esplorazione di queste grotte è tassativa la consultazione di previsioni meteorologiche affidabili e un'ottima conoscenza del sistema.

L'arrivo di una piena per propagazione diretta, invece, è spesso preannunciato da segnali quali il graduale innalzamento del livello dell'acqua o l'aumento della velocità del flusso, spesso accompagnati da rumori quali colpi d'ariete sulle pareti, fischi o rombi dovuti all'espulsione dell'aria dalle gallerie che si vanno allagando (famoso è l'esempio della Grotta Masera, sul Lago di Como, una sorgente di troppo pieno la cui entrata in funzione è preannunciata da un forte "rombo di tuono", perfettamente udibile nel vicino paese, che fa accorrere gli abitanti a godersi lo spettacolo).

Interessante è confrontare l'andamento delle portate nel corso di una piena (con un grafico detto idrogramma) in un acquifero a circolazione diffusa (tipico delle rocce porose) e in un acquifero carsico: la presenza di grandi condotti carsici fa sì che l'arrivo dell'onda di piena sia più veloce e concentrato nel tempo, così che il picco di piena è, a parità di precipitazioni, molto più alto.

L'onda di piena è in genere accompagnata da un aumento della torbidità dell'acqua e dal trasporto di materiale preso in carico. Le relazioni tra andamento delle portate e variazioni di contenuto in sali disciolti (misurato dalla conducibilità elettrica) e torbidità nel corso di una piena in un acquifero carsico indicano che l'aumento della conducibilità elettrica è in relazione con il pistonaggio di acque che sono rimaste a lungo nella zona satura (e si sono quindi arricchite di carbonati), mentre l'aumento della torbidità è legato all'arrivo diretto di acque di infiltrazione: l'analisi delle acque ci permette di evidenziare, quindi, l'arrivo dell'onda di piena dinamica e di quella "fisica". Le analisi chimiche e di portata delle acque di una sorgente sono piuttosto

complesse, ma sono però indispensabili per comprendere i meccanismi di piena in un sistema carsico.

Gli acquiferi carsici

Gli acquiferi carsici rappresentano un'importantissima risorsa idrica in moltissime regioni della Terra: i terreni carsici, infatti, sono, per loro stessa natura, privi di acque superficiali, e tutta la circolazione idrica avviene in profondità.

Si tratta, però, di risorse molto delicate da utilizzare e da proteggere. Gli acquiferi carsici, infatti, per alcune loro caratteristiche, sono particolarmente vulnerabili agli inquinamenti e all'eccessivo sfruttamento.

Un utilizzo eccessivo e incontrollato delle riserve delle zone sature profonde può essere un pericolo per questo tipo di acquiferi: le acque profonde, infatti, a volte si muovono molto lentamente e richiedono anni o decenni per essere sostituite e un emungimento eccessivo può compromettere per sempre lo sfruttamento dell'intero acquifero.

Ma è soprattutto nei riguardi della propagazione di sostanze inquinanti che gli acquiferi carsici appaiono particolarmente vulnerabili. In una sabbia o una ghiaia, dove le velocità delle acque sono molto lente, il contatto prolungato dell'acqua con la roccia fa sì che le acque possano essere depurate da eventuali inquinanti, sia per effetto di filtro meccanico, sia per naturale degrado di alcune sostanze con il tempo, sia per l'azione di colonie di batteri che vivono sulla superficie dei granuli. Questi processi fanno sì che molti inquinanti, soprattutto quelli organici, vengano eliminati dall'acquifero stesso, con un meccanismo di autodepurazione che contribuisce a proteggere la falda acquifera dagli inquinamenti. Nella zona più superficiale di un acquifero carsico, le acque si muovono a velocità elevate, paragonabili a quelle di un corso d'acqua superficiale, e l'effetto di autodepurazione è praticamente nullo: quello che entra in un acquifero carsico, quasi sempre esce immutato alla sorgente, spesso in brevissimo tempo. Nella zona satura profonda, invece, dove la circolazione è molto lenta, le sostanze inquinanti si possono raccogliere e depositare, concentrandosi. Successivamente, il particolare meccanismo di propagazione delle piene, per pistonaggio, può provocare la fuoriuscita istantanea e concentrata di un eventuale inquinante, che si è magari accumulato lentamente nel corso degli anni. Spesso questi episodi di inquinamento istantaneo appaiono inspiegabili, perché non si riesce a individuare alcuna fonte di inquinamento attuale: piccole quantità di inquinanti, ben tollerabili da altri tipi di acquiferi, divengono così potenzialmente assai pericolose per un acquifero carsico.

Purtroppo, le aree carsiche hanno un'altra caratteristica che le rende ancora più vulnerabili: la presenza, nella zona di assorbimento, di una grande quantità di depressioni, inghiottitoi, pozzi e doline sembra ideale per farne delle comode discariche dove occultare tutto ciò che non serve più, a volte anche materiali assai pericolosi. Troppo spesso si dimentica, o si finge di non sapere che in questo modo si inquina l'intero sistema carsico. Poiché non sempre è noto il punto di risorgenza delle acque carsiche, l'inquinamento prodotto nella zona di assorbimento può andare a inquinare sorgenti distanti anche diversi chilometri, addirittura in valli adiacenti: il malcostume

di chi vive nelle zone a quote più alte può causare a volte gravi problemi agli ignari abitanti del fondovalle. La conoscenza degli acquiferi carsici è ancora tanto scarsa, purtroppo, che fino a pochi anni addietro è stato persino proposto di utilizzare le grotte per lo stoccaggio di rifiuti tossici e radioattivi!

Gli abitanti delle grotte

L'ambiente delle grotte, buio e misterioso, ha da sempre stimolato la fantasia dell'uomo, suscitando un misto di curiosità e timore. L'uomo ha quindi popolato le grotte di esseri arcani e fantastici, quasi sempre legati al mondo dell'oltretomba e al culto dei morti: presso le culture occidentali gli abitanti delle grotte erano visti come maligni e diabolici, ma in molte altre culture, specie quelle orientali, erano (e in molti casi sono tuttora) esseri soprannaturali positivi, protettori e apportatori di buona fortuna. Con il procedere delle conoscenze e delle ricerche su questo particolare ambiente, ci si è resi conto che le grotte non ospitano né diavoli né draghi, bensì una microfauna di esseri piccolissimi e schivi, difficili da osservare, ma interessantissimi per lo studio dell'evoluzione e dell'adattamento all'ambiente. Foto 1

Biologi speciali. La biospeleologia è la branca della zoologia che studia gli animali, grandi e piccoli, che vivono nelle grotte, i loro cicli vitali e gli adattamenti che permettono loro di vivere in un ambiente con caratteristiche del tutto particolari.

La prima segnalazione di un interesse da parte dell'uomo per gli abitanti delle caverne è antichissima: 15.000 anni fa in una grotta sui Pirenei (Francia) è stato ritrovato un osso di bisonte sul quale un nostro antenato raffigurò un insetto che ancora oggi si incontra facilmente nelle grotte, una cavalletta del genere *Troglophilus* (da trogo, grotta, e philo, amico).

Bisogna, tuttavia, attendere il 1500 per avere le prime descrizioni scientifiche di animali di grotta, anche se fu soltanto nel 1700 che gli studiosi si interessarono a questo ambiente in modo più diffuso e sistematico. La biospeleologia nacque nel 1907 con il lavoro del naturalista rumeno Racovitza, che diede la prima impostazione moderna a questo tipo di studi. La biospeleologia inizialmente si occupava soltanto degli animali che vivono nelle grotte, ma con il progredire degli studi i ricercatori si sono resi conto che, per quanto riguarda gli animali più piccoli (come insetti, ragni e altri Artropodi) anche una piccola fessura o una valletta ombreggiata hanno le stesse caratteristiche dell'ambiente cavernicolo. Di conseguenza il termine biospeleologia ha ora un significato più ampio, interessandosi di tutte le forme di vita che occupano ambienti con caratteristiche simili a quelle delle grotte.

Inquilini temporanei e non

I biospeleologi suddividono gli abitanti delle grotte in tre grandi categorie: **troglosseni**, **troglofili** e **troglobi**. Questi nomi un po' difficili indicano animali che possono trovarsi in grotta per caso (troglosseni) o per necessità (troglofili), o animali che vivono tutto il loro ciclo vitale in grotta (troglobi). Questi ultimi hanno sviluppato adattamenti particolari, tanto che non possono sopravvivere al di fuori delle grotte.

Visitatori involontari. I **troglosseni** sono gli animali che vengono a trovarsi in grotta per caso, per esempio perché caduti all'interno di un pozzo o di una spaccatura o trascinati dentro una grotta da un torrente in piena o da acque di ruscellamento. Sono animali che normalmente vivono in superficie e che non hanno sviluppato alcun adattamento alla vita in grotta. Sono quindi destinati alla morte, in questo ambiente a loro estraneo, anche se in alcuni casi possono sopravvivere a lungo, se ricevono fonti di cibo dall'esterno, soprattutto se rimangono in prossimità degli ingressi, dove c'è ancora un po' di luce.

Non possono comunque riprodursi in grotta e si limitano a sopravvivere come possono. Le grotte conservano spesso resti fossili di animali troglosseni, entrati in grotta loro malgrado, tra cui anche l'uomo (come, per esempio, il celebre uomo di Altamura, in Puglia) ...

Comodi rifugi. I **troglofili** sono gli "amici delle grotte", animali che normalmente vivono alla luce del sole, ma che occasionalmente possono trovare rifugio nelle grotte, dove cercano riparo dal freddo, dalle intemperie o dal caldo eccessivo, o si proteggono dai predatori. È il caso di pipistrelli, volpi, opossum, procioni, istrici, piccoli roditori, serpenti e innumerevoli altri animali che in grotta cercano riparo e un luogo sicuro per mettere al mondo i piccoli o per immagazzinarvi riserve di cibo (come fanno molti roditori) o per nascondervi le prede per sottrarle ad altri predatori (come fanno, per esempio, iene e leopardi).

Pipistrelli e orsi passano l'inverno in grotta e mettono al mondo i piccoli, che usciranno a conoscere il mondo esterno soltanto in primavera, perché le grotte offrono un riparo caldo e sicuro per trascorrere il letargo invernale.

In prossimità degli ingressi è comunissimo, per gli speleologi, imbattersi nelle tracce dei frequentatori delle grotte: escrementi, resti di cibo, impronte, nidi e tane. A volte gli speleologi forniscono involontariamente cibo e rifugio agli ospiti delle grotte: può capitare di trovare una famigliola di ghiri pacificamente raggomitolata tra le corde lasciate in un sacco alla base di un pozzo profondo 90 m in fase di esplorazione!

Non sempre si tratta di animali grandi e visibili: moltissimi insetti e altri Artropodi (come ragni e millepiedi) o anfibi (come rane e salamandre) si rifugiano nelle grotte e nelle fessure nei mesi più freddi: in inverno in prossimità degli ingressi di una grotta è facilissimo osservare farfalle, ragni, opilioni e altri piccoli "rifugiati" che sfruttano il tepore delle cavità.

I troglofili sono tutti animali che vivono in superficie, che hanno bisogno della luce per muoversi e che si nutrono di cibo che non trovano in grotta. Si tratta, perciò, di abitanti "opportunisti" delle grotte che sfruttano per il letargo, il riposo o come rifugio per i piccoli, ma che non possono vivere perennemente in grotta: devono infatti uscire per procurarsi il cibo o per trovarsi un compagno. Alcuni di loro, tuttavia, pur avendo bisogno della vista per muoversi, mostrano una sorprendente capacità di orientarsi al buio, come gli orsi o i roditori.

Altri hanno sviluppato sistemi particolari per muoversi nell'oscurità totale, come per esempio i pipistrelli o alcune specie di uccelli che nidificano in grotta: le salangane (una specie di rondini del sud-est asiatico che forniscono i nidi tanto prelibati per la cucina orientale) o il guacharo (un curioso uccello del Sudamerica). Questi animali sono dotati di un sistema di "ecolocalizzazione": sono

in grado di emettere suoni ad alta frequenza che, rimbalzando contro ostacoli o prede e percepiti da un sofisticato sistema uditivo, permettono loro di costruire, in totale assenza di luce, una vera e propria "mappa" del luogo in cui si muovono con precisione sorprendente.

Inquilini stabili. Gli animali **troglobi** sono, invece, gli animali che trascorrono l'intero ciclo della loro vita in grotta, dove nascono, vivono, si riproducono e si nutrono. Si sono specializzati nel vivere in questo ambiente e, nel corso di migliaia o persino milioni di anni, hanno modificato il loro corpo sviluppando adattamenti e strategie particolari. Non hanno quindi necessità di uscire all'esterno e in molti casi non possono sopravvivere al di fuori dell'ambiente sotterraneo.

Non tutti i phyla animali sono rappresentati in questa categoria: mancano, per esempio, mammiferi e uccelli. Vi troviamo molti rappresentanti tra gli Artropodi (ragni, scorpioni e pseudoscorpioni, amblipigi, centopiedi e millepiedi, crostacei, come i porcellini di terra o i gamberetti, e soprattutto insetti), ma anche tra i pesci e gli anfibi.

Un ambiente particolare

L'ambiente di grotta possiede alcune caratteristiche fisiche e morfologiche che lo rendono molto particolare e diverso da tutti gli altri ambienti terrestri. Queste caratteristiche fanno sì che non tutti gli organismi vi possano vivere, ma soltanto quelli che hanno sviluppato particolari adattamenti evolutivi.

L'ambiente ipogeo può essere suddiviso in diversi sotto ambienti:

- **ambiente di superficie**
- **ambiente endogeo** (suolo)
- **sotterraneo superficiale** (fessure e fratture della roccia)
- **sotterraneo profondo.**

Gli adattamenti e le specializzazioni delle specie animali divengono via via più marcate quanto più ci si addentra in profondità.

Tra i fattori ambientali che caratterizzano l'ambiente sotterraneo il più importante e appariscente è ovviamente la mancanza di luce, la quale scompare rapidamente, allontanandosi dall'ingresso. Ne deriva la necessità di sviluppare adattamenti che permettano di muoversi, di difendersi o fuggire dei predatori, di procacciarsi il cibo e di trovare un compagno per riprodursi in un luogo dove l'oscurità è perenne e completa. Foto 8

Un'altra conseguenza significativa dell'assenza di luce è la graduale scomparsa, al ridursi della sua intensità, degli organismi vegetali che vivono grazie alla fotosintesi clorofilliana. Le piante superiori sono le prime a scomparire, mentre alcune piante, dette sciafile, sono più resistenti di altre alla scarsità di luce. Le piante che più si spingono all'interno delle grotte sono le felci (**crittogame**) e gli ultimi vegetali a scomparire sono i muschi e le alghe verdi-azzurre, che possono vivere in condizioni che il nostro occhio percepisce ormai come buio quasi assoluto. Di conseguenza con l'assenza dei vegetali viene a mancare un'importante fonte di cibo, caratteristica di un ambiente oligotrofico, cioè povero di nutrimento.

La catena alimentare viene stravolta e gli animali che vi vivono devono adattarsi.

Anche la temperatura è un parametro molto importante, poiché controlla il metabolismo di ogni specie animale. Le grotte hanno una caratteristica particolare: la temperatura al loro interno è molto stabile ed è costante durante tutto l'anno e pari alla temperatura media annua dell'esterno. Da questo deriva che la maggior parte degli animali cavernicoli non è in grado di sopportare sbalzi termici e variazioni di pochissimi gradi li possono uccidere.

Un altro parametro importante è l'umidità, che è in genere elevata in grotta e nell'ambiente degli interstizi e delle fratture.

La maggior parte degli animali cavernicoli ha bisogno di un elevato tasso di umidità, molto prossimo alla saturazione: alcune sono specie stenoidre e necessitano di umidità costante. Per questo, se si vuole andare alla ricerca di animali in grotta bisogna tener conto che le zone secche sono praticamente disabitate.

Gli adattamenti

L'ambiente di grotta è un ambiente severo e selettivo e pochissimi organismi vi si sono adattati sviluppando caratteristiche morfologiche e metaboliche particolari. Le modificazioni non sono immediate, ma sono il frutto di un'evoluzione che può durare anche qualche milione di anni, a partire da specie che vivevano all'esterno che sono rimaste per varie ragioni isolate all'interno di cavità sotterranee. Le specie che da più tempo si sono adattate alla vita sotterranea sono quelle che mostrano le modificazioni più specialistiche.

A causa della **mancanza di luce**, gli occhi sono uno strumento inutile: le specie che da più tempo si sono adattate a vivere in grotta sono caratterizzate dalla totale assenza di occhi (**anoftalmia**), mentre nelle specie in via di adattamento gli occhi sono presenti, ma atrofizzati o poco sviluppati. Alcune specie presentano, alla nascita, occhi più o meno rudimentali che poi si atrofizzano o scompaiono con la crescita. Per muoversi al buio, per percepire la presenza di predatori o di individui della propria specie, si sviluppano altri organi di senso: gli organismi di grotta sono in genere dotati di zampe molto lunghe, di lunghissime antenne, di peli e setole che hanno la funzione di organi tattili e di un senso dell'olfatto sviluppatissimo.

Nel buio più completo, anche la capacità di volare è inutile: gli animali cavernicoli che derivano da specie originariamente in grado di volare (come gli insetti) hanno tutti perso questa capacità, con atrofizzazione e scomparsa delle ali.

Con il buio svaniscono anche i colori: la fauna cavernicola presenta il fenomeno della **depigmentazione**, con individui scarsamente colorati e di colori tenui sui toni del beige o giallino (il colore della chitina), come molti insetti, o completamente bianchi o trasparenti, come molte specie di pesci o gamberetti. È interessante notare che le specie ad adattamento più recente, se riportate alla luce per un tempo abbastanza lungo, possono riacquistare la colorazione, mentre le specie ormai adattate alla vita cavernicola non hanno più questa capacità e vengono spesso uccise dall'intensità della radiazione solare.

La mancanza di luce influisce anche sulla produzione di chitina (che è la sostanza che costituisce l'esoscheletro di insetti e crostacei), per cui questi presentano in genere un esoscheletro più

sottile e meno robusto che rende gli individui più vulnerabili ai predatori e li espone alla disidratazione. Alcuni coleotteri si sono evoluti sviluppando una particolare saldatura delle elitre, che crea una cavità all'interno dell'addome capace di contenere una piccola quantità di liquidi "di riserva": per questo molti insetti cavernicoli presentano un addome sferico e particolarmente voluminoso.

Tigri in miniatura

Data la mancanza di vegetali, nell'ambiente ipogeo la piramide alimentare è strutturata in modo differente: la base dell'alimentazione è rappresentata da batteri autotrofi, cioè organismi che riescono a produrre sostanza organica non dalla luce, ma direttamente dalle sostanze minerali, come nitrobatteri (che utilizzano l'azoto), solfobatteri (che utilizzano lo zolfo) e molti altri. Esiste poi una **fauna batteriofaga**, che vive nel fango e che si nutre dei batteri. I batteriofagi sono a loro volta predati dalla **fauna limivora** (lombrichi, crostacei, larve di insetti), che si nutre "setacciando" il fango e che a sua volta diviene preda di **chilopodi** (centopiedi), **aracnidi** (ragni e opilioni), e **insetti** che in grotta sono al vertice della piramide alimentare.

L'equivalente dei "grandi carnivori" è rappresentato dai chilopodi e dai coleotteri, che, nonostante le loro ridotte dimensioni, svolgono il medesimo ruolo ecologico di leoni e tigri negli ambienti di superficie. I coleotteri sono, tra gli animali di grotta, quelli che mostrano i più stupefacenti adattamenti: sono predatori efficienti e terribili, dotati di un olfatto finissimo, in grado di localizzare con precisione le loro prede e di spostarsi su lunghe distanze alla ricerca di cibo.

L'apparato boccale e masticatore, particolarmente evoluto, non lascia scampo alle prede e ne fa delle vere e proprie "piccole tigri" del mondo degli insetti.

Altri cacciatori molto efficienti sono i chilopodi e i crostacei, come i gamberi. I pesci sono organismi troglobi che raggiungono le maggiori dimensioni (qualche decina di centimetri), segno della loro posizione al vertice della catena alimentare nel mondo sotterraneo sommerso.

Stili di vita

L'ambiente cavernicolo è un ambiente povero di cibo. La parola d'ordine sottoterra è il risparmio energetico, per cui gli organismi meglio adattati sono quelli che hanno bisogno di poca energia per vivere e per riprodursi. Per questo, la maggior parte degli abitanti delle grotte ha un metabolismo molto rallentato: una crescita lenta, ridotte dimensioni, un lungo ciclo vitale. Sono lenti e si muovono poco, raggiungono la maturazione sessuale molto lentamente e spesso mantengono i caratteri tipici delle forme giovanili, si riproducono poco, si accontentano di quantità di cibo molto ridotte e spesso hanno un basso consumo di ossigeno.

Mancando l'alternanza notte-giorno, i ritmi vitali non sono ovviamente basati sul normale ritmo di 24 ore a cui sono sottoposti tutti gli organismi che vivono alla luce del sole. A causa delle scarse risorse alimentari, che dipendono dai batteri autotrofi e dagli scarsi e sporadici apporti dall'esterno, l'ambiente ipogeo può ospitare soltanto un ridotto numero di specie rappresentate

da pochi individui: le grotte sono allora un luogo poco affollato e con pochi predatori, un ambiente quindi protetto e tranquillo.

Piccoli diavoli da proteggere

L'animale simbolo delle grotte è sicuramente il **pipistrello**. In molte grotte in aree tropicali i pipistrelli formano colonie di migliaia, a volte milioni di individui. Lo spettacolo offerto da questi animali è uno dei più affascinanti della natura: al tramonto si muovono nel cielo, disegnando un "serpente" nero, per andare a caccia di insetti.

Questo animale possiede caratteristiche del tutto particolari: è l'unico mammifero in grado di volare, con ali e muscolatura adatta a differenza di altri mammiferi "volanti", come certe specie di scoiattoli, dotati solo di membrane di pelle. Ma la sua caratteristica più particolare è sicuramente il sistema di ecolocazione: nessun altro animale ha un "radar" altrettanto preciso e sofisticato, tanto che gli permette di spingersi nelle zone più lontane dagli ingressi e di cacciare prede anche molto piccole come gli insetti. Per gli speleologi impegnati in passaggi piccoli e angusti è abbastanza comune sentirsi sfiorare il viso dalla corrente d'aria leggera e "sfarfallante" creata dal battito delle ali del pipistrello che passa a pochi centimetri dalle pareti e dallo speleologo, senza sfiorare né le une né l'altro!

Il suo sofisticato sistema uditivo lo ha dotato di enormi orecchie (al contrario degli occhi, che sono piccoli e poco sviluppati anche se il pipistrello non è del tutto cieco) e il suo naso ha spesso un aspetto curioso, essendo modificato per poter emettere gli ultrasuoni necessari a orientarsi. Questo gli conferisce un aspetto non proprio gradevole, che, unitamente alle ali membranose e alla colorazione spesso scura, gli danno un aspetto di "piccolo diavolo". Infatti sono state alimentate ingiuste e sciocche credenze, che spesso dipingono il pipistrello come un animale pericoloso e maligno, fonte di infondato timore, che in passato (e purtroppo ancora oggi) ha portato a vere e proprie persecuzioni nei suoi confronti.

Moltissime persone sono a tutt'oggi convinte che i pipistrelli si impiglino ai capelli, possibilità in realtà assai remota, vista la precisione del volo del "piccolo diavolo" e vista la sensibilità del suo apparato uditivo, che, sollecitato dai nostri strepiti di spavento, lo farà sicuramente fuggire rapidamente, ben più spaventato di noi! Anche la credenza che i pipistrelli succhino il sangue è ingiustificata: esiste una sola specie di **pipistrello "vampiro"**, del genere *Desmodus*, che vive in Sudamerica, che pratica un morso indolore perché la sua saliva contiene un anticoagulante e una sorta di anestetico alla sua vittima. Si tratta, contrariamente a ciò che si crede, di un esserino lungo pochi centimetri, in grado di suggerire una quantità assai modesta di sangue (non certo capace di dissanguare una persona!) e che attacca in genere quadrupedi, che non possiedono mani in grado di scacciarlo. Il pipistrello "vampiro" ha un comportamento sociale che fa facilmente perdonare queste sue abitudini alimentari: non potendo resistere senza cibo per più di poche ore, è sua abitudine aiutare i piccoli e gli esemplari feriti o ammalati che non possono procurarsi il nutrimento da soli, rigurgitando cibo nella loro bocca.

Al di là delle leggende e della tradizione popolare, i pipistrelli, in realtà, sono animali utilissimi: sono infatti formidabili cacciatori di insetti, che divorano ogni notte a tonnellate. Se adeguatamente protetti, sono quindi efficientissimi "insetticidi naturali", che non costano nulla, non inquinano e rallegrano le nostre sere estive con il loro volo ondeggiante. Il loro guano costituisce, inoltre, un ottimo e pregiato fertilizzante. Purtroppo, è un animale sempre più raro nei paesi industrializzati a causa del massiccio uso di pesticidi, che, avvelenando le sue prede abituali, finisce per avvelenare anche il nostro piccolo amico.

Storie di draghi

L'animale che più spesso la fantasia dell'uomo ha collocato nelle grotte, di solito a guardia di immensi tesori o di principesse rapite, è il drago. Ma si tratta davvero soltanto di leggende? Molto spesso le leggende non sono altro che esagerazioni della realtà e la leggenda dei draghi non fa eccezione. I draghi sono quasi sempre dotati di ali, guarda caso simili a quelle dei pipistrelli (e di ogni diavolo che si rispetti, del resto): forse il timore di questi piccoli abitanti delle grotte li ha fatti, in qualche caso, vedere più grandi di quello che sono in realtà?

Molti ritrovamenti paleontologici (come quelli dei grandi dinosauri) hanno sicuramente contribuito a far nascere le leggende sui draghi e il fatto che all'interno delle grotte si siano spesso ritrovate ossa di grandi dimensioni (come, per esempio, quelle dell'orso delle caverne, il grande *Ursus spelaeus*) ha sicuramente fatto sì che le grotte siano state viste come la dimora di questi esseri fantastici. Per esempio, nell'Italia del sud, i ritrovamenti di fossili di elefanti, il cui cranio è dotato di un grande foro per le cavità nasali dove si innesta la proboscide, ha fatto nascere la leggenda dei ciclopi, mitici esseri giganteschi dotati di un solo grande occhio in mezzo alla fronte. Ma le leggende sui draghi ebbero una straordinaria conferma nel 1689. In una sorgente nei pressi di una grotta del Carso, il naturalista Valvassor, uno dei primi studiosi di grotte, ritrovò un animaletto curioso: lungo e roseo, dotato di quattro zampette, una lunga coda e due strani ciuffi rossi ai lati del muso privo di occhi, questo animale sembrava proprio un piccolo drago in miniatura... sicuramente il cucciolo di qualche essere gigantesco e mostruoso, portato all'esterno dalle acque! Bisogna aspettare il 1768 per svelare il mistero: non si trattava di un cucciolo di drago, ma di un esemplare adulto di *Proteus anguinus*, uno dei più strani abitanti delle grotte.

Il proteo

Si tratta di un anfibio, lontano parente delle salamandre, che presenta uno dei più sorprendenti adattamenti alla vita nelle grotte. Vive nelle grotte dell'area mediterranea orientale, in Dalmazia, Slovenia e nel Carso triestino e goriziano. È lungo 20-30 cm, di colore roseo e forma allungata, con una lunga coda e quattro piccole zampe (dotate di tre dita quelle anteriori e di due dita quelle posteriori), che non sono, però, in grado di sostenerlo, per cui il proteo non può camminare, ma solo nuotare. Alla nascita presenta occhi sviluppati, ma questi, crescendo, si atrofizzano completamente. La sua particolarità sono i due ciuffi rossi delle branchie ai lati del muso, che

rimangono anche nell'individuo adulto. Il proteo non completa la sua metamorfosi e rimane allo stadio larvale, giovanile, per tutta la sua vita: si tratta, in pratica, di un eterno bambino...

Numerosi laboratori sotterranei di biospeleologia ne allevano esemplari a scopo di studio, ma la sua riproduzione in cattività è molto difficile. Nel 1832, il naturalista Alberto Parolini ne introdusse alcuni esemplari nelle grotte di Oliero, vicino Vicenza, dove la specie era assente. Dei protei introdotti non si seppe più nulla e si pensò che non fossero sopravvissuti, ma nel 1965 alcuni speleosub nella sorgente del Cogol dei Veci fecero un incontro straordinario con diversi esemplari, che, evidentemente, si erano adattati e si erano riprodotti, e ora l'incontro con questi buffi animaletti è molto frequente per gli speleologi che si immergono nelle sorgenti di Oliero. Questo dimostra la grande adattabilità di questi animali e fa ben sperare di poterlo reintrodurre nelle zone in cui era originariamente presente, ma da cui è scomparso, spesso a causa dell'inquinamento delle acque.

Testo aggiornato ad agosto 2022