

Il paesaggio carsico

Dove si formano le grotte

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 pressochè totale di corsi d'acqua superficiali**, poichè tutta l'acqua, o buona parte di essa, viene rapidamente portata in profondità.

Questa caratteristica rende il lavoro degli speleologi particolarmente importante, poichè 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 sòtanos messicani, di cui il Sotano 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 fondovalle, 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 sature 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 ad 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 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, ed 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, poichè, 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, perchè spesso 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, poichè 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.