

Come si formano

Un po' di chimica

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, poichè 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).

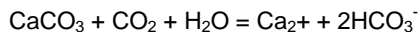
Non solo acqua

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 ad 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, poichè 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!

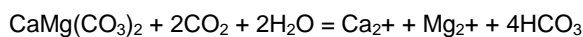
Anidride carbonica, un'alleata

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 CO₂ 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, CaCO₃) e la dolomite (carbonato di calcio e magnesio, CaMg(CO₃)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 CO₂ 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 conosciute

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 CO_2 che può sciogliersi in acqua: tanto **più è bassa** la temperatura, tanto maggiore è la quantità di CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 .

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 ad esaurirsi 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 **cristalli 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 addensati 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 perchè 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.

Poichè 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 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.

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 g/cm³, 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 la 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 e 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.