CAPITOLO

16

Il modellamento del rilievo

Le montagne sembrano eterne solo perché la nostra vita è breve: il gelo, l'acqua e il vento le stanno smontando, granello dopo granello.

OBIETTIVI

1. Distinguere gli agenti endogeni da quelli esogeni e riconoscere le fonti di energia che li alimentano.
2. Descrivere la degradazione meteorica fisica e chimica, il fenomeno carsico e la formazione del suolo.
3. Classificare i movimenti di massa e spiegare perché l'Italia è un Paese fragile dal punto di vista idrogeologico.
4. Riconoscere le forme prodotte dalle acque correnti, dai ghiacciai, dal vento e dal mare.
5. Valutare il ruolo degli organismi e dell'uomo nel modellamento del territorio e nella difesa del suolo.
6. Leggere un paesaggio italiano riconoscendo gli agenti che lo hanno costruito.

INDICE DEL CAPITOLO

16.1 Le forze che modellano la superficie 2
16.2 La degradazione meteorica 4
16.3 Frane e dissesto idrogeologico 8
16.4 Il lavoro delle acque correnti 10
16.5 Ghiacciai e vento 14
16.6 Il mare, gli organismi e l'uomo 17

Scienze naturali 1 · Parte III · Aria, acqua e rilievo · versione 1.0
Capitolo 16: Il modellamento del rilievo · pagine 415–440 del volume completo · estratto per lo studio

Guarda una fotografia delle Dolomiti, del Gran Sasso o delle scogliere del Gargano: tutto sembra immobile, come se quelle forme fossero lì da sempre. In realtà ogni paesaggio è una fotografia scattata durante un film lentissimo. Le pareti rocciose perdono ogni inverno qualche frammento, i torrenti trascinano a valle ghiaia e sabbia, le spiagge avanzano o arretrano, i ghiacciai che un tempo riempivano le valli alpine hanno lasciato colline e laghi dove oggi sorgono paesi e vigneti.

In questo capitolo conclusivo mettiamo insieme molte delle cose che hai studiato: l'acqua che gela e aumenta di volume (Capitolo 2), la solubilità dei gas nell'acqua (Capitolo 3), le reazioni chimiche (Capitolo 5), l'atmosfera e il clima (Capitoli 13 e 14), le acque continentali e marine (Capitolo 15). Vedremo come questi processi, lavorando per migliaia o milioni di anni, scolpiscono le forme della superficie terrestre. E vedremo anche che l'uomo è diventato uno degli agenti più rapidi nel trasformare il territorio, con conseguenze che riguardano la sicurezza di tutti.

16.1 Le forze che modellano la superficie

16.1.1 Agenti endogeni ed esogeni

Il **rilievo** è l'insieme delle forme della superficie terrestre: montagne, colline, valli, pianure, coste. Due gruppi di forze, opposte e complementari, lo costruiscono e lo distruggono.

Gli **agenti endogeni** («generati all'interno») sono le forze che hanno origine dentro la Terra e sono alimentate dal suo calore interno: sollevano catene montuose, deformano e fratturano le rocce, producono vulcani e terremoti. Li studierai più avanti nel corso di scienze; qui basta sapere che tendono a *creare* rilievi e dislivelli.

Gli **agenti esogeni** («generati all'esterno») agiscono sulla superficie: l'atmosfera con le sue variazioni di temperatura, le acque correnti, i ghiacciai, il vento, il mare, gli organismi viventi. Il loro lavoro tende invece a *spianare* i rilievi: demoliscono le parti più alte e ne trasportano i frammenti verso le zone più basse, fino al mare.

Il paesaggio che vediamo è quindi il risultato di una gara fra due squadre. Le Alpi, per esempio, sono una catena giovane: gli agenti endogeni le sollevano ancora, mentre l'erosione le consuma, e per questo hanno cime aguzze e valli profonde. Le colline dell'Europa centrale, molto più antiche, sono state invece consumate fino a forme dolci e arrotondate.

16.1.2 Le rocce, materia prima del paesaggio

Le forme del rilievo sono scolpite nelle **rocce**, i materiali solidi naturali che formano la crosta terrestre. Una roccia è di solito un aggregato di minerali, cioè di sostanze naturali solide con

una composizione chimica definita (Capitolo 5). Per capire il paesaggio bastano per ora tre esempi, che ritroverai in tutto il capitolo.

- Il **calcare** è formato soprattutto da carbonato di calcio, $CaCO_3$, che spesso deriva da gusci e scheletri di organismi marini accumulati sul fondo del mare: è la roccia di molte montagne degli Appennini e delle Prealpi, e l'acqua piovana lo scioglie lentamente.
- L'**argilla** è fatta di granuli finissimi che trattengono l'acqua: è impermeabile, diventa plastica quando è bagnata e si erode facilmente.
- Il **granito** è una roccia dura e compatta, fatta di cristalli di quarzo, feldspati e mica ben visibili a occhio nudo, nata dal lento raffreddamento di materiale fuso in profondità: resiste bene all'erosione.

Come si formano le rocce e come si classificano lo studierai nel secondo biennio. Qui conta un'idea: rocce diverse reagiscono in modo diverso agli agenti esogeni, e per questo il paesaggio cambia da una regione all'altra. Il calcare dà grotte e doline, l'argilla calanchi e frane, il granito pareti e massi arrotondati.

16.1.3 Da dove viene l'energia

Gli agenti esogeni sono mossi da due «motori». Il primo è l'**energia solare**: il Sole scalda la superficie in modo diverso da luogo a luogo e genera i venti (Capitolo 13), fa evaporare l'acqua e alimenta il ciclo dell'acqua (Capitolo 15), da cui dipendono piogge, fiumi e ghiacciai. Il secondo è la **forza di gravità**, che fa cadere i frammenti di roccia, fa scorrere l'acqua e il ghiaccio verso il basso e trascina tutto ciò che è stato staccato verso le quote più basse.

Il lavoro degli agenti esogeni si può scomporre in quattro fasi, che si susseguono come in una catena di montaggio al contrario:

- la **degradazione meteorica**, o alterazione, che indebolisce e frantuma la roccia sul posto;
- l'**erosione**, cioè l'asportazione del materiale da parte di un agente in movimento (acqua, ghiaccio, vento, onde);
- il **trasporto** del materiale eroso, anche per centinaia di chilometri;
- la **sedimentazione**, il deposito del materiale quando l'agente perde energia: un fiume che rallenta, un ghiacciaio che fonde, il vento che si calma.

Le forme che ne risultano sono di due tipi: **forme di erosione**, scavate dove l'agente asporta materiale (una valle, una falesia, un circo glaciale), e **forme di accumulo**, costruite dove lo deposita (una pianura alluvionale, una spiaggia, una morena, una duna).

ERRORE FREQUENTE

Degradazione meteorica ed erosione non sono la stessa cosa. La degradazione *prepara* il materiale e avviene sul posto, anche senza che nulla si muova: una roccia può sbriciolarsi restando dov'è. L'erosione invece richiede un agente che *porti via* i frammenti. Un masso spaccato dal gelo che resta sul versante è stato degradato; quando un torrente lo trascina a valle, è stato eroso.

16.2 La degradazione meteorica

Le rocce che affiorano in superficie si sono formate, in gran parte, in condizioni molto diverse da quelle dell'atmosfera: a temperature e pressioni più alte, o sul fondo del mare. Esposte all'aria, all'acqua e agli sbalzi termici, si trovano «fuori posto» e lentamente si trasformano. La degradazione meteorica può essere fisica o chimica; spesso le due agiscono insieme.

16.2.1 La degradazione fisica

Nella **degradazione fisica** la roccia si frantuma in pezzi sempre più piccoli, ma la sua composizione chimica non cambia.

Il **crioclastismo** (dal greco *krýos*, gelo, e *klásis*, rottura) è l'azione del gelo. Come hai visto nel Capitolo 2, l'acqua è una sostanza anomala: solidificando aumenta di volume di circa il 9 %, perché il ghiaccio ha densità minore dell'acqua liquida. Quando l'acqua che si è infiltrata in una fessura gela, il ghiaccio preme sulle pareti con forze enormi e allarga la fessura; al disgelo l'acqua penetra più a fondo, e al gelo successivo la spinta si ripete (Figura 16.1). Il crioclastismo è più efficace dove la temperatura oscilla spesso intorno a 0 °C, come in alta montagna nelle mezze stagioni: ogni notte di gelo seguita da un giorno di disgelo è un colpo di cuneo. Alla base delle pareti rocciose delle Alpi e degli Appennini si accumulano così le **falde di detrito**, pendii di frammenti spigolosi staccati dal gelo.

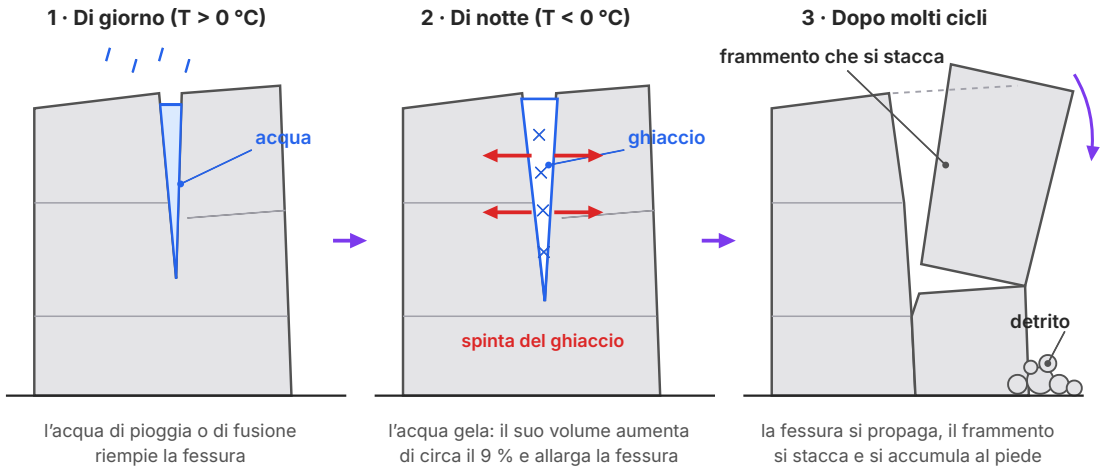


Figura 16.1 Crioclastismo. L'acqua che si infiltra in una fessura, gelando, aumenta di volume di circa il 9 % e spinge sulle pareti; il ciclo gelo–disgelo, ripetuto molte volte, allarga la fessura finché un frammento si stacca e si accumula alla base della parete come detrito (schema non in scala).

Il **termoclastismo** è dovuto alle variazioni di temperatura. Le rocce conducono male il calore: di giorno lo strato esterno si scalda e si dilata più di quello interno, di notte si raffredda e si contrae. Inoltre i diversi minerali di una roccia si dilatano in misura diversa. Dopo migliaia di cicli si formano fessure e la superficie si sfalda in scaglie. Il fenomeno è più evidente nei deserti, dove manca la copertura di nubi e di vegetazione e l'escursione termica fra il giorno e la notte è molto grande.

L'**aloclastismo** è l'azione dei sali. Lungo le coste e nei deserti l'acqua che contiene sali disciolti penetra nei pori della roccia; quando evapora, i sali cristallizzano e i cristalli, crescendo, spingono sulle pareti dei pori proprio come il ghiaccio. Le rocce costiere bucherellate da cavità tondeggianti, gli *alveoli* o *tafoni*, molto comuni per esempio sulle coste granitiche della Sardegna, sono in gran parte il risultato di questo processo, aiutato dall'umidità marina e dal vento che asporta i granuli staccati. Lo stesso meccanismo danneggia i monumenti e le murature delle città di mare.

Anche gli organismi partecipano alla degradazione fisica: le radici degli alberi si insinuano nelle fessure e, crescendo, le allargano; gli animali che scavano tane rimescolano e frantumano il terreno.

16.2.2 La degradazione chimica

Nella **degradazione chimica** i minerali della roccia reagiscono con l'acqua, con l'ossigeno e con il diossido di carbonio, e si trasformano in sostanze nuove. È favorita dal caldo e dall'umidità: per questo è intensissima nelle regioni equatoriali e quasi assente nei deserti freddi.

- **Dissoluzione.** Alcuni minerali si sciolgono direttamente nell'acqua, come il salgemma (cloruro di sodio) e il gesso; altri, come il calcare, si sciolgono in acqua che contiene CO_2, come vedremo fra poco.
- **Ossidazione.** I minerali che contengono ferro reagiscono con l'ossigeno dell'aria e dell'acqua formando ossidi e idrossidi di ferro, rossastri o giallastri: è lo stesso processo della ruggine (Capitolo 5). Il colore rosso di molti suoli mediterranei e delle rocce dei deserti è dovuto proprio agli ossidi di ferro.
- **Idrolisi** (cenno). Alcuni minerali molto diffusi nelle rocce come il granito, i feldspati, reagiscono lentamente con l'acqua e si trasformano in minerali argillosi. Il granito, che sembra indistruttibile, si sgretola così in un sabbione chiaro: i granuli di quarzo, che resistono, restano sciolti in mezzo all'argilla.

16.2.3 Il carsismo

Il calcare è una roccia formata quasi interamente da carbonato di calcio, $CaCO_3$, un composto praticamente insolubile nell'acqua pura. La pioggia, però, non è acqua pura: attraversando l'atmosfera e soprattutto il suolo, dove le radici e i decompositori producono molto CO_2, scioglie un po' di diossido di carbonio e diventa debolmente acida. Quest'acqua è in grado di sciogliere il calcare secondo la reazione

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$$

Il prodotto, l'idrogenocarbonato di calcio (detto anche bicarbonato di calcio), è solubile e se ne va con l'acqua. La doppia freccia indica che la reazione può avvenire nei due versi: se l'acqua perde CO_2, il carbonato di calcio torna a depositarsi. L'insieme dei fenomeni di dissoluzione e di deposito del calcare si chiama **carsismo**, dal Carso, l'altopiano calcareo alle spalle di Trieste che si prolunga in Slovenia, dove questi fenomeni sono stati studiati per la prima volta in modo sistematico.

Sulla superficie di un altopiano calcareo l'acqua non scorre a lungo: si infiltra nelle fratture della roccia e le allarga per dissoluzione. Nascono così forme caratteristiche (Figura 16.2):

- i **campi solcati**, superfici di roccia nuda incise da solchi e scanalature affilate;
- le **doline**, conche chiuse a forma di imbuto o di catino, larghe da pochi metri a centinaia di metri, che si formano dove la dissoluzione è più intensa o dove la volta di una cavità sotterranea crolla;
- gli **inghiottitoi**, aperture e pozzi verticali attraverso cui l'acqua di superficie scompare nel sottosuolo.

Sotto la superficie l'acqua scava un vero e proprio reticolo di condotti, gallerie e **grotte**, percorsi a volte da fiumi sotterranei che tornano alla luce più a valle in grandi **sorgenti carsiche**. In Italia sono famose la Grotta Gigante sul Carso triestino, le Grotte di Frasassi nelle Marche e le Grotte di Castellana in Puglia.

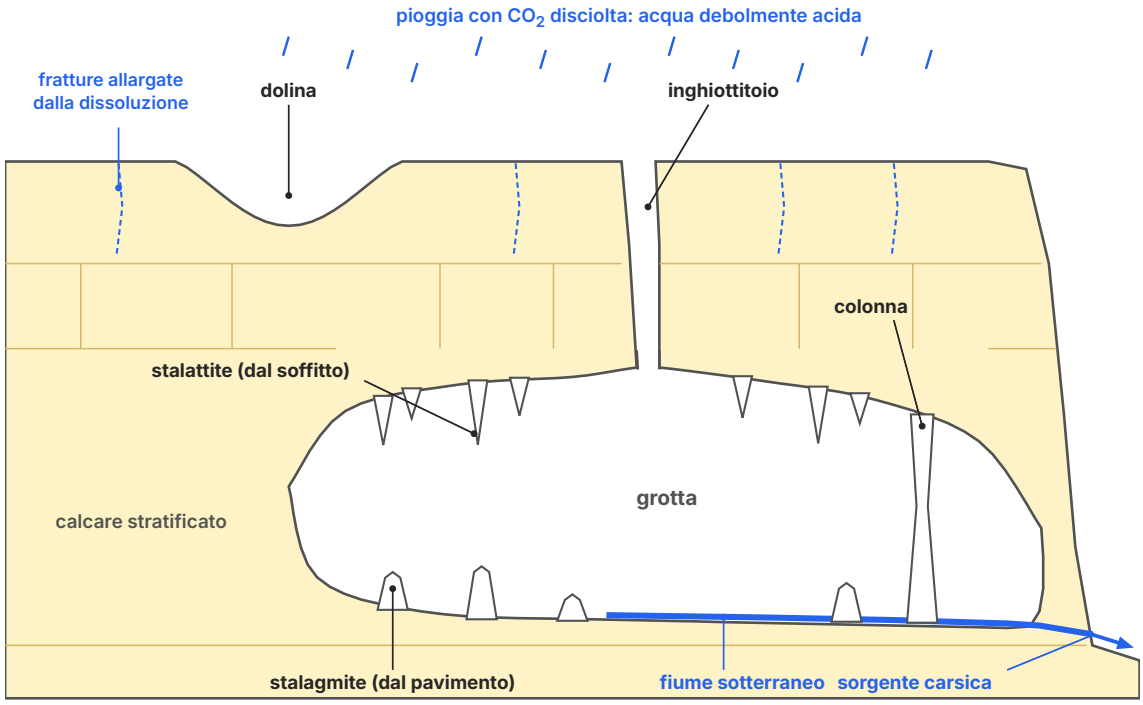


Figura 16.2 Sezione schematica di un altopiano calcareo con le principali forme carsiche: in superficie doline, fratture allargate e inghiottitoi; nel sottosuolo una grotta con stalattiti, stalagmiti e una colonna, percorsa da un fiume sotterraneo che riemerge in una sorgente carsica (schema non in scala).

Nelle grotte avviene anche il processo inverso. Una goccia d'acqua ricca di idrogenocarbonato di calcio che pende dal soffitto si trova in un ambiente con meno CO_2 di quello del suolo: perde un po' di gas, l'equilibrio si sposta verso sinistra e un velo sottilissimo di $CaCO_3$ si deposita. Goccia dopo goccia, dal soffitto crescono verso il basso le **stalattiti**; dove le gocce cadono, sul pavimento crescono verso l'alto le **stalagmiti**. Quando una stalattite e una stalagmite si saldano si forma una **colonna**. La crescita è lentissima, in genere frazioni di millimetro all'anno: una stalattite lunga un metro può avere molte migliaia di anni.

ERRORE FREQUENTE

Stalattiti e stalagmiti si scambiano facilmente. Un trucco: le stala**tt**iti s**t**anno a**tt**accate al **t**e**tt**o; le stala**gm**iti salgono dal pavimento come i **m**onti. Ricorda anche che non sono «gocce pietrificate» né ghiaccio: sono carbonato di calcio che si è depositato perché l'acqua ha perso CO_2.

COLLEGAMENTI

Chimica. Nel Capitolo 3 hai visto che i gas sono più solubili nell'acqua fredda che in quella calda: una bibita gassata calda perde subito le bollicine. Per questo l'acqua fredda, che trattiene più CO_2, scioglie il calcare più efficacemente di quella calda. Lo stesso equilibrio spiega il calcare che incrosta il fondo dei bollitori: scaldando un'acqua «dura», ricca di idrogenocarbonato di calcio, il CO_2 si libera e il $CaCO_3$ si deposita. Le piogge acide (Capitolo 13), più acide della pioggia naturale, corrodono rapidamente statue e facciate in marmo, che è anch'esso carbonato di calcio.

16.2.4 Il suolo

Il prodotto più prezioso della degradazione meteorica è il **suolo**, lo strato superficiale e sciolto che ricopre le rocce e ospita la vita delle piante. Il suolo non è semplice roccia sbriciolata: è un miscuglio eterogeneo (Capitolo 3) di frammenti minerali, argille, sostanza organica in decomposizione (l'**humus**), acqua, aria e un numero immenso di organismi, dai lombrichi ai batteri.

Un suolo maturo, visto in sezione, mostra una serie di strati sovrapposti detti **orizzonti**. Dall'alto verso il basso si distinguono di solito: l'orizzonte **O**, di foglie e resti organici; l'orizzonte **A**, scuro, ricco di humus, da cui l'acqua che si infiltra porta via le particelle più fini e le sostanze solubili; l'orizzonte **B**, dove queste sostanze si accumulano; l'orizzonte **C**, formato dalla roccia madre alterata e frantumata; infine la roccia inalterata, indicata con **R**.

Il suolo si forma con estrema lentezza: secondo la FAO possono servire fino a mille anni per produrne un solo centimetro. Per questo, a scala umana, è una risorsa non rinnovabile. Un suolo che viene asportato da una frana, dilavato dalle piogge su un campo lasciato nudo o coperto da cemento e asfalto è perso per sempre.

16.3 Frane e dissesto idrogeologico

16.3.1 I movimenti di massa

Su un versante la forza di gravità spinge continuamente verso il basso i materiali; l'attrito e la coesione li trattengono. Quando l'equilibrio si rompe, si ha un **movimento di massa**: lo spostamento verso valle di roccia, detrito o terreno, dovuto alla gravità senza che un agente di trasporto lo trascini. I movimenti più rapidi si chiamano **frane**. In base al modo in cui il materiale si muove si distinguono tre tipi principali (Figura 16.3).

- **Crolli.** Blocchi di roccia si staccano da una parete molto ripida, lasciando una *nicchia di distacco*, e precipitano in caduta libera, rimbalzando e frantumandosi. Sono improvvisi e rapidissimi; spesso il distacco è preparato dal crioclastismo.

- **Scivolamenti.** Una massa di roccia o di terreno scorre in blocco lungo una superficie di rottura. Se la superficie è curva, a cucchiaio, la massa ruota all'indietro mentre scende (scivolamento rotazionale), lasciando in alto una scarpata; se la superficie è piana, per esempio uno strato inclinato di argilla, la massa scivola come su uno scivolo (scivolamento traslativo).
- **Colate.** Materiali fini, impregnati d'acqua, si comportano come un fluido denso e scorrono lungo i canali e le valli formando lingue e lobi di fango o di detrito. Le colate rapide possono percorrere chilometri in pochi minuti.

Esistono anche movimenti lentissimi, come il **soliflusso** e il *creep*, in cui il terreno scivola di pochi millimetri o centimetri all'anno: li tradiscono i pali e gli alberi inclinati e i muretti che si deformano.

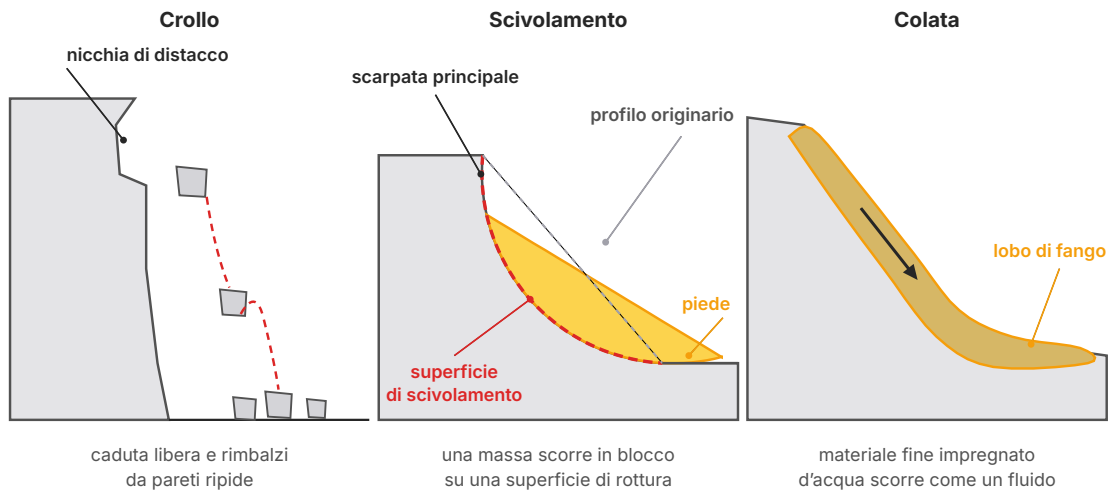


Figura 16.3 I tre tipi principali di frana. Nel crollo i blocchi si staccano da una nicchia e cadono in caduta libera; nello scivolamento rotazionale la massa (in giallo) scorre lungo una superficie curva e ruota all'indietro, lasciando in alto una scarpata (la linea tratteggiata grigia indica il profilo originario del versante); nella colata il materiale fine impregnato d'acqua scorre come un fluido e si espande in un lobo.

16.3.2 Perché un versante cede

Le cause di una frana sono di due tipi. Le **cause predisponenti** rendono un versante fragile: una forte pendenza, rocce fratturate o argillose, strati inclinati nello stesso verso del pendio, la mancanza di vegetazione. Le **cause scatenanti** fanno precipitare la situazione: soprattutto le piogge intense o prolungate, che riempiono d'acqua i pori del terreno, lo appesantiscono e riducono l'attrito fra i granuli; poi la fusione rapida della neve, i terremoti, l'erosione al piede del versante da parte di un fiume o del mare, e gli interventi dell'uomo, come scavi, tagli stradali, disboscamenti, carichi eccessivi.

16.3.3 Il dissesto idrogeologico in Italia

Con il termine **dissesto idrogeologico** si indica l'insieme dei processi, frane, alluvioni ed erosione, che degradano il territorio e mettono a rischio persone e beni. L'Italia è uno dei Paesi europei più esposti: ha montagne giovani e ripide, molte rocce argillose (soprattutto lungo l'Appennino), piogge concentrate in pochi eventi intensi e un territorio densamente abitato. L'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI), curato dall'ISPRA, censisce oltre 620 000 frane, che interessano circa il 7,9 % del territorio nazionale (rapporto ISPRA 2021).

APPROFONDIMENTO

Il Vajont, 9 ottobre 1963

Nella valle del torrente Vajont, al confine fra Friuli e Veneto, era stata costruita una delle dighe ad arco più alte del mondo. Il versante settentrionale del Monte Toc, che chiudeva il lago artificiale, era instabile, e i segni di movimento erano stati osservati per anni. La sera del 9 ottobre 1963 una massa di circa 270 milioni di metri cubi di roccia scivolò in blocco nel lago: l'onda scavalcò la diga, che rimase in piedi, e si abbatté sulla valle del Piave, distruggendo Longarone e altri centri. Le vittime furono quasi duemila. Il Vajont è oggi studiato in tutto il mondo come esempio di frana per scivolamento e come lezione sulla responsabilità di chi progetta opere in territori fragili.

Difendersi dalle frane significa prima di tutto conoscerle: cartografarle, monitorare i versanti con strumenti e satelliti, non costruire nelle zone pericolose. Poi si può intervenire con opere di consolidamento, come drenaggi che tolgono acqua al terreno, muri di sostegno, reti paramassi, e soprattutto con la cura del bosco e dei terrazzamenti, che trattengono il suolo.

16.4 Il lavoro delle acque correnti

Le acque che scorrono sulla superficie sono l'agente esogeno più importante nella maggior parte delle regioni della Terra, Italia compresa. Un fiume è insieme uno scultore, che scava, un trasportatore e un costruttore.

16.4.1 Erosione, trasporto e sedimentazione

L'acqua che scorre erode il suo letto in due modi: con la propria forza, che solleva e trascina i materiali sciolti, e soprattutto con i ciottoli e la sabbia che porta con sé, che urtano e levigano il fondo e le sponde come una carta vetrata. Il materiale viene trasportato in modi diversi a seconda delle dimensioni: le sostanze disciolte viaggiano **in soluzione**; argilla e limo restano **in sospensione** e rendono l'acqua torbida; la sabbia avanza a piccoli salti (**saltazione**); ciottoli e massi rotolano e strisciano sul fondo (**trascinamento**).

La capacità di un corso d'acqua di erodere e trasportare cresce rapidamente con la velocità della corrente. Quando l'acqua rallenta, perché la pendenza diminuisce, il letto si allarga o il fiume entra in un lago o nel mare, deposita prima i materiali più grossi e poi via via quelli più fini: i sedimenti risultano così **classati**, cioè separati per dimensione. È lo stesso principio della decantazione che hai visto nel Capitolo 4.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto sedimento porta un fiume?

Un fiume in piena ha una portata di 1500 m^3/s e trasporta in sospensione 0,50 g di sedimento per litro d'acqua. Quanto sedimento porta al mare in un giorno?

Soluzione. 0,50 g/L = 0,50 kg/m^3, perché 1 m^3 = 1000 L. Ogni secondo passano 1500 m^3 × 0,50 kg/m^3 = 750 kg di sedimento. In un giorno (86 400 s): 750 kg/s × 86 400 s = 6,48 × 10^7 kg ≈ 6,5 × 10^4 t, cioè circa 65 000 tonnellate, il carico di più di duemila camion. Nota che la concentrazione si esprime proprio come quelle delle soluzioni del Capitolo 3.

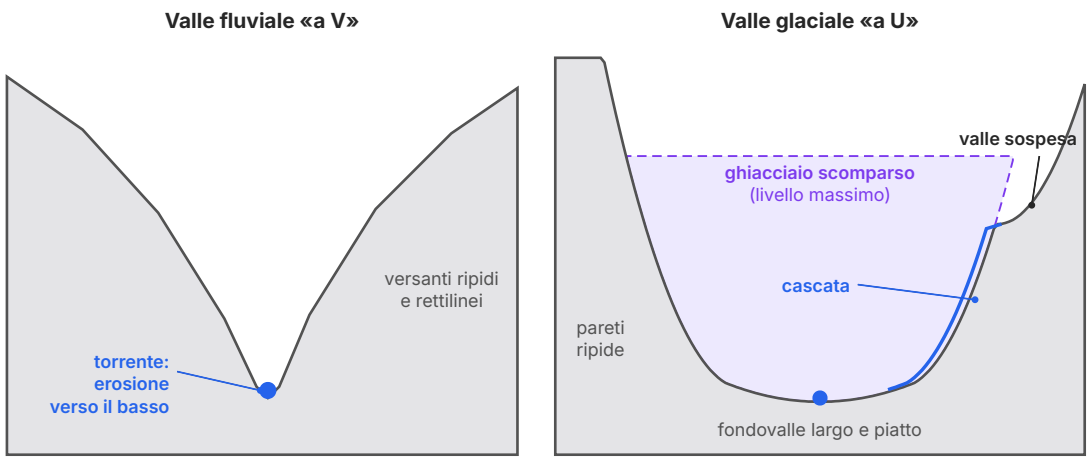


Figura 16.4 Sezioni trasversali di una valle fluviale a V e di una valle glaciale a U. Il ghiacciaio, che riempiva la valle fino al livello indicato, ne ha allargato e appiattito il fondo; la valle laterale, scavata da un ghiacciaio più piccolo, è rimasta sospesa e il suo torrente scende con una cascata (schema non in scala).

16.4.2 Il corso montano: valli a V, cascate e conoidi

Nel tratto montano la pendenza è forte, l'acqua è veloce e scava soprattutto verso il basso. Il torrente incide un solco sempre più profondo, mentre i versanti vengono demoliti dalle frane e dal ruscellamento e scivolano verso il fondo: nasce la tipica **valle a V**, con il fondo stretto occupato interamente dal corso d'acqua e versanti ripidi e rettilinei (Figura 16.4). Dove la roccia è

molto resistente il torrente può scavare **forre** profonde e strettissime; dove incontra un gradino di roccia dura forma una **cascata**.

Allo sbocco di una valle laterale in una valle principale, o di una valle montana in pianura, la pendenza cala di colpo, l'acqua rallenta e deposita il suo carico a ventaglio: si forma un **conoide alluvionale**, un cono di ghiaia e sabbia con la punta rivolta verso monte. Sui conoidi, asciutti e soleggiati, sorgono molti paesi delle valli alpine; ma proprio lì, durante le piene, il torrente può cambiare improvvisamente percorso.

16.4.3 Il corso di pianura: meandri e pianure alluvionali

In pianura la pendenza è minima e il fiume, invece di scavare verso il basso, erode lateralmente. Il suo percorso si piega in anse sempre più ampie, i **meandri**. In ogni curva l'acqua più veloce è spinta contro la sponda esterna, che viene erosa e diventa ripida; lungo la sponda interna l'acqua rallenta e deposita sabbia e ghiaia, formando una **barra di meandro** (Figura 16.5). Così i meandri migrano lentamente e si accentuano, finché due anse si avvicinano tanto che, durante una piena, il fiume taglia il collo di terra che le separa. L'ansa abbandonata, isolata dai sedimenti, diventa un lago a forma di ferro di cavallo: lungo il Po e i suoi affluenti questi laghi si chiamano **lanche**.

Durante le piene il fiume esce dal suo letto e si espande sulle aree circostanti, dove l'acqua rallenta e deposita limo e sabbia. Piena dopo piena, i fiumi costruiscono così le **pianure alluvionali**, formate da strati di sedimenti spessi anche centinaia di metri: la Pianura Padana, la più grande d'Italia, è stata colmata dai sedimenti del Po e dei suoi affluenti alpini e appenninici, in un antico golfo marino. Lungo le sponde le piene depositano i materiali più grossi e costruiscono rilievi allungati, gli **argini naturali**, che l'uomo ha poi rialzato artificialmente.

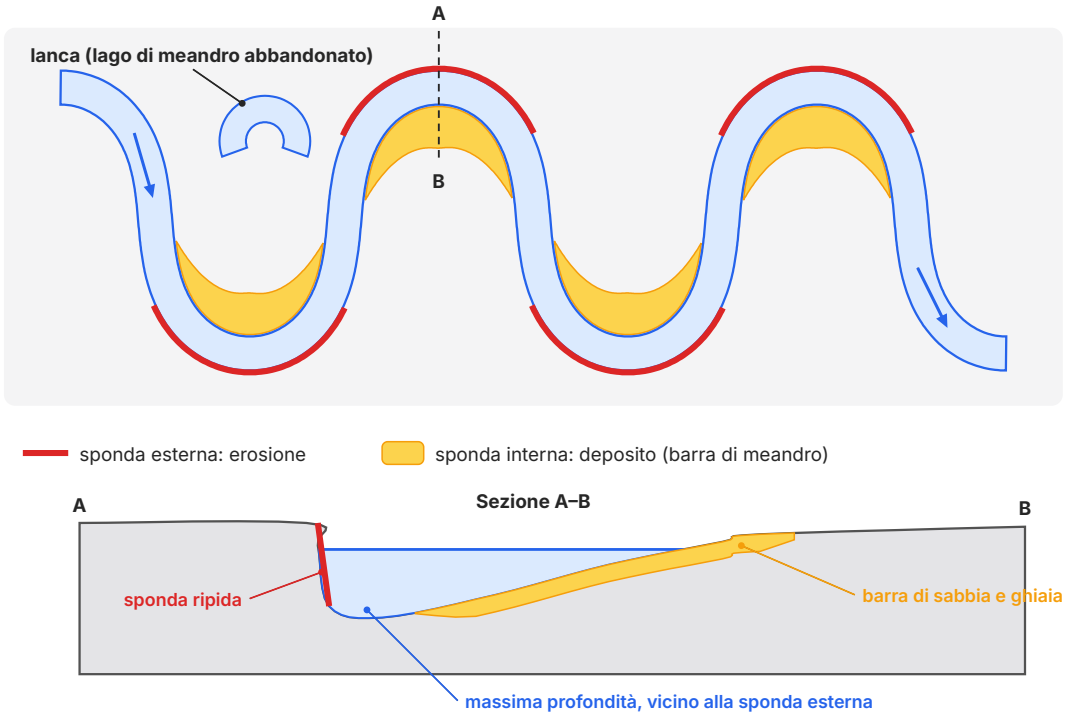


Figura 16.5 Un fiume a meandri in pianta (forma calcolata con una curva «generata da seno», tipica dei meandri reali) e in sezione. Sulla sponda esterna di ogni curva il fiume erode, su quella interna deposita una barra di sabbia e ghiaia; un'ansa tagliata durante una piena è rimasta isolata come lanca. La sezione A–B attraversa una curva: la sponda esterna è ripida e il punto più profondo è vicino a essa.

Alla foce, se il mare non ha onde e maree abbastanza forti da disperdere i sedimenti, il fiume costruisce un **delta**, una pianura che avanza verso il mare e in cui il corso d'acqua si divide in più rami: è il caso del Po e del Nilo. Se invece onde e maree sono forti, la foce resta aperta a imbuto e si ha un estuario (Capitolo 15).

16.4.4 Calanchi e piramidi di terra

Non solo i fiumi modellano il terreno: anche l'acqua piovana che scorre in rivoli sui versanti, il **ruscellamento**, può essere un agente potente, soprattutto dove manca la vegetazione. Sulle rocce argillose, impermeabili e facili da erodere, le piogge incidono una fitta rete di solchi separati da creste affilate, che si approfondiscono a ogni temporale: sono i **calanchi**, paesaggi quasi lunari diffusi lungo l'Appennino, dalle Crete Senesi in Toscana alla Basilicata. A Civita di Bagnoregio, nel Lazio, l'erosione delle argille e delle rocce vulcaniche sottostanti ha isolato il paese su uno sperone che continua a ridursi.

Dove il terreno è formato da sedimenti fini mescolati a grossi massi, come nei depositi lasciati dai ghiacciai, il ruscellamento asporta il materiale fine tutto intorno, mentre un masso protegge dalla pioggia la colonna di terra sotto di sé. Nascono così le **piramidi di terra**, guglie alte anche decine di metri sormontate da un «cappello» di roccia, come quelle di Segonzano in Trentino e del Renon in Alto Adige. Quando il masso cade, la piramide è destinata a consumarsi rapidamente.

16.5 Ghiacciai e vento

16.5.1 Come lavora un ghiacciaio

Nel Capitolo 15 hai visto come un ghiacciaio nasce dalla neve che si accumula e si trasforma in ghiaccio, e come scorre lentamente verso valle. Il ghiacciaio è un agente di erosione formidabile. Il ghiaccio, che ingloba blocchi e detriti, raschia e leviga il fondo e le pareti come una gigantesca lima (**abrasione**); inoltre il ghiaccio che rigela nelle fessure strappa blocchi interi dal fondo (**estrazione**). A differenza di un fiume, un ghiacciaio occupa tutta la larghezza della valle e la erode su tutta la sezione.

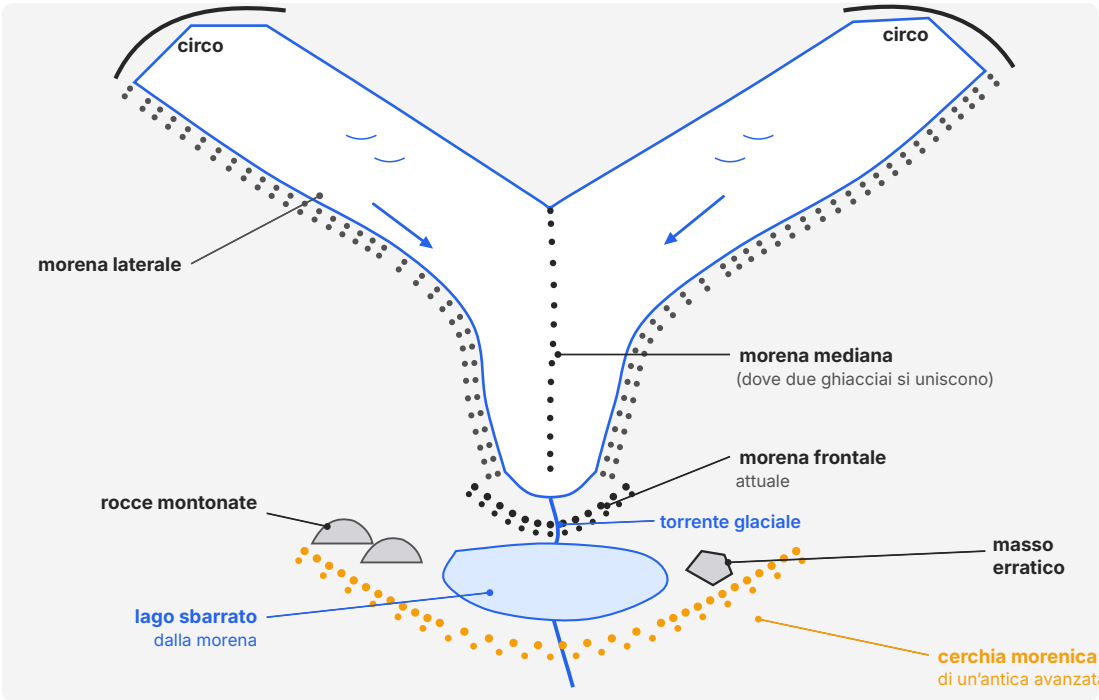


Figura 16.6 Un ghiacciaio vallivo visto dall'alto. Due ghiacciai nati in circhi diversi si uniscono: le loro morene laterali interne formano la morena mediana. Davanti alla fronte si trova la morena frontale attuale; più a valle, una cerchia morenica lasciata durante un'avanzata più antica sbarra un lago. Nella zona abbandonata dal ghiaccio affiorano rocce montonate e un masso erratico (schema non in scala).

16.5.2 Le forme di erosione glaciale

- Il **circo glaciale** è una conca a forma di anfiteatro, chiusa da pareti ripide, scavata nella parte alta dei monti dove si accumula la neve che alimenta il ghiacciaio. Quando il ghiaccio scompare, sul fondo del circo resta spesso un laghetto alpino.
- La **valle a U**, o valle glaciale, ha il fondo largo e piatto e le pareti ripide, perché il ghiacciaio, scorrendo, ha allargato e approfondito un'antica valle fluviale (Figura 16.4). Le valli laterali, percorse da ghiacciai più piccoli che scavavano meno, restano «appese» in alto: sono le **valli sospese**, da cui oggi i torrenti scendono con cascate.
- Le **rocce montonate** sono dossi di roccia lisciati e arrotondati dal ghiaccio sul lato rivolto a monte e più scabri sul lato a valle, dove il ghiaccio ha strappato blocchi. Sulla loro superficie si vedono spesso le **strie glaciali**, graffi paralleli incisi dai detriti trascinati, che indicano la direzione di scorrimento del ghiaccio.

Quando la lingua glaciale arriva fino al mare e poi si ritira, la valle a U viene invasa dalle acque: si forma un **fiordo**, come quelli della Norvegia.

16.5.3 Le forme di accumulo glaciale

Il materiale eroso viaggia sopra, dentro e sotto il ghiaccio e si accumula quando il ghiaccio fonde. I depositi glaciali sono formati da frammenti di tutte le dimensioni mescolati senza ordine, dall'argilla ai massi: a differenza dei sedimenti fluviali, *non* sono classati. Questi depositi formano le **morene** (Figura 16.6):

- le **morene laterali**, cordoni allungati ai lati della lingua glaciale;
- la **morena mediana**, una striscia di detrito al centro del ghiacciaio, che nasce dove due ghiacciai si uniscono e le loro morene laterali interne si saldano;
- la **morena di fondo**, il detrito trascinato sotto il ghiaccio;
- la **morena frontale**, un arco di detrito accumulato davanti alla fronte, dove il ghiaccio fonde.

I **massi erratici** sono blocchi, a volte grandi come case, trasportati dal ghiaccio anche per decine di chilometri e abbandonati lontano dalle rocce da cui provengono: in Lombardia e in Piemonte se ne trovano di granito, staccati dalle Alpi, sopra colline di tutt'altra natura. Proprio i massi erratici hanno permesso di ricostruire l'estensione degli antichi ghiacciai.

Durante le glaciazioni (Capitolo 14), l'ultima delle quali ha avuto il suo massimo circa 20 000 anni fa, i ghiacciai alpini scendevano fino allo sbocco delle valli in pianura. Qui hanno lasciato grandi **anfiteatri morenici**, archi di colline che chiudono a valle i grandi laghi prealpini: il Lago Maggiore, il Lago di Como, il Lago d'Iseo e il Lago di Garda occupano conche modellate dai ghiacciai e sono sbarrati a sud dalle loro morene. Ancora più a ovest, l'anfiteatro morenico di Ivrea, con la lunga e rettilinea Serra d'Ivrea, è una delle morene più spettacolari d'Europa.

APPROFONDIMENTO

Agassiz e l'«epoca glaciale»

All'inizio dell'Ottocento i massi erratici sparsi nelle pianure svizzere erano un enigma: molti pensavano che li avesse trasportati un grande diluvio. Alcuni naturalisti e montanari svizzeri, come Ignaz Venetz e Jean de Charpentier, sostennero che fossero stati portati da ghiacciai un tempo molto più estesi. Il giovane naturalista Louis Agassiz, inizialmente scettico, osservò i ghiacciai attuali, le rocce montonate, le strie e le morene, e nel 1837 propose a Neuchâtel l'idea di una vera e propria «epoca glaciale», sviluppata poi nei suoi *Études sur les glaciers* del 1840. È un bell'esempio di metodo scientifico: confrontare ciò che accade oggi con le tracce lasciate nel passato.

16.5.4 Il vento e i deserti

Il vento è un agente importante dove il terreno è asciutto e privo di vegetazione: nei deserti, lungo le spiagge, nelle pianure aride. Agisce in due modi. Con la **deflazione** solleva e porta via

le particelle sciolte più fini, sabbia e polvere, lasciando sul posto i ciottoli; con la **corrasione** usa i granelli di sabbia trasportati come un getto di sabbiatrice, che leviga e scava le rocce. Poiché la sabbia viaggia vicino al suolo, la corrasione è più forte alla base delle rocce, che assumono a volte la forma di funghi.

Il materiale trasportato si deposita formando le **dune**, cumuli di sabbia con un versante sopravento in dolce pendio e uno sottovento più ripido, dove la sabbia scivola. La sabbia viene spinta su per il pendio dolce e ricade dall'altra parte, così la duna avanza lentamente nella direzione del vento. Dove la sabbia è scarsa e il vento soffia sempre dalla stessa direzione si formano le **barcane**, dune a mezzaluna con le punte rivolte verso valle rispetto al vento. La polvere più fine può viaggiare per migliaia di chilometri: la sabbia sahariana che a volte colora la pioggia in Italia, portata dallo scirocco (Capitolo 13), ne è un esempio; dove si accumula in grandi spessori forma il **loess**, un deposito fertile molto diffuso in Cina.

Il **deserto** non è sempre un mare di sabbia. I geografi distinguono i deserti di dune (*erg*), quelli di ciottoli (*reg*), da cui la deflazione ha portato via la sabbia, e quelli rocciosi (*hamada*); questi ultimi due tipi sono molto estesi. Nei deserti la pioggia è rara ma, quando cade, scorre violentemente in letti normalmente asciutti, gli *uadi*, ed è spesso l'acqua, più del vento, a modellare il paesaggio.

16.6 Il mare, gli organismi e l'uomo

16.6.1 Le coste alte

Il mare modella le coste con il moto ondoso (Capitolo 15). Le onde che si frangono lanciano contro la riva acqua, aria compressa, sabbia e ciottoli: è l'**abrasione marina**. Dove la costa è rocciosa e ripida, le onde scavano alla base della parete, all'altezza del livello del mare, un incavo detto **solco di battente**. Quando il solco è abbastanza profondo, la roccia sovrastante, rimasta senza appoggio, crolla; il mare rimuove i blocchi e torna a scavare. La costa arretra così mantenendo una parete verticale, la **falesia**, mentre ai suoi piedi resta una superficie rocciosa debolmente inclinata, la **piattaforma d'abrasione** (Figura 16.7).

Le rocce più resistenti resistono più a lungo e formano promontori, archi e scogli isolati, come i **faraglioni** di Capri. Coste alte e frastagliate si trovano per esempio sul Gargano, sul Conero, in Liguria, in Sardegna e in Sicilia.

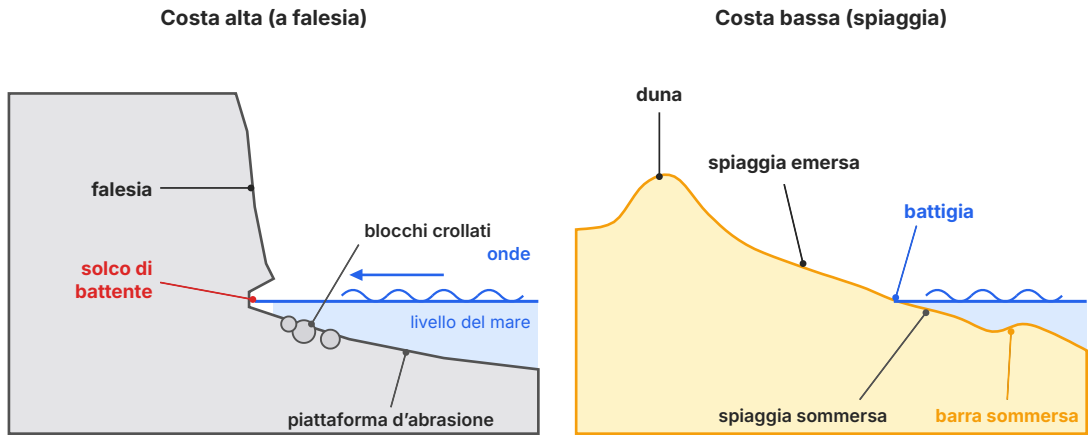


Figura 16.7 Profili di una costa alta e di una costa bassa. A sinistra le onde scavano il solco di battente alla base della falesia, che crolla e arretra lasciando la piattaforma d'abrasione; a destra la spiaggia comprende una parte emersa, con la duna, la battigia e una parte sommersa con una barra di sabbia (schema non in scala).

16.6.2 Le coste basse

Dove la costa è bassa e i fiumi portano molti sedimenti, il mare li ridistribuisce e costruisce. La **spiaggia** è un accumulo di sabbia o ciottoli, sempre rimescolato dalle onde: comprende una parte emersa, una linea di **battigia** dove si frangono le ultime onde e una parte sommersa, spesso con barre di sabbia parallele alla riva. Alle spalle della spiaggia il vento accumula le dune costiere, che proteggono l'entroterra dalle mareggiate.

Le onde raramente arrivano perpendicolari alla riva: per questo spostano la sabbia lungo la costa, in una sorta di nastro trasportatore detto **deriva litorale**. Così si formano cordoni di sabbia allungati (Figura 16.8):

- il **lido**, un cordone che separa dal mare un bacino d'acqua bassa, la **laguna**, collegata al mare da varchi detti bocche; la Laguna di Venezia è separata dall'Adriatico dai lidi e comunica con il mare attraverso tre bocche di porto, Lido, Malamocco e Chioggia, dove oggi funzionano le paratoie mobili del MOSE;
- il **tombolo**, un cordone che unisce un'isola alla terraferma: il Monte Argentario, in Toscana, è collegato alla costa da due tomboli, la Giannella e la Feniglia, che racchiudono la laguna di Orbetello.

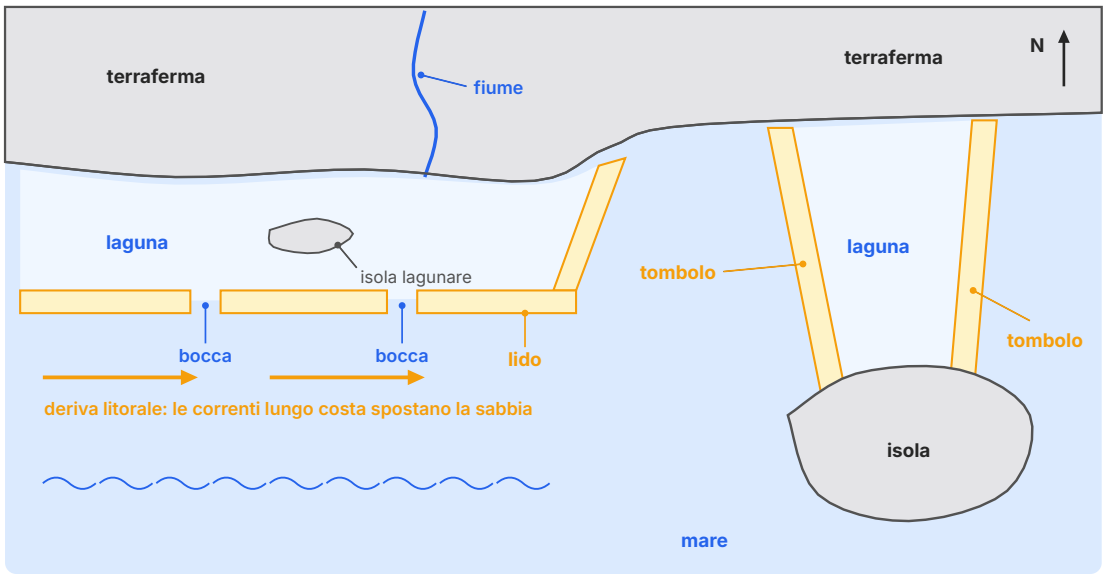


Figura 16.8 Forme delle coste basse in pianta. A sinistra un lido, interrotto da bocche, separa dal mare una laguna; a destra due tomboli collegano un'isola alla terraferma e racchiudono una laguna, come all'Argentario. La deriva litorale sposta la sabbia lungo la costa (schema non in scala).

16.6.3 L'erosione delle coste

Molte spiagge italiane si stanno restringendo. La causa principale è che arriva meno sabbia: le dighe trattengono i sedimenti nei bacini artificiali, l'estrazione di ghiaia e sabbia dagli alvei ha impoverito i fiumi, e gli argini e le briglie riducono l'erosione dei versanti. Inoltre porti, moli e costruzioni sulle dune interrompono la deriva litorale. Per difendere le spiagge si costruiscono scogliere frangiflutti e pennelli, che però spesso spostano il problema più in là lungo la costa, oppure si effettuano *ripascimenti*, cioè si riporta sabbia prelevata altrove. La soluzione più duratura è restituire ai fiumi la possibilità di portare sedimenti e lasciare spazio alle dune.

16.6.4 Gli organismi costruttori

Anche gli esseri viventi modellano il rilievo. I più potenti sono i coralli, piccoli animali dei mari tropicali caldi, limpidi e poco profondi, che vivono in colonie e costruiscono scheletri di carbonato di calcio. In migliaia di anni i loro scheletri si accumulano in **barriere coralline** che possono estendersi per centinaia di chilometri: la Grande Barriera Corallina australiana, lunga oltre 2000 km, è la più grande struttura costruita da organismi viventi. Altri organismi demoliscono: certi molluschi e spugne perforano le rocce calcaree delle coste (bioerosione), le radici e i licheni contribuiscono alla degradazione.

16.6.5 L'uomo, un agente geologico

Oggi l'uomo sposta ogni anno più materiale di tutti i fiumi del pianeta messi insieme, secondo diverse stime scientifiche. Le **cave** asportano intere montagne, come accade per il marmo delle Alpi Apuane, che si estrae dall'epoca romana; le strade e le gallerie tagliano i versanti; le dighe cambiano il regime dei fiumi; argini e canali hanno ridisegnato la Pianura Padana. Soprattutto, città, capannoni e infrastrutture coprono il suolo con cemento e asfalto: è il **consumo di suolo**, che in Italia, secondo l'ISPRA, procede a una velocità di oltre 2 m^2 al secondo (dati riferiti al 2022). Un suolo impermeabilizzato non assorbe la pioggia: l'acqua scorre in superficie e raggiunge in fretta i fiumi, aumentando il rischio di alluvioni.

COLLEGAMENTI

Educazione civica e Agenda 2030. L'obiettivo 15 dell'Agenda 2030 dell'ONU («Vita sulla terra») chiede di fermare il degrado del suolo, e l'obiettivo 11 di rendere le città sicure e resilienti. La **difesa del suolo** comincia da scelte concrete: non costruire nelle aree a rischio di frana o di alluvione, mantenere boschi e terrazzamenti, recuperare gli edifici esistenti invece di occupare nuovi terreni, lasciare ai fiumi lo spazio per esondare in aree non abitate. Sono decisioni che si prendono nei Comuni e nelle Regioni, cioè anche con il voto e la partecipazione dei cittadini.

16.6.6 Leggere un paesaggio: dalle Alpi al mare lungo il Garda e il Mincio

Proviamo ora a leggere un paesaggio reale riconoscendo gli agenti che lo hanno costruito. Seguiamo idealmente una goccia d'acqua che cade sulle montagne del Trentino, a nord del Lago di Garda.

Sulle cime, in alta quota, la goccia trova pareti di roccia spaccate dal **gelo** e, ai loro piedi, falde di detrito; più in basso, conche abbandonate dai ghiacciai, i **circhi**, con laghetti alpini. Scendendo con il fiume Sarca percorre valli che hanno il profilo a U dei solchi **glaciali**, con torrenti laterali che precipitano da valli sospese, e attraversa i **conoidi** su cui sorgono i paesi. Il Sarca sfocia nel Lago di Garda, il più grande lago italiano (circa 370 km^2), che occupa una conca allungata modellata dall'antico ghiacciaio del Garda.

A sud il lago è chiuso da un arco di colline: è l'**anfiteatro morenico** del Garda, costruito dal ghiacciaio durante le glaciazioni. La goccia esce dal lago a Peschiera con il fiume Mincio, che si apre un varco fra le morene ed entra nella Pianura Padana. Qui il paesaggio cambia: il Mincio forma i laghi che circondano Mantova e poi confluisce nel Po. Il Po, il fiume più lungo d'Italia, scorre con ampi **meandri**, lanche e argini su una **pianura alluvionale** costruita dai suoi stessi sedimenti, e infine si divide nei rami del **delta**. Le sabbie che porta al mare vengono distribuite dalla deriva litorale e alimentano lidi e spiagge dell'alto Adriatico, mentre le **lagune** di Venezia e del delta testimoniano il lento equilibrio fra fiumi e mare.

In qualche centinaio di chilometri la goccia ha attraversato il regno del gelo, quello dei ghiacciai, quello dei fiumi e quello del mare. E ovunque ha trovato le tracce dell'uomo: dighe, cave, argini, città, campi. Saper leggere un paesaggio significa anche capire quali di queste tracce lo rendono più fragile e quali lo proteggono.

Tabella 16.1 Gli agenti esogeni e le loro forme principali.

Agente	Processi	Forme di erosione	Forme di accumulo
Atmosfera e acque d'infiltrazione	crioclastismo, termoclastismo, aloclastismo; dissoluzione, ossidazione, idrolisi	campi solcati, doline, inghiottitoi, grotte	falde di detrito, stalattiti e stalagmiti, suolo
Gravità	crolli, scivolamenti, colate, soliflusso	nicchie di distacco, scarpate	accumuli di frana
Acque correnti	erosione lineare e laterale, trasporto, sedimentazione classata	valli a V, forre, calanchi, piramidi di terra	conoidi, pianure alluvionali, argini naturali, delta
Ghiacciai	abrasione, estrazione di blocchi	circhi, valli a U, valli sospese, rocce montonate, fiordi	morene, anfiteatri morenici, massi erratici
Vento	deflazione, corrasione	deserti di ciottoli e rocciosi, rocce a fungo	dune, barcane, loess
Mare	abrasione marina, deriva litorale	falesie, solchi di battente, piattaforme d'abrasione, faraglioni	spiagge, lidi, lagune, tomboli
Organismi e uomo	bioerosione, costruzione, scavo, impermeabilizzazione	cave, tagli stradali	barriere coralline, discariche, riporti

COLLEGAMENTI

Storia. Le colline moreniche a sud del Garda sono anche un luogo della storia d'Italia. Il 24 giugno 1859, durante la Seconda guerra d'indipendenza, a Solferino e San Martino si combatterono le battaglie che aprirono la strada all'unificazione. Lo svizzero Henry Dunant, colpito dalla sofferenza dei feriti abbandonati, propose di creare un'organizzazione di soccorso neutrale: nacque così, pochi anni dopo, la Croce Rossa. La geografia fisica, con i suoi rilievi e i suoi corsi d'acqua, ha spesso deciso dove si combattevano le battaglie.

DA RICORDARE

Ogni agente esogeno lascia una «firma» riconoscibile. I sedimenti fluviali sono **classati** e i ciottoli sono arrotondati; i depositi glaciali sono **caotici**, con massi spigolosi mescolati all'argilla; le valli fluviali sono a **V**, quelle glaciali a **U**; le dune hanno il versante ripido **sottovento**. Riconoscere queste firme permette di ricostruire paesaggi scomparsi, come i grandi ghiacciai che 20 000 anni fa arrivavano fino alla pianura.

SINTESI

- Il rilievo è il risultato del contrasto fra agenti endogeni, che lo costruiscono con l'energia interna della Terra, e agenti esogeni, che lo demoliscono grazie all'energia solare e alla gravità.
- Il lavoro degli agenti esogeni comprende degradazione meteorica, erosione, trasporto e sedimentazione, e produce forme di erosione e forme di accumulo.
- La degradazione fisica frantuma la roccia senza cambiarne la composizione: crioclastismo (il gelo aumenta il volume dell'acqua di circa il 9 %), termoclastismo e aloclastismo.
- La degradazione chimica trasforma i minerali: dissoluzione, ossidazione e, in cenno, idrolisi; è favorita dal caldo e dall'umidità.
- Il carsismo è la dissoluzione del calcare da parte dell'acqua ricca di CO_2 ($CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$); produce doline, inghiottitoi, grotte e, con la reazione inversa, stalattiti (dal soffitto) e stalagmiti (dal pavimento).
- Il suolo, formato da minerali, humus, acqua, aria e organismi e organizzato in orizzonti, si forma in tempi lunghissimi ed è una risorsa non rinnovabile.
- Le frane (crolli, scivolamenti, colate) sono movimenti di massa dovuti alla gravità, preparati da cause predisponenti e innescati soprattutto dalle piogge; l'Italia è molto esposta al dissesto idrogeologico.
- Le acque correnti scavano valli a V nel tratto montano, costruiscono conoidi allo sbocco delle valli, formano meandri, lanche, pianure alluvionali e delta in pianura; sulle argille il ruscellamento produce calanchi.
- I ghiacciai scavano circhi, valli a U, valli sospese e rocce montonate, e depositano morene non classate e massi erratici; i grandi laghi prealpini sono di origine glaciale.
- Il vento agisce per deflazione e corrasione e accumula dune, come le barcane; il mare scolpisce falesie e costruisce spiagge, lidi, lagune e tomboli grazie alla deriva litorale.
- L'uomo è oggi un agente geologico potente: cave, dighe e consumo di suolo modificano il territorio e ne aumentano la fragilità; la difesa del suolo richiede scelte consapevoli.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Gli agenti esogeni ricavano l'energia per il loro lavoro:
   - **A.** dal calore interno della Terra
   - **B.** dall'energia solare e dalla forza di gravità
   - **C.** dalla rotazione terrestre
   - **D.** dalle reazioni nucleari nel nucleo terrestre

2. ● Il crioclastismo è più efficace:
   - **A.** nei deserti caldi, dove non piove mai
   - **B.** nelle foreste equatoriali
   - **C.** dove la temperatura oscilla spesso intorno a 0 °C
   - **D.** sul fondo degli oceani

3. ● Il fenomeno carsico interessa soprattutto:
   - **A.** le rocce calcaree
   - **B.** le argille
   - **C.** i graniti
   - **D.** le sabbie

4. ●● Nelle grotte, il carbonato di calcio si deposita formando stalattiti e stalagmiti perché:
   - **A.** l'acqua gela a contatto con la roccia
   - **B.** l'acqua evapora completamente in pochi secondi
   - **C.** nella grotta arriva più CO_2 che nel suolo
   - **D.** l'acqua che gocciola perde CO_2 e l'equilibrio si sposta verso il $CaCO_3$

5. ● Una frana in cui blocchi di roccia si staccano da una parete e cadono in caduta libera è:
   - **A.** una colata
   - **B.** un crollo
   - **C.** uno scivolamento rotazionale
   - **D.** un soliflusso

6. ●● In un meandro l'erosione è più intensa:
   - **A.** sulla sponda interna della curva
   - **B.** al centro del letto, in modo uniforme
   - **C.** sulla sponda esterna della curva
   - **D.** solo alla foce del fiume

7. ● Una morena è:
   - **A.** un deposito di detriti non classati trasportati e abbandonati da un ghiacciaio
   - **B.** una conca scavata dal ghiacciaio nella parte alta della montagna
   - **C.** un deposito di sabbia ben classata lasciato dal vento
   - **D.** un lago di origine carsica

8. ●● In una barcana le punte della mezzaluna sono rivolte:
   - **A.** verso la direzione da cui proviene il vento
   - **B.** verso il mare
   - **C.** verso nord, in qualunque deserto
   - **D.** nella direzione verso cui soffia il vento

9. ●● Il cordone di sabbia che collega un'isola alla terraferma si chiama:
   - **A.** lido
   - **B.** falesia
   - **C.** tombolo
   - **D.** barra di meandro

Vero o falso

10. ● Il termoclastismo è particolarmente efficace nei deserti, dove l'escursione termica fra il giorno e la notte è molto grande.

11. ● Le stalagmiti crescono dal soffitto della grotta verso il basso.

12. ●● La deflazione è l'azione abrasiva dei granelli di sabbia trasportati dal vento sulle rocce.

13. ● I calanchi si formano soprattutto su rocce argillose prive di vegetazione.

14. ●● I depositi dei ghiacciai sono formati da frammenti ben classati, cioè separati per dimensioni.

15. ●● La costruzione di dighe lungo i fiumi può favorire l'erosione delle spiagge alla loro foce.

Applicare e calcolare

16. ● In una fessura di roccia si raccolgono 100 cm^3 d'acqua (densità 1,00 g/cm^3), che poi gelano. Sapendo che la densità del ghiaccio è 0,917 g/cm^3, calcola il volume del ghiaccio e l'aumento percentuale di volume.

17. ● In una grotta una stalattite lunga 30 cm è cresciuta con una velocità media di 0,12 mm all'anno. Quanti anni ha impiegato a formarsi?

18. ● Il bordo di una falesia arretra in media di 0,30 m all'anno. Una casa è stata costruita a 25 m dal bordo: fra quanti anni, in media, il bordo raggiungerà la casa? Di quanto sarà arretrata la falesia in 50 anni?

19. ●● In una regione montuosa la degradazione e l'erosione abbassano la superficie in media di 0,05 mm all'anno. Di quanti metri si abbasserebbe in un milione di anni, se nessuna forza la sollevasse? Quanto tempo servirebbe per abbassarla di 1000 m?

20. ●● Un tratto di fiume è lungo 18,6 km misurato lungo l'alveo, mentre la distanza in linea retta fra i suoi estremi è 7,5 km. Calcola l'indice di sinuosità (lunghezza dell'alveo / distanza in linea retta). Un fiume si considera a meandri quando l'indice supera 1,5: è questo il caso?

21. ●● Un fiume ha una portata media di 1200 m^3/s e trasporta in sospensione in media 0,40 g/L di sedimento. Calcola la massa di sedimento trasportata in un secondo e in un anno (365 giorni), in tonnellate.

22. ●● Su una carta topografica in scala 1 : 25 000 la fronte di un ghiacciaio alpino nel 2020 si trova 2,8 cm più a monte rispetto alla posizione del 1990. Calcola l'arretramento reale in metri e la velocità media di arretramento in metri all'anno.

23. ●● Supponi che il consumo di suolo in un Paese avanzi alla velocità costante di 2,4 m^2 al secondo. Calcola la superficie consumata in un anno (365 giorni) in km^2 e quanti campi da calcio (105 m × 68 m) vengono coperti ogni giorno.

Leggere dati e figure

24. ● Osserva la Figura 16.5. Su quale sponda di ciascuna curva il fiume erode e su quale deposita? Perché la sezione A–B non è simmetrica? Dove ti aspetti che, in futuro, il fiume tagli un'ansa formando una nuova lanca?

25. ●● Osserva le Figure 16.4 e 16.6. Elenca tre forme che indicano la presenza passata di un ghiacciaio in una valle oggi priva di ghiaccio, e spiega perché un lago come quello della Figura 16.6 si trova proprio a monte di un arco di colline.

26. ●● La tabella riporta la distanza della fronte di un ghiacciaio alpino dalla sua posizione del 1990 (dati di un esempio realistico): 1990, 0 m; 2000, 180 m; 2010, 420 m; 2020, 700 m. Calcola la velocità media di arretramento in ciascun decennio e commenta l'andamento, collegandolo con il Capitolo 14.

27. ●● Osserva la Figura 16.3 e classifica i tre eventi seguenti. a) Dopo tre giorni di pioggia, una lingua di fango e detriti scende lungo un canalone e invade la strada. b) Un blocco di roccia si stacca da una parete verticale e rimbalza fino al fondovalle. c) Una porzione di collina argillosa scende in blocco, lasciando in alto una scarpata e inclinando gli alberi verso monte.

Indagare e argomentare

28. ●● Progetta un esperimento per confrontare la degradazione chimica di diversi materiali (un frammento di marmo o di calcare, un gessetto, un sasso di granito o di quarzo) usando aceto e acqua. Indica che cosa osservi, quali variabili mantieni costanti e quale controllo usi. Perché l'aceto «esagera» l'effetto della pioggia?

29. ●● Spiega perché in Italia frane e alluvioni causano danni così frequenti, distinguendo fra cause naturali (rilievo, rocce, clima) e cause legate alle attività umane. Proponi tre interventi di difesa del suolo.

30. ●●● Durante una gita trovi, su una collina della Pianura Padana, un grande masso di granito, mentre tutto intorno ci sono solo ghiaie e argille. Formula un'ipotesi sulla sua origine e indica quali altri indizi cercheresti nel paesaggio per confermarla.

31. ●●● Un Comune costiero vuole costruire un nuovo porto turistico e, a qualche chilometro, gli abitanti chiedono di bloccare l'erosione della spiaggia con una scogliera. Usando il concetto di deriva litorale, spiega quali effetti potrebbero avere queste opere sulle spiagge vicine e proponi una soluzione più sostenibile.

32. ●● **Leggi il tuo territorio.** Scegli un paesaggio vicino alla tua scuola che puoi osservare durante un'uscita (una valle, un tratto di fiume, una collina, una spiaggia, una cava). Descrivi le forme che vedi, indica se sono forme di erosione o di accumulo e quale agente esogeno le ha prodotte; poi cerca su una carta geologica o sul sito della tua regione quali rocce affiorano. Il paesaggio è stabile o vedi segni di frane, erosione o interventi dell'uomo?

Approfondimento: la chimica del carsismo

33. ●●● Secondo la reazione del carsismo, una mole di $CaCO_3$ reagisce con una mole di CO_2. Usando le masse atomiche della Tabella B.1, calcola la massa di CO_2 necessaria per sciogliere 1,00 kg di calcare formato da $CaCO_3$ puro.

PER APPROFONDIRE

- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: i capitoli sulla degradazione meteorica e sul suolo, sui movimenti di massa, sui fiumi, sui ghiacciai, sul vento e sulle coste.
- [AHR] C. D. Ahrens, *Meteorology Today*: le pagine sulle precipitazioni intense e sui venti aiutano a capire gli agenti che innescano frane ed erosione.
- [ATK] P. W. Atkins, L. Jones, *Principi di chimica*: gli equilibri di solubilità e il ruolo del diossido di carbonio nella dissoluzione dei carbonati.

Glossario del capitolo

Agenti endogeni
Forze che hanno origine all'interno della Terra, alimentate dal suo calore interno, che sollevano e deformano la crosta creando rilievi.

Agenti esogeni
Agenti che agiscono sulla superficie terrestre (atmosfera, acque, ghiacciai, vento, mare, organismi), mossi dall'energia solare e dalla gravità, e che tendono a spianare i rilievi.

Barcana
Duna a forma di mezzaluna con le punte rivolte sottovento, tipica dei deserti con poca sabbia e venti costanti.

Carsismo
Insieme dei fenomeni di dissoluzione e di deposito del calcare da parte dell'acqua contenente diossido di carbonio: doline, inghiottitoi, grotte, stalattiti e stalagmiti.

Crioclastismo
Frantumazione delle rocce dovuta all'acqua che gela nelle fessure e, aumentando di volume di circa il 9 %, le allarga.

Degradazione meteorica
Insieme dei processi fisici e chimici che indeboliscono, frantumano o trasformano le rocce sul posto, senza trasportarle.

Dolina
Conca chiusa a imbuto o a catino tipica delle regioni carsiche, prodotta dalla dissoluzione del calcare o dal crollo di una cavità.

Erosione
Asportazione di materiale da parte di un agente in movimento, come acqua corrente, ghiaccio, vento o onde.

Frana
Movimento rapido di roccia, detrito o terreno lungo un versante, dovuto alla gravità; i tipi principali sono crolli, scivolamenti e colate.

Lanca
Lago a forma di ferro di cavallo nato da un meandro abbandonato, quando il fiume ne taglia il collo durante una piena.

Masso erratico
Blocco di roccia trasportato da un ghiacciaio lontano dal luogo d'origine e abbandonato su rocce di natura diversa.

Meandro
Ansa di un fiume di pianura; il fiume erode la sponda esterna e deposita su quella interna, così i meandri migrano e si accentuano.

Morena
Deposito caotico, non classato, di detriti trasportati e abbandonati da un ghiacciaio: laterale, mediana, di fondo o frontale.

Sedimentazione
Deposito dei materiali trasportati quando l'agente di trasporto perde energia.

Stalagmite
Concrezione di carbonato di calcio che cresce dal pavimento di una grotta, dove cadono le gocce.

Stalattite
Concrezione di carbonato di calcio che pende dal soffitto di una grotta, formata dalle gocce d'acqua che perdono CO_2.

Suolo
Strato superficiale e sciolto formato da frammenti minerali, humus, acqua, aria e organismi, organizzato in orizzonti; si forma in tempi lunghissimi.

Termoclastismo
Frantumazione delle rocce dovuta alle ripetute dilatazioni e contrazioni causate dalle variazioni di temperatura.

Tombolo
Cordone di sabbia costruito dalla deriva litorale che collega un'isola alla terraferma.

Valle a U
Valle glaciale con fondo largo e piatto e pareti ripide, prodotta dall'erosione di un ghiacciaio.

Soluzioni

1. B. Il Sole muove venti e ciclo dell'acqua; la gravità fa scendere acqua, ghiaccio e detriti. Il calore interno (A) alimenta gli agenti endogeni.

2. C. Servono molti cicli di gelo e disgelo, quindi temperature che passano spesso sopra e sotto 0 °C, come in alta montagna.

3. A. Il calcare ($CaCO_3$) si scioglie nell'acqua che contiene CO_2.

4. D. Nella grotta la goccia perde CO_2: l'equilibrio $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$ si sposta verso sinistra e il carbonato di calcio si deposita.

5. B. Il crollo è una caduta libera di blocchi da una parete ripida.

6. C. Sulla sponda esterna l'acqua è più veloce ed erode; su quella interna rallenta e deposita.

7. A. Le morene sono depositi glaciali caotici, non classati; la conca in alta montagna (B) è il circo.

8. D. Le punte (corna) della barcana sono rivolte sottovento, nella direzione verso cui soffia il vento.

9. C. Il tombolo unisce un'isola alla terraferma; il lido separa una laguna dal mare.

10. V. Nei deserti, senza nubi né vegetazione, la roccia si scalda molto di giorno e si raffredda molto di notte.

11. F. Le stalagmiti crescono dal pavimento verso l'alto; sono le stalattiti a pendere dal soffitto.

12. F. La deflazione è l'asportazione delle particelle sciolte da parte del vento; l'azione abrasiva della sabbia trasportata si chiama corrasione.

13. V. Le argille sono impermeabili e poco coerenti; senza vegetazione il ruscellamento le incide rapidamente.

14. F. I depositi glaciali (morene) sono caotici, con frammenti di tutte le dimensioni mescolati; sono i sedimenti fluviali a essere classati.

15. V. Le dighe trattengono i sedimenti nei bacini artificiali: alla foce arriva meno sabbia per alimentare le spiagge, che si erodono.

16. Massa = 100 cm^3 × 1,00 g/cm^3 = 100 g; volume del ghiaccio = 100 g / 0,917 g/cm^3 ≈ 109 cm^3; aumento ≈ 9 cm^3, cioè circa il 9 %.

17. 30 cm = 300 mm; tempo = 300 mm / 0,12 mm all'anno = $2,5 \times 10^3$ anni (2500 anni).

18. 25 m / 0,30 m all'anno ≈ 83 anni. In 50 anni: 0,30 m/anno × 50 anni = 15 m.

19. 0,05 mm/anno × 1 000 000 anni = 50 000 mm = 50 m. Per 1000 m = 1 000 000 mm: 1 000 000 mm / 0,05 mm/anno = 2×10^7 anni (20 milioni di anni).

20. Indice = 18,6 km / 7,5 km ≈ 2,5 (2,48). È maggiore di 1,5: il fiume è a meandri.

21. 0,40 g/L = 0,40 kg/m^3. In un secondo: 1200 m^3 × 0,40 kg/m^3 = 480 kg = 0,48 t. In un anno: 480 kg/s × 86 400 s × 365 ≈ $1,5 \times 10^{10}$ kg ≈ $1,5 \times 10^7$ t (circa 15 milioni di tonnellate).

22. Distanza reale = 2,8 cm × 25 000 = 70 000 cm = 700 m. In 30 anni (1990–2020): 700 m / 30 anni ≈ 23 m all'anno.

23. Un anno = 365 × 86 400 s = $3,15 \times 10^7$ s; superficie = 2,4 $m^2/s \times 3,15 \times 10^7$ s ≈ $7,6 \times 10^7$ m^2 ≈ 76 km^2. In un giorno: 2,4 × 86 400 ≈ $2,07 \times 10^5$ m^2; un campo = 105 × 68 = 7140 m^2; $2,07 \times 10^5$ / 7140 ≈ 29 campi al giorno.

24. Il fiume erode la sponda esterna di ogni curva (in rosso) e deposita sulla sponda interna (barre in giallo). La sezione è asimmetrica perché sul lato esterno (A) la corrente veloce scava una sponda ripida e il punto più profondo, mentre sul lato interno (B) l'acqua lenta costruisce una barra in dolce pendio. Una nuova lanca si formerà dove due anse successive si avvicinano di più, cioè dove il collo di terra fra le curve è più stretto: lì una piena può tagliarlo.

25. Indizi: sezione della valle a U, valli sospese con cascate, circhi, rocce montonate con strie, morene, massi erratici (bastano tre). Il lago si trova a monte di un arco di colline perché quelle colline sono una cerchia morenica frontale: il detrito accumulato davanti alla fronte di un antico ghiacciaio fa da diga e trattiene le acque nella conca scavata dal ghiaccio.

26. 1990–2000: 180 m / 10 anni = 18 m/anno; 2000–2010: (420 − 180) m / 10 anni = 24 m/anno; 2010–2020: (700 − 420) m / 10 anni = 28 m/anno. L'arretramento non solo continua ma accelera: è coerente con il riscaldamento globale (Capitolo 14), che allunga la stagione di fusione e riduce l'accumulo di neve; anche il ghiacciaio stesso, assottigliandosi, si trova a quote più basse e più calde.

27. a) Colata (rapida, di fango e detrito), innescata dalle piogge. b) Crollo, con caduta libera e rimbalzi. c) Scivolamento rotazionale: la massa scorre su una superficie curva e ruota all'indietro, per questo gli alberi si inclinano verso monte e in alto resta la scarpata principale.

28. Traccia: si mettono campioni di massa e dimensioni simili in bicchieri con lo stesso volume di aceto, alla stessa temperatura; un bicchiere con acqua distillata per ogni materiale fa da controllo. Si osserva l'effervescenza (bollicine di CO_2) e si misura la perdita di massa dopo un tempo fissato, asciugando i campioni. Marmo e calcare (carbonato di calcio) reagiscono; granito e quarzo no. Il gesso reagisce solo se è di carbonato di calcio: molti gessetti da lavagna sono di gesso (solfato di calcio) e con l'aceto non fanno bollicine, un risultato «inatteso» che vale la pena discutere. L'aceto (acido acetico) è molto più acido della pioggia: l'esperimento accelera in minuti un processo che in natura richiede secoli, quindi mostra il tipo di reazione, non la sua velocità reale.

29. Traccia: cause naturali: rilievi giovani e ripidi, molte rocce argillose e fratturate (Appennino), piogge concentrate in eventi intensi, terremoti; cause umane: costruzioni in aree a rischio (conoidi, aree golenali, versanti instabili), consumo di suolo che impermeabilizza il terreno, abbandono dei boschi e dei terrazzamenti, tagli stradali, restringimento degli alvei. Interventi: cartografia del rischio e divieto di costruire nelle zone pericolose; monitoraggio e drenaggi dei versanti; manutenzione dei boschi, dei terrazzamenti e degli alvei; aree di espansione per le piene; limitare il consumo di suolo.

30. Traccia: ipotesi: è un masso erratico, trasportato da un ghiacciaio proveniente dalle Alpi durante una glaciazione e abbandonato quando il ghiaccio fuse. Conferme: la collina potrebbe essere una morena (deposito caotico, non classato, con ciottoli spigolosi e striati mescolati all'argilla); altre colline disposte ad arco (anfiteatro morenico), magari con un lago a monte; altri massi della stessa roccia; rocce affini nelle valli alpine a monte, da cui si può ricostruire il percorso del ghiacciaio.

31. Traccia: la deriva litorale trasporta la sabbia lungo la costa. Il molo del porto la blocca: la spiaggia si allarga sopraflutto (dal lato da cui arriva la sabbia) e si erode sottoflutto, dove la sabbia non arriva più. Una scogliera può proteggere un tratto di spiaggia ma spesso sposta l'erosione più avanti. Soluzioni più sostenibili: ripascimenti con sabbia compatibile, by-pass della sabbia attorno al porto, tutela e ricostruzione delle dune, riduzione dell'estrazione di sedimenti dai fiumi e gestione dei sedimenti trattenuti dalle dighe, valutare nel complesso l'intera unità fisiografica costiera prima di costruire.

32. Traccia: per ogni forma si indica l'agente (acqua corrente, ghiaccio, vento, mare, gravità, uomo) e se è di erosione (valle a V, falesia, nicchia di frana) o di accumulo (conoide, pianura alluvionale, morena, spiaggia). Le rocce si ricavano dalla carta geologica: per esempio calcari dove si trovano grotte e doline, argille dove compaiono calanchi e frane. Segni di instabilità sono alberi inclinati, crepe nel terreno o nei muri, scarpate nude; segni di interventi dell'uomo sono argini, briglie, scogliere, cave.

33. $M(CaCO_3) = 40{,}078 + 12{,}011 + 3 \times 15{,}999 = 100{,}086$ g/mol; $n = 1000$ g / 100,086 g/mol ≈ 9,99 mol. Servono 9,99 mol di CO_2; $M(CO_2) = 44{,}009$ g/mol; massa = 9,99 mol × 44,009 g/mol ≈ 440 g ($4{,}40 \times 10^2$ g).