CAPITOLO

15

L’idrosfera: acque marine e continentali

La goccia che stamattina è uscita dal tuo rubinetto è stata nuvola, ghiaccio, fiume e oceano, e lo sarà di nuovo.

OBIETTIVI

1. Descrivere come è distribuita l’acqua sulla Terra e spiegare le tappe del ciclo dell’acqua.
2. Riconoscere le forme dei fondali oceanici e descrivere le proprietà dell’acqua marina: salinità, temperatura, densità, pressione, luce.
3. Spiegare le onde, le maree e le correnti marine, superficiali e profonde.
4. Distinguere porosità e permeabilità; descrivere falde freatiche e artesiane, sorgenti e pozzi.
5. Descrivere fiumi, laghi e ghiacciai, con esempi italiani, e calcolare la portata di un corso d’acqua.
6. Valutare l’acqua come risorsa: usi, depurazione, inquinamento ed eutrofizzazione.

INDICE DEL CAPITOLO

15.1 L’acqua sulla Terra e il suo ciclo 2
15.2 Oceani e mari 5
15.3 I movimenti del mare 10
15.4 Le acque continentali: sotterranee, fiumi e laghi 15
15.5 I ghiacciai 20
15.6 L’acqua come risorsa 22

Scienze naturali 1 · Parte III · Aria, acqua e rilievo · versione 1.0
Capitolo 15: L'idrosfera: acque marine e continentali · pagine 385–414 del volume completo · estratto per lo studio

Visto dallo spazio, il nostro pianeta è soprattutto blu: gli oceani coprono circa il 71 % della sua superficie. Eppure, se chiedi a un agricoltore siciliano in agosto o a un sindaco di un comune alpino durante una siccità, ti diranno che l'acqua è un bene prezioso e spesso scarso. Come si conciliano queste due immagini? La risposta sta in due fatti che scoprirai in questo capitolo: quasi tutta l'acqua della Terra è salata, e quella dolce è per lo più chiusa nei ghiacci o nascosta sotto terra.

L'insieme di tutte le acque del pianeta, allo stato liquido, solido e aeriforme, forma l'**idrosfera**: oceani e mari, fiumi e laghi, acque sotterranee, ghiacciai, vapore e nubi. L'idrosfera non è un serbatoio immobile: l'acqua passa di continuo da una parte all'altra, mossa dall'energia del Sole e dalla gravità. Nel Capitolo 13 hai studiato l'atmosfera e nel Capitolo 14 hai visto come il vapore diventa nubi e precipitazioni; qui seguiremo l'acqua quando arriva al suolo e al mare.

15.1 L'acqua sulla Terra e il suo ciclo

15.1.1 Quanta acqua c'è e dove si trova

Sulla Terra ci sono circa 1,39 miliardi di km^3 d'acqua. È una quantità enorme, ma se la raccogliessimo in una sfera, questa avrebbe un diametro di circa 1400 km: poco più della lunghezza dell'Italia, dalle Alpi alla punta meridionale della Sicilia. L'acqua è un sottile velo sulla superficie di un pianeta roccioso.

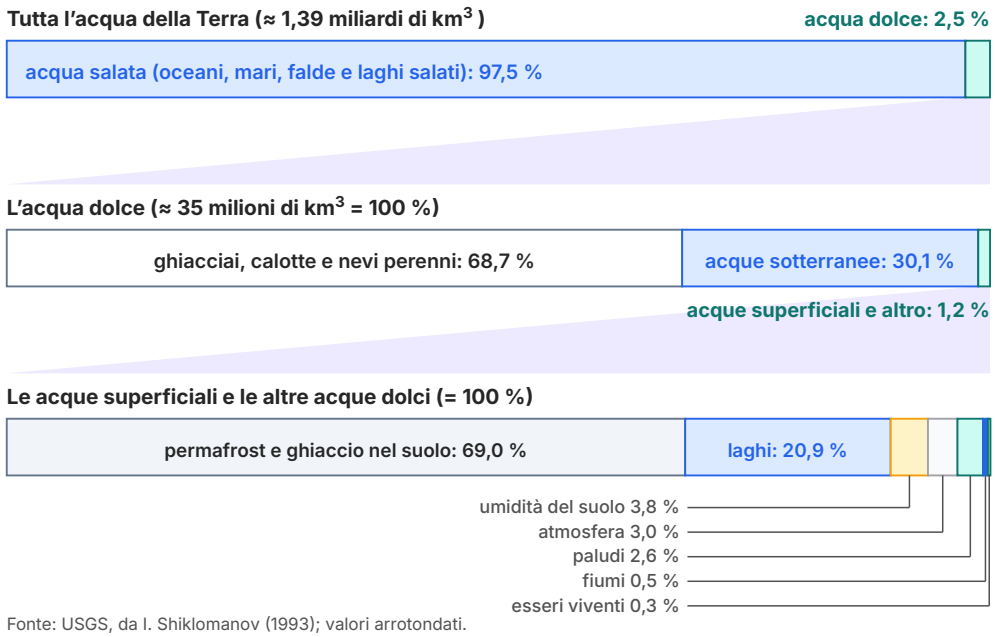
La Figura 15.1 mostra come si distribuisce. Il 97,5 % circa è acqua salata: quasi tutta negli oceani e nei mari (96,5 % del totale), il resto in falde e laghi salati. Solo il 2,5 % è **acqua dolce**, cioè con pochi sali disciolti. E di questa piccola parte:

- circa il 69 % è ghiaccio, nelle calotte dell'Antartide e della Groenlandia, nei ghiacciai e nelle nevi perenni;
- circa il 30 % è nel sottosuolo, come acqua sotterranea;
- appena l'1 % circa è in superficie e nell'atmosfera: ghiaccio del suolo gelato (permafrost), laghi, paludi, umidità del suolo, vapore, fiumi, esseri viventi.

I fiumi, a cui pensiamo subito quando immaginiamo l'acqua dolce, contengono in ogni istante una frazione minuscola dell'acqua del pianeta: meno di due parti su un milione. La loro importanza non dipende da quanta acqua contengono, ma da quanta ne fanno scorrere: l'acqua dei fiumi si rinnova in poche settimane.

DA RICORDARE

Se tutta l'acqua della Terra stesse in una bottiglia da 1 litro, l'acqua dolce sarebbe circa 25 mL, poco più di un cucchiaio e mezzo; quella di tutti i laghi d'acqua dolce e di tutti i fiumi messi insieme sarebbe meno di 0,07 mL, circa una goccia. Per questo l'acqua dolce disponibile va considerata una risorsa limitata.



Fonte: USGS, da I. Shiklomanov (1993); valori arrotondati.

Figura 15.1 La distribuzione dell'acqua sulla Terra. Ogni barra ingrandisce la parte evidenziata di quella sopra: l'acqua dolce è il 2,5 % del totale, e quella di laghi e fiumi è una frazione minima dell'acqua dolce. Dati USGS, da I. Shiklomanov (1993).

15.1.2 Il ciclo dell'acqua

Le acque della Terra sono collegate da un percorso chiuso, il **ciclo dell'acqua** (o *ciclo idrologico*), rappresentato nella Figura 15.2. Il motore è il Sole: la sua energia fa evaporare l'acqua, e la gravità la riporta verso il basso. Seguiamo le tappe.

- **Evaporazione.** Dalla superficie degli oceani, dei laghi e dei suoli umidi l'acqua passa allo stato di vapore. I sali restano in mare: il vapore è acqua pura. È la grande «distillazione» naturale che produce acqua dolce (Capitolo 4).
- **Traspirazione.** Le piante assorbono acqua con le radici e la cedono all'aria come vapore attraverso le foglie. Evaporazione dal suolo e traspirazione insieme si chiamano **evapotraspi-**

razione.

- **Condensazione.** Salendo, l'aria umida si raffredda e il vapore condensa in goccioline o brina in cristalli di ghiaccio, formando le nubi (Capitolo 14).
- **Precipitazione.** Pioggia, neve e grandine riportano l'acqua al suolo e al mare.
- **Infiltrazione.** Parte dell'acqua caduta sulle terre penetra nel terreno e alimenta le acque sotterranee: è l'**infiltrazione**.
- **Ruscellamento.** L'acqua che non si infiltra e non evapora scorre in superficie lungo i pendii: è il **ruscellamento**, che alimenta torrenti e fiumi. Fiumi e acque sotterranee riportano infine l'acqua al mare.

Le frecce della figura riportano stime dei flussi medi annui. Ogni anno evaporano dagli oceani circa 413 000 km^3 d'acqua, ma sugli oceani ne ricadono come precipitazione solo 373 000 km^3: la differenza, 40 000 km^3, viene portata dai venti sopra i continenti. Sulle terre emerse cadono circa 113 000 km^3 all'anno; 73 000 tornano nell'aria per evapotraspirazione, e i 40 000 rimanenti ritornano al mare attraverso fiumi e acque sotterranee. Il bilancio si chiude: nel lungo periodo il livello del mare non cambia per effetto del ciclo, perché quanto il mare «presta» ai continenti viene restituito.

Una molecola d'acqua non resta per lo stesso tempo in ogni parte del ciclo. Il **tempo di residenza** è il tempo medio che l'acqua trascorre in un serbatoio: circa 9–10 giorni nell'atmosfera, settimane nei fiumi, anni o decenni nei laghi, da secoli a migliaia di anni nelle acque sotterranee profonde e negli oceani, fino a centinaia di migliaia di anni nelle zone più profonde della calotta antartica. Si stima dividendo la quantità d'acqua presente nel serbatoio per il flusso che lo attraversa (vedi l'esercizio 22).

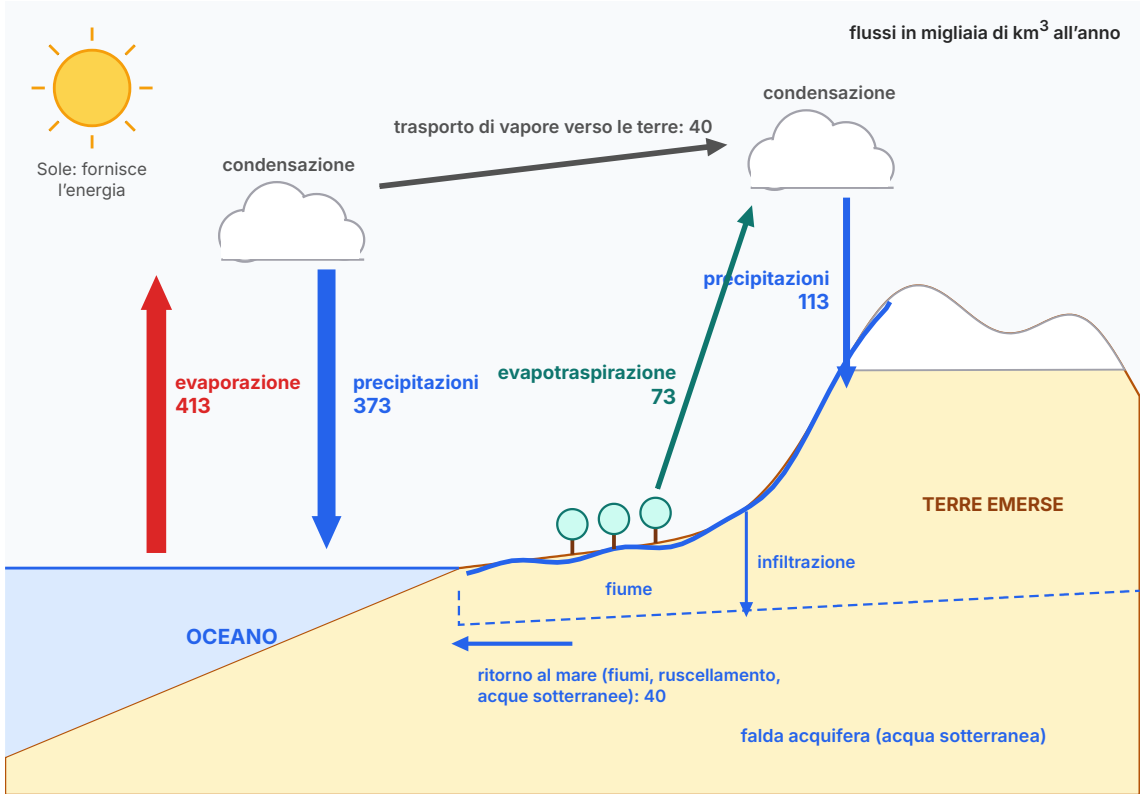


Figura 15.2 Il ciclo dell'acqua (schema non in scala). Le frecce indicano i flussi medi annui fra oceani, atmosfera e terre emerse, in migliaia di km³ all'anno (stime di K. E. Trenberth e collaboratori, 2007, arrotondate). Il bilancio è in pareggio: gli oceani perdono per evaporazione 40 000 km³ più di quanti ne ricevano dalle piogge, e li riottengono dai fiumi e dalle acque sotterranee.

15.2 Oceani e mari

15.2.1 Bacini oceanici e forma dei fondali

Le acque salate formano un'unica distesa continua, divisa per convenzione in tre grandi oceani (Pacifico, Atlantico e Indiano) più le acque intorno all'Antartide e il Mar Glaciale Artico. Il Pacifico, da solo, è più esteso di tutte le terre emerse messe insieme. I *mari* sono porzioni di oceano più piccole, parzialmente chiuse dalle terre, come il Mediterraneo o il Mar Baltico. La profondità media degli oceani è di circa 3700 m; il punto più profondo conosciuto, nella fossa delle Marianne (Pacifico occidentale), è a quasi 11 000 m sotto il livello del mare.

Se potessimo svuotare un oceano, vedremmo che il fondo non è una piatta conca ma ha forme molto varie (Figura 15.3). Partendo dalla costa incontriamo:

- la **piattaforma continentale**, il prolungamento sommerso dei continenti, con debole pendenza, fino a circa 200 m di profondità; può essere larga pochi chilometri o diverse centinaia (come nell'Adriatico settentrionale, che è tutto piattaforma). È la parte più ricca di vita e di pesca, perché la luce arriva fino al fondo;
- la **scarpata continentale**, un pendio più ripido che scende fino a 3000–4000 m, spesso inciso da profondi canyon sottomarini;
- la **piana abissale**, una vasta pianura fra 4000 e 6000 m di profondità, ricoperta di fini sedimenti;
- le **dorsali oceaniche**, lunghissime catene montuose sottomarine (nel complesso oltre 60 000 km) che si innalzano di 2–3 km sopra le piane abissali e hanno al centro una profonda valle;
- le **fosse oceaniche**, depressioni strette e allungate che superano i 6000 m e raggiungono quasi 11 000 m, spesso parallele a catene di isole o a coste montuose.

Perché esistono dorsali e fosse è una storia che riguarda l'interno della Terra: la studierai più avanti, con la tettonica delle placche. Qui ci basta descriverne la forma.

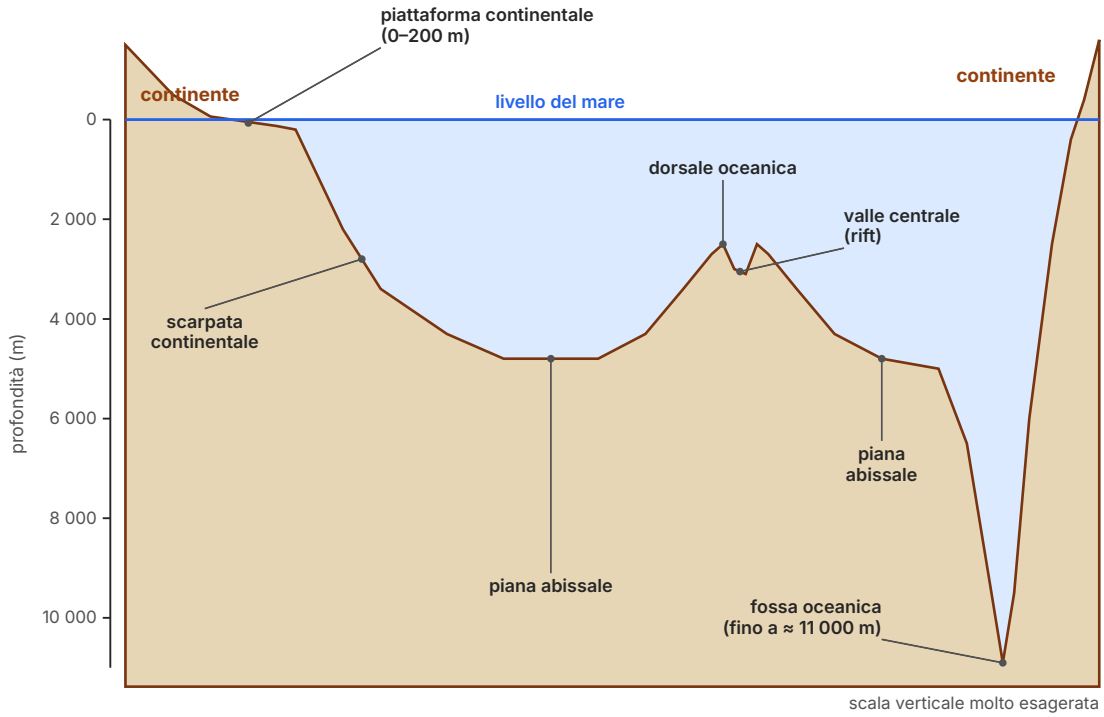


Figura 15.3 Profilo schematico dei fondali oceanici, da un continente all'altro. La scala verticale è molto esagerata rispetto a quella orizzontale (le distanze orizzontali non sono in scala): nella realtà la scarpata continentale ha pendenze di pochi gradi e un oceano è largo migliaia di chilometri.

15.2.2 Il Mediterraneo

Il Mediterraneo è un mare quasi chiuso, di circa 2,5 milioni di km², collegato all'Atlantico solo dallo stretto di Gibilterra, largo circa 14 km e poco profondo; un'altra stretta via d'acqua, attraverso i Dardanelli e il Bosforo, lo unisce al Mar Nero, mentre il canale di Suez, artificiale, lo collega al Mar Rosso. La sua profondità media è di circa 1500 m, ma nel Mar Ionio si superano i 5000 m. Il mare che circonda l'Italia prende nomi diversi: Mar Ligure, Tirreno, Ionio, Adriatico. L'Adriatico settentrionale è poco profondo (meno di 100 m), mentre il Tirreno e lo Ionio hanno ampie zone profonde più di 3000 m.

Il clima mediterraneo, con estati calde e secche, fa sì che l'evaporazione superi la somma di precipitazioni e apporti dei fiumi. Il Mediterraneo perde quindi più acqua di quanta ne riceva dal cielo e dalle terre: il deficit è compensato da acqua atlantica che entra in superficie da Gibilterra, mentre in profondità esce verso l'oceano acqua mediterranea più salata e più densa.

15.2.3 La salinità dell'acqua marina

L'acqua di mare è una soluzione (Capitolo 3): il solvente è l'acqua, i soluti sono soprattutto sali. La **salinità** è la massa di sali disciolti in 1 kg di acqua marina, e si esprime in grammi per kilogrammo, cioè in per mille (‰). La salinità media degli oceani è di circa 35 ‰: in 1 kg di acqua di mare sono disciolti circa 35 g di sali, e 965 g sono acqua.

Tabella 15.1 Composizione media dei sali disciolti nell'acqua di mare (percentuali in massa sul totale dei sali, valori arrotondati).

Sale	Formula	% sul totale dei sali
cloruro di sodio	$NaCl$	77,8
cloruro di magnesio	$MgCl_2$	10,9
solfato di magnesio	$MgSO_4$	4,7
solfato di calcio	$CaSO_4$	3,6
solfato di potassio	K_2SO_4	2,5
carbonato di calcio e altri		0,5

Il sale più abbondante è il cloruro di sodio, il comune sale da cucina, che costituisce quasi i quattro quinti dei sali disciolti (Tabella 15.1). I sali vengono in gran parte dalle rocce dei continenti, sciolte lentamente dalle acque e portate al mare dai fiumi, e in parte dalle emissioni dei vulcani sottomarini. Evaporando, l'acqua lascia i sali in mare: è per questo che il mare è salato e i fiumi no. Nelle saline (Capitolo 4) si sfrutta lo stesso principio per ottenere il sale.

La salinità non è uguale ovunque. Aumenta dove l'evaporazione è forte e gli apporti di acqua dolce sono scarsi; diminuisce dove piove molto, dove sfociano grandi fiumi o dove fondono i

ghiacci. Il Mar Rosso, chiuso fra deserti, raggiunge circa 40 ‰; il Mediterraneo ha in media circa 38 ‰; il Mar Baltico, quasi chiuso e alimentato da molti fiumi in un clima freddo, ha in media solo 7–8 ‰ e nei golfi più interni è quasi dolce.

ERRORE FREQUENTE

«La salinità del mare è 3,5 g per litro.» Sbagliato due volte: è circa 35 g di sali per *kilogrammo* di acqua marina (35 ‰, cioè il 3,5 % in massa), e non è un valore fisso ma una media che varia da mare a mare. Attenzione anche alla definizione: la massa dei sali si riferisce al kilogrammo di *soluzione*, non di acqua pura.

ESEMPIO SVOLTO

Problema. Quanti grammi di sali si ottengono facendo evaporare completamente 3,0 kg di acqua del Mediterraneo (38 ‰)? Quanto cloruro di sodio, circa?

Soluzione. 38 ‰ significa 38 g di sali per ogni kilogrammo di acqua marina: 3,0 kg × 38 g/kg = 114 g ≈ $1{,}1 \times 10^2$ g di sali. Il cloruro di sodio è circa il 77,8 % dei sali: 114 g × 0,778 ≈ 89 g.

15.2.4 Temperatura, densità, pressione e luce

Temperatura. In superficie l'acqua marina va da circa −2 °C nei mari polari a circa 30 °C nei mari tropicali. Il Sole riscalda soltanto lo strato superficiale, che le onde e il vento rimescolano fino a qualche decina o centinaio di metri. Sotto questo *strato rimescolato* la temperatura diminuisce rapidamente con la profondità: questa fascia di brusco calo si chiama **termoclino** e negli oceani aperti delle basse e medie latitudini si estende da circa 100 m a circa 1000 m. Più in basso si trovano le acque profonde, fredde e uniformi, fra 1 e 4 °C, anche all'equatore (Figura 15.4). Il Mediterraneo fa eccezione: la soglia poco profonda di Gibilterra impedisce l'ingresso delle fredde acque profonde atlantiche, e sotto qualche centinaio di metri la temperatura resta intorno ai 13–14 °C fino al fondo. Grazie al suo alto calore specifico (Capitolo 2), il mare si riscalda e si raffredda lentamente e mitiga il clima delle coste.

Densità. Per i sali disciolti, l'acqua di mare è più densa dell'acqua dolce: in superficie circa 1,025 g/cm^3 contro 1,000 g/cm^3. La densità aumenta quando la temperatura diminuisce e quando la salinità aumenta. A differenza dell'acqua dolce, che ha la massima densità a circa 4 °C (Capitolo 2), l'acqua di mare con salinità normale diventa sempre più densa raffreddandosi, fino a quando gela, a circa −1,9 °C. Il ghiaccio marino che si forma è quasi dolce: congelando, l'acqua espelle gran parte del sale, e l'acqua che resta sotto diventa più salata, più densa e tende ad affondare. Vedremo che questo fatto mette in moto la circolazione profonda degli oceani.

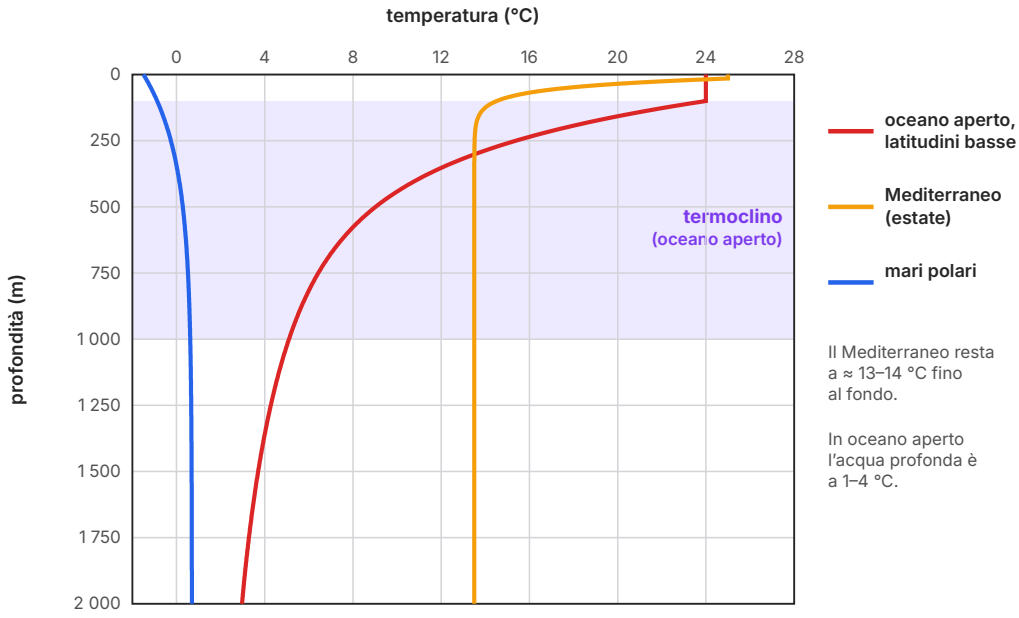


Figura 15.4 Andamento tipico della temperatura del mare con la profondità in tre situazioni (curve schematiche costruite su valori tipici). Nell'oceano aperto delle basse latitudini la temperatura cala bruscamente nel termoclino; nei mari polari è quasi uniforme; nel Mediterraneo, in estate, il termoclino è sottile e poco profondo, e sotto qualche centinaio di metri l'acqua resta a circa 13–14 °C fino al fondo.

Pressione. Scendendo in mare, alla pressione dell'aria si aggiunge il peso dell'acqua sovrastante. Poiché l'acqua è circa 800 volte più densa dell'aria, la pressione cresce molto in fretta: circa 1 atm in più ogni 10 m di profondità.

IN SINTESI

$$\text{pressione totale (atm)} \approx 1 + \frac{\text{profondità (m)}}{10\ \text{m}}$$

A 10 m la pressione è circa 2 atm, a 30 m circa 4 atm; nella fossa delle Marianne, a quasi 11 000 m, supera le 1000 atm (oltre una tonnellata su ogni centimetro quadrato). L'aumento è lineare, perché l'acqua è quasi incomprimibile: è diverso da quanto accade nell'aria, dove la pressione cala con la quota in modo esponenziale (Capitolo 13).

Luce e colore. La luce del Sole penetra nell'acqua ma viene assorbita rapidamente. Il rosso è assorbito già nei primi metri, il giallo e il verde più in basso; il blu arriva più in profondità di tutti. Per questo il mare aperto e limpido appare blu e un sub, a 20 m, vede gli oggetti rossi

come grigi o bruni. In acque costiere, ricche di alghe microscopiche e di particelle sospese, il colore tende al verde o al bruno. Nelle acque più limpide la luce sufficiente per la fotosintesi arriva fino a circa 200 m: è la *zona fotica*, dove vivono le alghe che sostengono quasi tutta la vita marina. Al di sotto di circa 1000 m regna il buio completo.

APPROFONDIMENTO

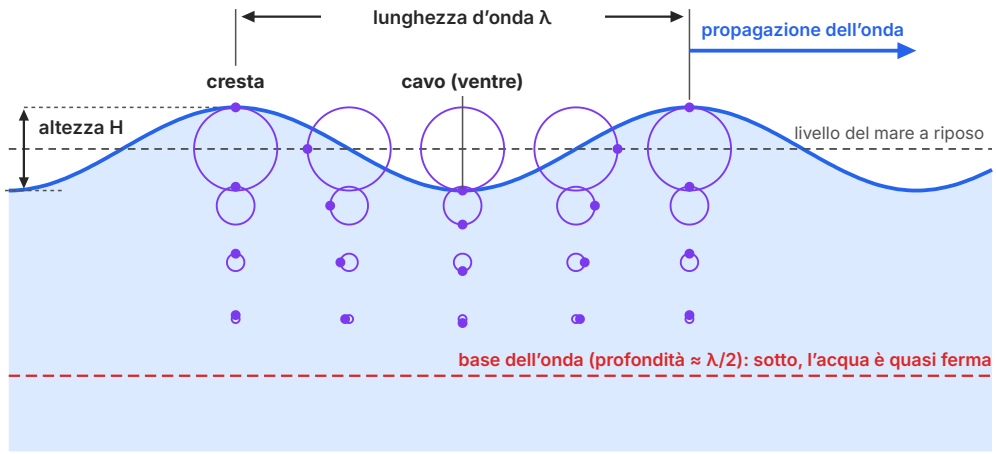
Un bolognese nel Bosforo. Uno dei primi studi sperimentali sul mare fu condotto da Luigi Ferdinando Marsili (1658–1730). Nel 1679–1680, a Costantinopoli, Marsili osservò che nel Bosforo l'acqua superficiale scorre dal Mar Nero verso il Mar di Marmara, ma i pescatori raccontavano che le reti calate in profondità venivano trascinate in senso opposto. Marsili misurò la densità delle acque dei due mari, trovando più leggera quella del Mar Nero, meno salata, e riprodusse il fenomeno in una vasca divisa da una paratia forata: l'acqua più densa scorreva sul fondo, quella meno densa in superficie. Era la prima spiegazione sperimentale di una corrente dovuta a differenze di densità. Nel 1725 Marsili pubblicò una *Storia fisica del mare*, considerata uno dei primi trattati di oceanografia. L'oceanografia moderna nacque invece con la spedizione britannica della nave *Challenger* (1872–1876), che misurò profondità, temperature e salinità in tutti gli oceani.

15.3 I movimenti del mare

15.3.1 Le onde

Le **onde** marine sono oscillazioni della superficie del mare prodotte quasi sempre dal vento, che trasferisce all'acqua parte della sua energia. Un'onda si descrive con alcune grandezze (Figura 15.5): la *cresta* è il punto più alto, il *cavo* (o ventre) il punto più basso; l'*altezza* H è il dislivello fra cresta e cavo; la **lunghezza d'onda** λ è la distanza fra due creste successive; il *periodo* T è il tempo che impiegano due creste successive a passare per lo stesso punto. La velocità con cui l'onda avanza è $v = \lambda/T$. Le onde sono tanto più alte quanto più il vento è forte, quanto più a lungo soffia e quanto più lungo è il tratto di mare su cui agisce.

Che cosa si sposta davvero, quando un'onda avanza? Osserva un gabbiano posato sull'acqua: sale e scende, avanza e arretra un poco, ma non viaggia con l'onda. Ciò che si propaga è l'energia, non l'acqua. In mare aperto ogni particella d'acqua descrive un'orbita quasi circolare, di diametro uguale all'altezza dell'onda in superficie: sotto la cresta si muove nel verso di propagazione, sotto il cavo nel verso opposto. Le orbite si restringono rapidamente con la profondità e diventano trascurabili a circa metà della lunghezza d'onda, la *base dell'onda*. Per questo un sottomarino in immersione non sente la tempesta che infuria in superficie.



- particella d'acqua: descrive un'orbita circolare che si restringe con la profondità e torna al punto di partenza dopo un periodo T; sotto la cresta si muove nel verso dell'onda, sotto il cavo nel verso opposto.

Figura 15.5 Un'onda in mare aperto, che si propaga verso destra. I cerchi sono le orbite descritte dalle particelle d'acqua, calcolate per un'onda di acqua profonda: il loro raggio si riduce a meno di un quarto ogni λ/4 di profondità, e a una profondità pari a λ/2 il moto è quasi nullo. I punti mostrano la posizione delle particelle nell'istante rappresentato.

Quando l'onda si avvicina alla costa e il fondale diventa meno profondo di circa λ/2, le orbite «toccano» il fondo e vengono frenate. L'onda rallenta, la lunghezza d'onda si accorcia e l'altezza cresce; la cresta, che si muove più veloce della base, finisce per scavalcarla e l'onda si rovescia: si forma il **frangente**. Solo a questo punto l'acqua si sposta davvero verso la riva, con la risacca che poi la riporta indietro. Le onde, i frangenti e le correnti che generano lungo la riva modellano le coste, come vedrai nel Capitolo 16.

ESEMPIO SVOLTO

Problema. Da una boa si osserva che passano creste ogni 8,0 s; la distanza fra due creste è stimata in 100 m. Con quale velocità avanzano le onde?

Soluzione. $v = \lambda/T = 100\ \text{m} / 8{,}0\ \text{s} = 12{,}5\ \text{m/s} \approx 13\ \text{m/s}$, cioè circa 45 km/h. L'acqua sotto la boa, invece, compie soltanto un'orbita ogni 8,0 s.

Uno **tsunami** (parola giapponese, «onda del porto») è una serie di onde lunghissime causate non dal vento ma da un improvviso spostamento di una grande massa d'acqua: un forte terremoto sottomarino che solleva o abbassa il fondale, una grande frana sottomarina o costiera, un'eruzione vulcanica. In mare aperto uno tsunami ha lunghezza d'onda di centinaia di chilo-

metri, altezza spesso inferiore al metro e passa inosservato sotto le navi; ma viaggia velocissimo, a 700–800 km/h dove l'oceano è profondo 4000–5000 m. Vicino alla costa rallenta e la sua altezza cresce fino a molti metri: l'acqua invade le terre per centinaia di metri o chilometri. Lo tsunami dell'Oceano Indiano del 26 dicembre 2004 e quello del Giappone dell'11 marzo 2011 furono catastrofici; anche il Mediterraneo ne ha subiti, come quello che seguì il terremoto di Messina e Reggio Calabria del 28 dicembre 1908.

15.3.2 Le maree

Le **maree** sono innalzamenti e abbassamenti periodici del livello del mare. Nella maggior parte delle località si osservano due alte maree e due basse maree al giorno, e ogni giorno si ripetono circa 50 minuti più tardi del giorno precedente, seguendo il passaggio della Luna. La causa è l'attrazione gravitazionale differenziale della Luna e del Sole sulla Terra, che crea due rigonfiamenti opposti dell'oceano; l'hai studiata nel Capitolo 11, dove hai visto anche perché le maree sono più ampie (maree vive) in Luna nuova e in Luna piena e meno ampie (maree morte) al primo e all'ultimo quarto.

L'*ampiezza* della marea, cioè il dislivello fra alta e bassa marea, dipende moltissimo dalla forma delle coste e dei fondali. In mare aperto è inferiore al metro; nei mari chiusi come il Mediterraneo è di pochi decimetri. Ma in certe baie e golfi stretti e lunghi l'acqua entra «in risonanza» e l'ampiezza diventa enorme: nella Baia di Fundy, in Canada, supera i 15 m e a Mont-Saint-Michel, in Normandia, sfiora i 14 m. In Italia l'ampiezza massima si registra nell'Adriatico settentrionale, dove con le maree vive arriva a circa 1 m.

COLLEGAMENTI

Venezia e l'acqua alta (storia ed educazione civica). A Venezia l'*acqua alta* si verifica quando a un'alta marea astronomica si sommano altri fattori: lo scirocco, che soffiando lungo l'Adriatico spinge l'acqua verso nord; una bassa pressione, che lascia «sollevare» la superficie del mare; le oscillazioni libere del bacino adriatico. Il 4 novembre 1966 il livello raggiunse 194 cm sopra lo zero di riferimento, il 12 novembre 2019 187 cm. L'abbassamento del suolo e il lento innalzamento del mare rendono gli allagamenti sempre più frequenti. Per difendere la laguna è stato costruito il MOSE, un sistema di paratoie mobili alle tre bocche di porto, sollevato per la prima volta il 3 ottobre 2020. Le chiusure proteggono la città, ma ostacolano il ricambio d'acqua della laguna e il traffico del porto: un esempio di come le scelte sul territorio richiedano di bilanciare interessi diversi.

15.3.3 Le correnti superficiali

Le **correnti marine** sono spostamenti di grandi masse d'acqua che seguono percorsi abbastanza costanti, come fiumi dentro il mare. Le *correnti superficiali*, che interessano le prime centinaia di metri, sono generate soprattutto dai venti dominanti (Capitolo 13): gli alisei spingono l'acqua verso ovest nella fascia equatoriale, i venti occidentali verso est alle medie latitudini. La

rotazione terrestre devia le correnti per l'effetto di Coriolis, verso destra nell'emisfero boreale e verso sinistra in quello australe, e i continenti ne sbarrano il cammino.

Il risultato sono grandi circuiti chiusi detti *vortici* (o giri) oceanici, che ruotano in senso orario negli oceani dell'emisfero boreale e in senso antiorario in quelli dell'emisfero australe (Figura 15.6). Lungo i loro margini occidentali scorrono verso i poli correnti calde, strette e veloci; lungo i margini orientali scendono verso l'equatore correnti fredde, più larghe e lente. Intorno all'Antartide, dove nessun continente la ostacola, la Corrente circumpolare antartica fa il giro completo del pianeta da ovest verso est ed è la più grande corrente oceanica.

La corrente più famosa è la **Corrente del Golfo**: nasce nel Golfo del Messico, risale la costa degli Stati Uniti a velocità che possono superare i 2 m/s e attraversa l'Atlantico con il nome di Deriva nord-atlantica. Porta acqua calda fino alle coste dell'Europa nord-occidentale, contribuendo a rendere il clima dell'Irlanda o della Norvegia molto più mite di quello del Labrador, in Canada, alla stessa latitudine, lambito da una corrente fredda. Le correnti fredde, invece, rendono aride molte coste: lungo il Perù e la Namibia l'aria che si raffredda sopra il mare freddo non produce piogge, e lì si estendono alcuni dei deserti più aridi del mondo.

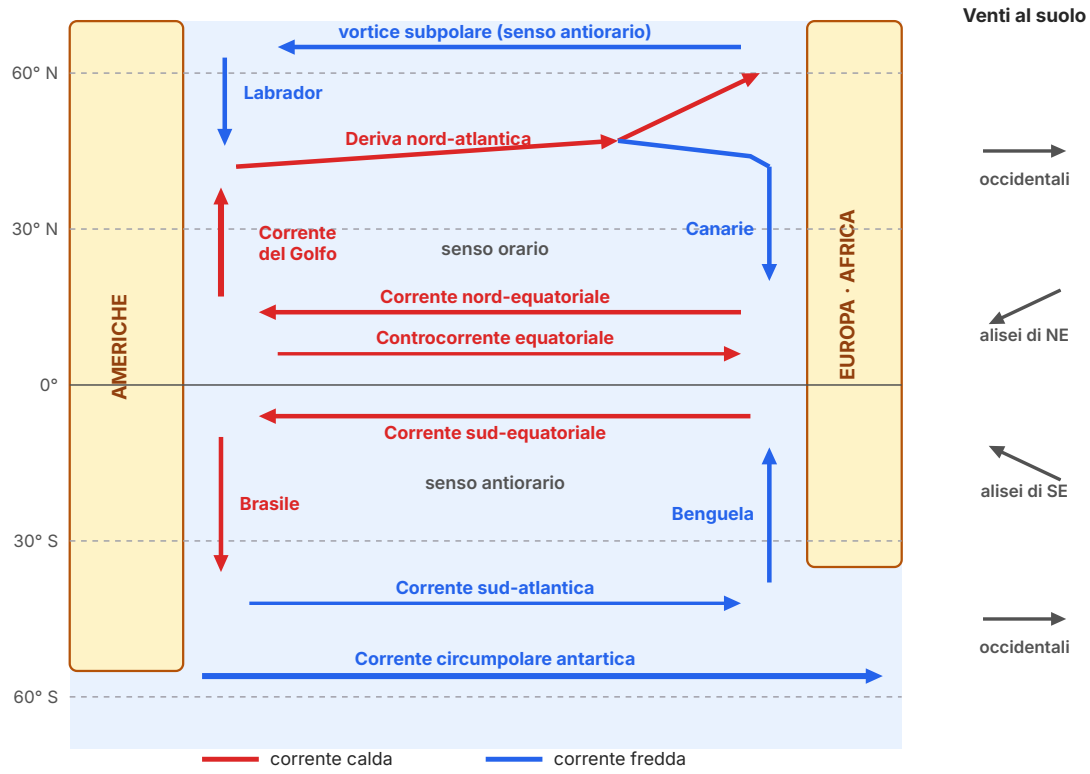


Figura 15.6 Schema delle principali correnti superficiali dell'Atlantico (oceano idealizzato fra due continenti rettangolari: le coste non sono realistiche; schema non in scala). A destra, i venti dominanti al suolo che le generano. Nell'emisfero boreale il vortice subtropicale ruota in senso orario, in quello australe in senso antiorario; a sud dell'Africa e del Sudamerica la Corrente circumpolare antartica scorre da ovest verso est intorno a tutto il globo.

15.3.4 La circolazione profonda ed El Niño

In profondità l'acqua si muove per un motivo diverso: le differenze di densità, dovute a differenze di temperatura (in greco *thermós*, «caldo») e di salinità (*háls*, «sale»). Si parla perciò di **circolazione termoalina**. Nell'Atlantico settentrionale, fra Groenlandia e Norvegia, e intorno all'Antartide l'acqua superficiale si raffredda molto e, quando si forma il ghiaccio marino, diventa anche più salata: diventa così densa da sprofondare fino al fondo dell'oceano. Da lì scorre lentamente lungo i fondali verso l'equatore e oltre, si distribuisce negli oceani Indiano e Pacifico e risale gradualmente in superficie, da dove le correnti superficiali la riportano verso le regioni polari. Questo «nastro trasportatore» globale impiega circa mille anni per un giro completo; ridistribuisce calore, ossigeno e sostanze nutritive in tutti gli oceani. Il riscaldamento globale, che addolcisce e scalda le acque polari, potrebbe rallentarlo: è uno dei temi più studiati del clima futuro (Capitolo 14).

Correnti e atmosfera sono strettamente legate. Un esempio è **El Niño**: ogni 2–7 anni circa, nel Pacifico equatoriale gli alisei si indeboliscono e l'acqua calda che normalmente accumulano verso l'Asia e l'Australia si espande verso est fino alle coste del Perù. Le acque fredde e ricche di nutrienti non risalgono più lungo la costa sudamericana, la pesca crolla, e il clima cambia in molte regioni del mondo: piogge intense in Perù, siccità in Indonesia e Australia. Il nome, «il Bambino» in spagnolo, fu dato dai pescatori peruviani perché il fenomeno si manifesta spesso intorno a Natale.

15.4 Le acque continentali: sotterranee, fiumi e laghi

15.4.1 Porosità e permeabilità

Dove va l'acqua che si infiltra nel terreno? Dipende dalle rocce e dai sedimenti che incontra. Due proprietà sono decisive.

- La **porosità** è la frazione del volume di una roccia o di un sedimento occupata da spazi vuoti (pori, fratture), che possono riempirsi d'acqua. Si esprime in percentuale: una sabbia ha tipicamente una porosità del 25–40 %.
- La **permeabilità** è la capacità di lasciarsi attraversare dall'acqua. Perché l'acqua scorra, i pori devono essere abbastanza grandi e comunicanti.

Le due proprietà non coincidono. L'argilla è molto porosa, anche più della sabbia, ma i suoi pori sono così minuscoli che l'acqua vi resta trattenuta: l'argilla è *impermeabile*. Ghiaie e sabbie sono porose e permeabili; un calcare compatto ha pochi pori ma può essere molto permeabile per le fratture e le cavità carsiche (Capitolo 16); un granito non fratturato è quasi impermeabile.

15.4.2 Le falde acquifere

L'acqua infiltrata scende attraverso uno strato in cui i pori contengono sia aria sia acqua (*zona di aerazione*), finché incontra uno strato impermeabile che la blocca. Sopra di esso si accumula, riempiendo completamente i pori dei sedimenti permeabili: è la *zona di saturazione*. Un corpo di roccia o di sedimento permeabile e saturo d'acqua, da cui l'acqua si può estrarre, si chiama **acquifero**, e l'acqua che contiene forma una **falda acquifera** (Figura 15.7).

La **falda freatica** è la falda più vicina alla superficie, non coperta da strati impermeabili: il suo limite superiore, la *superficie freatica*, è libero e si alza e si abbassa con le piogge e le siccità. Segue a grandi linee la forma del terreno, ma in modo attenuato. Un *pozzo freatico* scavato fino alla zona di saturazione si riempie d'acqua fino al livello della superficie freatica; per prelevarla bisogna pomparla.

ESEMPIO SVOLTO

Esperienza di laboratorio: misurare la porosità della sabbia

Materiale: due cilindri graduati da 250 mL, sabbia asciutta, acqua. **Procedimento:** versa sabbia nel primo cilindro fino al segno di 200 mL, battendolo leggermente perché si assesti. Nel secondo cilindro misura 200 mL d'acqua e versala lentamente sulla sabbia finché l'acqua arriva esattamente alla superficie della sabbia. Leggi quanta acqua resta nel secondo cilindro.

Calcolo: se restano 128 mL, l'acqua entrata nei pori è 200 mL − 128 mL = 72 mL; la porosità è 72 mL / 200 mL = 0,36 = 36 %. **Varianti:** ripeti con ghiaietto e con argilla in polvere; poi fora il fondo di bicchieri di plastica pieni dei tre materiali e misura il tempo che impiega a passare la stessa quantità d'acqua: è un confronto di permeabilità.

La **falda artesiana** (o confinata) è invece racchiusa fra due strati impermeabili, come l'acqua in un tubo. Si alimenta dove lo strato permeabile affiora, spesso su rilievi lontani: la *zona di ricarica*. Poiché l'acqua della zona di ricarica sta più in alto, l'acqua della falda è sotto pressione. Se si perfora lo strato impermeabile superiore, l'acqua risale nel pozzo fino a un livello detto *livello piezometrico*: se questo è più alto del terreno, l'acqua esce da sola dal pozzo, che si dice *artesiano zampillante*. Il nome viene dall'Artois, una regione della Francia settentrionale dove pozzi di questo tipo furono scavati fin dal Medioevo.

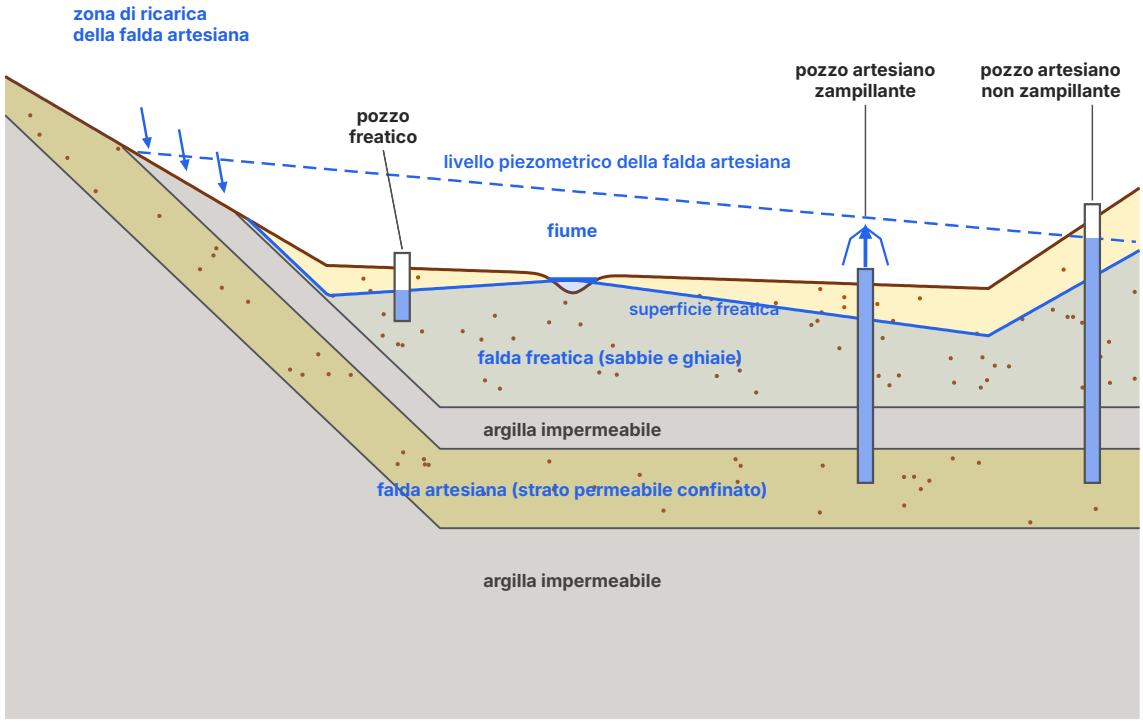


Figura 15.7 Sezione schematica (non in scala) di una falda freatica e di una falda artesiana. La falda artesiana è racchiusa fra due strati di argilla e si alimenta nella zona di ricarica, sul rilievo a sinistra; il livello piezometrico (linea tratteggiata) scende lentamente allontanandosi da essa. Dove il terreno è più basso del livello piezometrico il pozzo è zampillante; dove è più alto, l'acqua risale nel pozzo ma non esce. Il fiume è alimentato dalla falda freatica.

Una **sorgente** è un punto in cui l'acqua sotterranea esce spontaneamente in superficie. Si forma, per esempio, dove la superficie freatica interseca il pendio di una valle, o al contatto fra uno strato permeabile sovrastante e uno impermeabile che affiora lungo un versante. Molte sorgenti dell'Appennino e delle Alpi nascono da acquiferi calcarei. Le acque sotterranee sono preziose: filtrate lentamente dai sedimenti, sono di solito più pulite di quelle superficiali, e in Italia forniscono la grande maggioranza dell'acqua potabile. Ma si ricaricano lentamente: se si preleva più acqua di quanta se ne infiltri, la falda si abbassa, i pozzi vanno approfonditi e, vicino alle coste, l'acqua di mare può penetrare nell'acquifero e salinizzarlo.

ERRORE FREQUENTE

Le acque sotterranee non sono, di regola, «laghi» o «fiumi» sotterranei. Nella maggior parte dei casi l'acqua occupa i pori minuscoli fra i granelli di sabbia o di ghiaia, come in una spugna, e si muove molto lentamente, da pochi centimetri a qualche metro al giorno. Vere grotte percorse da corsi d'acqua esistono solo nelle rocce carsiche, come i calcari del Carso (Capitolo 16).

15.4.3 I fiumi

Un **fiume** è un corso d'acqua perenne che scorre in un letto (o alveo), alimentato da precipitazioni, nevi e ghiacciai, sorgenti e falde. I corsi d'acqua brevi, ripidi, con portata molto variabile e spesso asciutti in estate si chiamano *torrenti*. Un fiume riceve l'acqua dei suoi *affluenti* e sbocca in mare, in un lago o in un altro fiume.

Il **bacino idrografico** di un fiume è l'intera area le cui acque, scorrendo in superficie, confluiscono in quel fiume. Bacini vicini sono separati da una linea immaginaria, lo **spartiacque**, che corre di solito lungo le creste dei rilievi: una goccia di pioggia caduta da una parte o dall'altra finisce in fiumi diversi. Lo spartiacque dell'Appennino, per esempio, separa i fiumi che sfociano nel Tirreno da quelli che sfociano nell'Adriatico.

La **portata** è il volume d'acqua che attraversa una sezione del fiume nell'unità di tempo; si misura in metri cubi al secondo (m^3/s). Si calcola moltiplicando l'area della sezione bagnata per la velocità media della corrente:

$$\text{portata } Q = \text{area della sezione } (m^2) \times \text{velocità media } (m/s)$$

ESEMPIO SVOLTO

Problema. In un tratto un fiume è largo 40 m e profondo in media 2,5 m; la corrente ha velocità media 1,2 m/s. Calcola la portata e il volume d'acqua che passa in un'ora.

Soluzione. Area della sezione: 40 m × 2,5 m = 100 m^2. $Q = 100\ m^2 \times 1{,}2\ m/s = 120\ m^3/s$. In un'ora (3600 s) passano $120\ m^3/s \times 3600\ s = 432\,000\ m^3 \approx 4{,}3 \times 10^5\ m^3$, il volume di più di cento piscine olimpioniche.

La portata cambia durante l'anno: il suo andamento è il **regime** del fiume. Un fiume a regime *pluviale* ha le piene nelle stagioni piovose (in Italia autunno e primavera) e le magre in estate, come molti fiumi appenninici; uno a regime *nivale* o *glaciale* ha le piene fra la tarda primavera e l'estate, quando fondono nevi e ghiacci, come i fiumi alpini. Il Po ha un regime misto, con due massimi (primavera-inizio estate e autunno), e una portata media alla foce di circa 1500 m^3/s.

Il *profilo longitudinale* di un fiume, cioè la sua quota dalla sorgente alla foce, è di solito concavo: ripido nel corso superiore, dove il fiume scava e trasporta ciottoli, sempre più dolce nel

corso medio e inferiore, dove deposita sabbie e limi. Il punto più basso a cui un fiume può erodere è il *livello di base*, che per i fiumi che sfociano in mare è il livello del mare.

Alla foce i sedimenti trasportati possono comportarsi in due modi. Se il fiume porta molti sedimenti e il mare ha correnti e maree deboli, i depositi si accumulano e la foce avanza verso il mare dividendosi in più rami: si forma un **delta**, come quelli del Po, del Nilo o del Mississippi. Se invece le maree e le correnti sono forti e asportano i sedimenti, la foce resta aperta e si allarga a imbuto: è un **estuario**, come quelli del Tamigi, della Senna o del San Lorenzo. Come i fiumi scavano le valli e costruiscono le pianure lo vedrai nel Capitolo 16.

Tabella 15.2 I fiumi italiani più lunghi e i laghi italiani più estesi (valori arrotondati; per il Ticino e il lago Maggiore sono compresi i tratti in territorio svizzero).

Fiume	Lunghezza (km)	Foce	Lago	Superficie (km²)	Origine
Po	652	Adriatico (delta)	Garda	370	glaciale
Adige	410	Adriatico	Maggiore	212	glaciale
Tevere	405	Tirreno	Como	146	glaciale
Adda	313	Po	Trasimeno	128	tettonica
Oglio	280	Po	Bolsena	114	vulcanica
Tanaro	276	Po	Iseo	65	glaciale
Ticino	248	Po	Varano	60	costiera
Arno	241	Tirreno	Lesina	51	costiera

Il **Po** è il fiume più lungo d'Italia: nasce sul Monviso, attraversa tutta la Pianura Padana e sfocia in Adriatico con un ampio delta. Il suo bacino, di circa 71 000 km², è il più grande del Paese e comprende quasi un quarto del territorio nazionale; vi vive più di un quarto della popolazione italiana. Le sue piene, come quella del novembre 1951 che allagò il Polesine, e le sue magre, come quella dell'estate 2022, toccano l'intera economia del Nord.

15.4.4 I laghi

Un **lago** è una massa d'acqua ferma che occupa una depressione del terreno, senza comunicazione diretta con il mare. Si alimenta con fiumi immissari, sorgenti e precipitazioni, e perde acqua per evaporazione e, di solito, attraverso un fiume emissario: il Ticino, per esempio, entra nel Lago Maggiore ed esce dalla sua estremità meridionale. I laghi si classificano in base all'origine della conca (Tabella 15.2):

- **glaciali**: occupano conche scavate dai ghiacciai, spesso sbarrate da morene; tali sono i grandi laghi prealpini (Garda, Maggiore, Como, Iseo) e molti piccoli laghi alpini di alta quota;

- **vulcanici**: occupano crateri o grandi conche vulcaniche, e hanno spesso forma circolare (Bolsena, Bracciano, Vico, Albano);
- **tettonici**: si formano in depressioni create da movimenti della crosta terrestre (il Trasimeno; nel mondo, il Lago Baikal, il più profondo della Terra);
- **di sbarramento**: nascono quando una frana, una colata lavica o un deposito blocca una valle, come il lago di Alleghe, formato da una frana nel 1771;
- **carsici**: occupano depressioni dovute alla dissoluzione delle rocce calcaree (per esempio il lago di Doberdò, nel Carso);
- **costieri**: specchi d'acqua separati dal mare da cordoni di sabbia, come i laghi di Lesina e di Varano, in Puglia.

Ci sono infine i laghi *artificiali*, creati da dighe per produrre energia idroelettrica o per irrigare. Il Garda è il lago più esteso d'Italia (circa 370 km^2); il lago di Como, con oltre 400 m, è il più profondo. I laghi sono forme di breve durata, in termini geologici: immissari e frane li riempiono di sedimenti, la vegetazione invade le sponde, e in alcune migliaia o decine di migliaia di anni molti si trasformano in paludi e poi in pianure. Grazie alla loro massa d'acqua, i grandi laghi mitigano il clima: sulle rive del Garda crescono olivi e limoni, a una latitudine dove altrove non prospererebbero.

COLLEGAMENTI

Geografia · Fiumi, laghi e città. Molte città italiane sono nate lungo un fiume o sulla riva di un lago, che offrivano acqua, difesa e una via di trasporto: Roma sul Tevere, Firenze e Pisa sull'Arno, Torino sul Po, Verona sull'Adige, Como sul suo lago. Il bacino del Po, il più grande d'Italia, ospita gran parte dell'agricoltura e dell'industria del Paese, e proprio per questo il fiume deve reggere prelievi d'acqua crescenti, che negli anni di siccità lo riducono a un filo. Cerca su un atlante il fiume o il lago più vicino alla tua città: quali attività umane si sono sviluppate lungo le sue rive?

15.5 I ghiacciai

Un **ghiacciaio** è una massa di ghiaccio formata dall'accumulo e dalla trasformazione della neve, abbastanza spessa da muoversi lentamente sotto il proprio peso. Si forma dove, in media, nell'anno cade più neve di quanta ne fonda.

15.5.1 Da neve a ghiaccio

La neve fresca è soffice e piena d'aria: la sua densità è circa 0,1 g/cm^3. Strato dopo strato, sotto il peso della neve che continua a cadere, i cristalli si arrotondano, si saldano fra loro e l'aria viene espulsa: dopo una o più estati la neve diventa **nevato** (o *firn*), granuloso e più denso. Con gli anni e la pressione il nevato diventa ghiaccio di ghiacciaio, compatto e azzurrognolo, con den-

sità circa 0,9 g/cm^3; al suo interno restano intrappolate minuscole bolle d'aria. Proprio quelle bolle, nelle carote di ghiaccio estratte in Antartide, conservano campioni dell'atmosfera di centinaia di migliaia di anni fa e permettono di ricostruire i climi del passato (Capitolo 14).

15.5.2 Accumulo, ablazione e movimento

In un ghiacciaio si distinguono due zone (Figura 15.8). Nella **zona di accumulo**, in alto, la neve che cade in un anno supera quella che fonde o sublima: il ghiacciaio guadagna massa. Nella **zona di ablazione**, più in basso, la fusione supera l'accumulo: il ghiacciaio perde massa. Le due zone sono separate dal **limite delle nevi persistenti**, la quota sopra la quale la neve resta al suolo anche alla fine dell'estate. Questa quota dipende dalla latitudine e dal clima: è al livello del mare nelle regioni polari, intorno ai 2700–3000 m sulle Alpi e intorno ai 5000 m nelle montagne equatoriali.

Il ghiaccio, pur essendo solido, sotto pressione si deforma lentamente come una pasta molto viscosa e scivola anche sul fondo roccioso: il ghiacciaio «scorre» verso valle, trasferendo ghiaccio dalla zona di accumulo a quella di ablazione. Le velocità vanno da qualche metro a qualche centinaio di metri all'anno. Dove il ghiaccio superficiale, rigido, è costretto a piegarsi o a stirarsi, si apre in fenditure profonde, i *crepacci*. All'estremità inferiore, la *fronte*, il ghiaccio fonde e dà origine a un torrente glaciale. La posizione della fronte dipende dal bilancio fra accumulo e ablazione: se per molti anni l'accumulo prevale il ghiacciaio avanza, se prevale l'ablazione la fronte arretra, anche se il ghiaccio continua a scorrere verso valle.

15.5.3 Ghiacciai montani e calotte

I *ghiacciai montani*, o alpini, occupano le valli e i circhi delle montagne; le Alpi italiane ne contano diverse centinaia, quasi tutti piccoli. Le **calotte glaciali** sono invece enormi coperture di ghiaccio che seppelliscono interi continenti: quella dell'Antartide si estende per circa 14 milioni di km^2 con spessori che superano i 4 km, quella della Groenlandia per circa 1,7 milioni di km^2. Insieme contengono quasi tutta l'acqua dolce del pianeta: se fondessero completamente, il livello del mare si alzerebbe di circa 65 m. Ai margini delle calotte il ghiaccio arriva al mare e si stacca in blocchi galleggianti, gli *iceberg*.

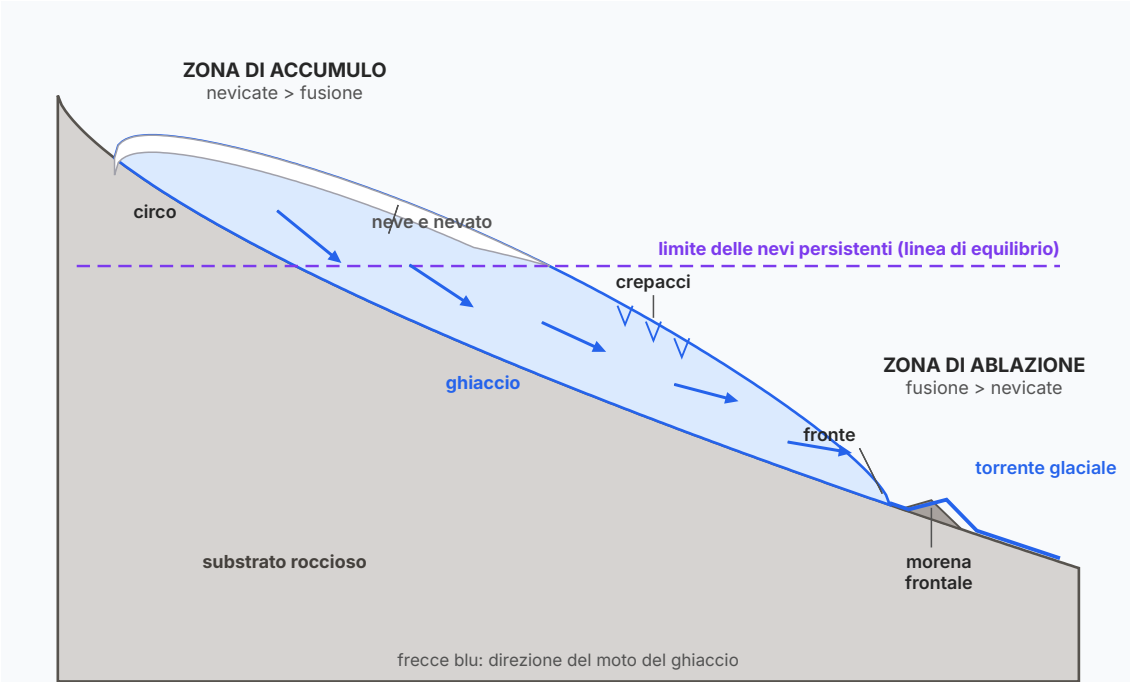


Figura 15.8 Sezione longitudinale schematica di un ghiacciaio vallivo (non in scala). Sopra il limite delle nevi persistenti, nella zona di accumulo, la neve si trasforma in nevato e ghiaccio; sotto, nella zona di ablazione, prevale la fusione. Il ghiaccio scorre dalla prima alla seconda zona: le frecce sono dirette verso il fondo nella zona di accumulo e verso la superficie in quella di ablazione.

Dalla metà dell'Ottocento, alla fine della cosiddetta Piccola età glaciale, quasi tutti i ghiacciai alpini sono in ritiro, e negli ultimi decenni il ritiro è diventato molto rapido a causa del riscaldamento globale (Capitolo 14). Nella sola estate 2022, eccezionalmente calda e povera di neve, i ghiacciai svizzeri hanno perso circa il 6 % del loro volume; il 3 luglio dello stesso anno il crollo di una parte del ghiacciaio della Marmolada causò undici vittime. La riduzione dei ghiacciai non è solo un problema paesaggistico: i ghiacciai sono riserve d'acqua che alimentano i fiumi alpini proprio in estate, quando l'agricoltura e le città ne hanno più bisogno.

15.6 L'acqua come risorsa

15.6.1 Gli usi dell'acqua

Nel mondo circa il 70 % dell'acqua dolce prelevata è usato in agricoltura, soprattutto per irrigare; circa il 20 % dall'industria, anche per raffreddare le centrali elettriche; poco più del 10 % per gli usi civili, cioè per bere, cucinare, lavarsi e pulire (stime FAO). Gran parte dell'acqua che «consumiamo» è quindi nascosta nei prodotti: servono molte centinaia di litri d'acqua per pro-

durre un kilogrammo di cereali e migliaia per un kilogrammo di carne bovina. In Italia, secondo l'ISTAT, le reti dei comuni erogano in media più di 200 litri per abitante al giorno, ma una quota rilevante dell'acqua immessa, oltre il 40 % nel 2022, si perde per strada a causa di tubature vecchie o danneggiate.

Prima di arrivare ai rubinetti l'acqua prelevata da falde, sorgenti, fiumi o laghi viene resa sicura da bere con la *potabilizzazione*, una sequenza di tecniche di separazione e di disinfezione che hai studiato nel Capitolo 4. Nelle isole e nei paesi aridi si ricorre anche alla dissalazione dell'acqua di mare.

15.6.2 Depurazione e inquinamento

Dopo l'uso, l'acqua diventa acqua di scarico, carica di sostanze organiche, detersivi, microrganismi. Prima di essere restituita a fiumi, laghi o mare deve passare per un impianto di **depurazione**. Nei trattamenti *preliminari e primari* griglie, vasche di sabbiatura e di sedimentazione eliminano i materiali grossolani e le particelle che si depositano; nel trattamento *secondario*, o biologico, batteri e altri microrganismi, in vasche ricche di ossigeno, decompongono la sostanza organica disciolta; con i trattamenti *terziari* si eliminano azoto e fosforo e si disinfetta l'acqua prima dello scarico. Dai fanghi che restano si può ricavare biogas.

Le acque possono essere inquinate da scarichi civili non depurati, da scarichi industriali (metalli pesanti, solventi), dall'agricoltura (fertilizzanti e pesticidi che si infiltrano nelle falde o scorrono nei fiumi), da sversamenti di petrolio e dalle plastiche, che si frammentano in microplastiche e si ritrovano ormai in tutti i mari. Le falde sono particolarmente vulnerabili: un inquinante che vi penetra può restarvi per decenni, perché l'acqua sotterranea si rinnova lentamente.

Un caso tipico è l'**eutrofizzazione**, l'eccessivo arricchimento di un lago o di un mare in sostanze nutritive, soprattutto composti di azoto e di fosforo provenienti da fertilizzanti, scarichi e, in passato, detersivi. I nutrienti fanno proliferare le alghe, che intorbidano l'acqua; quando muoiono, i batteri che le decompongono consumano l'ossigeno disciolto. Sul fondo l'ossigeno può esaurirsi del tutto: pesci e altri organismi muoiono, e si formano sostanze maleodoranti. Negli anni Ottanta del Novecento l'Adriatico settentrionale, che riceve i nutrienti del Po, conobbe estese fioriture algali; la riduzione dei fosfati nei detersivi e il miglioramento della depurazione hanno attenuato il problema.

COLLEGAMENTI

Agenda 2030, obiettivo 6 (educazione civica). L'obiettivo 6 dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite chiede di «garantire a tutti la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie». Nel 2010 l'Assemblea generale dell'ONU ha riconosciuto l'accesso all'acqua potabile e ai servizi igienici come un diritto umano. Anche le scelte quotidiane contano: riparare un rubinetto che gocciola, preferire la doccia al bagno, non sprecare cibo (che contiene tutta l'acqua usata per produrlo) riducono la nostra *impronta idrica*, cioè il volume totale d'acqua dolce usato per produrre ciò che consumiamo.

DA RICORDARE

Il ciclo dell'acqua è chiuso e rinnova di continuo l'acqua dolce, ma la rinnova con tempi molto diversi: settimane per i fiumi, decenni o secoli per molte falde, millenni per le calotte. Si può usare in modo sostenibile solo l'acqua che si rinnova: prelevare da una falda più di quanto la ricarichi significa consumare una riserva, come spendere un capitale invece degli interessi.

SINTESI

- L'idrosfera comprende circa 1,39 miliardi di km^3 d'acqua: il 97,5 % è salata; dell'acqua dolce (2,5 %) circa il 69 % è nei ghiacci, circa il 30 % nel sottosuolo e solo l'1 % circa in superficie e nell'atmosfera.
- Il ciclo dell'acqua, alimentato dal Sole, comprende evaporazione, traspirazione, condensazione, precipitazione, infiltrazione e ruscellamento; ogni anno circa 40 000 km^3 d'acqua passano dagli oceani alle terre come vapore e tornano al mare con fiumi e acque sotterranee.
- Dalla costa verso il largo si incontrano piattaforma continentale (fino a ≈ 200 m), scarpata, piana abissale (4000–6000 m); dorsali e fosse (fino a ≈ 11 000 m) sono le forme maggiori dei fondali.
- La salinità media degli oceani è ≈ 35 ‰ (35 g di sali per kg di acqua marina, soprattutto NaCl); è più alta nei mari caldi e chiusi (Mediterraneo ≈ 38 ‰, Mar Rosso ≈ 40 ‰) e più bassa nel Baltico.
- La temperatura del mare cala con la profondità, bruscamente nel termoclino; la densità aumenta con la salinità e al diminuire della temperatura; la pressione cresce di ≈ 1 atm ogni 10 m; la luce è assorbita in poche centinaia di metri.
- Le onde trasportano energia, non acqua: le particelle descrivono orbite che si annullano a ≈ $\lambda/2$ di profondità; vicino alla riva le onde frangono. Gli tsunami sono causati da terremoti, frane o eruzioni.
- Le maree (cause nel Capitolo 11) hanno ampiezze molto diverse: pochi decimetri nel Mediterraneo, ≈ 1 m nell'Adriatico settentrionale, oltre 15 m nella Baia di Fundy.
- Le correnti superficiali sono mosse dai venti e deviate da Coriolis in vortici (orari nell'emisfero boreale); la circolazione termoalina profonda è mossa dalle differenze di densità. El Niño è un riscaldamento periodico del Pacifico equatoriale orientale.
- Porosità e permeabilità controllano le acque sotterranee: la falda freatica è libera, la falda artesiana è confinata e in pressione; le sorgenti sono uscite naturali dell'acqua sotterranea.
- Un fiume è caratterizzato da bacino idrografico, portata (Q = area × velocità), regime e profilo longitudinale; sfocia a delta o a estuario. Il Po (≈ 652 km) è il fiume più lungo d'Italia, il Garda (≈ 370 km^2) il lago più esteso.
- I ghiacciai nascono dalla trasformazione della neve in nevato e ghiaccio; hanno una zona di accumulo e una di ablazione, separate dal limite delle nevi persistenti, e oggi sono in forte ritiro.
- L'acqua dolce va potabilizzata, depurata dopo l'uso e protetta dall'inquinamento; l'eutrofizzazione, causata da eccesso di azoto e fosforo, toglie ossigeno alle acque.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● La maggior parte dell'acqua dolce della Terra si trova:
   - **A.** nei laghi e nei fiumi
   - **B.** nell'atmosfera
   - **C.** nei ghiacciai e nelle calotte glaciali
   - **D.** nelle acque sotterranee

2. ● Una salinità di 35 ‰ significa che:
   - **A.** in 1 kg di acqua marina sono disciolti circa 35 g di sali
   - **B.** in 1 L di acqua marina ci sono 3,5 g di sali
   - **C.** in 1 kg di acqua marina ci sono 35 mg di sali
   - **D.** il 35 % dell'acqua marina è sale

3. ● La parte del fondale che prolunga i continenti fino a circa 200 m di profondità è:
   - **A.** la scarpata continentale
   - **B.** la piattaforma continentale
   - **C.** la piana abissale
   - **D.** la dorsale oceanica

4. ●● Il Mediterraneo è più salato dell'oceano Atlantico perché:
   - **A.** riceve più acqua dai fiumi
   - **B.** i suoi fondali sono ricchi di sale
   - **C.** è collegato al Mar Nero
   - **D.** l'evaporazione supera gli apporti di piogge e fiumi

5. ●● Al passaggio di un'onda in mare aperto, una boa ancorata con una lunga catena:
   - **A.** viene trasportata verso la costa insieme all'onda
   - **B.** resta del tutto immobile
   - **C.** sale, scende e oscilla avanti e indietro, tornando circa al punto di partenza
   - **D.** si sposta soltanto in orizzontale

6. ●● La Corrente del Golfo:
   - **A.** è una corrente calda che contribuisce a mitigare il clima dell'Europa nord-occidentale
   - **B.** è una corrente fredda che scende lungo le coste del Canada
   - **C.** è una corrente profonda dovuta a differenze di densità
   - **D.** scorre nel Mediterraneo

7. ● Un fiume alimentato soprattutto dalla fusione di nevi e ghiacciai ha in genere le piene:
   A. in inverno
   B. in autunno
   C. all'inizio della primavera, quando piove di più
   D. fra la tarda primavera e l'estate

8. ●● Una falda artesiana:
   A. è la falda più superficiale, con una superficie libera
   B. è racchiusa fra due strati impermeabili e la sua acqua è in pressione
   C. si trova solo nelle rocce carsiche
   D. è sempre formata da acqua salata

9. ● Il lago più esteso d'Italia e la sua origine sono:
   A. il Trasimeno, tettonica
   B. il lago di Bolsena, vulcanica
   C. il lago Maggiore, costiera
   D. il Garda, glaciale

Vero o falso

10. ● Nel mare la pressione aumenta di circa 1 atmosfera ogni 10 m di profondità.

11. ● L'argilla è un materiale molto poroso ma poco permeabile.

12. ●● L'acqua di mare, come l'acqua dolce, raggiunge la massima densità a circa 4 °C.

13. ● Il delta si forma quando le maree e le correnti asportano tutti i sedimenti portati dal fiume.

14. ●● Il ghiaccio marino è quasi dolce, perché congelando l'acqua espelle gran parte del sale.

15. ●● Se la fronte di un ghiacciaio arretra, significa che il ghiaccio ha smesso di muoversi verso valle.

Applicare e calcolare

16. ● Un sub si immerge fino a 25 m di profondità in mare. Stima la pressione totale che agisce su di lui, in atmosfere.

17. ● Quanti grammi di sali sono disciolti in 2,0 kg di acqua oceanica con salinità 35 ‰? Quanti di questi sono, circa, cloruro di sodio (Tabella 15.1)?

18. ●● Sciogli 36 g di sale in 1,000 kg di acqua distillata. Qual è la salinità della soluzione, in ‰? Perché non è 36 ‰?

19. ●● Un fiume, in un certo tratto, è largo 200 m, profondo in media 2,0 m, e la corrente ha velocità media 1,5 m/s. Calcola la portata e il volume d'acqua che passa in un giorno.

20. ●● Al largo, le creste di un'onda passano ogni 7,2 s e distano 80 m l'una dall'altra. Calcola la velocità dell'onda in m/s e in km/h. A che profondità circa il moto dell'acqua dovuto a quest'onda diventa trascurabile?

21. ●● Uno tsunami attraversa l'oceano alla velocità media di 720 km/h. Quanto tempo impiega a raggiungere una costa distante 2700 km dal punto in cui si è formato?

22. ●●● Nell'atmosfera sono presenti in media circa 12 900 km^3 d'acqua (come vapore, goccioline e cristalli). Ogni anno ne entrano circa 486 000 km^3 per evaporazione ed evapotraspirazione (Figura 15.2). Stima il tempo di residenza medio dell'acqua nell'atmosfera, in giorni.

23. ●● Con i dati della Figura 15.1 (acqua totale ≈ 1386 milioni di km^3, acqua dolce ≈ 35,0 milioni di km^3): (a) calcola la percentuale di acqua dolce; (b) immagina tutta l'acqua in una bottiglia da 1,0 L: quanti millilitri sarebbero acqua dolce?

24. ●● Un campione di 2,0 m^3 di sabbia ha porosità del 30 %. Quanti litri d'acqua contiene se è completamente saturo?

Leggere dati e figure

25. ● Osserva la Figura 15.2. Verifica che il bilancio dell'acqua sia in pareggio sia per gli oceani sia per le terre emerse, scrivendo le due uguaglianze. Che cosa accadrebbe al livello del mare se, per un lungo periodo, i fiumi restituissero meno acqua di quella trasportata dai venti sulle terre?

26. ●● Osserva la Figura 15.4. (a) Qual è, circa, la temperatura dell'oceano aperto a 500 m e a 1500 m? (b) In quale intervallo di profondità la temperatura cambia più rapidamente? (c) Perché a 1000 m il Mediterraneo è molto più caldo dell'oceano?

27. ●● Osserva la Figura 15.7. (a) Perché il pozzo freatico deve essere dotato di una pompa? (b) Perché nel pozzo a destra l'acqua risale molto sopra lo strato permeabile ma non esce in superficie? (c) Che cosa succederebbe al pozzo zampillante se la zona di ricarica venisse impermeabilizzata da un'ampia area urbana?

28. ●● Usa la Tabella 15.2. (a) Quale percentuale della superficie del Garda rappresenta quella del lago di Como? (b) Quale frazione della lunghezza del Po rappresenta quella dell'Arno? (c) Quali dei laghi elencati devono la loro conca all'azione dei ghiacciai?

Indagare e argomentare

29. ●● Progetta un esperimento per mostrare che l'acqua salata è più densa dell'acqua dolce e che, a parità di salinità, l'acqua fredda è più densa di quella calda. Indica materiali, procedimento, variabili controllate e risultati attesi. Collega il risultato alla circolazione termoalina.

30. ●● Il Mar Rosso e il Mar Baltico sono entrambi mari quasi chiusi, ma il primo ha salinità ≈ 40 ‰ e il secondo ≈ 7–8 ‰. Spiega la differenza usando il bilancio fra evaporazione, precipitazioni e apporti dei fiumi.

31. ●●● A Venezia si discute se chiudere il MOSE più spesso, anche per maree non eccezionali. Elenca i fattori che causano l'acqua alta e argomenta vantaggi e svantaggi di chiusure frequenti, per la città, per il porto e per l'ecosistema della laguna.

32. ●●● Un lago prealpino mostra in estate acque torbide e verdi e, in autunno, morie di pesci sul fondo. Proponi una spiegazione basata sull'eutrofizzazione, descrivendo la catena di cause ed effetti, e indica tre interventi concreti per migliorare la situazione.

PER APPROFONDIRE

- [PRE] F. Press, R. Siever, J. Grotzinger, T. H. Jordan, *Capire la Terra*: i capitoli sul ciclo dell'acqua e le acque sotterranee, sui ghiacciai e sugli oceani, con ottime sezioni dei fondali.
- [AHR] C. D. Ahrens, *Meteorology Today*: le pagine sulle interazioni fra oceano e atmosfera, con le correnti oceaniche ed El Niño.
- [SAG] C. Sagan, *Cosmos*: il capitolo sulla Terra come pianeta, per capire perché è l'unico del Sistema solare con oceani di acqua liquida in superficie.

Glossario del capitolo

Bacino idrografico
L'area le cui acque superficiali confluiscono in un determinato fiume; è delimitata dagli spartiacque.

Ciclo dell'acqua
Percorso chiuso dell'acqua fra oceani, atmosfera e terre emerse (evaporazione, traspirazione, condensazione, precipitazione, infiltrazione, ruscellamento), alimentato dall'energia del Sole.

Circolazione termoalina
Circolazione profonda degli oceani dovuta a differenze di densità, causate da differenze di temperatura e di salinità.

Delta
Foce che avanza verso il mare dividendosi in più rami, formata dall'accumulo dei sedimenti di un fiume dove maree e correnti sono deboli.

El Niño
Riscaldamento periodico (ogni 2–7 anni circa) delle acque superficiali del Pacifico equatoriale orientale, legato all'indebolimento degli alisei, con effetti sul clima di molte regioni.

Eutrofizzazione
Eccessivo arricchimento delle acque in nutrienti (azoto, fosforo), che provoca la proliferazione di alghe e l'esaurimento dell'ossigeno.

Evapotraspirazione
Passaggio di acqua dal suolo e dalle piante all'atmosfera come vapore, per evaporazione dal terreno e traspirazione delle foglie.

Falda artesiana
Falda racchiusa fra due strati impermeabili, alimentata da una zona di ricarica più alta e quindi in pressione.

Falda freatica
Falda acquifera più vicina alla superficie, non coperta da strati impermeabili, con una superficie libera (superficie freatica).

Idrosfera
L'insieme di tutte le acque della Terra, allo stato liquido, solido e aeriforme: oceani e mari, acque continentali, ghiacci, vapore atmosferico.

Limite delle nevi persistenti
Quota sopra la quale la neve resta al suolo tutto l'anno; in un ghiacciaio separa la zona di accumulo da quella di ablazione.

Lunghezza d'onda
Distanza fra due creste (o due cavi) successive di un'onda; si indica con λ.

Permeabilità
Capacità di una roccia o di un sedimento di lasciarsi attraversare dall'acqua.

Piana abissale
Vasta pianura dei fondali oceanici, fra circa 4000 e 6000 m di profondità, coperta da sedimenti fini.

Piattaforma continentale
Fondale a debole pendenza che prolunga i continenti sotto il mare, fino a circa 200 m di profondità.

Porosità
Frazione del volume di una roccia o di un sedimento occupata da spazi vuoti, espressa in percentuale.

Portata
Volume d'acqua che attraversa una sezione di un corso d'acqua nell'unità di tempo, in m^3/s; è il prodotto dell'area della sezione per la velocità media.

Salinità
Massa di sali disciolti in 1 kg di acqua marina, espressa in grammi per kilogrammo (‰); in media circa 35 ‰ negli oceani.

Termoclino
Strato del mare, sotto lo strato superficiale rimescolato, in cui la temperatura diminuisce rapidamente con la profondità.

Tsunami
Serie di onde lunghissime e velocissime generate da un improvviso spostamento d'acqua causato da un terremoto sottomarino, una frana o un'eruzione.

Soluzioni

1. C. Circa il 69 % dell'acqua dolce è nei ghiacciai, nelle calotte e nelle nevi perenni; circa il 30 % è sotterranea.

2. A. La salinità è la massa di sali (in g) disciolta in 1 kg di acqua marina: 35 ‰ = 35 g/kg (3,5 % in massa).

3. B. La piattaforma continentale è il prolungamento sommerso dei continenti, con debole pendenza, fino a circa 200 m.

4. D. Nel clima mediterraneo l'evaporazione supera precipitazioni e apporti fluviali; i sali restano in mare e la salinità sale a circa 38 ‰.

5. C. Al passaggio dell'onda l'acqua descrive orbite quasi circolari: la boa sale, scende, avanza e arretra tornando circa al punto di partenza. Si propaga l'energia, non l'acqua.

6. A. È una corrente calda superficiale del margine occidentale del vortice nord-atlantico; con la Deriva nord-atlantica porta calore verso l'Europa nord-occidentale.

7. D. Regime nivale o glaciale: piene fra tarda primavera ed estate, quando fondono nevi e ghiacci; magre in inverno.

8. B. La falda artesiana è confinata fra due strati impermeabili e, alimentata da una zona di ricarica più alta, è in pressione.

9. D. Il Garda (≈ 370 km^2) è di origine glaciale.

10. V. $\rho gh = 1025\ kg/m^3 \times 9{,}81\ m/s^2 \times 10\ m \approx 1{,}0 \times 10^5$ Pa ≈ 1 atm.

11. V. I pori dell'argilla sono numerosi ma minuscoli: l'acqua resta trattenuta e non scorre.

12. F. L'acqua di mare con salinità normale diventa sempre più densa raffreddandosi, fino al congelamento a circa −1,9 °C; il massimo a ≈ 4 °C vale per l'acqua dolce.

13. F. È il contrario: il delta si forma quando il fiume porta molti sedimenti e maree e correnti sono deboli; se i sedimenti vengono asportati si forma un estuario.

14. V. Congelando, l'acqua espelle gran parte del sale; l'acqua circostante diventa più salata e più densa.

15. F. Il ghiaccio continua a scorrere verso valle; la fronte arretra perché la fusione nella zona di ablazione supera l'apporto di ghiaccio dall'alto.

16. p ≈ 1 atm + 25 m / (10 m/atm) = 1 + 2,5 = 3,5 atm.

17. Sali: 2,0 kg × 35 g/kg = 70 g. NaCl: 70 g × 0,778 ≈ 54 g.

18. Massa della soluzione: 1000 g + 36 g = 1036 g. Salinità = 36 g / 1,036 kg ≈ 34,7 ‰ ≈ 35 ‰. Non è 36 ‰ perché la salinità si riferisce al kilogrammo di soluzione (acqua + sali), non al kilogrammo di acqua pura.

19. Area: 200 m × 2,0 m = 400 m^2; Q = 400 m^2 × 1,5 m/s = 600 m^3/s. In un giorno (86 400 s): $600 \times 86\,400 \approx 5{,}2 \times 10^7\ m^3$.

20. $v = \lambda/T = 80\ m / 7{,}2\ s \approx 11\ m/s \approx 40$ km/h. Il moto diventa trascurabile a circa $\lambda/2 = 40$ m di profondità.

21. t = d/v = 2700 km / 720 km/h = 3,75 h = 3 h 45 min.

22. Tempo di residenza = 12 900 km^3 / 486 000 km^3/anno ≈ 0,0265 anni; × 365 giorni ≈ 9,7 giorni (circa 10 giorni).

23. (a) 35,0 / 1386 × 100 ≈ 2,5 %. (b) 1000 mL × 0,0253 ≈ 25 mL.

24. Volume dei pori: 2,0 m^3 × 0,30 = 0,60 m^3 = 600 L.

25. Oceani: 413 = 373 + 40 (evaporazione = precipitazioni + ritorno dai continenti). Terre: 113 = 73 + 40 (precipitazioni = evapotraspirazione + deflusso al mare). Se i fiumi restituissero meno di 40 000 km^3

l'anno, l'acqua si accumulerebbe sulle terre (ghiacci, falde, laghi) e il livello del mare si abbasserebbe, come accade durante le glaciazioni.

26. (a) Circa 9 °C a 500 m e circa 4 °C a 1500 m. (b) Fra circa 100 m e 1000 m (termoclino), soprattutto nei primi 300–400 m. (c) La soglia di Gibilterra, poco profonda, impedisce l'ingresso delle acque profonde fredde dell'Atlantico; le acque profonde del Mediterraneo si formano nel Mediterraneo stesso, da acque superficiali che d'inverno non scendono sotto i 13 °C circa: per questo restano a ≈ 13–14 °C.

27. (a) In una falda freatica l'acqua non è in pressione: nel pozzo sale solo fino alla superficie freatica, sotto il terreno, e va pompata. (b) La falda artesiana è in pressione e l'acqua risale fino al livello piezometrico; in quel punto il terreno è più alto del livello piezometrico, quindi l'acqua non esce. (c) La ricarica diminuirebbe: la falda si svuoterebbe lentamente, il livello piezometrico si abbasserebbe e il pozzo potrebbe smettere di zampillare.

28. (a) 146 / 370 ≈ 0,39 → circa il 39 %. (b) 241 / 652 ≈ 0,37, poco più di un terzo. (c) Garda, Maggiore, Como e Iseo.

29. Traccia: due bicchieri di acqua dolce colorata e salata (per es. 35 g di sale per kg); versare con cautela acqua salata colorata sul fondo di un contenitore di acqua dolce (con un imbuto o lungo un cucchiaio) e osservare che resta sotto; ripetere con acqua dolce calda colorata e fredda incolore (l'acqua calda resta sopra). Variabili controllate: volumi, temperatura (nel primo esperimento), salinità (nel secondo); variabile indipendente: salinità o temperatura; osservazione: stratificazione. In alternativa, un uovo che affonda in acqua dolce e galleggia in acqua molto salata. Collegamento: nelle regioni polari l'acqua fredda e salata è più densa e sprofonda, mettendo in moto la circolazione termoalina.

30. Traccia: il Mar Rosso è circondato da deserti, riceve pochissima pioggia e quasi nessun fiume, mentre l'evaporazione è intensa per il clima caldo: i sali si concentrano. Il Baltico, in clima freddo, ha evaporazione scarsa, riceve molte precipitazioni e l'acqua di numerosi fiumi, e scambia poca acqua con l'oceano attraverso stretti poco profondi: l'acqua dolce diluisce i sali.

31. Traccia: fattori: marea astronomica (soprattutto maree vive), scirocco che spinge l'acqua verso nord, bassa pressione, oscillazioni del bacino adriatico, abbassamento del suolo e innalzamento del livello del mare. Vantaggi di chiusure frequenti: meno danni a edifici, negozi e monumenti, vita cittadina regolare. Svantaggi: minore ricambio d'acqua nella laguna (accumulo di inquinanti e nutrienti, meno ossigeno), interruzione del traffico navale e danni economici al porto, costi di esercizio e manutenzione. Una risposta equilibrata propone soglie di chiusura ragionate e interventi complementari (rialzo delle rive, riduzione degli scarichi).

32. Traccia: azoto e fosforo da fertilizzanti agricoli, scarichi civili poco depurati e allevamenti arrivano al lago → proliferazione di alghe (acque verdi e torbide) → le alghe morte affondano e vengono decomposte da batteri che consumano ossigeno → sul fondo l'ossigeno si esaurisce (il rimescolamento estivo è ostacolato dal termoclino) → morie di pesci. Interventi: migliorare la depurazione, con trattamenti terziari per rimuovere fosforo e azoto; ridurre e dosare i fertilizzanti, creare fasce di vegetazione lungo i corsi d'acqua; controllare gli scarichi degli allevamenti e collegare le case alla fognatura.