

# Scienze della Terra



## 1.1 Il pianeta Terra

La Terra descrive un'orbita ellittica con piccola eccentricità, situata tra quelle di Venere e Marte, transitando al perielio il 4 gennaio e all'afelio il 4 luglio; il piano di tale orbita è detto **eclittica**, il periodo della sua rivoluzione **anno siderale** e il periodo di rotazione intorno all'asse passante per i poli è detto **giorno siderale**. L'asse stesso compie un lento giro di **precessione** in ca 26.000 anni attorno alla perpendicolare all'eclittica. A causa della lentezza del moto di precessione, la direzione nello spazio dell'asse di rotazione rimane costante nel corso di molte rivoluzioni, verso la stella a Ursae Minoris, detta perciò "stella polare": tale costanza, insieme all'inclinazione dell'asse, determina l'alternarsi delle **stagioni**. La Terra compie altri moti minori, come lo spostamento dell'asse maggiore dell'orbita (con periodo di 117.000 anni), la **nutazione** (18,6 anni), la variazione dell'inclinazione dell'asse di rotazione dovuta al suo comportamento non totalmente rigido (**polodia**), variazioni di eccentricità e obliquità dell'eclittica, tutti dovuti alle perturbazioni create dalla Luna e dagli altri pianeti. Inoltre partecipa ai movimenti complessivi del sistema solare intorno al suo baricentro e verso la costellazione di Ercole e a quelli generali della Galassia intorno al suo centro.

Sferica in prima approssimazione, la forma della Terra è definita **geoide**, solido irregolare subsferico dotato di schiacciamento ai poli, la cui superficie risulta in ogni punto perpendicolare alla direzione del filo a piombo. La forza centrifuga, opposta alla gravità e derivante dal moto di rotazione della Terra, è massima all'equatore e nulla ai poli: ciò ha dato origine al suo schiacciamento polare. Il raggio medio è pari a 6371,22 km. Da un'ellisse i cui semiassi corrispondano rispettivamente al raggio polare ed equatoriale, si ottiene il solido geometrico più vicino alla forma terrestre (**ellissoide di rotazione**), in genere riferito all'altezza media del mare. La Terra è ricoperta per ca il 74% dall'acqua (**idrosfera**), per la quasi totalità quella degli oceani (profondità media 3800 m) e per il 26% dalle terre emerse (altezza media 823 m): le variazioni estreme della crosta sono rappresentate dalla fossa delle Marianne (-11.034 m) e dal monte Everest (8849 m). La massa terrestre genera un campo gravitazionale: il valore medio dell'accelerazione di gravità alla superficie è di  $9,8 \text{ m/s}^2$  e la velocità di fuga alla superficie di  $11,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ . La sua composizione metallica, inoltre, è responsabile di un campo magnetico (**geomagnetismo**) il cui asse è leggermente sfasato rispetto a quello di rotazione; la sua influenza si estende in modo variabile nello spazio circostante (**magnetosfera**), per ca 60.000 km nella direzione del Sole e 250.000 in quella opposta. La Terra è avvolta da un'**atmosfera** e le sue grandezze termodinamiche medie al suolo sono 1013 hPa di pressione e  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  di temperatura.

### 1.1.1. Origini

Si considera come inizio della storia della Terra la solidificazione dei primi frammenti di crosta, cristallizzati sulla superficie del magma primario; attraverso la datazione assoluta delle rocce più antiche, tale evento è collocato ca 4,5 miliardi di anni fa. Le diverse teorie sull'origine del sistema solare condividono l'ipotesi di una nebulosa primordiale soggetta a contrazione, a riscaldamento e a rotazione; attraverso una serie di fasi evolutive, da essa sarebbero derivati il Sole e i pianeti. Sulla superficie della Terra, la formazione di una superficie solida avrebbe avuto inizio ca 3500 milioni di anni fa, collegata a intensi fenomeni vulcanici che a loro volta diedero origine a una prima atmosfera, con emissione di vapore acqueo, favorendo il formarsi dell'idrosfera. La conformazione attuale della crosta, a partire da un'unica zolla, è ipotizzata dalla teoria della deriva dei continenti. Le più antiche testimonianze di vita sul pianeta sono costituite da organismi unicellulari, probabilmente alghe, risalenti a ca 3800 milioni di anni fa, mentre a 900 milioni di anni sono datati i primi organismi pluricellulari.

### 1.1.2 La teoria della deriva dei continenti

Secondo la **teoria della deriva dei continenti** di A. Wegener (1912), l'attuale disposizione dei blocchi continentali deriva dalla spaccatura di un'unica massa (**Pangea**), le cui singole zolle si sarebbero spostate sotto l'azione della rotazione terrestre e del moto di precessione scivolando sopra le masse più dense.

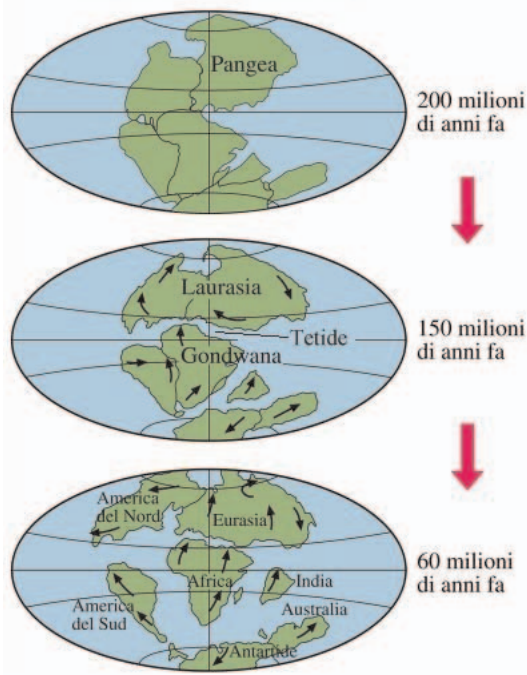


Figura 1 Teoria della deriva dei continenti.

## 1.2 Struttura e composizione della Terra

La differenziazione gravitativa dei materiali che costituiscono la Terra ha contribuito alla loro disposizione in strati concentrici, diversi per densità e composizione. Le conoscenze sulla loro struttura si basano principalmente sullo studio della propagazione delle onde sismiche, in parte riflesse o rifratte dalle superfici di separazione. Lo strato esterno è detto **crosta**, spessa in media 40 km (ma fino a 70 km sotto le catene montuose), formata in prevalenza da silicati di alluminio (**sial**) e magnesio (**sima**) nella crosta continentale, solo sima in quella oceanica, con densità media di  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ . L'equilibrio idrostatico della crosta è spiegato dalla teoria dell'**isostasia**. Al di sotto della crosta, separato da una superficie detta **discontinuità di Mohorovicic**, il **mantello** si spinge fino a una profondità di ca 2900 km, ed è formato da silicati di ferro e magnesio, con densità media di  $4,5 \text{ kg/dm}^3$ . Al suo interno, separato dalla **discontinuità di Gutenberg**, il **nucleo** è composto in prevalenza da leghe di ferro e nichel, con densità media di  $11 \text{ kg/dm}^3$ .

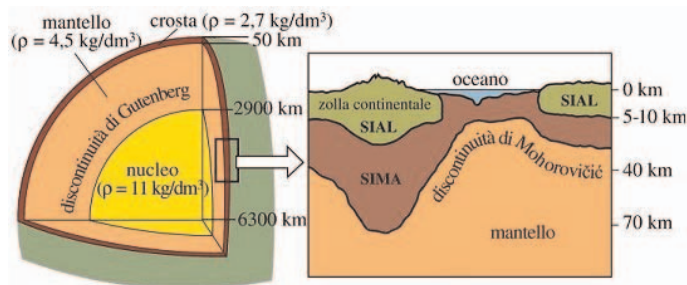


Figura 2 Struttura interna della Terra e ingrandimento di una sezione della crosta.

Una seconda distinzione degli strati più superficiali del pianeta è basata sulla consistenza rocciosa: a una **litosfera** rigida superficiale, formata dalla crosta e un primo strato del mantello per uno spessore di ca 100 km, segue l'**astenosfera**, di consistenza plastica e dello spessore di alcune centinaia di chilometri. Complessivamente la litosfera viene interpretata come un mosaico di placche rigide in continuo e reciproco movimento sulla sottostante astenosfera. La temperatura interna della Terra è pari alla media esterna nei primi metri di profondità (livello neutro), iniziando poi a crescere regolarmente secondo un gradiente geotermico medio di 1 °C ogni 33 m; nel mantello tale gradiente diminuisce e nel nucleo la temperatura non dovrebbe superare i 2500-3000 °C.

## La tettonica delle placche

La **tettonica delle placche** (o **tettonica a zolle**) è la teoria geologica formulata agli inizi degli anni '60 (H.H. Hess, R. Dietz, J.T. Wilson) sulla scorta delle nuove conoscenze relative all'espansione dei fondali oceanici e alla subduzione della litosfera lungo le fosse oceaniche; è l'unica teoria moderna che tenti una sintesi su scala globale dell'insieme dei fenomeni geologici conosciuti. Si basa sull'assunto che la litosfera sia discontinua, costituita cioè da un mosaico di **zolle** o **placche** che si concentrano in **cellule di convezione** del tutto simili a quelle che si vengono a creare in un fluido riscaldato dal basso. Esistono 6 zolle maggiori e un certo numero di zolle minori, separate da discontinuità dette **margini**, che interessano tutto lo spessore della litosfera e non coincidono necessariamente con i margini continentali.

In base al movimento relativo delle zolle si distinguono tre tipi di margine:

- **margini di accrescimento** o **divergenti** o **costruttivi**, lungo cui due zolle si allontanano per generazione di nuova litosfera. È detta **dorsale oceanica** ciascuna delle imponenti catene di vulcani lineari che percorrono il centro dell'oceano Indiano, dell'Atlantico, del Pacifico sud-orientale e dei bacini polari, con uno sviluppo complessivo di circa 80.000 km, una larghezza media di 1500 km e si elevano di 1-3 km dal fondale oceanico, arrivando talvolta a emergere (per es. in Islanda). Caratterizzate da un'accentuata sismicità, sono interessate, per tutta la lunghezza, da un fitto sistema di fratture verticali, trasversali all'asse della catena, che isolano blocchi in movimento reciproco (*faglia trasforme*);

- **margini trascorrenti** o **conservativi**, lungo cui due zolle scivolano una accanto all'altra senza avvicinarsi o allontanarsi (per es. la faglia di San Andreas, in California);

- **margini di consumo** o **convergenti** o **distrittivi**, lungo cui due zolle si avvicinano mentre una viene subdotta all'altra con formazione di un arco magmatico o insulare. Lungo il margine che separa le due placche si forma una **fossa oceanica**, depressione stretta e allungata del fondale oceanico, dove questo raggiunge le sue massime profondità, solitamente situata tra la pianura abissale e la scarpata continentale, associata a un arco. Le principali fosse oceaniche sono l'abisso Challenger (-11.034 m), nella fossa delle Marianne, la fossa di Puerto Rico (-9220 m), nell'Atlantico, la fossa di Giava (-7450 m), nell'oceano Indiano. Il movimento di una placca oceanica che si immerge sotto un'altra placca, sprofondando nel mantello, è detto **subduzione**. Il piano tettonico lungo il quale una placca litosferica viene subdotta a un'altra è chiamato **piano di Benioff** ed è inclinato di 15°-75° (in media 45°).

Le zone instabili della crosta, caratterizzate da fenomeni sismici e vulcanici, coinciderebbero con i margini, mentre le zone stabili si troverebbero al centro delle zolle maggiori. La litosfera oceanica prodotta nelle dorsali (con avanzamento di ca 15 cm annui su tutta la Terra) verrebbe quindi consumata nelle fosse oceaniche; la litosfera continentale viene trasportata passivamente su quella oceanica: due continenti in collisione lungo un margine di consumo, troppo leggeri per essere subdotti nel mantello, sarebbero la causa dell'**orogenesi** (ovvero la formazione dei sistemi montuosi). La tettonica a zolle risulta in accordo con la teoria della deriva dei continenti di A. Wegener.

### 1.2.1 Vulcani, terremoti e maremoti

Un **vulcano** è un'apertura della crosta terrestre attraverso cui un magma giunto in prossimità della superficie libera i propri gas e fuoriesce eventualmente in un'eruzione di lava o di materiale piroclastico. Elementi morfologici del vulcano sono il *serbatoio magmatico*, più o meno profondo, che lo alimenta; il *condotto* o *camino*, attraverso cui il materiale magmatico è spinto in superficie; il *cono*, eventualmente formato dall'accumulo dei prodotti eruttivi e il *cratere* o la *caldera*. Tra i gas, emessi da

tutti i tipi di vulcano, sono presenti vapore acqueo, anidride carbonica e quantità solitamente minori di anidride solforosa e solforica, idrogeno, ossido di carbonio, zolfo, cloro ecc.

Il tipo di attività e la struttura dei vulcani dipendono dalla qualità del magma: in generale i chimismi basici (tipici di aree tettonicamente distensive, come le dorsali oceaniche) danno eruzioni effusive, quelli acidi (margini convergenti di placche litosferiche) eruzioni esplosive, quelli neutri presentano manifestazioni miste.

In base al tipo di apparato vulcanico esterno i vulcani sono classificati in 4 tipi: ■ **vulcani a scudo**, con fianchi con pendenza moderata, costruiti dall'eruzione di lava basaltica fluida; i maggiori vulcani del pianeta sono di questo tipo (come il Mauna Loa, nelle Hawaii);

■ **vulcani a cono** o **stratovulcani**, generati da lave acide, per cui il magma risulta molto viscoso e trova difficoltà nel risalire, solidificando velocemente una volta fuori; alle emissioni laviche si alternano emissioni di piroclasti; le eruzioni di questi vulcani possono essere molto violente (come quella del Vesuvio nel 79 d.C.), poiché il magma tende ad ostruire il camino vulcanico creando un "tappo";

■ **vulcani lineari** o **fissurali**, formati lungo i margini divergenti e quindi localizzati principalmente lungo le dorsali oceaniche; ■ **vulcani sottomarini**, i vulcani più diffusi del pianeta, che nel corso della storia geologica della Terra hanno dato vita alle dorsali oceaniche, alle isole e agli arcipelaghi vulcanici; possono essere lineari, a cono o a scudo.

In base all'attività eruttiva vengono invece distinti cinque tipi di vulcani:

■ **hawaiani**, alimentati direttamente dal magma basico profondo, con grandi edifici a scudo costruiti dalle abbondanti colate (per es. Mauna Loa e Kilauea, nelle Hawaii);

■ **stromboliani**, a chimismo intermedio-basico, con cono a strati alterni di materiale lavico e piroclastico (per es. Etna e Stromboli);

■ **vulcaniani**, a chimismo intermedio-acido, con cono a strati dove il materiale piroclastico è più abbondante della lava (per es. Vesuvio e Fuji in Giappone);

■ **peléeiani**, a chimismo acido, con edificio irregolare formato dai soli prodotti piroclastici, mentre la lava, troppo viscosa per fuoriuscire, ristagna in cupole o guglie nel condotto (per es. La Pelée in Martinica e Krakatoa in Indonesia); questi primi quattro tipi, caratterizzati da un condotto lineare a sbocco idealmente puntiforme, sono detti centrali;

■ **lineari** o **islandesi**, a chimismo basico, in cui il condotto è un piano di frattura crostale, che interseca la superficie secondo una linea lungo cui avviene l'eruzione; questi vulcani sono in gran parte sottomarini e nel loro complesso costituiscono le dorsali oceaniche.

Sono considerati attivi i vulcani che hanno eruttato in epoca storica; se ne conoscono oltre 700 emersi, di cui circa 300 attualmente in eruzione.

Il **vulcanismo** è l'insieme dei processi dovuti alla risalita di un magma alla superficie terrestre, che portano alla formazione di un vulcano e ad altre manifestazioni minori o diffuse, annoverate nel vulcanismo secondario: geysir, fumarola, soffione boracifero, vulcano di fango, mofeta, putizza, solfatara, sorgente termale, nube ardente. Tali fenomeni sono raggruppati secondo archi o linee (isole e archi insulari degli oceani Pacifico, Indiano e Atlantico, fosse tettoniche africane, Mediterraneo, regione caucasica e cintura circumpacifica), detti **archi tettonici** e interpretati come margini di placche litosferiche, legati alla passata attività orogenetica (vulcanismo di orogenesi, come il Vesuvio o il Krakatoa) o al formarsi di fratture o **faglie** (vulcanismo di cratogene, come i vulcani islandesi e hawaiani). Spesso legati all'attività sismica, i processi coinvolti nel vulcanismo sono alla base del metamorfismo roccioso.

I **terremoti** o **sismi** sono l'effetto della liberazione rapida e improvvisa di energia meccanica dal sottosuolo, che si propaga sotto forma di **onde sismiche** attraverso la crosta terrestre e gli involucri sottostanti, manifestandosi sotto forma di scosse o vibrazioni. L'energia delle spinte tettoniche si accumula lentamente nelle rocce fino a superarne il limite di resistenza meccanica e a provocarne la rottura (**faglia**) o la rimobilizzazione lungo una precedente linea di frattura (faglia attiva). Benché le onde sismiche interne si generino lungo tutta la superficie di rottura, si assume che esse partano dal punto centrale, detto **ipocentro**; sulla sua verticale si trova il primo punto della superficie raggiunto dalle onde, detto **epicentro**, da cui si propagano le onde superficiali. Le onde sismiche comprendono le onde *P* (o primarie), longitudinali e le onde *S* (o secondarie), trasversali; quelle superficiali si originano nell'epicentro e comprendono le onde *R* (o di Rayleigh) e le onde *L* (o di Love) che imprimono moti

complessi alla superficie libera del terreno. La velocità delle onde sismiche dipende dal tipo e dalla densità e caratteristiche elastiche del mezzo: le più veloci sono le onde *P* (da 350 a 7000 m/s).

Le vibrazioni del terremoto si rilevano tramite il **sismografo**, che fornisce una registrazione permanente (**sismogramma**). L'intensità dei terremoti è valutata mediante la **scala Richter** o la **scala Mercalli** modificata: la prima fornisce una valutazione obiettiva (**magnitudo**) della quantità totale di energia liberata, mentre la seconda assegna un grado agli effetti più o meno dannosi provocati sull'ambiente. La distribuzione geografica dei terremoti indica la loro concentrazione in fasce sismiche ben definite, larghe qualche centinaio di km e lunghe migliaia di km, nettamente associate alle catene montuose più recenti (fascia alpino-himalayana e cintura circumpacifica) e alle dorsali oceaniche; tali fasce vengono interpretate come corrispondenti ai confini tra placche litosferiche contigue.

Il **maremoto** è un violento sommovimento marino, con un sistema di onde di eccezionale lunghezza (oltre 100 km) e velocità (oltre 100 m/s), generato da un terremoto con epicentro in mare o da una violenta eruzione vulcanica sottomarina. Le onde possono propagarsi per oltre 15.000 km raggiungendo un'eccezionale altezza in prossimità della costa (**tsunami**) e arrecando gravi danni.

### 1.2.2 I minerali e le rocce

Un **minerale** è una sostanza naturale, generalmente allo stato solido cristallino, caratterizzata da una composizione chimica definita. I minerali si originano nella litosfera e sulla sua superficie tramite processi inorganici (*minero-genesi*) e rappresentano i costituenti fondamentali di tutte le rocce. Proprietà fisiche dei minerali sono la struttura (di tipo cristallino o, più raramente, amorfo) e l'eventuale forma cristallina (studiata dalla cristallografia), la densità, la durezza, la sfaldatura, il punto di fusione, la conducibilità termica, la forma dei frammenti irregolari (frattura), la reazione alla deformazione (duttilità), oltre alle proprietà ottiche (colore, riflessione, rifrazione, lucentezza, birifrangenza, colore della polvere, luminescenza ecc.), magnetiche, elettriche (conducibilità, piroelettricità, piezoelettricità), radioattive. I minerali conosciuti sono oltre 5000, spesso comprendenti numerose varietà. Dal punto di vista cristallografico i minerali, che presentano comunemente fenomeni di isomorfismo e di polimorfismo, si suddividono in 9 classi: *elementi nativi* (con leghe, carburi ecc.), *solfuri* (con arseniuri, seleniuri ecc.), *alogenidi, ossidi e idrossidi, carbonati* (con nitrati e borati), *solfati* (con cromati, molibdati ecc.), *fosfati* (con arseniati e vanadati), *sostanze organiche* e **silicati**. Questi ultimi (minerali del silicio) sono il costituente essenziale della maggior parte delle rocce (ca l'80% della litosfera superiore); la loro struttura cristallina è caratterizzata dal gruppo  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , che forma celle elementari con gli atomi di ossigeno disposti ai vertici di un tetraedro, al cui centro sta un atomo di silicio, che può essere sostituito da un atomo di alluminio (*alumosilicati*).

Le **rocce** sono estese porzioni di litosfera costituite da un aggregato continuo di minerali e definite dall'associazione (o *paragenesi*) delle specie presenti (roccia composta o polimineralica) o, più raramente, da una sola specie (roccia semplice o monomineralica).

In base all'origine le rocce si classificano in 3 gruppi:

- **rocce magmatiche** (95% della litosfera), derivanti dal raffreddamento e dal consolidamento di un magma, distinte in rocce *intrusive* (solidificate all'interno della crosta terrestre), *effusive* (solidificate in superficie in seguito al raffreddamento veloce della lava) e *ipoabissali* o *filoniane* (intermedie tra le due precedenti);
- **rocce sedimentarie** (1% della litosfera), derivanti da processi di erosione e disgregazione di rocce preesistenti, o dal trasporto, sedimentazione e diagenesi dei loro detriti, si suddividono in rocce *clastiche* (formate da frammenti trasportati e quindi trasformati meccanicamente, come l'arenaria), *chimiche* (formate in bacini a seguito di trasformazioni chimiche, come la bauxite e le evaporiti, per es. salgemma e gesso) e *organogene* (formate dall'accumulo di resti organici, come i calcari);
- **rocce metamorfiche** (4% della litosfera), prodotte dall'azione del metamorfismo regionale, termico e dinamico su rocce preesistenti; si classificano in base alla roccia originaria e al grado metamorfico raggiunto.

Le *rocce piroclastiche* sono formate da frammenti dei prodotti dei vulcani, che sedimentano dopo essere ricadute sulla terra o nel mare, e possono quindi essere considerate sia magmatiche che sedimentarie.

In base al contenuto di silice le rocce magmatiche si suddividono in 3 gruppi:



- **rocce acide**, con un contenuto di silice superiore o uguale al 65%, come il granito (intrusiva) e la pomice e l'ossidiana (effusive);
- **rocce neutre o intermedie**, con un contenuto di silice tra 52% e 65%, come la diorite;
- **rocce basiche**, con un contenuto di silice tra 45% e 52%, come il gabbro (intrusiva) e il basalto (effusiva);
- **rocce ultrabasiche**, con un contenuto di silice inferiore al 45%, come la peridotite.

È detto **ciclo delle rocce** (o **ciclo litogenetico**) l'insieme dei processi naturali che, in modo lento e continuo, trasformano qualsiasi roccia profonda in un prodotto metamorfico o magmatico e qualsiasi roccia affiorante in una roccia sedimentaria.

### 1.2.3 Le risorse naturali

I minerali sono presenti in tutte le rocce, ma diventano una **risorsa** solo quando sono concentrati in un volume limitato: i giacimenti minerali. In un giacimento, raramente situato in superficie e più comunemente in profondità, il minerale è sempre mescolato a materiali privi di valore economico da cui dev'essere separato con un notevole costo, grande produzione di scorie e conseguente notevole impatto ambientale.

Le rocce stesse costituiscono una risorsa, usate direttamente soprattutto in edilizia, come marmo, sabbia e ghiaia. La loro estrazione viene eseguita nelle cave. Ciò comporta alcuni rischi, tra i quali l'instabilità dei versanti e un notevole impatto ambientale con deturpazione del paesaggio in seguito a eliminazione della vegetazione e accumulo delle scorie.

Anche se le uniche vere fonti primarie di energia sul nostro pianeta sono il Sole e la Terra, intese come materia in trasformazione, vengono considerate *fonti primarie* quelle di partenza per le trasformazioni che portano all'energia utilizzabile, secondarie quelle intermedie nel processo di trasformazione, quindi sono risorse primarie anche i combustibili fossili, ovvero carbone, petrolio e gas naturale (metano).

Il **carbone fossile** è una roccia sedimentaria organogena, costituita da carbonio (59-95%) e sostanze volatili, talvolta mescolati a solfuri, carbonati o silicati. Ha origine da resti vegetali seppelliti da sedimenti che li sottraggono all'ossidazione: la carbonizzazione è una lentissima trasformazione chimica (secondo altri, biochimica) delle sostanze organiche del legno, con arricchimento in carbonio per volatilizzazione di idrogeno, ossigeno e azoto. Anche l'origine dei giacimenti è ancora discussa: si formerebbero per il rapido seppellimento di una foresta nel luogo dove era cresciuta o, secondo altre teorie, per accumulo di detriti vegetali strappati e trasportati dalle piene dei fiumi. I carboni fossili si classificano in base all'età del giacimento, quindi al grado di carbonizzazione, in: *torba* (neozoico), *lignite* (cenozoico e mesozoico), *litantrace* (permiano e carbonifero), *antracite* (paleozoico inferiore). Come fonte di energia, il carbone fossile fornisce da 5000 a 8500 kcal/kg; le riserve probabili sulla Terra sono stimate in 6000 miliardi di t, di cui l'80% di antracite e litantrace, il 18% di lignite e il 2% di torba.

Il **petrolio** è una miscela naturale di idrocarburi liquidi, di composizione assai complessa e variabile, estratta da giacimenti che si trovano nella crosta terrestre a una profondità generalmente compresa tra poche decine e diverse migliaia di metri. I petroli greggi contengono idrocarburi paraffinici (alcani), naftenici (cicloalcani), aromatici (benzene) e, in piccola quantità, idrocarburi non saturi (alcheni). La loro composizione media in peso comprende carbonio (79-89%), idrogeno (9,5-15%), azoto (0,02-2%), ossigeno (0,1-7%), zolfo (0,1-6%). Sull'origine del petrolio sono state fatte diverse ipotesi: a causa della diversa composizione dei petroli, è possibile che la loro origine non sia unica; prevalente è l'ipotesi dell'origine da sostanze organiche, accumulate sul fondo di mari e lagune, che si sono trasformate in petrolio in assenza di ossigeno e in presenza di batteri anaerobi. Il petrolio si trova nel sottosuolo, accumulato in strati rocciosi permeabili racchiusi da altri strati impermeabili; viene portato in superficie dalla pressione dei gas sotterranei o mediante pompe; il petrolio greggio estratto viene raccolto in serbatoi per sedimentare la sabbia, i fanghi e per una decantazione dell'acqua.

Il *petrolio greggio* è un liquido facilmente infiammabile, di densità compresa tra 0,7 e 0,85 kg/dm<sup>3</sup>; unità di misura commerciale è il barile, pari a 157,97 litri. Per distillazione il petrolio greggio viene separato in quattro frazioni, caratterizzate dall'intervallo di temperatura: *oli leggeri* (40-225 °C), *petrolio* (225-280 °C), *oli medi* (tra 280-300 °C), *oli pesanti* (sopra i 300 °C). Con ulteriori trattamenti di recupero e di raffinazione si ottiene una serie di prodotti molto importanti, che comprende benzine, cherosene, oli per motori diesel, oli per riscaldamento, lubrificanti, cere, grassi, coke di petrolio, oltre a una serie di prodotti destinati all'industria petrolchimica, come etilene, butadiene, materie plastiche. Il suo sfruttamento intensivo nel sec. XX e la dipendenza da tale fonte della società moderna, che hanno



determinato la creazione di poli di potere economico e politico a causa della disomogenea distribuzione dei giacimenti, insieme all'impatto ambientale del suo utilizzo, hanno dato impulso alle ricerche di fonti energetiche alternative ad alto rendimento. Le riserve sfruttabili entro limiti economici accettabili sono stimate in 100-200 miliardi di tonnellate (contro una produzione annua di greggio di ca 4 miliardi di tonnellate). L'importanza del petrolio nell'economia mondiale è testimoniata anche dal suo soprannome (oro nero) e dall'adozione della tonnellata equivalente di petrolio (tep) come unità di misura di energia per le fonti di combustibile fossile.

Il **gas naturale** è una miscela gassosa, presente spontaneamente in natura, contenente in prevalenza metano ed etano, in piccola quantità propano, butano, idrocarburi superiori, talvolta anche azoto, ossido di carbonio, idrogeno solforato, elio; composizioni particolari hanno le emanazioni vulcaniche e alcune sorgenti naturali. È presente in giacimenti simili a quelli di petrolio, cui è spesso associato.

### 1.3 L'atmosfera

L'atmosfera è l'involucro gassoso che circonda le stelle, i pianeti e alcuni satelliti. L'atmosfera della Terra è costituita da aria, progressivamente più rarefatta col crescere dell'altitudine, fino al "vuoto" interplanetario; non esiste quindi un limite superiore definito, ma esso viene fissato convenzionalmente a 1000 km. La pressione media esercitata dall'atmosfera al livello del mare e a 0 °C è di 101.325 Pa (pari a 1 atm, 760 mmHg e 1013 mbar). La suddivisione dell'atmosfera, basata generalmente sulla sua struttura termica, comprende: la **troposfera** (da 0 a 10-15 km), dove si svolgono i principali fenomeni meteorologici e dove la temperatura e la pressione diminuiscono all'aumentare della quota; la **stratosfera** (fino a 30-50 km), dove la percentuale di vapore acqueo si riduce a valori minimi e si forma, nella parte alta, l'ozono (**ozonosfera**); la **mesosfera** (fino a 80-90 km) dove la temperatura dapprima aumenta e poi torna a diminuire con l'altitudine e diversi fenomeni fotochimici formano ozono e ionizzano le particelle dei gas (ionosfera); la **termosfera** (fino a 500 km ca), dove la temperatura (cinetica) aumenta con la quota e scompaiono il vapore acqueo, l'anidride carbonica e l'ozono; l'**esosfera** (oltre i 500 km), lo strato più esterno e rarefatto.

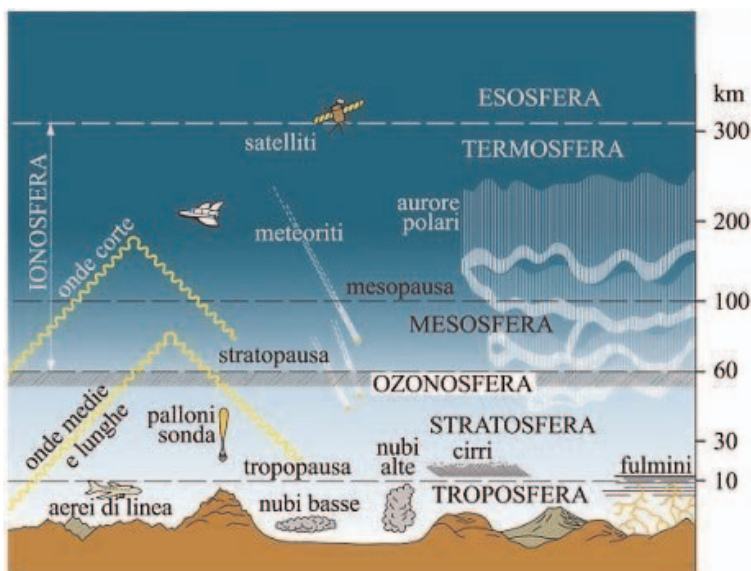


Figura 3 L'atmosfera terrestre.

L'attuale atmosfera della Terra è diversa da quella degli altri pianeti. Nell'**atmosfera primitiva** l'abbondanza degli elementi doveva essere conforme a quella della composizione media della materia cosmica, ma in base alla composizione attuale dell'atmosfera terrestre si deve supporre che la maggior parte dei gas sia dissipata nello spazio. Probabilmente l'idrogeno, l'elio e gli elementi leggeri si allontanarono nello spazio a causa del flusso dell'energia radiante del Sole e perché la forza di attrazione

terrestre non era sufficiente a trattenerli. Nei pianeti più grandi essi possono permanere sia per la maggiore potenza del campo gravitazionale sia per la maggiore distanza dal Sole.

Poiché l'azoto, l'ossigeno, l'idrogeno e il carbonio si trovano più o meno abbondantemente nell'atmosfera attuale, si deve ritenere che essi siano in parte rimasti sulla Terra perché si sono combinati per dare origine a composti così pesanti da non superare la velocità di fuga. Così l'azoto è rimasto combinato sotto forma di cloruro di ammonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) e di nitruri; l'ossigeno si è combinato con il silicio nei silicati e con l'idrogeno nell'acqua; il carbonio si è legato con il ferro originando carburi ( $\text{FeC}$ ).

A questo punto bisogna tenere presente che mentre la parte esterna della Terra si era solidificata, nell'interno si aveva un accumulo di calore in seguito allo sviluppo delle reazioni di decadimento degli elementi radioattivi. Iniziava così un processo di **degassazione dei magmi profondi** e l'emissione di essi all'esterno mediante le **eruzioni vulcaniche**.

Anidride carbonica, idrogeno solforato, ossido di carbonio, fluoruri, vapor d'acqua e molti altri sono gas emessi dai vulcani. Di conseguenza, una causa fondamentale di modificazione dell'atmosfera della Terra risiede nell'apporto di gas e vapori dall'interno del pianeta. Altro elemento decisivo di trasformazione dell'atmosfera terrestre primitiva, essenzialmente riducente, è stata la disponibilità di ossigeno. Infatti il vapor d'acqua atmosferico viene decomposto fotochimicamente con produzione di ossigeno.

L'**ossigeno** dette inizio a tutta una serie di reazioni chimiche (ossidazioni) che consentirono di originare i composti attuali. A questo proposito è interessante osservare che le più antiche rocce sedimentarie conosciute (risalenti a oltre 3 miliardi di anni fa) presentano un'ossidazione assai ridotta. Questo significa che l'atmosfera, già in uno stadio di sviluppo avanzato, non era ancora ossidante e che questa caratteristica è stata acquisita in tempi più recenti.

Inoltre, notevoli quantitativi di carbonio sono stati immobilizzati nelle rocce con la formazione dei carbonati e delle rocce combustibili. È difficile dire quando l'atmosfera terrestre abbia raggiunto la composizione attuale. Tuttavia dall'esame dei resti organici fossili sembra che essa sia rimasta immutata negli ultimi 600 milioni di anni.

La **composizione attuale dell'atmosfera** è:

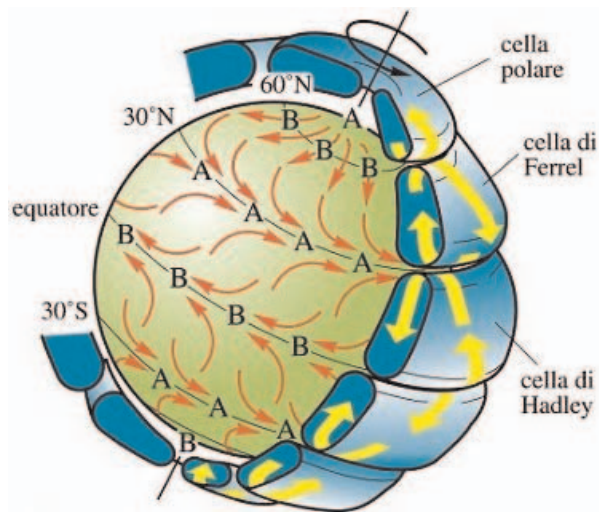
- Azoto (78%)
- Ossigeno (21%)
- Argon (0,93%)
- Anidride carbonica (0,03%)
- Idrogeno, elio, neon, kripton, xeno, ozono, ammoniaca e ossido di carbonio sono presenti in quantità ridotta.

### 1.3.1 L'effetto serra

È detto **effetto serra** il fenomeno per cui la parte del flusso di radiazione infrarossa (termica) che, riflessa dalla superficie terrestre, viene dispersa, tende a diminuire con l'aumento della concentrazione di alcuni gas nell'atmosfera, con un conseguente aumento della temperatura media. I principali gas responsabili (detti gas a effetto serra o **gas serra**) sono biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ), vapore acqueo ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ), esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ), clorofluorocarburi. Tale fenomeno, indotto naturalmente dai prodotti vulcanici e amplificato, a partire dall'inizio dell'era industriale, dall'uso intensivo di combustibili fossili, è stato aggravato nella 2<sup>a</sup> metà del sec. XX dall'intensa deforestazione, che riduce le capacità di riassorbimento della  $\text{CO}_2$ , raggiungendo livelli preoccupanti. Un tentativo di limitare l'emissione dei gas responsabili dell'effetto serra è stato effettuato dalla comunità internazionale con il protocollo di Kyoto (2002), poi rinnovato dal protocollo di Doha (2012), dall'accordo di Parigi (2015) e infine dall'accordo di Glasgow (2021).

### 1.3.2 La circolazione atmosferica

La **circolazione atmosferica** (o **circolazione generale**) e l'insieme dei moti atmosferici derivati da differenze di pressione, a loro volta dovute al differente riscaldamento delle masse d'aria sulla Terra, oggetto di studio della **meteorologia**. In una sezione meridiana dell'atmosfera vengono individuate tre celle di circolazione: la **cella di Hadley**, in cui il flusso è diretto verso l'equatore a terra e verso i tropici in quota; la **cella di Ferrel**, diretta a terra dal polo verso le latitudini precedenti e inversamente in quota; la **cella polare**, diretta a terra dal polo verso le latitudini precedenti e inversamente in quota. Tale circolazione generale, unitamente all'effetto dell'accelerazione di Coriolis, determina sulla superficie terrestre la formazione di fasce di alte e basse pressioni relative, dando origine a una circolazione di superficie caratterizzata da un flusso diretto mediamente verso est alle medie latitudini dei due emisferi e da venti costanti verso ovest e l'equatore, separati da una zona di instabilità detta zona di convergenza intertropicale.



**Figura 4** Movimento generale delle masse d'aria nella circolazione atmosferica, al suolo (frecce rosse) e in verticale (frecce gialle) dovuto alle aree di alta pressione (A) polari e intorno ai 30° N e S e alle basse pressioni (B) equatoriali e intorno ai 60° N e S e al movimento di rotazione terrestre.

Tale movimento, prevalentemente orizzontale, delle masse d'aria rispetto alla superficie terrestre è detto **vento**; la sua velocità è misurata parallelamente al suolo, mentre la componente verticale, in genere assai ridotta rispetto alla prima (tranne che in fenomeni particolari come temporali e cicloni tropicali), ha importanti effetti termodinamici sull'aria e viene catalogata come fenomeno convettivo o corrente verticale; in base a tale velocità (detta anche intensità) il vento viene suddiviso nei vari gradi di forza della **scala Beaufort**. Rispetto alla regolarità e alla persistenza si distinguono invece venti *costanti*, che spirano sempre nella medesima direzione, come gli **alisei** e i controalisei; *periodici*, che spirano alternativamente in determinati periodi, in opposte direzioni, come i **monsoni** o le brezze; *irregolari*, incostanti, senza una direzione fissa o condizionati dalla morfologia dei luoghi; *locali*, tipici di una regione limitata e dipendenti da una particolare situazione meteorologica (es. blizzard, bora, föhn, ghibli, libeccio, maestrale).

## 1.4 L'idrosfera

Più del 70% della superficie del nostro pianeta, ossia 360 milioni di km<sup>2</sup>, è ricoperto dalle acque del mare, che formano una massa avente un volume di circa 1,4 miliardi di km<sup>3</sup>. Probabilmente la Terra è l'unico pianeta del Sistema solare a possedere acqua allo stato liquido in quantità notevole.

L'importanza dell'acqua è tale che la presenza della vita sulla Terra si può far derivare da essa, mentre proprio la sua mancanza potrebbe spiegare l'assenza della vita sugli altri corpi del Sistema solare. Inoltre l'**idrosfera** è legata mediante l'evaporazione all'atmosfera, cioè all'involucro gassoso della Terra. Le piogge e le acque che scorrono sulle terre emerse e si versano in mare completano il ciclo legando perennemente i due sistemi.

Idrosfera	
Oceani e mari	1.370.000.000
Calotte glaciali, ghiacciai e oceanici	34.000.000
Acque sotterranee	8.400.000
Laghi d'acqua dolce	126.000
Laghi d'acqua salata	104.000
Umidità del suolo	66.500
Acqua atmosferica	13.000
Fiumi	1.200
<b>Totale</b>	<b>1.412.710.700</b>

La temperatura dell'acqua di mare (in media 3,9 °C) diminuisce con la profondità e, in superficie, con la latitudine (da oltre 28 °C a -3 °C). Il fondo dei bacini marini, in particolare le fasce adiacenti alle coste (piattaforma continentale), è soggetto alla sedimentazione dei detriti provenienti dall'erosione diretta delle coste e dal trasporto operato dai corsi d'acqua; tali apporti si distribuiscono solitamente con granulometria decrescente dalla sponda (ghiaie, sabbie) al largo (argille, fanghi), mescolandosi ai resti inorganici degli organismi marini. La distribuzione dei mari ha un'importanza primaria nella determinazione dei climi, influenzati dall'evaporazione e dal movimento delle correnti.

### 1.4.1 La salinità e i ghiacci marini

La **salinità dell'acqua di mare** si aggira intorno al valore del **35‰**. Si tratta naturalmente di valori medi. In realtà esistono delle variazioni sia per quanto riguarda le acque superficiali sia per le acque profonde. Negli **oceani la salinità più alta (37‰)** si riscontra in corrispondenza delle alte pressioni tropicali. All'**equatore**, pur essendo superiore alla media, la **salinità è inferiore** a quella dei tropici, perché si hanno elevate precipitazioni e intensa nebulosità, che attenua l'azione della radiazione solare. Alle **alte latitudini** la salinità si abbassa e ivi si registrano valori del **33-34‰**. Infatti l'evaporazione è meno intensa e si ha un notevole apporto stagionale di acque dolci dovuto allo scioglimento dei ghiacci polari. Nei mari adiacenti la salinità segna delle variazioni rispetto alle acque dell'oceano. Così mentre la Manica registra ancora un valore di 35‰, si scende al 32‰ sulle coste danesi del Mare del Nord; nel Kattegat la salinità ha valori del 20‰; all'estremità del Baltico, sia nel Golfo di Botnia sia nel Golfo di Finlandia, la salinità è del 3-4‰, quasi come nelle acque dolci. In questi mari la **bassa salinità dipende dalla scarsa evaporazione**, dal notevole **afflusso di acque dolci** e dai ridotti scambi con le acque oceaniche.

Il **congelamento delle acque superficiali** nei mari polari avviene a -2°C, con i sali che si dividono dall'acqua. Il fenomeno inizia vicino alle coste sia per la presenza di bassi fondali sia per la minor salinità causata dall'afflusso di acque dolci da terra. Il mare comincia a coprirsi di piccoli cristalli di ghiaccio della lunghezza di 2-4 cm a forma di scaglia. Questo **primo stadio di congelamento** viene chiamato in inglese *slush* (pastoso) e in russo *salo* (grasso). I cristalli a poco a poco si ingrandiscono imprigionando nella parte inferiore il **salmastro**, cioè acqua a bassa salinità, e si forma uno strato di

ghiaccio poroso e poco resistente. Questo strato, generalmente, è diviso in placche di un circa 1 m di diametro, rialzate ai bordi per agglutinamento di altri cristalli di ghiaccio e per scontri con altre placche. Il **secondo stadio** viene chiamato *pancake-ice* (frittella di ghiaccio). Con l'ulteriore abbassamento della temperatura il ghiaccio si inspessisce e si consolida, i vari blocchi si uniscono e formano il *pack-ice* (banchisa) che, spinto dai venti, ruota intorno all'Antartide o va alla deriva nell'Oceano Glaciale Artico (**terzo stadio**).

### 1.4.2 Moti marini

Il mare è soggetto ai movimenti delle correnti (*circolazione oceanica*), della marea e delle onde marine; in funzione dell'altezza media delle onde lo stato del mare vivo è formalizzata dalla **scala Douglas**.

È detto **corrente** il movimento di una massa d'acqua in una data direzione, che può essere superficiale o profonda, costante o periodica, più fredda o calda dell'acqua circostante. Si origina per differenze di densità generate a loro volta da differenze di temperatura o salinità (*corrente di gradiente*), per alternanza di marea in bacini contigui (*corrente di marea*) o a causa del vento (*corrente di deriva*). I grandi circuiti delle correnti oceaniche, analogamente alla circolazione atmosferica, convogliano l'eccesso di calore dalle zone tropicali verso quelle polari, creando condizioni climatiche accettabili su gran parte della Terra.

La **marea** è invece un movimento periodico di innalzamento e abbassamento del livello delle acque marine, dovuto all'azione gravitazionale combinata della Luna e del Sole. L'oscillazione principale, dovuta all'azione lunare, si manifesta con un periodo di circa 6h 12m, nelle sue fasi di flusso (o *alta marea*) e deflusso (o *bassa marea*); il livello delle acque risulta così massimo intorno ai meridiani (e antimeridiani) sulla cui verticale sta passando la Luna e minimo intorno ai meridiani posti a 90° rispetto ai primi. La posizione relativa di Terra, Sole e Luna durante l'anno crea inoltre un'amplificazione o riduzione di tale fenomeno, che raggiunge i suoi massimi nelle *maree sizigiali* (novilunio e plenilunio, quando i tre astri sono allineati) e i suoi minimi nelle *maree di quadratura* (Sole e Luna ad angolo retto rispetto alla Terra). La differenza tra i livelli dell'alta e bassa marea, detta *ampiezza* o *ampiezza di marea*, è generalmente maggiore negli oceani (con un massimo di 20 m nella baia di Fundy in Nuova Scozia, Canada orientale) che nei bacini più piccoli e chiusi (60 cm nel Mediterraneo).

## 1.5 Il clima

Ogni parte della Terra possiede condizioni meteorologiche proprie, determinati valori di **temperatura**, **umidità**, **pressione** che caratterizzano lo stato dell'atmosfera del nostro pianeta. Le caratteristiche meteorologiche dei luoghi in cui ognuno di noi vive cambiano nel corso dell'anno in maniera più o meno sensibile. Ciò è dovuto al fatto che le condizioni astronomiche mutano e le conseguenze sullo stato dell'atmosfera, ossia sui suoi valori fisici di temperatura, umidità e pressione, sono quasi sempre abbastanza immediate. È per questi motivi che il **tempo meteorologico** cambia continuamente.

Dato che il tempo meteorologico muta per ogni punto della Terra nel corso dell'anno e poiché si verificano delle differenze tra gli stessi periodi di anni diversi, l'unico modo per conoscere lo stato dell'atmosfera, ossia le condizioni meteorologiche di una certa località, è riferirsi a condizioni statisticamente medie.

L'insieme delle condizioni meteorologiche medie dell'atmosfera di una data regione si definisce **clima**. Il clima è quindi lo **stato medio della temperatura**, **umidità** e **pressione**, diverso dal tempo, che è la situazione meteorologica in un determinato momento.

Ogni luogo della Terra presenta proprie caratteristiche meteorologiche; è quindi intuitivo che due luoghi posti in posizioni astronomiche e topografiche non troppo diverse debbano avere condizioni atmosferiche non dissimili.

Non vi è motivo di fare un'interminabile elencazione di **microclimi**, ma tenendo presente soltanto le differenze sostanziali fra un luogo e un altro è possibile conoscere bene i lineamenti climatici delle varie regioni del globo con pochi tratti essenziali.

Tra tutti i diversi tentativi di **classificazione dei climi** della Terra, i migliori risultati sono stati raggiunti da W. Köppen; lo schema cui ci riferiamo è l'ultimo (1940). Gli elementi meteorologici su cui si basa sono due, la temperatura e le precipitazioni, sia perché sono effettivamente molto significativi sia perché sono quelli meglio conosciuti per il maggior numero di dati a disposizione. Lo **schema di Köppen**

(Tabella 1) mostra una **partizione zonale** dei climi, che si distribuiscono in latitudine secondo fasce, sviluppate lungo i paralleli. È questa zonatura che ha fatto sorgere spontaneo il collegamento con le **associazioni vegetali** della Terra (insieme caratteristico di piante che, pur appartenendo a classi diverse, ha le stesse esigenze trofico-climatiche).

**Tabella 1** I climi della terra secondo W. Köppen.

Gruppi e tipi climatici	Associazioni vegetali	Caratteristiche principali
<b>Climi tropicali umidi</b> – equatoriale (Af) – subequatoriale (Aw)	<b>Megaterme</b> – foreste pluviali – savana	Questo gruppo ha come limite l'isoterma di 15-18 °C del mese più freddo. La fascia corrispondente è caratterizzata dalle megaterme, che sono piante che abbisognano costantemente di alte temperature e abbondanti precipitazioni.
<b>Climi aridi</b> – arido caldo (BS, BW) – arido con inverno freddo (BS, BW)	<b>Xerofile</b> – steppa e deserto	Questo gruppo è caratterizzato dalla carenza di precipitazioni, non superiori a 500 mm annui, ma soprattutto dal deficit del bilancio fra precipitazioni ed evapotraspirazione. Le xerofile sono piante che esigono un ambiente secco per gran parte dell'anno e caldo per almeno una stagione (una stagione si considera calda quando la media stagionale eguaglia o supera 20 °C).
<b>Climi temperati calsi</b> – intertrop. montano (CW) – subtropicale (Cs) – fresco umido (Cf)	<b>Mesoterme</b> – vegetaz. altitudinale – laurifoglie-macchia – latifoglie decidue	Questo gruppo presenta variazioni da un tipo all'altro ed è caratterizzato da temperature medie moderate comprese fra l'isoterma di 15-18 °C del mese più caldo e l'isoterma di -3 °C del mese più freddo. Le piante sono mesoterme, cioè adattate a un alternarsi di stagioni, che pur differendo fra loro non hanno eccessi climatici; nei climi mediterranei appaiono le xerofite, che differiscono dalle xerofile in quanto queste ultime per vivere esigono che il clima abbia caratteristiche di siccità, mentre le prime sopportano la siccità per adattamento.
<b>Climi temperati freddi</b> – freddo umido (Df) – freddo con inverno asciutto (Dw)	<b>Microterme</b> – latifoglie con specie dominante – steppa-prateria – agnifoglie	Questo gruppo è caratterizzato, come limite equatoriale, dall'isoterma del mese più freddo che non supera -3 °C, mentre il limite polare è dato dall'isoterma del mese più caldo di 10 °C (limite del bosco). Le microterme sono vegetali specializzati per sopportare periodi più o meno prolungati di freddo, ma non al di sotto dei limiti indicati; abbisognano inoltre di quantità moderate di pioggia.
<b>Climi nivali</b> – seminivale (ET) – nivale (EF)	<b>Echistoterme</b> – tundra – neve perenne	Questo gruppo è caratterizzato da temperature al di sotto di 0 °C per quasi tutto l'anno, per cui il suolo è gelato. Possono comparire alcuni mesi con temperature superiori a 0 °C, ma inferiori a 10 °C. In questo modo possono svilupparsi solo vegetali inferiori.



### 1.5.1 Il cambiamento climatico

Con il termine **cambiamento climatico** si indica la variazione del clima della Terra relativi alle grandezze in gioco (temperatura, pressione e composizione chimica dell'atmosfera, precipitazioni, nuvolosità, temperatura degli oceani, distribuzione e sviluppo di piante e animali). La Convenzione delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici utilizza il termine "cambiamento climatico" solo per riferirsi ai mutamenti prodotti dall'uomo e "variabilità climatica" per quello generato da cause naturali.

Con l'espressione **riscaldamento globale** si indica invece l'aumento di temperatura media sviluppatosi a partire dall'inizio del XX secolo e tuttora in corso, essenzialmente dovuto a un'aumento dell'**effetto serra**. La comunità scientifica attribuisce tale mutamento a fattori imputabili all'attività umana.

In base al quinto rapporto del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (2013), i dati combinati della temperatura media globale della superficie della Terra e dell'oceano indicano un riscaldamento medio di 1,1°C dal 1880. L'allarme è particolarmente grave per alcuni paesi, tra cui l'Italia, che si sta scaldando più velocemente della media globale: il record italiano raggiunto nel 2018 è stato di +1,5 °C rispetto al trentennio 1971-2000.

Le **cause** antropiche dell'aumento dell'effetto serra sono in particolare:

- l'incremento della concentrazione di gas serra nell'atmosfera;
- i cambiamenti sulla superficie terrestre, in particolare la deforestazione;
- l'allevamento intensivo.

Le **conseguenze** ambientali del riscaldamento, al di là di effetti economici, sanitari e sociali, sono:

- la desertificazione;
- l'innalzamento del limite delle nevi perenni;
- la recessione o il ritiro dei ghiacciai;
- l'innalzamento, il riscaldamento e l'acidificazione degli oceani;
- l'aumento di fenomeni atmosferici estremi.

### La reazione della comunità internazionale

Il problema del riscaldamento globale ha iniziato a essere discusso a livello internazionale nel 1979, con la prima Conferenza mondiale sul clima, organizzata da UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente), OMM, FAO, OMS e UNESCO. Nel 1988 è stato istituito il **Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC)**, con lo scopo di valutare e raccogliere informazioni sul cambiamento climatico e di promuovere una serie di conferenze internazionali operative.

– Il **protocollo di Kyoto** (1977), primo passo per fissare gli obiettivi di riduzione delle emissioni dei gas serra per i paesi sviluppati e per quelli a economia di transizione (nessun tipo di limitazione era previsto per i paesi in via di sviluppo); il protocollo prevedeva, entro il 2008-12, una riduzione complessiva delle emissioni del 5,2% rispetto al 1990, con quote assegnate a ogni gruppo di paesi, tramite interventi di riduzione delle emissioni in alcuni settori (produzione di energia, processi industriali, agricoltura, gestione dei rifiuti), e di aumento della biomassa vegetale (riforestazione); gli accordi sono entrati in vigore nel 2005 dopo la ratifica da parte della Russia (mentre gli USA, principale produttore di gas a effetto serra, non vi hanno aderito).

– Il **protocollo di Doha** (2012) ha esteso i termini di scadenza del protocollo di Kyoto al 2020 e ha concordato un calendario per un accordo universale sui cambiamenti climatici che coinvolga tutti i paesi a partire dal 2020, da adottare entro il 2015.

– Gli **accordi di Parigi** (2015) hanno stabilito l'obiettivo a lungo termine di mantenere l'aumento medio della temperatura ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, puntando a un aumento di 1,5 °C; l'accordo è entrato in vigore nel 2016 a seguito della sua ratifica da parte di 74 paesi.

– La **conferenza di Glasgow** (2021) ha stabilito l'impegno a dimezzare le emissioni nel prossimo decennio e azzerare le emissioni nette di carbonio entro la metà del secolo, prioritariamente con i seguenti interventi:

- accelerare la transizione dal carbone all'energia pulita;
- proteggere e ripristinare la natura a beneficio delle persone e del clima;
- accelerare la transizione verso i veicoli a zero emissioni.

Poiché il primo ciclo quinquennale previsto dagli accordi di Parigi si è concluso nel 2020, sarà necessario che i paesi aggiornino i loro obiettivi per il 2030.



## 1.6 L'ambiente e l'ecosistema

### 1.6.1 L'ambiente

Come cacciatore e come raccoglitore l'uomo è stato partecipe dell'ecosistema planetario come componente non determinante e ne ha subito la natura dinamica. Divenuto agricoltore sedentario ed allevatore si è trasformato in specie dominante del biotopo e della biocenosi.

L'**uomo agricoltore** ha così **trasformato il paesaggio vegetale** incrementando quindi le piante che gli sono necessarie e trapiantando le specie vegetali utili da un luogo all'altro della Terra. Il grano, dalle zone originarie della Mesopotamia e della Valle dell'Indo, si è così diffuso in tutto il Bacino del Mediterraneo, in Europa e poi nel Nuovo Mondo; il castagno, più utile del faggio, in quanto oltre al legname fornisce un frutto, lo sostituì nei boschi a latifoglie e dall'Asia Minore si diffuse nelle zone montuose temperate europee; la canapa, originaria dell'Iran e dell'India, è arrivata in Europa a opera degli Sciti, migranti dalla pianura Sarmatica verso le aree mediterranee e del Nord-Europa. La canna da zucchero è stata trapiantata dai Portoghesi dall'India in Brasile. L'allevamento, invece, favorì lo sviluppo di alcune specie vegetali a scapito di altre.

L'**uomo allevatore** diffuse le specie utili distruggendo quelle che giudicava nocive, specialmente carnivore, causando così gravi squilibri nella biocenosi. La specie umana, in natura, ha saputo conquistare una posizione di predominio su tutte le altre specie viventi e, pur rimanendo soggetta alle leggi di natura, si è diffusa in modo mai avvenuto nella storia ed ha indotto modifiche ambientali profonde con la sua cultura e la sua tecnologia. I grandi cambiamenti, di conseguenza, hanno modificato e continuano a modificare l'ambiente e le condizioni climatiche.

Tra i principali fattori troviamo l'uso dell'energia di origine minerale, l'accrescersi della popolazione, l'aumento del tenore di vita, la produzione di rifiuti, spesso non degradabili. Tutto ciò e tantissimi altri fattori responsabili hanno accelerato il processo di trasformazione e ne è risultato un **nuovo ecosistema** il cui equilibrio con le leggi ambientali naturali sta diventando precario.

La combustione del carbone e dei derivati del petrolio è responsabile per il 60-80% dell'**inquinamento atmosferico**. Le acque calde immesse nei fiumi e nei laghi danneggiano la fauna e la flora acquatica. I pesticidi, pur aumentando le rese agricole, sono spesso facilmente assimilabili dagli organismi animali; il DDT è stato trovato anche nel grasso dei pinguini e in altri animali e ciò dimostra che l'inquinamento non ha limiti territoriali.

L'industria immette nell'atmosfera fumi contenenti sostanze tossiche e nell'acqua prodotti chimici letali come i composti del mercurio e del cromo. L'intensa urbanizzazione fa sì che centri industriali e amministrativi, già cospicui, inglobino i minori centri vicini eliminando le zone verdi intermedie, con squilibri regionali e pesanti conseguenze sulla salute pubblica e la qualità della vita (vedi metropoli come Il Cairo o Città del Messico).

L'inquinamento dovuto ai fattori sopra descritti ha sollevato diverse problematiche, quali:

- effetto serra e surriscaldamento ambientale
- buco dell'ozono
- desertificazione
- scioglimento dei ghiacciai
- piogge acide
- estinzione di specie viventi

L'uomo si sente così condizionato nel suo sviluppo fisico e mentale da tutte quelle forze, biologiche, fisiche e sociali, che lo circondano e reagisce all'ambiente in due modi:

1. creando un ambiente più o meno artificiale che migliora la sua qualità di vita;
2. adattandosi alle forze ambientali naturali e a quelle che egli stesso ha creato.

Un modello, elaborato da specialisti del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), prende in esame cinque fattori fondamentali che stanno determinando la rapidità con cui il tempo sta modificando l'ambiente e cerca di individuare tutte le più varie connessioni che fra essi intercorrono.

Questi fattori sono:

- popolazione
- capitale
- alimenti
- risorse non rinnovabili
- inquinamento.

## 1.6.2 L'ecosistema

Non è possibile parlare di **ecosistema** senza introdurre e spiegare che cosa sia l'**ecologia**.

L'**ecologia** studia le associazioni degli esseri viventi in rapporto alle condizioni fisico-climatiche e alla concorrenza vitale con altre specie. Questa relazione si esplica in un equilibrio fra le diverse componenti per l'utilizzazione dello spazio, consente la vita e rende possibile la moltiplicazione delle diverse specie. L'ecologia è quella parte della biologia che studia i rapporti degli animali e delle piante con il loro ambiente, quindi avremo:

### RELAZIONI RECIPROCHE = ORGANISMI + AMBIENTE

Dove mancano le condizioni sufficienti alla vita si hanno spazi **abiotici**, come per esempio le regioni di crudo deserto, le vette delle montagne più alte, le acque a fortissima concentrazione salina, come il Mar Morto, o asfittiche, come i bassi fondali del Mar Nero. L'insieme degli organismi viventi che costituiscono un equilibrio biologico prende il nome di **biocenosi**. Lo spazio che essi occupano si chiama **biotopo** ed è uno spazio omogeneo di dimensioni varie: può essere un lago, una palude, il delta di un fiume, una foresta, un singolo albero. L'ambiente è l'insieme delle specie che in esso vivono prendono il nome di **ecosistema**.

Ogni ecosistema è costituito da una comunità di organismi ed elementi non viventi tra i quali si vengono a creare degli equilibri biologici.

L'esempio classico di un equilibrio biologico in un determinato ambiente si realizza fra una specie vegetale, una specie animale erbivora e una specie animale carnivora in un biotopo limitato, quale per esempio un'isola.

La specie animale erbivora è limitata dalla quantità della specie vegetale disponibile e la specie animale carnivora dalla specie erbivora. Se i carnivori superano numericamente certi limiti, gli erbivori corrono il rischio di essere distrutti, esaurendo le disponibilità di nutrimento della specie carnivora, che a sua volta si estingue perché se quest'ultima aumenta diminuiscono gli erbivori e aumenta la specie vegetale. Mancando il nutrimento per la specie carnivora questa diminuisce, creando per la specie erbivora la possibilità di aumentare con la seguente rarefazione della specie vegetale. In tal modo tra le tre specie conviventi viene a stabilirsi un equilibrio nell'ambito del biotopo. Fenomeni analoghi si hanno tra i mammiferi.

Però l'equilibrio biologico di un dato ecosistema può venire rotto anche per l'introduzione di una specie nuova, fenomeno più comune di quanto si creda, specialmente nel campo degli artropodi in genere e degli insetti, in particolare da quando le linee aeree permettono loro di superare indenni la zona equatoriale che un tempo operava da filtro. Anche le variazioni ambientali, se sono imponenti, possono portare al formarsi di un nuovo ecosistema.

L'uomo ha spesso contribuito, e in parecchi casi è stato il principale responsabile, alla scomparsa di numerose specie, basti ricordare l'*Alca impennis*, piccolo pinguino che abitava le isole dell'Atlantico Settentrionale, ricercato per il suo piumino e completamente distrutto fra il 1844 e il 1846.

I biologi, in questo campo, hanno preso posizioni molto chiare: l'aumento delle conoscenze dei meccanismi evoluti ha reso pressante la necessità non solo di operare per la sopravvivenza di quelle specie animali che sono minacciate dall'estinzione, ma di salvaguardare quelle specie cui l'uomo è interessato per via delle caratteristiche genetiche del ceppo originario, quando questo è diventato una rarità; ciò per salvare la diversità biologica della specie.

Nell'agricoltura e nell'allevamento si opera per selezionare quei soggetti che permettono il massimo rendimento in un particolare ambiente fisico-climatico. Questa selezione a partire dal patrimonio genetico del ceppo originario riduce la diversità genetica della specie. La storia dell'evoluzione della vita

sulla Terra ci ha insegnato che le specie altamente specializzate per un determinato habitat sono destinate a scomparire al variare delle condizioni ambientali. In natura sopravvivono e si evolvono le specie non eccessivamente specializzate e il cui patrimonio genetico ha la potenzialità di adeguarsi a nuove condizioni di vita; da qui la necessità quindi di conservare il ceppo originario della specie, generalmente spontaneo o selvaggio, per poter fronteggiare nuove situazioni ambientali. Infatti è da questo ceppo che è possibile selezionare quei caratteri che adatteranno la specie a variazioni di clima, di suolo e di nuove tecniche agrarie. Tutto ciò è valido anche per la *specie umana*.

Una popolazione geneticamente simile si trova indifesa di fronte a un particolare tipo di epidemia o a bruschi cambiamenti delle condizioni di vita. È la varietà genetica del gruppo che garantisce la capacità di rispondere e adattarsi a condizioni nuove. Nell'ambito del gruppo ciò che dà al singolo il suo valore genetico non è la qualità dei caratteri che egli porta con sé, ma il fatto che il suo patrimonio genetico, tolto il caso dei gemelli monovulari, è diverso da quello di ogni altro suo simile, ed è questa varietà biologica che determina il successo della specie.

## In sintesi

**Alisei** Venti regolari e costanti che spirano per tutto l'anno in una fascia compresa tra i 30° N e l'equatore (alisei di NE) e tra i 30° S e l'equatore (alisei di SE); fra le due fasce esiste una zona di instabilità, detta zona di convergenza intertropicale, al cui interno si verifica spesso assenza di vento (calme equatoriali).

**Astenosfera.** Strato esterno del mantello terrestre, sottostante la litosfera, compreso tra 60 e 300 km ca di profondità; si suppone sia sede dei moti convettivi che sarebbero all'origine dei lenti movimenti delle placche litosferiche.

**Atmosfera.** Involucro gassoso che circonda la Terra, costituita da aria progressivamente più rarefatta col crescere dell'altitudine fino a una quota massima convenzionalmente fissata a 1000 km.

**Benioff, piano di.** Piano tettonico, inclinato di 15°-75°, lungo il quale avverrebbe la subduzione di una placca litosferica rispetto a un'altra, secondo la teoria della tettonica a zolle.

**Biocenosi.** Complesso di individui delle diverse specie animali e vegetali che coabitano in un determinato ambiente (biotopo) e che interagiscono fra loro. Costituisce la parte vivente di un ecosistema.

**Clima.** L'insieme delle condizioni meteorologiche medie che si verificano in una regione per un determinato periodo di tempo; i suoi parametri (temperatura, pressione, insolazione, umidità, nuvolosità, venti e precipitazioni) sono influenzati da fattori quali la latitudine, l'altitudine, la distribuzione del rilievo, delle pianure e dei mari, le correnti marine e atmosferiche, l'albedo, la vegetazione e le attività dell'uomo.

**Crosta.** Involucro superficiale della Terra, delimitato inferiormente dalla discontinuità di Mohorovicic, che lo separa dal mantello; si distingue una crosta continentale, spessa in media 40 km (fino a 70 km sotto le maggiori catene montuose) e una crosta oceanica, dello spessore di 5-8 km.

**Dorsale oceanica.** Catena di vulcani che percorrono il centro degli oceani, caratterizzata da un'accentuata sismicità e interpretabile come un margine di accrescimento, lungo cui due placche si allontanano.

**Effetto serra.** Fenomeno naturale per cui la parte del flusso di radiazione termica che viene riflessa dalla superficie terrestre e dispersa diminuisce con l'aumentare della concentrazione di alcuni gas nell'atmosfera, con un conseguente aumento della temperatura media.

**Epicentro.** Punto della superficie terrestre che si trova sulla verticale dell'ipocentro di un terremoto. Da esso si originano le onde sismiche superficiali (onde *L* o *R*).

**Esosfera.** Parte più esterna dell'atmosfera terrestre costituente la zona di transizione con lo spazio interplanetario; si estende da un'altezza di 600-800 km fino a diverse migliaia di km dove la densità atmosferica eguaglia quella del vento solare.

**Faglia.** Frattura in una massa rocciosa accompagnata dallo scorrimento relativo delle due parti separate. È originata da forze tettoniche di distensione (faglia diretta), di compressione (faglia inversa) o di taglio (faglia trasforme).

**Fossa oceanica.** Depressione stretta e allungata del fondale oceanico, dove questo raggiunge le sue massime profondità, solitamente situata tra la pianura abissale e la scarpata continentale, associata a un arco.

**Geoide.** Modello della forma della Terra, concepito come superficie che in ogni punto è perpendicolare alla direzione del vettore forza di gravità, senza tenere conto dei rilievi e delle depressioni. È assai simile a un ellissoide di rotazione.

**Geosinclinale** Vasto bacino sedimentario di forma allungata, costituente una zona instabile della litosfera; la sua evoluzione, attraverso fenomeni di subsidenza e corrugamento, si conclude con la formazione di una catena montuosa (orogenesi).

**Gondwana.** Nome del supercontinente del paleozoico che comprendeva in un'unica massa emersa l'America meridionale, l'Africa, il Madagascar, l'India, l'Australia e l'Antartide. A N il bacino della Tetide lo separava dal Laurasia. Lo smembramento del Gondwana ebbe inizio nel giurassico, con il movimento verso O della placca africo-americana, verso S dell'Antartide, verso E della placca australo-indiana.

**Gutenberg, discontinuità.** Superficie di separazione tra il mantello e il nucleo terrestri, situata a ca 2900 km di profondità.

**Idrosfera.** L'insieme delle acque presenti o circolanti sulla superficie e nella crosta terrestri, formato da oceani, mari, laghi, fiumi, ghiacci e acque meteoriche. Corrisponde a circa il 74% della superficie del pianeta.

**Ionosfera.** Insieme degli strati ionizzati dell'atmosfera terrestre, estesi dalla parte superiore della mesosfera (80 km di altezza) al limite esterno della termosfera (500 km ca). La ionosfera è caratterizzata da una notevole rarefazione delle particelle gassose, parte delle quali vengono ionizzate dalle radiazioni solari, in particolare dai raggi ultravioletti, rendendo l'atmosfera elettricamente conduttrice.

**Ipocentro.** Punto interno della crosta terrestre da cui hanno origine le onde sismiche di un terremoto. Si trova sulla verticale passante per l'epicentro, a una profondità massima di 700 km.

**Köppen, classificazione.** Schema di classificazione dei climi, che comprende cinque classi: A) climi megatermici umidi o tropicali umidi; B) climi aridi; C) climi mesotermici o temperati caldi; D) climi microtermici o boreali; E) climi nivali o glaciali.

**Laurasia.** Supercontinente del paleozoico che comprendeva in un'unica massa emersa l'America settentrionale, la Groenlandia e l'Eurasia a N delle catene alpino-himalayane. A S il bacino della Tetide lo separava dal Gondwana. Lo smembramento del Laurasia ebbe probabilmente inizio nel triassico superiore, con il movimento verso O della placca americana.

**Litosfera.** Insieme degli strati superficiali della Terra, costituito dalla crosta e dalla parte superficiale del mantello, di spessore variabile da 75 km (sotto gli oceani) a 120 km (in corrispondenza delle catene montuose).

**Magnetosfera.** Regione di spazio in cui si manifesta il campo magnetico della Terra, in cui restano intrappolate le particelle cariche del vento solare, costituendo fasce di radiazione. Interessa l'atmosfera sopra i 100 km di altezza e comprende, nelle regioni più esterne, le fasce di Van Allen.

**Mantello.** Involucro intermedio della Terra, spesso 2900 km, compreso tra la crosta e il nucleo, da cui lo separano rispettivamente le discontinuità di Mohorovicic e di Gutenberg.

**Mercalli, scala.** Scala proposta nel 1902 per fornire una misura dell'intensità di un terremoto in una data località indipendentemente dalla distanza dell'epicentro, basata sulle conseguenze osservabili del sisma sugli edifici e sull'ambiente naturale. La scala in uso oggi (Mercalli modificata o Mercalli-Cancani-Sieberg) è divisa in 12 gradi ed è una delle più utilizzate a livello pratico.

**Mesosfera.** Strato dell'atmosfera terrestre, compreso tra la stratosfera e la termosfera, da 30-50 a 80-90 km di altezza; l'aria è praticamente priva di vapore acqueo e più ricca di ozono rispetto agli strati sottostanti; la temperatura cresce con l'altezza fino a 50-60 km, quindi diminuisce (inversione termica) fino al limite inferiore della ionosfera.

**Mohorovicic, discontinuità (o Moho).** Superficie di separazione tra la crosta e il mantello terrestri, situata dai 10-15 ai 60-70 km di profondità, rivelata da una brusca variazione della velocità delle onde sismiche.

**Monsoni** Venti periodici che interessa l'Asia sud-orientale, con periodo semiannuale, causato dalle differenti condizioni di temperatura e pressione che si verificano nella fascia intertropicale, sul continente e sull'oceano e dallo spostamento degli alisei; l'inversione stagionale di tali condizioni determina l'alternanza tra il monzone invernale, freddo e asciutto, che spirava dal continente verso il mare, e il monzone estivo, che spirava dal mare verso terra.

**Ofoliti** Associazioni di rocce magmatiche basiche (gabbri, basalti, diabasi ecc.) con le relative rocce metamorfiche (serpentine, anfiboliti, prasiniti ecc.); si formano durante le fasi precoci di un'orogenesi, con la risalita di magma basico tra i sedimenti di una geosinclinale.

**Onda sismica.** Onda meccanica attraverso cui si propaga l'energia di un terremoto; le onde profonde sono originate nell'ipocentro e comprendono le onde *P* (o primarie), longitudinali e le onde *S* (o secondarie), trasversali; quelle superficiali si originano nell'epicentro e comprendono le onde *R* (o di Rayleigh) e le onde *L* (o di Love).

**Orogenesi** Insieme dei processi di deformazione della crosta terrestre che porta al corrugamento e al sollevamento delle catene montuose, degli archi insulari, delle dorsali; comprende una fase precoce o di geosinclinale, una fase parossistica, con il sollevamento, la dislocazione e il piegamento di grandi masse rocciose, una fase tardiva, con movimenti di assestamento e attiva erosione dei nuovi rilievi fino allo stadio di peneplaino.

**Ozonosfera.** Strato dell'atmosfera terrestre dove si concentra l'ozono prodotto dall'azione fotochimica dei raggi ultravioletti sulle molecole di ossigeno; localizzata perlopiù nella stratosfera, tra i 20 e i 50 km di altezza, assorbe gran parte della radiazione ultravioletta dannosa per gli organismi viventi.

**Pangea.** Supercontinente paleozoico ipotizzato dalla teoria della deriva dei continenti. Riuniva in un'unica massa tutte le terre allora emerse, circondate dall'oceano Panthalassa; durante il mesozoico, l'apertura del bacino della Tetide portò allo smembramento della Pangea in Laurasia a N e Gondwana a S, da cui si originarono, per successive suddivisioni (apertura dell'Atlantico) e movimenti, i continenti attuali.

**Richter, scala.** Scala che valuta la quantità di energia liberata da un sisma, associando un indice (magnitudo) al rapporto tra il logaritmo decimale dell'ampiezza massima di una scossa e il logaritmo dell'ampiezza di una scossa campione. Lo zero della scala equivale a un'energia liberata pari a 105 J.

**Salinità.** Quantità di sali minerali contenuti nell'acqua di mare. Varia con la temperatura, la profondità, la solubilità dei diversi sali, gli apporti e la mescolanza di più correnti, il rapporto tra evaporazione e precipitazioni; la salinità del mare è pari in media al 35 per mille.

**Sial.** Parte superiore della crosta terrestre, presente sui continenti fino a una profondità di 15-20 km; è formata da rocce magmatiche e metamorfiche composte in prevalenza da minerali di silicio (Si) e alluminio (Al), da cui il nome. Poggia sul sima.

**Sima.** Parte inferiore della crosta terrestre, estesa fino alla discontinuità di Mohorovicic; è formata da rocce magmatiche basiche composte in prevalenza da silicati (Si) di magnesio (Ma) e ferro, da cui il nome. Negli oceani è ricoperta da un sottile strato di sedimenti, nei continenti soggiace al sial.

**Sisma.** Movimento della crosta terrestre, rapido e improvviso (terremoto), oppure lento e continuo a carattere verticale (bradisismo).

**Stratosfera.** Involucro dell'atmosfera terrestre, compreso tra la troposfera e la mesosfera, da 10-15 a 30-50 km di altezza; la parte superiore è sede dell'ozonosfera.

**Subduzione.** Movimento di una placca oceanica che si immerge sotto un'altra placca, sprofondando nel mantello lungo il piano di Benioff; lungo il margine che separa le due placche si forma una fossa oceanica.

**Termosfera.** Strato dell'atmosfera terrestre, compreso tra la mesosfera e l'esosfera, da 80-90 km a ca 500 km di altezza; gran parte della ionosfera ha sede nella termosfera.

**Tetide.** Bacino oceanico formatosi nel paleozoico con lo smembramento della Pangea; si andò allargando da E a O, tra Laurasia a N e Gondwana a S; durante il mesozoico seguì le fasi evolutive di una geosinclinale, culminate nel cenozoico con il suo corrugamento nel sistema alpino-himalayano. Residui della Tetide sono considerati il Mediterraneo e il mar Caspio.

**Tettonica delle placche (o delle zolle).** Teoria che sintetizza su scala globale l'insieme dei fenomeni geologici conosciuti, sull'assunto che la litosfera sia discontinua, costituita cioè

da un mosaico di zolle o placche che si concentrano in cellule di convezione del tutto simili a quelle che si vengono a creare in un fluido riscaldato dal basso.

**Troposfera.** Regione inferiore dell'atmosfera terrestre, estesa dalla superficie del pianeta a un'altezza di 10-15 km, sede di tutti i fenomeni meteorologici.

**Van Allen, fasce.** Regione della magnetosfera terrestre, costituita da due fasce di forma toroidale, disposte simmetricamente con l'asse geomagnetico in comune, caratterizzate dalla presenza di un'alta concentrazione di particelle cariche a elevata energia, che rimangono "intrappolate" dal campo magnetico, responsabili delle tempeste magnetiche e di alcuni fenomeni ottici come le aurore polari.

**Vulcanismo.** Insieme dei processi dovuti alla risalita di un magma alla superficie terrestre, che portano alla formazione di un vulcano e ad altre manifestazioni minori o diffuse, annoverate nel vulcanismo secondario: geyser, fumarola, soffione boracifero, vulcano di fango, mofeta, putizza, solfatara, sorgente termale, nube ardente.