



ECOLOGIA GENERALE

QUADERNO *GEV* N. 1



GEV 1

SOMMARIO

- 1 ECOLOGIA GENERALE
- 3 I VIVENTI E L'AMBIENTE
- 3 Flussi di energia e cicli di materia sul pianeta Terra
- 4 Il ciclo endogeno
- 5 Il ciclo delle rocce sedimentarie
- 5 Il ciclo dell'acqua
- 7 Il ciclo biogeochimico
- 9 Il ciclo della materia nei viventi
- 10 La fotosintesi e l'evoluzione dei viventi
- 10 *Fotosintesi - Respirazione*
- 13 *Il problema energetico*
- 14 GLOSSARIO
- 17 I COMPONENTI DEGLI ECOSISTEMI E LE LORO INTERAZIONI
- 17 Fattori abiotici e biotici
- 18 Fattori limitanti
- 19 Capacità di adattamento
- 21 Comportamenti e interazioni comportamentali
- 23 I fattori inquinanti
- 24 DINAMICA DEGLI ECOSISTEMI
- 25 Tempo geologico
- 25 Tempo biologico
- 26 Tempo storico
- 27 BIBLIOGRAFIA

ECOLOGIA GENERALE

Nata come una diramazione della Biologia, l'Ecologia, rispetto alle altre discipline scientifiche, si è caratterizzata fin dall'origine per un diverso approccio alla conoscenza, centrato sul concetto base che **nella realtà ogni cosa è legata alle altre**.

Da disciplina prevalentemente descrittiva, di taglio naturalistico, si è trasformata in pochi decenni in una materia complessa, interdisciplinare, che si propone una visione unitaria dell'ambiente e dei suoi problemi. Una traccia di questa trasformazione si può cogliere riprendendo alcune delle più note definizioni di questa disciplina.

Nel 1868 il tedesco E. Haeckel propone per la prima volta alla comunità scientifica il termine "Ecologia" – da οίκος = casa e da λογος = scienza, discorso – ponendo l'accento sugli aspetti biologici dell'ambiente, cioè sulle relazioni tra gli organismi e il loro habitat naturale, nonché sui reciproci rapporti fra i vari organismi viventi nello stesso ambiente.

Questa definizione, tuttora valida, viene ripresa da E. P. Odum nel 1983. Egli attribuisce all'Ecologia il compito di indagare sui vari ambienti di vita, ponendo però l'accento sugli aspetti funzionali che sono comuni a tutte le forme viventi, uomo compreso. Riferendosi alle modalità di sfruttamento delle risorse ambientali Odum accomuna ancora, dal punto di vista concettuale, Ecologia ed Economia. Entrambi i termini infatti si riferiscono alla stessa radice οίκος = casa poiché entrambe le discipline si occupano della "casa" dei viventi, cioè degli spazi terrestri e delle loro risorse, interpretate però – occorre pure sottolinearlo – secondo punti di vista e interessi diversi, talora contrapposti.

A partire da A. G. Tansley (1935), molti studiosi di Ecologia propongono di identificare il loro campo di indagine in un'**unità funzionale** più precisa: l'**ecosistema**. Esso comprende l'intera comunità biologica (☞ **biocenosi**) e il suo ambiente fisico (☞ **biotopo**); entrambe queste componenti interagiscono tra di loro e con l'ambiente esterno e sono coinvolte in quei **processi ecologici fondamentali** (flusso di energia, ciclo di materia) che consentono all'ecosistema la sopravvivenza nel tempo. Nello studio ecologico dei sistemi complessi l'attenzione si sposta soprattutto sui livelli superiori di organizzazione delle forme viventi (popolazioni, comunità) e sugli aspetti dinamici, cioè sulle varie trasformazioni scandite dai diversi ritmi della freccia del tempo (tempo biologico, storico, geologico...).

Nell'analisi dell'ecosistema una componente non certo trascurabile è data dalla presenza dell'uomo nel suo duplice ruolo biologico e socio-culturale. Con lo sviluppo della riflessione e del dibattito sulle problematiche del rapporto Uomo-Natura, nell'ambito dell'educazione ambientale, per sottolineare la particolare rilevanza e problematicità del cosiddetto "fattore antropico", si preferisce utilizzare il termine **eco-socio-sistema**.

In questa ottica la ricerca si è molto sviluppata, specie negli ultimi anni, producendo risultati non solo in termini teorici ma anche progettuali e applicativi, mirati a migliorare la gestione del territorio, per prevenire o correggere le alterazioni ambientali indotte dall'azione dell'uomo (**Ecologia applicata**).

La storia e lo sviluppo del pensiero ecologico hanno influenzato profondamente oltre che l'approccio concettuale, gli strumenti e i metodi di studio di questa disciplina, caratterizzata da una naturale tendenza in-

NOTA BENE – Per facilitare il collegamento fra testo e immagini, è stato inserito il simbolo (☞) come richiamo. Gli eventuali rimandi ad altre voci, paragrafi, capitoli, quaderni, testi di leggi ecc. sono evidenziati dal simbolo (⇒). Le voci di glossario sono indicate con il simbolo (☞).

novativa. Per conoscere la "complessità" di un ecosistema occorre infatti superare i limiti di una visione settoriale, specialistica, privilegiando i contenuti e i metodi propri dell'approccio sistemico.

Nell'analisi sistemica il ricercatore fa riferimento a modelli interpretativi che si soffermano non sulle singole componenti ma sulle loro interconnessioni – a vari livelli organizzativi –, sulla dinamica dei flussi di energia e dei cicli di materia, sugli effetti della causalità non lineare, delle interazioni con l'ambiente esterno, dei cambiamenti nel tempo, irreversibili e solo in parte prevedibili.

In questo approccio si utilizzano i fondamenti teorici provenienti da aree disciplinari diverse, quali Statistica, Matematica, Informatica, Biologia, Fisica, Chimica, Meteorologia ecc., in uno studio integrato di tipo interdisciplinare (con contributi, ad esempio, dalla Storia, dalla Geografia, dall'Economia, dalle Scienze naturali e sociali ecc.).

Tutto ciò comporta per il ricercatore l'esigenza di maturare una mentalità ecologica, capace di pensare per relazioni, in termini globali, e di acquisire il "senso del limite" anche in rapporto a valutazioni di carattere etico. È un cambiamento di prospettiva che si riflette non solo nel suo modo di fare ricerca e di rapportarsi alle problematiche del sapere scientifico e della cultura in senso globale, ma anche con il suo modo di interagire con la realtà, di fare previsioni, di prendere decisioni in condizioni di incertezza, di affrontare questioni che interessano la collettività.

Possiamo dunque comprendere le ragioni per cui l'Ecologia, rimasta a lungo ai margini della scienza ufficiale, abbia dato un contributo alla messa in crisi di quei paradigmi su cui si basa il sapere tradizionale (certezza, prevedibilità, oggettività, neutralità ecc.) e abbia molto ampliato la sua influenza anche sulla cultura in senso generale.

Il pensiero ecologico, in questi ultimi anni, ha contribuito ad approfondire la riflessione storico-sociale sulla crisi biofisica del pianeta, sulle problematiche del rapporto Natura-Cultura, sulla necessità di un cambiamento negli stili di vita individuali e collettivi. È così aumentata nella società odierna la consapevolezza del fatto che ai bisogni elementari dell'uomo per la sua sopravvivenza, con la crescita demografica e lo sviluppo tecnologico, si sono aggiunte nuove e più complesse variabili socio-economiche e politico-culturali. Sempre più ampiamente si discute ora di impatto ambientale, di risorse energetiche dissipate, di risorse non rinnovabili, di occupazione di spazi naturali, di inquinamento, di perturbazione dei cicli naturali e altro ancora.

I VIVENTI E L'AMBIENTE

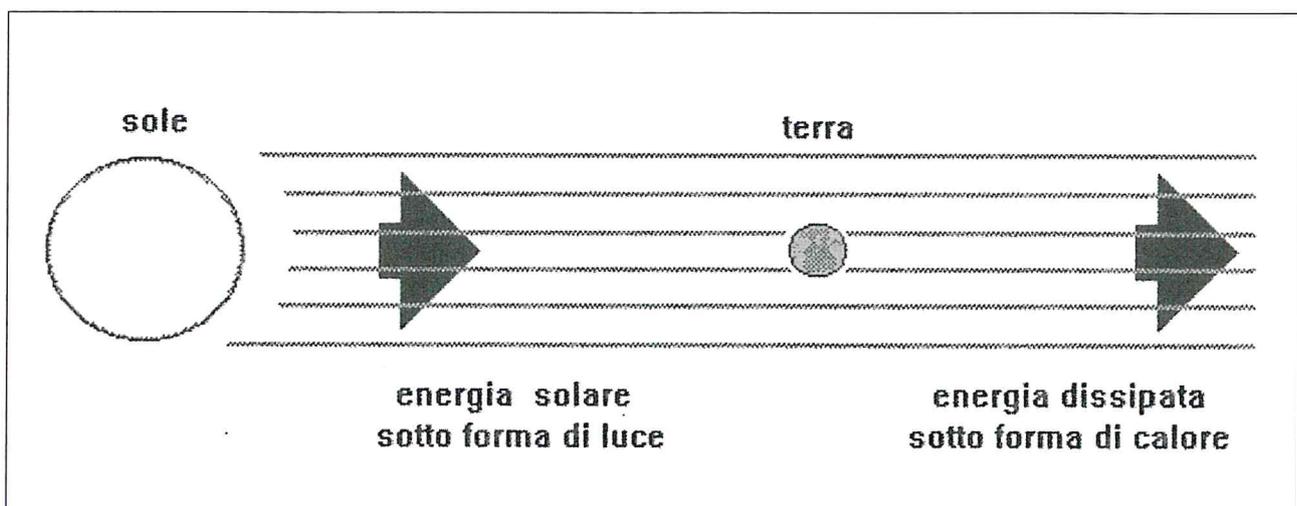
□ FLUSSI DI ENERGIA E CICLI DI MATERIA SUL PIANETA TERRA

La Terra nel suo insieme può essere vista come un unico **ecosistema**, una grande “casa” dei viventi. Nel funzionamento dell’ecosistema sono coinvolti elementi inorganici (o abiotici) e organici (o biotici); essi interagiscono in una rete complessa e continua di scambi e trasformazioni che ha il suo motore principale nel Sole. Il **Sole** è infatti la sorgente primaria dell’energia che sta alla base dei processi vitali, dei cicli biologici e, in parte, di quelli geologici (☞ **fig. 1**). È una centrale energetica ricchissima e, dal nostro punto di vista di abitanti del pianeta Terra, praticamente inesauribile (almeno ancora per alcuni miliardi di anni!). Soltanto una piccolissima frazione delle radiazioni solari che cadono sulla Terra (circa lo 0,02%) viene effettivamente utilizzata dagli esseri viventi attraverso il processo della fotosintesi; questa quantità è comunque sufficiente per far girare il “motore” della vita. L’energia solare che attraversa l’ecosistema terrestre, dopo aver partecipato in forme diverse ai vari processi che avvengono sulla Terra, decade in calore, una forma di energia irrecuperabile che viene dissipata, più o meno rapidamente, nello spazio.

Mentre il nostro pianeta può contare su una fonte di energia pressoché inesauribile (il Sole), ha a disposizione invece una quantità **limitata** di materia, sia essa inorganica od organica; infatti l’apporto di materiale extraplanetario si può considerare un fenomeno marginale e sporadico, praticamente ininfluenza dal punto di vista quantitativo. Pertanto nell’ecosistema Terra la materia si produce e si trasforma all’interno di un ciclo chiuso, in cui avvengono processi chimico-fisici che fanno variare la composizione ma non la quantità complessiva dei materiali coinvolti. La materia sulla Terra deve essere quindi continuamente **riciclata**, attraverso processi che coinvolgono sia la materia vivente sia quella inorganica, e che consentono la sopravvivenza dell’intero ecosistema terrestre con tutti i suoi molteplici abitanti.

Analizzando la Terra nel suo insieme osserviamo che i grandi cicli della natura hanno tutti delle fasi o degli ambienti in comune; in altre parole confluiscono tutti in un unico grande ciclo le cui componenti non sono separabili; tuttavia, per semplificarne la descrizione e la comprensione, possiamo cercare di scomporli per poterli esaminare in modo indipendente, distinguendo il ciclo più profondo (o **ciclo endogeno**), che vede coinvolti i materiali presenti nella crosta e nel mantello terrestre, il **ciclo delle rocce sedimentarie**, il **ciclo dell’acqua** e infine i **cicli biologici**.

Fig. 1 – L’energia solare attraversa l’ecosistema terrestre e, dopo aver partecipato ai vari processi che avvengono sulla Terra, viene dissipata nello spazio sotto forma di calore.



□ IL CICLO ENDOGENO

I fenomeni profondi sono provocati dal calore interno della Terra; non è stato ancora del tutto chiarito quante e quali siano le cause che generano questo calore, ma certamente una componente importante, se non la principale, è dovuta al decadimento degli elementi radioattivi presenti in essa.

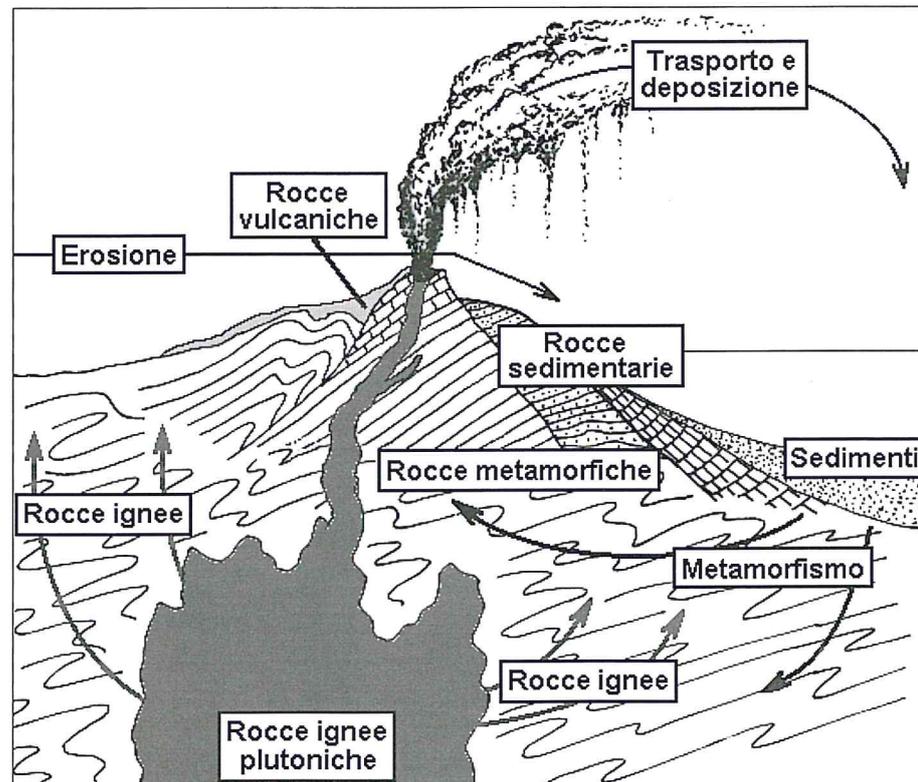
All'interno del **mantello**, l'involucro terrestre spesso circa 3000 chilometri compreso fra la sottile **crosta** (poche decine di chilometri) e il **nucleo**, per effetto di questo calore si producono dei moti convettivi, cioè dei flussi che determinano a loro volta il movimento delle grandi placche nelle quali è suddivisa la **litosfera** (insieme di crosta e della porzione più esterna del mantello, spesso da una settantina a circa 200 chilometri).

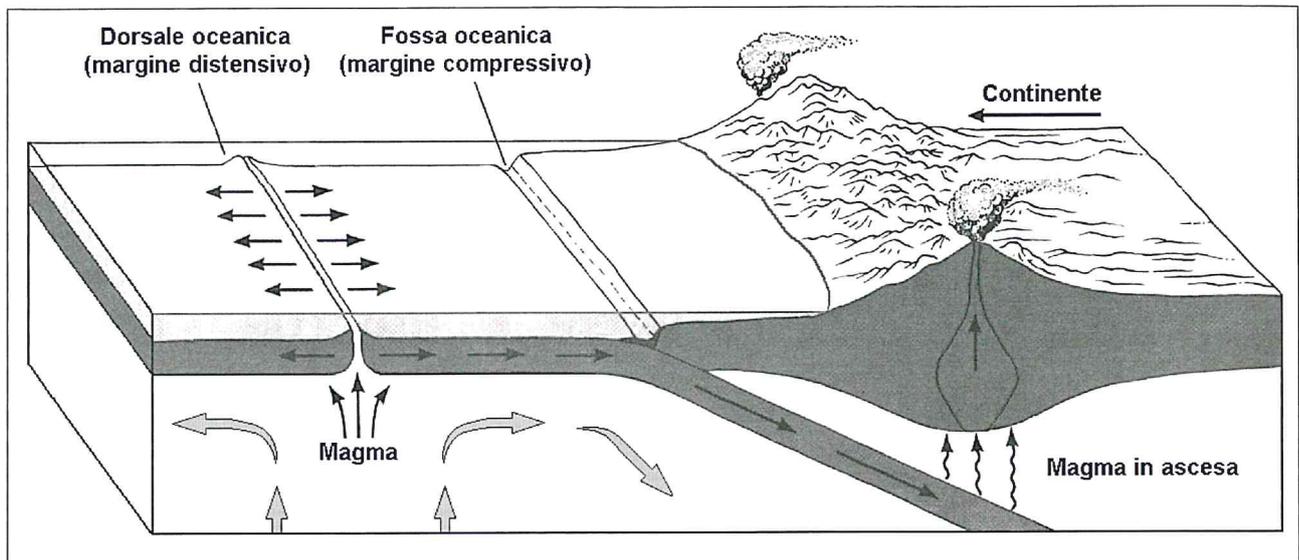
Nella **figura 2** (158) è possibile cogliere gli effetti di questo ciclo grandioso: magma costituito da rocce fuse sale alla superficie producendo incessantemente nuova crosta, in particolare lungo le dorsali oceaniche; queste dorsali si trovano generalmente a migliaia di metri di profondità, sul fondo degli oceani, ma possono anche arrivare ad affiorare sopra la superficie del mare, come succede in Islanda. In altri settori terrestri, la crosta vecchia di milioni di anni è invece destinata a essere lentamente distrutta.

Come si vede nella **figura 3** (159), la crosta oceanica formatasi in corrispondenza di una dorsale, va a infilarci al di sotto del margine di un continente fino a raggiungere nuovamente le condizioni per la fusione; una piccola parte di questi materiali, che risale all'interno della crosta continentale, viene eruttata sotto forma di lava da vulcani che aprono le loro bocche sui bordi del continente coinvolto nei movimenti.

Il nuovo materiale, giungendo in superficie o sul fondo degli oceani, viene a trovarsi in ambienti in cui è presente la vita e pertanto interferisce con i vari cicli biologici; entra in contatto con l'acqua e si trova coinvolto nel ciclo delle rocce sedimentarie, a sua volta strettamente legato al ciclo dell'acqua.

Fig. 2 – Attraverso processi più o meno lunghi e complessi anche le rocce vengono incessantemente riciclate.





□ IL CICLO DELLE ROCCE SEDIMENTARIE

Se esaminiamo un settore terrestre, come quello di **figura 2** (☞), vediamo che tutto ciò che affiora, comprese le rocce vulcaniche appena formate, subisce da parte dell'atmosfera e dell'acqua processi di alterazione chimica e di degradazione meccanica. I materiali mobilizzati da questi fenomeni sono trasportati rispettivamente in soluzione e in sospensione dalle acque continentali; possono depositarsi sul continente stesso (ad esempio sul fondo di laghi) o finire in mare, andando in entrambi i casi a formare **rocce sedimentarie**.

Fra i detriti che vanno a formare le rocce sedimentarie vi sono anche organismi morti o parti di essi (come conchiglie o scheletri) che, se conservati in modo diretto o indiretto (modelli, impronte), formeranno i **fossili**. Nel ciclo delle rocce sedimentarie non si producono esclusivamente rocce di origine detritica ma anche rocce che si formano per l'attività degli organismi costruttori (come i coralli) o per evaporazione di acque a forte contenuto salino (come nel caso del gesso).

Nel ciclo delle rocce sedimentarie abbiamo visto il ruolo dell'acqua come agente di alterazione e trasporto. Esaminiamo adesso un po' più attentamente l'intero **ciclo dell'acqua**, essenziale per la vita sul nostro pianeta e nel quale diventa nuovamente protagonista il Sole.

Vale la pena di osservare che con lo sviluppo dell'agricoltura e la deforestazione spinta dei nostri tempi è aumentato notevolmente (ossia due o tre volte) il trasporto di detriti solidi dal continente agli oceani rispetto alla situazione pre-umana. Ciò si risolve in una progressiva perdita di suoli agrari, che sono fondamentalmente il prodotto dell'alterazione delle rocce e in un aumento di contenuto solido (torbidità e fangosità) dei nostri fiumi attuali.

□ IL CICLO DELL'ACQUA

Il ciclo dell'acqua, in termini generali, è molto semplice: il calore solare produce evaporazione alla superficie delle masse d'acqua, soprattutto degli oceani, ma anche delle acque continentali (laghi e umidità dei suoli); il vapor acqueo, sotto forma di nubi, viene trasportato dai venti fino a quando non intervengono fenomeni di condensazione che trasformano il vapore in acqua, che cade sotto forma di pioggia, neve o grandine. Una parte dell'acqua di precipitazione scorre in superficie (da dove può nuovamente evaporare), una parte si infiltra nel sottosuolo, andando ad alimentare le falde sotterranee che, in tempi più o meno

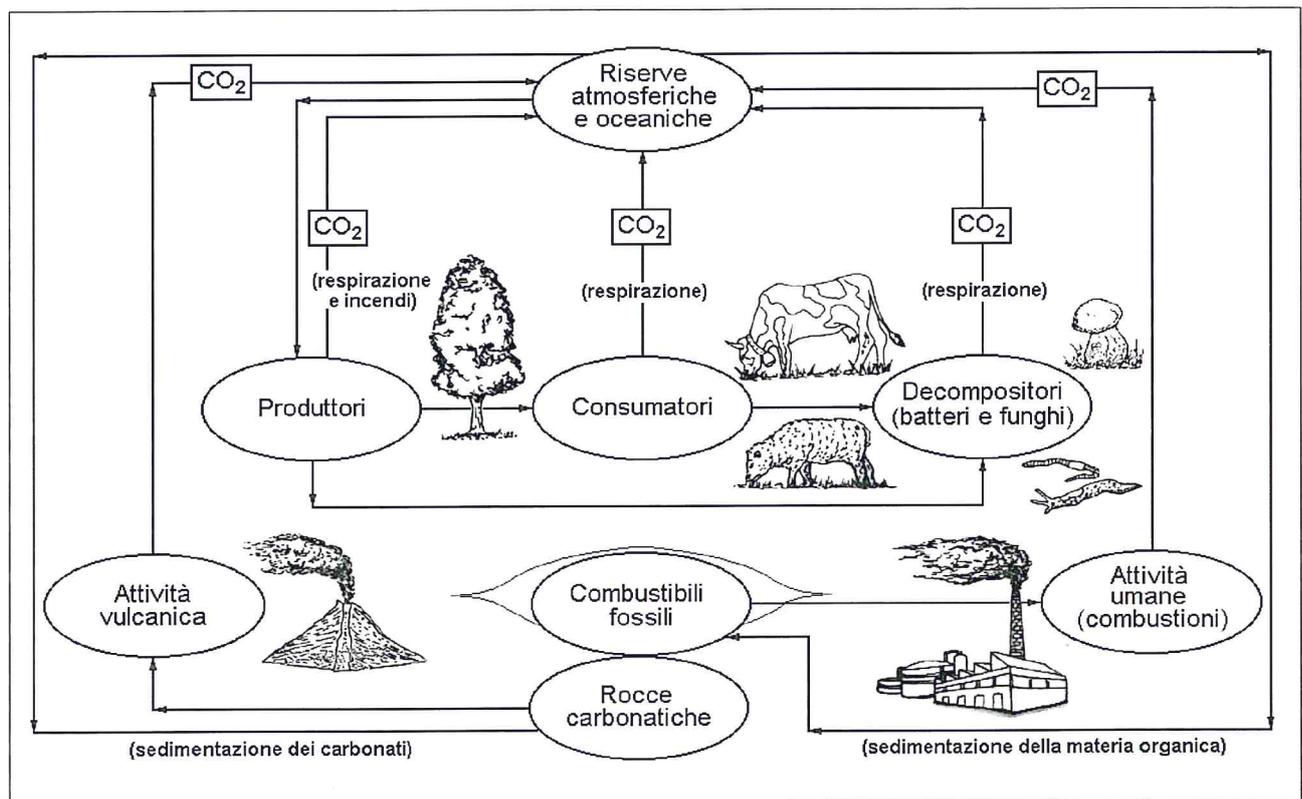
Fig. 3 – Formazione di nuova crosta lungo le dorsali oceaniche e riciclo della crosta vecchia al di sotto dei margini continentali con un processo detto di "subduzione".

IL CICLO BIOGEOCHIMICO

Si è già detto che il ciclo della materia è unico e coinvolge sia la materia organica sia quella inorganica; tuttavia, quando si entra nel merito dei cicli biologici (che sarebbe più corretto definire biogeochimici) è possibile, per semplicità, seguire il percorso di un singolo elemento e vedere come esso venga continuamente riciclato, in tempi più o meno lunghi, attraverso gli organismi e l'ambiente.

Esaminiamo il **ciclo del carbonio**. Come si può osservare nella **figura 6** (☞), in questo ciclo entrano in gioco tutti gli organismi viventi che liberano nell'atmosfera il biossido di carbonio attraverso il processo della respirazione; l'apporto di biossido di carbonio all'atmosfera deriva pure dai processi di combustione, sia di combustibili fossili (bruciati per ottenere energia o per riscaldare edifici), sia da combustioni estemporanee come l'incendio di un bosco. Il biossido di carbonio presente nell'atmosfera, attraverso la fotosintesi degli organismi autotrofi, fornisce gli ato-

Fig. 6 – Il ciclo del carbonio.



mi di carbonio che vengono fissati nelle molecole organiche di tutti gli esseri viventi. Il carbonio presente nella materia organica entra poi nel ciclo delle rocce sedimentarie: i resti vegetali, le spoglie di animali morti ecc., trasportati al mare dai corsi d'acqua, vanno ad aggiungersi agli organismi marini morti e contribuiscono alla formazione di **rocce carbonatiche**. Il carbonio entra nella composizione di alcune rocce, come calcari e dolomie, sia come cemento sia sotto forma di resti, come le conchiglie. La materia organica in altri casi può trasformarsi in **combustibili**, come carbone e petrolio, attraverso processi lenti, della durata di migliaia o milioni di anni, che iniziano sui fondali dei laghi e dei mari al termine della fase di trasporto. Un ulteriore contributo alle riserve di carbonio presenti nell'acqua marina proviene direttamente dall'atmosfera in quanto disciolto nell'acqua delle precipitazioni. Questo ciclo ha qualcosa da spartire anche con il **ciclo endogeno**, poiché attraverso l'attività vulcanica vengono immessi nell'atmosfera grandi quantità di biossido di carbonio.

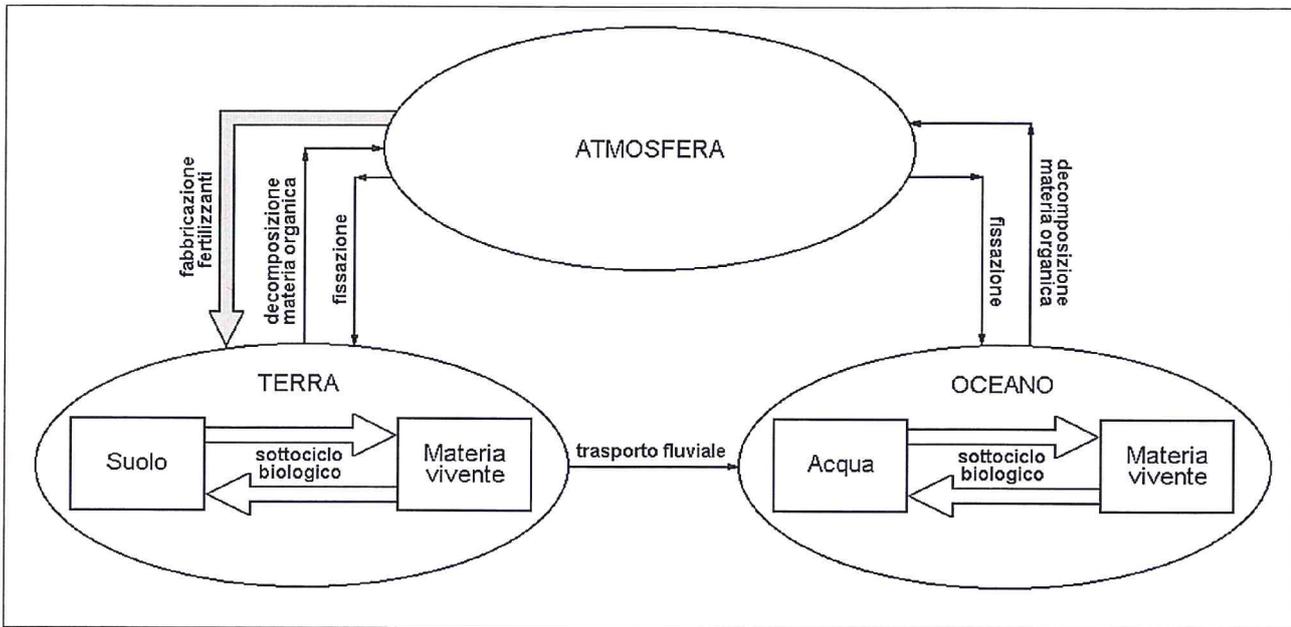


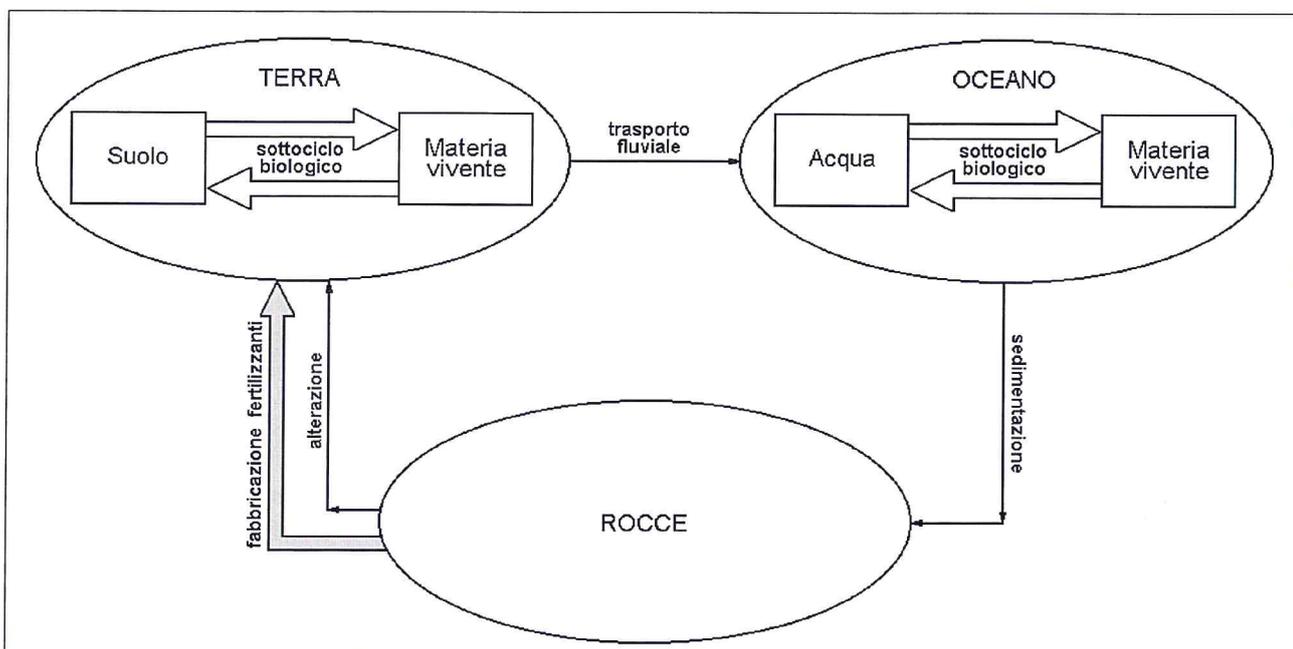
Fig. 7 (sopra) – Il ciclo dell'azoto.

Tra i cicli biogeochimici più interessanti possiamo ancora citare quelli del **fosforo** e dell'**azoto**: in entrambi i casi entrano in gioco elementi essenziali per la nutrizione e, in entrambi i casi, le attività umane negli ultimi decenni hanno introdotto modificazioni drastiche rispetto agli equilibri che si erano formati nel corso delle ere passate.

Anche per quanto riguarda i flussi coinvolti, i due cicli presentano delle analogie: in entrambi i casi ancora, i più intensi flussi sono fra minerali del suolo e materia vivente, per il comparto continentale, e fra sostanze disciolte e materia vivente, per il comparto oceanico.

Tutti questi sotto-cicli biologici, come è evidenziato dalle figure 7 e 8 (☞), non sono rigorosamente chiusi: infatti una limitata quantità di nutriente viene perduta, compensata però da una eguale entrata. Per il fosforo la perdita consiste in una sedimentazione di fosfati, bilanciata dalla continua lenta alterazione delle rocce che riforniscono di fosfati il suolo. Per l'azoto, invece, la perdita consiste nella liberazione di gas azotati (ammoniaca e ossidi di azoto) che accompagna la decomposizione della materia organica ed è bilanciata dalla fissazione dell'azoto atmosferico a opera soprattutto dei batteri.

Fig. 8 (sotto) – Il ciclo del fosforo.



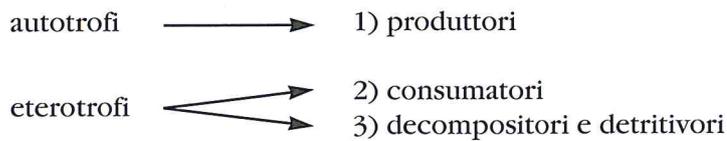
L'equilibrio qui descritto, che persisteva da milioni di anni, è stato violentemente perturbato negli ultimi decenni dalla produzione industriale di **fertilizzanti**, necessari a sostenere l'agricoltura convenzionale. Queste attività hanno portato a un consistente incremento della fissazione dell'azoto con il conseguente accumulo di nitrati nell'ambiente.

Per il fosforo, poi, la fabbricazione di fertilizzanti ha aumentato in modo ancora più grave l'immissione e quindi l'accumulo di un eccesso di fosfati nell'ambiente continentale, con gravi conseguenze ambientali (**eutrofizzazione** dei corpi idrici).

□ IL CICLO DELLA MATERIA NEI VIVENTI

Nelle **figure 7 e 8** (☞) una complessa serie di processi biologici è stata rappresentata in modo riassuntivo come scambi tra materia vivente da una parte e suolo, acqua e atmosfera dall'altro.

Questo complesso di scambi che è stato genericamente chiamato **sottociclo biologico**, vede coinvolti, in modi e sequenze differenti, tre gruppi principali di organismi:



Il primo gruppo è costituito dalle alghe unicellulari, da alcuni batteri e dai vegetali. Essi si nutrono di materia inorganica che trasformano nelle complesse molecole organiche caratteristiche dei viventi; questa trasformazione avviene grazie a un processo che prende il nome di **fotosintesi**, poiché utilizza l'energia delle radiazioni solari.

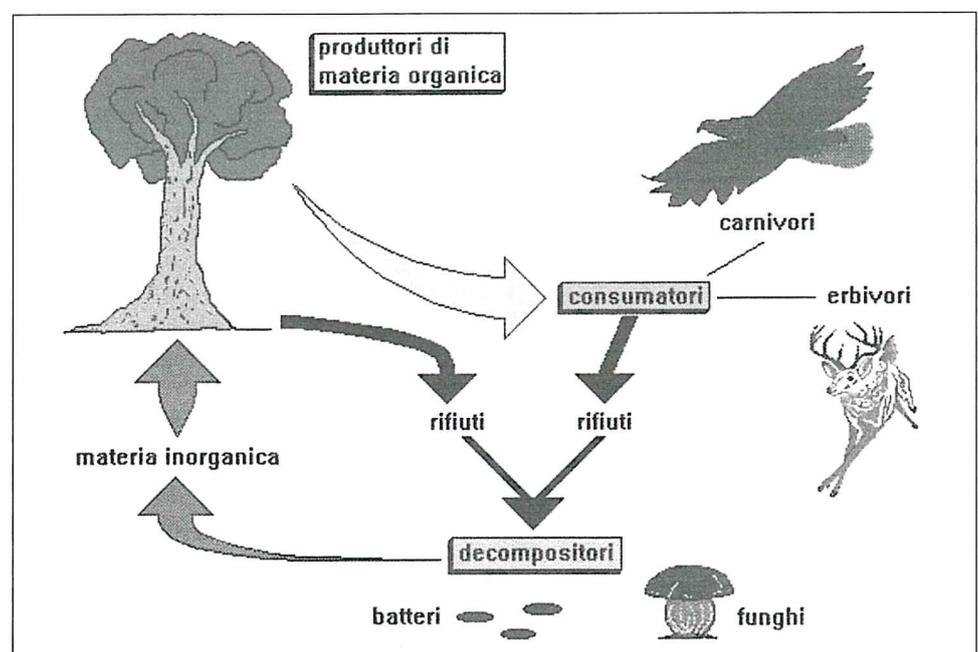
Il secondo gruppo comprende principalmente gli animali, che si nutrono in prevalenza di materiale organico già sintetizzato (cioè di organismi viventi e dei loro prodotti).

Il terzo gruppo è rappresentato da organismi piuttosto semplici, come gran parte dei batteri e i funghi. I decompositori si nutrono di cadaveri e di rifiuti organici che ingeriscono sotto forma di piccoli frammenti o che assorbono in soluzione. Vengono denominati anche detritivori quando demoliscono i detriti delle sostanze animali o di quelle vegetali caduti al suolo oppure sedimentati sui fondali acquatici.

Gli organismi di questo gruppo riciclano quindi i materiali organici in forme elementari, che possono essere nuovamente utilizzate dai produttori.

Il passaggio della materia terrestre attraverso questi tre gruppi di organismi può essere visto di conseguenza come un processo ciclico autosufficiente al quale viene dato il nome di **ciclo della materia** (☞ **fig. 9**).

Fig. 9 – Il ciclo della materia nei viventi.



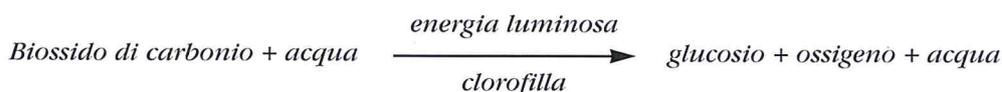
□ LA FOTOSINTESI E L'EVOLUZIONE DEI VIVENTI

Dal punto di vista **energetico** la comparsa e l'evoluzione della vita sulla Terra possono essere interpretate come una tendenza a progettare e realizzare strutture viventi via via più complesse e raffinate, capaci cioè di utilizzare l'energia con sempre maggiore efficacia, contrastando al loro interno, finché sono in vita, il degrado dell'energia in calore irre recuperabile (previsto dal 2° principio della termodinamica o dell'entropia). La principale sorgente dell'energia per le strutture viventi è, come si è già detto, il Sole. La piccolissima frazione delle radiazioni catturata effettivamente dagli esseri viventi (circa lo 0,02%) attiva il processo chiamato **fotosintesi**, che ha nei vegetali e in alcuni organismi unicellulari (i cosiddetti "produttori") i soli protagonisti (cfr. fig. 10). Questi infatti sono dotati di un pigmento verde, la **clorofilla**, che li rende capaci di utilizzare direttamente l'energia solare per costruire le molecole organiche necessarie alle funzioni vitali. Gli altri organismi (i cosiddetti "consumatori") recuperano questa energia **primaria** spezzando i legami chimici delle molecole che sono state prelevate dal mondo vegetale; viene così prodotta, immagazzinata e consumata energia **secondaria** nelle sue varie forme (chimica, meccanica, luminosa, termica...).

Alla base di queste trasformazioni energetiche vi è un altro importante processo biologico, la **respirazione**, che è paragonabile alla combustione ma che si compie a temperature decisamente inferiori (ad esempio nell'uomo mediamente a 37 °C). Osserviamo un po' più da vicino questi due fondamentali processi biologici.

Fotosintesi e respirazione possono essere considerati come processi tra loro speculari, complementari. Sono legati insieme in un ciclo continuo, tenuto in movimento dall'energia solare, nel quale da glucosio e ossige-

FOTOSINTESI



Attraverso la fotosintesi i vegetali e gli altri autotrofi riescono a organizzare molecole piccole, con legami poveri di energia, come l'acqua e il biossido di carbonio, in molecole più grandi (glucosio) caratterizzate da legami ricchi di energia. Il glucosio accumulato nei **cloroplasti** viene poi utilizzato per la sintesi degli altri zuccheri e di tutte le fondamentali molecole organiche (proteine, grassi, acidi nucleici).

La fotosintesi è un processo complesso che passa attraverso varie tappe, alcune delle quali avvengono soltanto durante il giorno (fase luminosa) e altre che si verificano anche nelle ore notturne (fase oscura). Nell'attività fotosintetica gli atomi di carbonio si legano fra loro formando le catene proprie dei composti organici; viene inoltre liberato ossigeno proveniente dalla scissione dell'acqua, mentre altre molecole di acqua sono liberate a conclusione del processo.

RESPIRAZIONE



Nel linguaggio comune si intende per respirazione l'atto di respirare, proprio degli organismi dotati di un apparato respiratorio, che consente loro di fare scambi gassosi con l'ambiente (assorbimento di ossigeno, espulsione di biossido di carbonio...). Questi scambi rendono possibile il vero e proprio processo respiratorio che avviene, per tutti gli esseri viventi, nelle singole cellule, all'interno di organuli detti mitocondri. Nella respirazione cellulare viene demolita la molecola del glucosio, caratterizzata da legami ricchi di energia, mediante un processo di ossidazione (combustione) che richiede consumo di ossigeno. Durante le varie tappe di questo processo, la cosiddetta catena respiratoria, si liberano molecole inorganiche (acqua e biossido di carbonio) mentre l'energia necessaria per le attività vitali viene prodotta e accumulata in un composto trasportatore di energia, detto ATP (adenosintrifosfato) che funziona come magazzino di energia chimica.

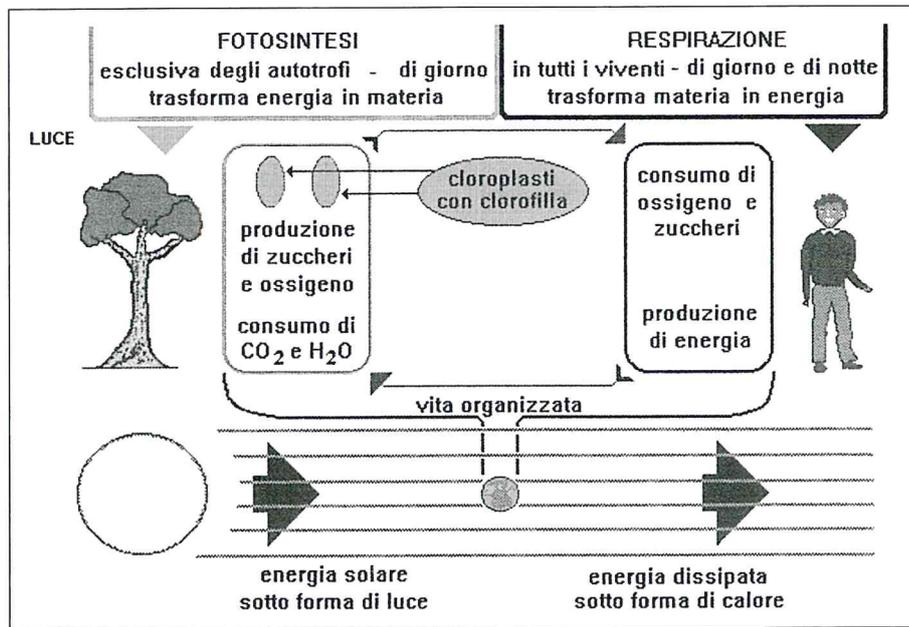


Fig. 10 – Schema dei processi della fotosintesi e della respirazione attraverso i quali fluisce continuamente l'energia che anima il ciclo della materia.

no continuano a formarsi biossido di carbonio e acqua e da queste molecole inorganiche continuano a formarsi glucosio e ossigeno. Attraverso questi passaggi la materia viene dunque continuamente riciclata mentre l'energia arrivata dal Sole, intrappolata dagli autotrofi e successivamente utilizzata in forme diverse da tutti i viventi, viene infine dispersa nello spazio sotto forma di calore. Sono questi i processi ecologici fondamentali che assicurano l'autoconservazione del sistema vita a tutti i livelli, dai più semplici ai più complessi. Nel proprio *habitat* (♣) ogni organismo è in grado di svolgere le sue funzioni vitali, scandite e orientate dalla freccia del tempo: può integrare o rinnovare le proprie componenti e può riprodurre copie di se stesso (**autopoiesi**); grazie alle capacità di **autoregolazione**, può mantenere sia la propria identità, legata allo specifico patrimonio genetico, sia la propria organizzazione interna, altamente ordinata, contro la tendenza generale al disordine. Può inoltre reagire autonomamente alle perturbazioni esterne con adattamenti o cambiamenti che, a livello di popolazione, possono entrare nella dinamica dei **processi evolutivi** propri degli esseri viventi.

A questo proposito, pur senza entrare nel merito della teoria evoluzionistica e dei suoi più recenti sviluppi, può essere interessante seguire un po' più da vicino la storia evolutiva dei vegetali e degli animali per cercare di cogliere le tappe più significative di quella tendenza del "fenomeno vita" a progettare strutture sempre più complesse (♣ fig. 11).

I primi vegetali erano **alghe** fluttuanti nei mari primitivi o ancorate alle coste rocciose. Alcune di queste erano munite di un pigmento verde, la clorofilla, ed erano capaci di fabbricare lo zucchero attraverso la fotosintesi. Questa fu veramente una grande invenzione anche perché forniva, come prodotto di scarto, il gas ossigeno che andava man mano accumulandosi nell'atmosfera primitiva. Il passaggio dall'atmosfera primitiva "riducente" a quella "ossidante" rese possibile nei viventi l'altra fondamentale "invenzione": la respirazione. Essa permette il passaggio da una combustione poco redditizia del glucosio, in assenza di ossigeno (**fermentazione batterica anaerobica**), a una combustione basata sull'ossigeno (**aerobica**) decisamente più redditizia dal punto di vista energetico. L'aumento dell'ossigeno nell'atmosfera favorì inoltre la formazione di uno strato di **ozono** (originato dalla trasformazione della molecola biatomica dell'ossigeno O_2 nella molecola triatomica dell'ozono O_3); questo strato, agendo da filtro delle radiazioni ultraviolette solari, che sono nocive alle strutture viventi, pose le condizioni per un loro gra-

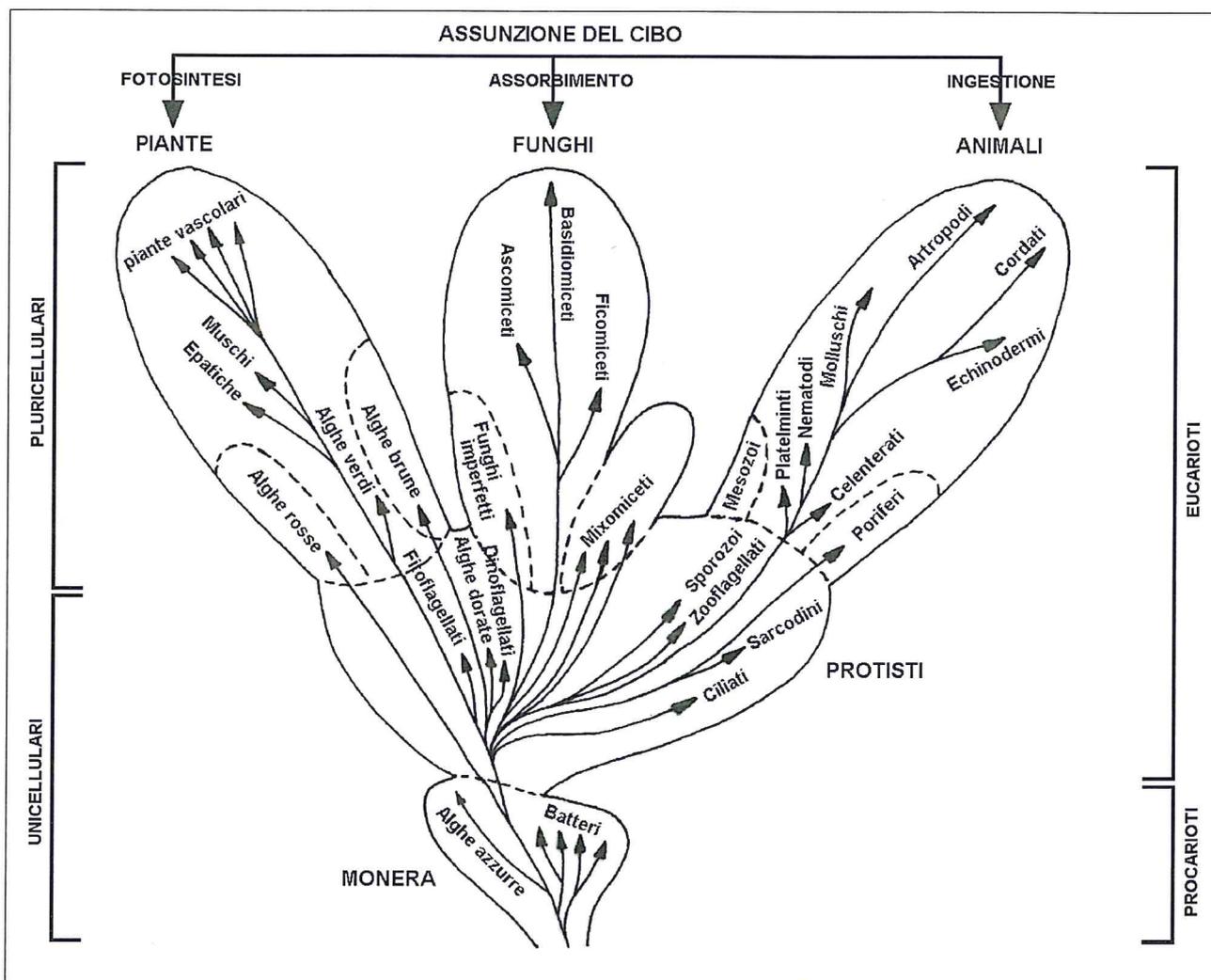


Fig. 11 – Schema della storia evolutiva dei viventi (secondo WHITTAKER, 1969).

duale passaggio dall'ambiente acquatico profondo alle zone superficiali e costiere e successivamente all'ambiente terrestre. In questo ambiente i vegetali svilupparono alcune caratteristiche comuni: la presenza di radici, con funzioni di sostegno e di assorbimento, e una cuticola esterna capace di contenere, nelle parti aeree, l'eccessiva perdita di vapor acqueo. Comparvero dapprima le **briofite** (muschi ed epatiche). Ancora oggi esse vivono nei luoghi umidi, poiché sono legate all'acqua per la riproduzione. Sono piantine di piccole dimensioni, prive di vasi conduttori; riescono a procurarsi l'acqua e i sali minerali sia attraverso i peli radicali sia attraverso le foglioline. Comparvero poi le **tracheofite**, che attualmente hanno la massima diffusione sul pianeta. Esse sono avanzatissime dalla presenza di un efficiente sistema vascolare, distinto in: legno (o xilema) – per il trasporto di acqua e sali minerali dalle radici alle foglie – e libro (o floema) – per il trasporto dei prodotti nutritivi, elaborati dalle foglie, a tutte le altre parti della pianta. Le prime tracheofite, le **felci**, ebbero il loro massimo sviluppo durante l'Era primaria. Mentre le felci erano e sono ancora legate ai luoghi umidi per la riproduzione, le **spermatofite**, cioè le piante terrestri dotate di semi, hanno superato questa limitazione. In questo grande gruppo – ora dominante sulla Terra – si distinguono le **gimnosperme**, piante a seme nudo rappresentate essenzialmente dalle conifere, e le **angiosperme** (mono o dicotiledoni) piante con semi ricoperti. Sono infatti dotate di fiori alla base dei quali si sviluppano successivamente i frutti che contengono i semi.

Parallelamente all'evoluzione dei vegetali si è andato sviluppando il complesso albero evolutivo degli animali, anch'esso inserito sullo stesso tronco – che indica l'origine da un antenato comune – e caratterizzato

da una chioma intensamente ramificata – che indica il grande livello di biodiversità raggiunto.

Nei mari primitivi il passaggio dai **protozoi** unicellulari ai primi organismi pluricellulari (**metazoi**) avvenne probabilmente attraverso forme intermedie di organizzazione coloniale, con cellule solo parzialmente indipendenti, simili a quelle di alcune spugne. **Spugne** e **celenterati**, hanno forme ancora abbastanza vicine a quelle vegetali e vivono in ambiente acquatico.

Più complesse sono poi le varie classi dei **vermi**, animali prevalentemente terrestri, già dotati di simmetria bilaterale e di veri e propri organi specializzati.

Procedendo attraverso le successive diramazioni dell'albero evolutivo possiamo poi distinguere, semplificando molto, due raggruppamenti divergenti di animali: gli **Invertebrati** e i **Vertebrati**. I primi sono privi di una struttura di sostegno interna e quindi limitati nelle dimensioni ma non nella diversità (comprendono, tra l'altro, gli **insetti**, i **crostacei**, i **molluschi**).

I Vertebrati sono invece dotati di un endoscheletro di natura ossea o cartilaginea, che permette loro di raggiungere maggiori dimensioni. In questi ultimi si affermano sempre più chiaramente alcune tendenze evolutive:

- ✓ affrancamento dalla vita acquatica, anche per quanto riguarda la riproduzione, ma, al tempo stesso, migliore adattamento a tutti gli ambienti, ivi compreso quello aereo;
- ✓ creazione di un ambiente interno sempre più autonomo rispetto al mondo esterno, grazie a sistemi più raffinati di autoregolazione (come la termoregolazione degli uccelli e dei mammiferi);
- ✓ sviluppo di una grande varietà di forme e comportamenti, in parte innati, in parte acquisiti con l'apprendimento, grazie anche alla progressiva evoluzione del sistema nervoso, in particolare dell'encefalo, dei nervi e degli organi di senso.

All'apice di questa linea evolutiva che va dai pesci, agli anfibi, ai rettili, agli uccelli, ai mammiferi, troviamo l'**uomo**, l'ultimo arrivato, appartenente al gruppo più evoluto dei mammiferi, i Primati.

IL PROBLEMA ENERGETICO

Le grandi fasi dell'evoluzione storica nella società umana sono state spesso determinate dal tipo di energia che l'uomo era in grado di adoperare.

A partire dall'Era industriale un fondamentale salto di qualità è consistito nella capacità di sfruttare, per il funzionamento delle macchine, energie fornite da risorse come carbone e petrolio.

Per la prima volta nella storia l'umanità ha fatto un uso massiccio di energie non rinnovabili, quali erano invece l'energia muscolare, il lavoro degli animali, la combustione di legno ecc. Questa fondamentale innovazione ha fatto emergere in maniera sempre più evidente e drammatica una serie di problemi: da un lato connessi al problema del reperimento sempre maggiore di risorse energetiche, dall'altro legati a una serie di impatti ambientali causati dal moderno sistema energetico.

Per quanto riguarda le prospettive energetiche, la previsione di un esaurimento delle scorte di combustibili fossili ha portato intorno agli anni '70 a esplorare lo sfruttamento dell'energia nucleare.

Le prime esperienze nucleari e in particolare alcuni incidenti, come quello di Chernobyl, hanno provocato un vivace dibattito relativo a questo argomento sul quale si è ancora lontani dal raggiungimento di una valutazione concorde nell'opinione pubblica e fra gli stessi esperti.

D'altra parte lo sfruttamento di combustibili fossili è universalmente riconosciuto come responsabile di alcuni fra i più gravi problemi ambientali globali quali l'aumento del biossido di carbonio atmosferico con il conseguente riscaldamento del pianeta, cambiamenti climatici, innalzamento del livello oceanico.

Ma anche a scala locale l'attuale sistema energetico è responsabile di gravi inquinamenti soprattutto atmosferici (immissione di monossido di carbonio, ossidi di azoto, idrocarburi ecc.).

Il problema energetico nel suo complesso rappresenta pertanto una delle massime sfide che l'umanità è chiamata oggi ad affrontare.

GLOSSARIO

■ **AMBIENTE** – È un termine a molte dimensioni, correlato alla varietà dei contesti disciplinari e culturali di riferimento. Concetto in rapida evoluzione, ha risentito in modo particolare dello sviluppo storico ed economico della società moderna e del conseguente acutizzarsi delle problematiche ambientali. Nel suo significato più vicino all'ecologia, l'ambiente può essere definito come l'insieme degli elementi – viventi e non – che circondano un organismo e sono in relazione con questo (dal latino *ambire* = andare incontro) e quindi fanno parte di un dato ecosistema. Nel linguaggio comune il termine ambiente è riferito generalmente all'insieme degli uomini e quindi, in pratica, all'ambiente umano nelle sue diverse accezioni: fisico, culturale, lavorativo ecc. Da un lato dunque sembra esistere un "ambiente" proprio della natura, dall'altro un "ambiente" proprio della nostra specie. In realtà ben sappiamo che l'uno è parte integrante dell'altro.

■ **AUTOECOLOGIA** – Studio delle relazioni ecologiche di una singola popolazione nei confronti del suo ambiente.

■ **BIODIVERSITÀ** – La diversità biologica deriva dall'insieme dei patrimoni genetici posseduti dalla comunità di un ecosistema. Il ruolo della biodiversità è importante perché dà più possibilità all'ecosistema di adattarsi alle perturbazioni dell'ambiente e quindi di mantenersi più a lungo stabile. Oggi è sempre più chiara la responsabilità dell'uomo nei confronti della biodiversità, vista ormai come un bene prezioso, da rispettare e proteggere.

■ **BIOCENOSI** – Termine ottocentesco, utilizzato tuttora frequentemente, specie in Europa, anche in sostituzione del termine ecosistema. Indica tuttavia solamente l'intera comunità biologica dell'ecosistema, cioè l'insieme di popolazioni che sono in grado di convivere in un determinato ambiente, interagendo fra loro e influenzandosi reciprocamente.

■ **BIOMA** – È un complesso di biocenosi riconoscibile da alcuni tipi di associazioni vegetali (prateria, savana, foresta boreale a conifere, macchia mediterranea...). In ecologia il bioma si situa, dal punto di vista spaziale, a un livello immediatamente inferiore alla biosfera. Al suo interno le popolazioni vegetali si trovano a uno stato di climax uniforme. Essendo difficile definire confini e caratteristiche delle varie aree geografiche in modo schematico e quindi artificioso, ben si capisce il fatto che esistano più classificazioni proposte, a seconda dei fattori considerati oltre a quelli vegetazionali (clima, suolo...). Odum (1973) propone 12 biomi, Whittaker (1975) 36, mentre Margalef (1986) ne propone solo 5. Esistono biomi terrestri, delle zone umide, di acqua dolce, costieri e marini.

■ **BIOMASSA** – È il peso di materia vivente presente nella comunità biologica di un ecosistema, a cui corrisponde un dato contenuto di energia potenziale. Il termine viene anche usato, in senso meno rigidamente scientifico, per riferirsi alla materia organica che può essere utilizzata dall'uomo come risorsa per la produzione di energia e di materie prime per l'industria.

■ **BIOSFERA** – Intesa nel suo significato più ampio, si può considerare come sinonimo di ecosfera. È l'insieme dei sistemi viventi con il loro ambiente terrestre che comprende: lo strato inferiore dell'atmosfera, la

litosfera superficiale (con una sottile zona ipogea), l'idrosfera fino alla sua massima profondità. Da quando è comparsa la vita sulla Terra, c'è una continua interazione tra i viventi e l'atmosfera, l'idrosfera e la litosfera, coinvolte nei cicli geochimici che sostengono il funzionamento degli ecosistemi.

■ **BIOTOPO** – È l'unità di ambiente fisico-chimico in cui vive una biocenosi. I principali componenti abiotici che interagiscono con la biocenosi sono l'aria, il suolo, l'acqua, i fattori morfologici e climatici, con le loro caratteristiche e il loro diverso grado di stabilità.

■ **CLIMAX** – È la condizione di maggiore stabilità in cui si può trovare una biocenosi. Questo stadio non è però permanente; mutate condizioni ambientali possono preludere a una serie di trasformazioni adattative delle varie popolazioni (successione ecologica).

■ **COMUNITÀ BIOLOGICA** – È l'insieme di organismi di specie diverse, ciascuna costituente una popolazione, che vivono in associazione in un determinato habitat. Dal punto di vista ecologico costituisce l'unità funzionale e strutturale dei sistemi viventi ai più alti livelli di complessità.

■ **ECOSISTEMA** – È l'unità di studio sistemico dell'ecologia. Ogni ecosistema comprende l'intera comunità di organismi viventi e il loro ambiente di vita, con le sue componenti fisico-chimiche. Le varie strutture, interagendo fra di loro, costituiscono un unico sistema funzionale e dinamico, in grado di svolgere, per un certo periodo di tempo, i processi ecologici fondamentali (flusso di energia, di informazioni, ciclo della materia) che ne garantiscono la sopravvivenza. Diversi per dimensioni e caratteristiche i vari ecosistemi terrestri possono essere considerati come unità minori di un unico grande sistema vivente: il pianeta Terra. Nello studio ecologico ambientale emergono, in tutta la loro complessità, le problematiche relative al rapporto Uomo-Natura e quindi al duplice ruolo biologico e socio-culturale dell'uomo negli ecosistemi. Sotto questo profilo, specie nell'ambito dell'educazione ambientale, viene spesso utilizzato dai ricercatori il termine **eco-socio-sistema**.

■ **ECOTONO** – Fascia più o meno ampia di transizione tra un ecosistema e un altro. In genere è caratterizzata da una maggiore diversità di nicchie ecologiche e quindi di popolazioni.

■ **ENTROPIA** – È una grandezza fisica di non facile comprensione che serve a descrivere leggi generali che esprimono tendenze cui è soggetta tutta la materia. Un principio basilare della fisica (2° principio della termodinamica) stabilisce che l'entropia tende ad aumentare nel tempo irreversibilmente: il passaggio di calore da un corpo caldo a uno più freddo, la transizione dall'ordine al disordine della materia, il degrado delle strutture complesse sono esempi di processi accompagnati da un aumento di entropia e che quindi ubbidiscono a tale principio fisico. I sistemi viventi, grazie alle funzioni vitali, sono in grado, per un certo periodo di tempo (ciclo vitale), di sintetizzare molecole complesse e ordinate, di opporsi alla omogeneità termica e alla destrutturazione. I processi vitali possono essere visti quindi come una risalita contro corrente rispetto alle leggi dell'entropia.

■ **GAIA** (l'antico nome greco della Terra) – Con questo termine viene indicata l'ipotesi scientifica di James E. Lovelock che propone di considerare il nostro pianeta come un unico grande ecosistema vivente, un

superorganismo capace di autoregolarsi mantenendo stabili le condizioni ambientali indispensabili per la vita.

■ **HABITAT** – È il particolare spazio in cui un organismo si è adattato a vivere (dal latino *habitat* = esso abita) rapportandosi con gli altri organismi e con il complesso di fattori che ne determinano le caratteristiche. Per organismi che vivono in un'area ristretta si utilizza generalmente il termine di "microhabitat". Quanto più una popolazione è specializzata tanto più la sua distribuzione è legata a un particolare habitat; per altre specie più adattabili l'habitat può essere invece più ampio e flessibile. Può anche cambiare nel tempo allargandosi e differenziandosi (ad esempio l'inurbamento di alcune popolazioni di uccelli). Habitat è utilizzato talora come sinonimo di "ambiente".

■ **NICCHIA ECOLOGICA** – Si usa per descrivere, a un livello più raffinato e complesso, l'habitat di una specie; per analizzare cioè il modo in cui un organismo occupa il proprio habitat, riuscendo a soddisfare le sue esigenze vitali e svolgendo un suo ruolo all'interno dell'ecosistema. Se si vuole indicare l'habitat di un fungo porcino è sufficiente indicare il castagneto; se si vuol descrivere la sua nicchia ecologica occorre precisare il tipo particolare di associazione mutualistica (micorrizza) del micelio fungino con le cellule radicali del castagno. L'oceano può essere indicato come l'habitat di un organismo marino mentre, come nicchia ecologica, si diversificherà a seconda della temperatura dell'acqua, della sua profondità, del suo grado di salinità, e così via. Generalmente si esercita competizione tra popolazioni che occupano, in tutto o in parte, la stessa nicchia ecologica.

■ **POPOLAZIONE** – Gruppo di individui di una stessa specie che convivono in un determinato ecosistema. Le popolazioni sono portatrici di un patrimonio genetico (*pool genico*) le cui caratteristiche e la cui frequenza sono continuamente messe in gioco da fattori "intracellulari" (mutazioni, scambi riproduttivi ecc.) e da fattori ambientali (interazioni adattative). In ogni ecosistema le variazioni del *pool genico* influiscono, unitamente ad altri fattori non genetici sia biotici che abiotici, sul controllo della densità delle varie popolazioni.

■ **SVILUPPO SOSTENIBILE** – La "Carta dei principi per l'educazione ambientale orientata allo sviluppo sostenibile e consapevole", redatta a cura del Comitato interministeriale della Pubblica Istruzione e dell'Ambiente (Fiuggi, 24 Aprile 1997), così definisce il concetto di **sviluppo sostenibile**: «L'umanità ha la capacità di educarsi a rendere lo sviluppo sostenibile e di garantire i bisogni attuali senza compromettere le possibilità delle generazioni future».

Viene dunque indicata in questo documento la via di un impegno, da parte della società, a soddisfare le esigenze dell'economia senza trascurare la salvaguardia dell'ambiente, cioè a fare scelte di sviluppo economico compatibili con i bisogni delle nuove generazioni, sia tenendo conto della disponibilità di risorse nell'intero pianeta sia delle sue capacità di assorbimento nei confronti dell'impatto ambientale. Questo impegno comporta, evidentemente, un processo di rinnovamento culturale e quindi un cambiamento nell'organizzazione della vita sociale e nei comportamenti individuali. Dal punto di vista ambientalista si tende generalmente ad ampliare il concetto di sostenibilità in senso ecologico, guardando oltre i bisogni dell'umanità e sottolineando in particolare le esigenze di stabilità degli ecosistemi. In effetti, mentre il termine di sviluppo sostenibile è stato ormai accettato dal mondo politico internazio-

nale, sull'onda della Conferenza mondiale di Rio de Janeiro sul tema **Ambiente e Sviluppo** (1992), nel mondo ambientalista si preferisce tuttora il termine **ecosviluppo**. Dietro questo concetto vi sono posizioni più o meno avanzate dell'ambientalismo mondiale, fino a quelle rappresentate dai teorici dell'"ecologia profonda", alcune più attente alle dimensioni del distacco Natura-Cultura, altre ai problemi delle relazioni sociali e della qualità della vita.

I COMPONENTI DEGLI ECOSISTEMI E LE LORO INTERAZIONI

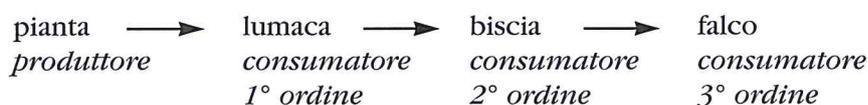
□ FATTORI ABIOTICI E BIOTICI

Qualunque ecosistema presente sulla Terra è composto da una serie più o meno numerosa di elementi: parte di queste componenti sono rappresentate dai diversi organismi viventi e parte dal mezzo fisico in cui questi organismi svolgono le loro funzioni. Il mezzo fisico comprende i **fattori abiotici**, cioè il substrato (naturale o artificiale) su cui si muovono gli animali terrestri (il suolo, le rocce, il ghiacciaio, l'asfalto delle città ecc.), l'aria e l'acqua; a sua volta questi mezzi sono caratterizzati da fattori variabili nel tempo come la temperatura, la luce ecc.

I **fattori biotici** sono costituiti invece da tutti gli organismi viventi di un ecosistema, e cioè dalla comunità biologica.

I rapporti fra tutti gli organismi che popolano gli ecosistemi sono di vario tipo e si intrecciano in modo tale da costituire una complessa rete che coinvolge produttori, consumatori e decompositori. In questa rete è tuttavia possibile stabilire delle gerarchie alimentari, individuando una serie di livelli. Il gradino alimentare (detto anche **livello trofico**) di base è costituito dai **produttori** o **autotrofi**: senza di essi non esisterebbero gli altri organismi. Sul gradino successivo troviamo tutti quei consumatori che si cibano direttamente dei produttori: ci riferiamo a tutti gli organismi erbivori. Questi animali, che si nutrono di erbe, di frutti o di foglie di alberi vengono anche definiti **consumatori di primo ordine**; tra di essi troviamo molti insetti, rettili erbivori come le iguane, uccelli che si nutrono di bacche, mammiferi come il coniglio o il cervo. Sul terzo gradino troviamo gli animali carnivori, come i serpenti o il leone, che si nutrono di animali erbivori e costituiscono i **consumatori di secondo ordine**. Sul gradino più alto troviamo i **consumatori di terzo ordine**: animali carnivori che si nutrono soltanto di altri carnivori. Questa scala, che serve a comprendere i rapporti alimentari fra i vari organismi, è tuttavia un po' schematica; molti animali possono essere contemporaneamente consumatori di primo e secondo ordine oppure di secondo e terzo; l'uomo, come tutti gli **onnivori**, si ciba sia di vegetali che di altri animali.

Quando si parla di livelli alimentari, o livelli trofici, si usa spesso il termine di **catena alimentare**; il passaggio di sostanze tra un produttore e i consumatori successivi, appartenenti ai vari livelli, rappresenta infatti un insieme simile a una catena dove ogni maglia è legata sia a quella che la precede sia a quella che la segue.



In una catena alimentare la freccia posta tra i vari organismi indica in quale direzione si trasferisce la materia e quindi anche l'energia. Tuttavia nel passaggio tra un gradino e il successivo circa l'80-90% dell'energia viene persa come calore e ceduta all'ambiente. La lumaca, mangian-

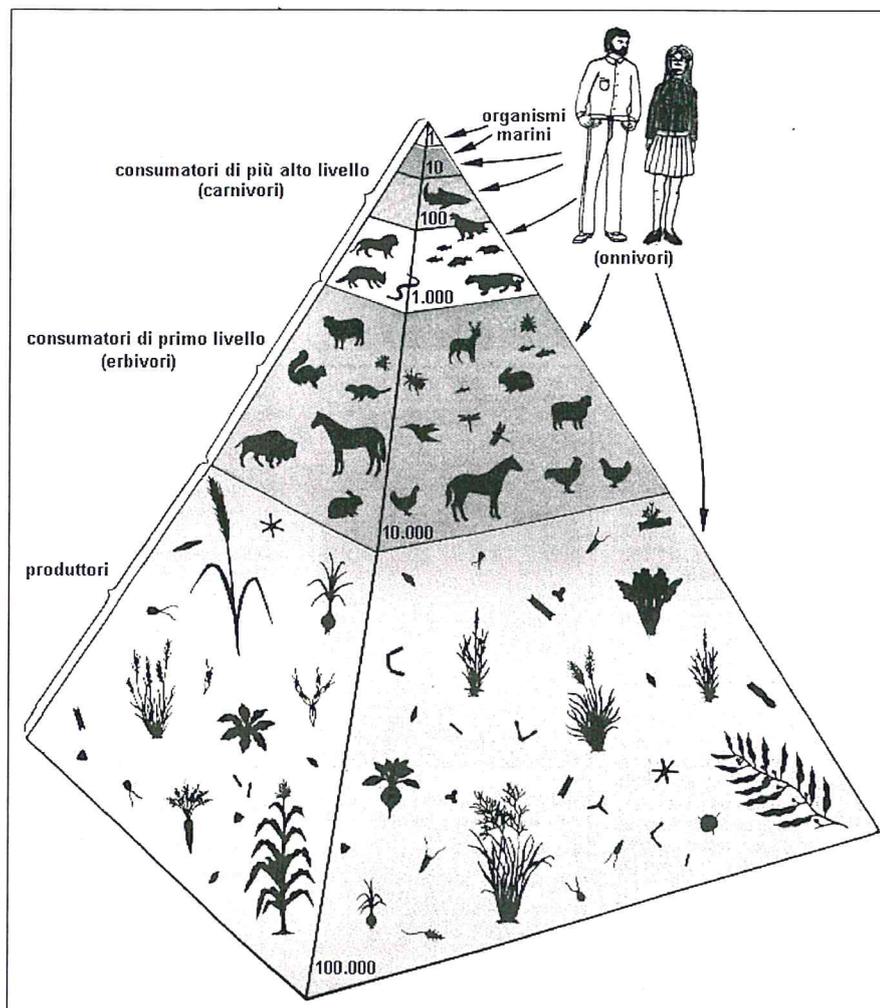


Fig. 12 – Rappresentazione della catena alimentare in forma di piramide.

ne alimentari in forma di piramidi, con la larga base occupata dagli organismi produttori e con i consumatori di terzo ordine confinati nel vertice (☞ fig. 12). Allo stesso modo può venire rappresentata la rete trofica, se si confrontano tra loro le diverse quantità di biomassa prodotte, ai vari livelli, dai produttori e dai consumatori.

Lo studio di queste piramidi, pur con le necessarie cautele, può dare utili indicazioni in termini quantitativi sulle relazioni alimentari ed energetiche che sono alla base della stabilità di ogni ecosistema.

Molto comunemente le catene alimentari vengono espresse in una forma grafica, come si vede nella figura 13 (☞), che permette di rappresentare la complessità della rete alimentare (rete trofica) presente in un determinato ecosistema.

☐ FATTORI LIMITANTI

Tutto quanto concerne la vita organizzata nei vari ambienti è condizionato dai fattori abiotici e biotici, che interagiscono fra di loro e influenzano sulla distribuzione e sulla varietà degli organismi presenti; quando uno di questi fattori ha effetti negativi su determinate popolazioni ed è in grado di limitarne la crescita, viene definito **fattore limitante**.

Tra i fattori limitanti sono molto importanti quelli climatici; temperature troppo alte o troppo basse, umidità atmosferica troppo elevata o siccità eccessiva dell'aria, presenza costante di vento determinano condizioni mal tollerate dalla maggior parte degli animali e delle piante e quindi sono fattori limitanti per lo sviluppo. Anche la disponibilità di spazio, e di conseguenza la disponibilità di cibo, deve essere considerata allo stesso modo; l'avanzata del deserto in certe regioni della Terra o

do la pianta, utilizza gran parte dell'energia immagazzinata nel vegetale per il proprio sviluppo e le proprie funzioni vitali e una parte la elimina con i rifiuti organici; nel corpo della lumaca quindi resta immagazzinata solo una piccolissima parte di energia proveniente dalla pianta; questa energia è a disposizione della biscia o di un altro animale che si mangerà la lumaca. Ciò significa che man mano che si sale di livello trofico l'energia utilizzabile diminuisce; questo fatto è facilmente verificabile se si esamina il numero di organismi presenti in un ecosistema ai vari livelli: notiamo infatti che mentre è elevatissimo il numero degli organismi produttori, il numero dei consumatori si riduce fortemente; il numero dei carnivori, consumatori di terzo ordine presenti in un ecosistema, è estremamente limitato. Questo andamento ha suggerito di rappresentare le cate-

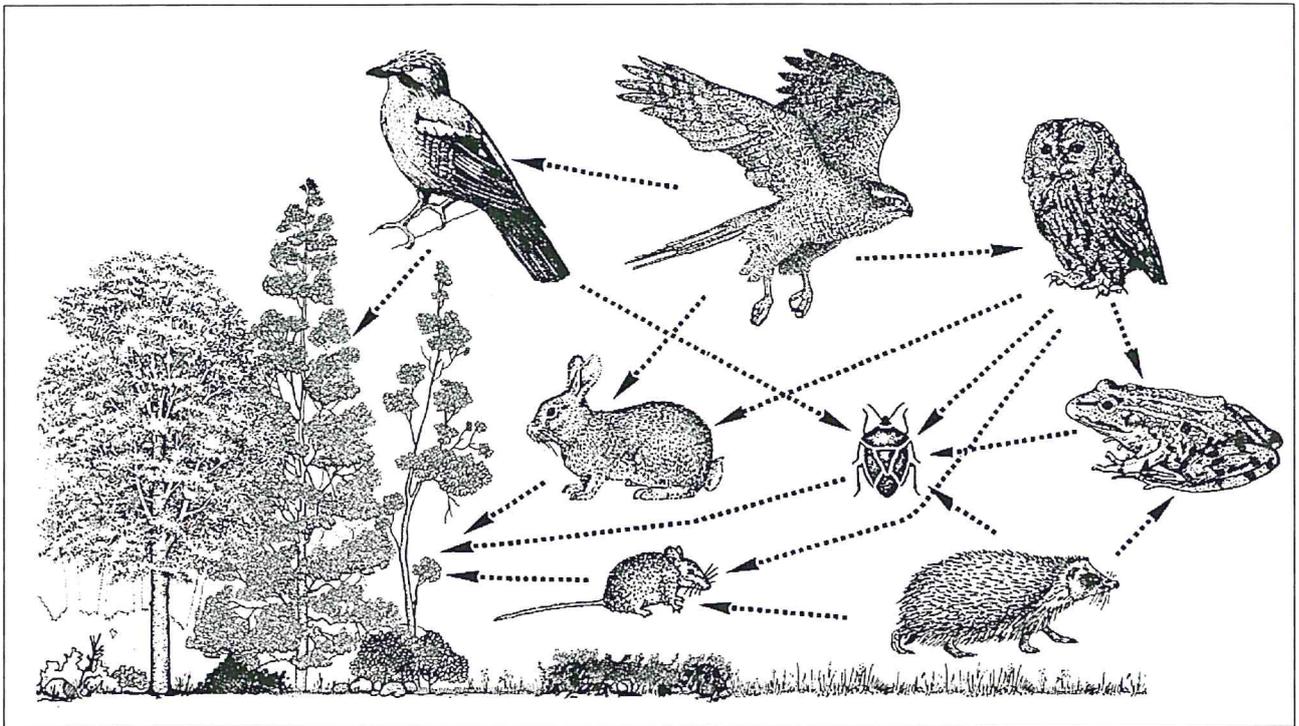


Fig. 13 – Rappresentazione di una catena alimentare mediante frecce che partono dai consumatori di 3° ordine e, attraverso varie prede, arrivano ai produttori.

la sottrazione di prezioso terreno fertile per costruire insediamenti di vario tipo ci forniscono esempi del condizionamento rappresentato da queste situazioni sulle popolazioni (non solo umane) in esse coinvolte. Tra i principali fattori limitanti vi è naturalmente la disponibilità di acqua e in particolare, per le popolazioni umane, di acqua potabile.

La vita nell'acqua è fortemente condizionata dalla luce, dalla temperatura e dalla presenza di ossigeno disciolto; acque molto torbide o fredde o scarsamente ossigenate non consentono un regolare sviluppo alla maggioranza degli organismi acquatici; un esempio in tal senso ci viene dalla distribuzione delle barriere coralline in quanto i limiti di tolleranza dei coralli costruttori in fatto di temperatura (mai inferiore ai 18 °C), disponibilità di ossigeno e torbidità dell'acqua sono assai vincolanti per il loro sviluppo.

I fattori limitanti condizionano dunque la distribuzione e lo sviluppo degli organismi viventi sui continenti e nei mari; se osserviamo la distribuzione della vegetazione sul nostro pianeta vediamo che è caratterizzata da andamenti areali lungo determinate fasce; queste fasce coincidono praticamente con le fasce climatiche. Dal momento che le condizioni climatiche variano sia con la latitudine (cioè spostandoci dall'equatore ai poli) sia con la quota (dal livello del mare agli 8846 metri della punta dell'Everest) possiamo osservare (cfr fig. 14) che esistono forti analogie nella distribuzione della vegetazione sia spostandoci verso i poli che salendo di quota lungo i rilievi (fasce altitudinali). Per intenderci, le caratteristiche delle praterie alpine esistenti sulle nostre montagne sono confrontabili con quelle della tundra, sviluppata (a quote molto basse) nelle regioni a cavallo del Circolo polare artico. Come appare dalla figura 15 (cfr) i limiti delle diverse fasce di vegetazione non sono regolari (cioè paralleli ai paralleli geografici) in quanto la distribuzione dei climi è a sua volta condizionata da tutta una serie di fattori come l'andamento dei rilievi terrestri, delle correnti marine ecc.

□ CAPACITÀ DI ADATTAMENTO

In tutti gli ambienti esistono dei fattori limitanti per determinati organismi; tuttavia, anche negli ambienti estremi caratterizzati da climi inospiti

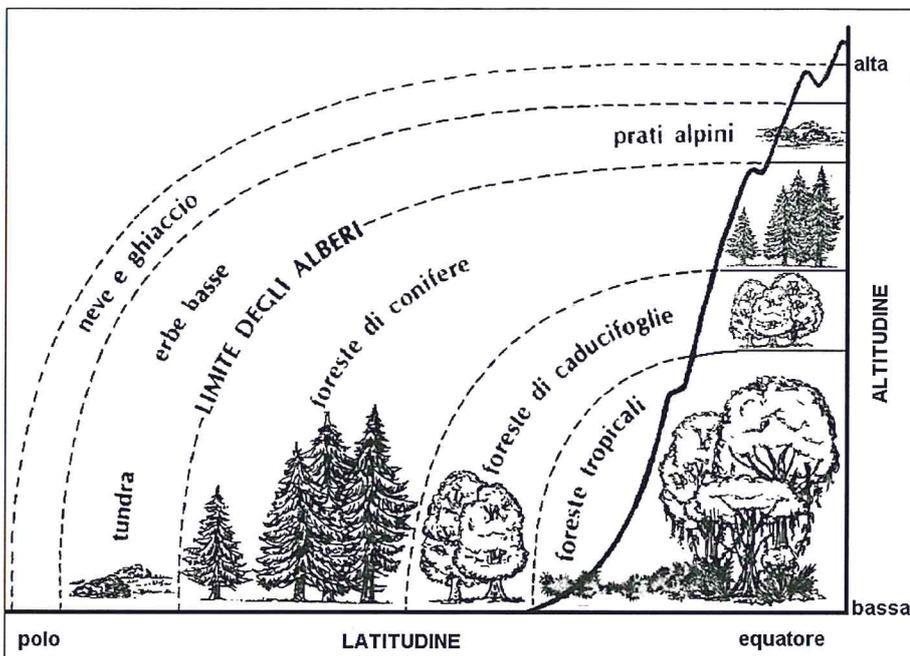
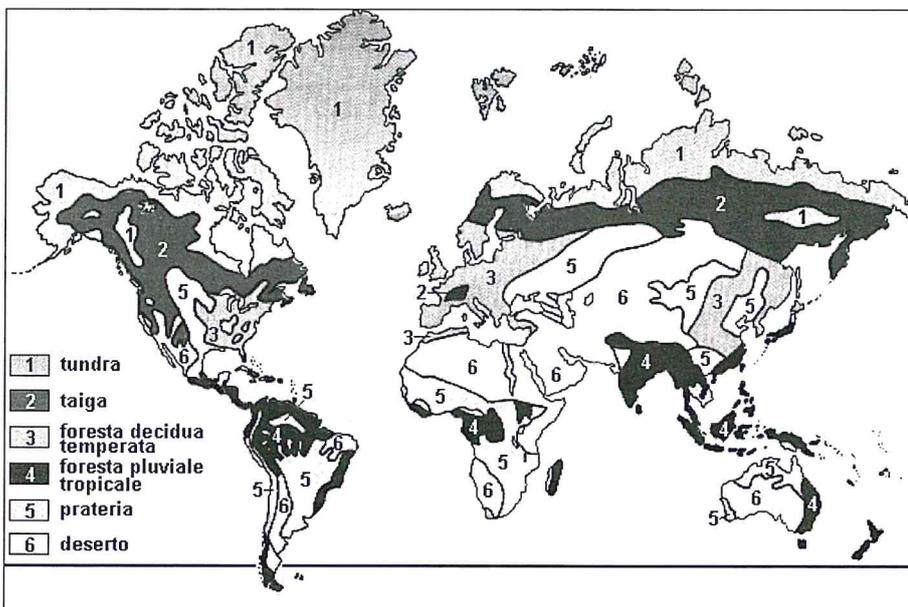


Fig. 14 (sopra) – Analogia nella distribuzione della vegetazione tra le fasce altitudinali e i diversi intervalli di latitudine.

Fig. 15 (sotto) – Distribuzione delle diverse fasce di vegetazione sulle aree continentali.



tali per gran parte degli esseri viventi, troviamo un certo numero di animali e piante che, come si dice, si sono adattati a vivere in quelle condizioni. Cosa significa adattarsi a determinate condizioni?

L'adattamento può essere definito come la proprietà degli organismi viventi di modificare le proprie funzioni e la propria struttura per renderle compatibili con nuove condizioni ambientali. Bisogna tuttavia distinguere fra i diversi casi di adattamento.

L'organismo di un alpinista che sale su una montagna

è in grado di compensare la diminuzione di pressione di ossigeno aumentando la ventilazione polmonare. Questo è un adattamento temporaneo che rientra nelle nostre possibilità immediate.

Diverso è il discorso se ci si riferisce a popolazioni (animali o vegetali) che si sono adattate stabilmente a vivere in una regione nella quale siano avvenuti dei cambiamenti più o meno rapidi delle condizioni ambientali. Questo adattamento non può essere conseguito nel corso della vita di un singolo individuo ma è un processo lento che avviene nell'arco di alcune o di moltissime generazioni. Esso coinvolge l'intera popolazione e può produrre nel tempo l'evoluzione e l'origine di una nuova specie.

Vi sono casi di adattamento evolutivo molto famosi perché si sono verificati in un tempo relativamente breve: le farfalle della specie *Biston betularia*, che vivevano in Inghilterra nel secolo scorso, erano di colore chiaro ma la stessa specie annoverava rari esemplari scuri per la presenza di un pigmento. Dal momento che di giorno queste farfalle se ne stanno immobili sulla bianca corteccia delle betulle, i già rari esemplari scuri sono facile preda degli uccelli, mentre per effetto del mimetismo,

gli esemplari chiari si confondono con la corteccia e sfuggono più facilmente alla caccia. Tuttavia, con lo sviluppo dell'industrializzazione di certe zone e la deposizione di pulviscolo nerastro proveniente dalle ciminiere sulla corteccia degli alberi, la situazione era destinata a cambiare: in questo ambiente mutato sono le farfalle chiare a essere più facilmente individuabili. A poco a poco il rapporto numerico fra esemplari chiari e scuri in quelle aree si è completamente invertito. In questo

caso l'adattamento si è verificato in seguito alla selezione naturale, ma è stato rapido (pochi decenni) in quanto il cambiamento che lo ha provocato è stato indotto dall'uomo.

Casi di adattamento che richiedono tempi estremamente lunghi, di migliaia se non addirittura di milioni di anni, sono quelli di tipo morfologico che comportano variazioni nella forma e nella struttura degli organismi, come l'adattamento al volo degli arti superiori degli uccelli e dei pipistrelli o l'adattamento della forma del becco degli uccelli, che si specializza in funzione di ben precisi regimi alimentari. Tra gli adattamenti più curiosi vi è il mimetismo, cioè la capacità di certi organismi di assumere l'aspetto di un rametto o di una foglia, o di essere scambiati per animali velenosi, o di mutare il colore della pelle, adattandola al colore del substrato per confondersi con esso.

□ COMPORAMENTI E INTERAZIONI COMPORAMENTALI

Gli organismi che vivono in un determinato ambiente reagiscono a tutti gli stimoli esterni (luce, suoni, presenza di altri organismi...) e interni (fame, sete, dolore...) con azioni diverse. I vari modi in cui un organismo risponde a questi stimoli definiscono il suo **comportamento**, attraverso il quale gli esseri viventi cercano di garantire la propria sopravvivenza individuale o quella della propria specie. Come esempi di comportamenti, fra gli animali, si possono citare: i movimenti rituali che avvengono nelle fasi di corteggiamento, talora vere e proprie danze rigorosamente conservate attraverso le generazioni, le lotte tra i maschi di un branco per affermare la supremazia, i movimenti dei perdenti per comunicare la propria sottomissione, e così via.

Lo studio del comportamento animale (che è compito dell'**Etologia**) ha permesso di individuare quelle che sono le risposte automatiche all'ambiente, e cioè i comportamenti innati, distinguendoli dai comportamenti acquisiti con l'esperienza. Si è potuto stabilire che i comportamenti innati, o istintivi, sono dettati dal patrimonio genetico; le "informazioni" su come reagire a determinati stimoli possono rimanere attive tutta la vita, o solo durante certi periodi, come ad esempio durante il periodo riproduttivo, o disattivarsi dopo un certo tempo.

È istruttivo il caso dei piccoli gabbiani che becchettano il becco dei genitori per far loro rigurgitare il pesce. Nei primi giorni di vita questo comportamento è istintivo, scatenato da un segnale particolare: i piccoli reagiscono alla presenza di una macchia rossa sul becco dei genitori. Se si mostra ai piccoli uccelli una bacchetta di legno con un'analogha macchia rossa la reazione sarà ugualmente il becchettamento. Dopo qualche tempo tuttavia, e tanti becchettamenti infruttuosi, i piccoli impareranno a riconoscere la macchia "buona" da quella "cattiva" e, con il comportamento acquisito, smetteranno di accanirsi con la bacchetta di legno, riconoscendo solo il becco dei genitori.

Un particolare comportamento, che può durare tutta la vita, è quello scoperto dal famoso etologo Konrad Lorenz dopo aver "covato" e atteso la schiusa di uova di oche: certi animali riconoscono come propri genitori il primo grosso individuo che si trovano accanto dopo la nascita. Riconoscere e seguire i genitori, o anche solo uno, è l'unico mezzo che i piccoli hanno per garantire la propria sopravvivenza. Questa automaticità di riconoscimento, anche in presenza di individui diversi dai veri genitori, prende il nome di **imprinting**. Si è anche potuto dimostrare che questo comportamento avviene in un arco di tempo molto limitato (per le oche un paio di giorni), trascorso il quale l'animale che è riuscito in qualche modo a sopravvivere non riconoscerà più alcun individuo come genitore.

Dal punto di vista ecologico il comportamento dei vari organismi costituisce un importante fattore di interazione biologica: può infatti influenzare il tasso di crescita o di diminuzione delle varie popolazioni, il loro grado di variabilità, la diversa distribuzione nell'ambito dell'ecosistema. Si possono distinguere fondamentalmente due tendenze nelle interazioni comportamentali, l'una di segno negativo, basata sulla competizione, l'altra invece positiva, basata sulla cooperazione.

La **competizione** è legata generalmente alla presenza di risorse che vengono utilizzate da più individui o da popolazioni diverse (luce, cibo, sito riproduttivo ecc.). La competizione è **intraspecifica** quando è riferita a individui della stessa specie e può avere effetti di regolazione sull'intera popolazione (ad esempio: competizione rispetto alla possibilità di accoppiamento, di accesso al cibo, alla sosta, alla tana).

L'**aggressività** è una manifestazione comune in questo tipo di comportamenti; è presente tuttavia, nella maggior parte dei casi, in forme ritualizzate e controllate, secondo modalità adattative. Ciò significa, in pratica, che i costi di un comportamento aggressivo non debbono superare i benefici ottenuti.

La competizione **interspecifica** riguarda i rapporti fra popolazioni diverse, in particolare tra quelle più affini o vicine, anche come nicchia ecologica. Posta in concorrenza tra di loro rispetto a una determinata risorsa, una popolazione può prevalere sull'altra fino a eliminarla dall'ecosistema. Talora invece si possono determinare in entrambe le popolazioni variazioni adattative, capaci di incidere sul percorso evolutivo di entrambe (**coevoluzione**). Tra i vari esempi possibili possiamo ricordare le relazioni preda-predatore e i multiformi casi di parassitismo.

Nell'equilibrio dell'ecosistema le interazioni comportamentali basate sulla **cooperazione** (intra o interspecifica) non sono meno importanti né meno frequenti di quelle basate sulla concorrenza e sulla competizione. L'**altruismo** è una manifestazione caratteristica di questo tipo di relazioni; esso si riscontra abbastanza frequentemente e, come è ben noto, può arrivare fino alla messa in pericolo o al sacrificio della vita individuale (ad esempio: animali "vedetta" nel gruppo, i cosiddetti "aiutanti" nell'allevamento parentale, la protezione materna nei confronti della prole). Tra i vari casi di interazioni positive si possono distinguere livelli differenti:

- ✓ il **commensalismo**, in cui una delle due popolazioni riceve maggiori benefici dall'altra, benefici che sono spesso di tipo alimentare, come nel caso di alcuni pesciolini ospitati tra i tentacoli velenosi dell'attinia (pomodoro di mare);
- ✓ la **simbiosi**, in cui entrambe le popolazioni traggono vantaggio dalla cooperazione, un vantaggio che però non è indispensabile per la loro sopravvivenza (nel rapporto tra il paguro e l'attinia il primo è protetto dagli attacchi esterni grazie al veleno del celenterato, questo a sua volta è avvantaggiato dagli spostamenti del crostaceo);
- ✓ il **mutualismo**, in cui la cooperazione è essenziale per la sopravvivenza di entrambe le popolazioni. È il caso, ad esempio, dell'associazione alga-fungo dei licheni o di quella tra leguminose e batteri fissatori di azoto.

La recente scoperta di Lynn Margulis che le cellule dotate di nucleo (**eucariote**) sono evolute da processi di cooperazione e non di competizione tra batteri procarioti ci suggerisce uno spostamento di prospettiva a proposito dei meccanismi che guidano l'evoluzione. Da Darwin in poi gli scienziati del mondo occidentale hanno posto l'accento soltanto sul ruolo della competizione e della selezione naturale, mentre oggi si riconosce sempre meglio il ruolo della cooperazione nei processi evolutivi, intimamente legati alla tendenza creativa della vita.

I FATTORI INQUINANTI

Si è accennato prima ai fattori limitanti; generalmente questi fattori sono naturali, tuttavia l'accresciuta capacità dell'uomo di sfruttare in modo massiccio le risorse terrestri e le moderne attività produttive stanno alterando sensibilmente le condizioni naturali.

L'uomo, in sostanza, sta creando nuovi fattori limitanti; fra i più preoccupanti vi sono le **piogge acide**. Le piogge sono già di per sé debolmente acide, per la normale e naturale presenza di acido carbonico che deriva dal biossido di carbonio; tuttavia il grado di acidità è destinato ad aumentare sensibilmente in presenza di inquinamento atmosferico, in particolare per effetto degli ossidi di zolfo e di azoto emessi in grande quantità soprattutto dalle centrali termoelettriche, dalle caldaie, dagli altiforni e, più diffusamente, da tutti i motori a combustione interna. La ricaduta al suolo di questi ossidi, che si trasformano in acidi con il vapore acqueo presente nell'atmosfera, provoca effetti complessi e talora devastanti sul manto vegetale. Inoltre, quando piogge di questo tipo cadono in specchi d'acqua a ricambio lento, come molti laghi, i danni si trasmettono a tutti gli organismi acquatici presenti.

Un fenomeno che potrebbe anche avere una certa componente naturale, ma quasi sicuramente è l'effetto di un inquinamento di origine antropica, è il cosiddetto **buco dell'ozono**. L'ozono (ossigeno triatomico) è comunemente presente in atmosfera e concentrato in una fascia compresa tra i 15 e i 50 chilometri di quota. Questa fascia costituisce un filtro molto efficace per i raggi ultravioletti, dannosi per gli esseri viventi, sia vegetali sia animali.

Nel 1977, durante una campagna di misurazioni compiute in Antartide da meteorologi inglesi, relative alla composizione dell'atmosfera alle varie quote, venne individuato per la prima volta una specie di buco nell'involucro gassoso, cioè un ampio settore dove la concentrazione dell'ozono era fortemente ridotta; il fenomeno, che è stagionale e inizia a manifestarsi in genere nel mese di ottobre, con riduzioni fino al 40%, venne da allora tenuto sotto stretta osservazione.

Quali sono le cause del fenomeno? Una di esse è certamente costituita dall'azione di idrocarburi clorurati e fluorurati, i CFC, comunemente impiegati come propellenti nelle bombolette spray e negli impianti di refrigerazione. Questi composti, e non solo questi, sono in grado di distruggere i legami tra i tre atomi di ossigeno che compongono la molecola dell'ozono, formando semplice ossigeno e ossidi di cloro, che continuano a loro volta il processo distruttivo innescato.

Poiché le osservazioni del fenomeno sono piuttosto recenti e mancano quindi dati precedenti all'introduzione sul mercato dei prodotti ritenuti responsabili, non possiamo capire se questa anomalia è totalmente artificiale o se è invece in parte naturale, incrementata e accelerata dai CFC. La comunità internazionale nel 1987, con il Protocollo di Montreal, ha deciso di bandire l'impiego di questi prodotti; purtroppo questo provvedimento sarà totalmente operativo solo nell'anno 2000.

Un fenomeno naturale che viene incrementato da fattori antropici è il cosiddetto **effetto serra**. I gas che compongono l'atmosfera in parte riflettono e in parte lasciano passare la luce proveniente dal Sole. L'energia luminosa riscalda la superficie terrestre che irradia a sua volta calore sotto forma di raggi infrarossi. Questo calore viene in parte dissipato nello spazio, ma in parte resta intrappolato dall'atmosfera soprattutto per la presenza del biossido di carbonio, proprio come avviene nelle serre per la presenza di una copertura di vetro o di plastica. Se non ci fosse questo fenomeno, la temperatura dell'aria sarebbe molto più bassa (intorno ai -20°C al suolo) e la vita sul nostro pianeta non sarebbe

possibile, almeno nelle forme attuali. Tuttavia, a seguito delle attività umane, la percentuale di biossido di carbonio e di altri gas responsabili di questo effetto sta aumentando, con la conseguenza che aumenta pure il calore intrappolato. La causa principale di questa variazione è il massiccio incremento nell'utilizzo di combustibili fossili (petrolio, gas naturale o carbone) a partire dal secolo scorso. Nel 1850 il livello del biossido di carbonio era di 265 parti per milione, mentre ora si avvia a raggiungere le 350 parti per milione. L'aumento della temperatura atmosferica globale, per quanto piccolo, può portare alla fusione di una parte dei ghiacci terrestri e il conseguente innalzamento del livello marino, con effetti catastrofici diretti su tutti i territori costieri e con la cancellazione di intere regioni.

Le previsioni sul futuro non sono facili. In primo luogo è assai arduo stabilire percentualmente quale parte abbiano i fenomeni naturali (come l'immissione in atmosfera di biossido di carbonio nelle manifestazioni vulcaniche) e quale invece le immissioni gassose prodotte dall'uomo; poi non dobbiamo dimenticarci che sulle variazioni di temperatura e, più in generale del clima, agisce tutta una serie di fattori diversi, quali ad esempio fattori astronomici e fattori naturali; le eruzioni vulcaniche ad esempio possono talora produrre ceneri in quantità tale da ridurre la radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre. Tutto questo rende estremamente difficile formulare previsioni a lunga scadenza in cui si colloca anche l'effetto serra. Tuttavia anche se gli esperti non sempre concordano sui vari aspetti, è evidente che si deve fare ogni sforzo per ridurre gli effetti sicuramente legati alle attività umane.

L'uomo, oltre a produrre quantità sempre più imponenti di rifiuti di ogni genere che, nel migliore dei casi, sottraggono porzioni di territorio a una popolazione che sta sempre più stretta sul nostro pianeta, di tanto in tanto, in conseguenza di incidenti, riversa in atmosfera, in mare o al suolo prodotti che creano danni gravissimi e talora difficilmente rimediabili. Fra gli esempi più noti le nubi radioattive provenienti da centrali nucleari in avaria (come a Chernobyl nel 1986), i tanti sversamenti in mare di prodotti petroliferi in seguito al naufragio di navi cisterna, l'immissione in atmosfera di grandi quantità di prodotti tossici, come avvenne nel 1976 a Seveso con la diossina. Questo composto (o meglio famiglia di composti, le policlorodibenzodiossine, non tutte ugualmente tossiche) si sviluppa comunemente per combustione a temperature relativamente basse (intorno ai 300-350 °C) ogni qual volta si bruciano sostanze contenenti cloro, come rifiuti organici, alcune materie plastiche, ma anche normale legna e carbone; al di sopra di una certa soglia di concentrazione, come è avvenuto all'ICMESA in seguito a un guasto, la diossina provoca come effetto immediato gravi dermatiti (clo-racne), soprattutto sulla pelle delicata dei bambini.

DINAMICA DEGLI ECOSISTEMI

L'ecosistema non è un'unità statica, permanente, ma un'unità funzionale, dinamica. In esso convivono e interagiscono due modi fondamentali di esistere, tesi l'uno alla conservazione l'altro al cambiamento. Questa coesistenza, che può sembrare paradossale, in realtà esprime l'esigenza che in un sistema vivente, nonostante il rinnovarsi continuo delle componenti, le strutture e le funzioni rimangano sostanzialmente identiche. Questa persistenza è assicurata da un equilibrio dinamico tra la capacità di autoregolazione (e quindi di resistenza al cambiamento) e la capacità di variazioni adattative, in risposta alle perturbazioni provenienti dall'ambiente interno ed esterno. L'accumularsi di questi cambiamenti può determinare la crescita (o il declino) del sistema e può far emergere, in

tempi lunghi, processi di differenziazione evolutiva (comparsa di nuove proprietà, salti di livello organizzativo...), cioè la comparsa di nuove specie. Nella dinamica dell'ecosistema il tempo ha dunque un ruolo fondamentale poiché scandisce e orienta i flussi, i cicli, gli scambi di energia, materia e informazioni che sono alla base del suo funzionamento.

L'immagine di una freccia temporale suggerisce bene l'idea dello scorrere unidirezionale del tempo a cui sono soggetti tutti gli esseri viventi. Questa idea è collegata agli sviluppi della fisica termodinamica da cui sono emersi i concetti di entropia e di tempo irreversibile, strettamente connessi al 2° principio della termodinamica. Fermare il tempo è impossibile nei sistemi viventi che sembrano avere incorporato nelle strutture genetiche uno specifico orologio biologico, una loro freccia del tempo. Questa ha per tutti un duplice significato: scandisce la durata e i ritmi dei diversi processi vitali, relativi ai singoli individui o a intere popolazioni, ma, al tempo stesso, indica un orientamento secondo una direzione precisa, un percorso che è irreversibile.

A ben guardare nell'ecosistema operano e si intersecano dinamiche temporali differenti: i ritmi lentissimi dell'evoluzione terrestre, i ritmi variabili o periodici dei fenomeni biologici, le fasi più o meno convulse della storia dell'uomo e delle varie civiltà umane. Nello scenario dell'ecosistema, accanto all'immagine di una freccia temporale irreversibile, emerge dunque l'immagine complessa di una pluralità di tempi, di velocità, di sequenze che si intrecciano inestricabilmente tra di loro, rendendo difficile e incerta qualunque interpretazione definitiva e ogni previsione futura.

□ TEMPO GEOLOGICO

È importante entrare nella dimensione del tempo geologico per cogliere le modalità e le forze con cui è stato modellato l'ambiente fisico dell'ecosistema e per comprenderne meglio il funzionamento e le trasformazioni.

Su questa scala temporale emergono con maggior chiarezza i collegamenti tra la componente biotica dell'ecosistema e i vari fattori abiotici: geologici (varietà di minerali, rocce e suoli), morfologico-topografici, geografico-climatici. Queste variabili sono spesso collegate a processi lenti e grandiosi, che hanno le origini nella storia evolutiva del nostro pianeta (formazione della crosta, dell'atmosfera, dei continenti, delle catene montuose ecc.), i cui ritmi sono assai più ampi, in genere, della vita di un organismo o di una popolazione.

□ TEMPO BIOLOGICO

Su questa scala temporale si misurano i cicli vitali degli individui (nascita, riproduzione, morte) e i ritmi periodici di alcuni loro comportamenti, diurni o notturni, stagionali, annuali (fasi di attività e di riposo con il giorno e la notte, letargo invernale, migrazioni, cicli riproduttivi...).

A livello di popolazione la freccia temporale scandisce cicli vitali e ritmi periodici (come le migrazioni degli uccelli) paragonabili a quelli dei singoli individui.

Gli ecologi studiano la dinamica delle popolazioni di un ecosistema analizzando statisticamente le loro variazioni quantitative nel tempo. Riportando su un grafico cartesiano le due variabili significative – numero degli individui e unità di tempo – si ottiene una curva di crescita che possiede caratteristiche simili. Essa riflette un andamento, una tendenza comune a tutte le popolazioni dell'ecosistema, siano esse vegetali o ani-

mali. Raggiunto il punto più alto della curva di crescita, che corrisponde al massimo della densità di una popolazione, la velocità di crescita inizia lentamente a diminuire; subentrano infatti, nell'interazione tra i vari individui della stessa specie o nella competizione con le altre popolazioni, dei fattori "regolatori", limitanti, i più importanti dei quali sono la carenza di cibo e di spazio. Per molte specie animali l'eccessivo affollamento può risultare dannoso anche dal punto di vista psicologico – e quindi comportamentale – soprattutto nei casi in cui l'intervento antropico abbia alterato in modo più o meno significativo le condizioni naturali di vita.

Oggi siamo molto più consapevoli del fatto che le relazioni tra le varie popolazioni di un ecosistema – specie quando questo è poco diversificato – si basano su equilibri assai delicati; basta un modesto intervento per metterli in crisi, con effetti imprevedibili.

Anche l'intera comunità di un ecosistema è influenzata, nel suo sviluppo dinamico, dalla freccia del tempo biologico. Biocenosi diverse si susseguono infatti in una stessa area con l'andar del tempo; questo avvicendamento prende il nome di **successione ecologica**. È un processo generalmente lento, caratterizzato da intervalli di tempo talora secolari, corrispondenti a sequenze che vanno dalla fase di colonizzazione a uno stadio di relativa stabilità.

Durante le varie sequenze la comunità insediata nell'ecosistema interagisce con l'ambiente modificandone le condizioni originarie, rendendolo gradualmente adatto a ospitare un nuovo tipo di comunità.

In genere la successione ecologica prende avvio da un territorio rimasto privo di vita in cui alcune popolazioni vegetali "pioniere" costituiscono la prima biocenosi, grazie alla quale, a poco a poco, si forma un manto erboso, la **prateria**, che più tardi sarà sostituita dall'**arbusteto**, caratterizzato da arbusti e pochi alberi sparsi. Quando il suolo, grazie a questa comunità, sarà più ricco di humus, l'arbusteto potrà essere gradualmente sostituito da una vera e propria **foresta** in cui saranno dominanti le varie popolazioni di alberi.

È questa la comunità finale dell'ecosistema, più stabile delle precedenti, detta **climax** (☞): a essa corrisponde il massimo della varietà di specie vegetali e animali (☞ **biodiversità**).

☐ TEMPO STORICO

Nell'evoluzione della biosfera lo scenario inizia a cambiare velocemente nel momento in cui, tra le varie specie di mammiferi che popolano la Terra, appare la specie umana. Essa si è integrata nei vari ecosistemi terrestri dimostrando elevate capacità di adattamento ma, al tempo stesso, ha iniziato a costruire un proprio ambiente sociale, espressione dello sviluppo storico e culturale delle sue varie civiltà. A questo complesso fenomeno si accompagna una temporalità particolare, non riconducibile alle precedenti, caratterizzata da ritmi veloci, spesso accelerati, propri delle dinamiche economiche, tecnologiche, storiche; una temporalità decisamente asimmetrica rispetto ai tempi della natura, della biologia, da cui dipende in gran parte l'attuale crisi dell'ambiente.

La posizione dell'uomo negli ecosistemi è duplice: egli, come "fattore antropico", è artefice di interventi sempre più rapidi e di trasformazioni spesso avventate nei confronti della natura, ma, al tempo stesso, è il testimone e l'interprete, sempre più cosciente e responsabile, dello stato dell'ambiente e dei suoi problemi.

È il solo dunque che può fare dei progetti per il futuro mirati alla salvaguardia sia dell'equilibrio biologico sia della sopravvivenza della specie umana.

BIBLIOGRAFIA

□ TESTI CONSULTATI

- AA. VV., *Dizionario dell'ambiente* (a cura di Gamba G. & Martignetti G.), ISEDI, UTET, 1995
- AA. VV., *La sfida della complessità* (a cura di Bocchi G. & Ceruti M.), Feltrinelli, Milano, 1985
- AA. VV. - SCUOLAMBIENTESVILUPPO, *Idee e materiali per l'educazione ambientale*, FNISM - Scholé, Torino, 1989
- BATESON G., *Mente e natura*, Adelphi, Milano, 1984
- BATESON G., *Verso un'ecologia della mente*, Adelphi, Milano, 1976
- BOCCHI G. & CERUTI M., *Origini di storie*, Feltrinelli, Milano, 1983
- BRESSO M., *Pensiero economico e ambiente*, Loescher, Torino, 1982
- CAPRA F., *La rete della vita*, Rizzoli, Milano, 1997
- CHAPMAN L. & REISS M. J., *Ecologia - Principi e applicazioni*, Zanichelli, Bologna, 1994
- CINI M., *Un paradiso perduto*, Feltrinelli, Milano, 1994
- DE ROSNAY J., *Il macroscopio*, Dedalo Libri, Bari, 1977
- LOVELOCK J. E., *Gaia - Nuove idee sull'ecologia*, Bollati Boringhieri, Torino, 1981
- MC COMBS L. W. & ROSA M., *Cos'è l'ecologia*, Loescher, Torino, 1978
- MORIN E., *Il pensiero ecologico*, Hopefulmonster, Firenze, 1988
- ODUM E. P., *Principi di ecologia*, Piccin, Padova, 1973
- TIEZZI E., *Tempi storici, tempi biologici - La Terra o la morte - I problemi della nuova biologia*, Garzanti, Milano, 1984
- RICKLEFS R. E., *Economia della natura*, Zanichelli, Bologna, 1978.

□ LETTURE CONSIGLIATE

- AA. VV., *Guida pratica all'ecologia*, Zanichelli, Bologna, 1987
- AA. VV., *Atti dei seminari di Didattica delle Scienze della natura 1991 - Giochi di ruolo e di simulazione nell'educazione scientifica* (a cura di Calcagno C. & Camino E.), CLU, Torino, 1992
- AA. VV., *Alfabeti per l'ecologia* (Collana diretta da Tiezzi E.), Giunti Marzocco, Milano, 1991
- *Entropia e dintorni*
 - *I limiti biofisici del pianeta*
 - *La fotosintesi e la sua storia*
 - *Il Sole e l'energia solare*
 - *Nord-Sud. Ambiente e sottosviluppo*
 - *Ecologia delle città e dell'urbanizzazione*
 - *Il problema demografico*
 - *Uomo, società e ambiente nell'evoluzione*
 - *Agricoltura, energia, sviluppo*
 - *L'evoluzione e la storia del pensiero evoluzionistico*
 - *L'energia*
- BADINO G., FORNERIS G. & PEROSINO G., *Ecologia dei fiumi e dei laghi*, EDA, Torino, 1991
- CAMINO E. & CALCAGNO C., *Un livido giorno di pioggia*, Gioco di ruolo sulle piogge acide, Ed. Gruppo Abele, Torino, 1992
- CAMINO E. & CALCAGNO C., *Cerca l'acqua sotto terra, ferma l'acqua fermando la terra*, Gioco di ruolo su acqua e erosione nel Sahel, Ed. Gruppo Abele, Torino, 1991
- CAMINO E. & CALCAGNO C., *La foresta è una somma di alberi... o no?*, Gioco di ruolo, Ed. Gruppo Abele, Torino, 1994
- CARSON A., *Primavera silenziosa*, Feltrinelli, Milano, 1963

- COMMONER B., *Il cerchio da chiudere*, Garzanti, Milano, 1972
FNISM - GRUPPO AMBIENTE, *I rifiuti, un problema di tutti*, Gioco di Ruolo
sullo smaltimento dei rifiuti, Ed. Gruppo Abele, Torino, 1993
GOULD S., *La vita meravigliosa*, Feltrinelli, Milano, 1989
GOULD S., *La freccia del tempo - Il ciclo del tempo*, Feltrinelli, Milano,
1989
MERCHANT C., *La morte della natura*, Garzanti, Milano, 1988
MORPURGO G., *Dalla cellula alle società complesse*, Bollati Boringhieri,
Torino, 1985
SATHOURIS E., *La danza della vita - Gaia, dal caos al cosmo*, Scholé
Futuro, FNISM, Torino, 1991
SCHUMACHER E. F., *Piccolo è bello*, Mondadori, Milano, 1978
VANDANA SHIVA, *Sopravvivere allo sviluppo*, ISEDI, Petrini, Torino, 1990.