- criosfera (ghiacci marini, calotte glaciali, ghiacciai),
- atmosfera,
- biosfera [8].

Le numerose e intrecciate interazioni tra questi elementi producono il clima e la sua evoluzione. A queste interazioni, soprattutto dopo la rivoluzione industriale, dobbiamo aggiungere l'influsso delle attività umane. Uno schema semplificato del "Sistema Terra" e delle relazioni tra i suoi elementi è riportato in figura 3.

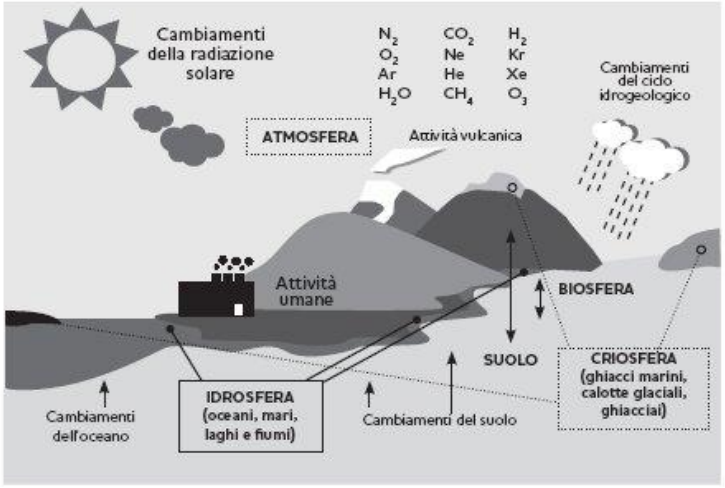


Fig. 3 – *Il clima è il risultato delle relazioni tra atmosfera e altri elementi del "Sistema Terra".*

Sebbene i fenomeni che determinano la dinamica del clima siano molteplici e complessi, la loro causa prima è unica: la radiazione solare [9] che riscalda la superficie terrestre. La superficie terrestre, a sua volta, trasmette il calore all'aria circostante. La quantità di radiazione solare assorbita dalla Terra varia da un punto all'altro del pianeta a seconda di molti fattori come il periodo dell'anno, la latitudine, la costituzione della superficie terrestre, ecc. Ad esempio, nelle zone temperate dell'emisfero nord, luglio è più caldo di gennaio, le regioni polari sono più fredde di quelle equatoriali e l'escursione termica giorno-notte di un'isola sarà inferiore a quella di un deserto a causa dell'azione mitigatrice del mare (rispetto al suolo desertico, l'acqua che circonda l'isola ha una capacità maggiore di immagazzinare l'energia solare di giorno e di rilasciare il calore di notte).

Queste diversità di assorbimento dell'energia solare da un punto all'altro del pianeta provocano differenze di temperatura che tendono a essere bilanciate dal trasporto di calore associato ai movimenti delle masse d'aria e alle correnti oceaniche. Il clima di una regione può essere quindi pensato come lo stato di equilibrio tra il flusso di energia in entrata e quello in uscita.

Consideriamo, ad esempio, l'energia ricevuta dal Sole da aree uguali di superficie terrestre a varie latitudini: è evidente che è inferiore ai poli che all'equatore (Fig. 4.1, in alto). Ai poli, infatti, i raggi solari incidono obliquamente, mentre all'equatore sono perpendicolari al suolo. Inoltre, nelle regioni polari, al contrario di quelle equatoriali, l'energia emessa dalla Terra sotto forma di raggi infrarossi [10] è superiore a quella ricevuta dal Sole come luce visibile (Fig. 4.1, in basso).

[8] Per biosfera intendiamo l'insieme degli esseri viventi.

[9] Il contributo energetico dovuto ai processi geotermici e nucleari terrestri è trascurabile.

[10] La Terra, come qualsiasi oggetto, emette radiazione, in accordo con le leggi del "corpo nero".

sia all'interno dei singoli sottosistemi del "Sistema Terra", sia nei processi di scambio tra questi ultimi. Vediamo solo un esempio, aiutandoci con la figura 12.

Partiamo da una causa prima: diciamo di far aumentare un po' la temperatura dell'aria (e magari quella dei mari): se ragioniamo a livello globale, è esattamente ciò che è successo negli ultimi decenni… Cosa accade allora nel sistema climatico?

Riferendoci alla parte sinistra della figura 12 possiamo dire che sicuramente questo innalzamento di temperatura tende a far sciogliere una certa quantità di ghiacci. Ma allora una certa porzione di superficie della Terra (sia essa terrestre o marina) "cambia colore": da bianca diventa più scura. Ciò significa che nella nuova situazione aumenta l'assorbimento della radiazione solare da parte della superficie (in termini tecnici si dice che diminuisce l'albedo superficiale). Questa superficie dunque si riscalda di più e, a sua volta, tende a far aumentare anche la temperatura dell'aria sovrastante.

Il risultato netto è che siamo partiti da una causa prima, abbiamo seguito una catena di effetti e l'ultimo effetto (il cambiamento nell'albedo superficiale) è andato a "retroagire" sulla causa prima, determinando un ulteriore aumento della temperatura. Quando si parte da un cambiamento, e una catena chiusa (un *loop*) di effetti come quella descritta porta a un'amplificazione di questo cambiamento, allora si dice che siamo in presenza di un "*feedback* positivo". Vorremmo far notare che questo meccanismo porta a destabilizzare il sistema, in quanto lo fa allontanare ancor più dal suo stato iniziale (in questo caso dalla temperatura iniziale prima del cambiamento/causa prima).

Ma l'aumento iniziale di temperatura ha anche altre conseguenze… Ad esempio, aumenta l'evaporazione di mari e oceani (freccia verticale diretta verso il basso). Ma con un'evaporazione aumentata si rende disponibile una maggiore quantità di vapor d'acqua in atmosfera. E il vapor d'acqua è un potente gas a effetto serra: ciò significa che esso contribuisce a intrappolare il calore in atmosfera. Ecco quindi che la maggiore concentrazione di vapor d'acqua tende a far aumentare ulteriormente la temperatura. Abbiamo trovato un altro *feedback* positivo.

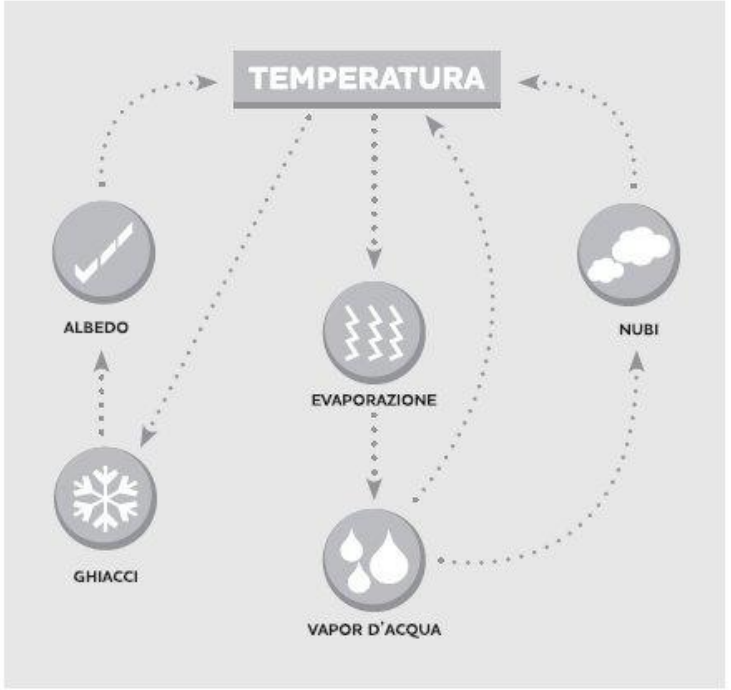


Fig. 12 – *Tre processi di* feedback *nel sistema clima.*

Attenzione, però: in figura, dal vapor d'acqua partono due frecce! Infatti, se aumenta il vapor d'acqua aumenta anche la possibilità di formazione di nubi che si creano tramite la sua condensazione. Ma le nubi in aggiunta fanno da scher-

niera dinamica ai mutamenti dell'ambiente esterno. In particolare, riferendosi alla figura 18, si possono identificare tre "strategie" con cui gli animali rispondono alle variazioni climatiche in atto e probabilmente risponderanno in futuro ai nuovi cambiamenti climatici. È interessante esaminarle con un po' di dettaglio.

La prima è una vera e propria "fuga" dal riscaldamento globale e consiste nel cambiamento dei cosiddetti areali, cioè degli spazi geografici in cui la specie è presente e interagisce con l'ecosistema. E infatti molte specie, anche non migratorie, si stanno già spostando: o per effetto diretto di cambiamenti climatici (ad esempio per l'aumento della temperatura nell'areale originario), o per qualche effetto indiretto, ad esempio perché le variazioni climatiche fanno spostare altre specie di cui si nutrono. Ovviamente è più facile utilizzare questa strategia in mare, dove non vi sono particolari barriere naturali o antropogeniche a ostacolare i movimenti, piuttosto che sulla terra: per questo oggi troviamo tanti pesci originari del Mar Rosso sui banchi dei nostri pescivendoli. Tuttavia, anche gli ecosistemi terrestri sono coinvolti in questi spostamenti…

Una seconda strategia di risposta ai cambiamenti climatici consiste nell'adattarsi *in loco*. In questo caso l'adattamento può essere di tipo plastico, con modificazioni del "comportamento" (inteso in senso lato), o addirittura di tipo genetico. Il secondo caso dovrebbe farci assistere a una microevoluzione da una generazione a generazioni successive. È chiaro che questo meccanismo evolutivo richiede più tempo rispetto alla risposta plastica: nonostante ciò, già in pochi decenni si sono riscontrati esempi di cambiamenti nel corredo genetico di determinati animali per mutazioni che rendono alcune specie più adatte al nuovo "ambiente climatico".

La risposta adattativa plastica presenta varie opzioni.

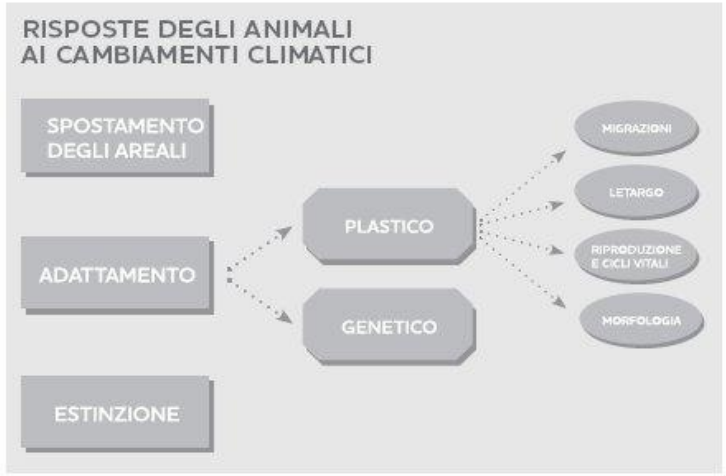


Fig. 18 – *Le strategie di risposta degli animali ai cambiamenti climatici.*

Per quegli animali che compiono migrazioni annuali si è riscontrata una generale tendenza ad arrivi primaverili anticipati, soprattutto per i migratori a corta distanza.

Un'altra strategia adattativa che permette agli animali di risparmiare energia in condizioni di *stress* (temperature basse o scarsità di cibo) è il letargo. Anche qui si sono osservati spesso risvegli primaverili anticipati, dovuti principalmente all'aumento della temperatura (in particolare delle minime notturne). Questi risvegli anticipati, però, possono portare con sé dei problemi: ad esempio, si è visto che alcune marmotte negli USA si svegliano dal letargo quando ancora sul terreno c'è neve e le piante di cui si nutrono non sono ancora presenti.

Anche la riproduzione e i cicli vitali sono risultati alterati dal precoce inizio della primavera! Pure qui, però, l'eventua-