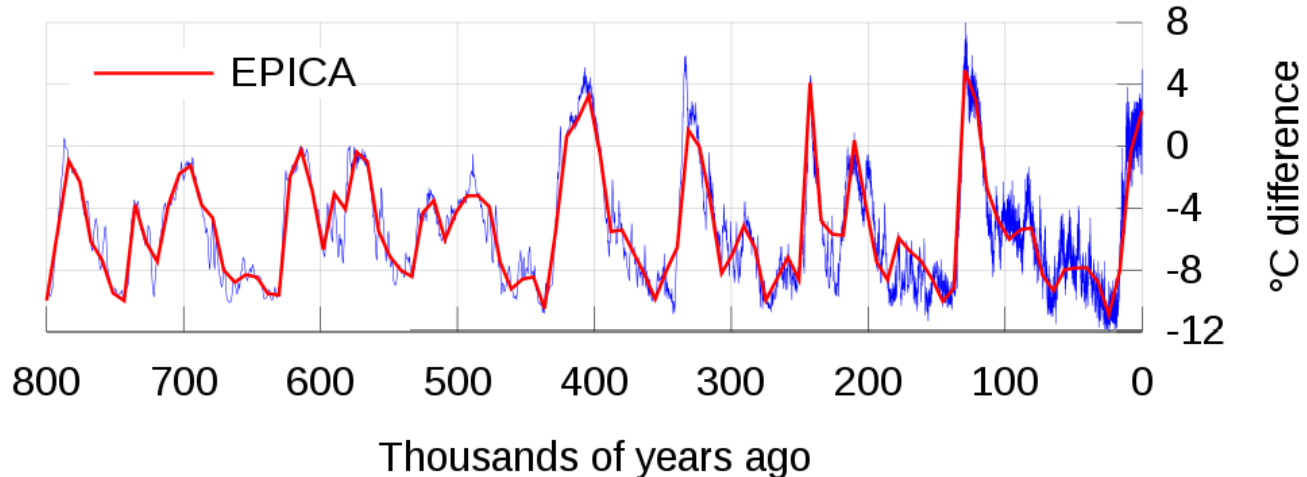
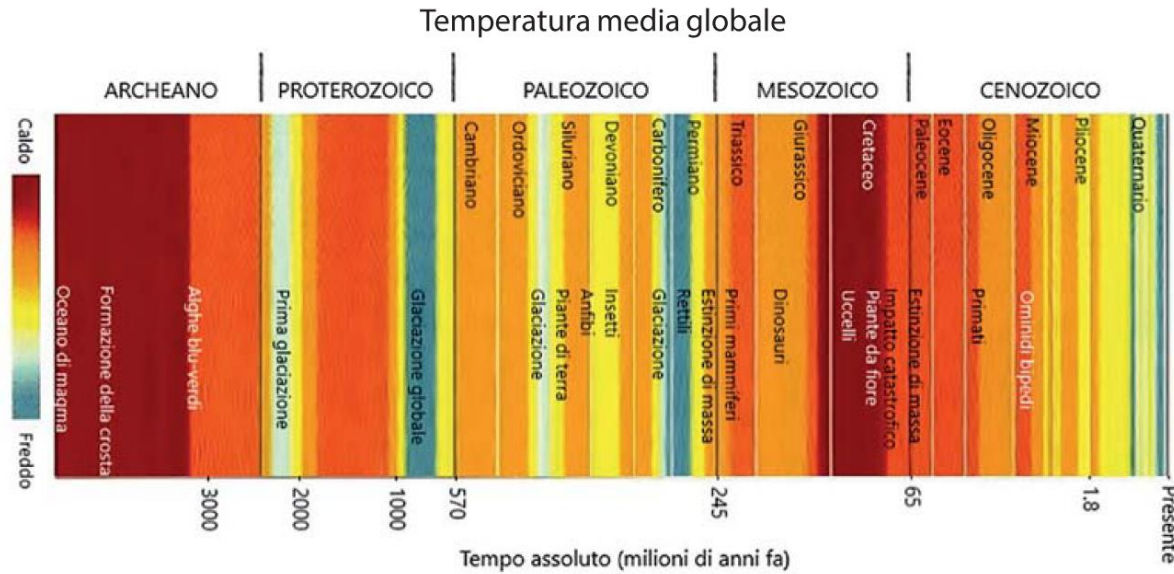


La variabilità climatica e i feedback

Ringraziamenti:

- Stefano Tibaldi (dispense Cà Foscari A.A. 2019-20)
- AA.VV. (UniTo) - Lessico e Nuvole: le parole del cambiamento climatico – 2020
- C. Cassardo et al. - Temporalità e tornado – cap. 1, 2021 – Ed. AlphaTest

La variabilità del clima

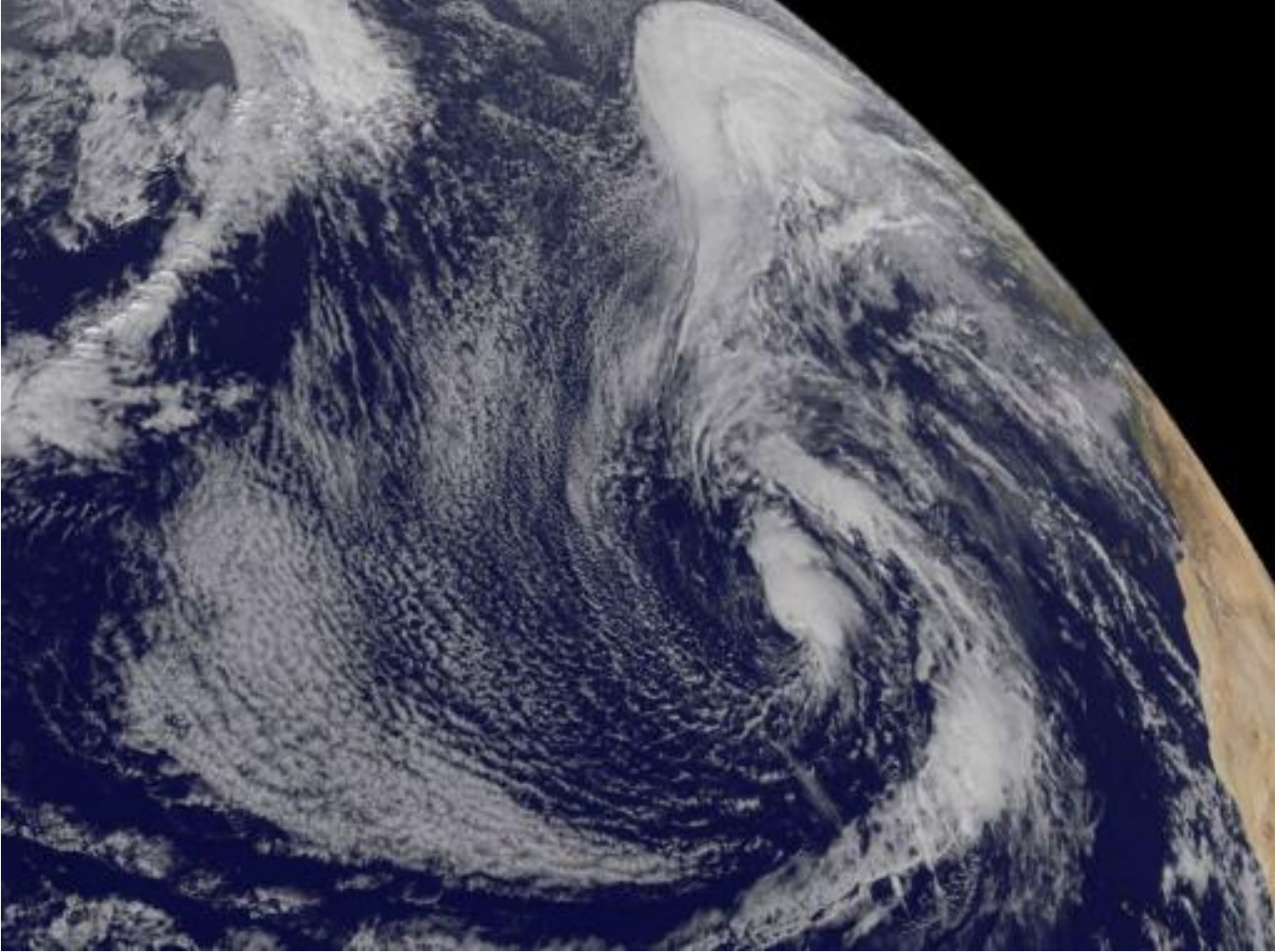


➤ Il clima della terra ha due proprietà apparentemente in contrasto tra loro:

□ **Non è mai fisso, ma le variabili “importanti” rimangono in un intervallo limitato**, che da tre miliardi di anni circa ha reso possibile la vita (anche se in forme diverse da quelle che conosciamo)

➤ **Perché il clima sulla terra varia, e perché non varia troppo?**

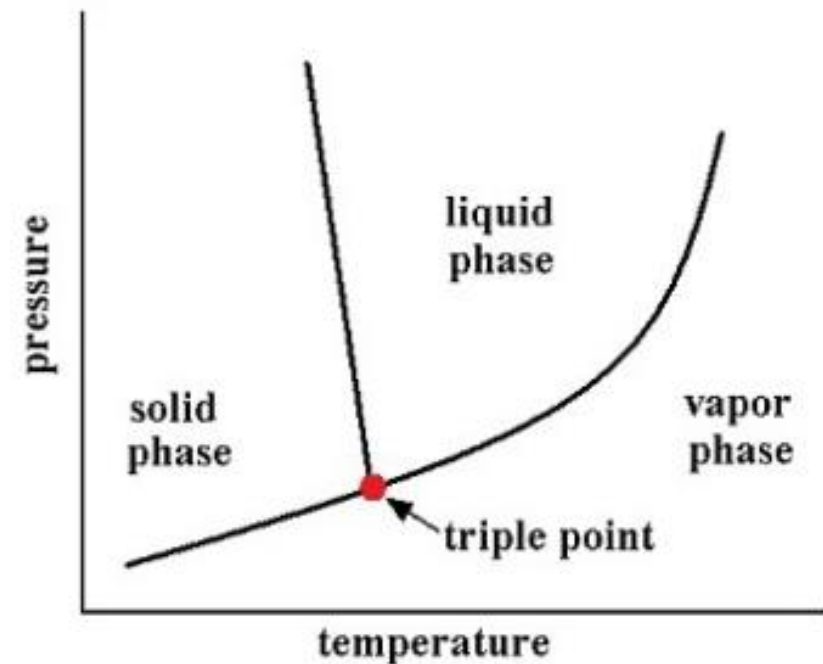
Perché il clima terrestre varia, ma «non troppo»?



- La Terra **possiede un involucro fluido che la circonda (atmosfera + oceano).**
- Atmosfera e oceano permettono una redistribuzione efficace del calore (attraverso i venti e la circolazione atmosferica, e le correnti oceaniche) dalle regioni dove c'è un accumulo di calore (basse latitudini) a quelle dove c'è un deficit (alte latitudini)

Perché il clima terrestre varia, ma «non troppo»?

- Sulla Terra le condizioni sono quelle prossime al **punto triplo dell'acqua**, in cui fase solida, liquida e gassosa coesistono
- Ciò dà luogo a passaggi di fase con conseguente rilascio e assorbimento di calore latente e a tutta la termodinamica che ne consegue
- L'acqua nelle sue varie forme circola attraverso il sistema dando luogo al **ciclo idrologico**, che **influenza ed è influenzato dal clima stesso**
- La Terra è popolata da esseri viventi (tra cui l'uomo) → l'interazione clima-biosfera è a doppio senso!
 - Effetti climatici indotti dalla vegetazione terrestre (retroazione albedo-precipitazione, evapotraspirazione-precipitazione, ondate di calore)
 - Contributo degli ecosistemi marini alle interazioni e retroazioni fra clima e biosfera (acidificazione oceani e CO₂)
 - Produzione di sostanze volatili e aerosol di origine biogenica che determinano la composizione e concentrazione degli aerosol atmosferici e hanno un effetto sulle nubi
 - Coevoluzione clima-biosfera → ipotesi di Gaia



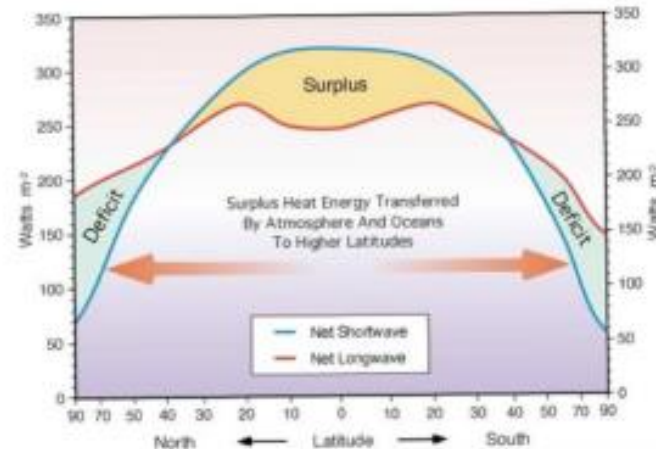
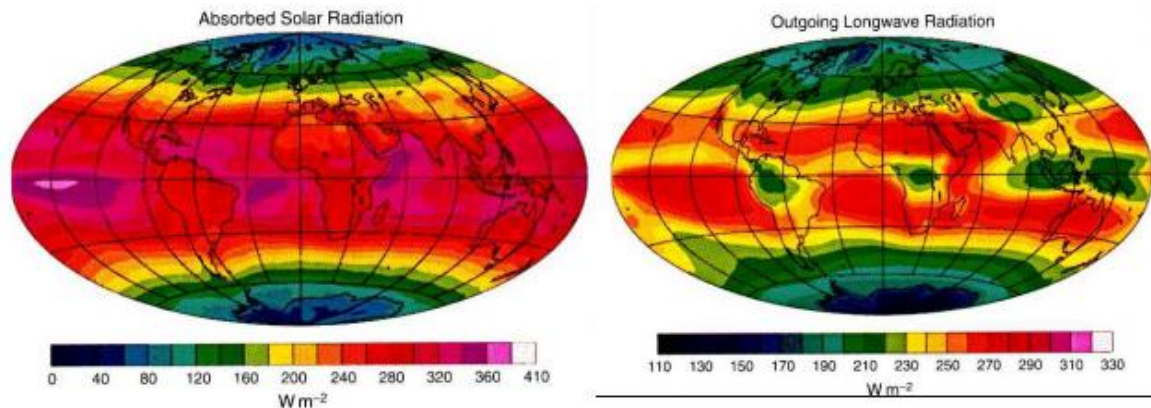
La variabilità del clima

- La variazione nello stato medio e in altre statistiche (deviazione standard, occorrenza degli estremi, etc.) che descrivono il clima su tutte le scale al di là di quelle dei singoli eventi meteorologici (def. IPCC)
- Il clima evolve e cambia a causa di:

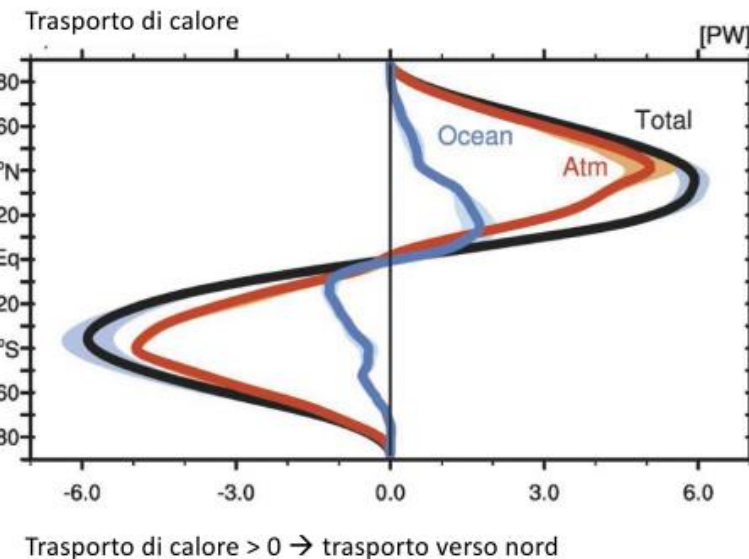
Variazioni dovute alla propria dinamica interna o all'azione di fattori (FORZANTI) che possono essere di origine naturale o antropica

Variazioni causate dall'azione di fattori esterni, che sostanzialmente modificano gli input del sistema

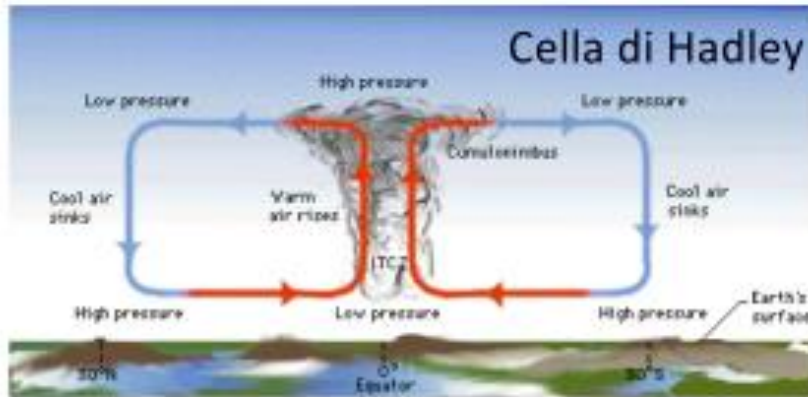
La variabilità interna: trasporto di calore



- Il calore viene redistribuito dalle basse alle alte latitudini grazie ai processi di trasporto nell'atmosfera (venti) e nell'oceano (correnti).
- Le differenze di temperatura tra equatore e poli sono molto più limitate di quello che sarebbero in assenza di atmosfera e oceani



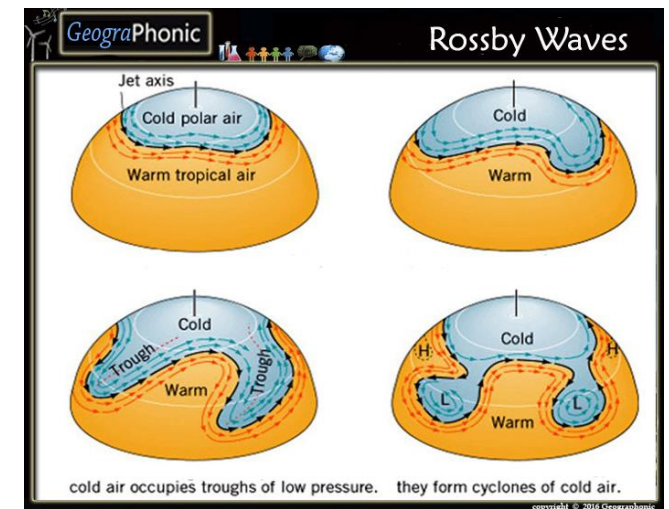
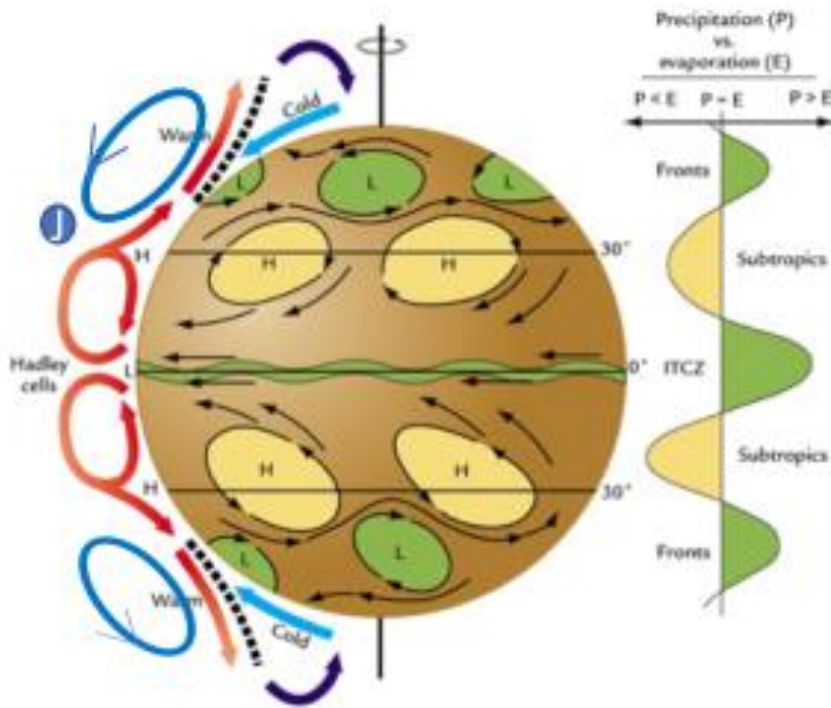
La variabilità interna: circolazione atmosferica



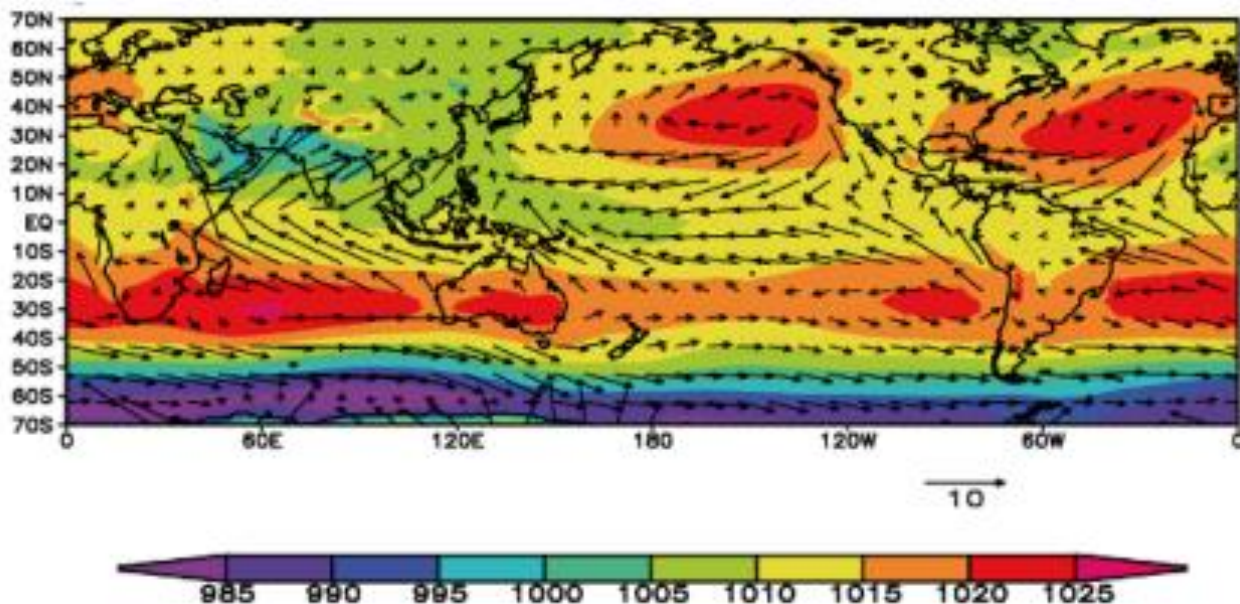
TROPICI: All'equatore, l'alta temperatura al suolo fa sì che l'aria, poco densa, salga. Ad alta quota l'aria comincia a muoversi verso le latitudini maggiori. Al suolo, la salita di aria all'equatore richiama aria dalle latitudini maggiori. La rotazione terrestre fa sì che tale cella si chiuda ridiscendendo verso la superficie a circa 30° latitudine → **CELLA di HADLEY**

EXTRATROPICI: la circolazione zonale è dominata alla superficie da venti che provengono da OVEST (westerly winds) che trasportano sistemi di alta e bassa pressione che regolano l'alternarsi del tempo meteorologico alle medie latitudini.

La circolazione meridionale è dominata dalla **cella di Ferrel**, una cella più debole rispetto a quella di Hadley – inoltre compaiono delle ondulazioni dette **onde di Rossby**



La variabilità interna: circolazione atmosferica

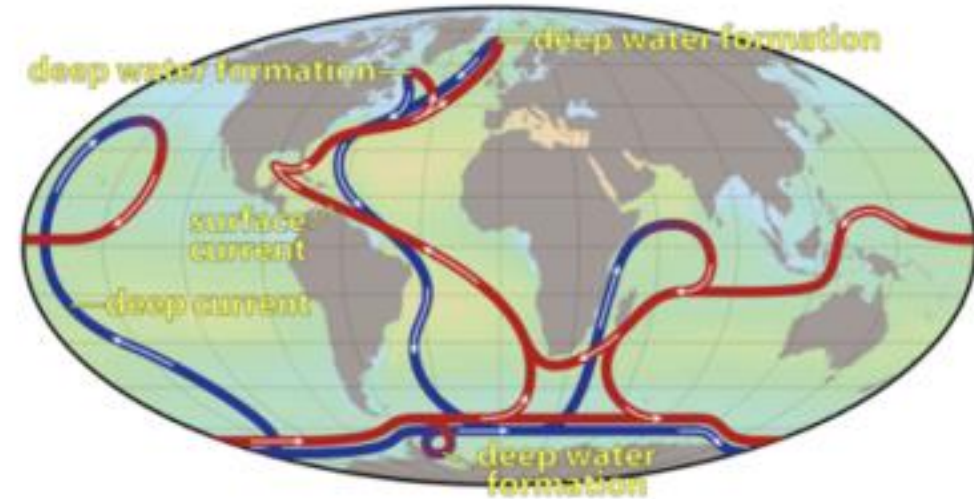
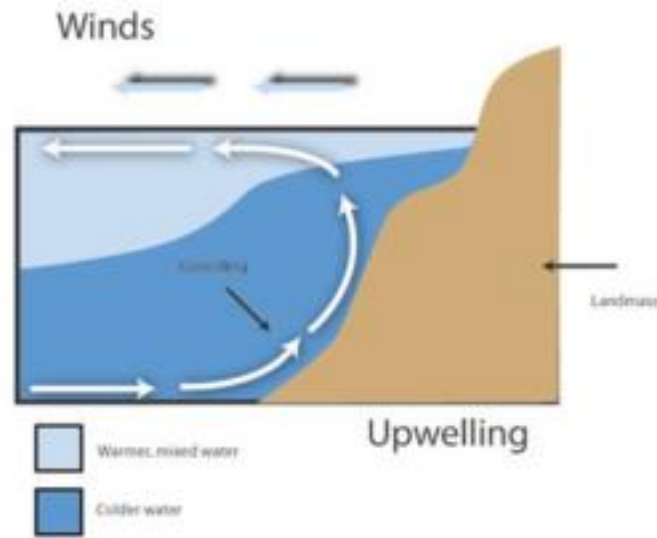


Ai tropici, la convergenza dei venti superficiali e l'ascesa verticale dell'aria non avvengono esattamente sopra l'equatore ma in un fascia chiamata ITCZ che, a causa della geometria dei continenti e alle correnti oceaniche, è posizionata attorno ai 5° di latitudine (e oscilla durante l'anno)

La pressione superficiale e i venti sono strettamente legati tra loro: nell'emisfero nord, i venti ruotano in senso orario attorno a un sistema di alta pressione e in senso antiorario attorno a un sistema di bassa pressione (il contrario avviene nell'emisfero sud). La circolazione è vicina a quello che viene definito **equilibrio geostrofico (bilanciamento tra la forza di Coriolis e il gradiente di pressione).**

Alle medie latitudini, i venti (**westerlies**) sono associati ad alta pressione nei subtropici (ad esempio sopra le Azzorre) e bassa pressione attorno a 50-60° di latitudine (ad esempio sopra l'Islanda).

La variabilità interna: circolazione oceanica



➤ Correnti profonde guidate da variazioni nella DENSITÀ dell'acqua

- ❑ la densità varia in funzione della **temperatura** e della **salinità** (Circolazione Termoalina).
- ❑ Caratterizzate da scale di tempo lunghe, dalle decine alle migliaia di anni)

➤ Correnti superficiali guidate dai venti.

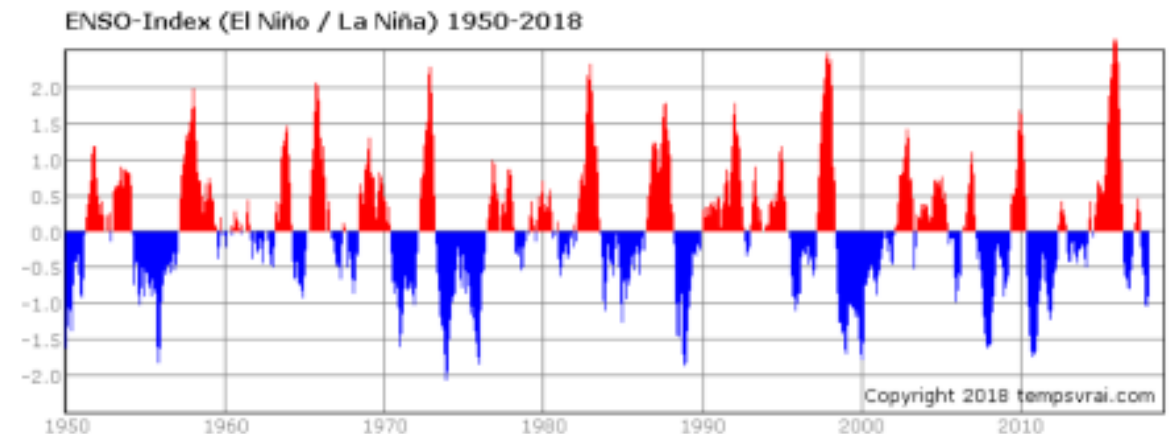
- ❑ Il loro pattern è determinato dalla **direzione del vento**, dalla **forza di Coriolis** e dalla **posizione delle terre emerse**
- ❑ Sono correnti calde, e si muovono verso le alte latitudini (es., corrente del Golfo)

La variabilità interna: teleconnessioni

- **Pattern o «schemi di circolazione» atmosferici, chiamati anche *modi di variabilità a scala sinottica* (da centinaia a migliaia di km) a bassa, media e alta frequenza.** Sono espressione di parte della variabilità meteorologica e climatica (variabilità interna) ma possono cambiare per effetto dell'innalzamento della temperatura globale.
- **La dinamica della teleconnessione è ciclica:** ogni fase della loro oscillazione si associano, statisticamente sulla regione interessata, **precise condizioni atmosferiche che riescono ad influenzare le condizioni meteo-climatiche di regioni molto distanti dalla sede della teleconnessione stessa.** Le teleconnessioni agiscono su scala emisferica o addirittura globale teleconnettendo punti tra loro distanti migliaia di km.

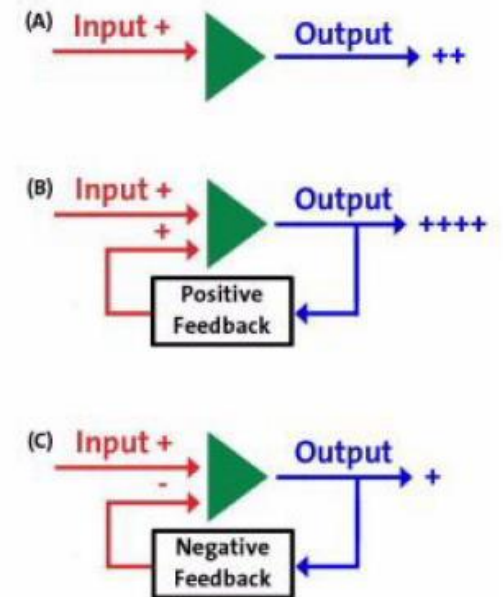
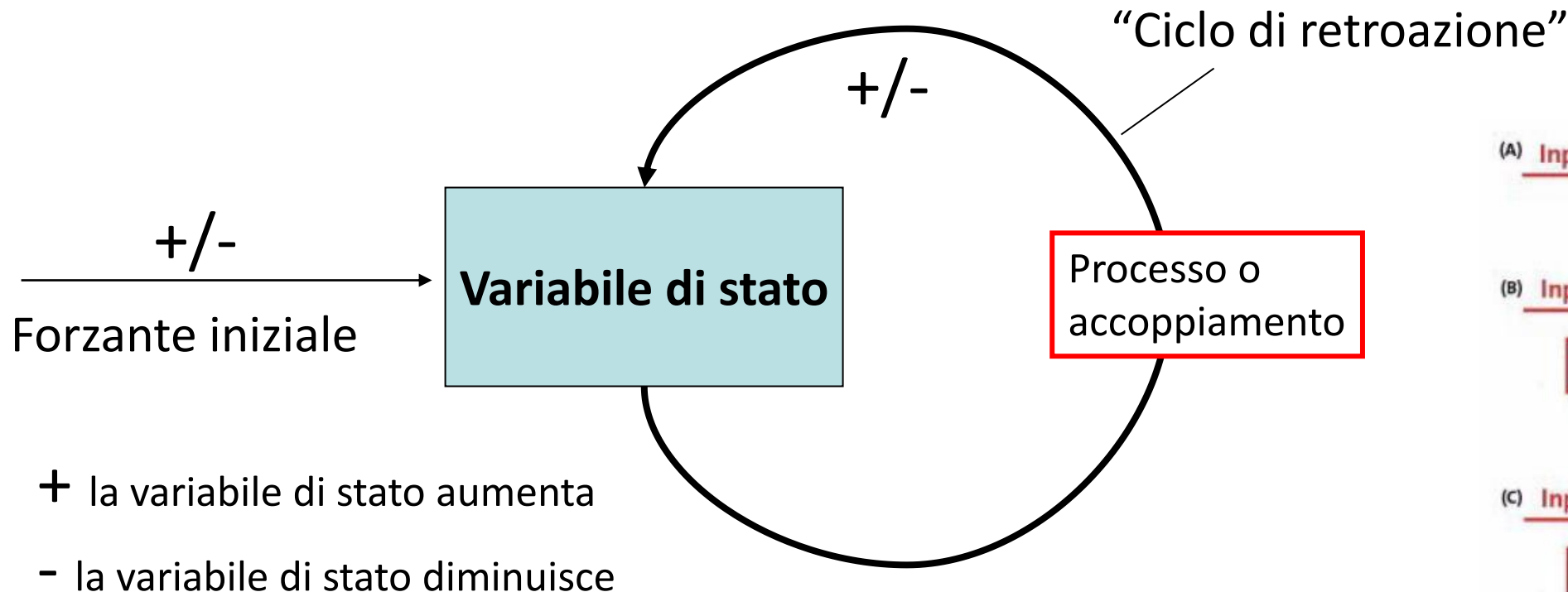
Ogni teleconnessione è caratterizzata da un indice variabile che si usa per quantificare la fase e la sua intensità.

Due esempi di teleconnessione sono **ENSO (El Niño)** (teleconnessione del sistema accoppiato atmosfera-oceano) e **NAO** (teleconnessione atmosferica).



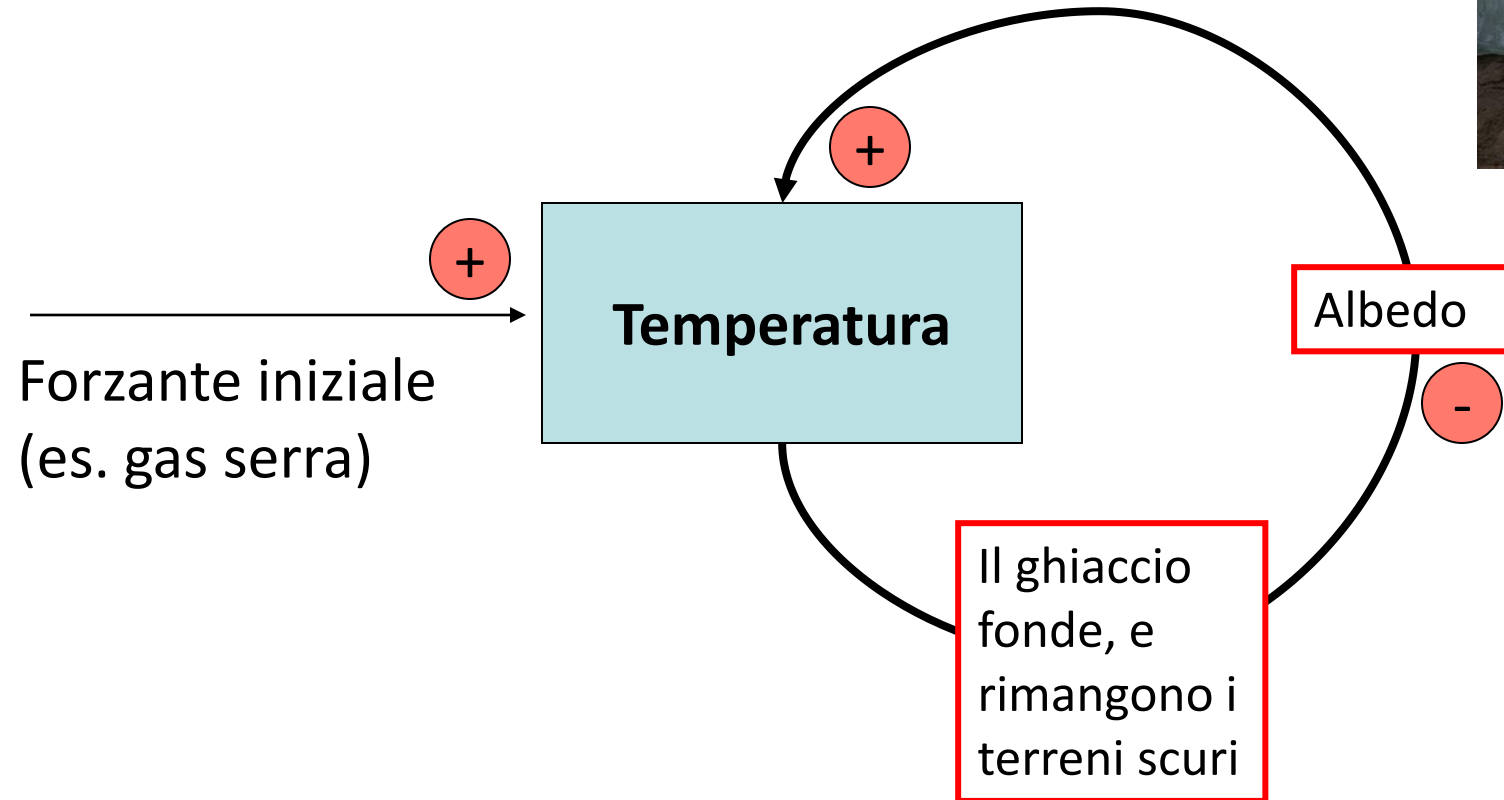
Le retroazioni (feedback)

- Cicli di causa ed effetto che amplificano o smorzano l'effetto iniziale di una forzante
- In genere coinvolgono più sottosistemi o componenti accoppiati da una variabile di stato



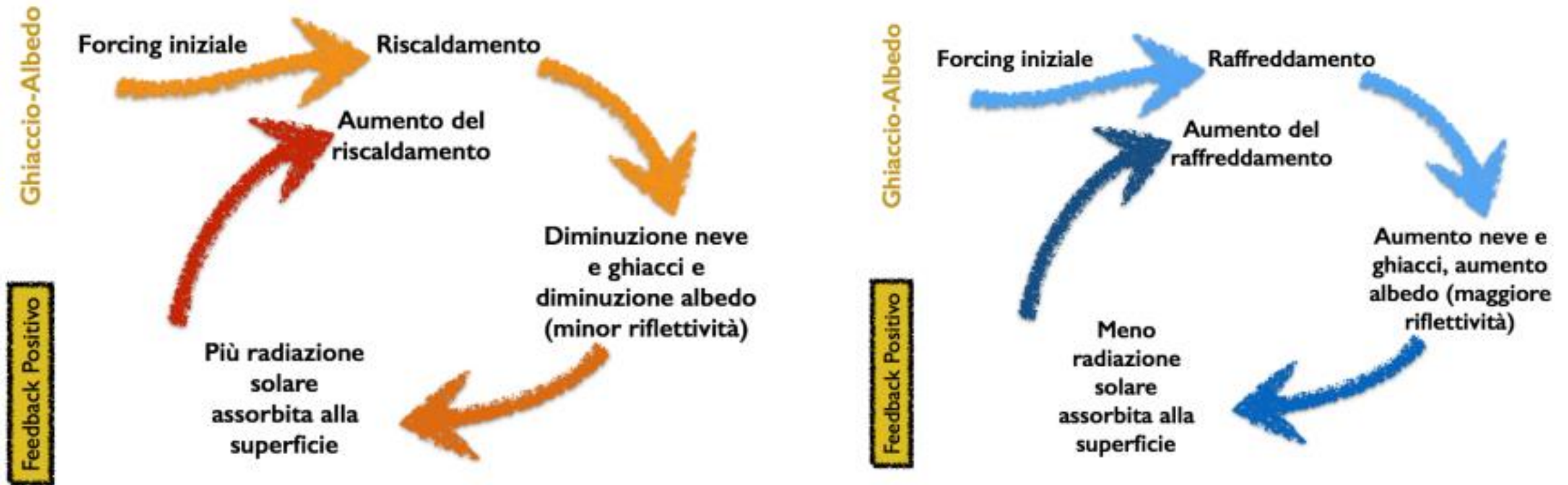
Il feedback ghiaccio - albedo

Esempio di feedback positivo



Cosa succede se la forzante iniziale causa una diminuzione della temperatura?

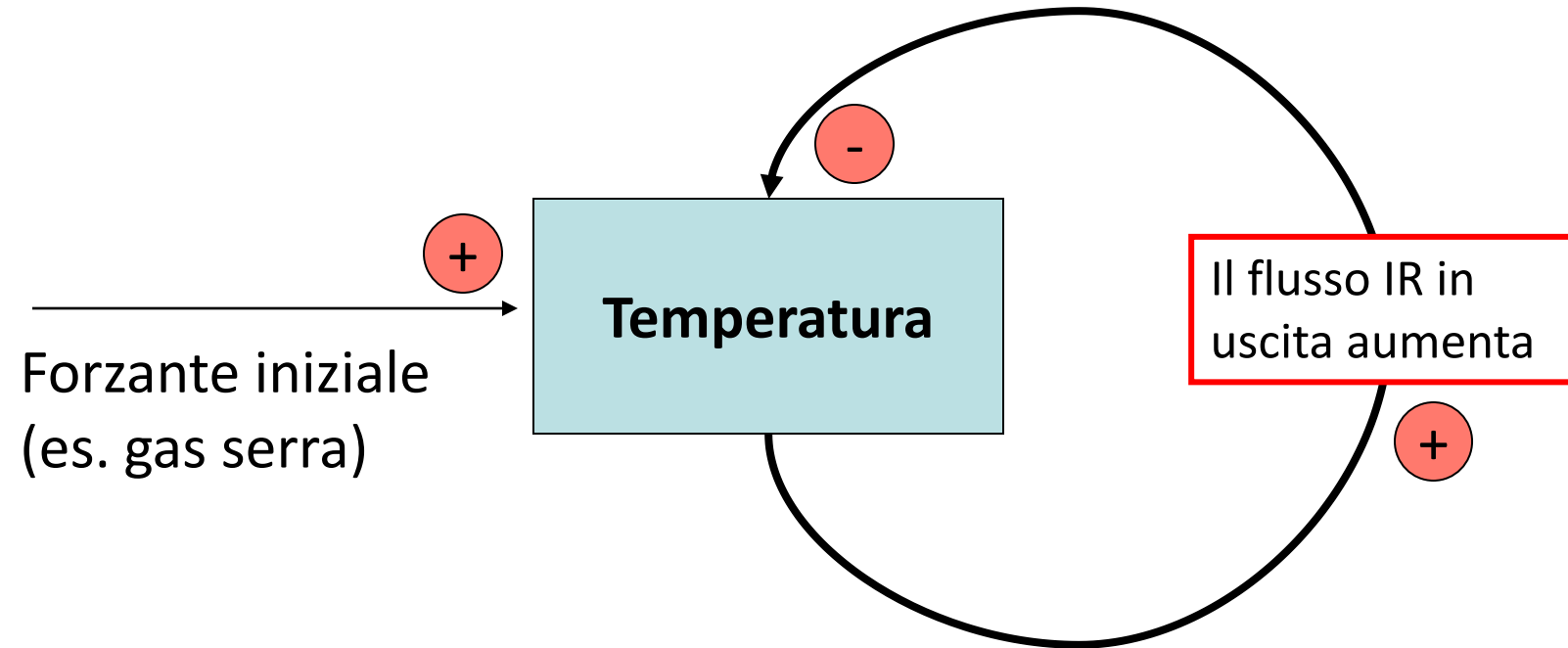
Il feedback ghiaccio - albedo



Il feedback rimane positivo (la diminuzione della temperatura si rafforza!)

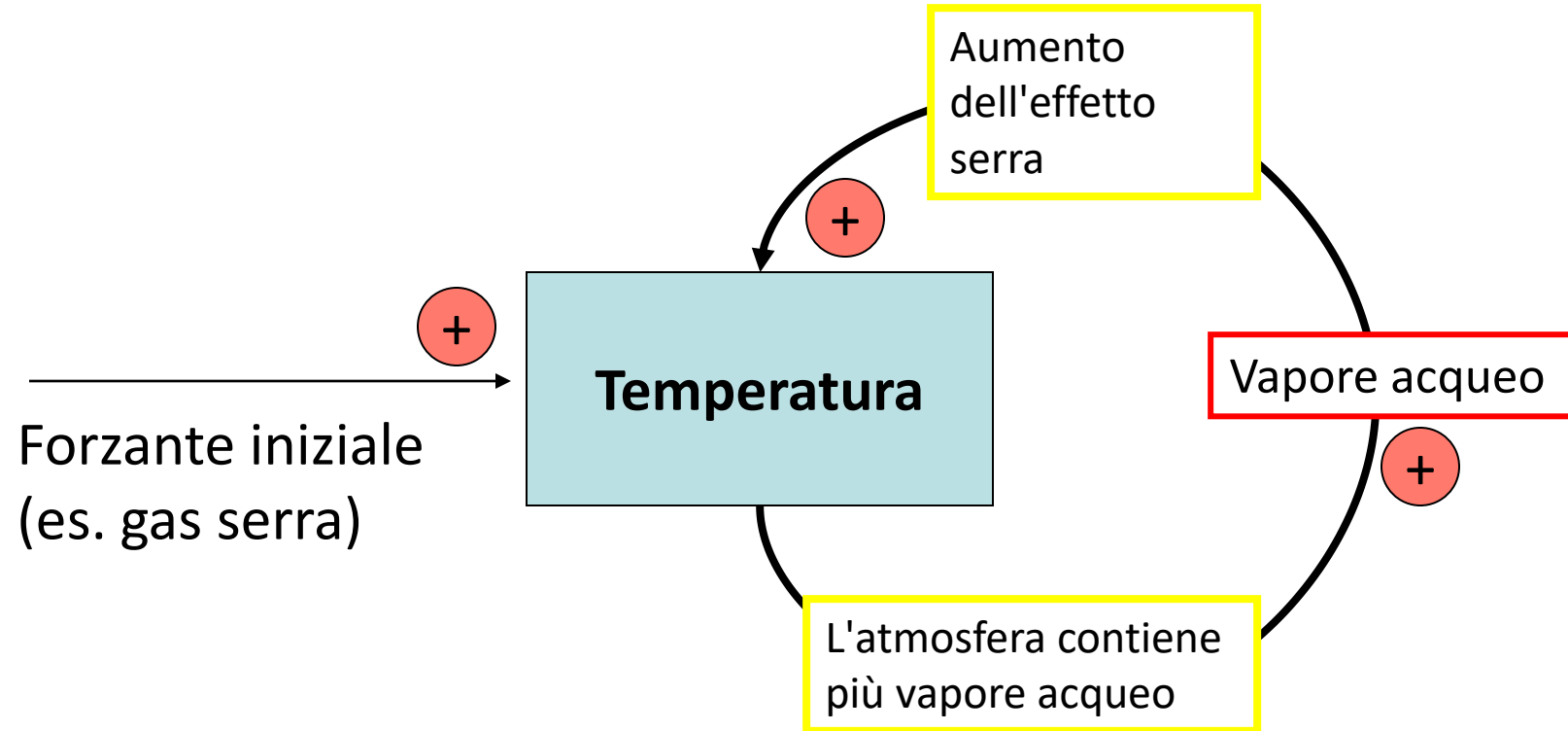
Il feedback radiazione infrarossa - temperatura

Esempio di feedback **negativo**

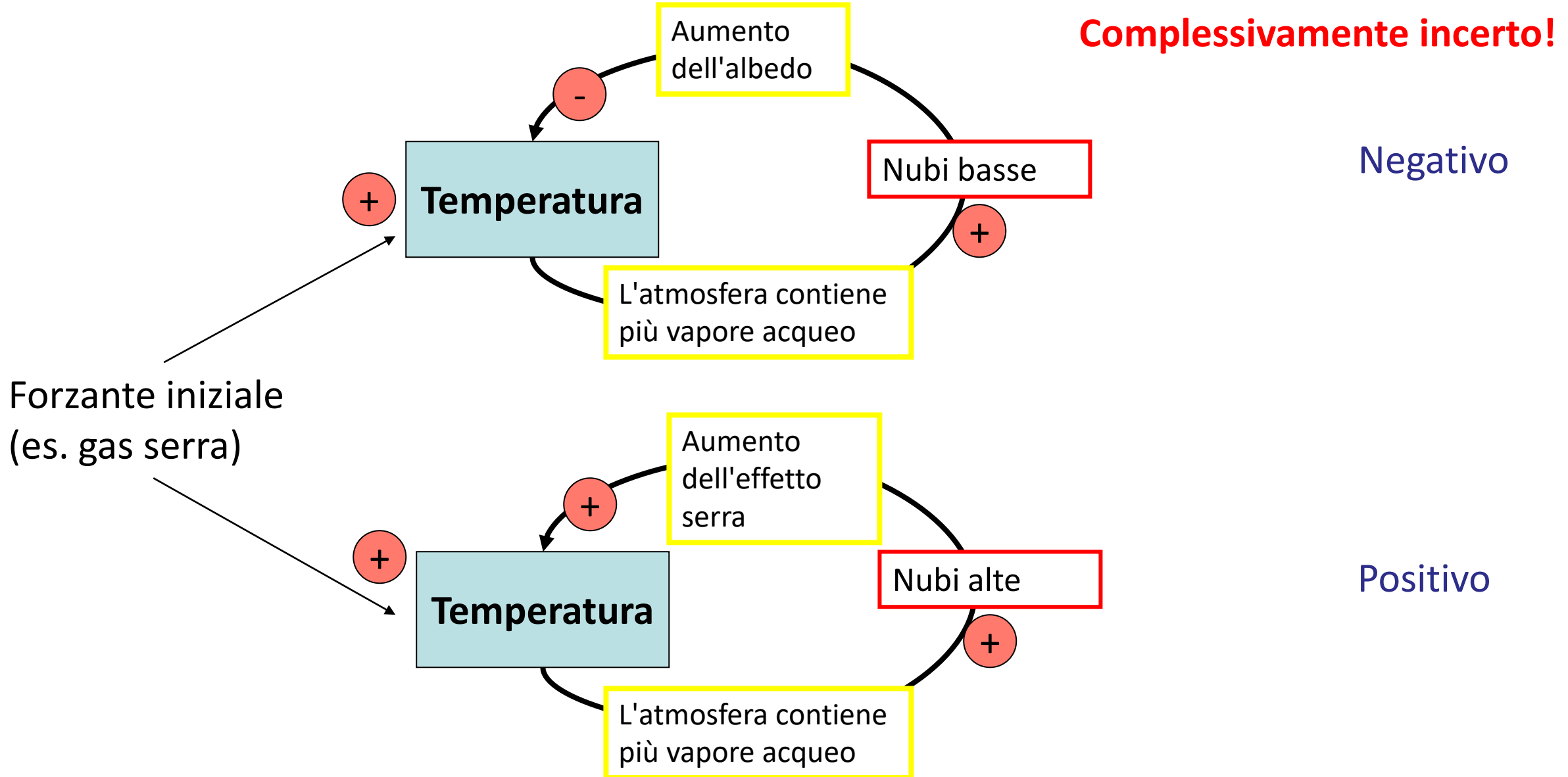


Il feedback vapore acqueo - temperatura

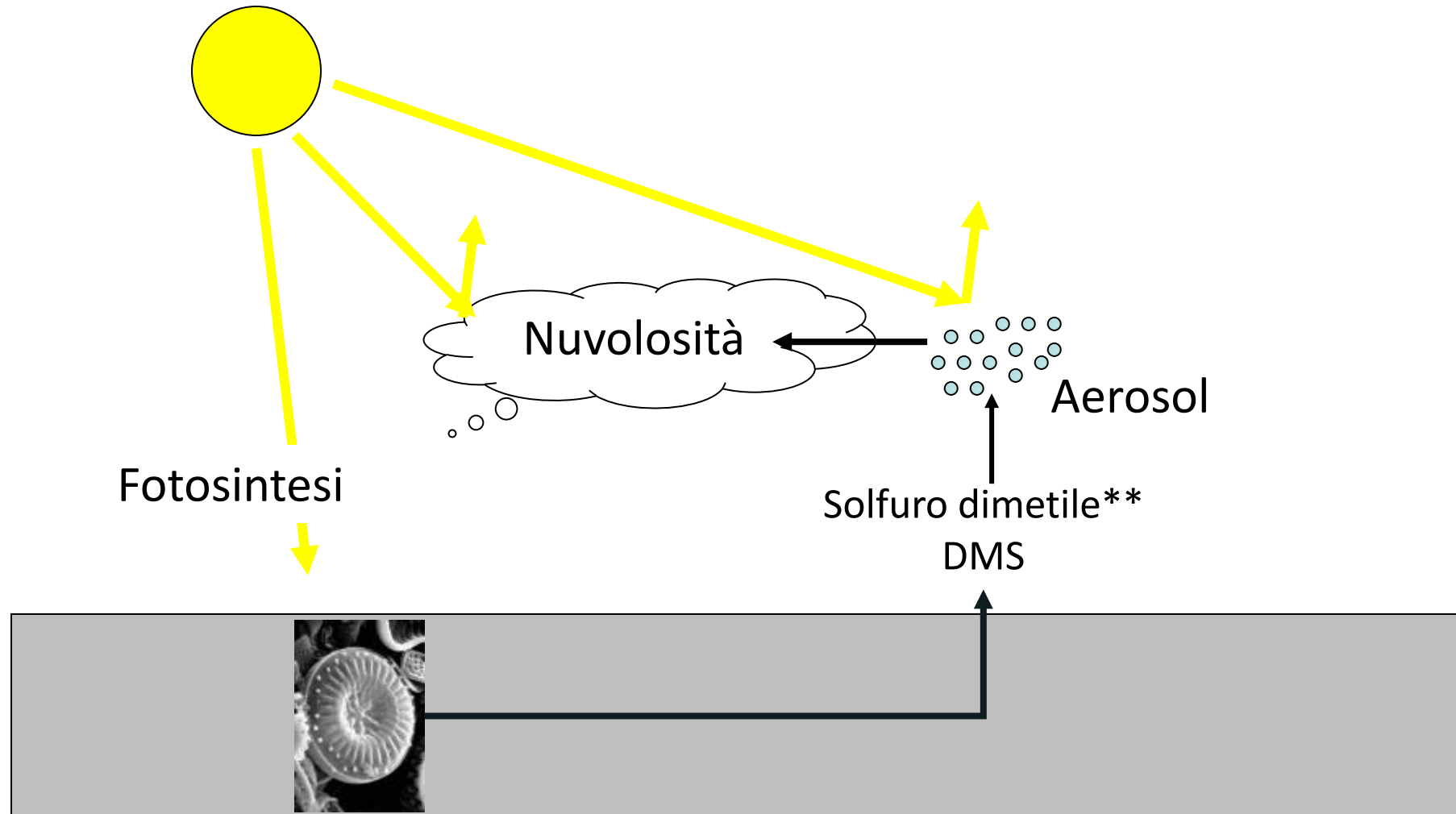
Feedback **positivo**



Il duplice feedback delle nubi



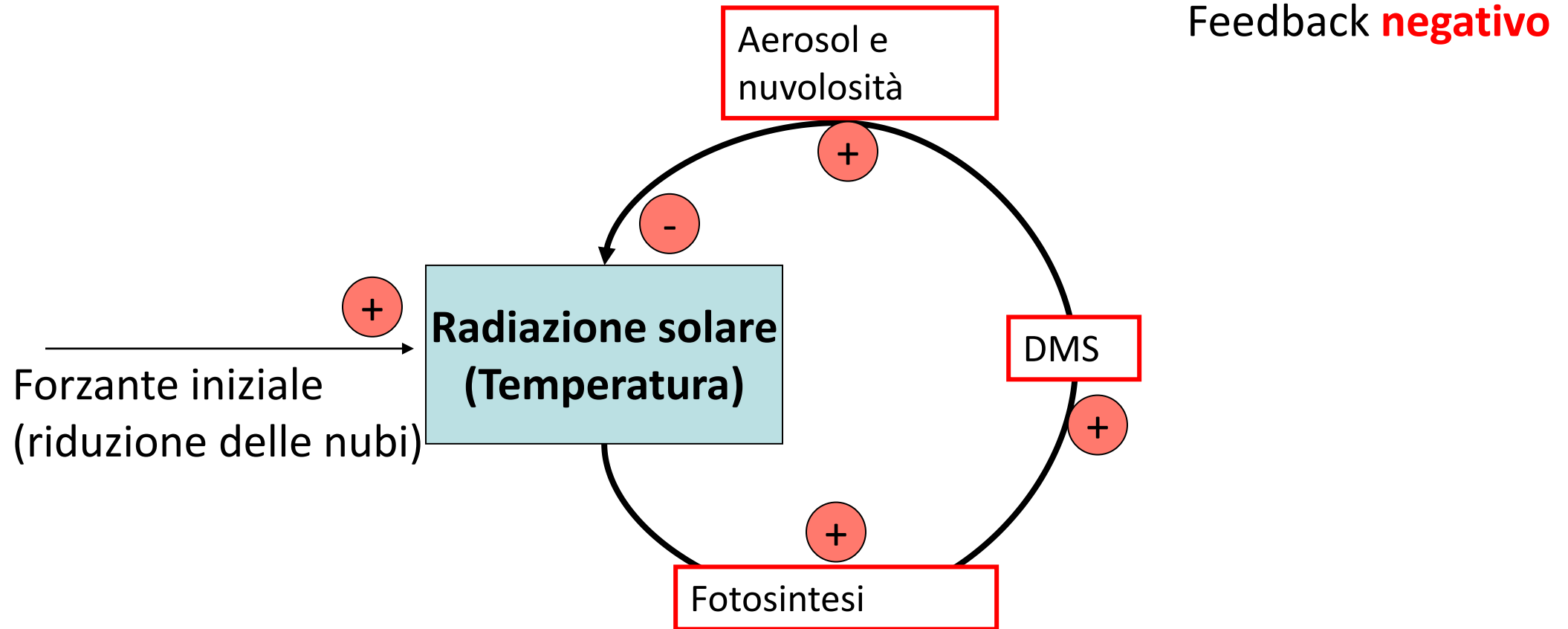
Fitoplancton — DMS: il feedback sulle nubi marine



**DMS non forma direttamente aerosol... → deve essere convertito in acido solforico

Fitoplancton — DMS: il feedback sulle nubi marine

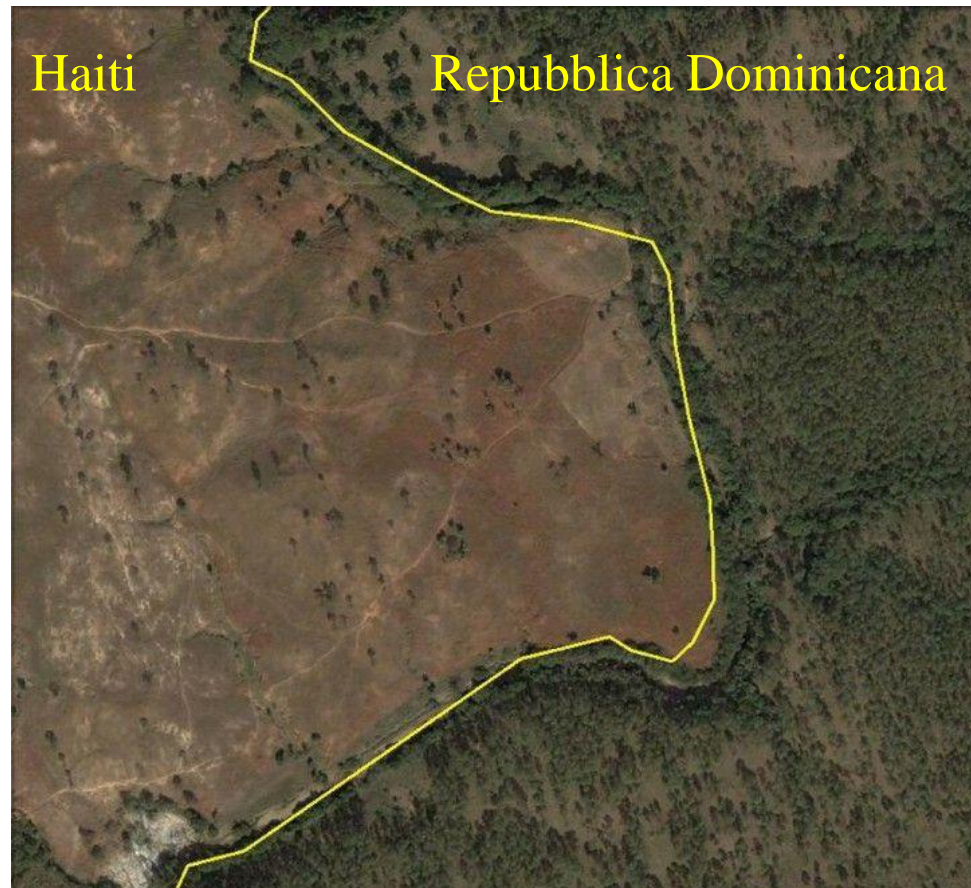
Charlson, Lovelock, Andrea, Warren - “C.L.A.W.” Hypothesis



I microbi svolgono un ruolo importante nel ciclo dello zolfo (aerosol), nel ciclo del carbonio (CO_2), nell'O₃ stratosferico, ...

Variabilità interna: il land use

- Modificazione della superficie terrestre
 - ☐ Cambiamento nell'uso del suolo, ...



Variabilità interna: l'atmosfera terrestre

➤ Modificazione dell'atmosfera terrestre

- ❑ Cambiamenti della composizione (naturali ed antropiche): gas serra, aerosol, gas fluorurati, ...

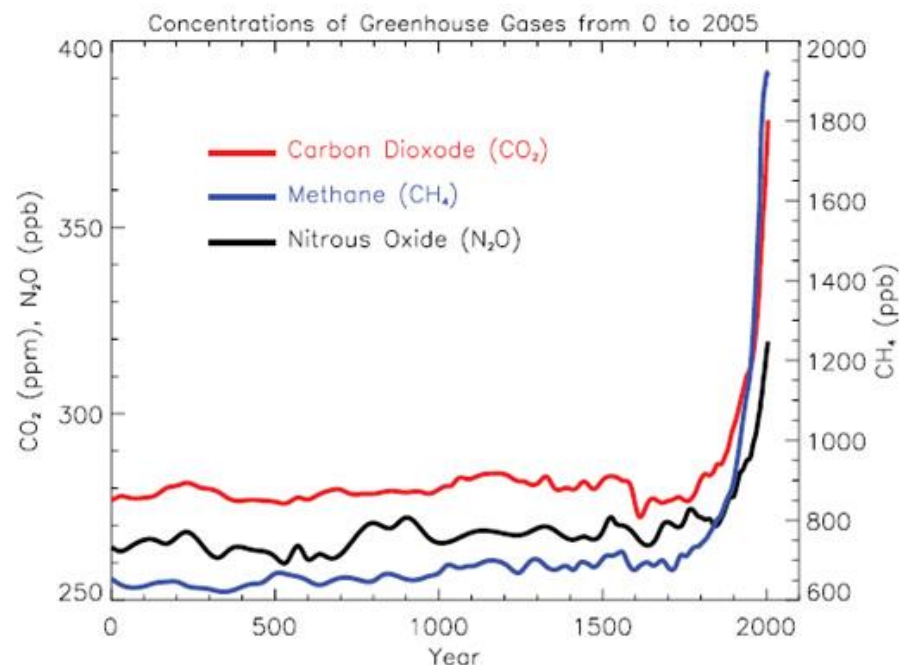


Figure 1. Atmospheric concentrations of important long-lived greenhouse gases over the last 2,000 years. Increases since about 1750 are attributed to human activities in the industrial era. Concentration units are parts per million (ppm) or parts per billion (ppb), indicating the number of molecules of the greenhouse gas per million or billion air molecules, respectively, in an atmospheric sample.

IPCC AR4 FAQ

La variabilità esterna: Sole e orbita

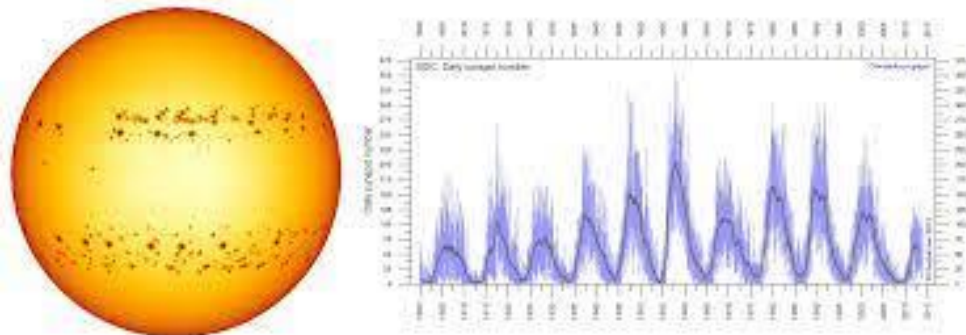
➤ Energia in arrivo dal Sole

□ Dipende dalla variabilità interna del Sole

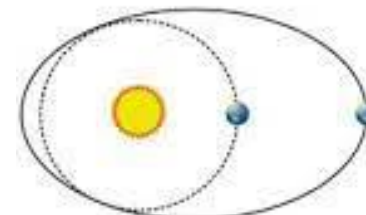
- Influenza il quantitativo di potenza irradiata dal Sole (e quindi ovviamente anche quanta radiazione incide in ogni istante al top dell'atmosfera terrestre)

□ Dipende dall'orbita terrestre

- Variando la distanza tra Terra e Sole, influenza il quantitativo di radiazione che incide in ogni istante al top dell'atmosfera terrestre



Milankovitch Cycles



Eccentricity



Obliquity



Precession

Ricapitolando: il clima terrestre è...

... il risultato dell'interazione di molte proprietà e processi:

- ❑ Radiazione solare e geometria orbitale
- ❑ La dimensione, la forza gravitazionale e la velocità di rotazione del pianeta
- ❑ Costituenti atmosferici, circolazione e ciclo idrologico
- ❑ Proprietà oceaniche e circolazione
- ❑ Idrologia, biologia e geochimica della superficie terrestre
- ❑ La geografia di continenti, ghiacciai, catene montuose e oceani
- ❑ ...