



# Introduzione al sistema climatico terrestre



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI



# Osservazioni di stato e tendenza

*Federico Porcù ([porcu@fe.infn.it](mailto:porcu@fe.infn.it))*

*Dipartimento di Fisica – Università di Ferrara*

**sistemi dinamici, non linearità, caos;**

**componenti e caratteristiche del sistema  
climatico terrestre;**

**un esempio di interazione tra  
sottosistemi;**

**forzanti e previsioni;**



Il sistema climatico è un sistema complesso

non esiste una definizione univoca e generale  
di sistema complesso

definiamo allora un sistema non complesso

sistema semplice o lineare o riducibile



linearità: l'effetto è proporzionale alla causa

riduzionismo: il sistema può essere compreso studiando separatamente le parti di cui è composto



## Caratteristiche di un sistema lineare:

- i componenti interagiscono tra loro in modo lineare;
- è predicibile;
- piccole perturbazioni danno piccole risposte;
- pochi parametri.



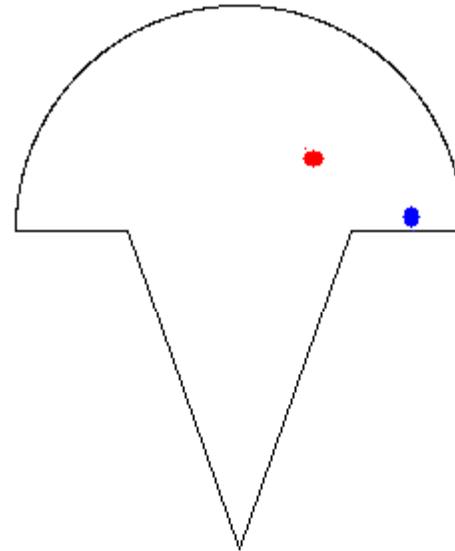
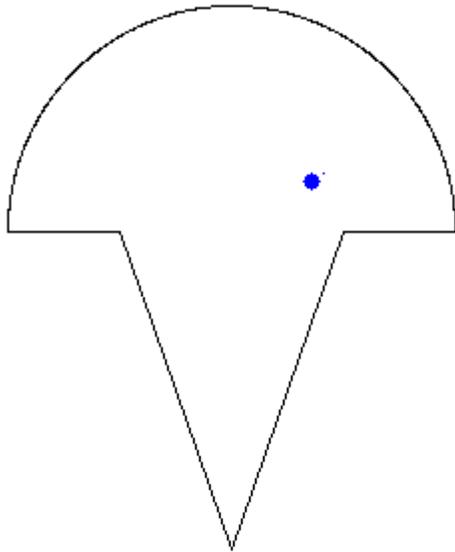
## Caratteristiche di un sistema non lineare:

- non è possibile riconoscere il ruolo di ogni singolo elemento in un processo (meccanismi di retroazione);
- è non predicibile (caos, sensibilità alle condizioni iniziali);
- piccole perturbazioni possono dare grandi risposte e viceversa (mucchio di sabbia);
- fenomeni di auto-organizzazione (vortici).



# Biliardo

## sensibilità alle condizioni iniziali



# Sistema di Lorenz

$$\dot{x} = \sigma(y - x)$$

$$\dot{y} = rx - y - xz$$

$$\dot{z} = xy - bz$$

---

$$x_{(t=0)} = 8$$

$$y_{(t=0)} = 1$$

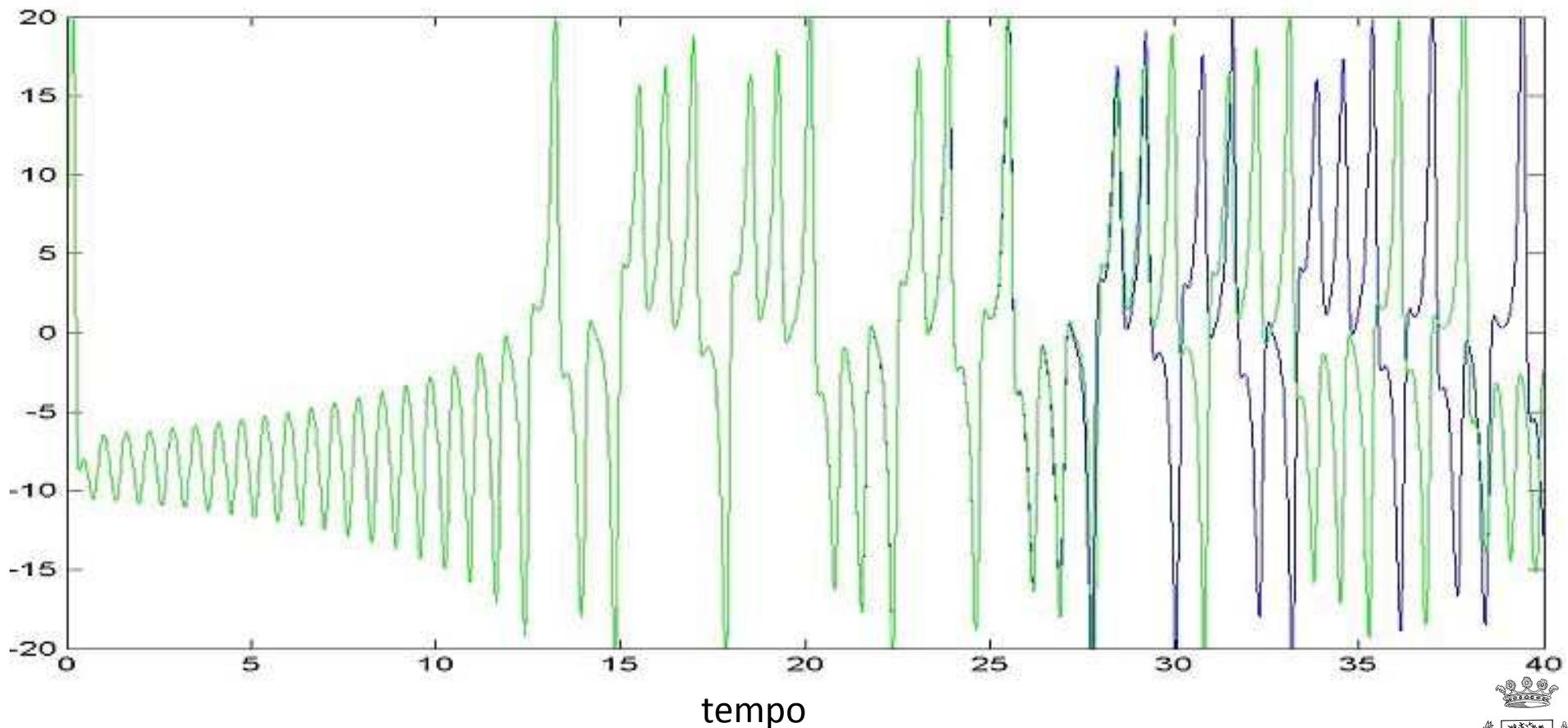
$$z_{(t=0)} = 1$$

---

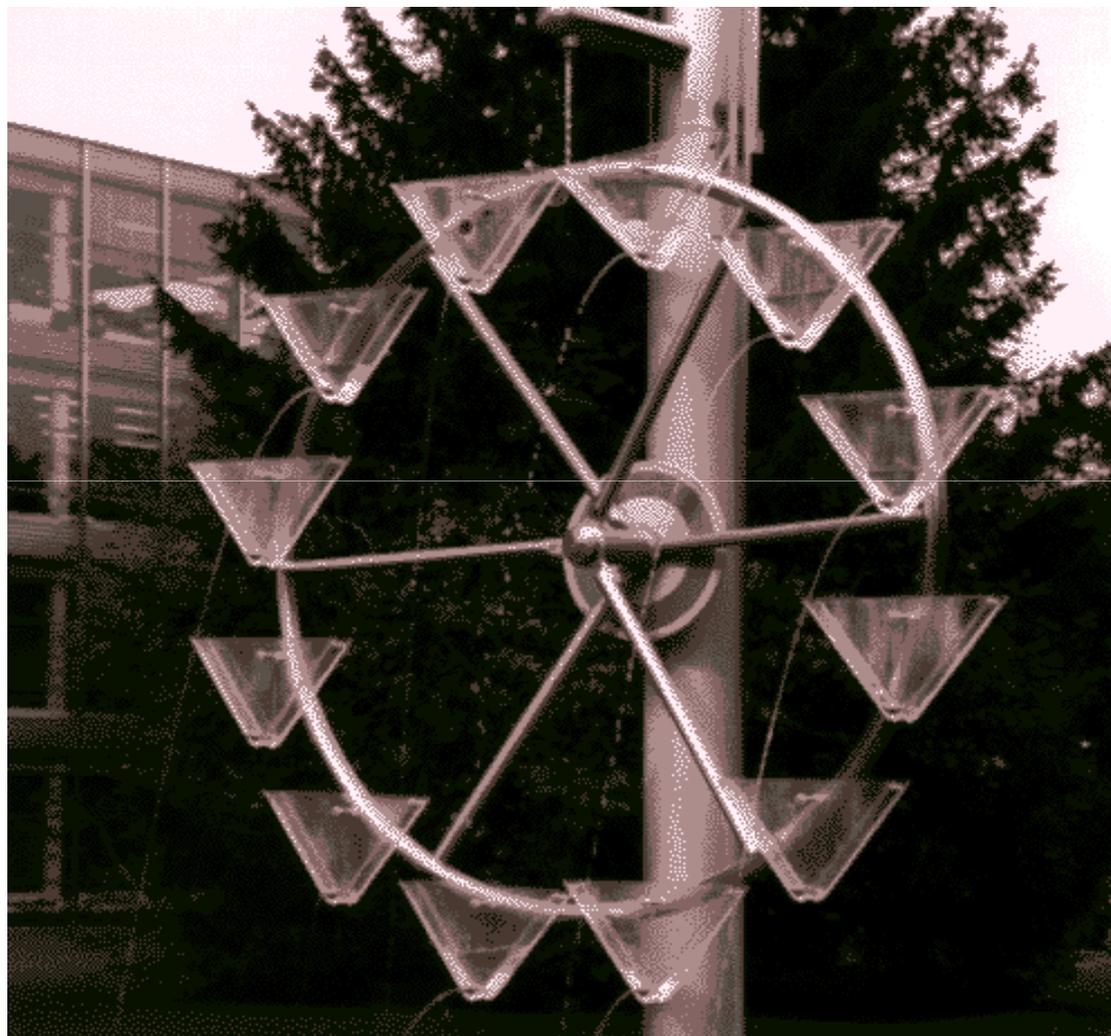
$$x_{(t=0)} = 8$$

$$y_{(t=0)} = 1.00000001$$

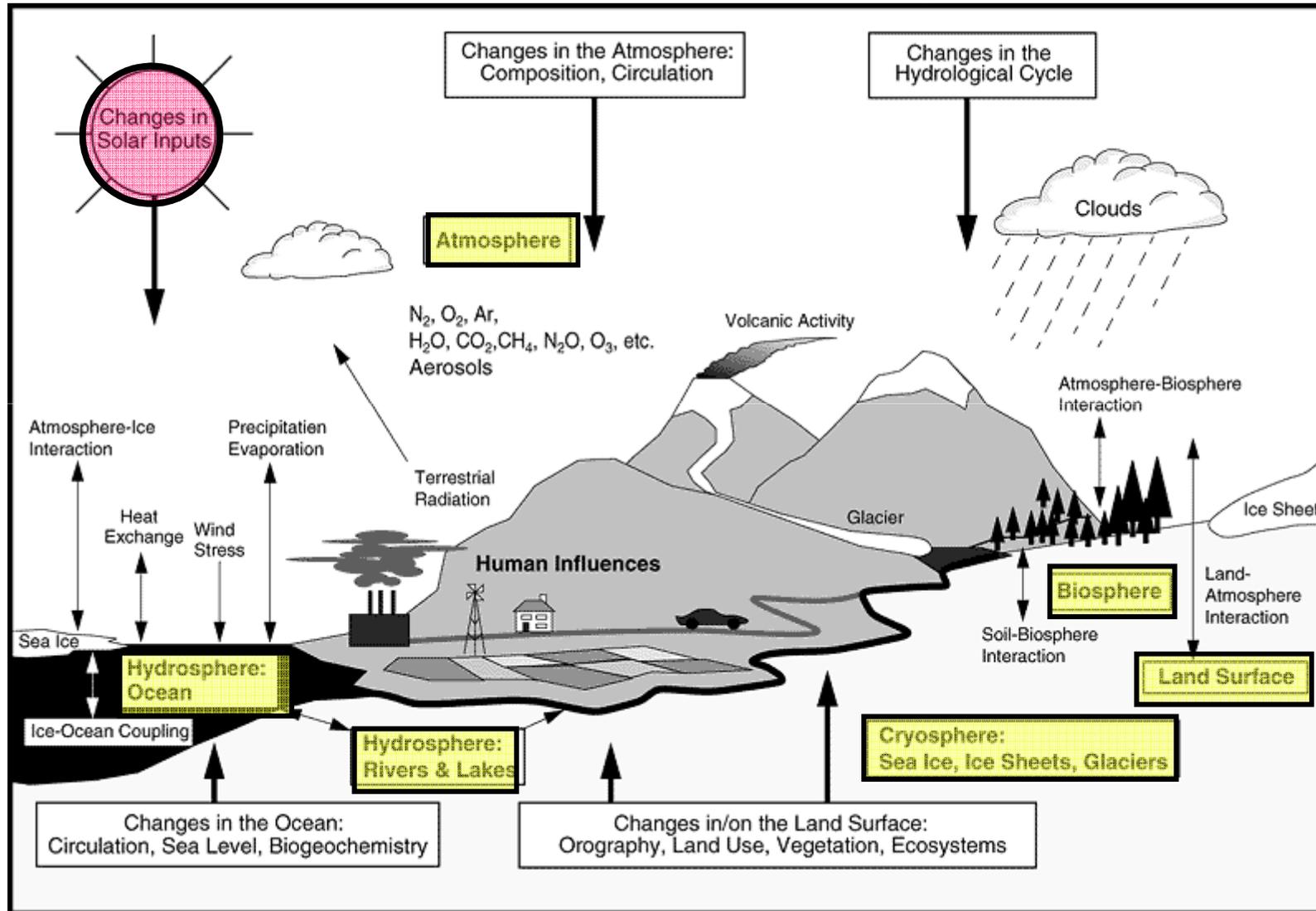
$$z_{(t=0)} = 1$$



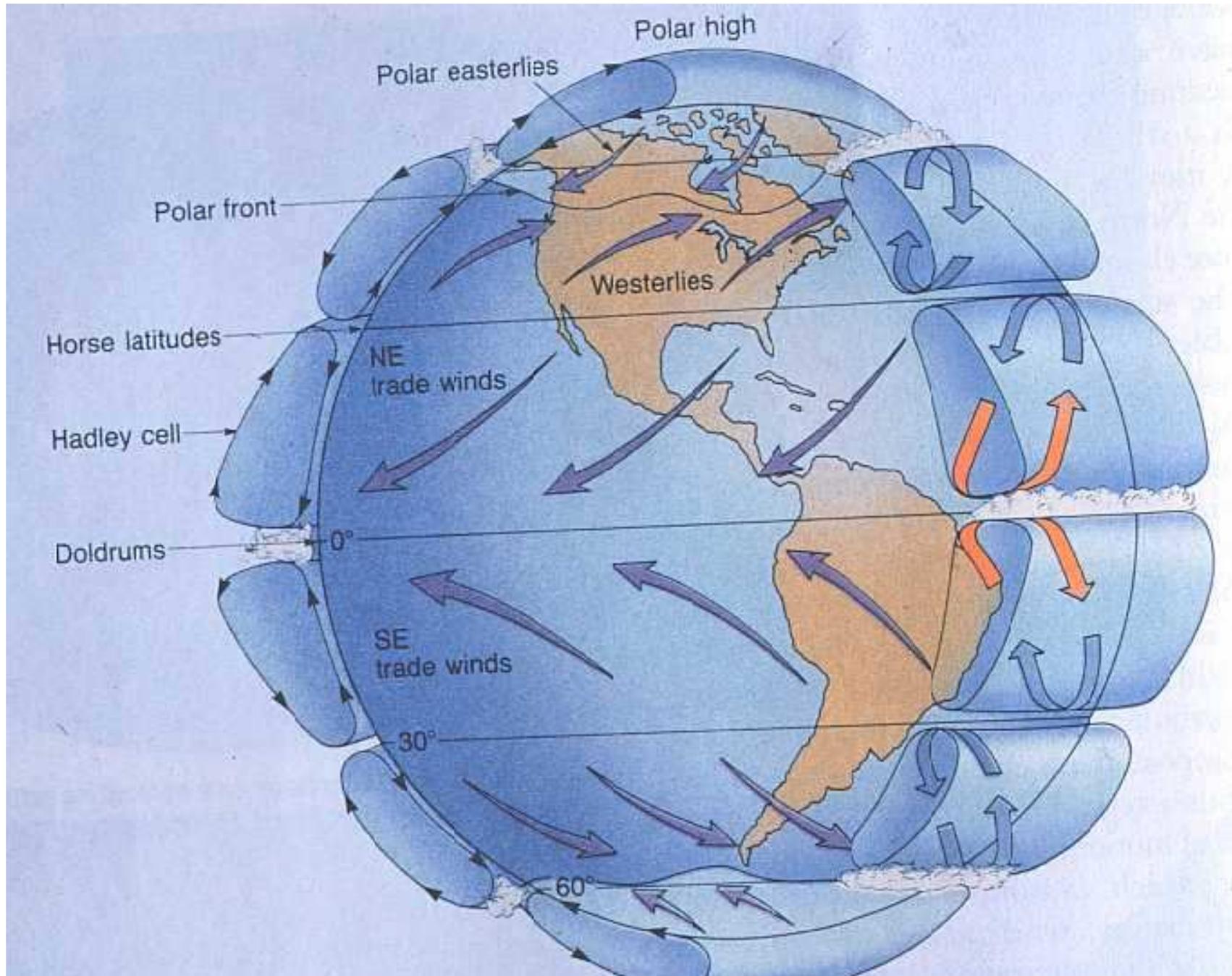
# ruota ad acqua di Lorenz



# The Global Climate System



# circolazione globale



# meccanismi di retroazione (feed back)

una forzatura su una componente del sistema produce un effetto che modifica l'impatto della forzatura

**feed back positivo: l'impatto aumenta**  
*instabilità*

**feed back negativo: l'impatto diminuisce**  
*stabilità*



## feed back negativo



## feed back positivo



# Effetto delle nubi sul bilancio energetico terrestre

Le nubi “raffreddano”:

**riflettono** parte della radiazione solare incidente, impedendole di riscaldare i bassi strati atmosferici e la superficie.

Le nubi “riscaldano”:

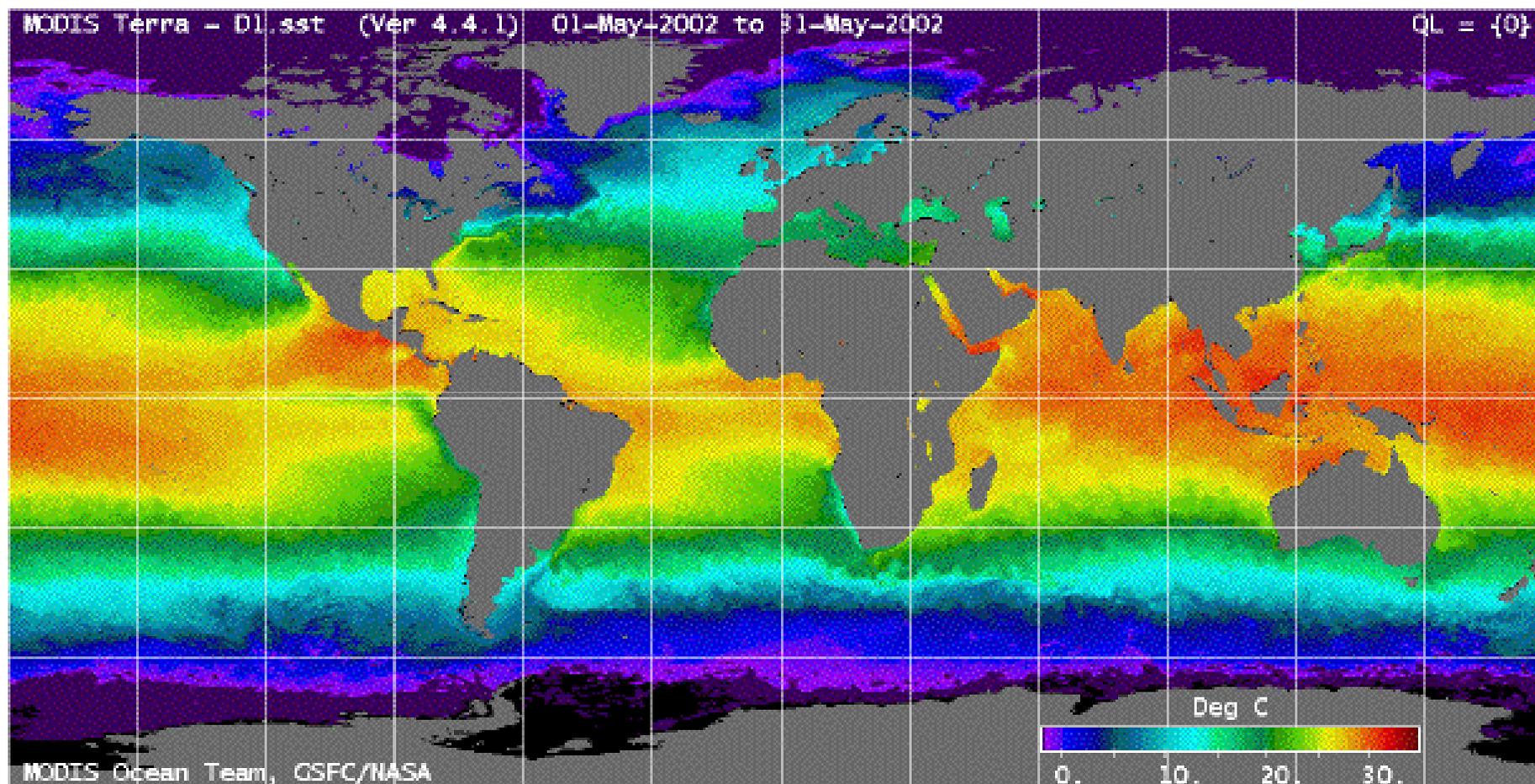
**assorbono** parte della radiazione terrestre, contribuendo all'effetto serra.

**L'effetto netto dipende da:**

- superficie;
- quantità e distribuzione di WV;
- latitudine;
- struttura microfisica e macrofisica della nube;



# temperatura media oceanica



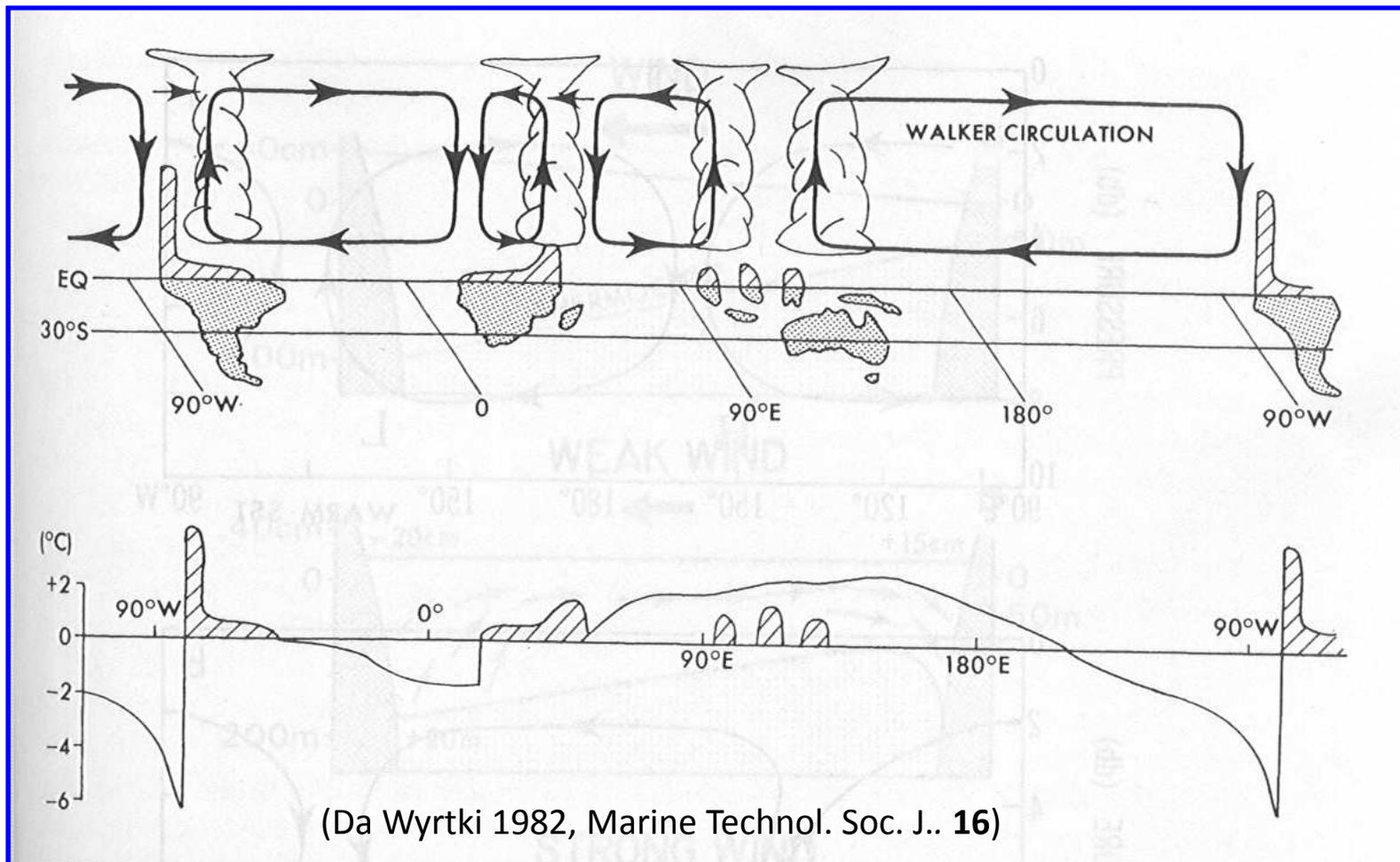
## Interazione Atmosfera/Oceano

- ❑ l'atmosfera influenza l'oceano principalmente a causa dello stress del vento superficiale;
- ❑ l'oceano influenza l'atmosfera principalmente a causa di anomalie nella temperatura della sua superficie (*Sea Surface Temperature SST*) e del conseguente flusso verticale di calore sensibile e latente.

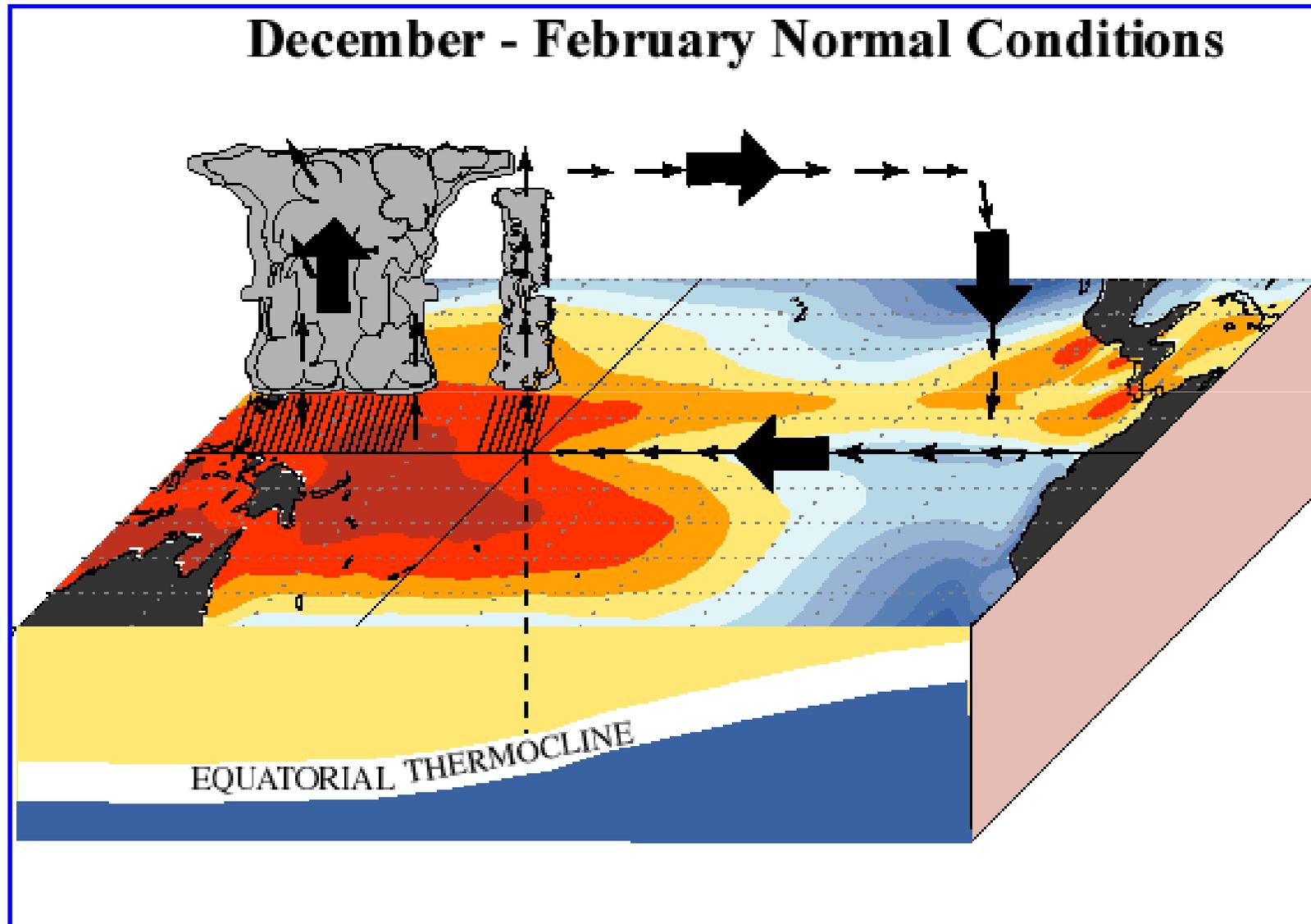


## Circolazione Atmosferica Equatoriale

Schema della normale circolazione di Walker lungo l'equatore. Risalita di aria e pioggia insistente sul Indonesia, Pacifico occidentale, Africa sud orientale e Amazonia, mentre condizioni di scarsa precipitazione nel Pacifico orientale e nell'Africa sud-occidentale. Il grafico in basso mostra inoltre il profilo dell'anomalia di temperatura lungo l'equatore.

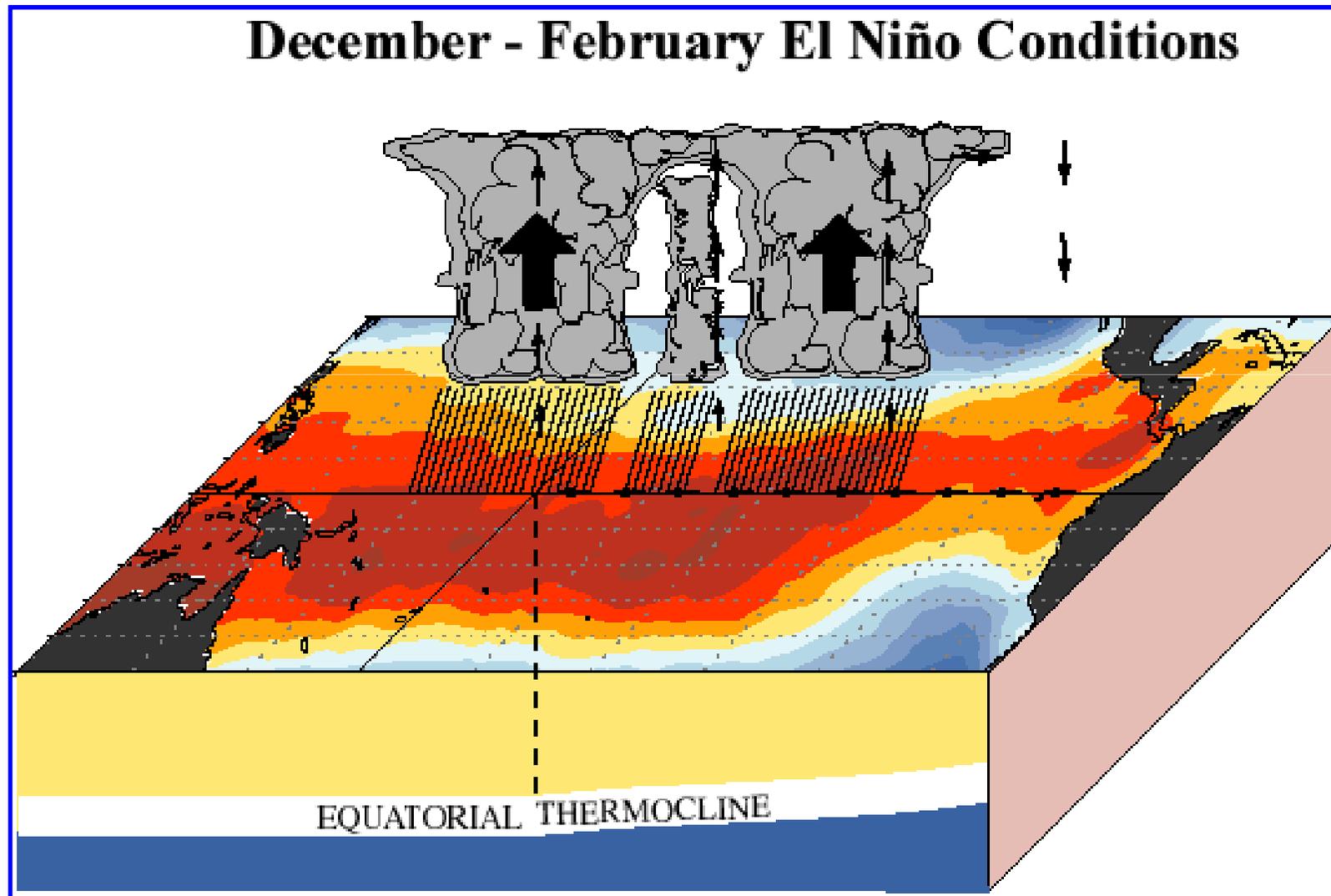


# *Circolazione Atmosferica Equatoriale*



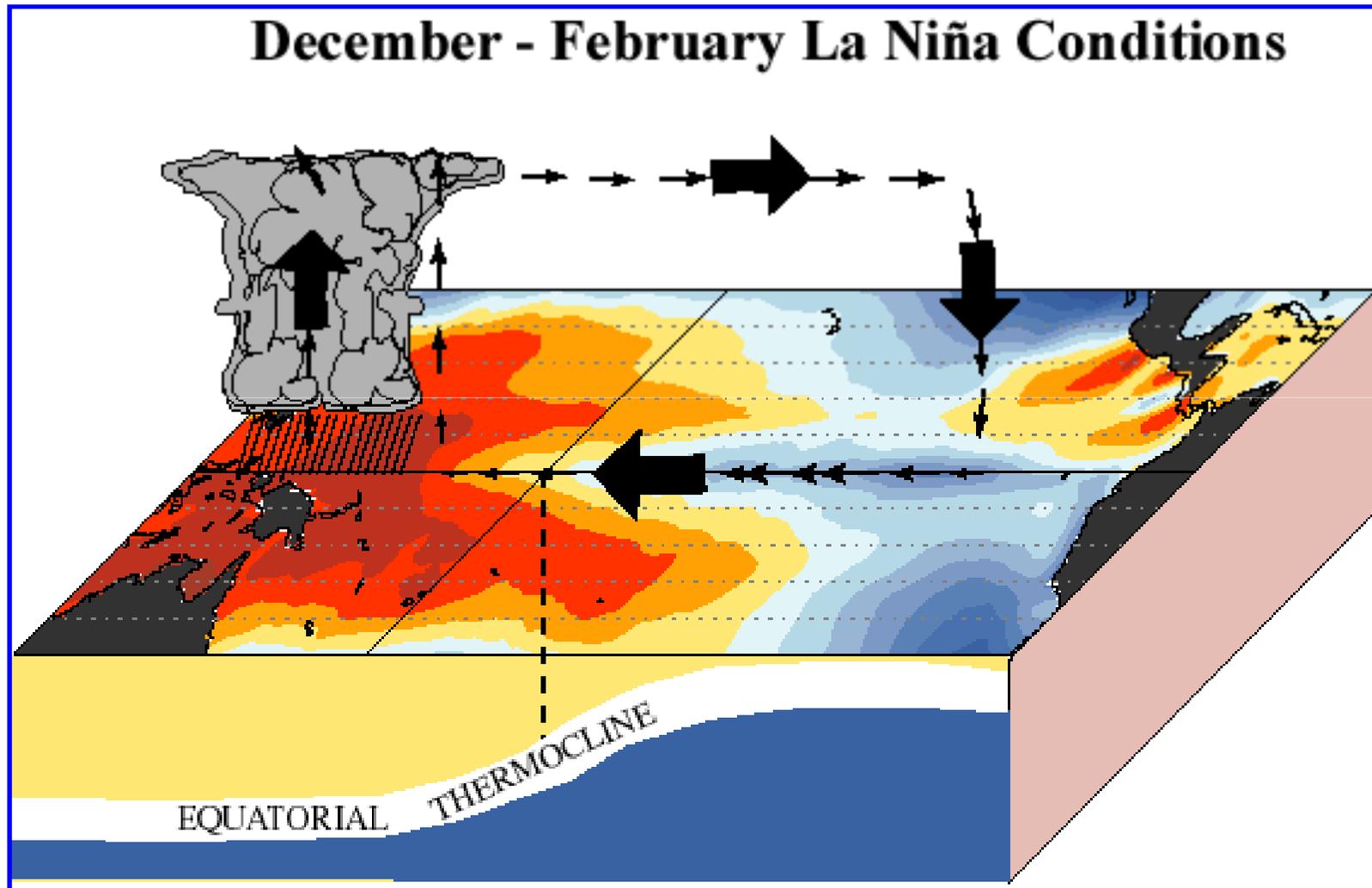
# *Circolazione Atmosferica Equatoriale*

## **Condizione ENSO – El Niño**



# *Circolazione Atmosferica Equatoriale*

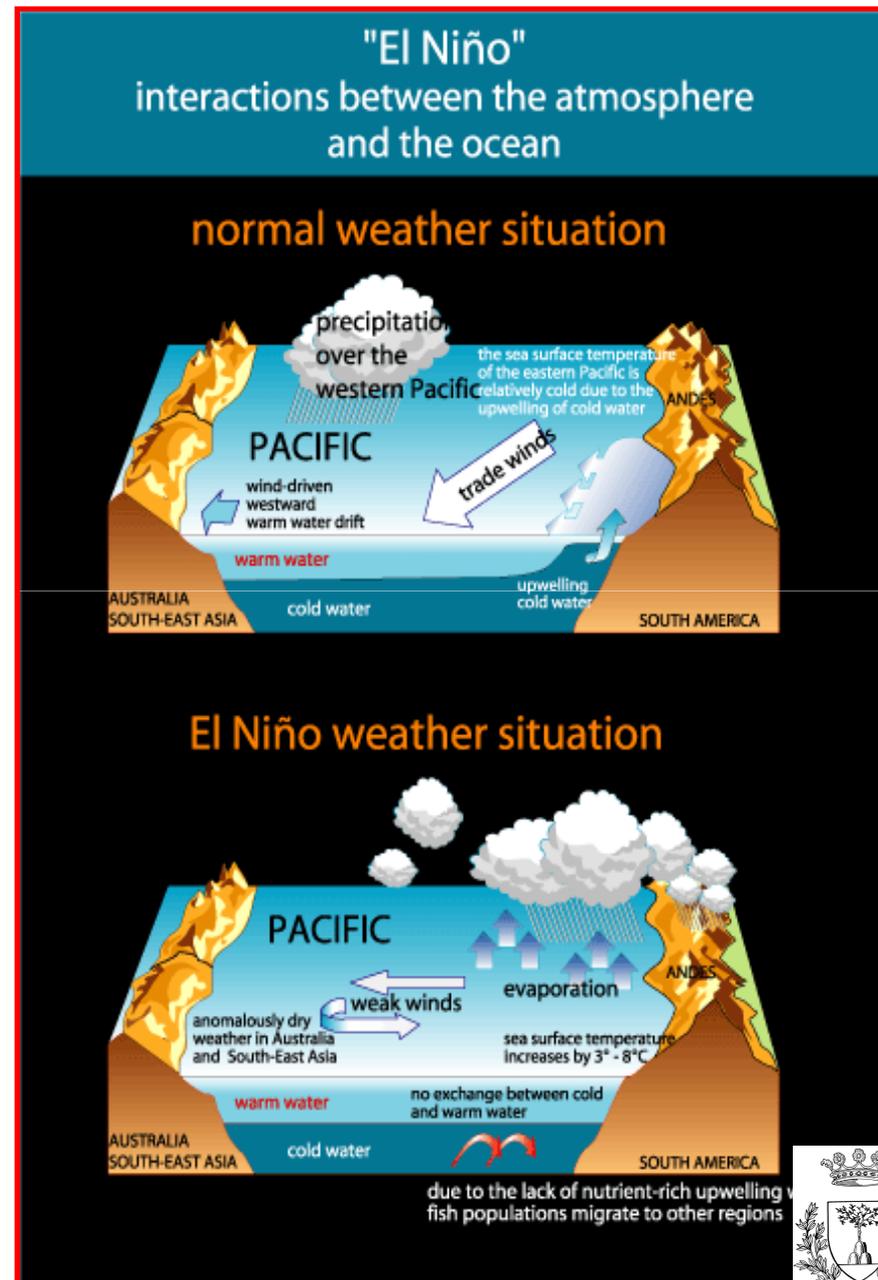
## Condizione anti ENSO – La Niña



## Circolazione Atmosferica Equatoriale - Condizione ENSO

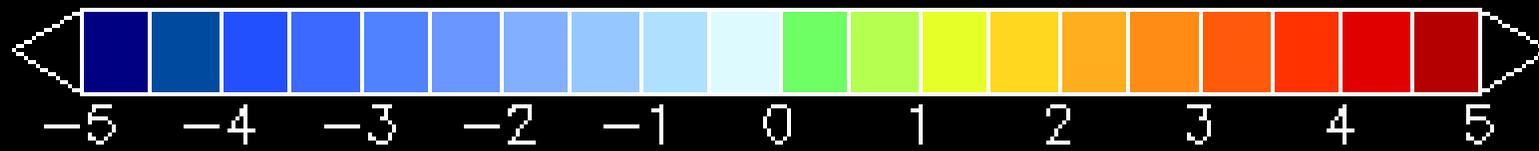
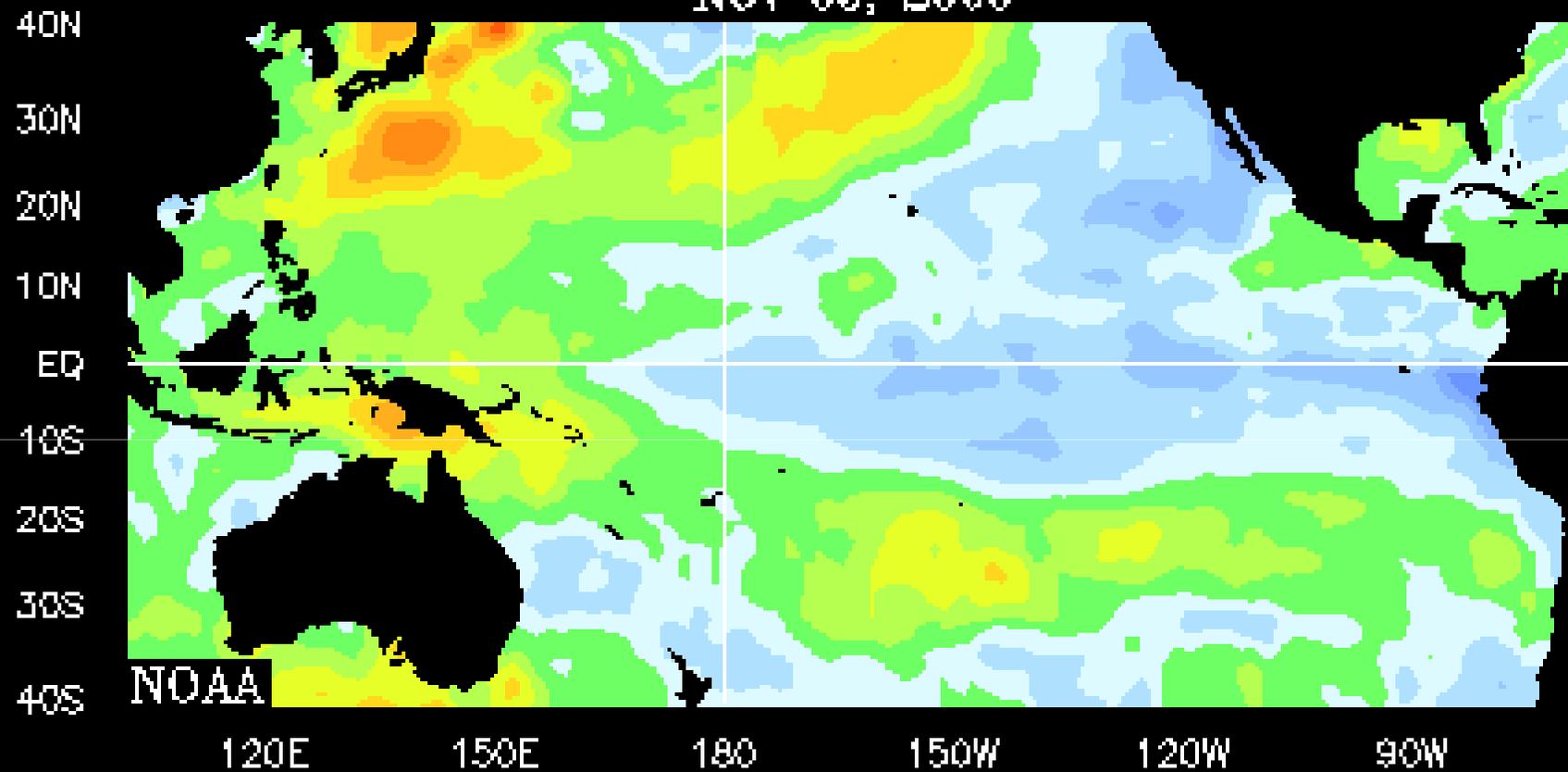
Negli anni “normali” il forte gradiente di temperatura superficiale (freddo a est caldo a ovest) nel Pacifico equatoriale è accompagnato da **forti venti alisei** che spingono le acque superficiali verso ovest permettendo a quelle più fredde e profonde di risalire in superficie. La **risalita delle acque** rafforza a sua volta il gradiente di temperatura superficiale mantenendo gli alisei.

Un **indebolimento degli alisei** nel Pacifico centrale **indebolisce l'upwelling** e fa aumentare la temperatura del Pacifico orientale. Questo fenomeno contribuisce a indebolire ulteriormente gli alisei. Il rafforzarsi vicendevole di questi effetti contribuisce all'instaurarsi di un El Niño.



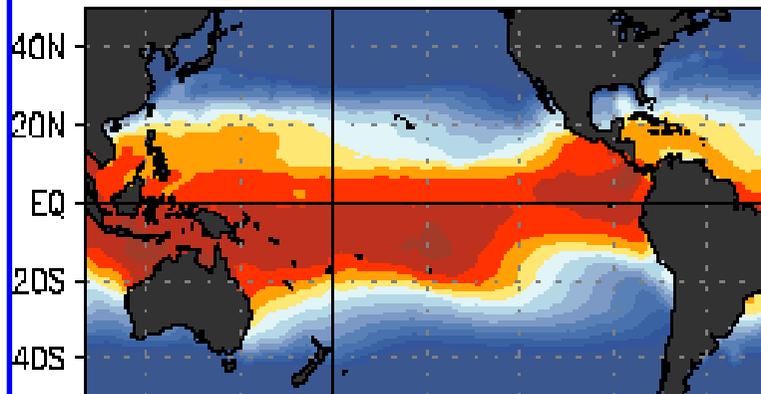
# SST ANOMALIES °C

NOV 05, 2000

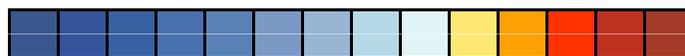


# OCEAN TEMPERATURES (°C)

## EL NIÑO Jan-Mar 1998

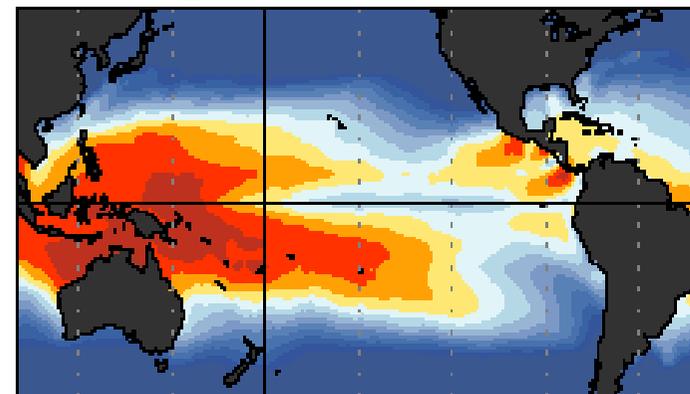


120E 150E 180 150W 120W 90W 60W

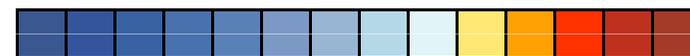


18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

## LA NIÑA Jan-Mar 1989

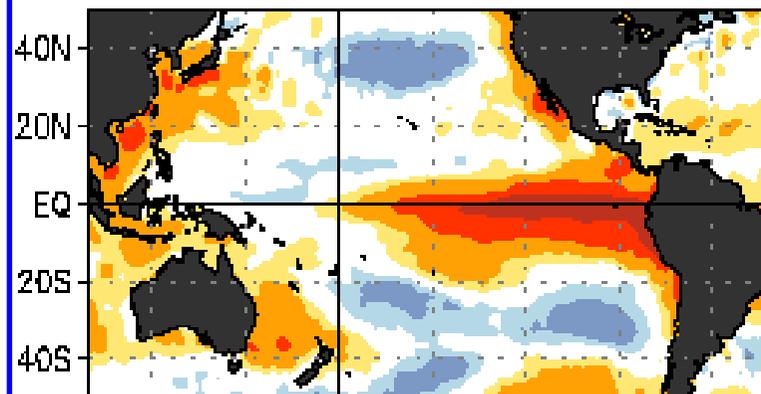


120E 150E 180 150W 120W 90W 60W



18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

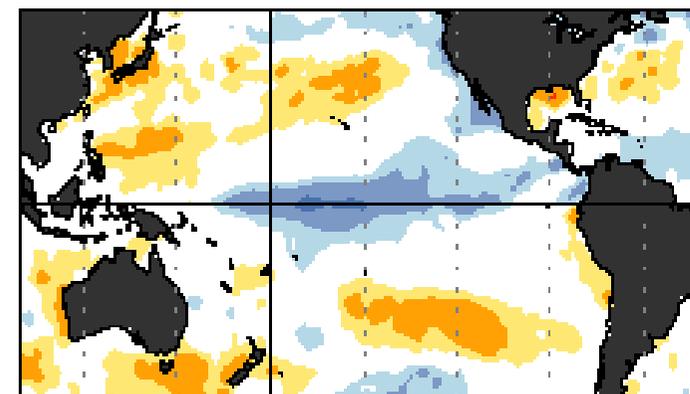
# OCEAN TEMPERATURE DEPARTURES (°C)



120E 150E 180 150W 120W 90W 60W



-3 -2 -1 -0.5 0.5 1 2 3



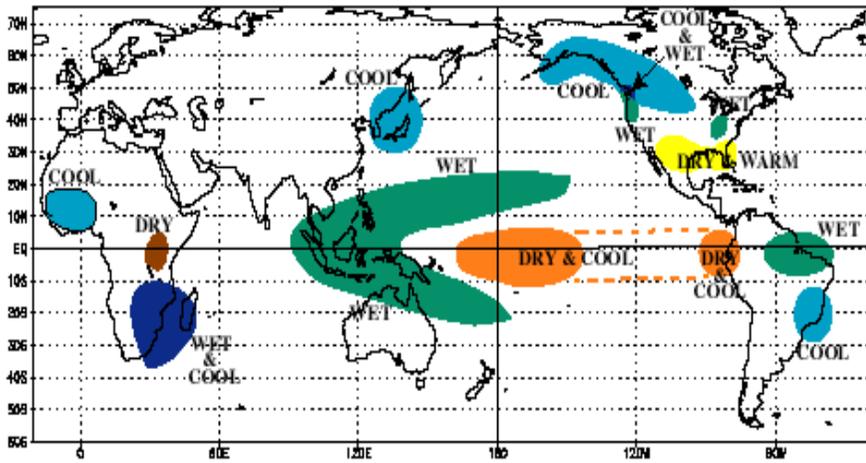
120E 150E 180 150W 120W 90W 60W



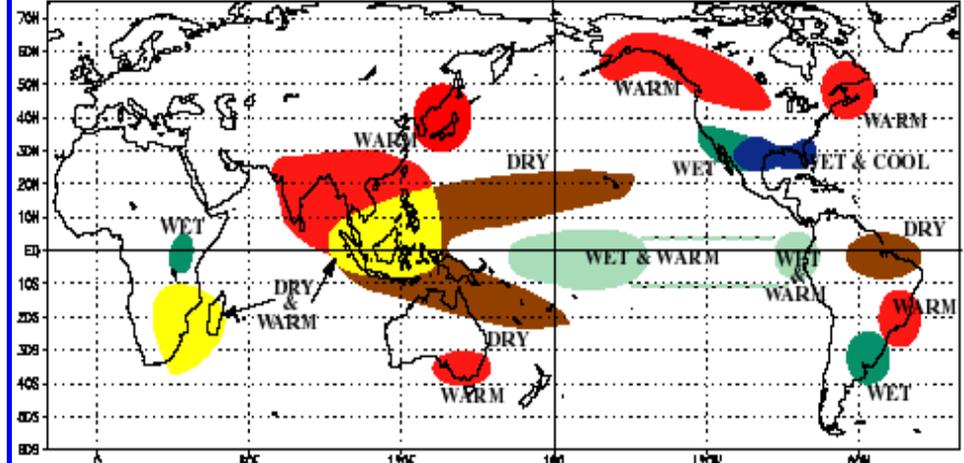
-3 -2 -1 -0.5 0.5 1 2 3



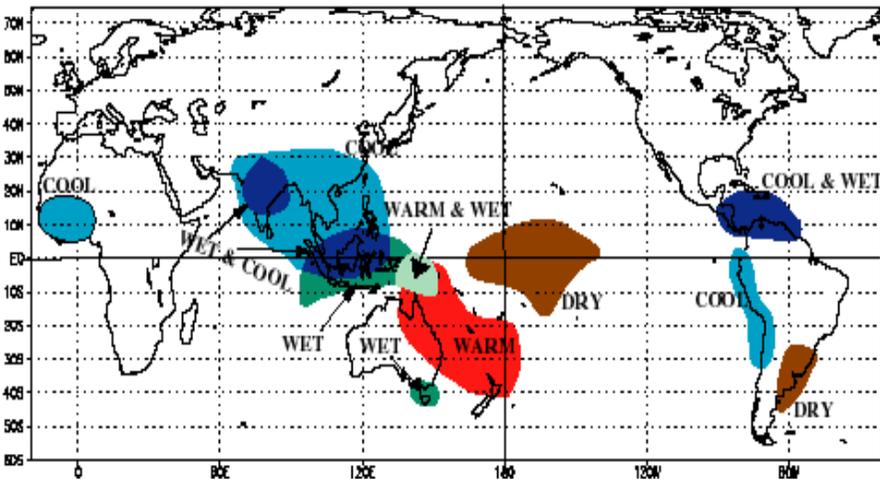
**COLD EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY**



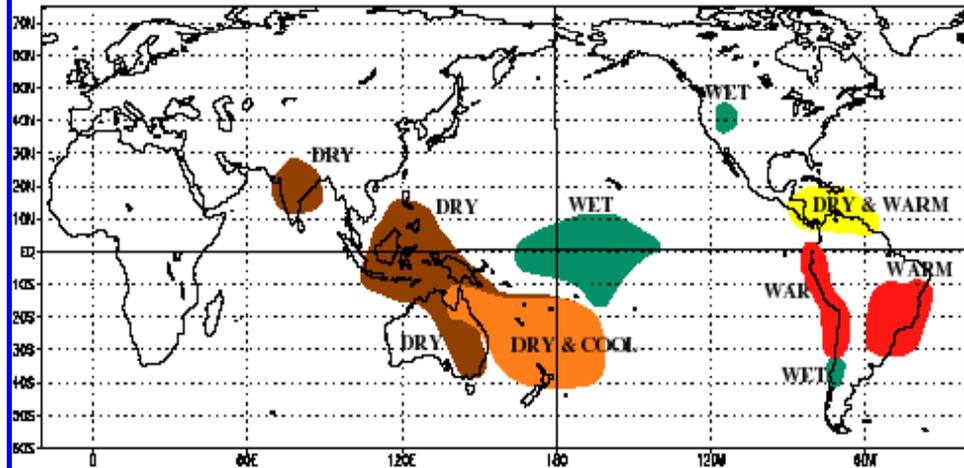
**WARM EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY**



**COLD EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST**



**WARM EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST**



Climate Prediction Center  
NCEP



Climate Prediction Center  
NCEP

# FORZANTI NATURALI

## VARIAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE

Diretta



Attività Solare

Indiretta



Milankovitch

## INTERAZIONI TRA DIVERSE COMPONENTI DEL SISTEMA

Interazione  
atmosfera-oceano



El Niño

## ERUZIONI VULCANICHE

Immissione di  
aerosol



SO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub>

## DERIVA DEI CONTINENTI



# FORZANTI ANTROPICHE

## IMMISSIONE DI GAS SERRA IN ATMOSFERA

SO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> O<sub>3</sub>



Combustibili fossili

CO<sub>2</sub> CH<sub>4</sub>



Incendi

CH<sub>4</sub>



Allevamenti

## IMMISSIONE DI AEROSOLS IN ATMOSFERA

Black Carbon, Organic Carbon



Combustibili fossili

Black Carbon



Incendi

## SFRUTTAMENTO DEL TERRENO

Variazioni di albedo

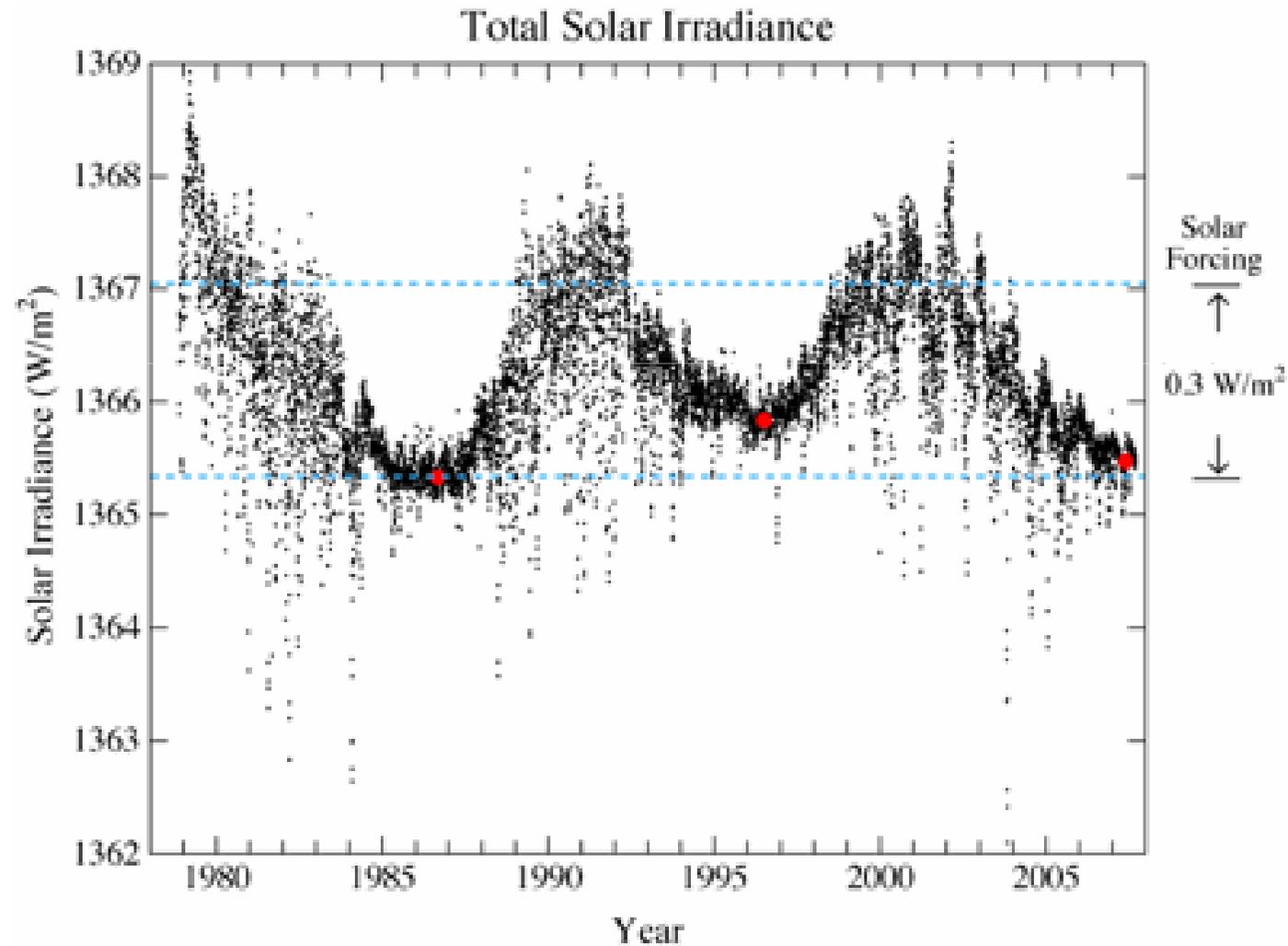


Riduzione delle foreste



# CAUSE ASTRONOMICHE

variazione dell'irraggiamento solare ( $\text{Wm}^{-2}$ )

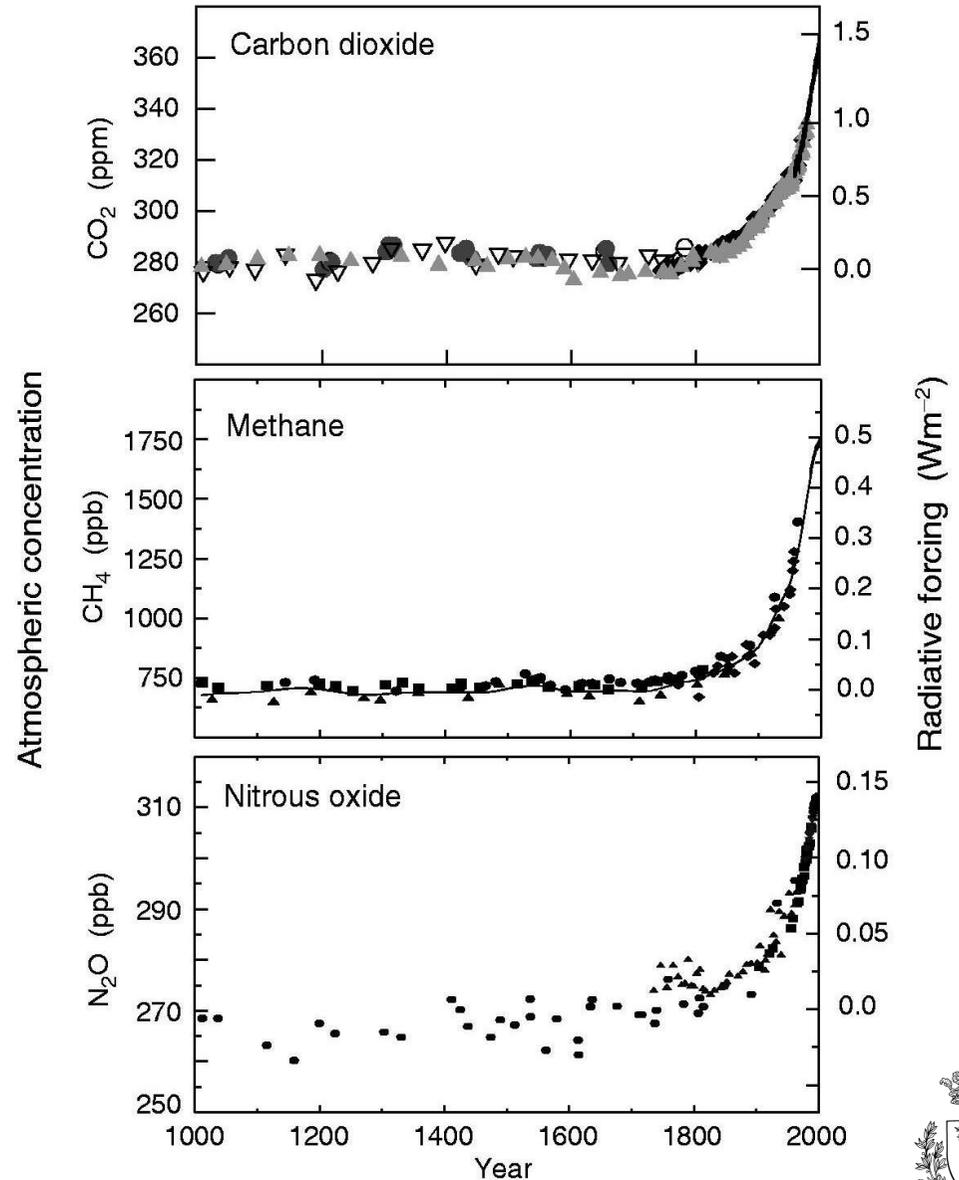


# CONCENTRAZIONE DEI GAS SERRA

- L'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) è aumentata del **31%** dal 1750 ad oggi con **crescita** nelle ultime due decadi di **1.5 ppm (0.4%) per anno**

- Il metano ( $\text{CH}_4$ ) è cresciuto di **1060 ppb (151%) dal 1750**; tale crescita è rallentata negli anni '90 rispetto agli anni '80.

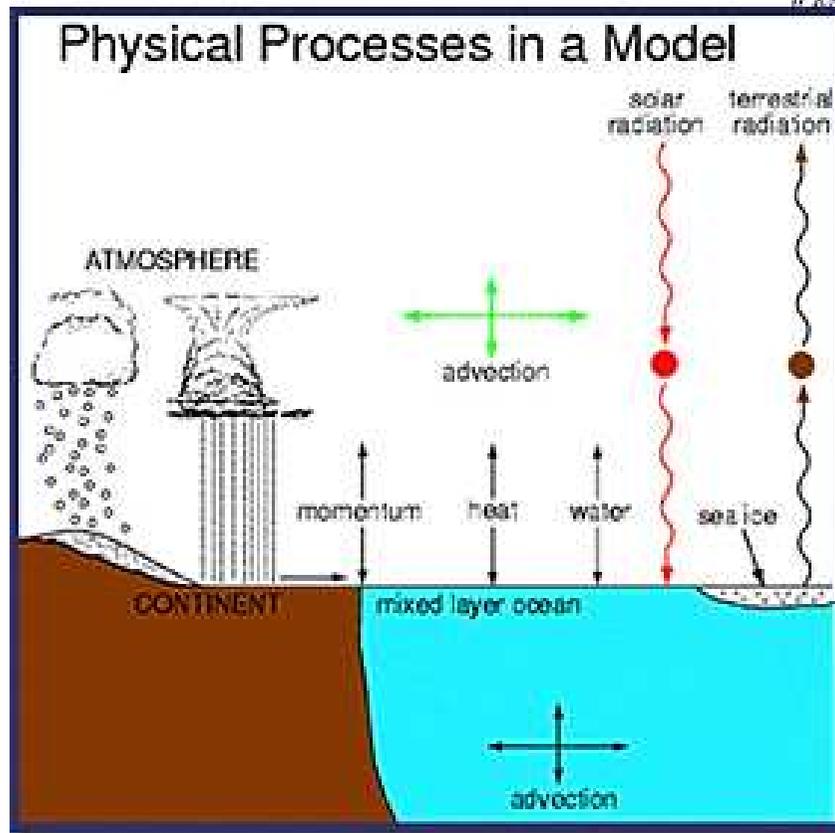
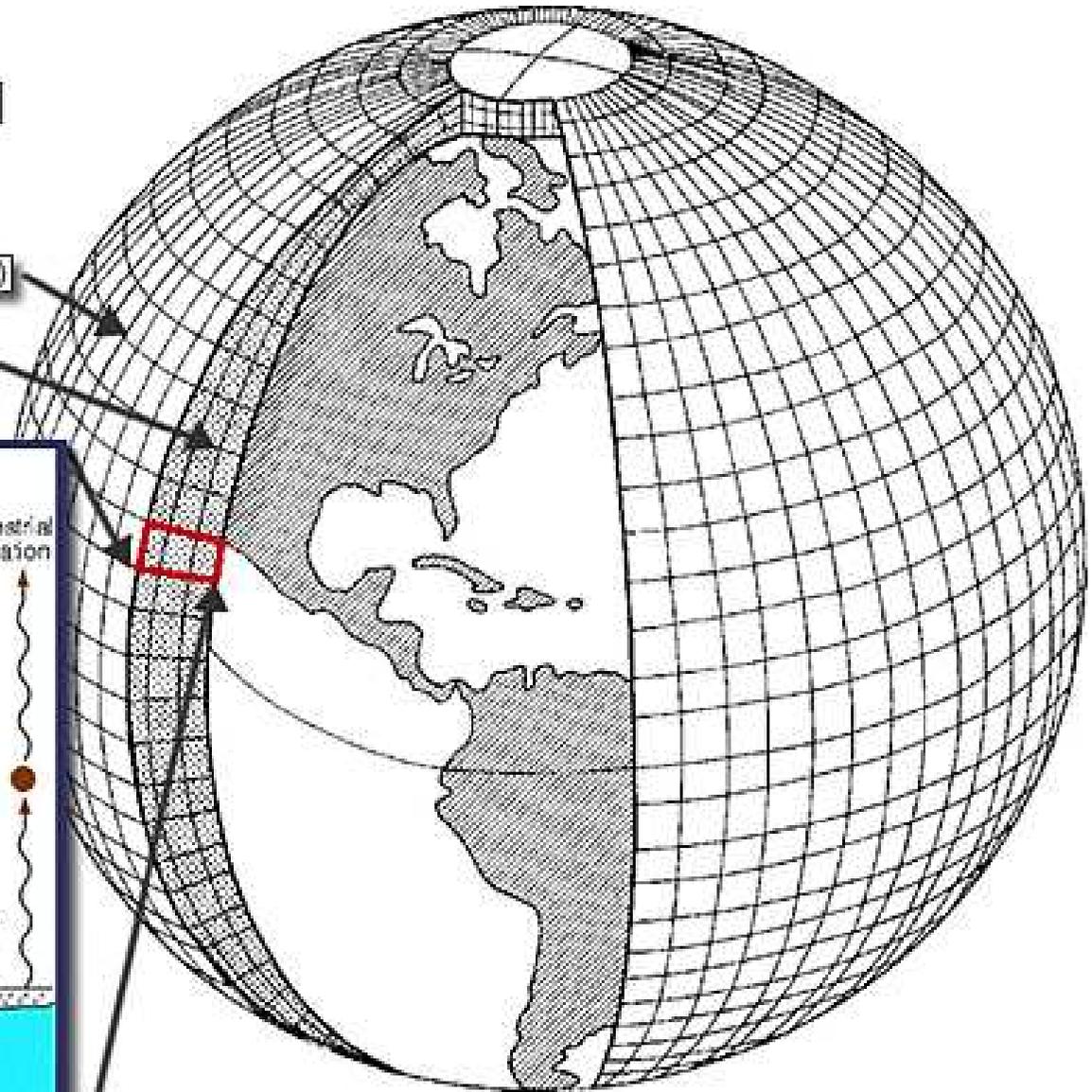
- L'ossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ) è cresciuto di **46 ppb (17%) dal 1750** (1/3 è di origine antropogenica).



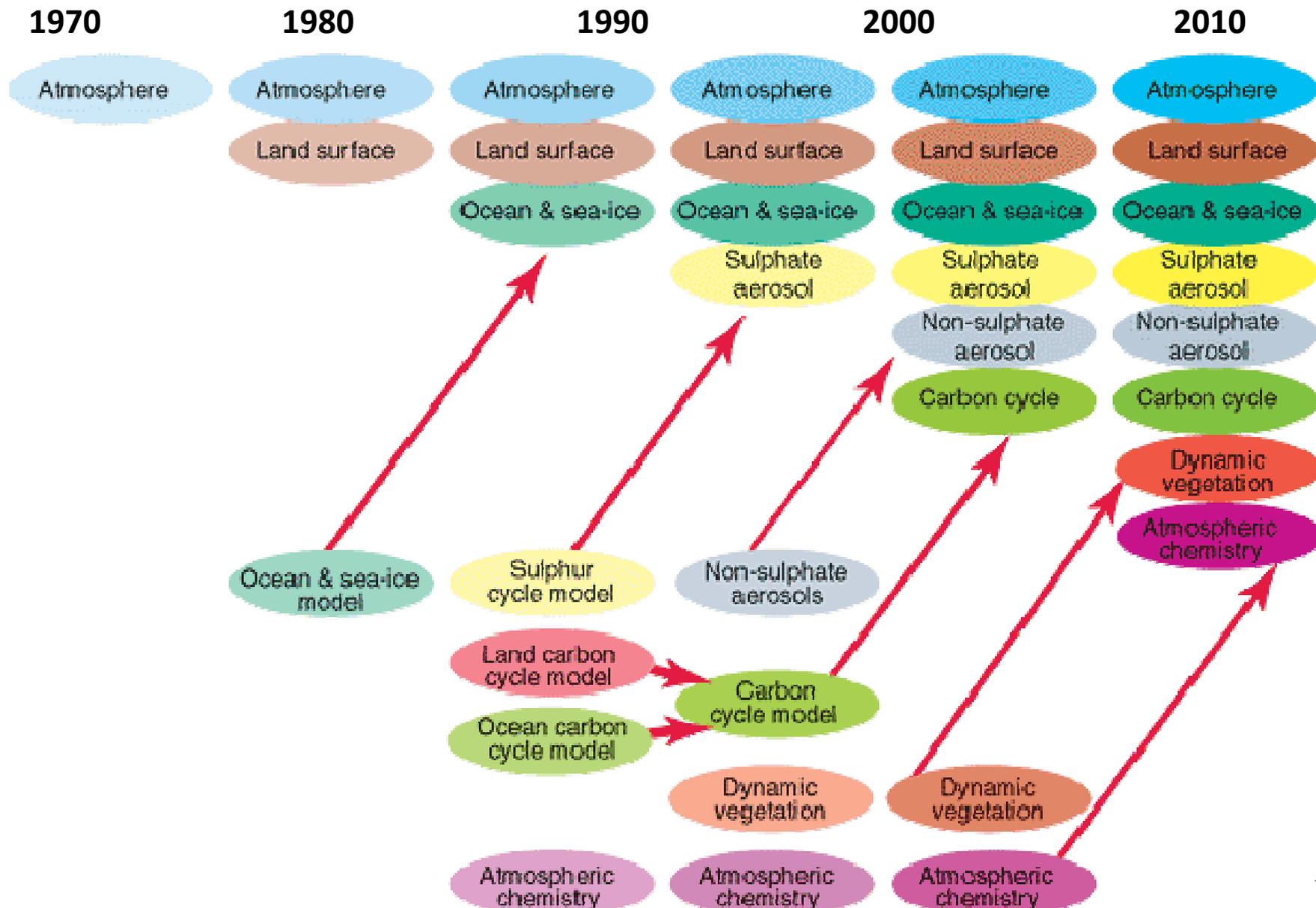
# Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (latitude - longitude)

Vertical Grid (height or pressure)

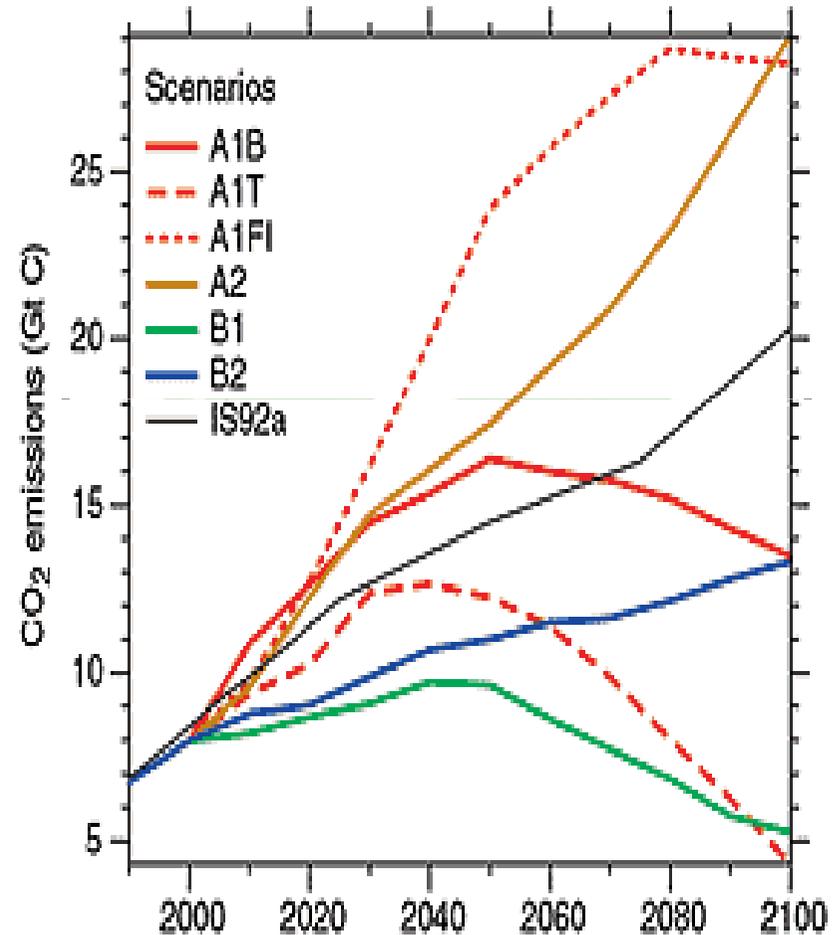


# evoluzione dei modelli climatici

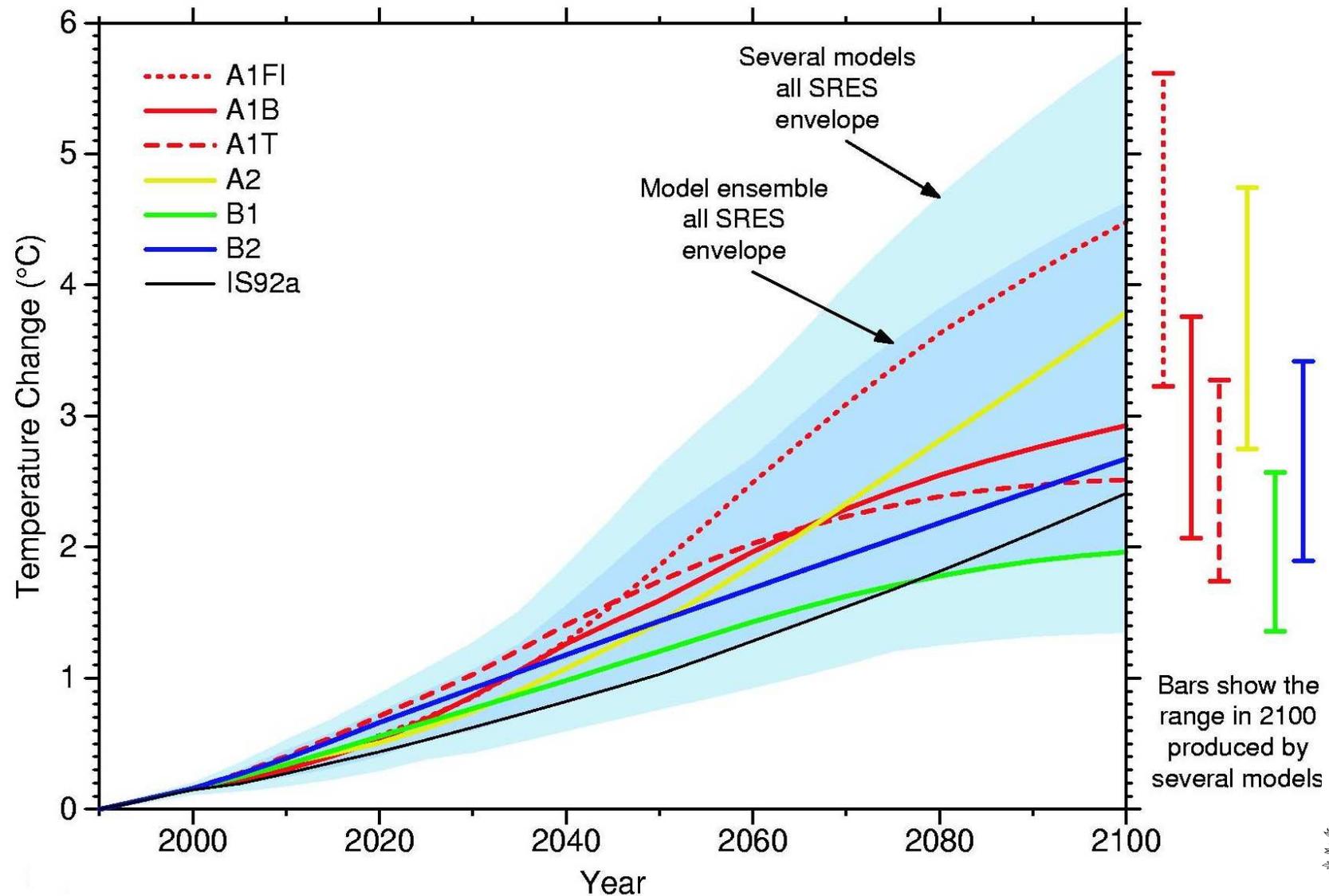


# Future Climate Change

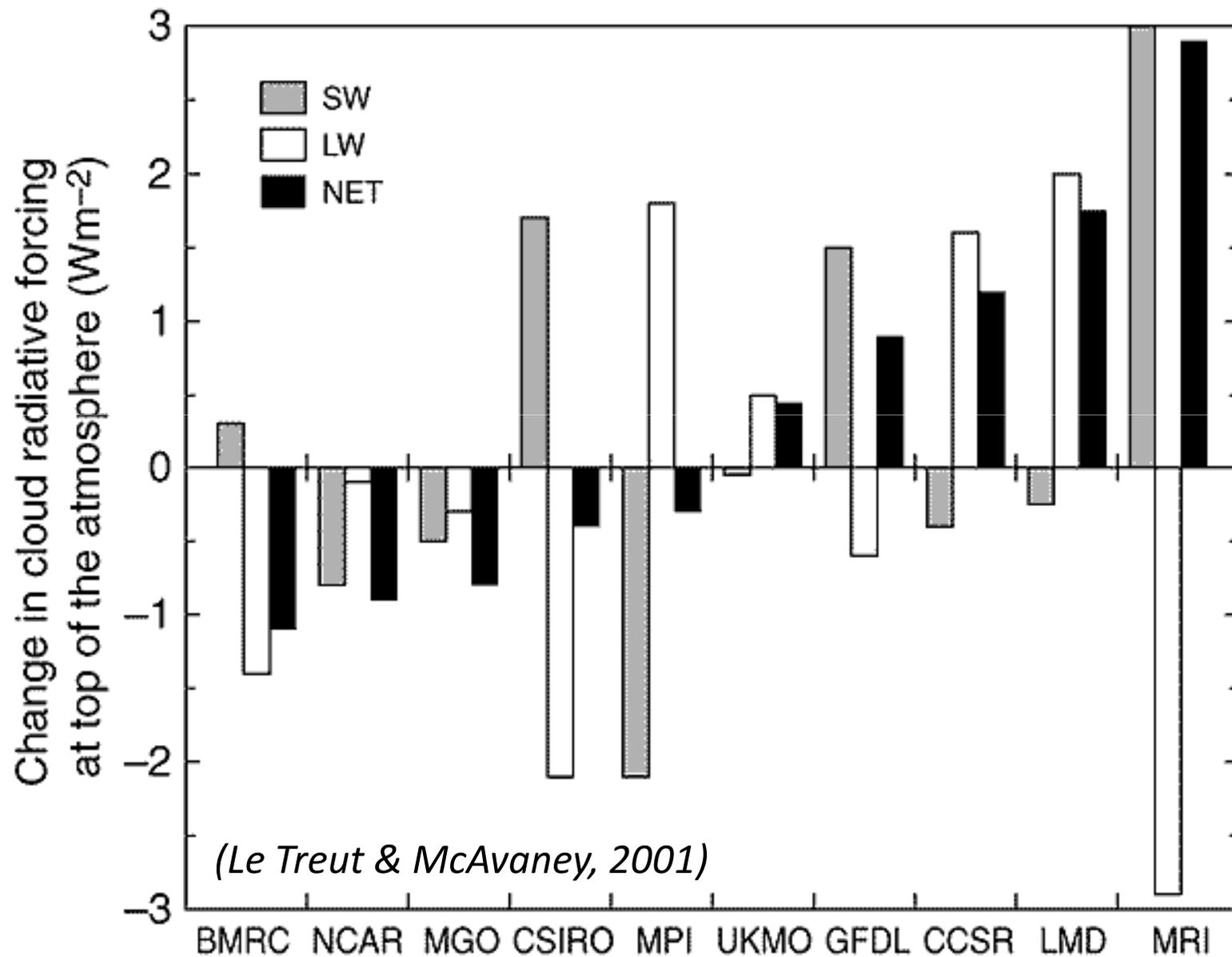
- A1: rapida crescita economica con sviluppo tecnologico
  - A1FI: uso intensivo di combustibili fossili
  - A1T: uso di combustibili non-fossili
  - A1B: bilancio di fonti di energia
- A2: espansione demografica
- B1: piu' attenzione ai problemi ambientali
- B2: piu' attenzione alle tematiche locali



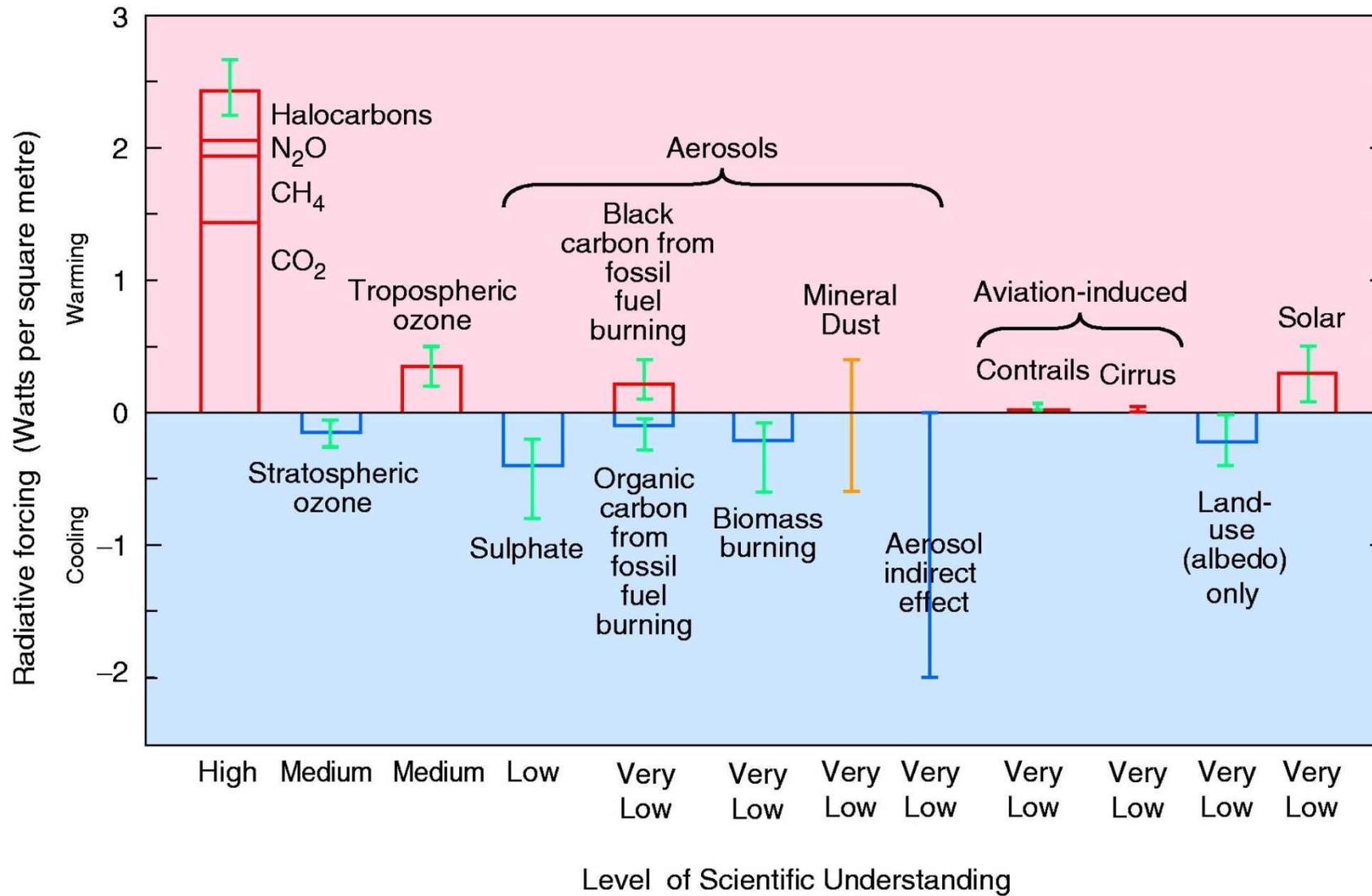
per la **temperatura globale** si prevede una **crescita** da **1.4 a 5.8°C** nel periodo **1990-2100**



# Stime di $\Delta$ CRF al raddoppio di $\text{CO}_2$



## The global mean radiative forcing of the climate system for the year 2000, relative to 1750



**Prediction is very  
difficult, especially if  
it's about the future.**

*-Nils Bohr-*