

Introduzione al sistema climatico terrestre



Osservazioni di stato e tendenza

*Federico Porcù (federico.porcu@unibo.it)
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Bologna*

sistemi dinamici, non linearità, caos;

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

**un esempio di interazione tra
sottosistemi;**

forzanti;

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

sistema: insieme di elementi che interagiscono tra loro con un obiettivo seguendo proprie regole

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:

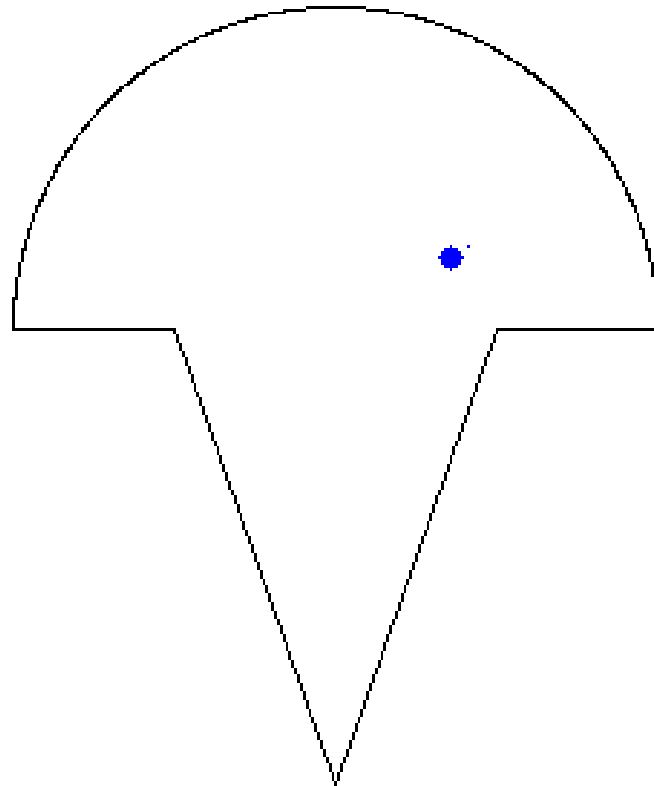
- i componenti interagiscono tra loro in modo lineare;
- è riducibile;
- è predicibile;
- è descritto da pochi parametri.

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, convezione).

Biliardo

sensibilità alle condizioni iniziali ($\Delta\phi = 0.5\%$)



Sistema di Lorenz

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

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

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

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

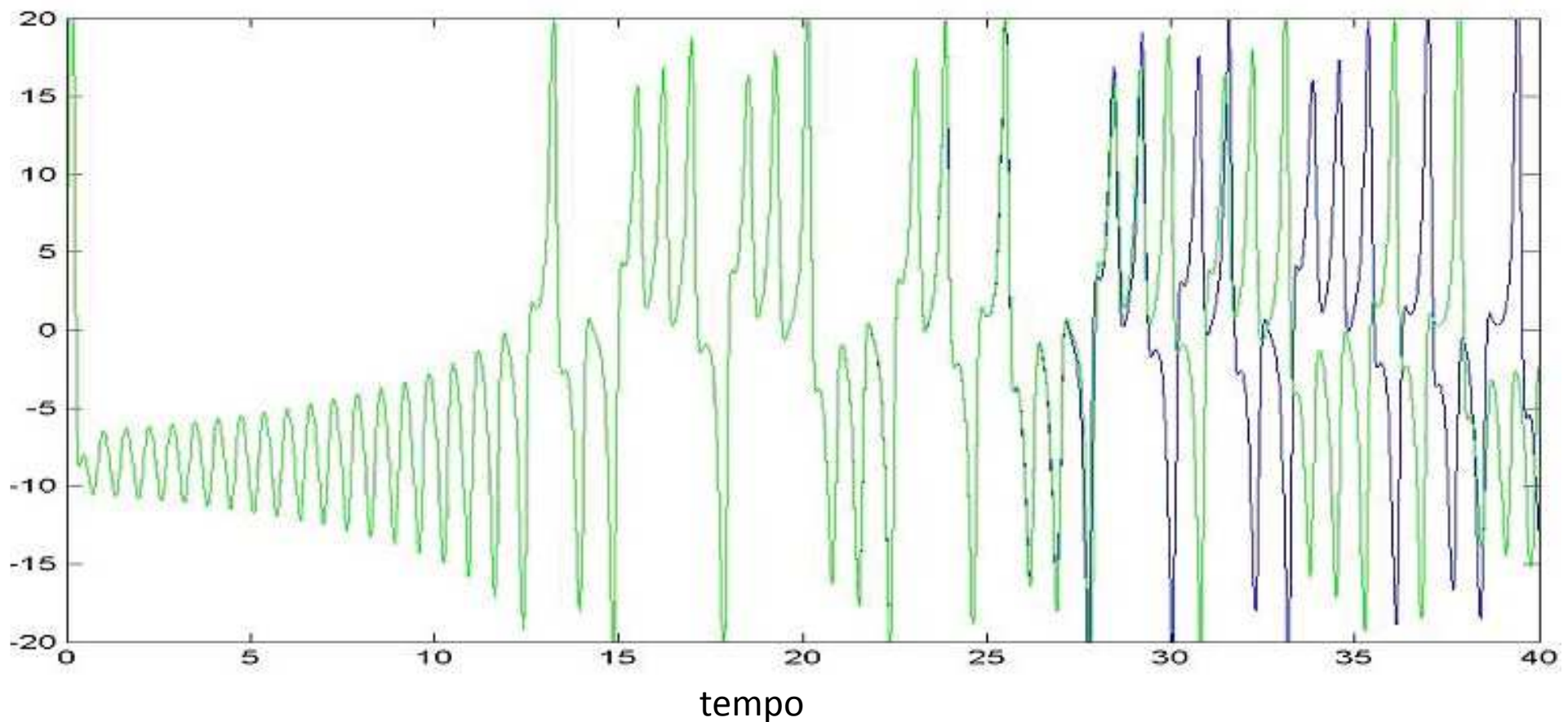
$$y_{(t=0)} = 1$$

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

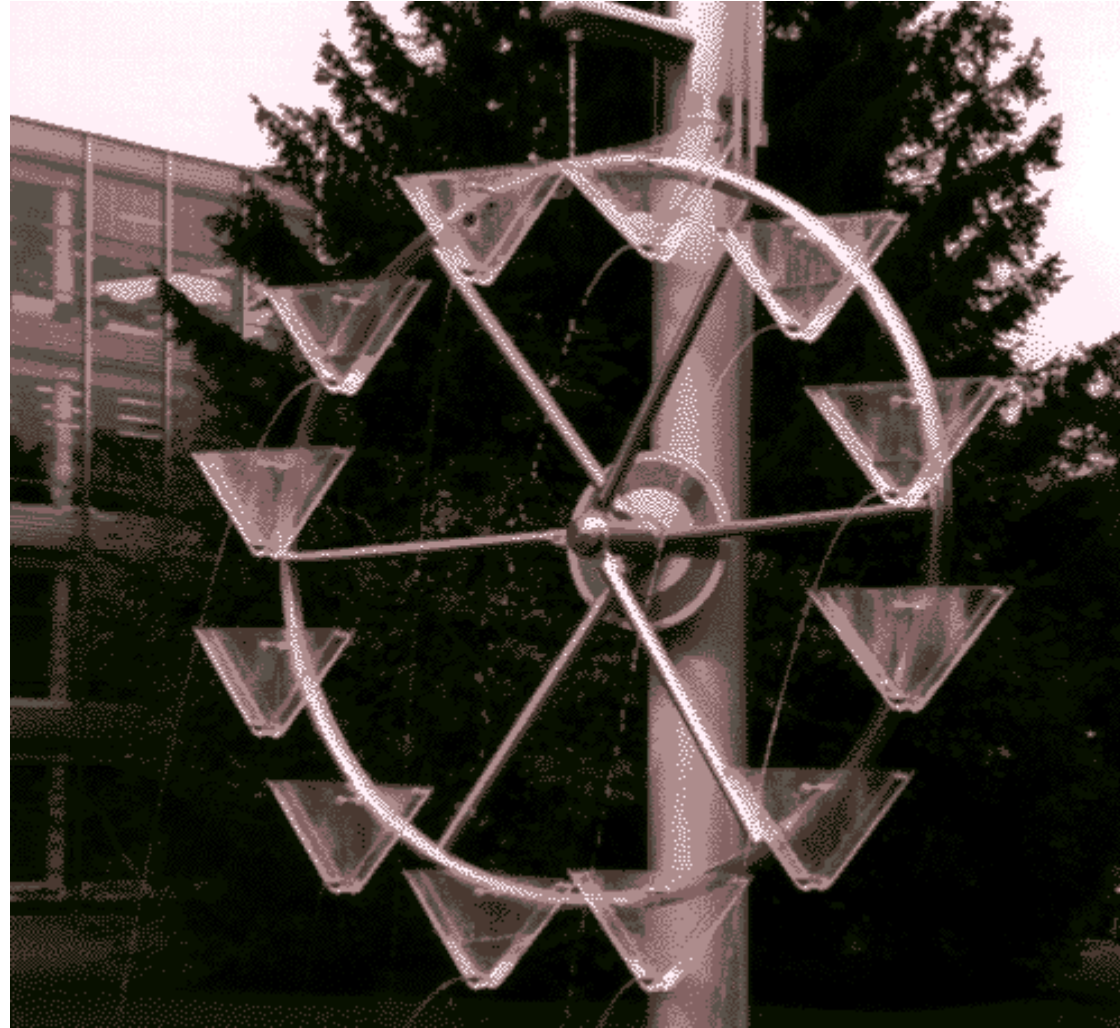
$$x_{(t=0)} = 8$$

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

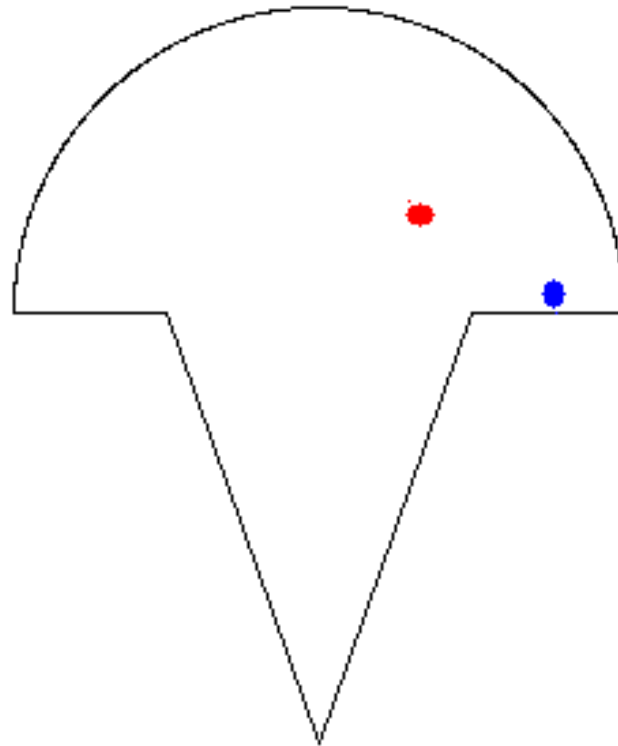
$$z_{(t=0)} = 1$$



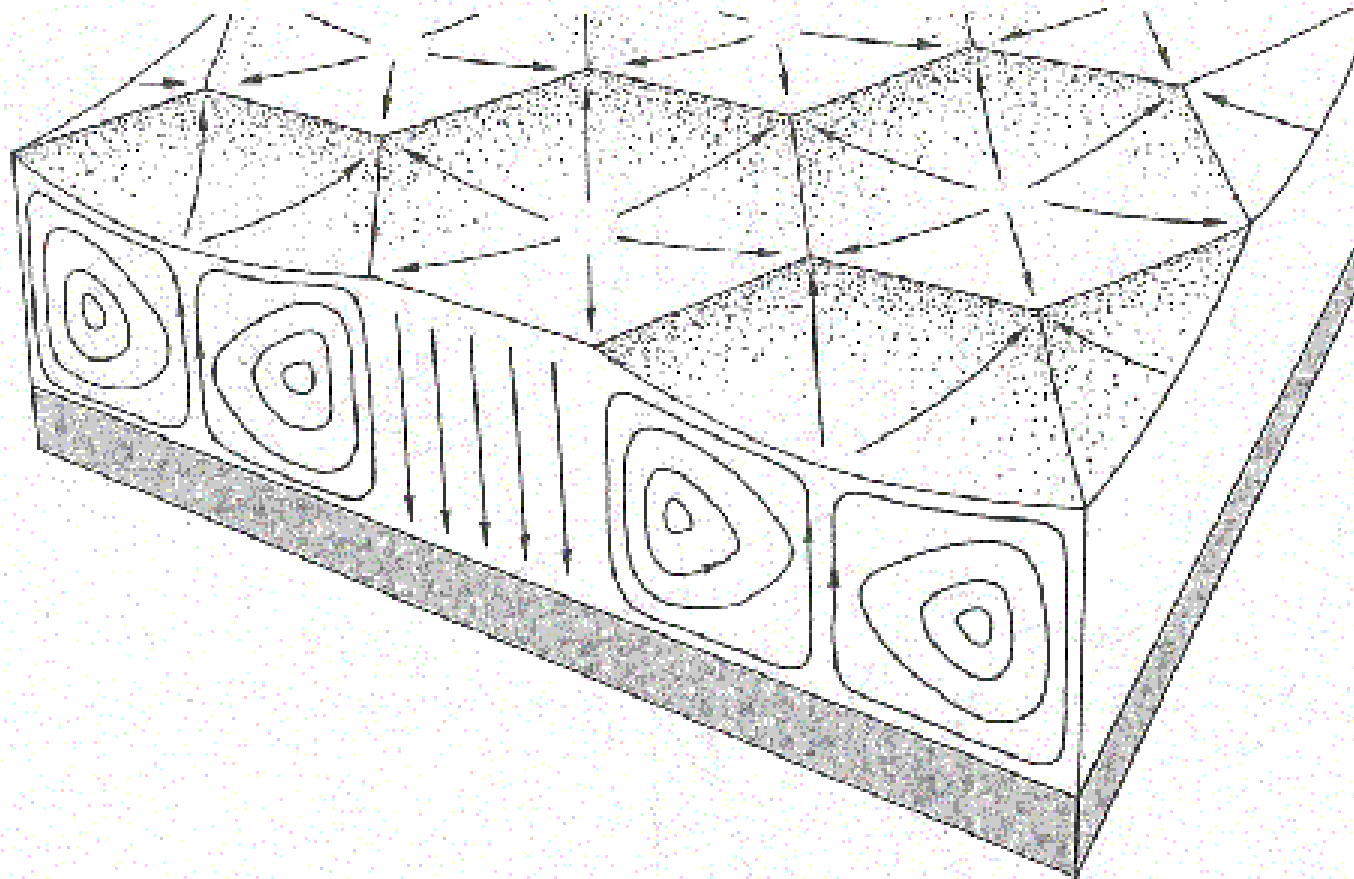
ruota ad acqua di Lorenz



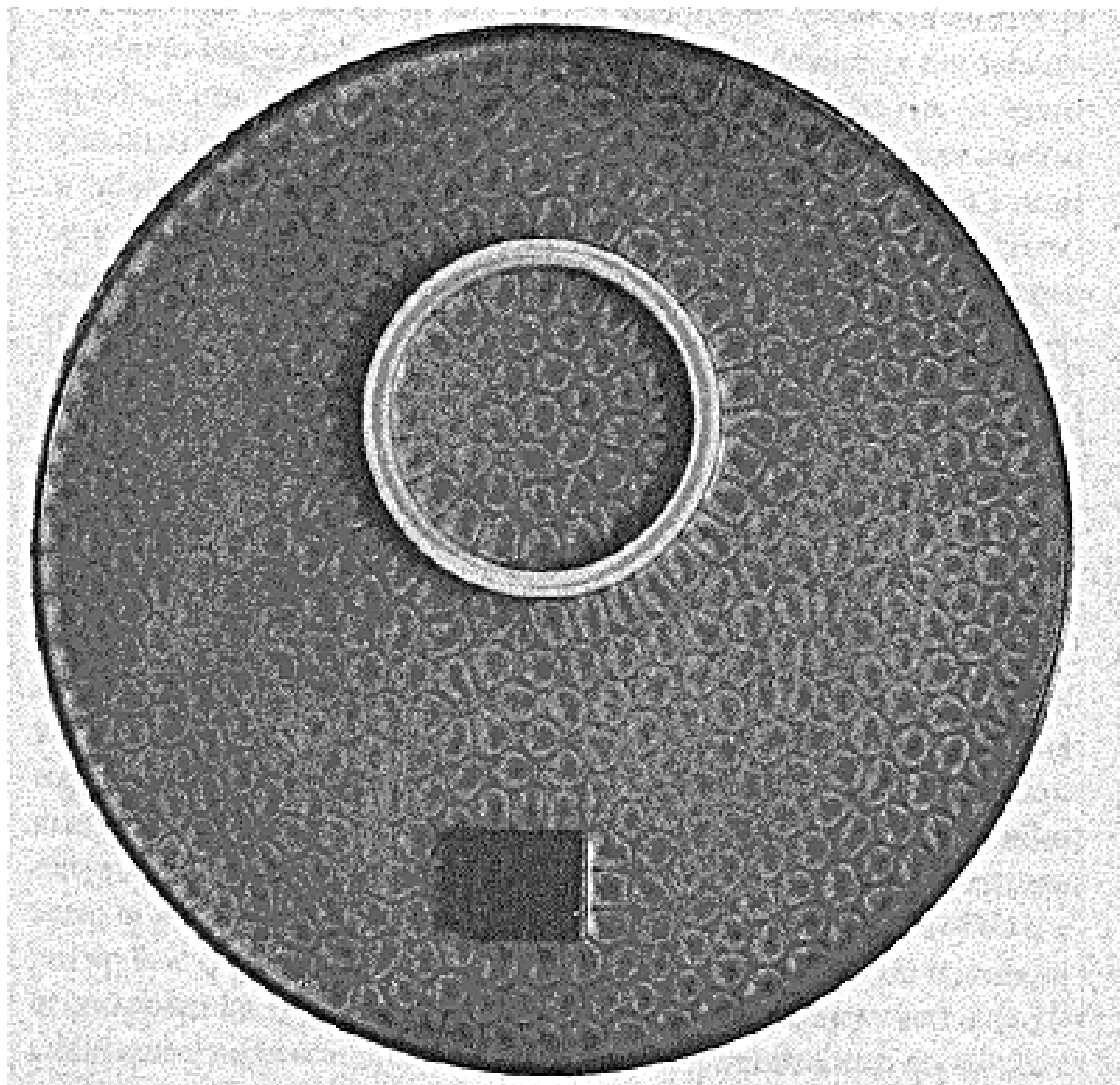
Biliardo ordine



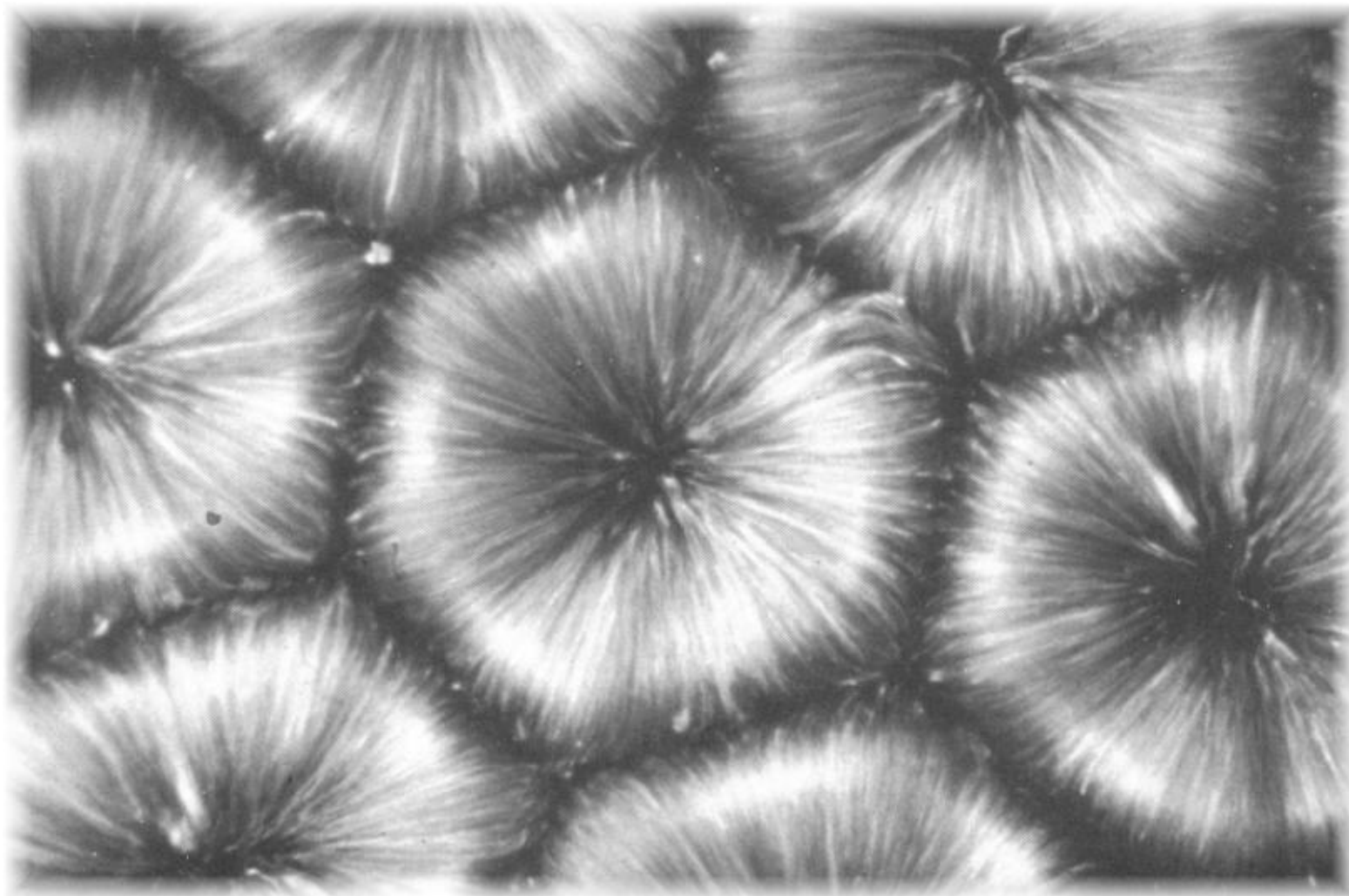
Convezione (Benard)



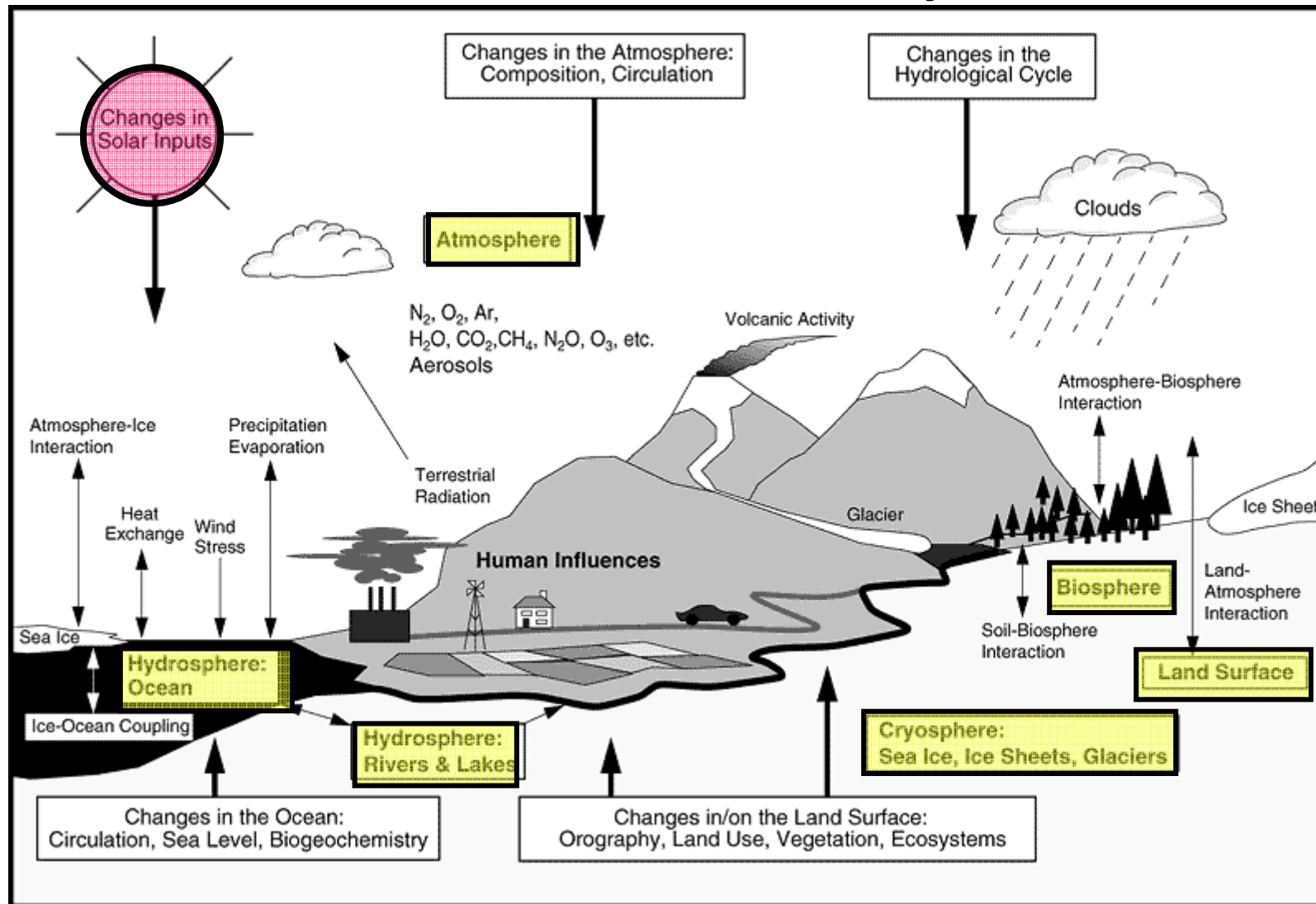
Convezione (Benard)



Convezione (Benard)



The Global Climate System



caratteristiche del sistema climatico:

- 1) diversi sottosistemi con:
diversi scale spazio-temporali,
diverse metodologie di studio,
diversi livelli di conoscenza;
- 2) interazioni tra sottosistemi:
difficilmente osservabili,
poco studiate,
- 3) necessità di tempi “sperimentali” lunghi;
- 4) sistema caotico.

*The key to gaining a better understanding of the **global environment** is exploring how the Earth's systems of air, land, water, and life interact with each other, **blending together** fields like meteorology, oceanography, biology, and atmospheric sciences*

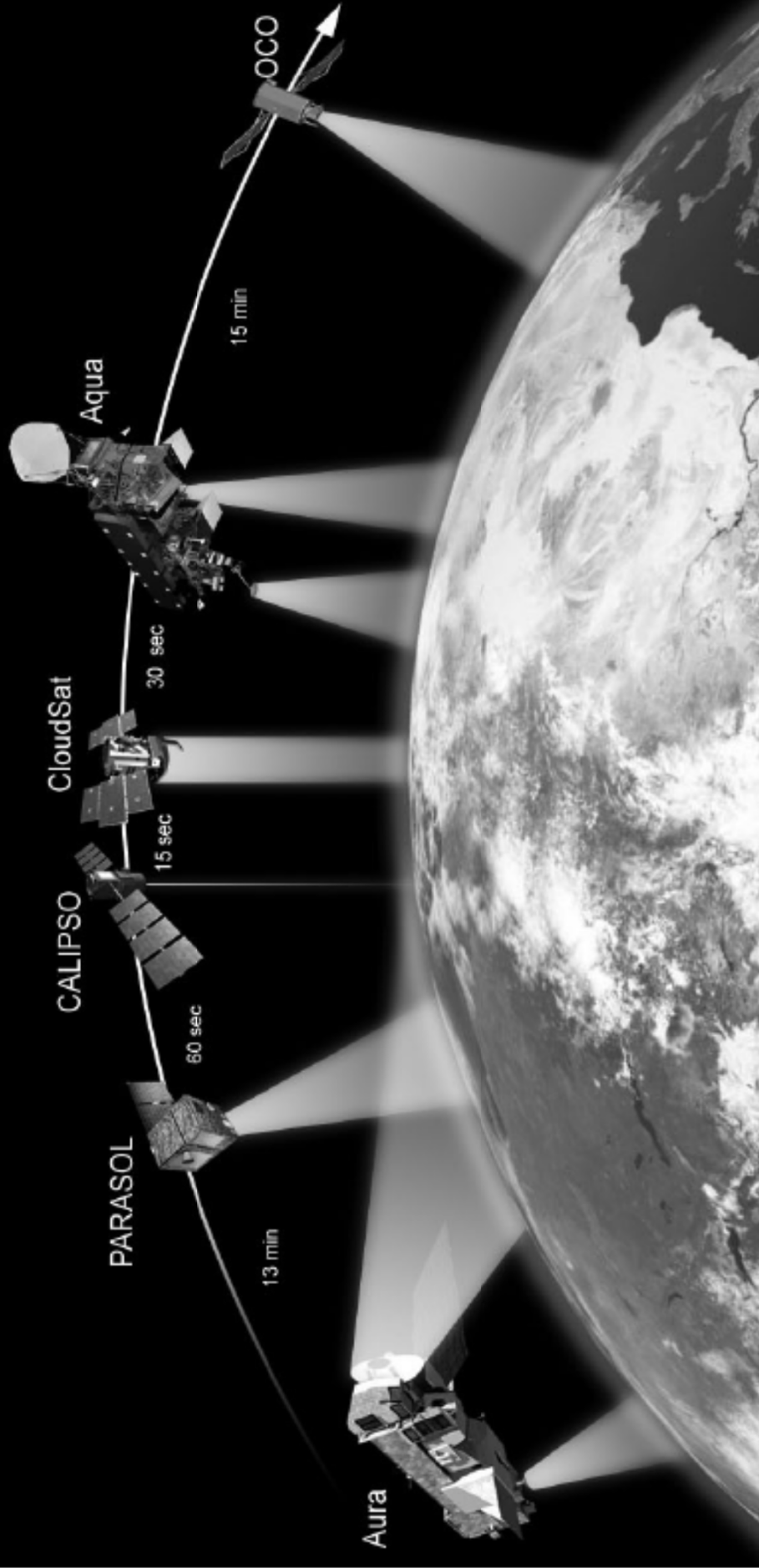
1991: Earth Science Enterprise

1999: Earth Observing System



*EOS will observe the key physical variables needed to advance understanding of the entire Earth system and develop a **deeper comprehension** of the **components** of that system and the **interactions** among the components*

The A-Train



24 EOS Measurements



ATMOSPHERE	Cloud Properties (amount, optical properties, height)	MODIS, GLAS, AMSR-E, MISR, AIRS, ASTER, SAGE III
	Radiative Energy Fluxes (top of atmosphere, surface)	CERES, ACRIM III, MODIS, AMSR-E, GLAS, MISR, AIRS, ASTER, SAGE III
	Precipitation	AMSR-E
	Tropospheric Chemistry (ozone, precursor gases)	TES, MOPITT, SAGE III, MLS, HIRDLS, LIS
	Stratospheric Chemistry (ozone, ClO, BrO, OH, trace gases)	MLS, HIRDLS, SAGE III, OMI, TES
	Aerosol Properties (stratospheric, tropospheric)	SAGE III, HIRDLS MODIS, MISR, OMI, GLAS
	Atmospheric Temperature	AIRS/AMSU-A, MLS, HIRDLS, TES, MODIS
	Atmospheric Humidity	AIRS/AMSU-A/HSB, MLS, SAGE III, HIRDLS, Poseidon 2/JMR/DORIS, MODIS, TES
	Lightning (events, area, flash structure)	LIS
	Total Solar Irradiance	ACRIM III, TIM
SOLAR RADIATION	Solar Spectral Irradiance	SIM, SOLSTICE

24 EOS Measurements



LAND	Land Cover & Land Use Change	ETM+, MODIS, ASTER, MISR
	Vegetation Dynamics	MODIS, MISR, ETM+, ASTER
	Surface Temperature	ASTER, MODIS, AIRS, AMSR-E, ETM+
	Fire Occurrence (extent, thermal anomalies)	MODIS, ASTER, ETM+
	Volcanic Effects (frequency of occurrence, thermal anomalies, impact)	MODIS, ASTER, ETM+, MISR
	Surface Wetness	AMSR-E
OCEAN	Surface Temperature	MODIS, AIRS, AMSR-E
	Phytoplankton & Dissolved Organic Matter	MODIS
	Surface Wind Fields	SeaWinds, AMSR-E, Poseidon 2/JMR/DORIS
	Ocean Surface Topography (height, waves, sea level)	Poseidon 2/JMR/DORIS

24 EOS Measurements



CRYOSPHERE

Land Ice

(ice sheet topography, ice sheet volume change, glacier change)

GLAS, ASTER, ETM+

Sea Ice

(extent, concentration, motion, temperature)

AMSR-E, Poseidon 2/JMR/DORIS, MODIS, ETM+, ASTER

Snow Cover

(extent, water equivalent)

MODIS, AMSR-E, ASTER, ETM+

un esempio di interazione tra sottosistemi: El nino

meccanismi di retroazione (feed back)

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

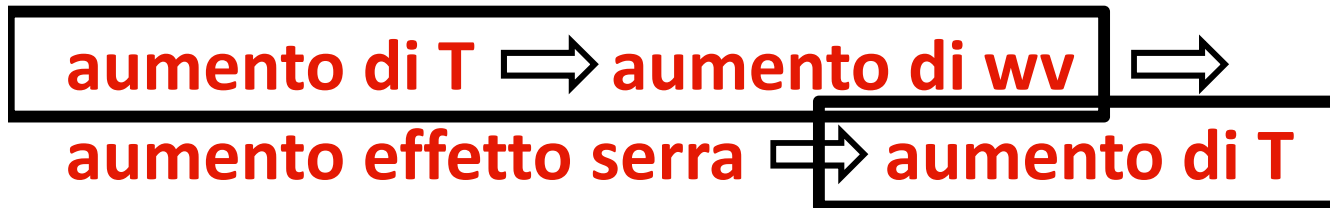
feed back positivo: l'impatto aumenta
instabilità

feed back negativo: l'impatto diminuisce
stabilità

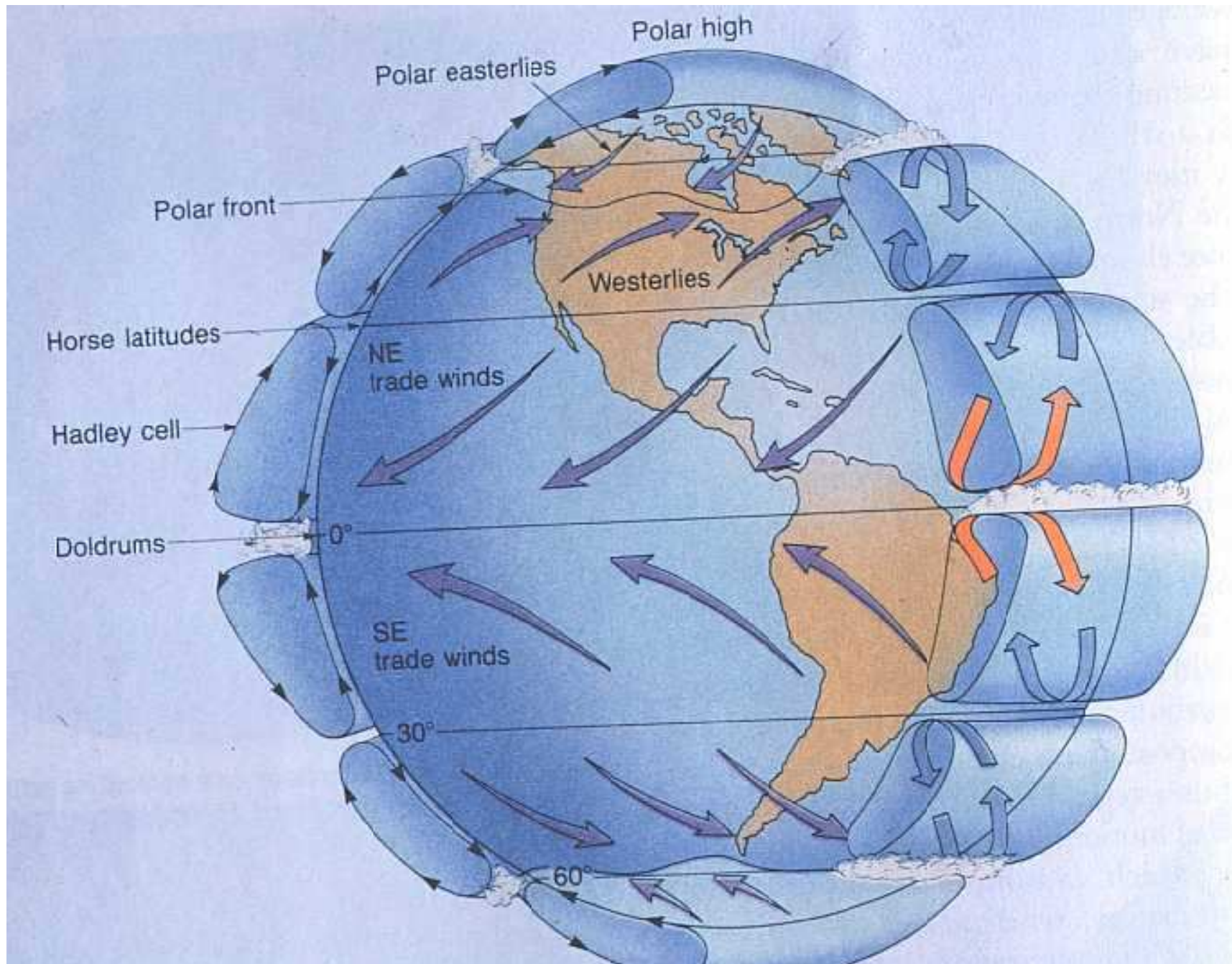
feed back negativo



feed back positivo



circolazione globale



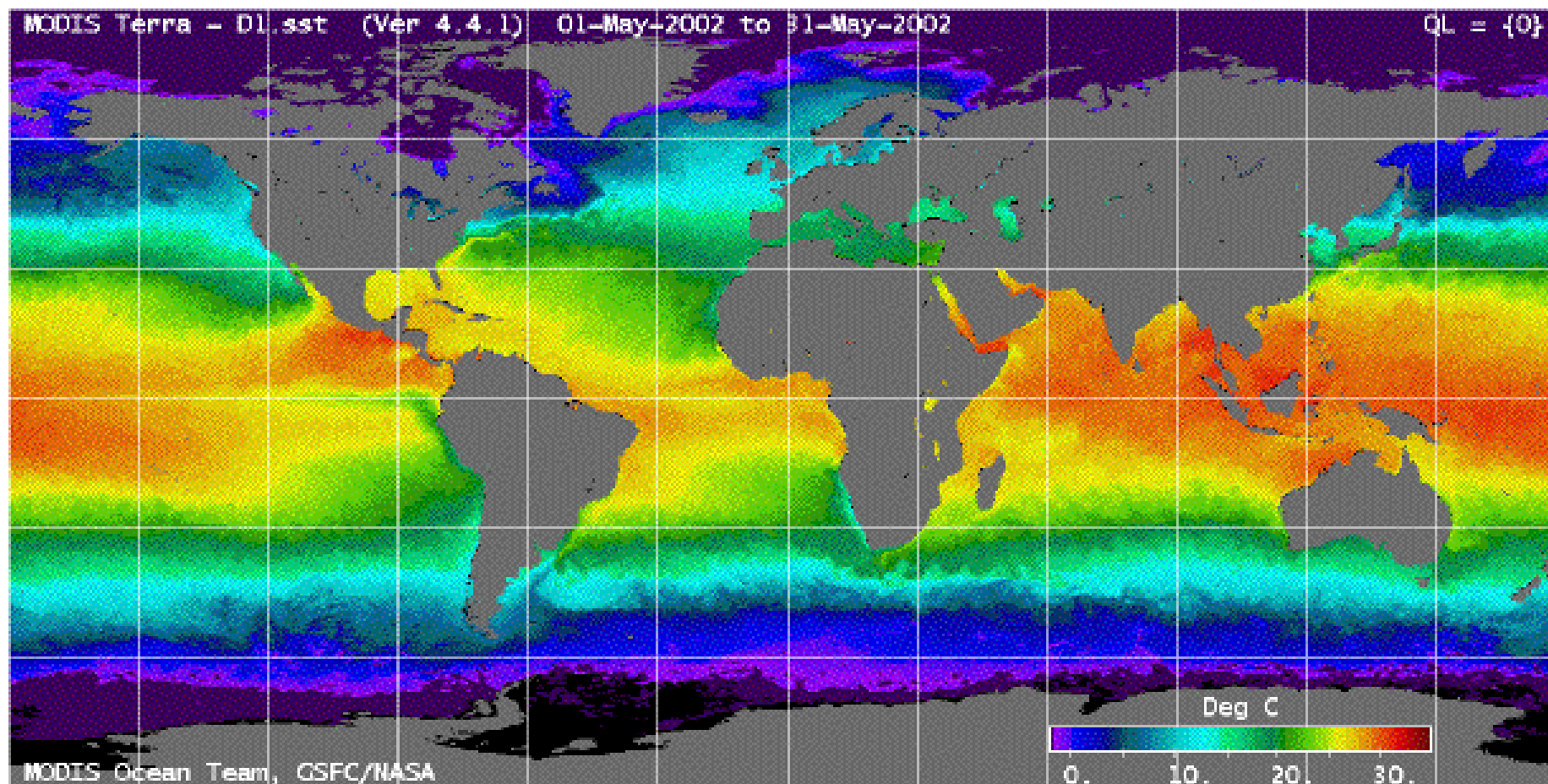
El Niño

Interazione Atmosfera/Oceano

- l'atmosfera influenza l'oceano principalmente a causa dello stress del vento superficiale;**

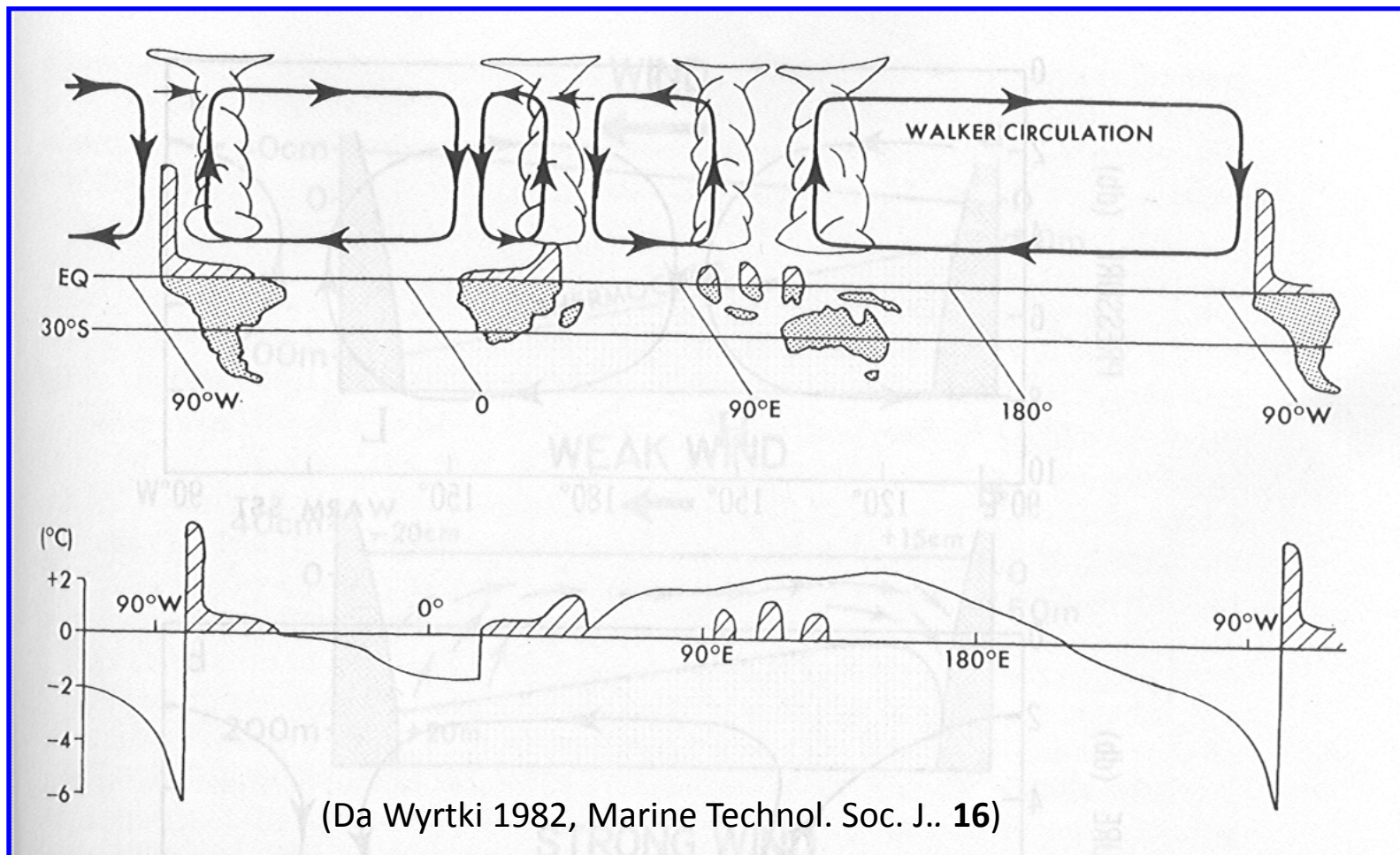
- l'oceano influenza l'atmosfera principalmente a causa di anomalie nella temperatura della sua superficie (*Sea Surface Temperature SST*) e del conseguente flusso verticale di calore sensibile e latente.**

temperatura media oceanica

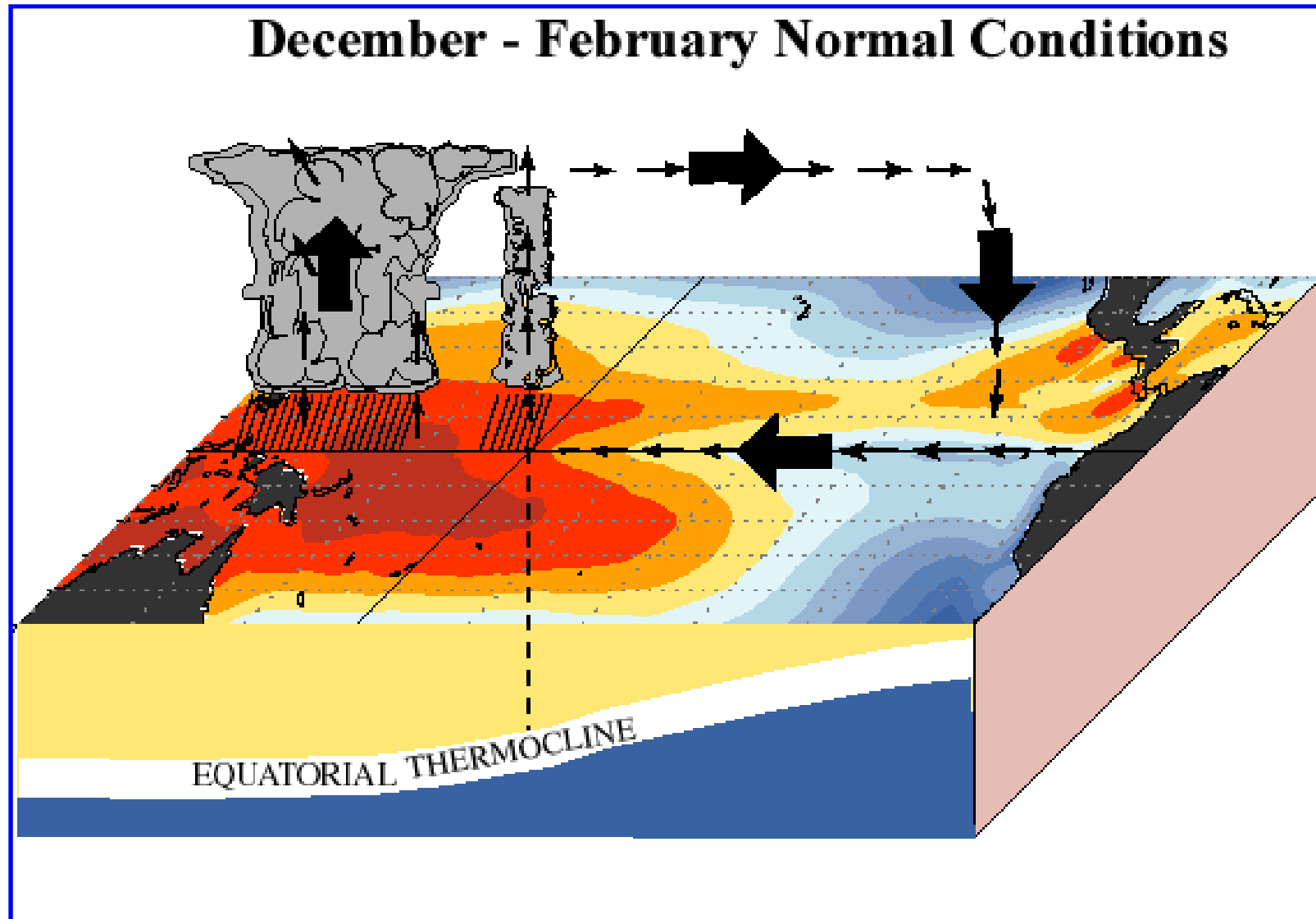


Circolazione Atmosferica Equatoriale

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.

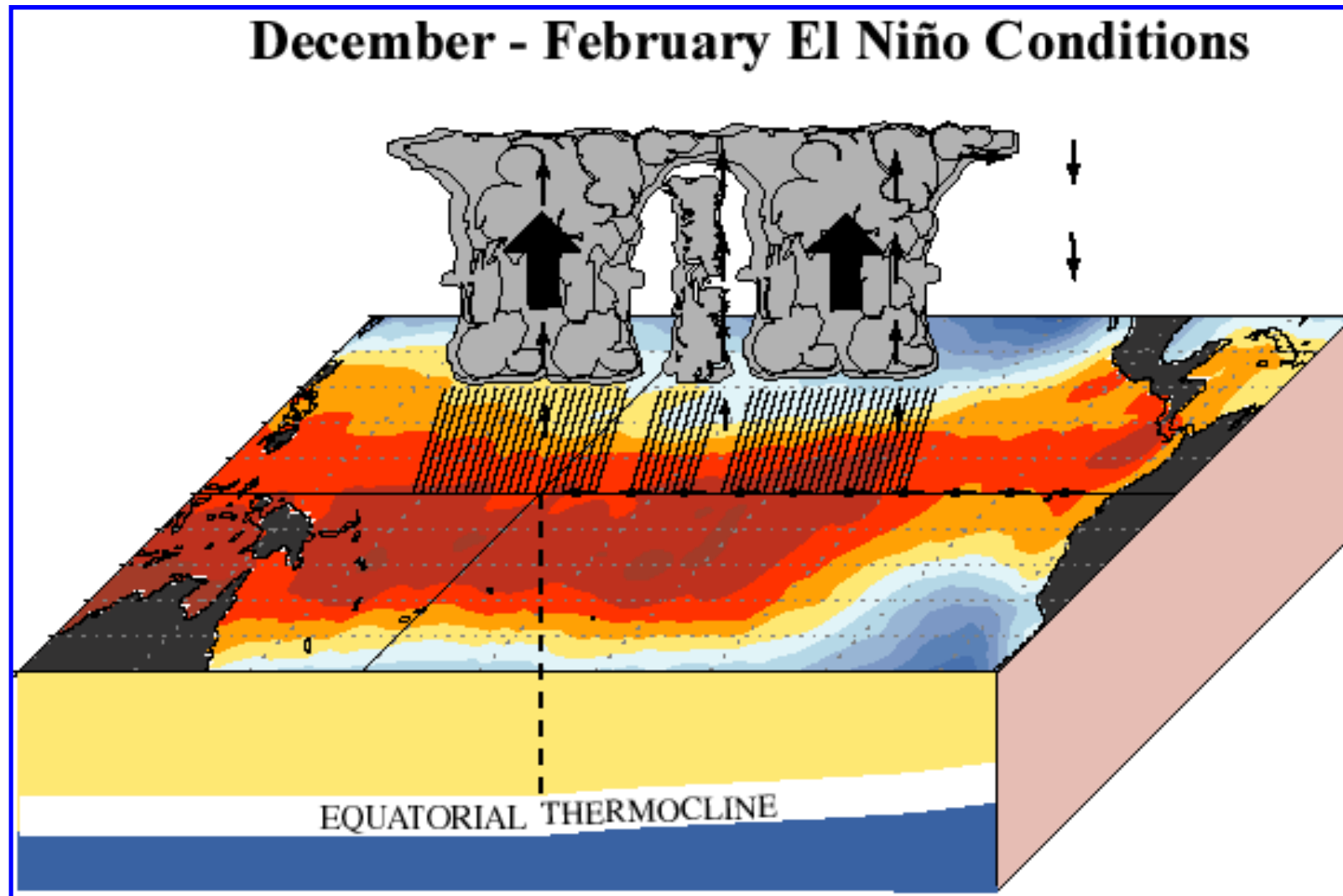


Circolazione Atmosferica Equatoriale



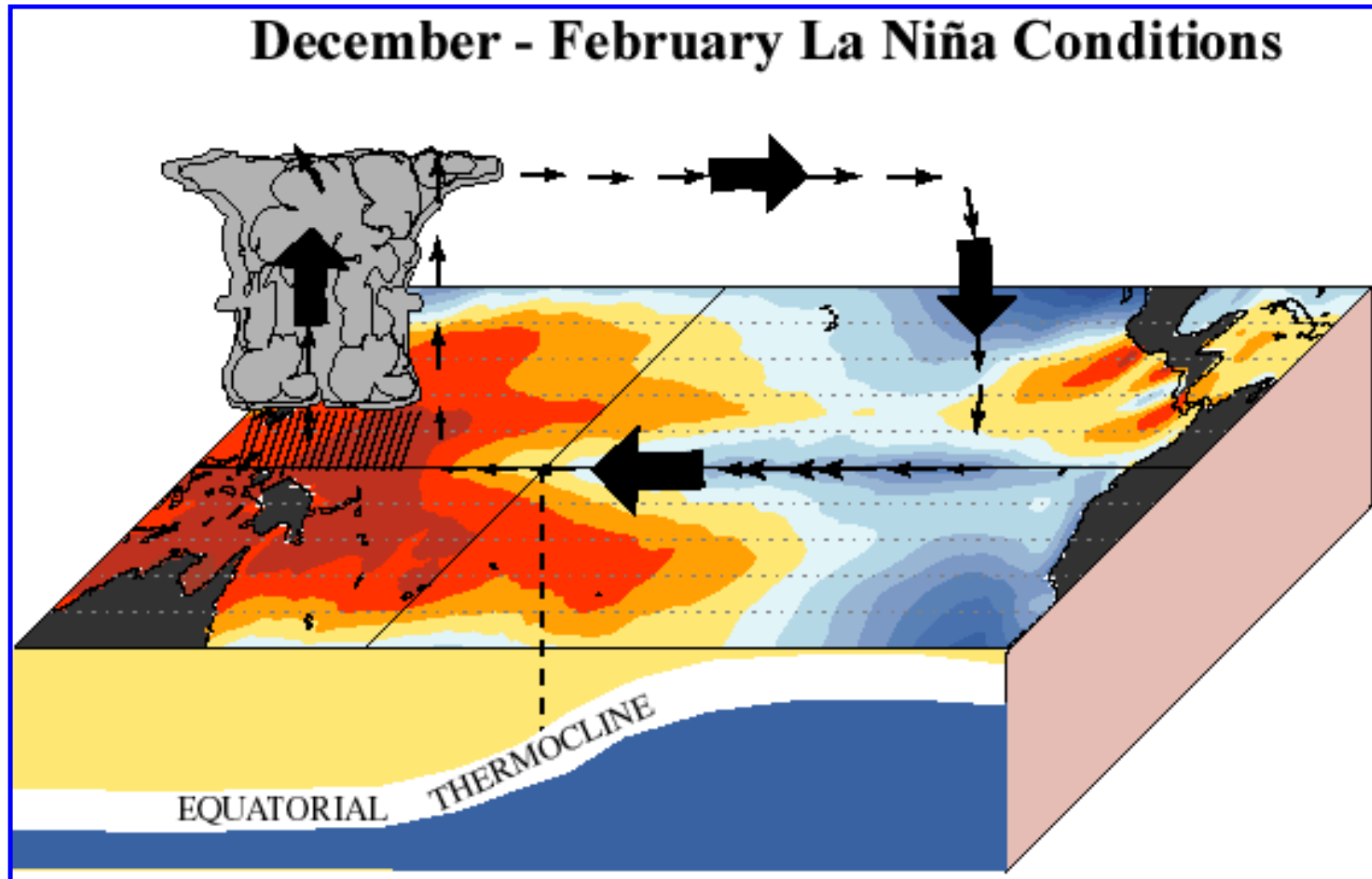
Circolazione Atmosferica Equatoriale

Condizione ENSO – El Niño



Circolazione Atmosferica Equatoriale

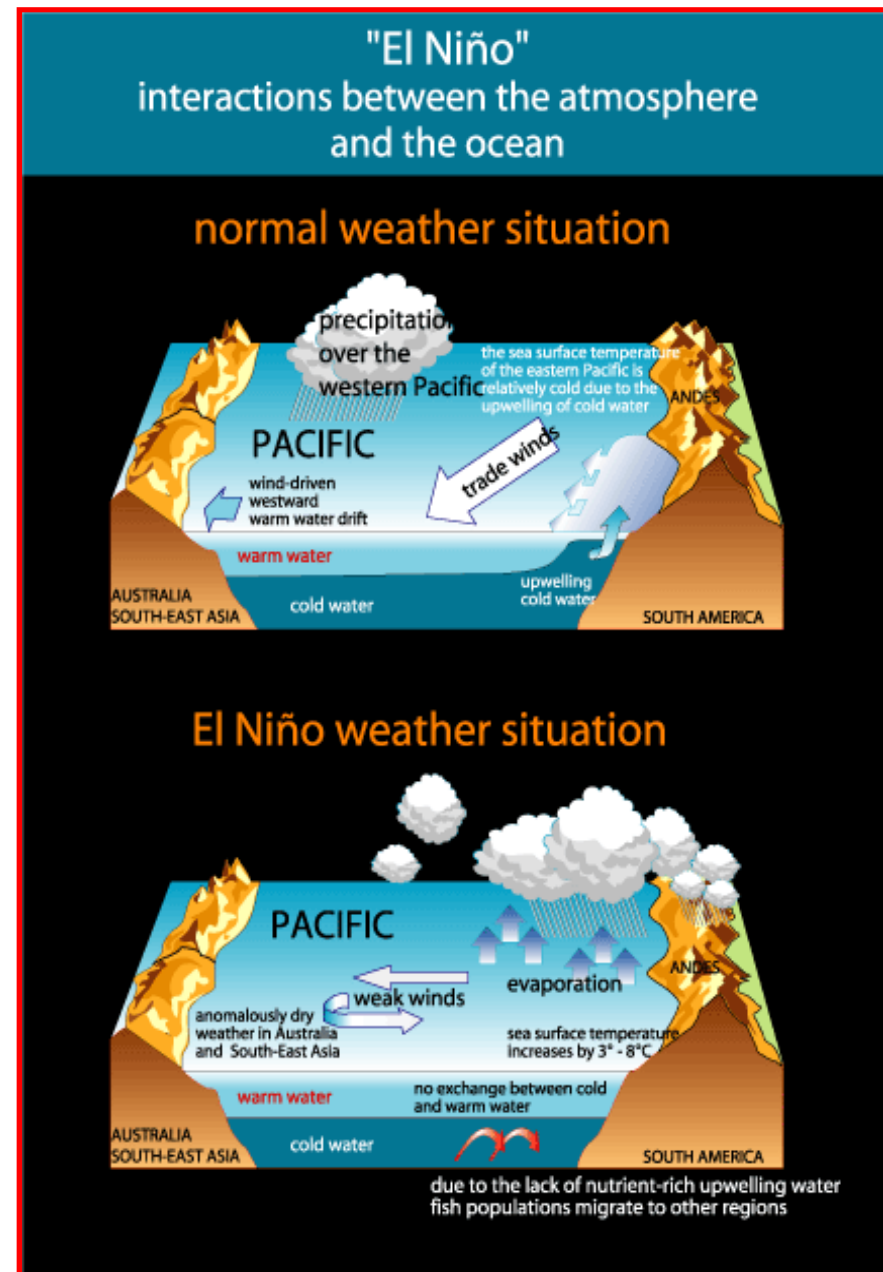
Condizione anti ENSO – La Niña



Circolazione Atmosferica Equatoriale - Condizione ENSO

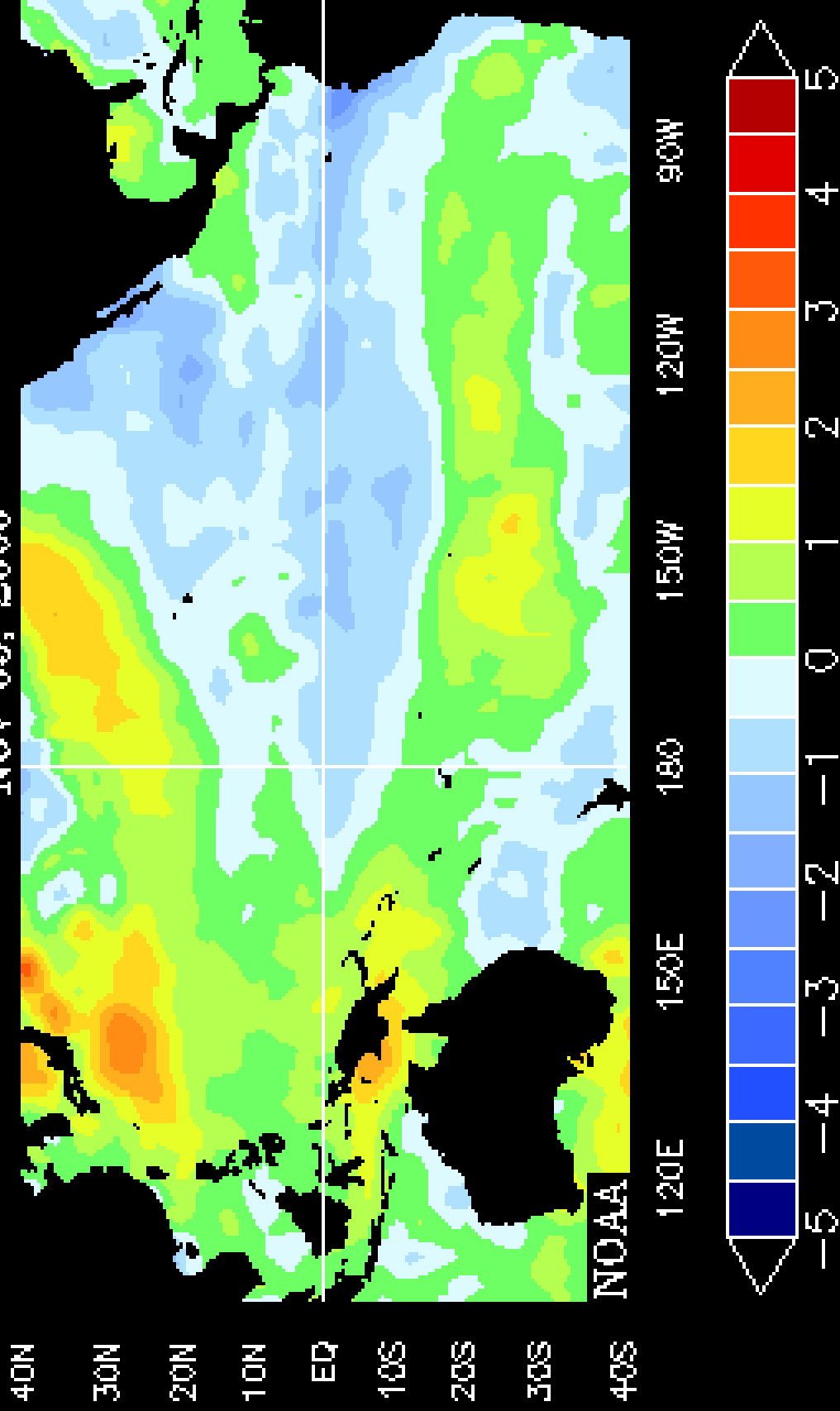
Negli anni “normali” il forte gradiente di temperatura superficiale (freddo a est caldo a ovest) nel Pacifico equatoriale è accompagnato da **forti venti alisei** che spingono le acque superficiali verso ovest permettendo a quelle più fredde e profonde di risalire in superficie. La **risalita delle acque**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

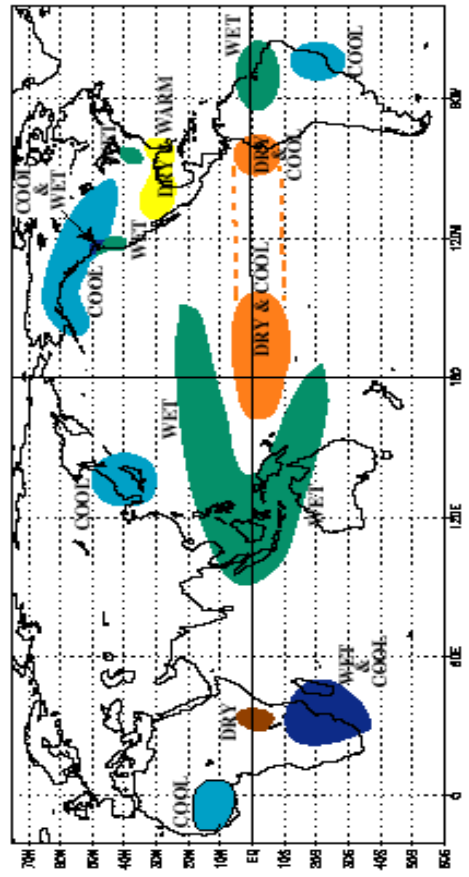


SST ANOMALIES °C

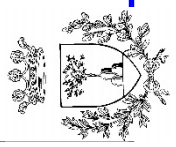
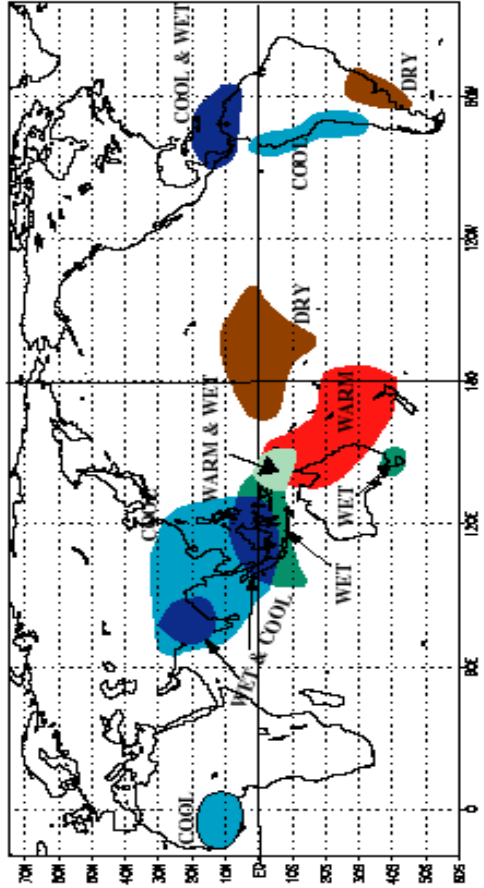
NOV 05, 2000



COLDEPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY

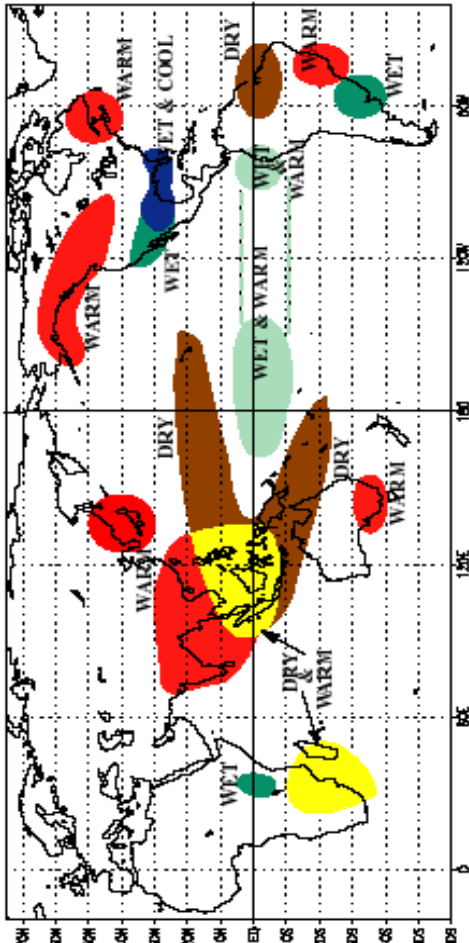


COLD EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST

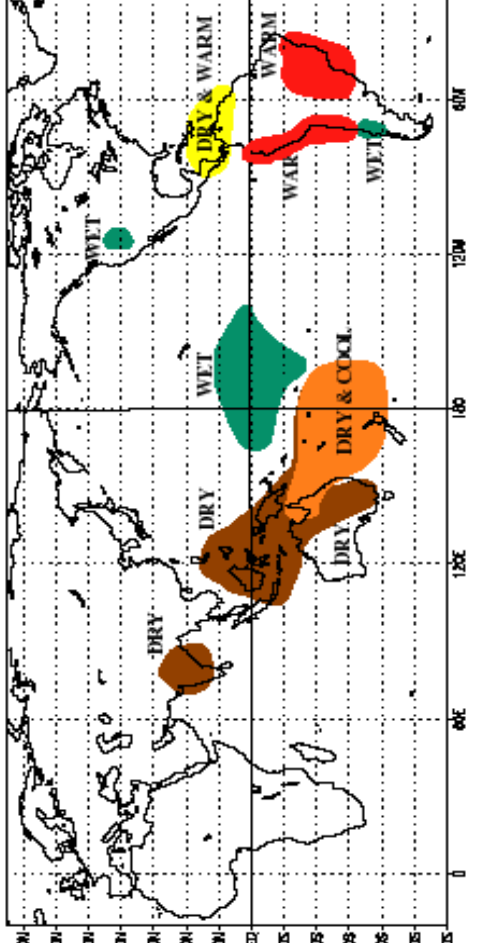


Climate Prediction Center
NCEP

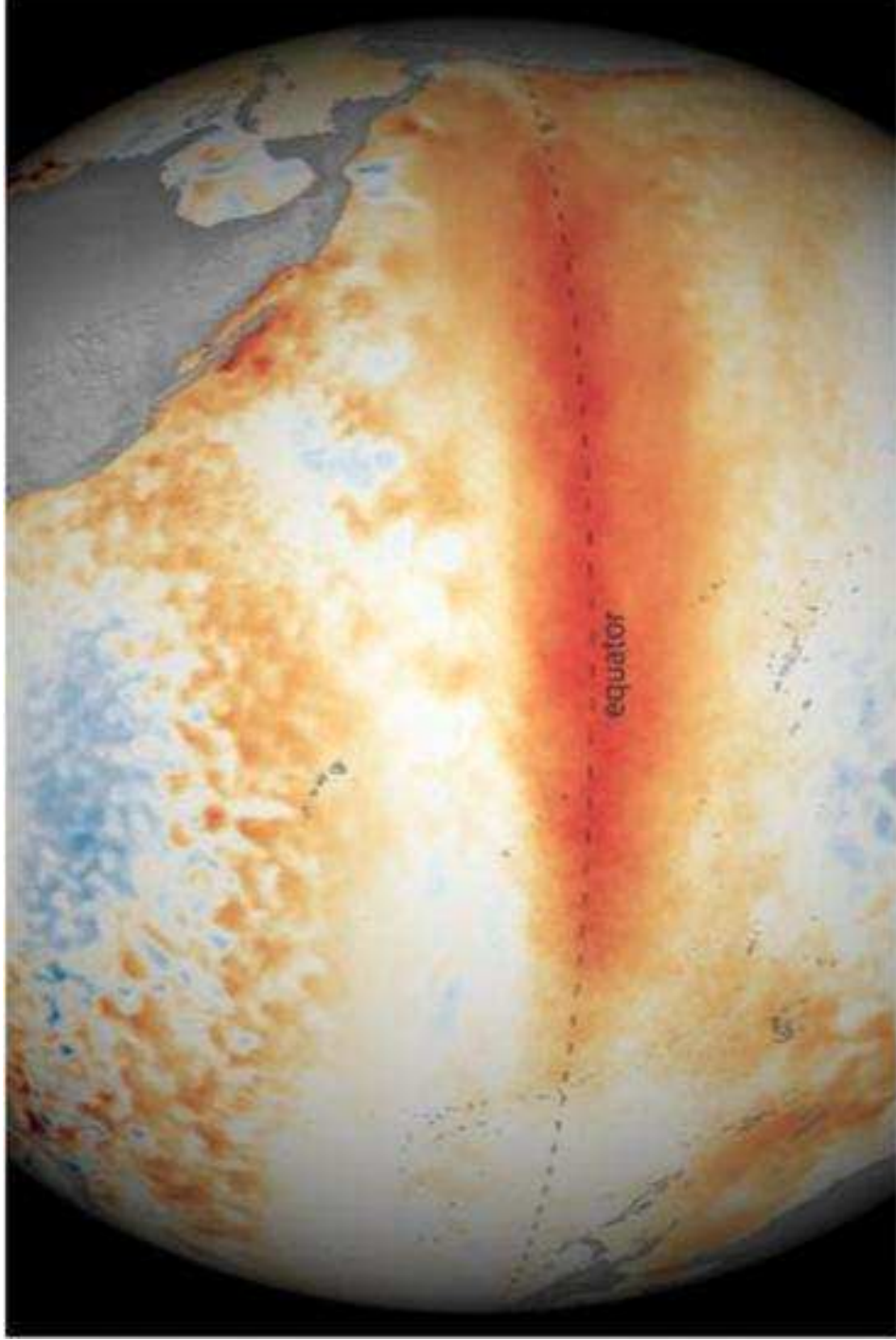
WARMEPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY



WARM EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST



Climate Prediction Center
NCEP



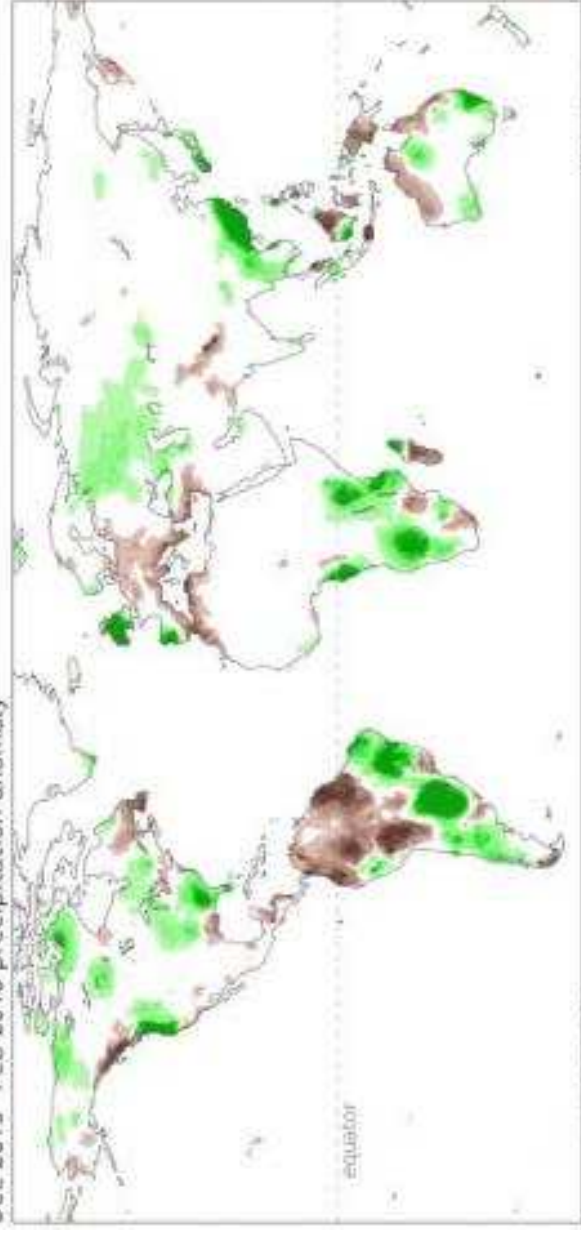
February 2016
compared to 1981-2010

Difference from average temperature (°F)

-9 0 9

Climate.gov/NNVL
Data: Geo-Polar SST

Dec 2015–Feb 2016 precipitation anomaly



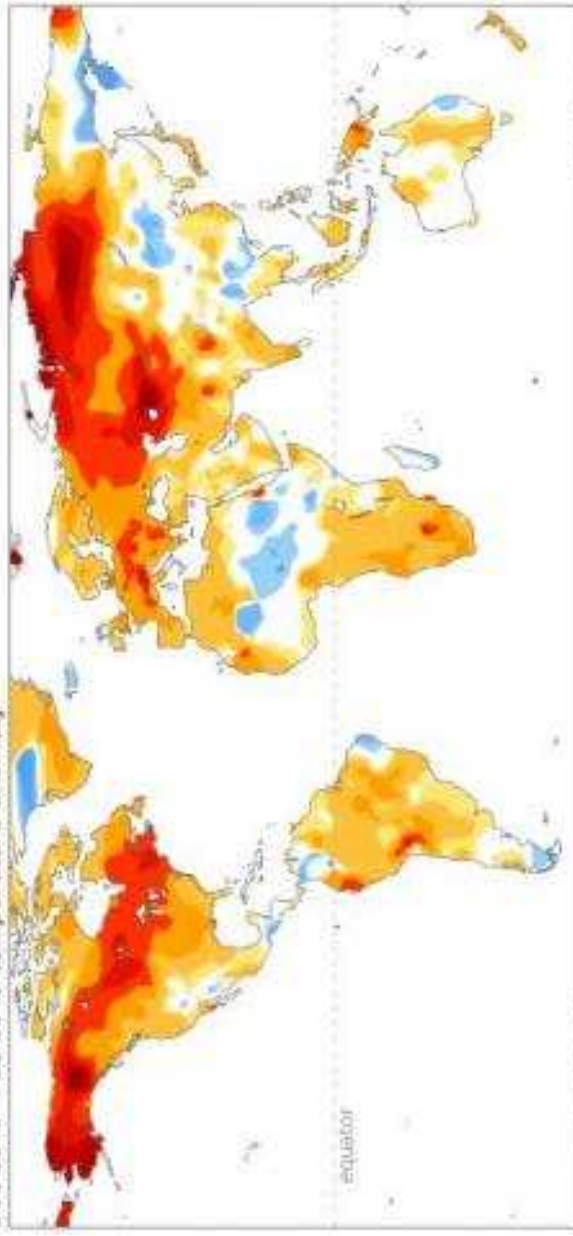
Compared to 1981–2010

Difference from average (mm)



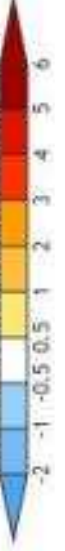
NOAA Climate.gov
Data: CPC

Dec 2015–Feb 2016 temperature anomaly



Compared to 1981–2010

Difference from average temperature (°C)



NOAA Climate.gov
Data: CPC

FORZANTI NATURALI

VARIAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE

Diretta



Attività Solare

Indiretta



Milankovitch

INTERAZIONI TRA DIVERSE COMPONENTI

El Niño

ERUZIONI VULCANICHE

DERIVA DEI CONTINENTI

FORZANTI ANTROPICHE

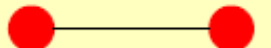
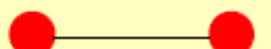
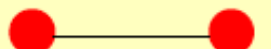


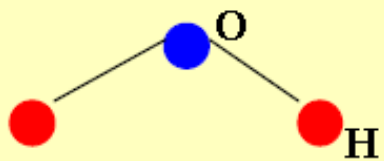
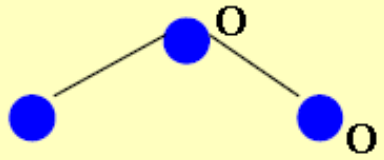
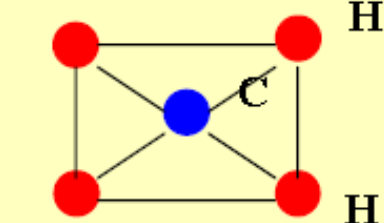
IMMISSIONE DI GAS IN ATMOSFERA

IMMISSIONE DI AEROSOL IN ATMOSFERA

SFRUTTAMENTO DEL TERRENO

forzanti - GHG I

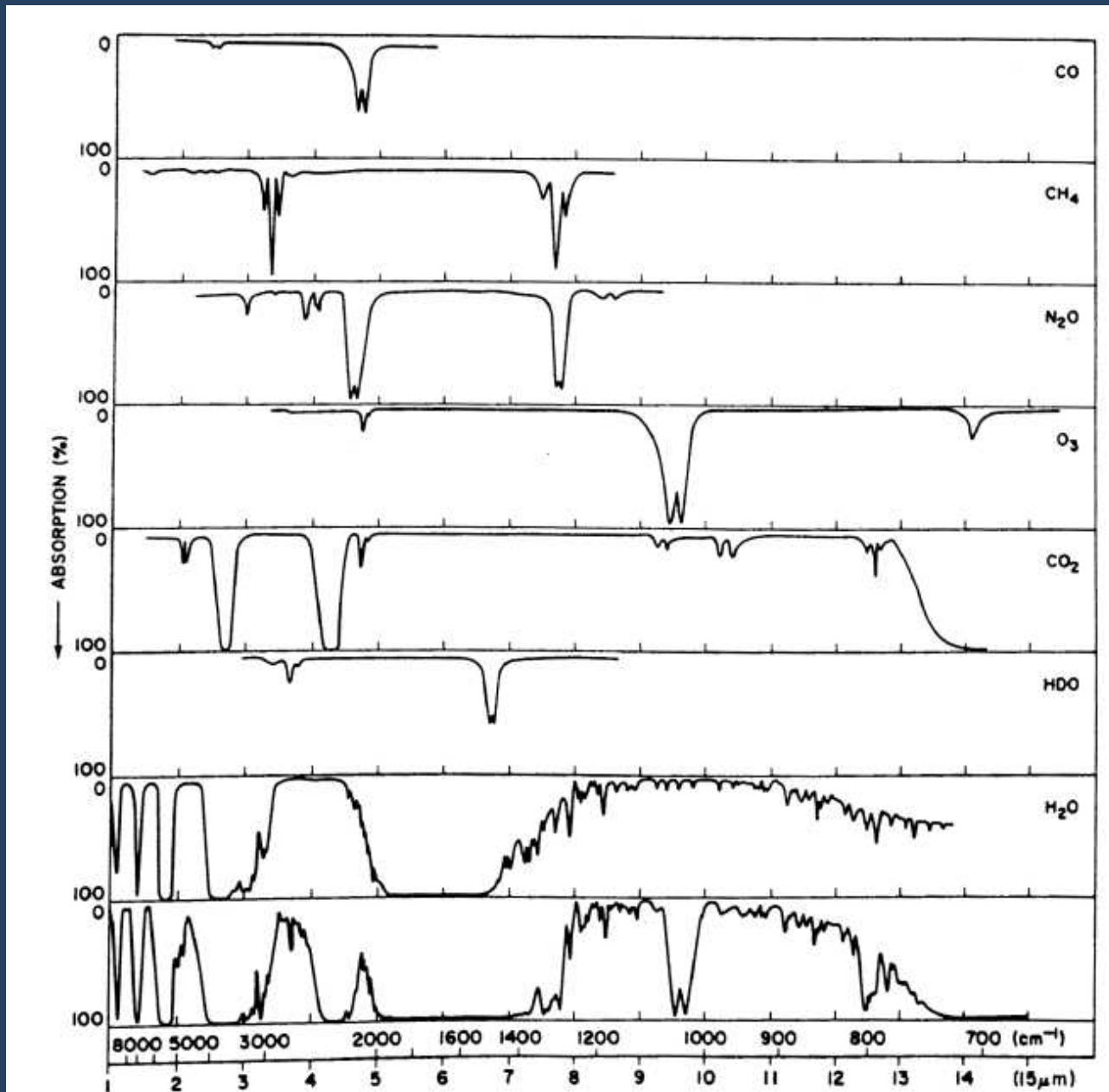
interazione tra radiazione e costituenti atmosferici

Molecule	Structure	Permanent dipole moment	May acquire dipole moment
N ₂	N  N	No	No
O ₂	O  O	No	No
CO	C  O	Yes	Yes
CO ₂	O  O	No	Yes (in two vibrational modes)
N ₂ O	N  N O	Yes	Yes
H ₂ O	 O H H	Yes	Yes
O ₃	 O O O	Yes	Yes
CH ₄	 C H H H H	No	Yes (in two vibrational modes)

Peixoto and Oort (1998)

forzanti - GHG II

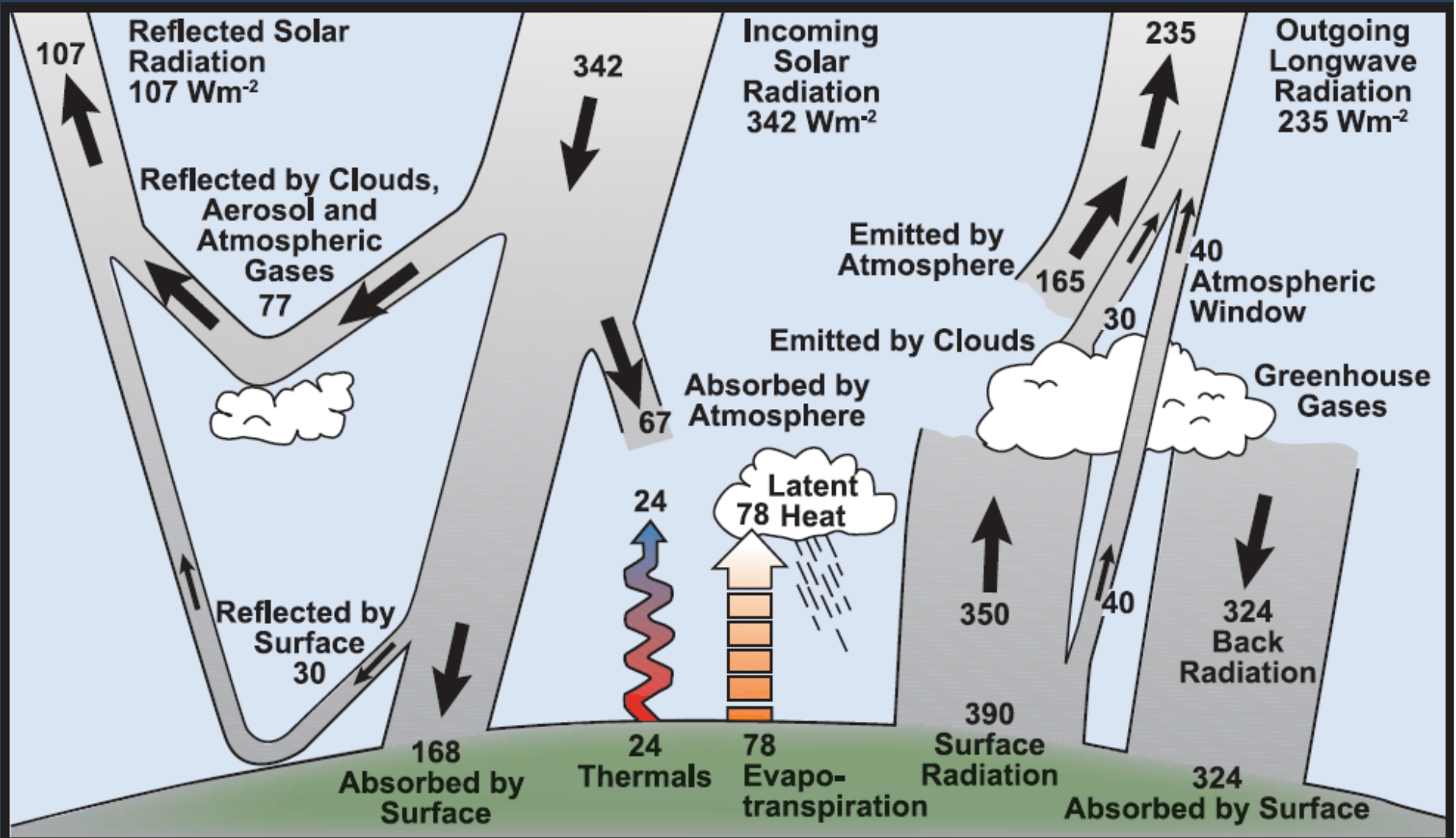
spettri di assorbimento dei gas atmosferici



(Valley, 1965)

forzanti - GHG III

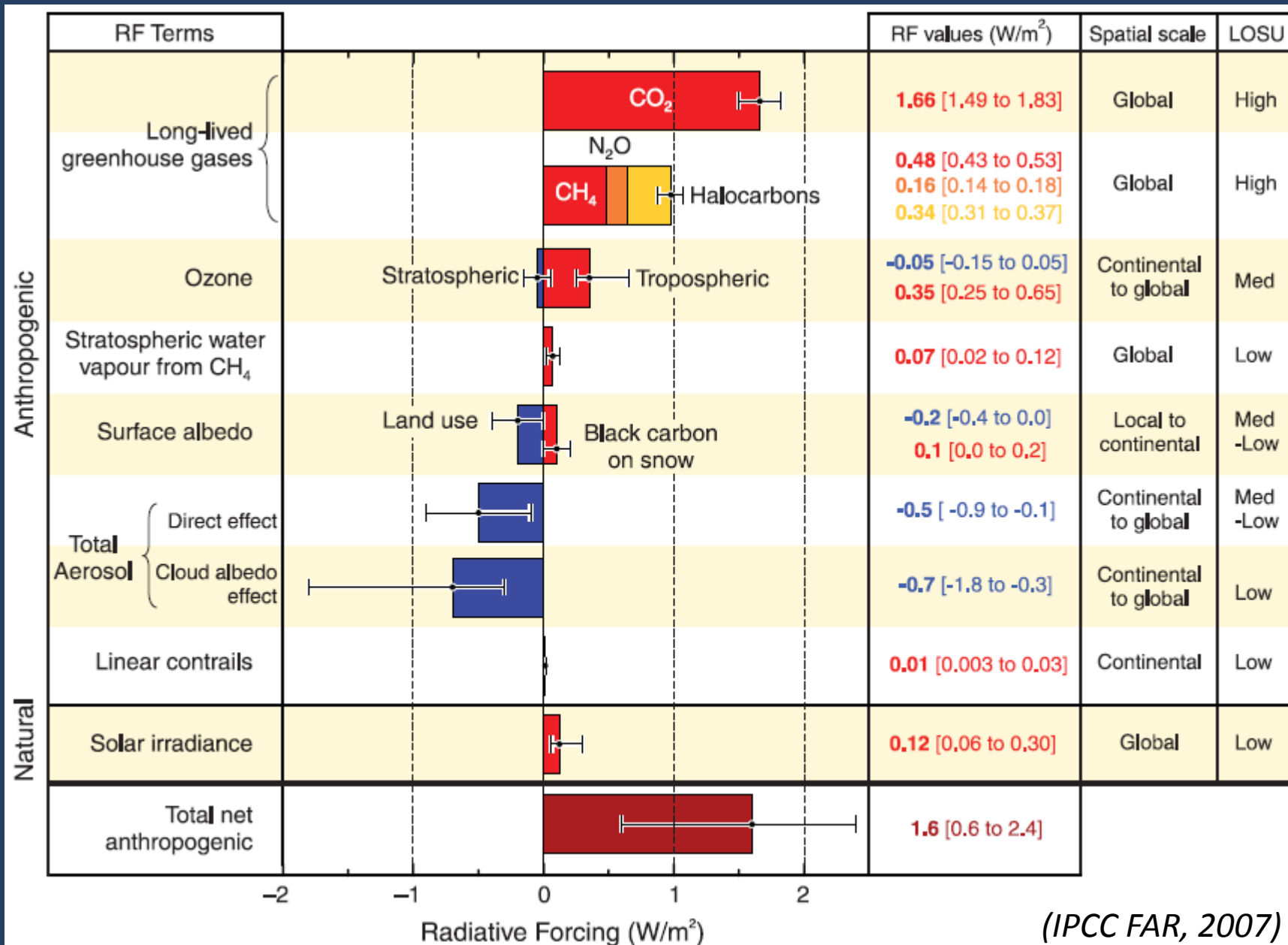
bilancio energetico terrestre: flussi globali medi annui (Wm^{-2})



Kiehl and Trenberth (1997)

forzanti - GHG V

radiative forcing & LOSU



forzanti - GHG VII

GWP per alcuni gas

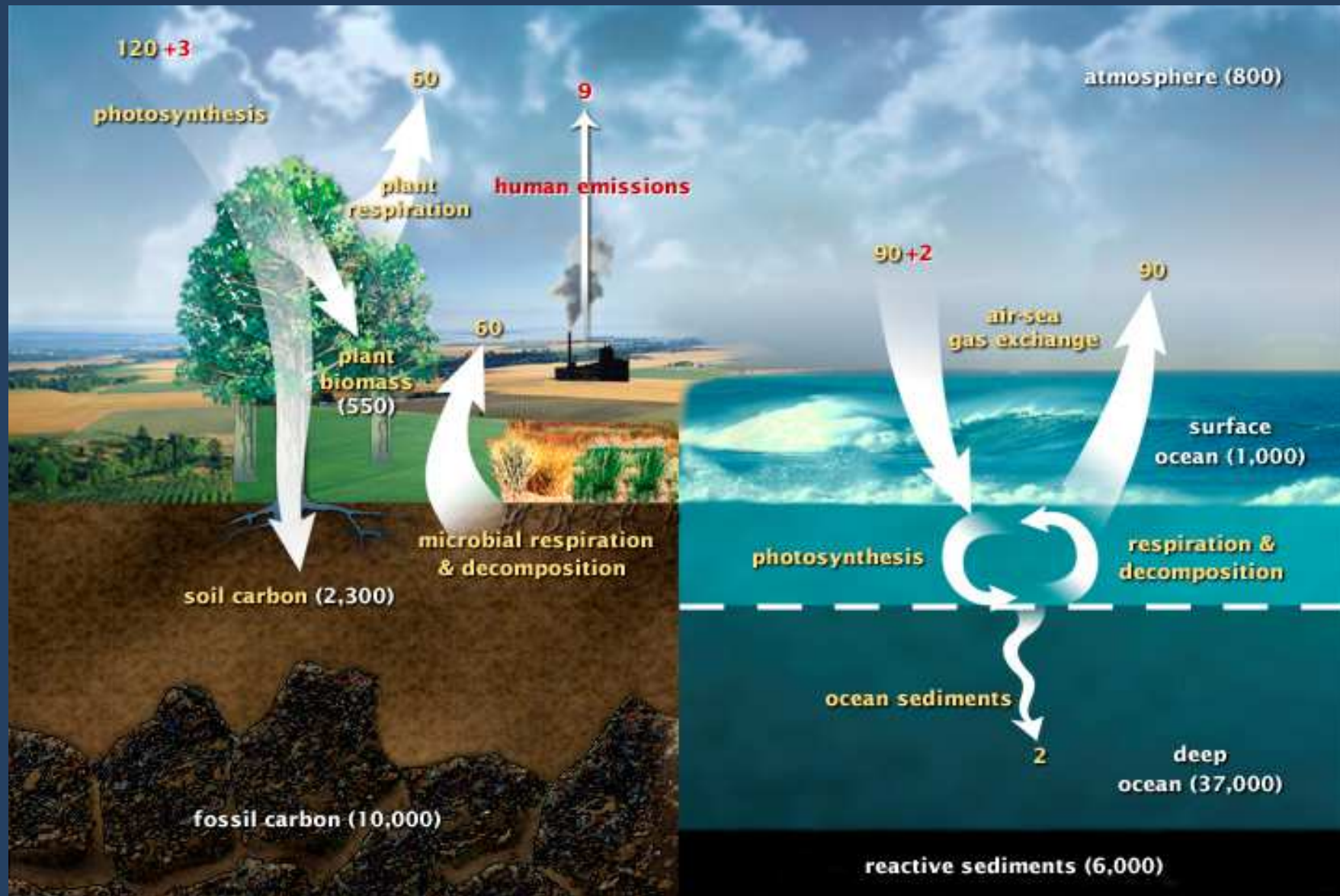
(IPCC FAR, 2007)

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency ($W\ m^{-2}\ ppb^{-1}$)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR [†] (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below ^a	^b 1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Methane ^c	CH ₄	12 ^c	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153
Sulphur hexafluoride	SF ₆	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
CFC-11	CCl ₃ F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CClF ₃	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CClF ₂ CF ₃	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF ₃	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF ₂	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	20	0.33		3,680	1,640	503
Carbon tetrachloride	CCl ₄	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Methyl bromide	CH ₃ Br	0.7	0.01		17	5	1
Methyl chloroform	CH ₃ CCl ₃	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	CHClF ₂	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClFCF ₃	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	9.3	0.14		2,250	725	220

forzanti - GHG VIII

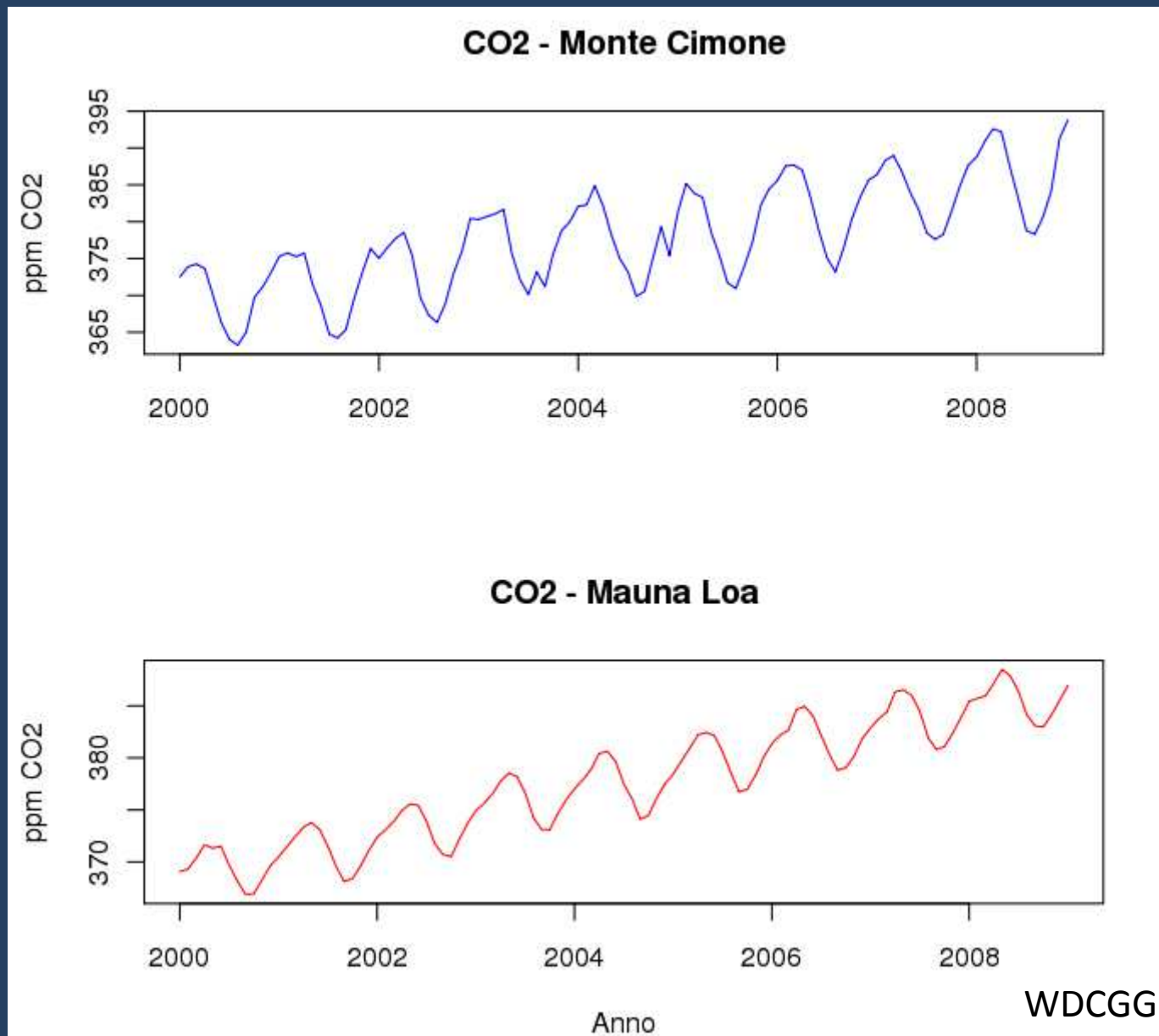
ciclo veloce del carbonio

flussi naturali (GtC/anno) flussi antropici (GtC/anno) riserve (GtC)



forzanti - GHG XI

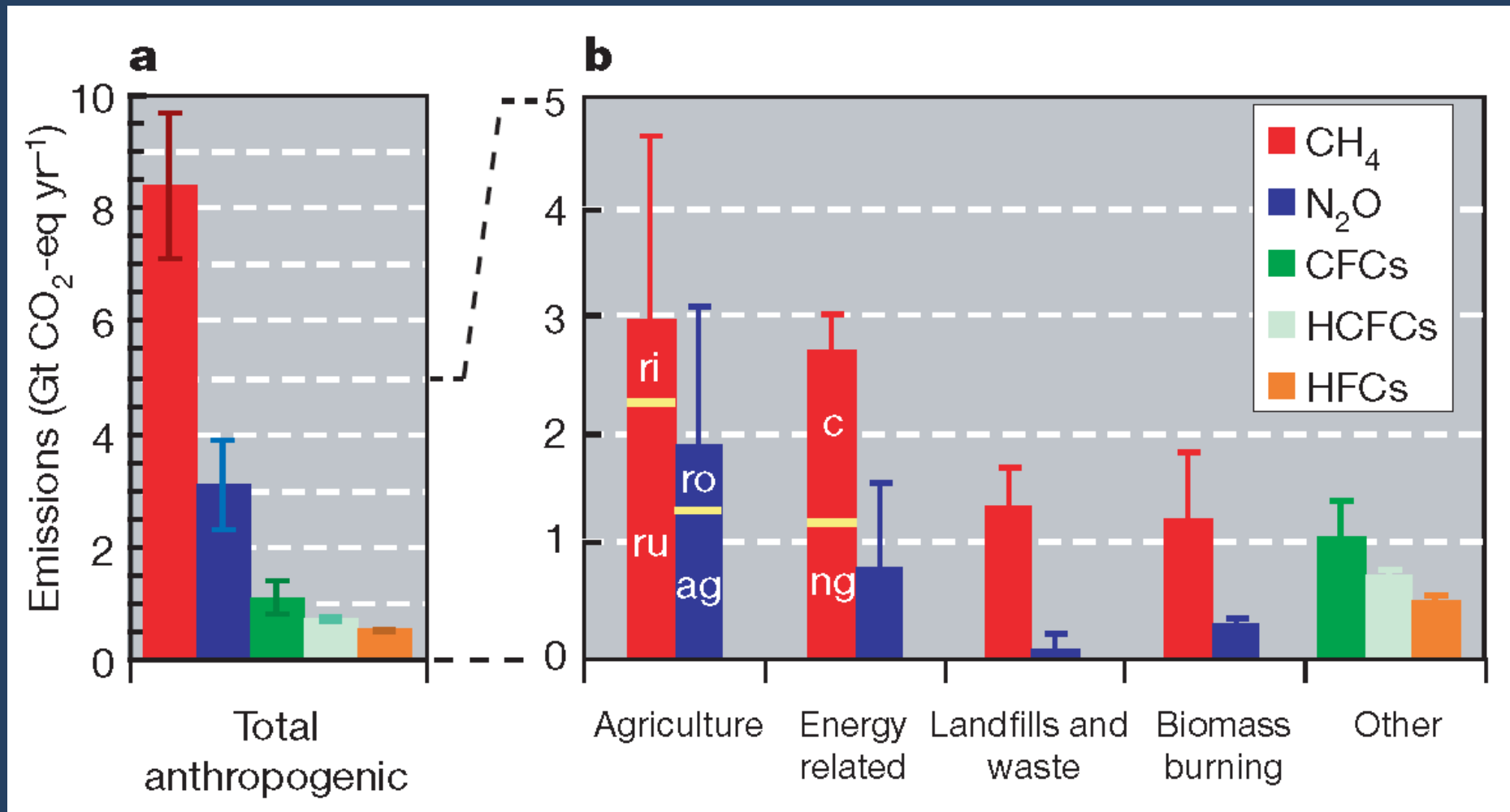
misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG XII

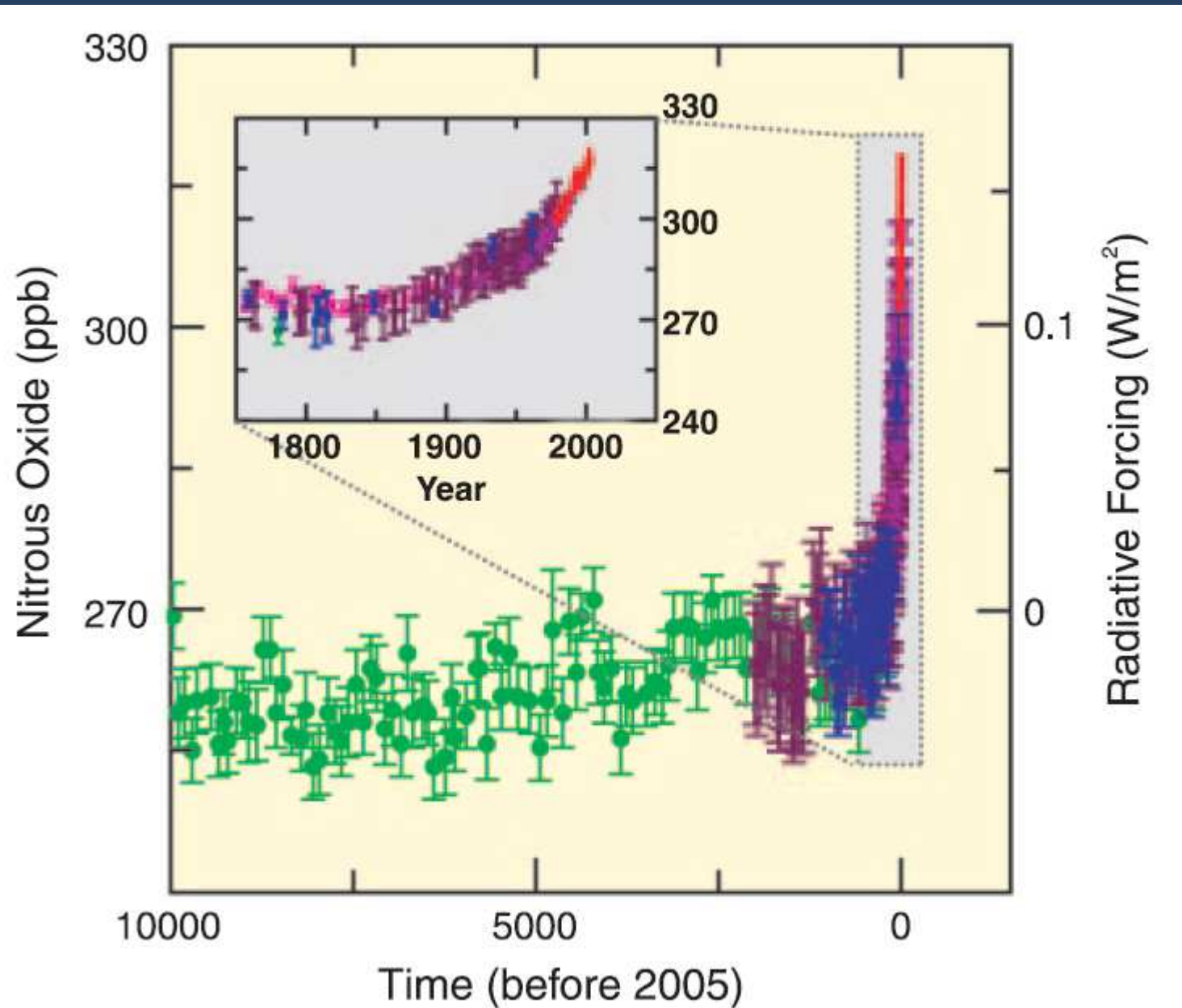
meccanismi di produzione e distruzione di altri GHG

ri: coltivazione del riso; ru: ruminanti; ng: gas naturali; c: miniere
ro: run-off; ag: agricoltura



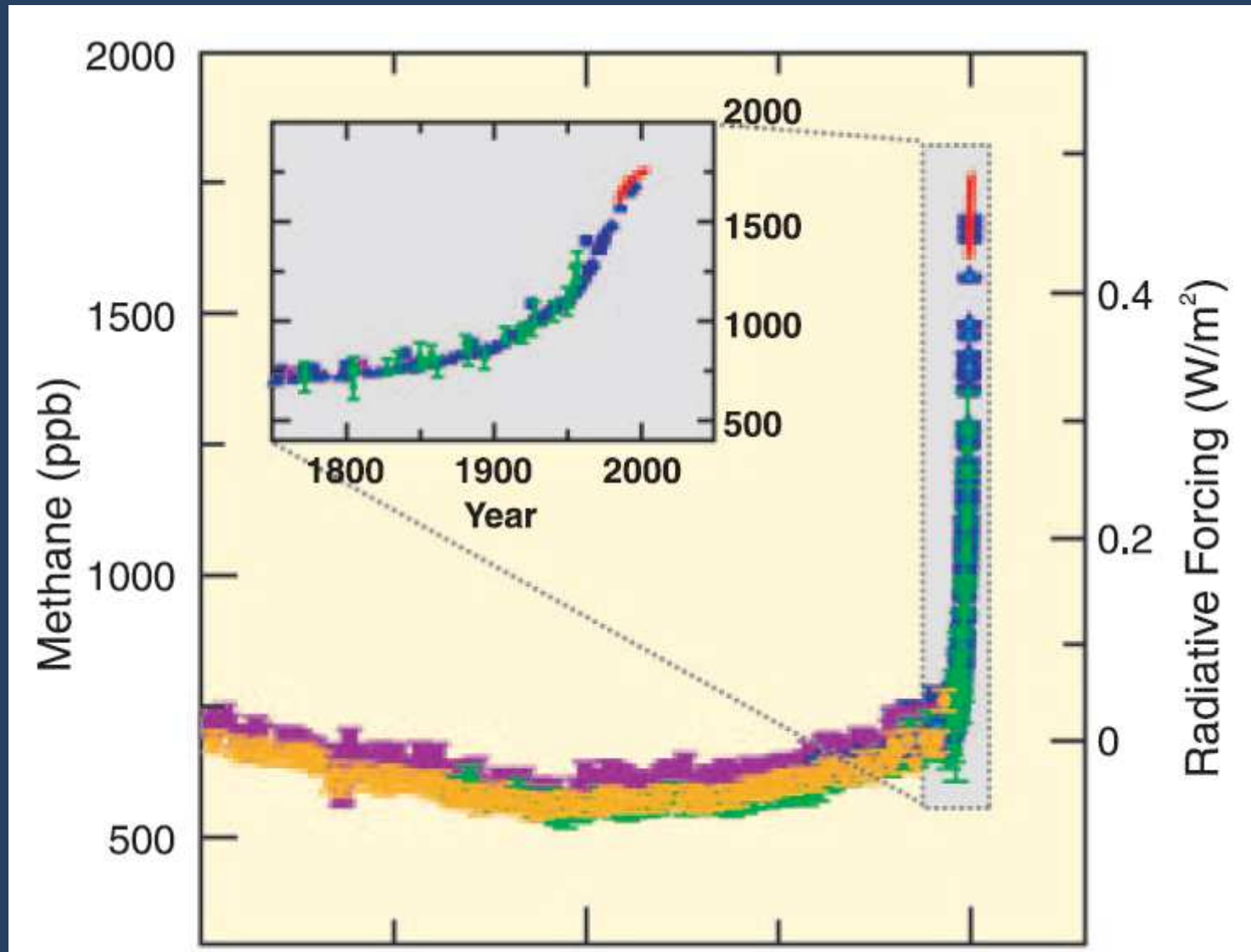
(Montzka et al, 2011)

forzanti - GHG XIII
record storici (ice cores)

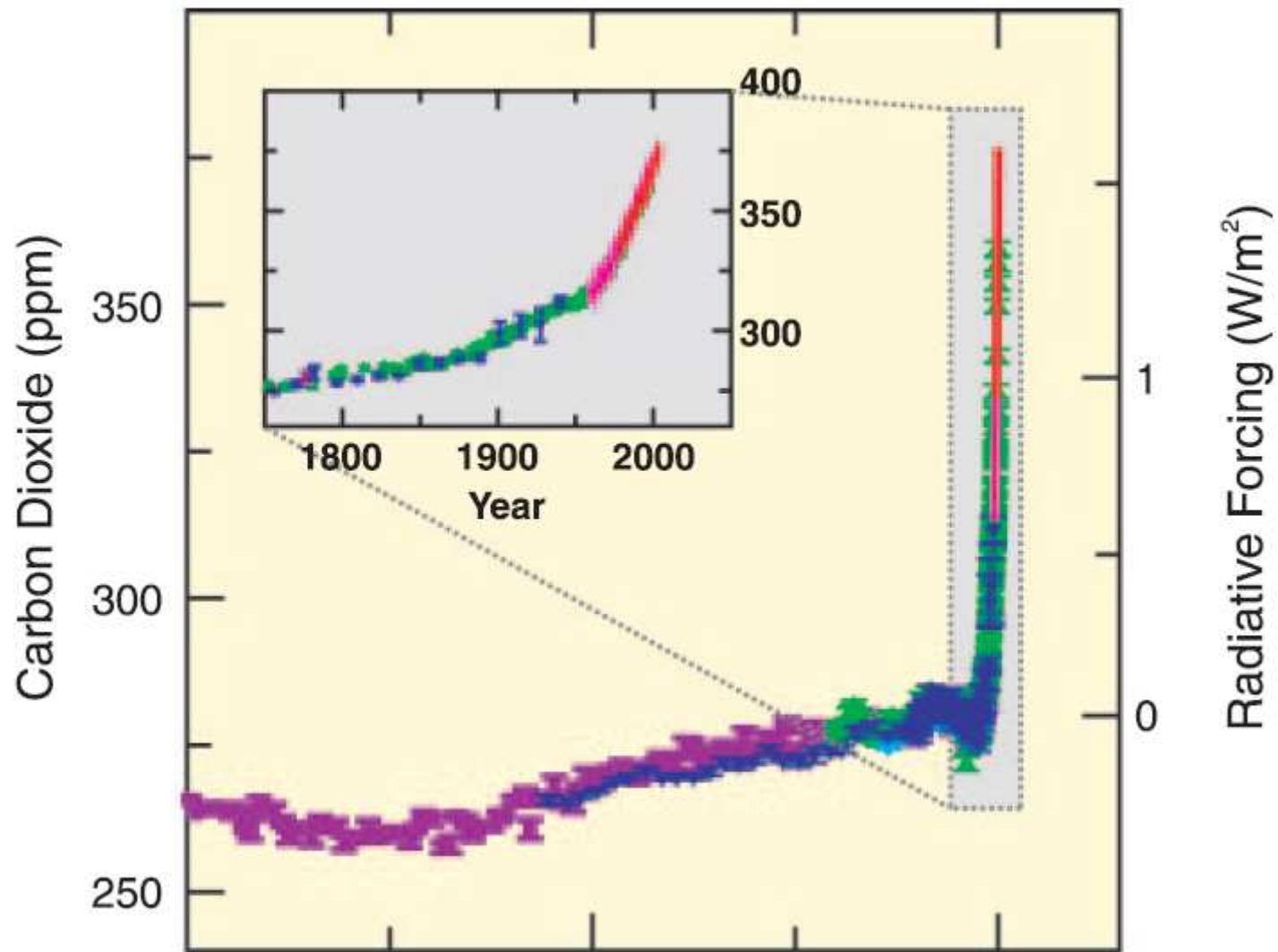


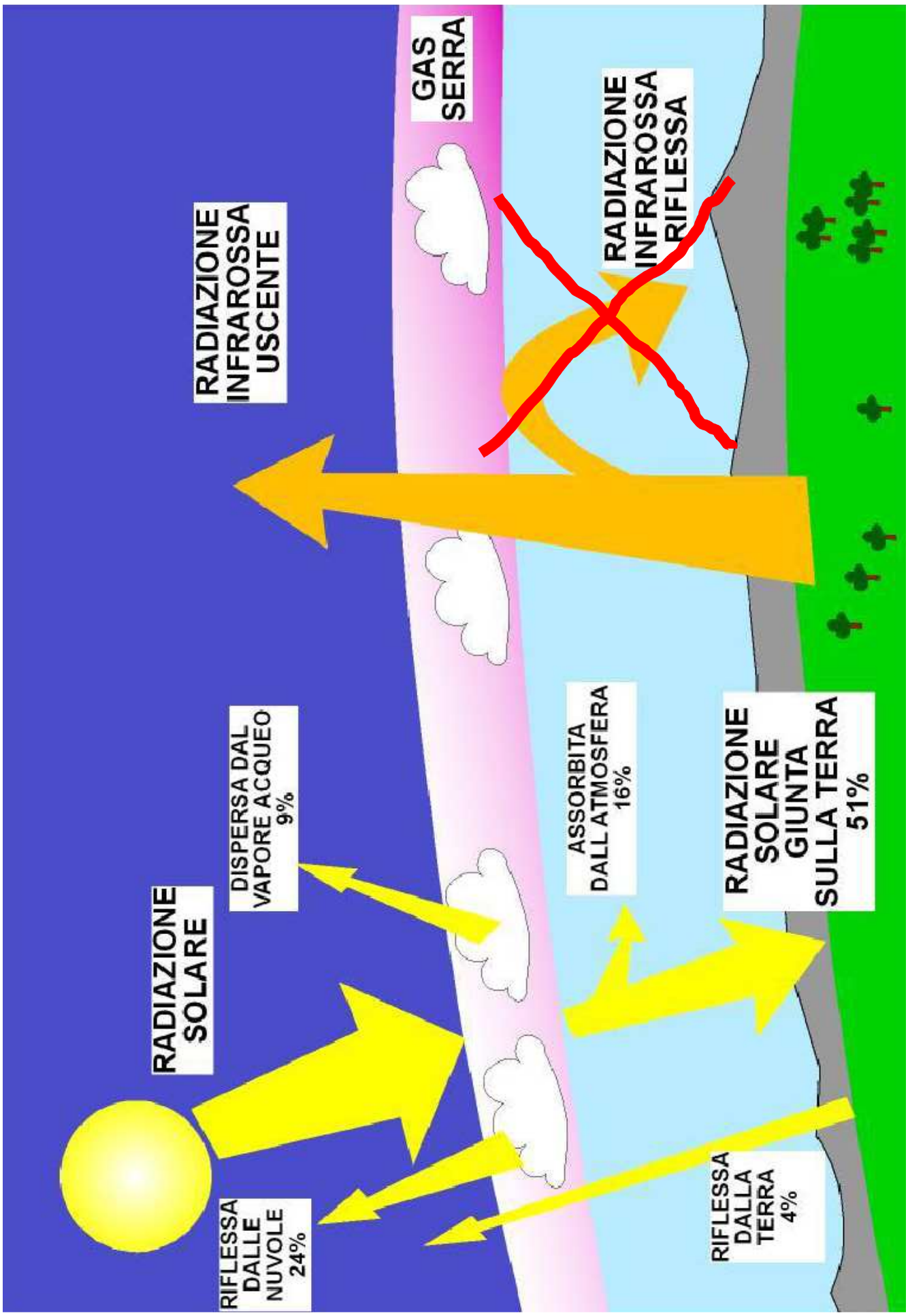
forzanti - GHG XIII

record storici (ice cores)



forzanti - GHG XIII
record storici (ice cores)





L'effetto serra

Energia Solare

Circa il 30%
delle radiazioni
infrarosse
si diffonde
nello spazio

Il gas serra lasciano passare l'energia solare e intrappolano parte del calore creato dai raggi del sole

Radiazione
solare
assorbita
dalla Terra

Una parte dell'energia
solare che raggiunge
il nostro pianeta viene
riflessa verso l'atmosfera
sotto forma di radiazioni
infrarosse



Anidride
carbonica
rilasciata
dagli aerei



Le navi
bruciano
combustibile



Le industrie
rilasciano
anidride
carbonica



Taglio
delle
foreste

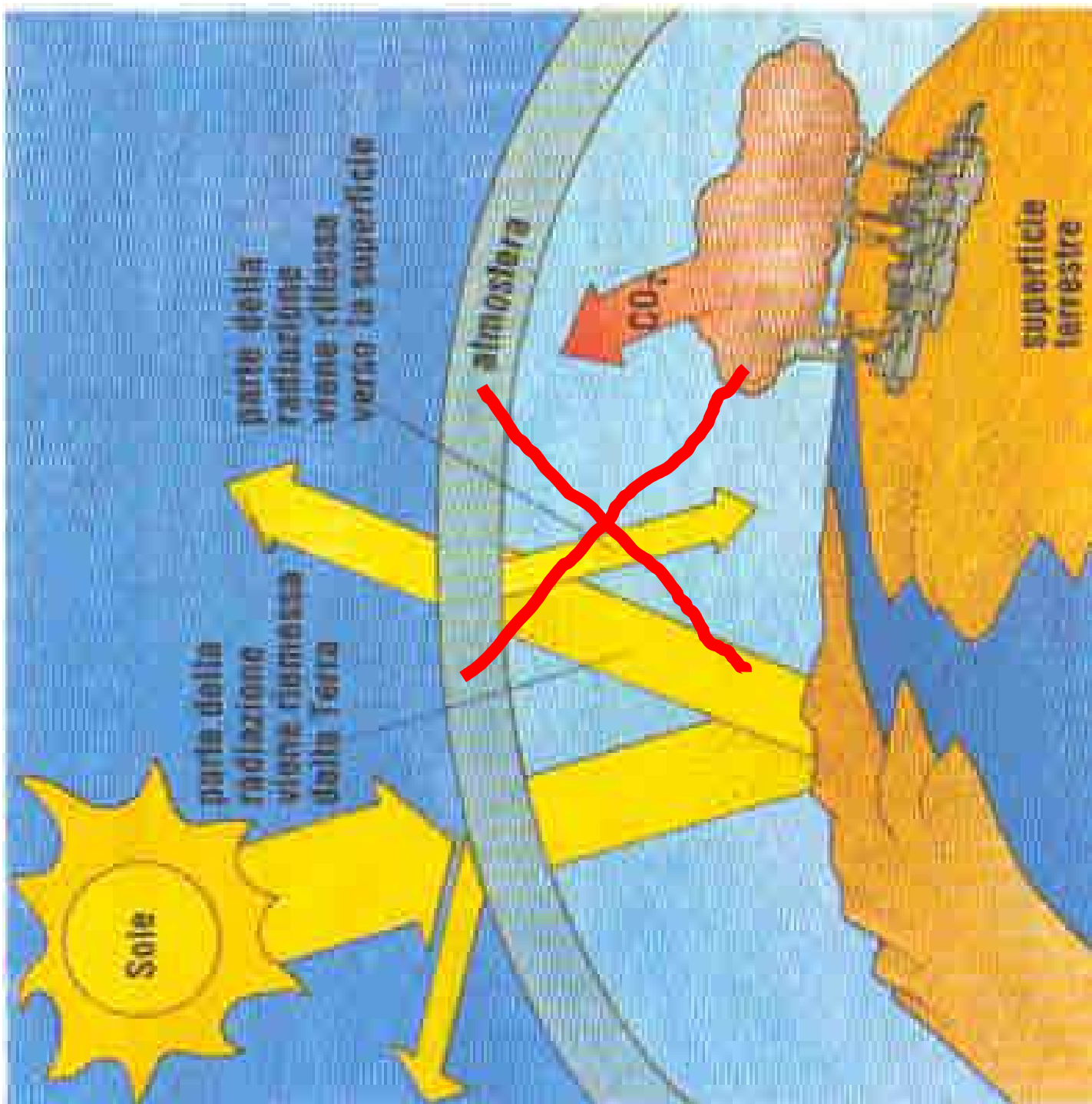


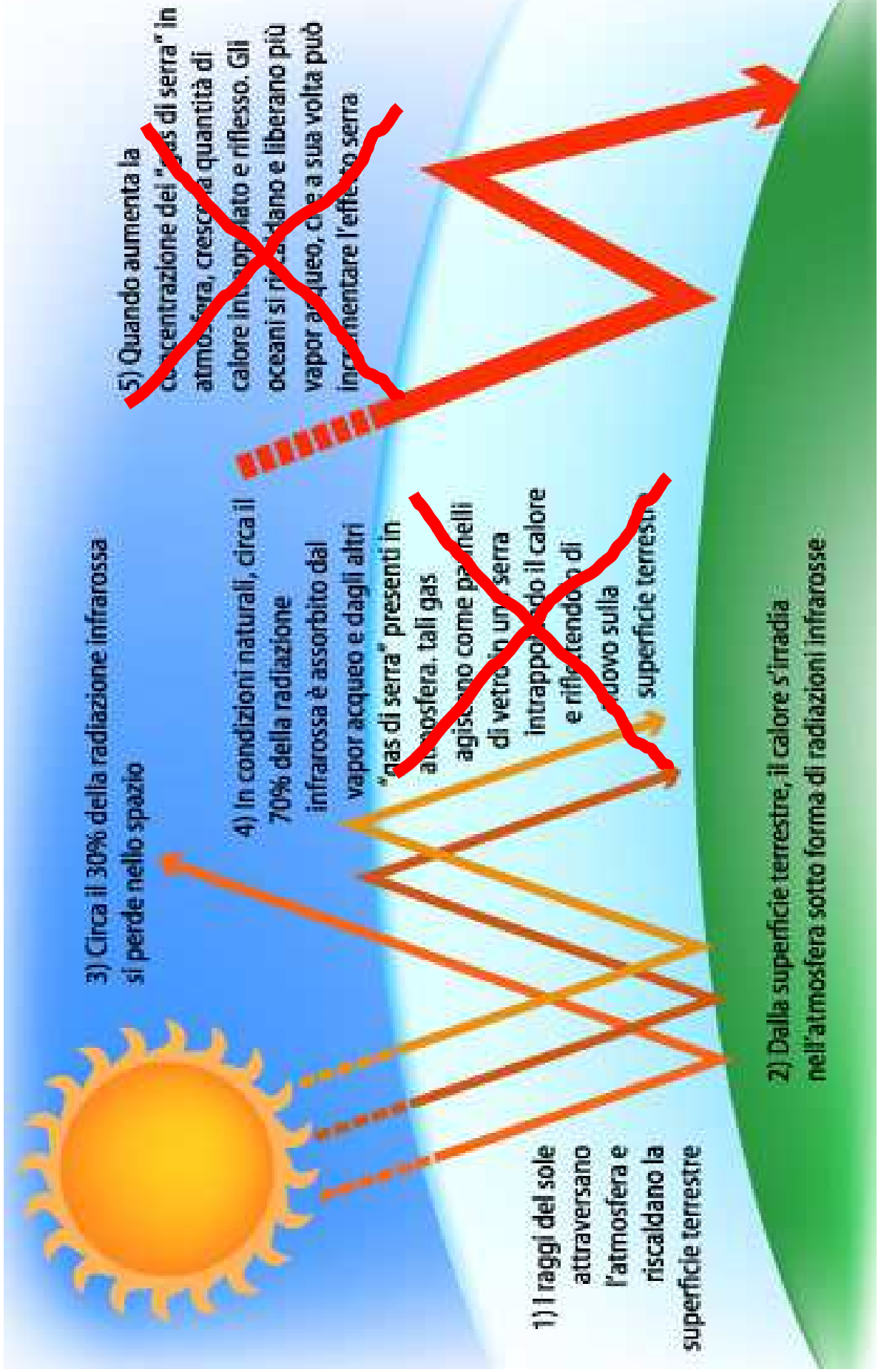
Consumo
di combustibili
fossili



Calore
intrappolato
e irradiato
dal gas serra







3) Circa il 30% della radiazione infrarossa si perde nello spazio

4) In condizioni naturali, circa il 70% della radiazione infrarossa è assorbito dal vapor acqueo e dagli altri "gas di serra" presenti in atmosfera. tali gas agiscono come pannelli di vetro in una serra intrappolando il calore e riflettendolo di nuovo sulla superficie terrestre

1) I raggi del sole attraversano l'atmosfera e riscaldano la superficie terrestre

2) Dalla superficie terrestre, il calore s'irradia nell'atmosfera sotto forma di radiazioni infrarosse

5) Quando aumenta la concentrazione del "gas di serra" in atmosfera, cresce la quantità di calore intrappolato e riflesso. Gli oceani si riscaldano e liberano più vapor acqueo, che a sua volta può incrementare l'effetto serra

ATMOSFERA

L'effetto serra



Radiazione solare netta in entrata: 240 watt per m²

Una parte della radiazione solare è riflessa dall'atmosfera e dalla superficie terrestre

Radiazione solare uscente: 103 Watt per m²

Una parte delle radiazioni ad infrarosso passa attraverso l'atmosfera e si perde nello spazio

Radiazione ad infrarosso netta in uscita: 240 Watt per m²

GASSERRA

Radiazione solare che passa attraverso l'atmosfera limpida
Radiazione solare in entrata 343 Watt per m²

Una parte della radiazione ad infrarosso è assorbita e rimessa dalle molecole di gas serra. L'effetto diretto è il riscaldamento della superficie terrestre della troposfera

La superficie assorbe più calore e la radiazione ad infrarosso è emessa di nuovo

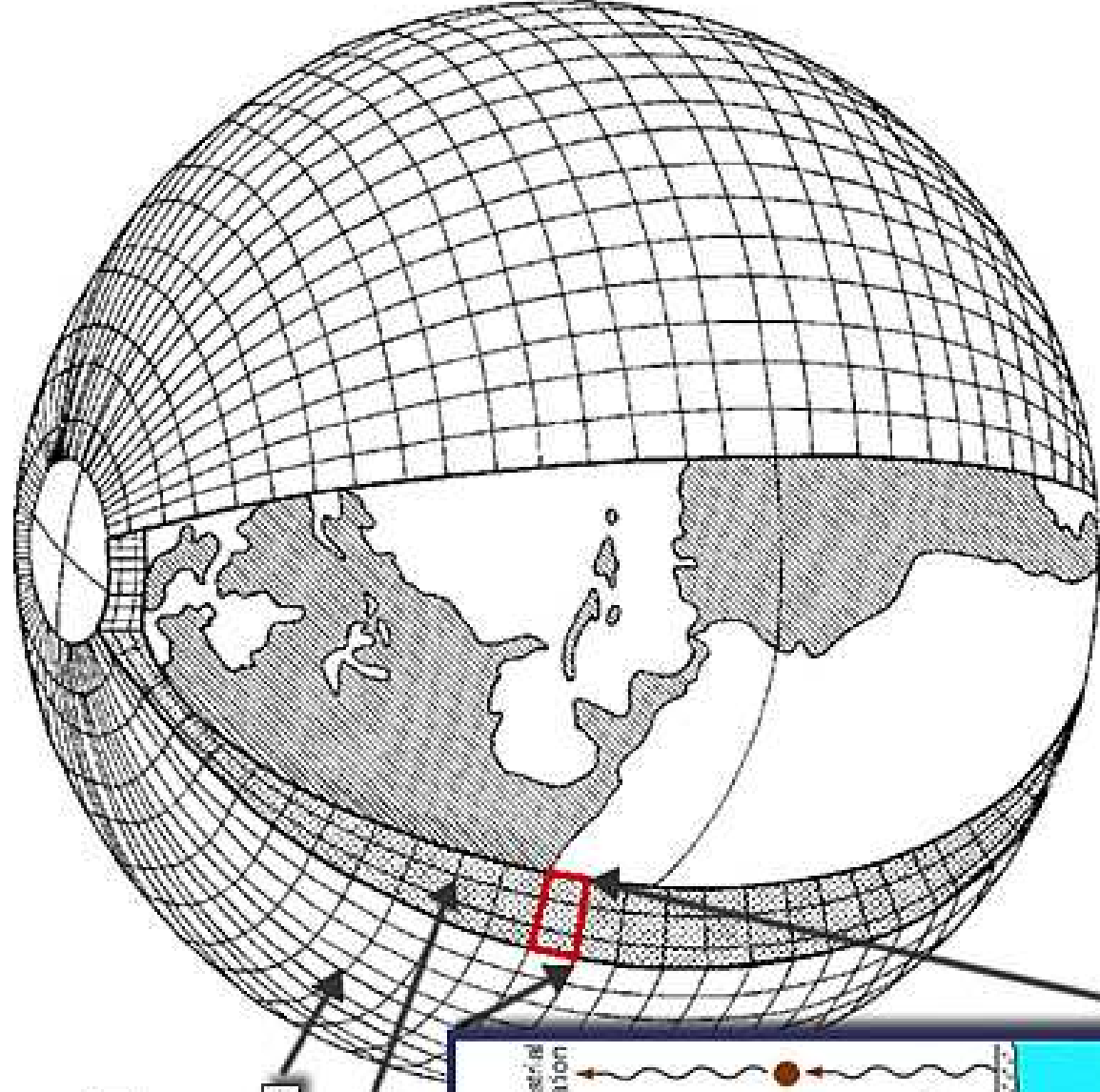
L'energia solare è assorbita dalla superficie terrestre (che così viene riscaldata) ...
168 Watt per m²

... ed è convertita in calore che causa l'emissione di radiazioni ad onda lunga (infrarossi) che ritornano nell'atmosfera

TERRA

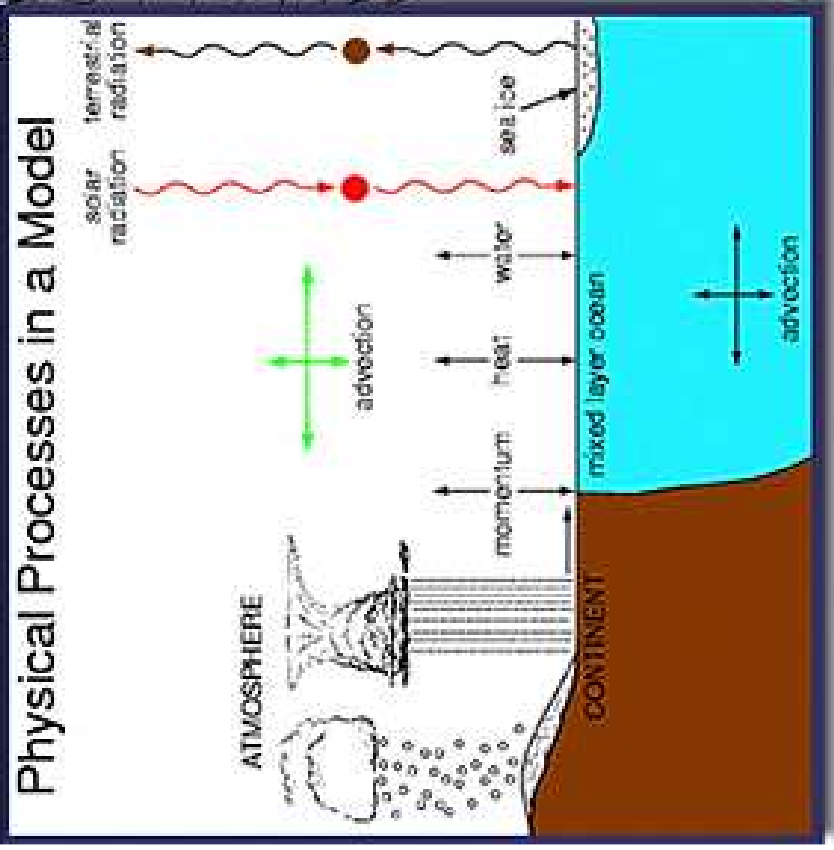


Schematic for Global Atmospheric Model

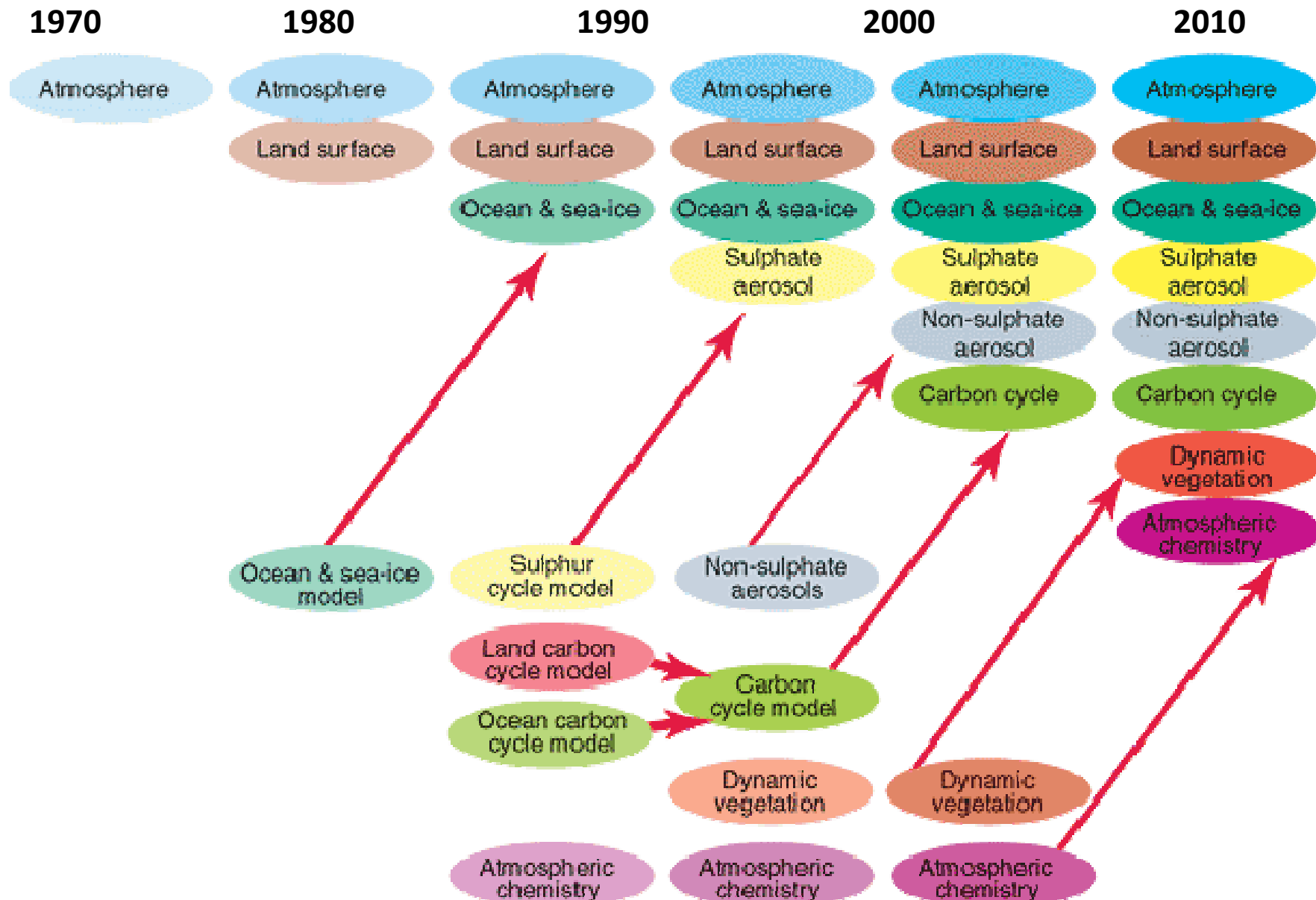


Horizontal Grid (latitude - longitude)

Vertical Grid (height or pressure)

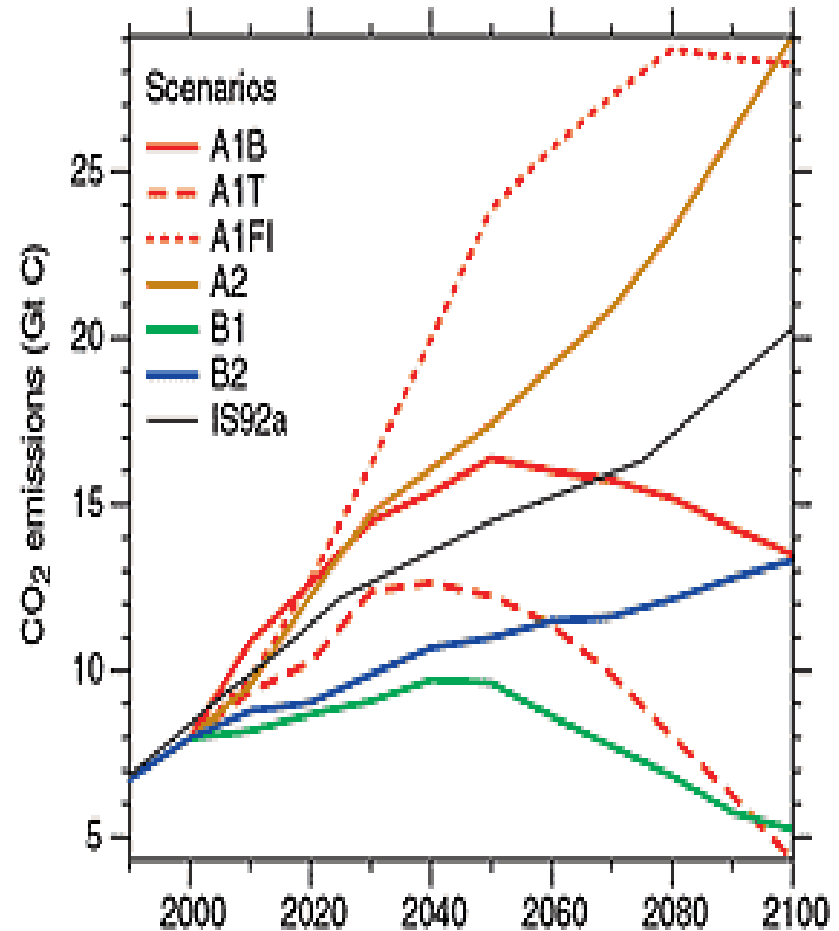


evoluzione dei modelli climatici

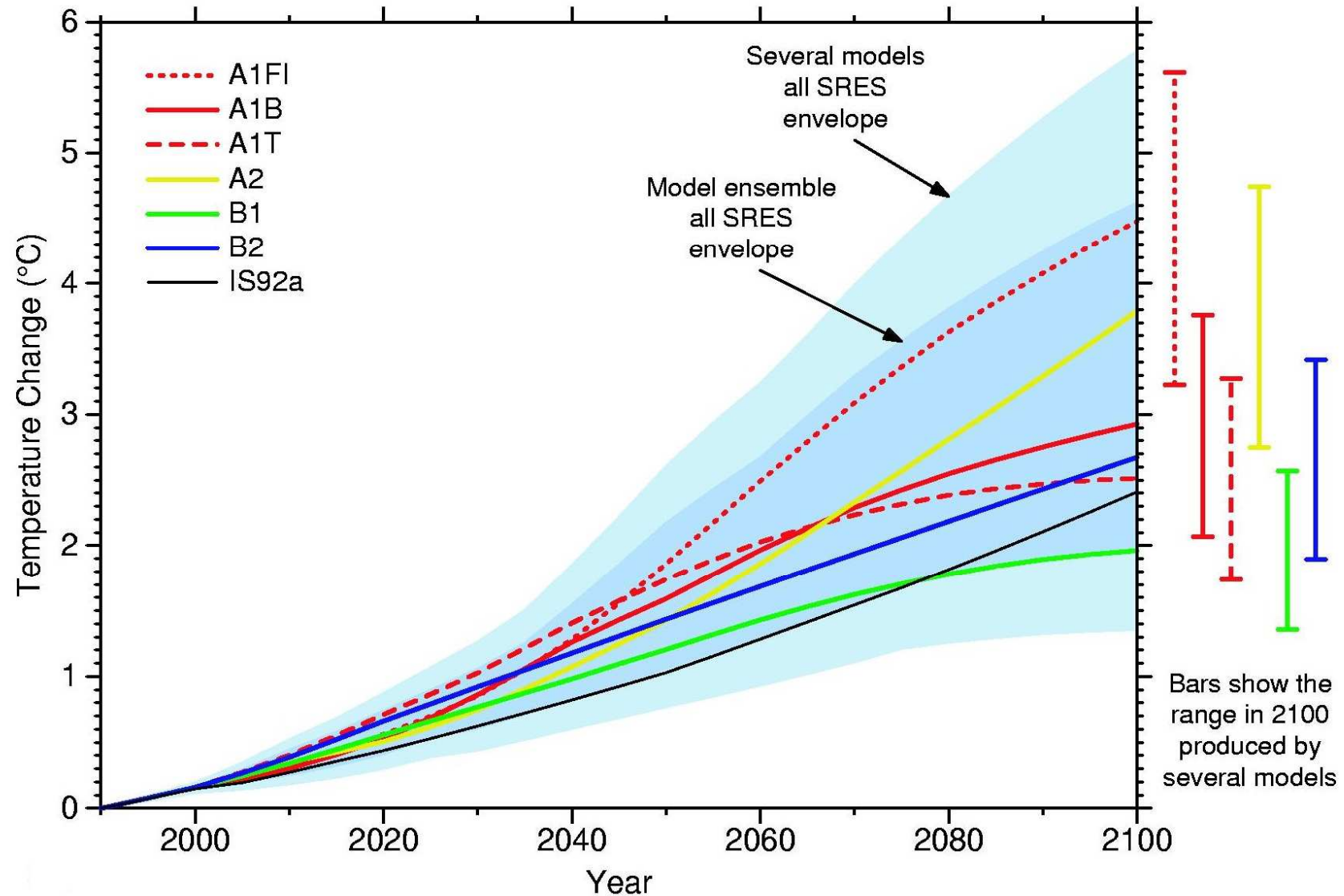


Future Climate Change

- 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**



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

-Nils Bohr-