



Introduzione al sistema climatico terrestre



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Osservazioni di stato e tendenza

*Federico Porcù (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;

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 riducibile;
- è predicibile;
- è descritto da pochi parametri.



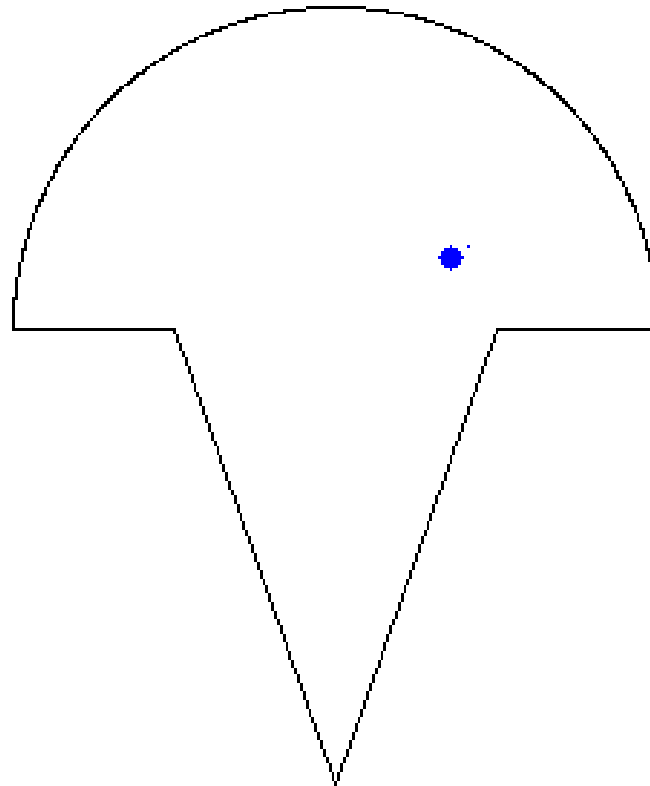
caratteristiche di un sistema non lineare:

- 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



Sistema di Lorenz

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

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

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

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

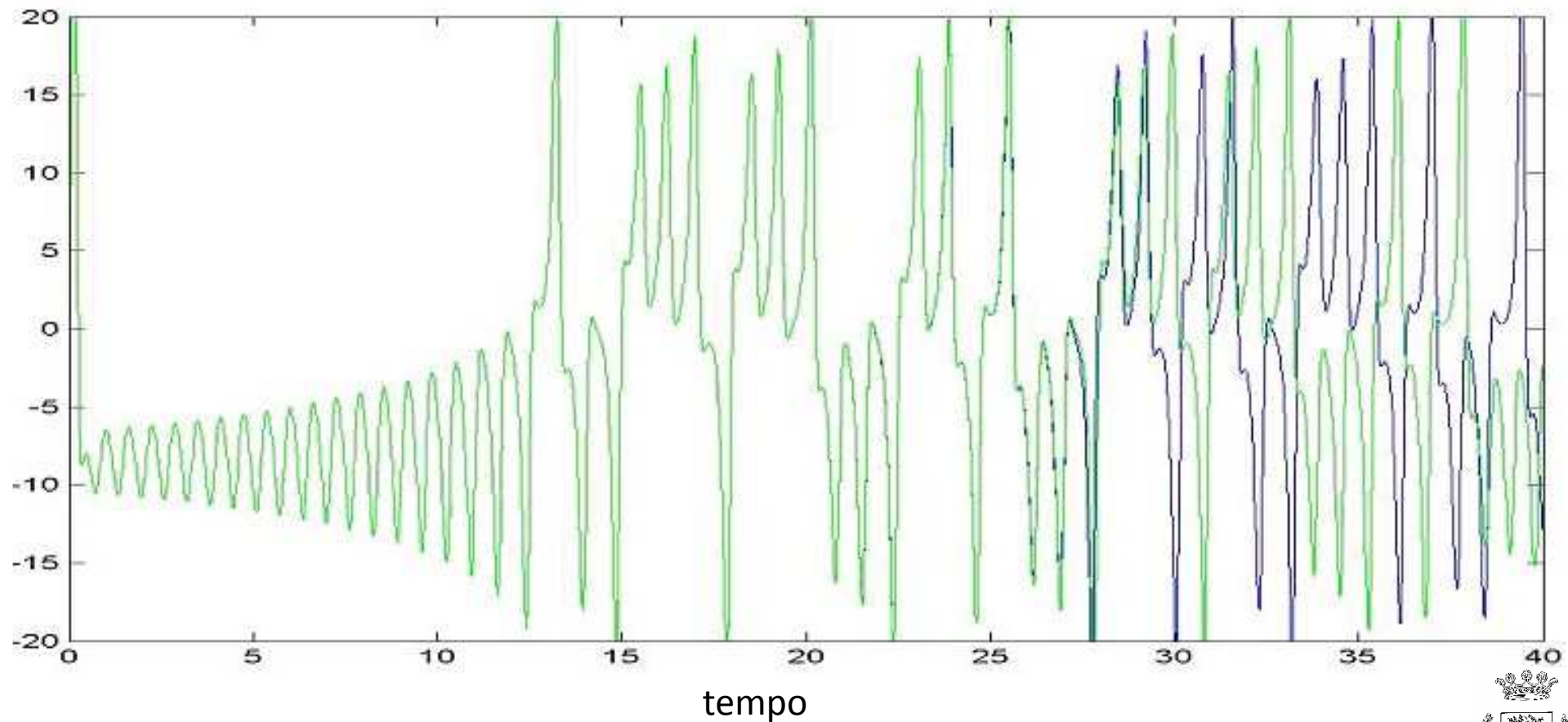
$$y_{(t=0)} = 1$$

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

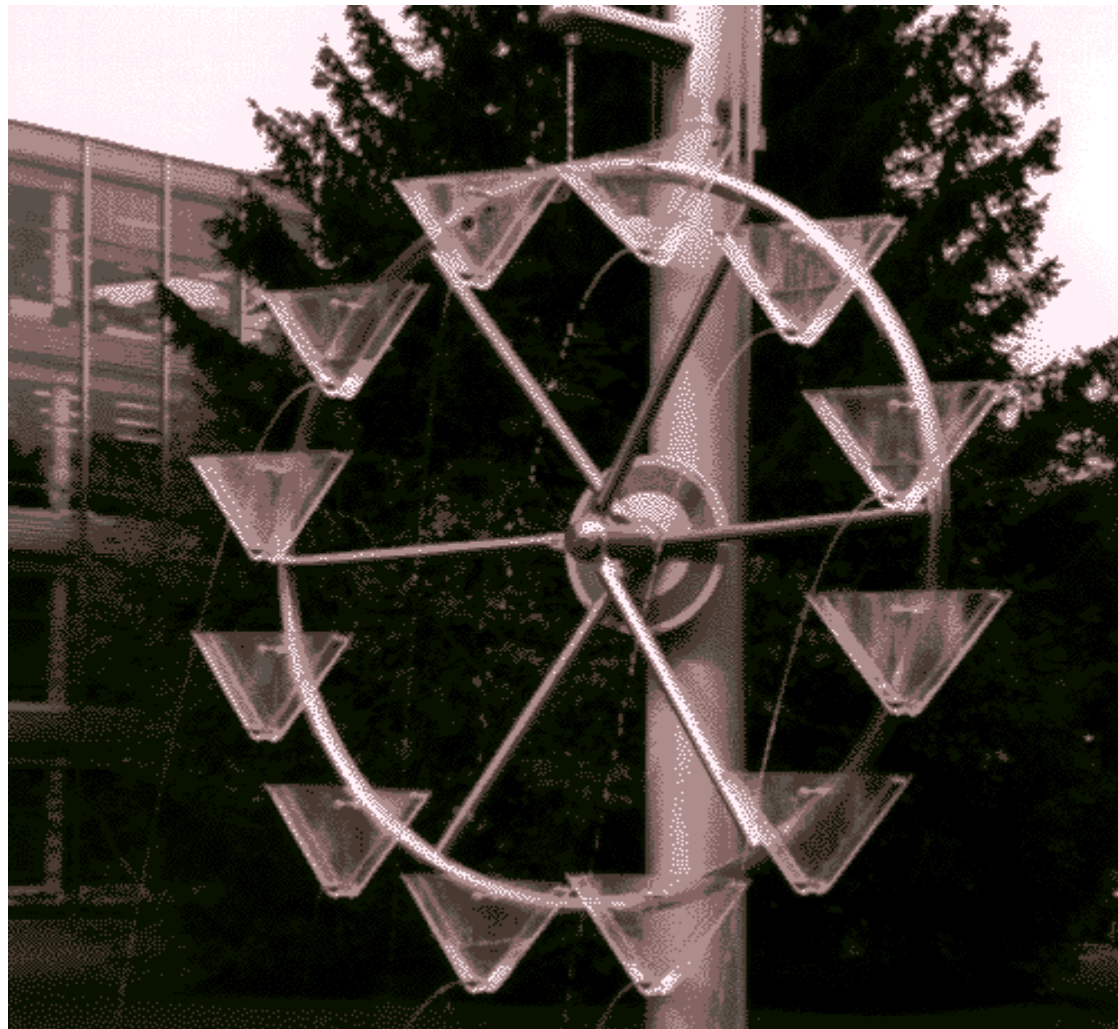
$$x_{(t=0)} = 8$$

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

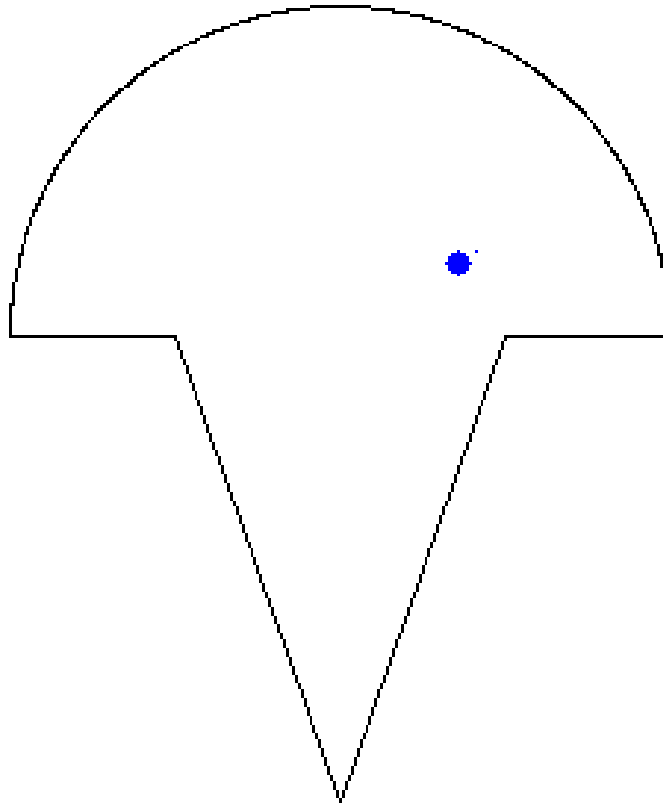
$$z_{(t=0)} = 1$$



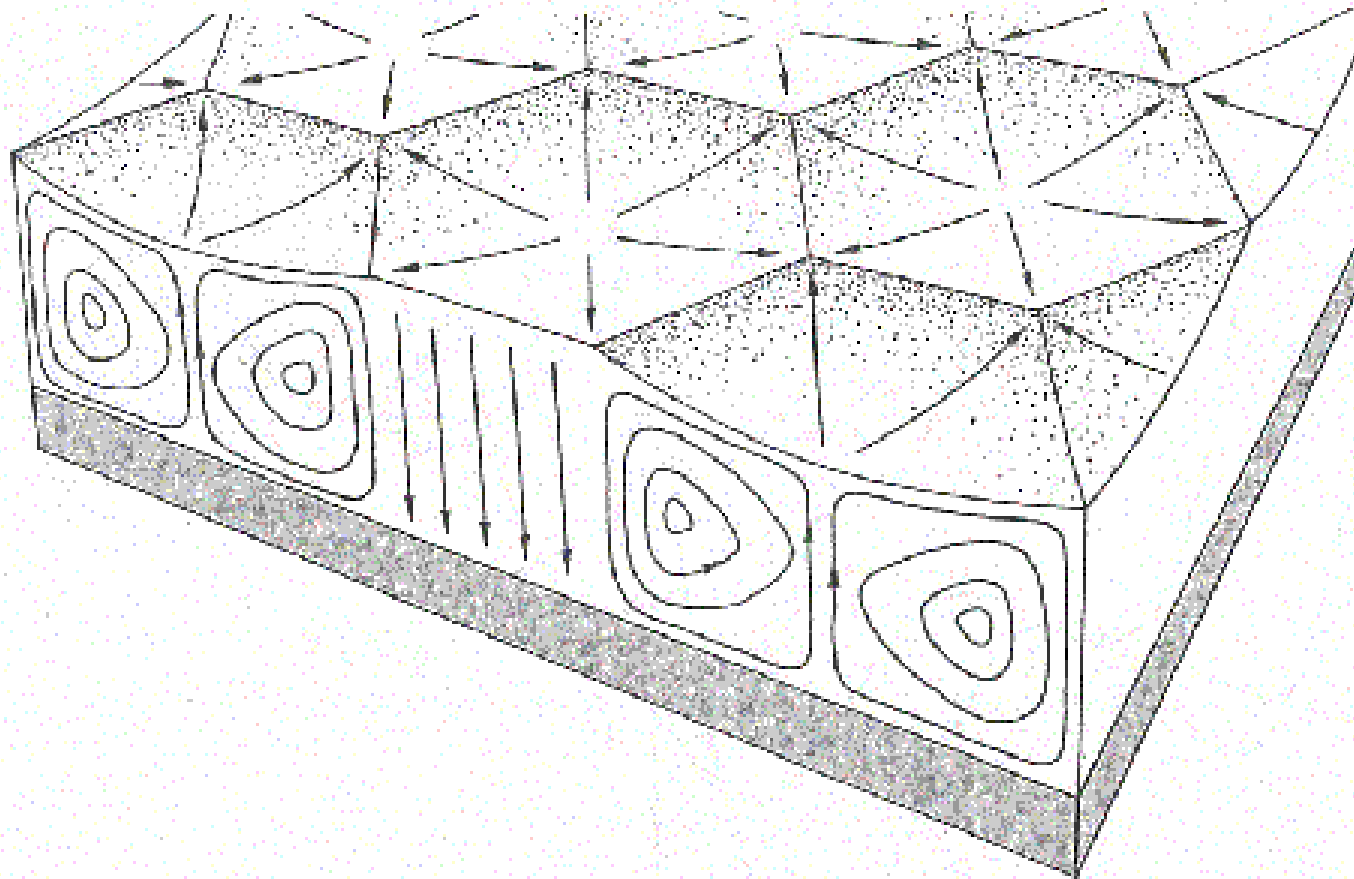
ruota ad acqua di Lorenz



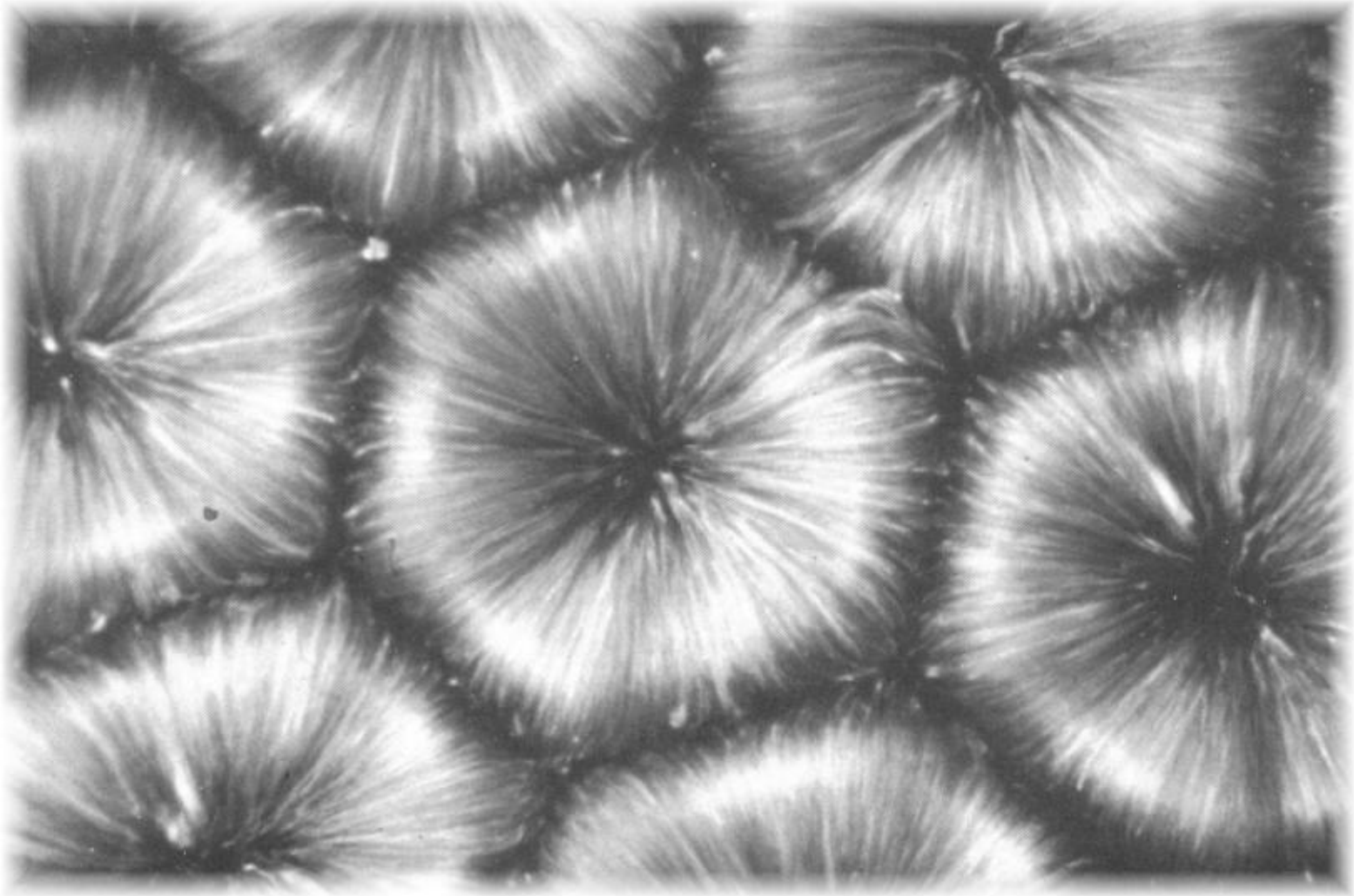
Biliardo ordine



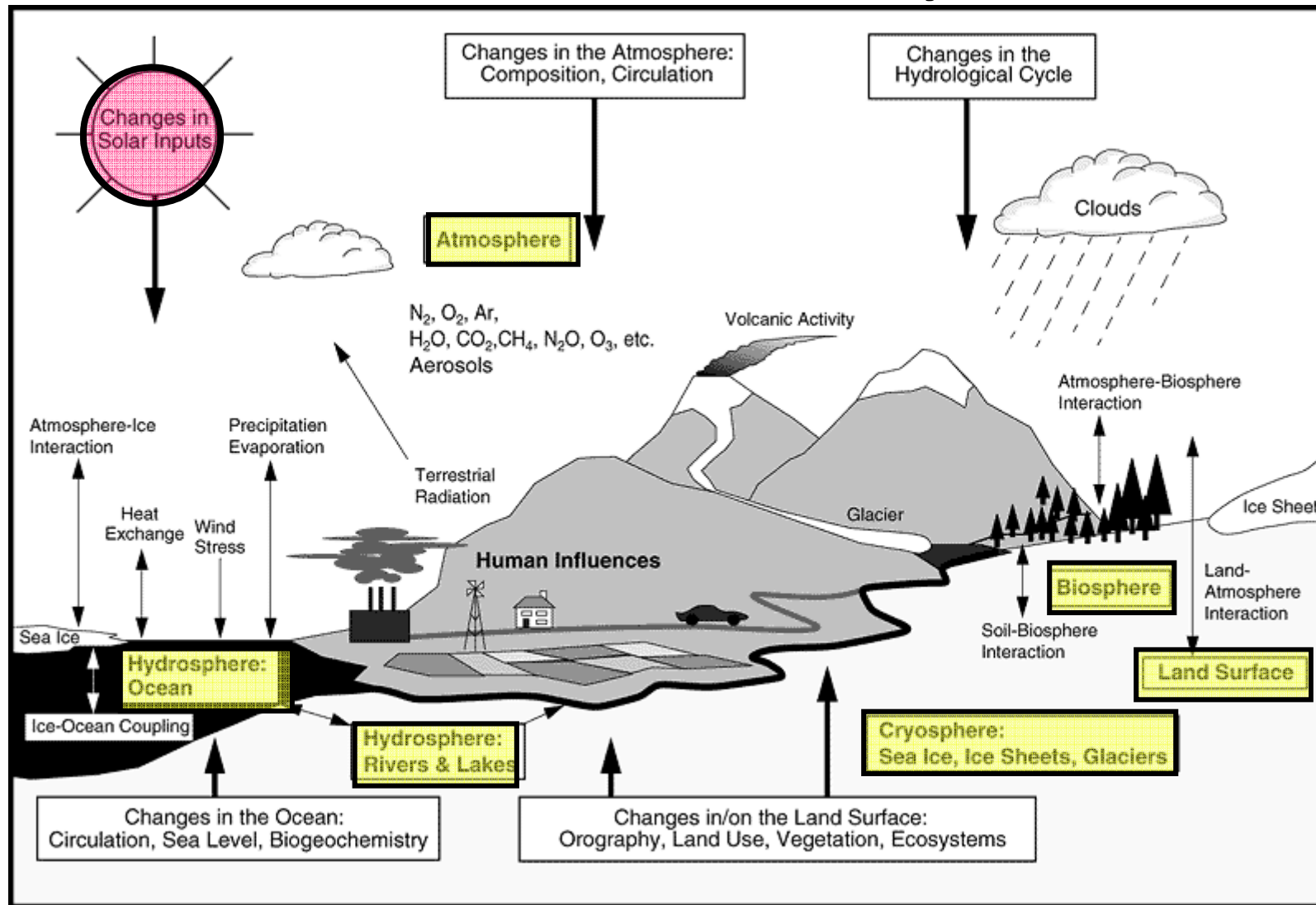
Convezione (Benard)



Convezione (Benard)



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

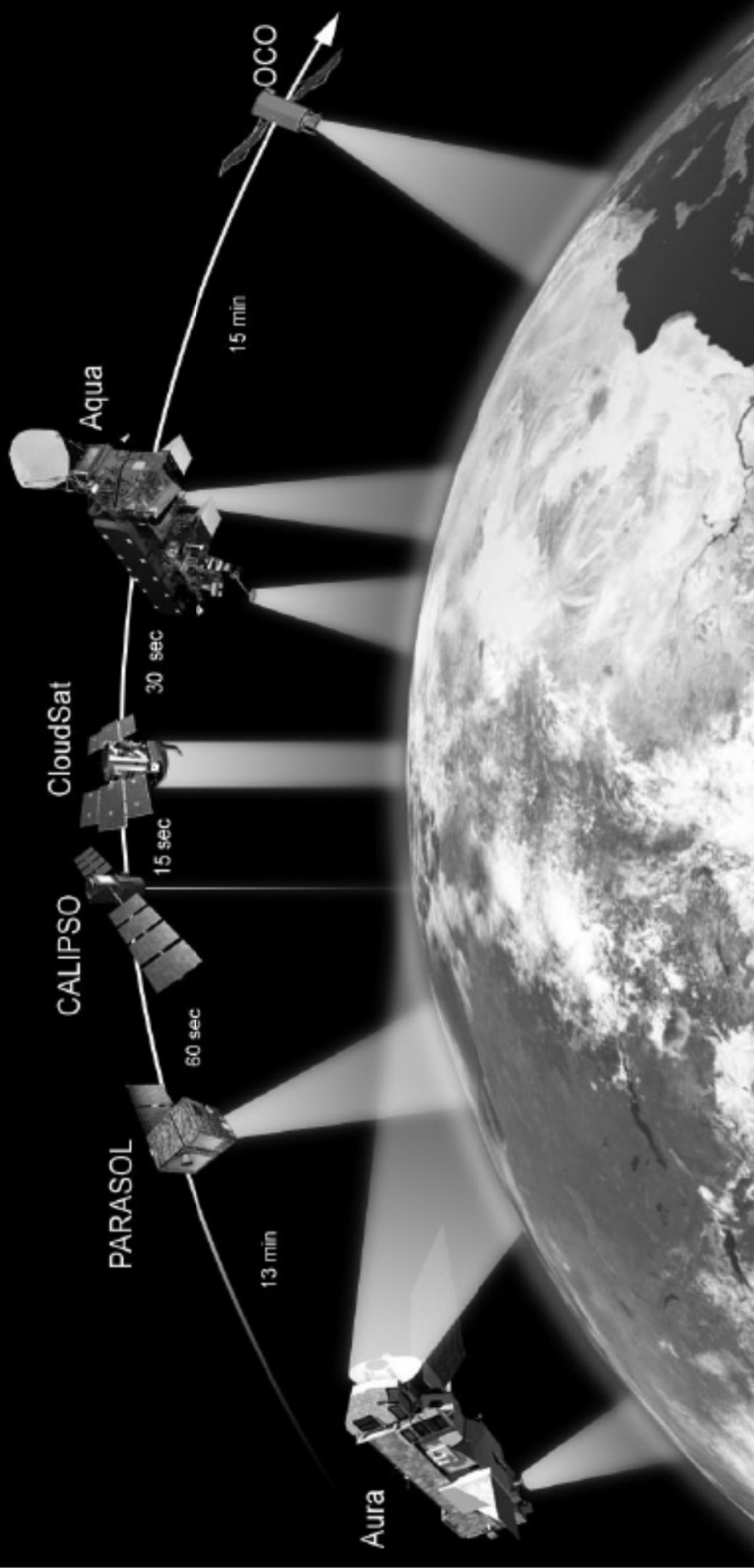
1999: Earth Observing System



*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
OCEAN	Surface Wetness	AMSR-E
	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



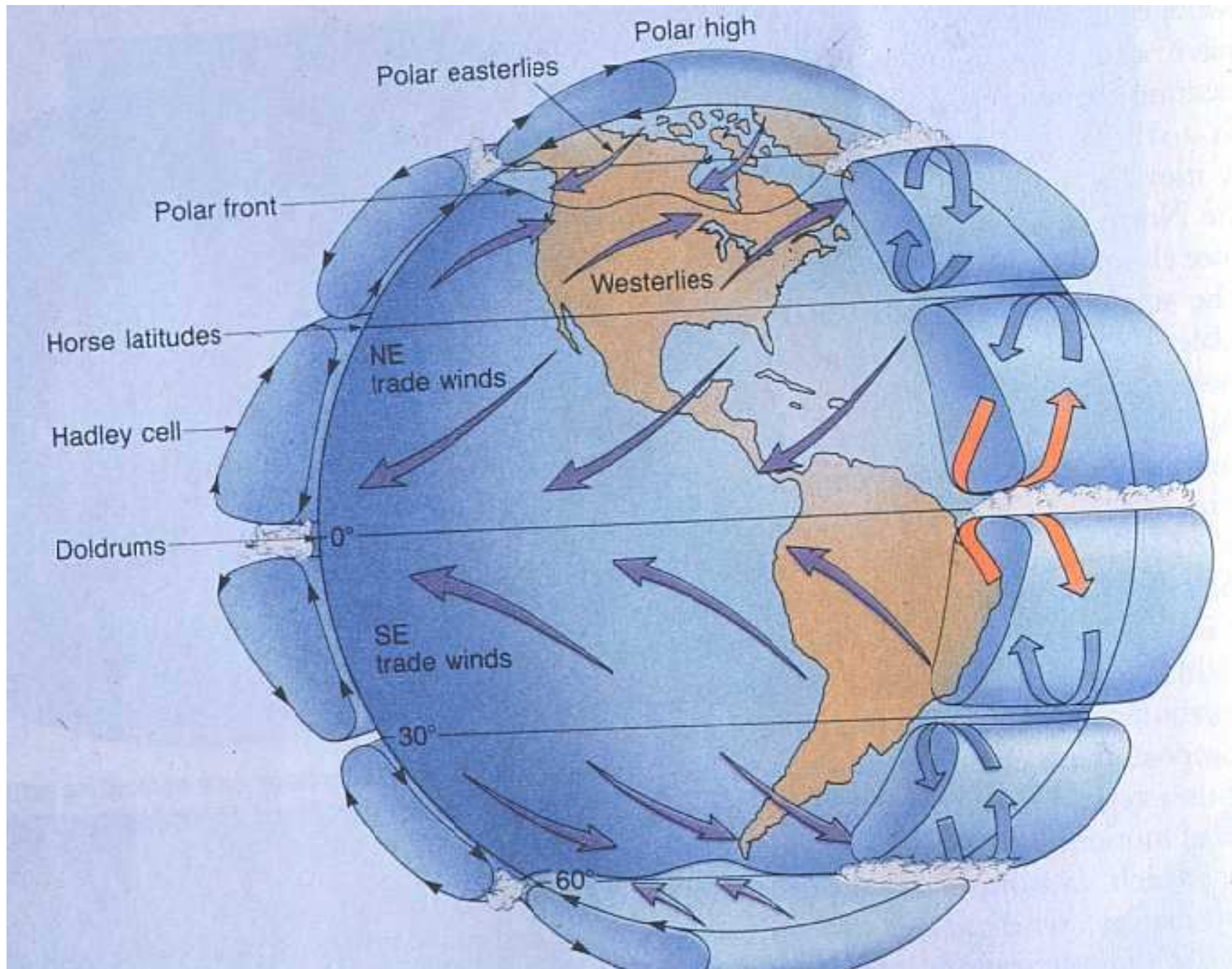
feed back positivo



diminuzione di T $\Rightarrow$ aumento ghiaccio superficiale $\Rightarrow$ aumento di albedo planetaria $\Rightarrow$ diminuzione di T



circolazione globale

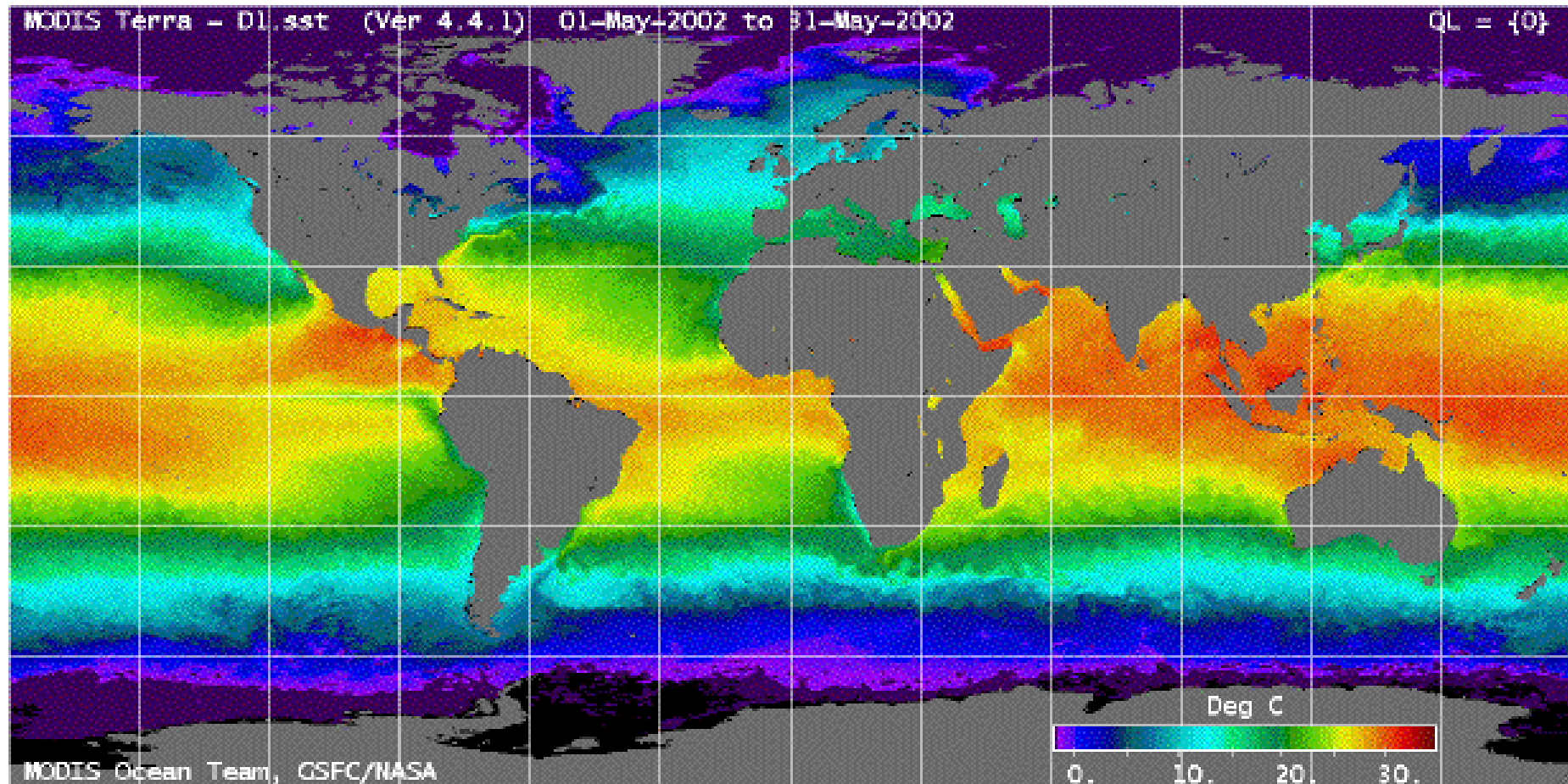


Interazione Atmosfera/Oceano

- ❑ 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.**

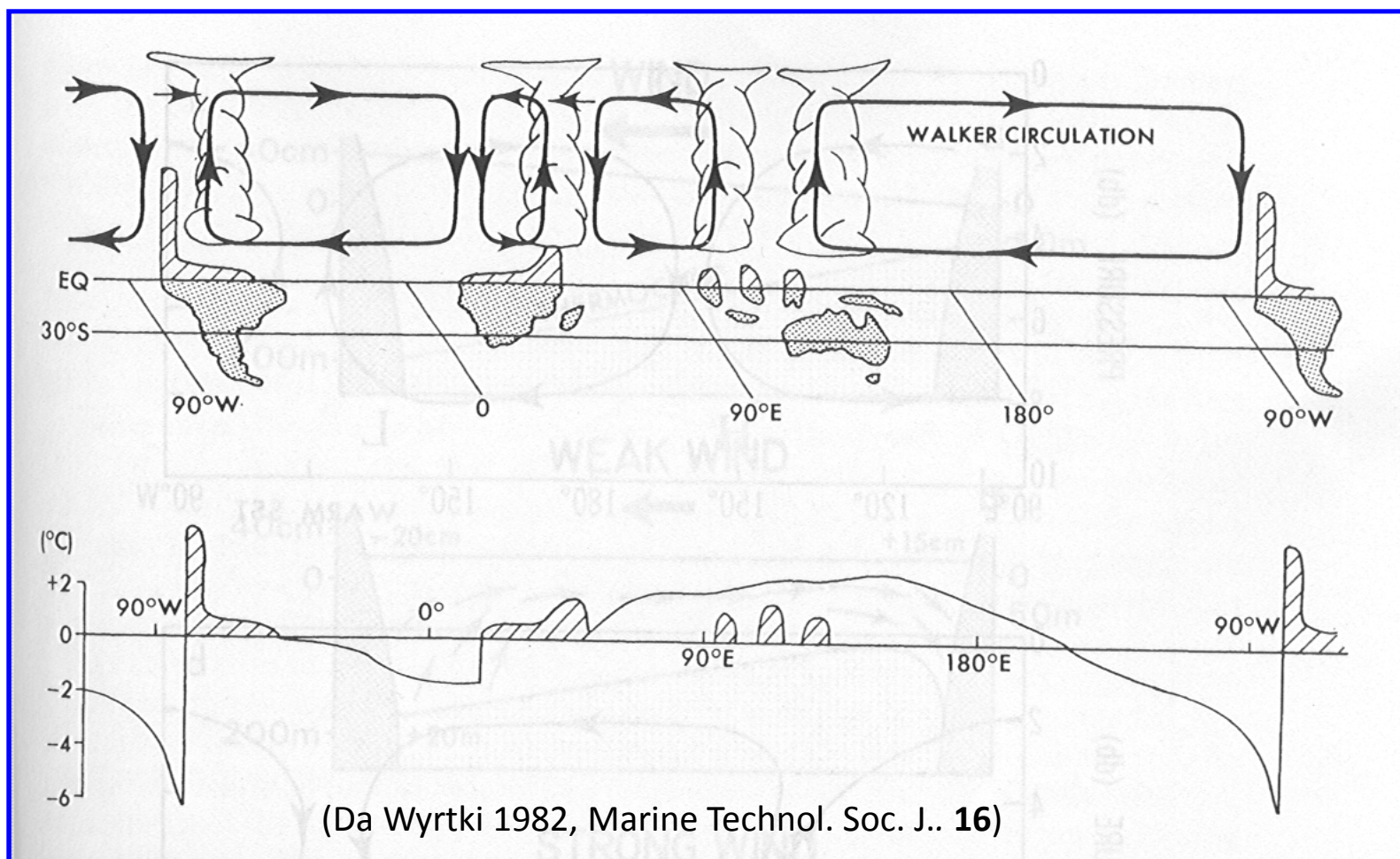


temperatura media oceanica

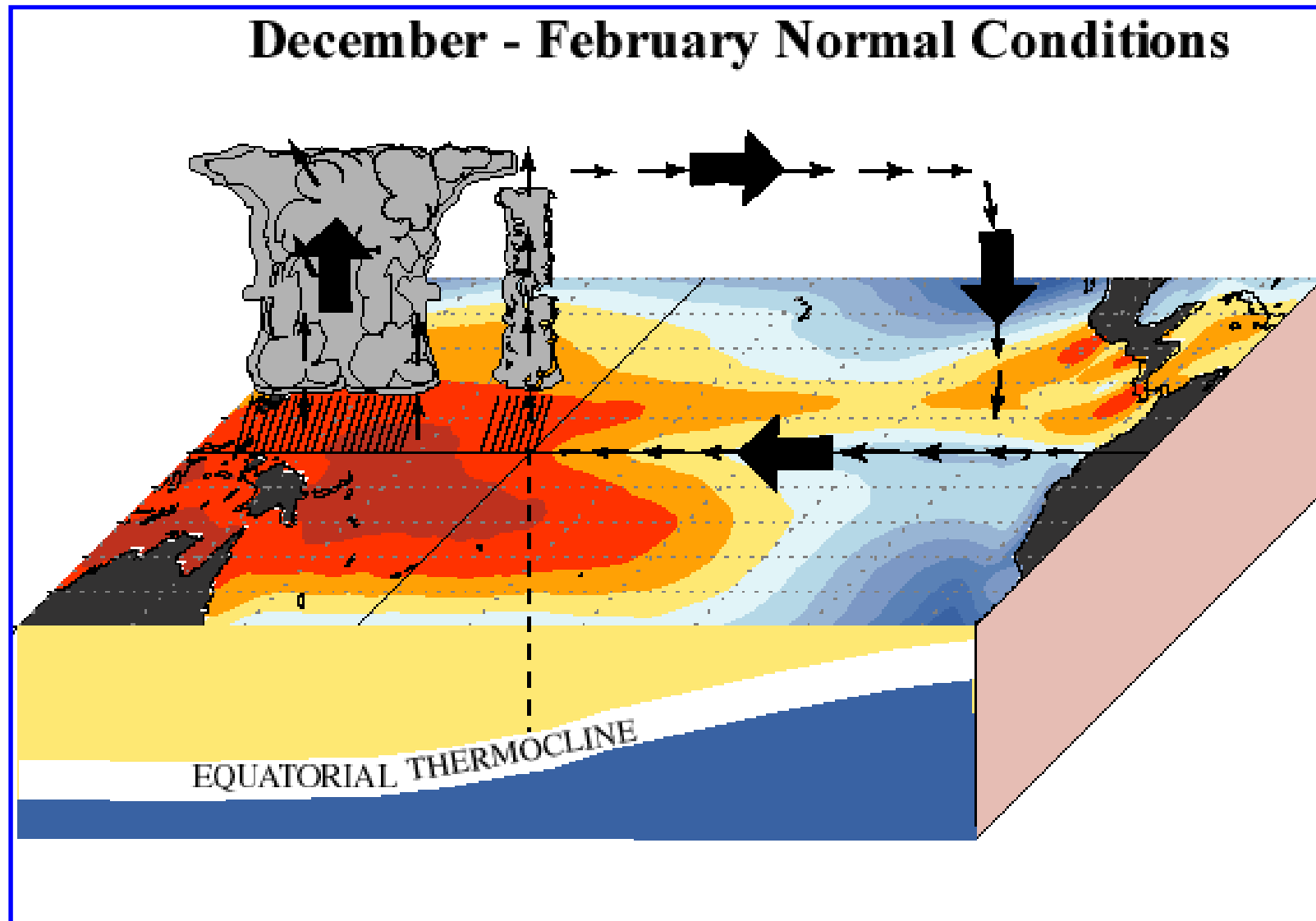


Circolazione Atmosferica Equatoriale

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.

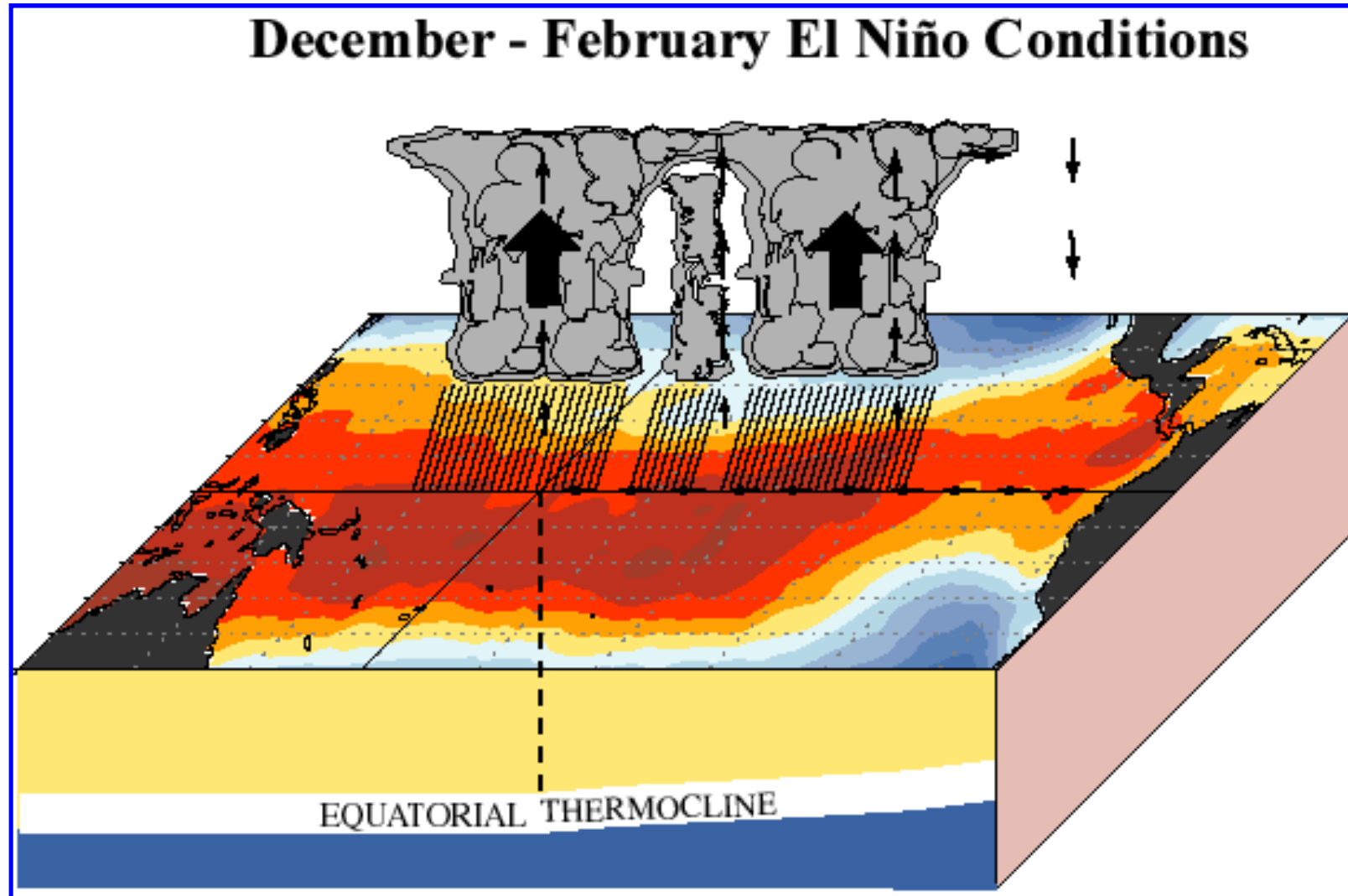


Circolazione Atmosferica Equatoriale



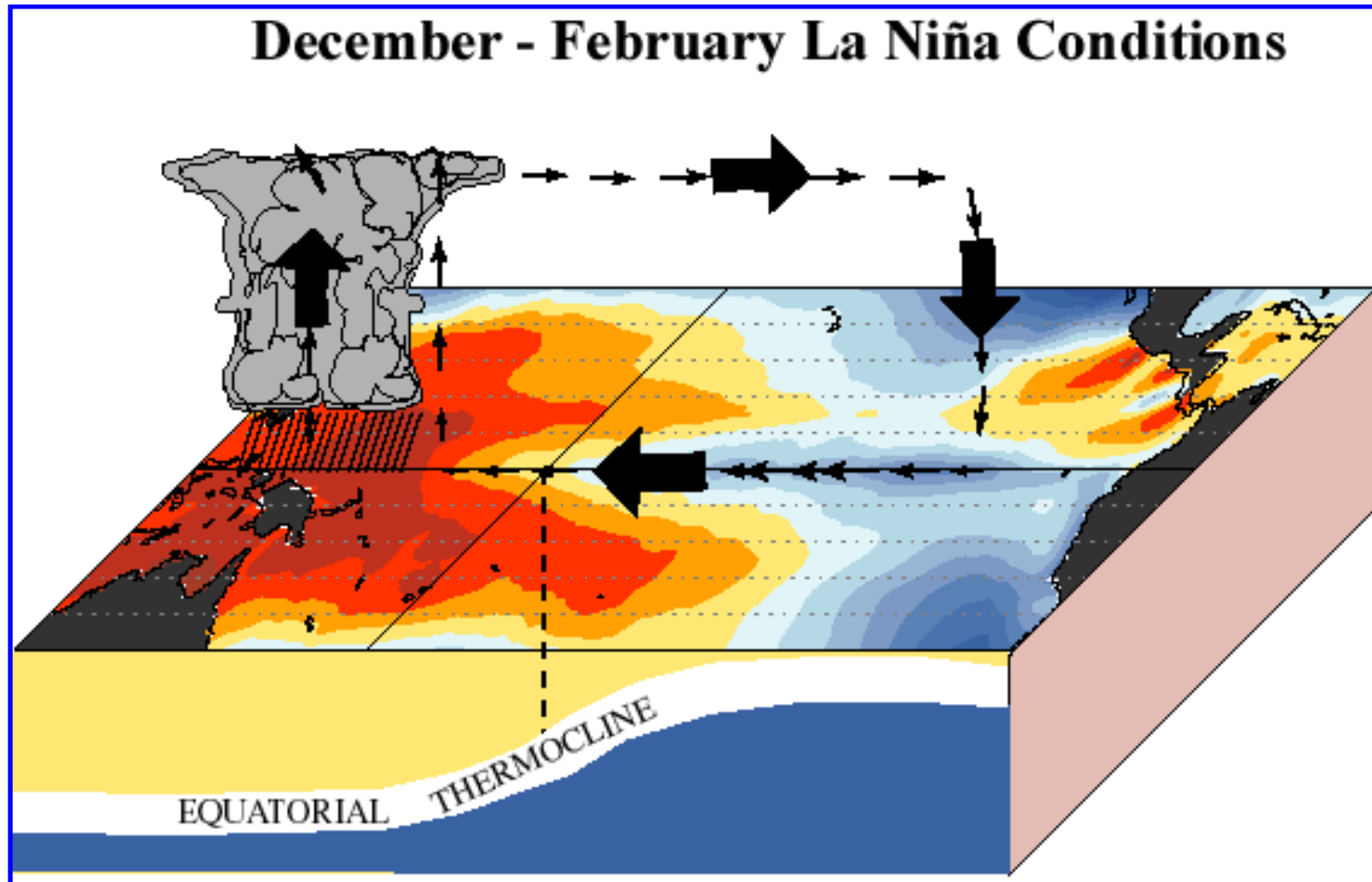
Circolazione Atmosferica Equatoriale

Condizione ENSO – El Niño



Circolazione Atmosferica Equatoriale

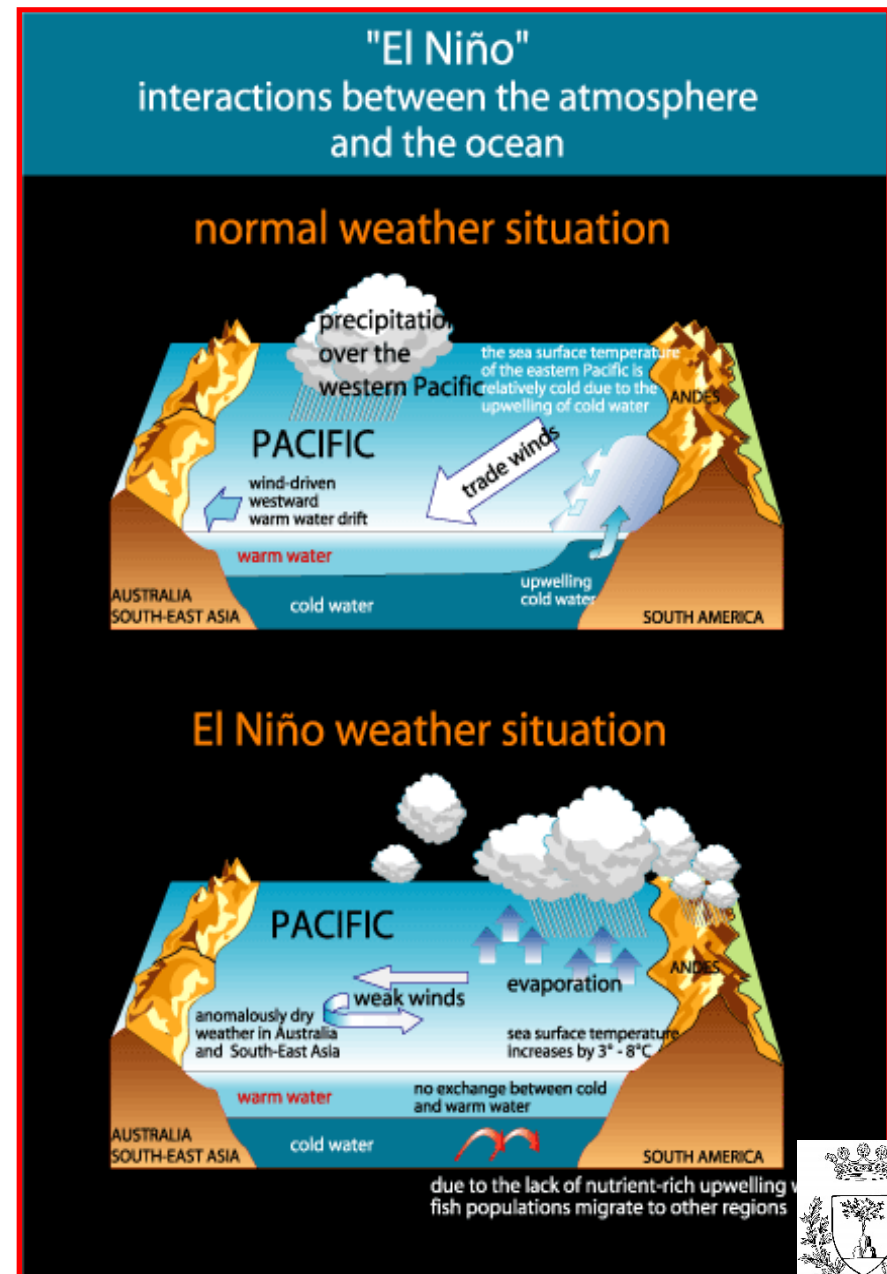
Condizione anti ENSO – La Niña



Circolazione Atmosferica Equatoriale - Condizione ENSO

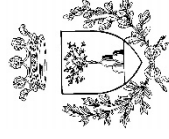
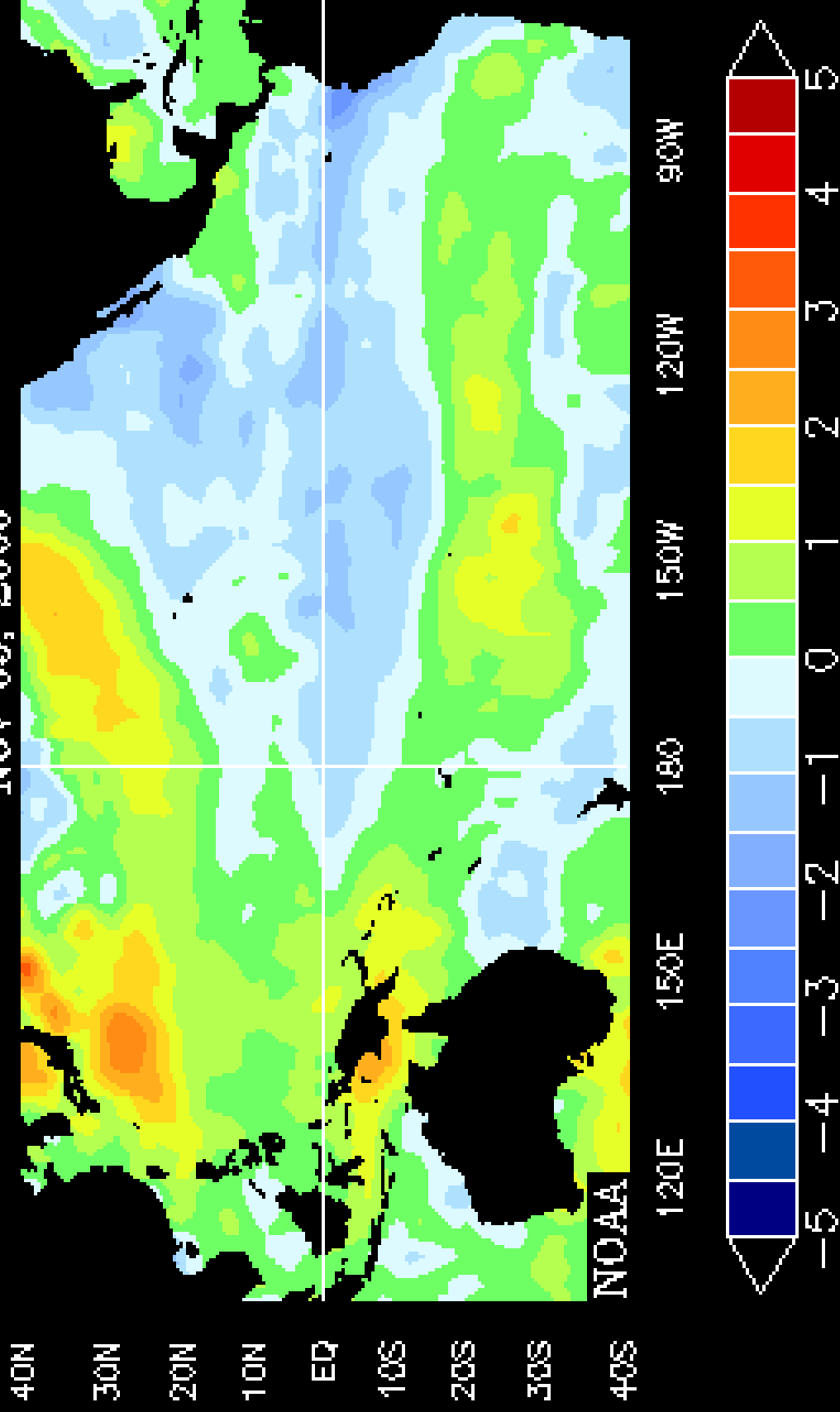
Negli anni “normali” il forte gradiente di temperatura superficiale (freddo a est caldo a ovest) nel Pacifico equatoriale è accompagnato da **forti venti alisei** che spingono le acque superficiali verso ovest permettendo a quelle più fredde e profonde di risalire in superficie. La **risalita delle acque**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

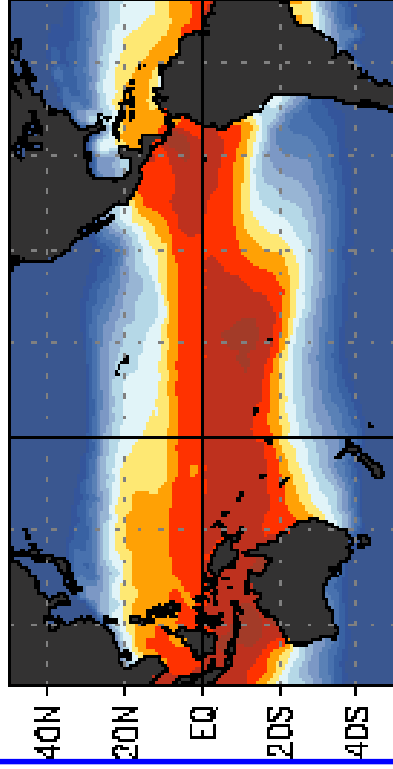
NOV 05, 2000



OCEAN TEMPERATURES (°C)

EL NIÑO

Jan-Mar 1998



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

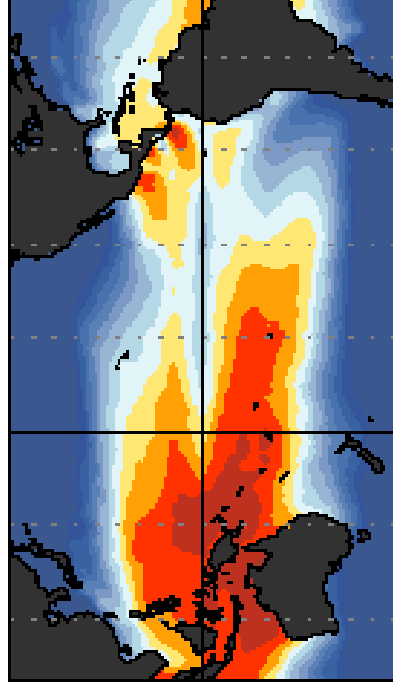


18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

OCEAN TEMPERATURE DEPARTURES (°C)

LA NIÑA

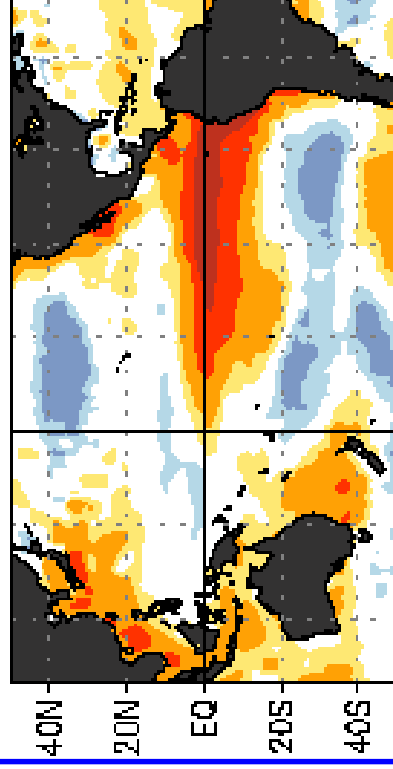
Jan-Mar 1989



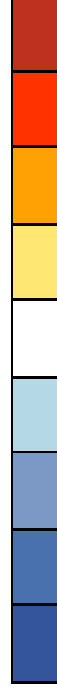
120E 150E 180 150W 120W 90W 60W



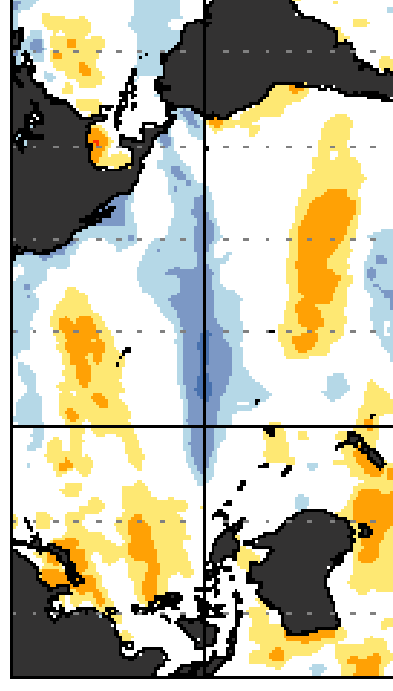
18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30



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



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



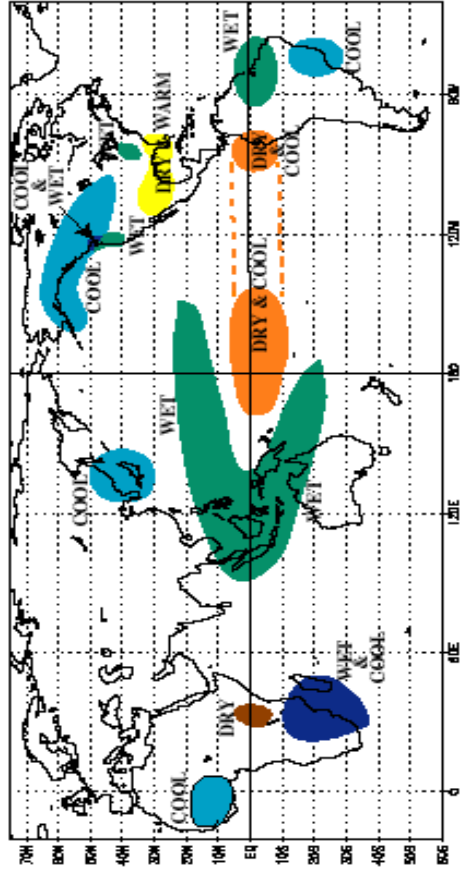
120E 150E 180 150W 120W 90W 60W



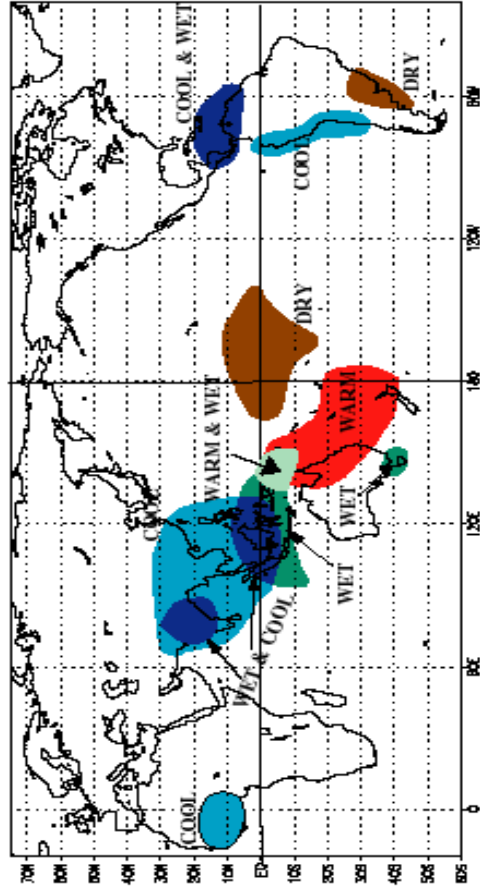
-3 -2 -1 -0.5 0.5 1 2 3



COLD EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY

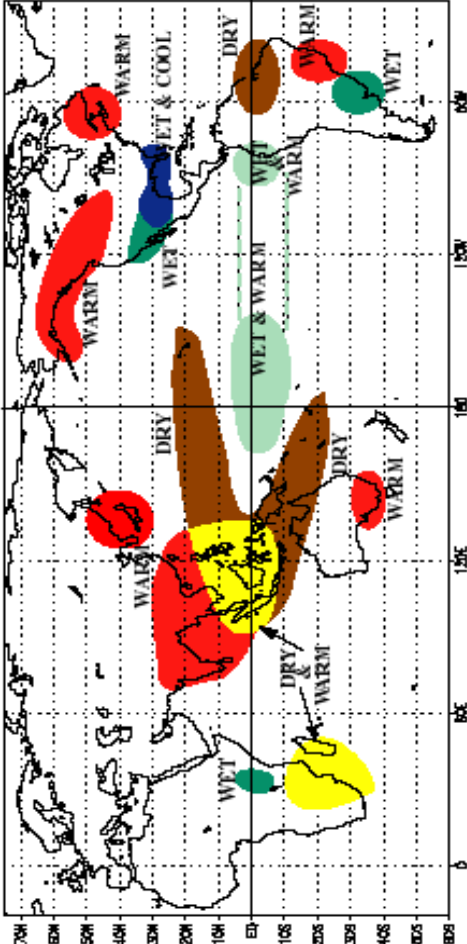


COLD EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST

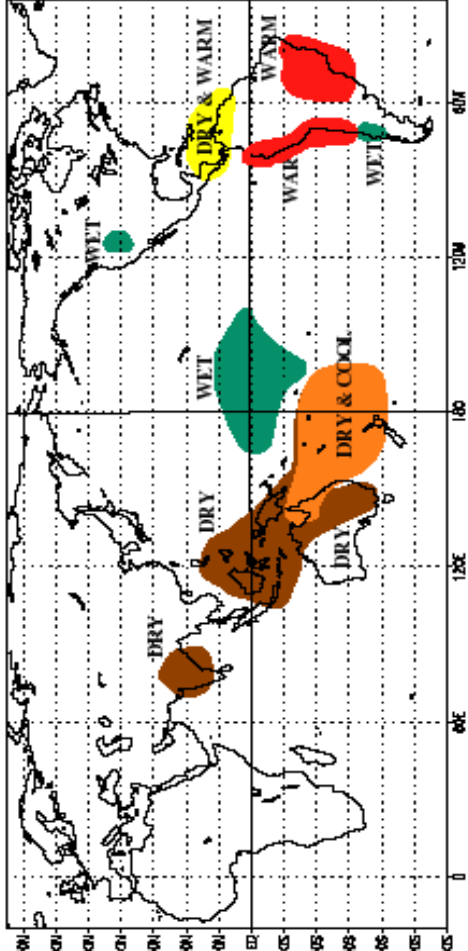


Climate Prediction Center
NCEP

WARM EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY



WARM EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST



Climate Prediction Center
NCEP

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

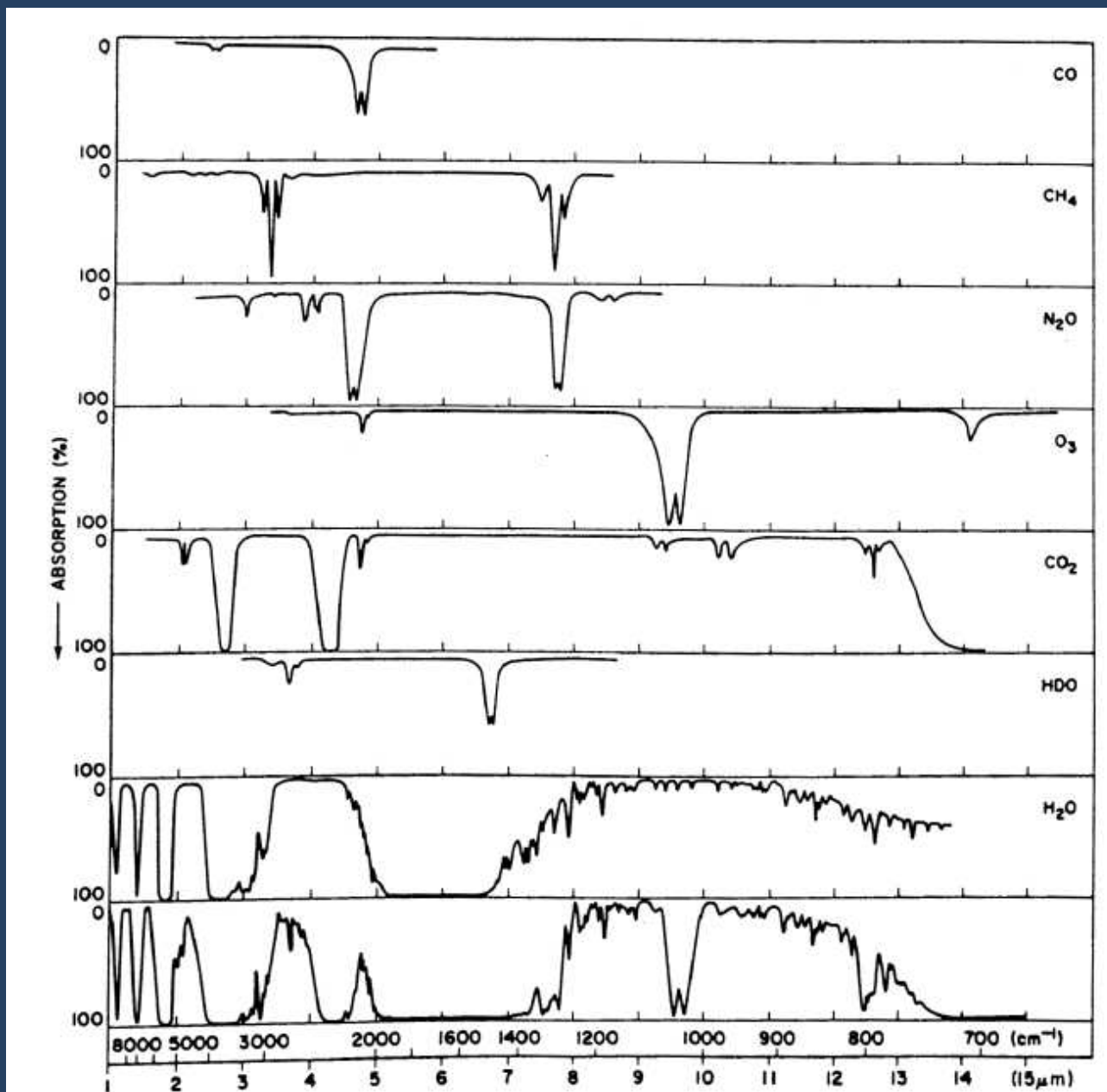


Molecule	Structure	Permanent dipole moment	May acquire dipole moment
N ₂	N  —  N	No	No
O ₂	O  —  O	No	No
CO	C  —  O	Yes	Yes
CO ₂	O  —  C —  O	No	Yes (in two vibrational modes)
N ₂ O	N  —  N —  O	Yes	Yes
H ₂ O	 H —  O —  H	Yes	Yes
O ₃	 O —  O —  O	Yes	Yes
CH ₄	 H —  C —  H  H —  H	No	Yes (in two vibrational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

Peixoto and Oort (1998)

forzanti - GHG II

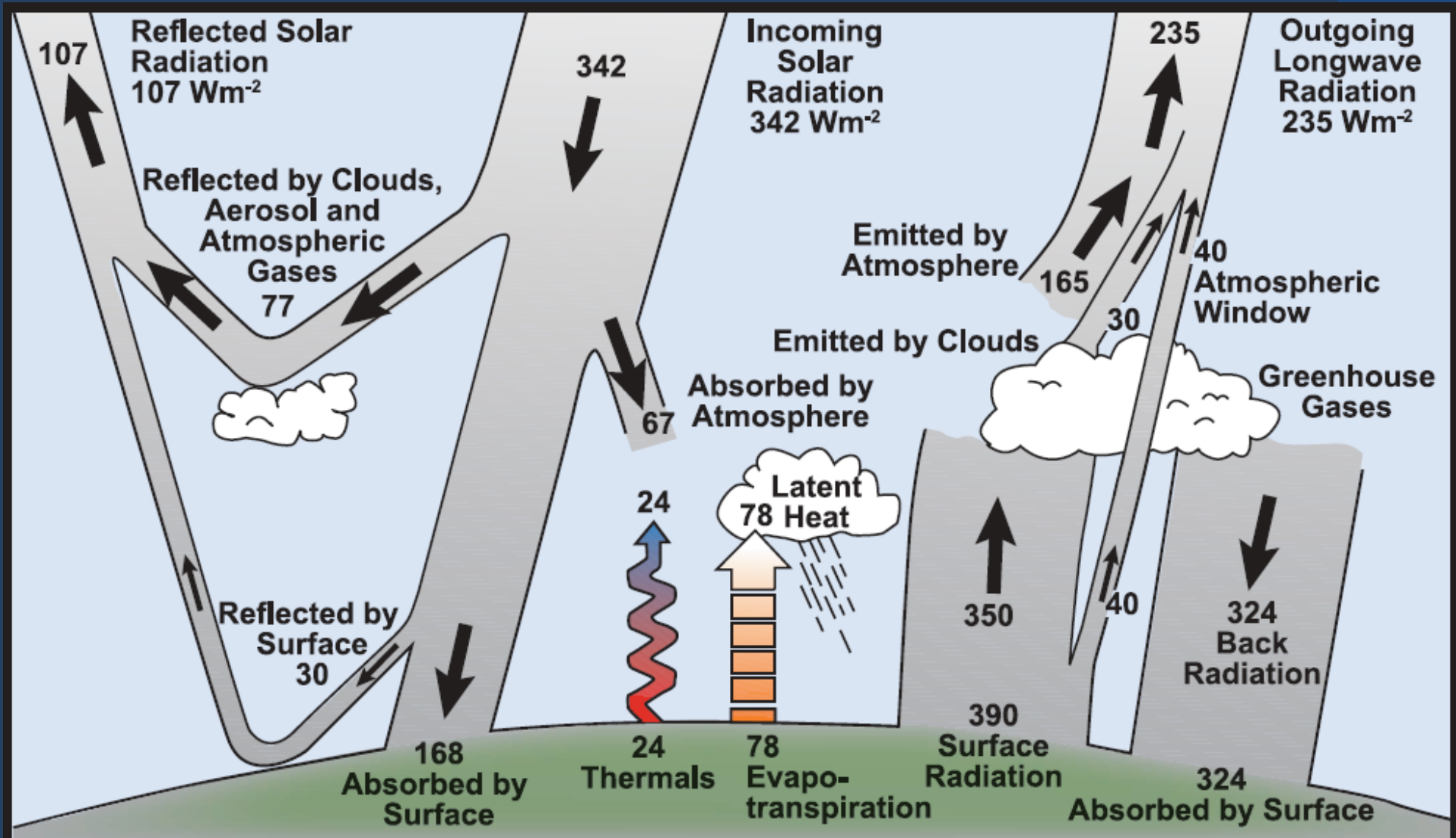
spettri di assorbimento dei gas atmosferici



(Valley, 1965)

forzanti - GHG III

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



Kiehl and Trenberth (1997)

forzanti - GHG IV

il forcing sul sistema



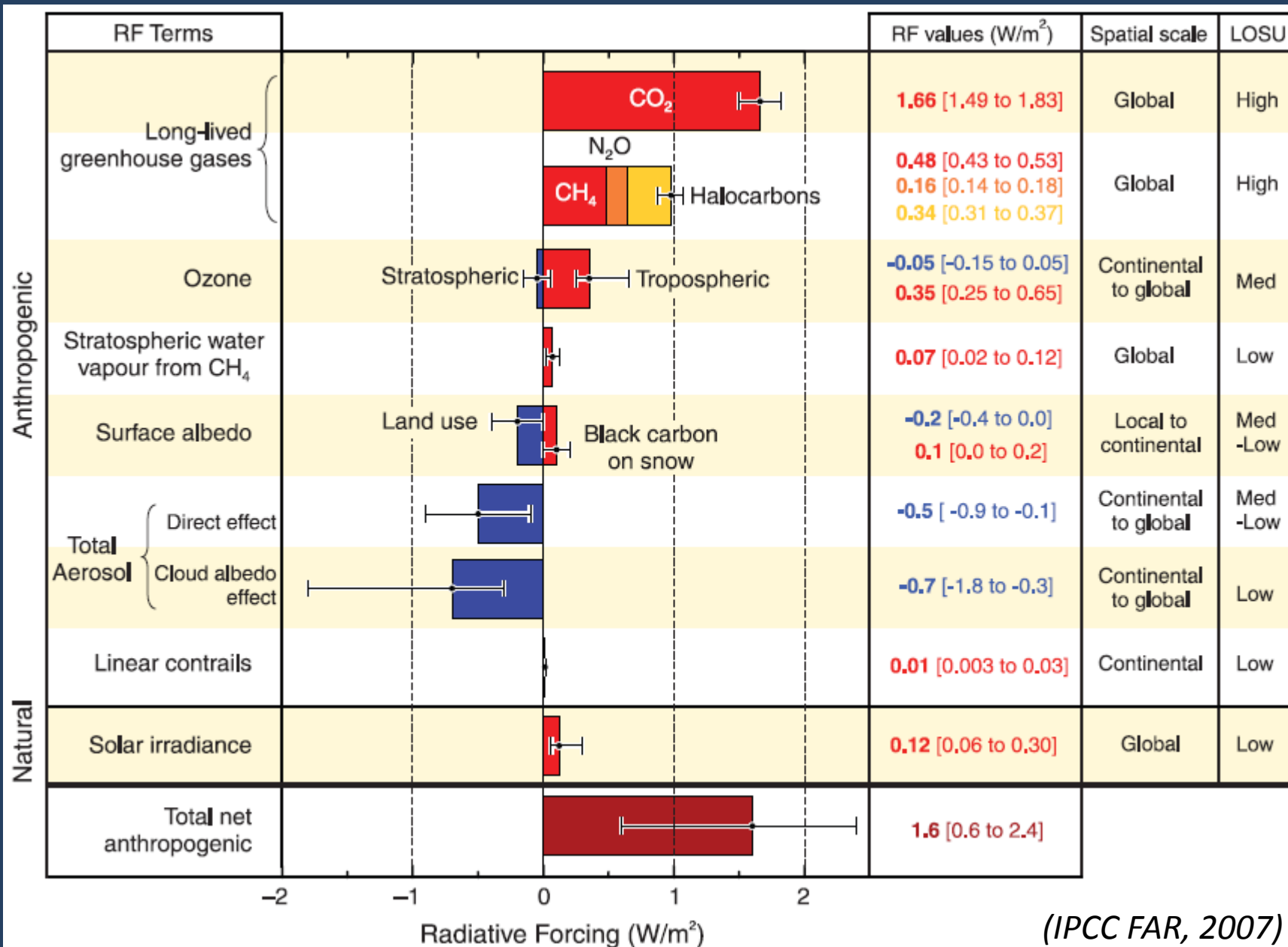
radiative forcing: misura l'influenza di un dato meccanismo nell'alterare il bilancio di flussi energetici entranti ed uscenti dal sistema alla tropopausa (TOA) in Wm^{-2} :

$$F_{in} - F_{out} = \Delta F = \frac{\Delta T}{\lambda}$$

λ è la sensibilità climatica [$m^2 K W^{-1}$] esprime la variazione della temperatura in seguito ad un forcing di $1 Wm^{-2}$ al TOA.

forzanti - GHG V

radiative forcing & LOSU



forzanti - GHG VI

Global Warming Potential



$$GWP(X) = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot X(t) dt}{\int_0^{TH} a_{CO_2} \cdot CO_2(t) dt}$$

ove:

a_x *è l'efficienza radiativa della specie x [$W m^{-2} kg^{-1}$]*

TH *è il Time Horizon sul quale è fatta la stima*

$X(t)$ *è il profilo di decadimento temporale della specie x*

forzanti - GHG VII

GWP per alcuni gas

(IPCC FAR, 2007)

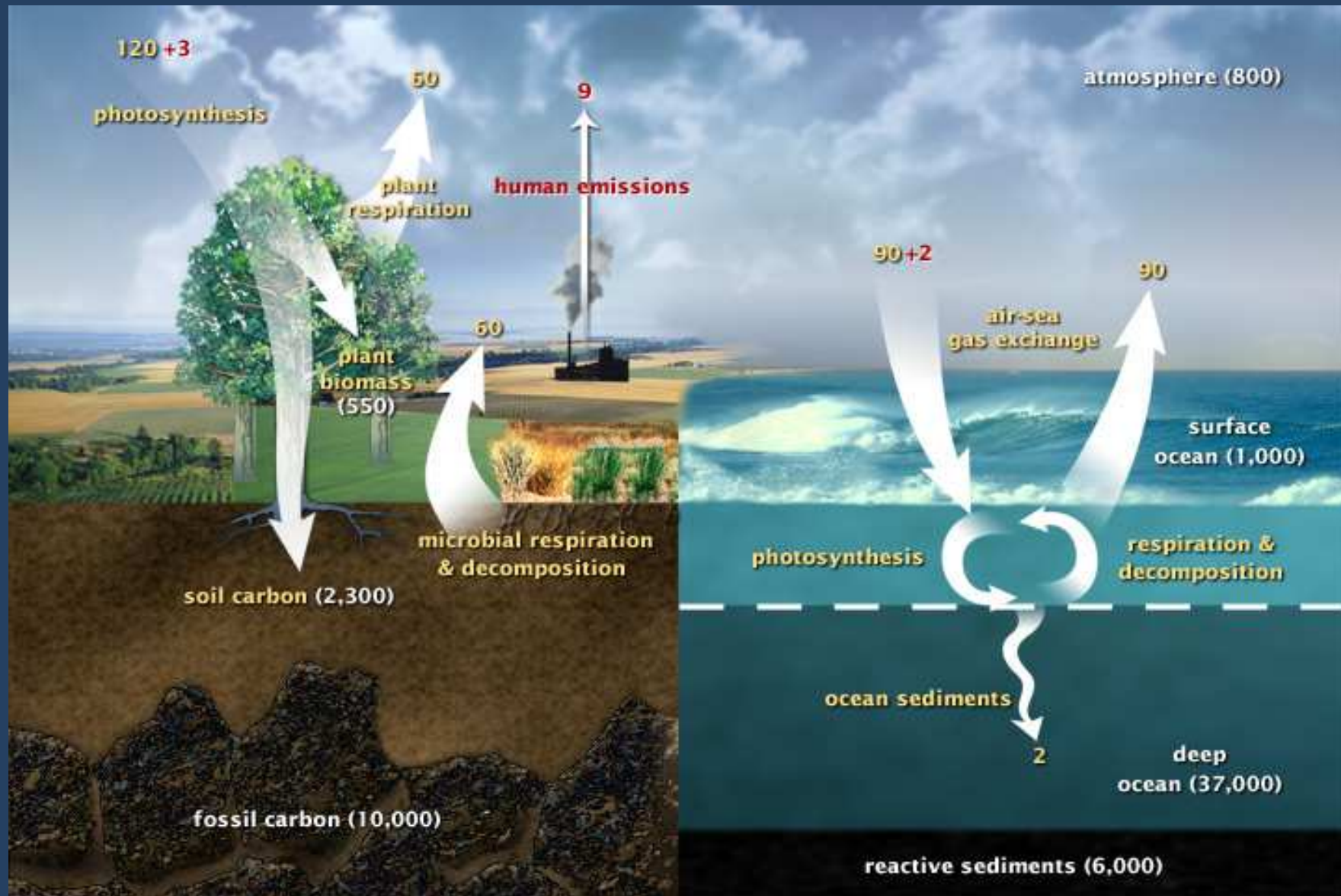


Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR [†] (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below ^a	^b 1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Methane ^c	CH ₄	12 ^c	3.7x10 ⁻⁴	21	72	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

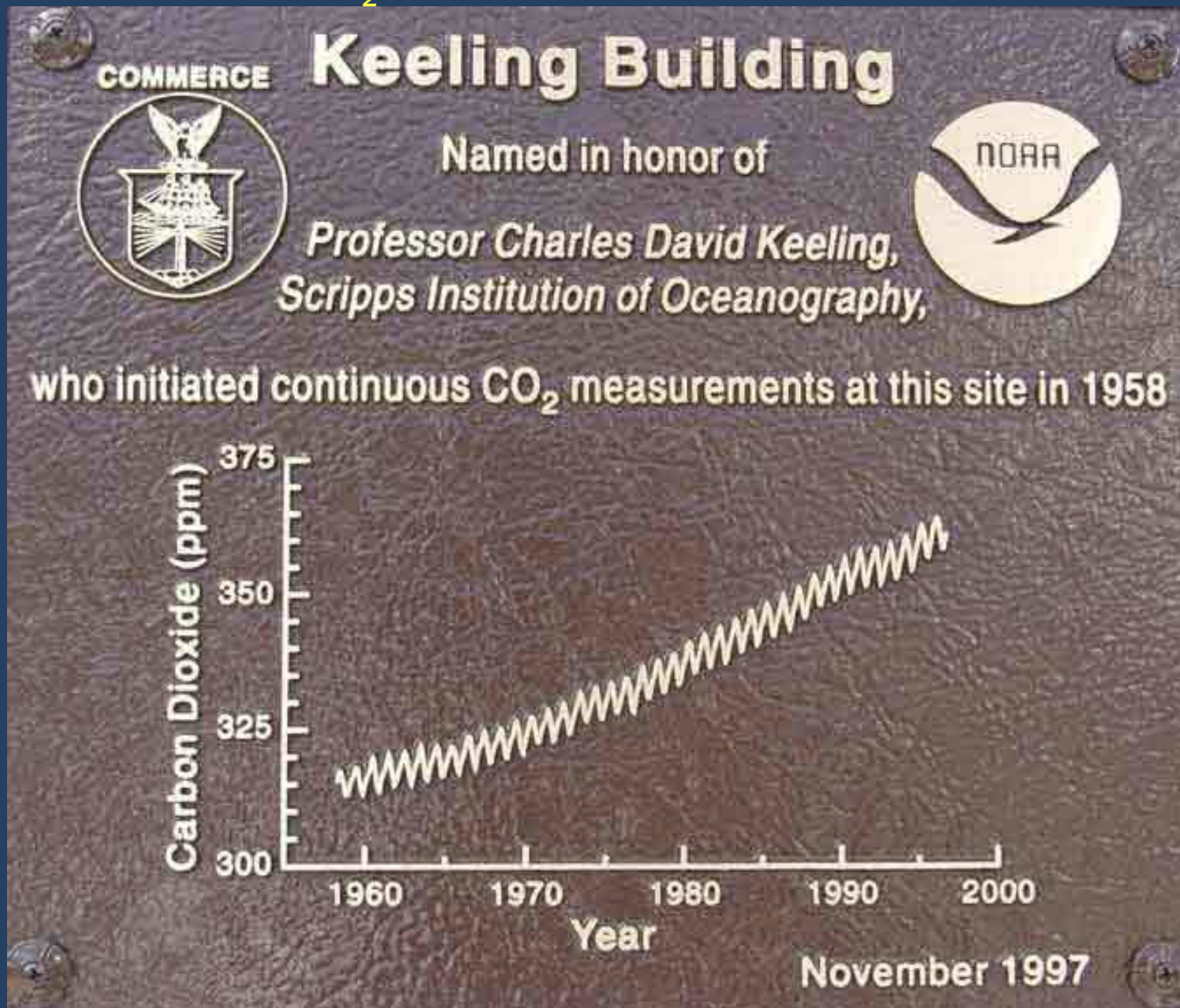
ciclo veloce del carbonio

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



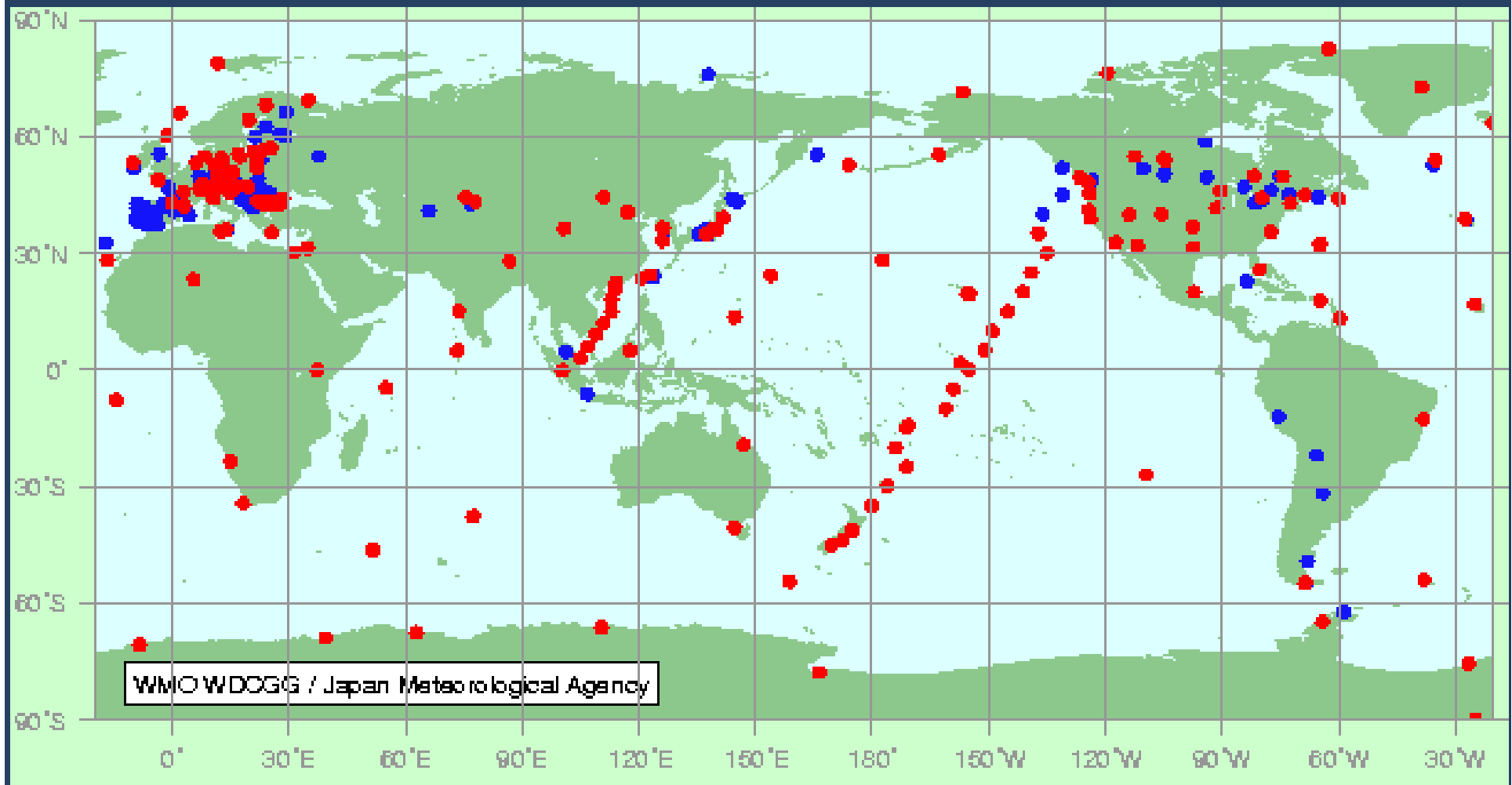
forzanti - GHG IX

misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG X

The Global Atmosphere Watch (GAW) programme of
WMO WDCGG (1990)

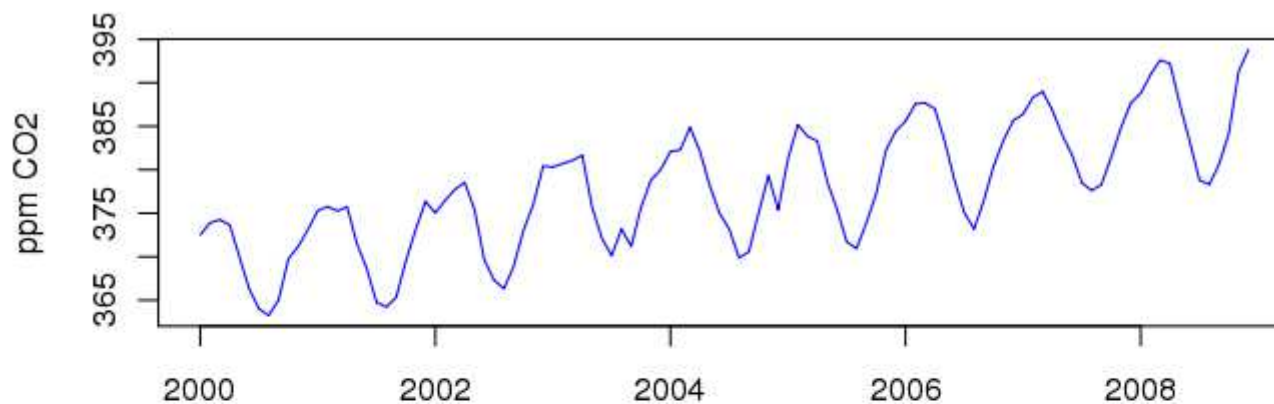


forzanti - GHG XI

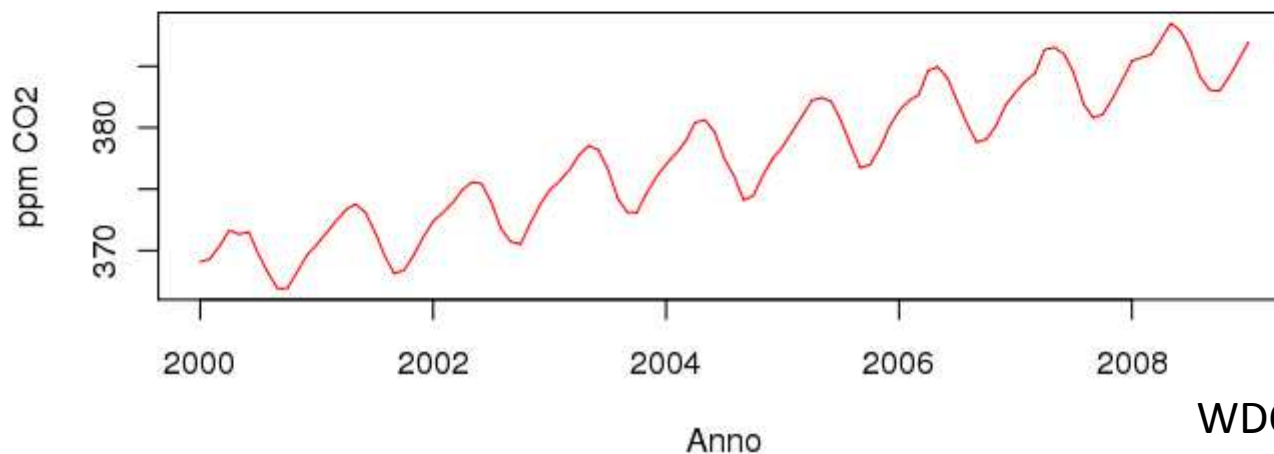
misure di contenuto di CO₂



CO2 - Monte Cimone



CO2 - Mauna Loa



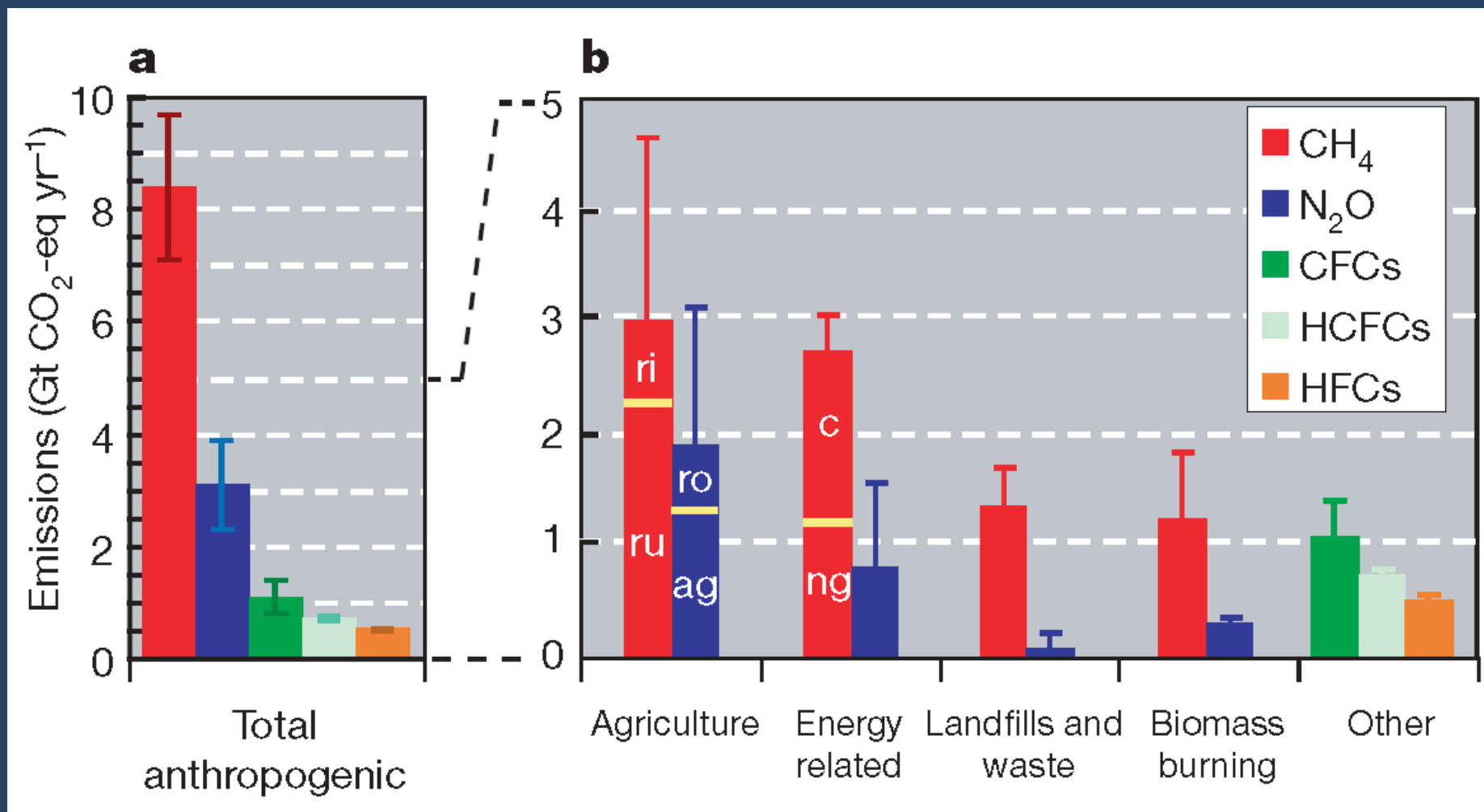
WDCGG

forzanti - GHG XII

meccanismi di produzione e distruzione di altri GHG



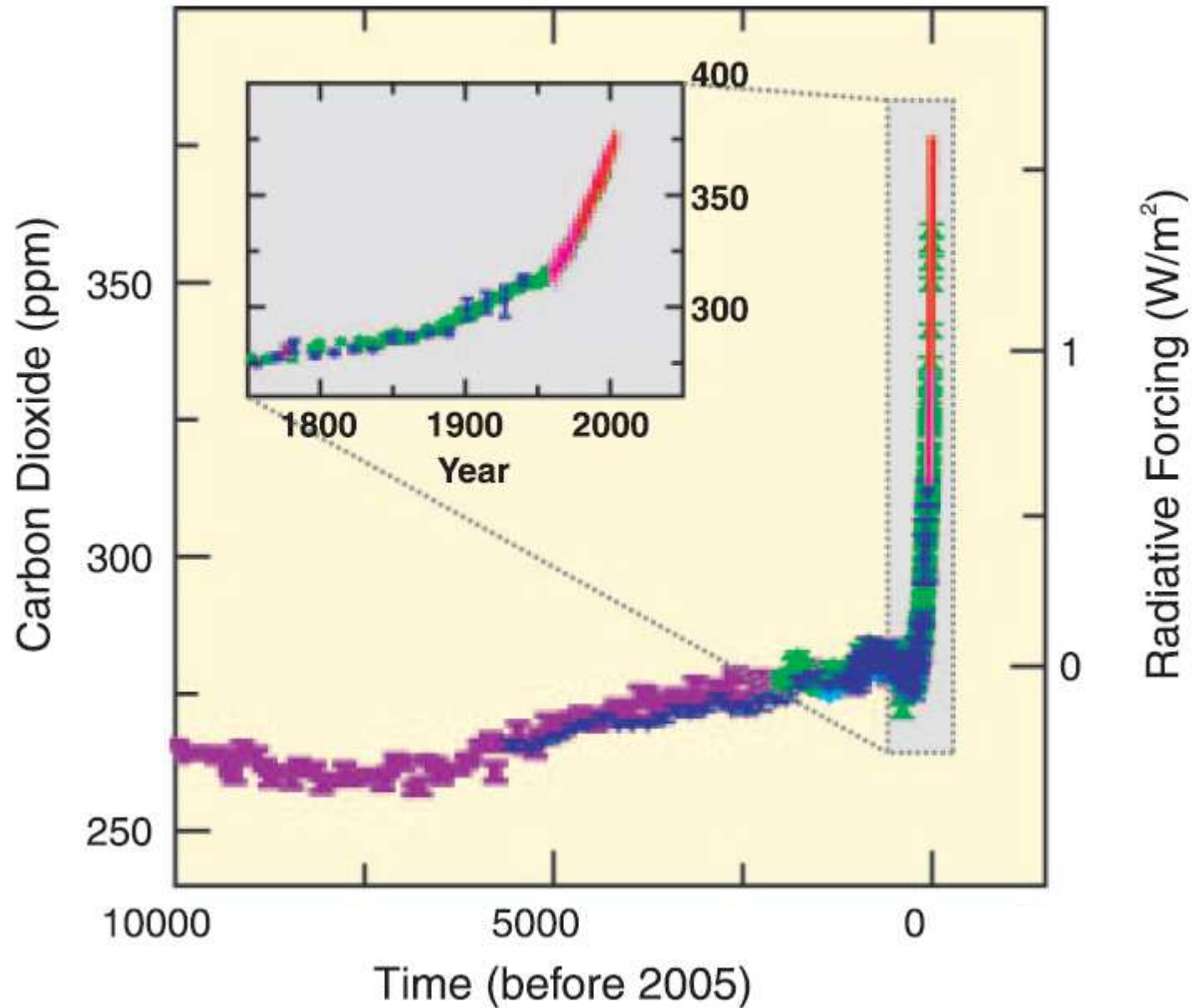
ri: coltivazione del riso; ru: ruminanti; ng: gas naturali; c: miniere
ro: run-off; ag: agricoltura

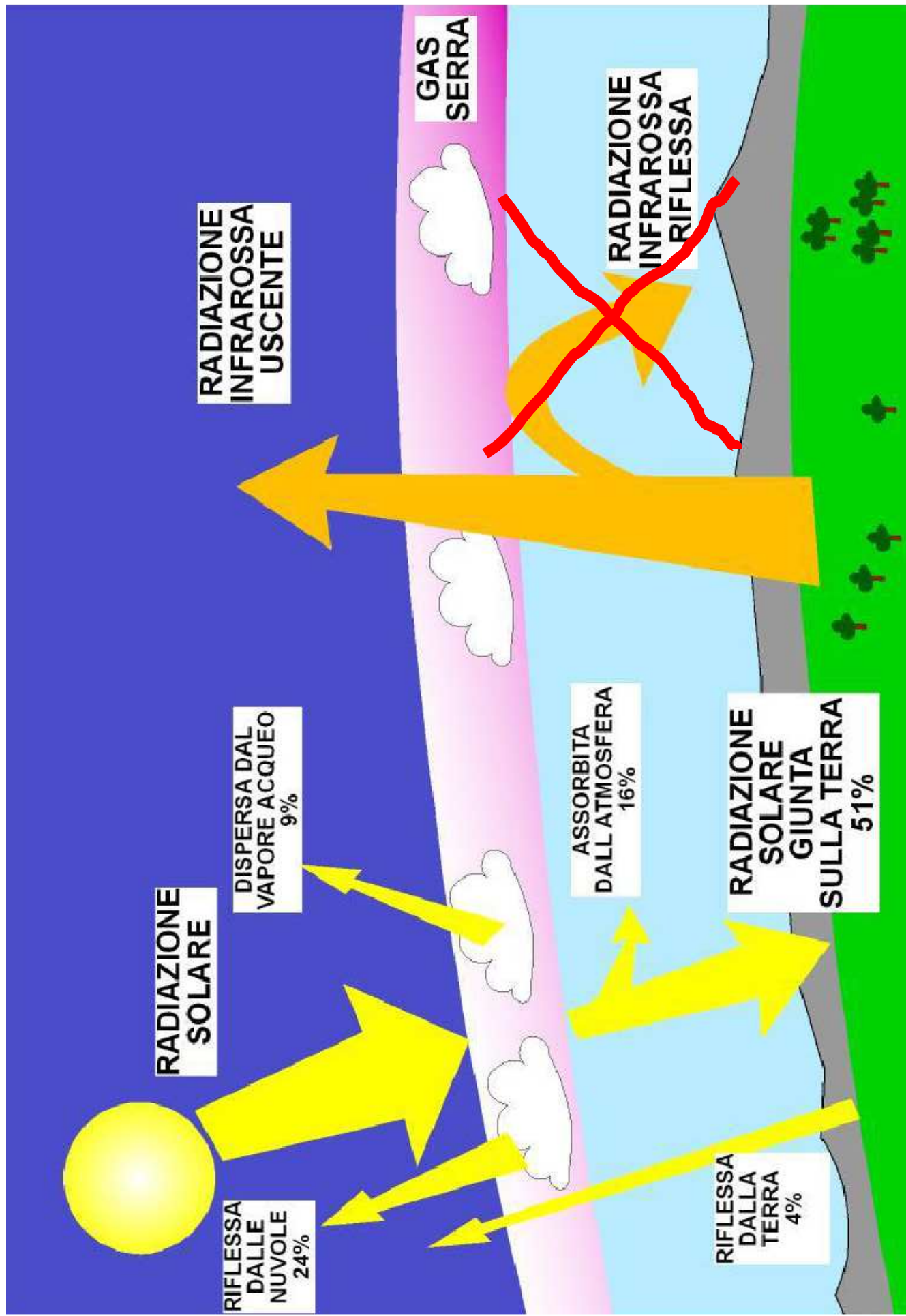


(Montzka et al, 2011)

forzanti - GHG XIII

record storici (ice cores)





L'effetto serra

Circa il 30%
delle radiazioni
infrarosse
si diffonde
nello spazio

Energia Solare

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

Radiazione
solare
assorbita
dalla Terra



Anidride
carbonica
rilasciata
dagli aerei



Le navi
bruciano
combustibile

Mari e oceani
si scaldano,
l'acqua evapora
e il vapore così
formato viene
intrappolato
dal gas serra



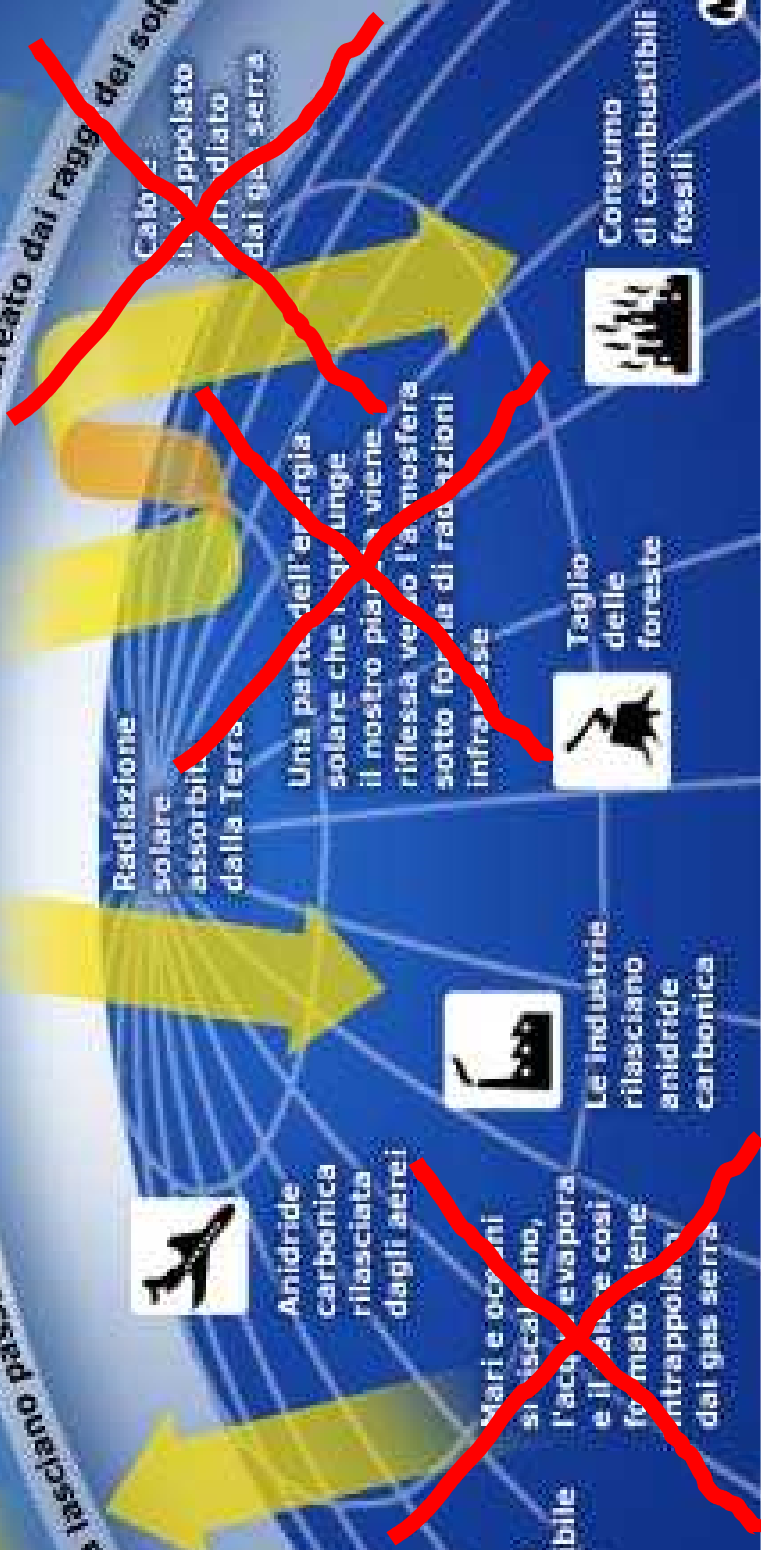
Le industrie
rilasciano
anidride
carbonica

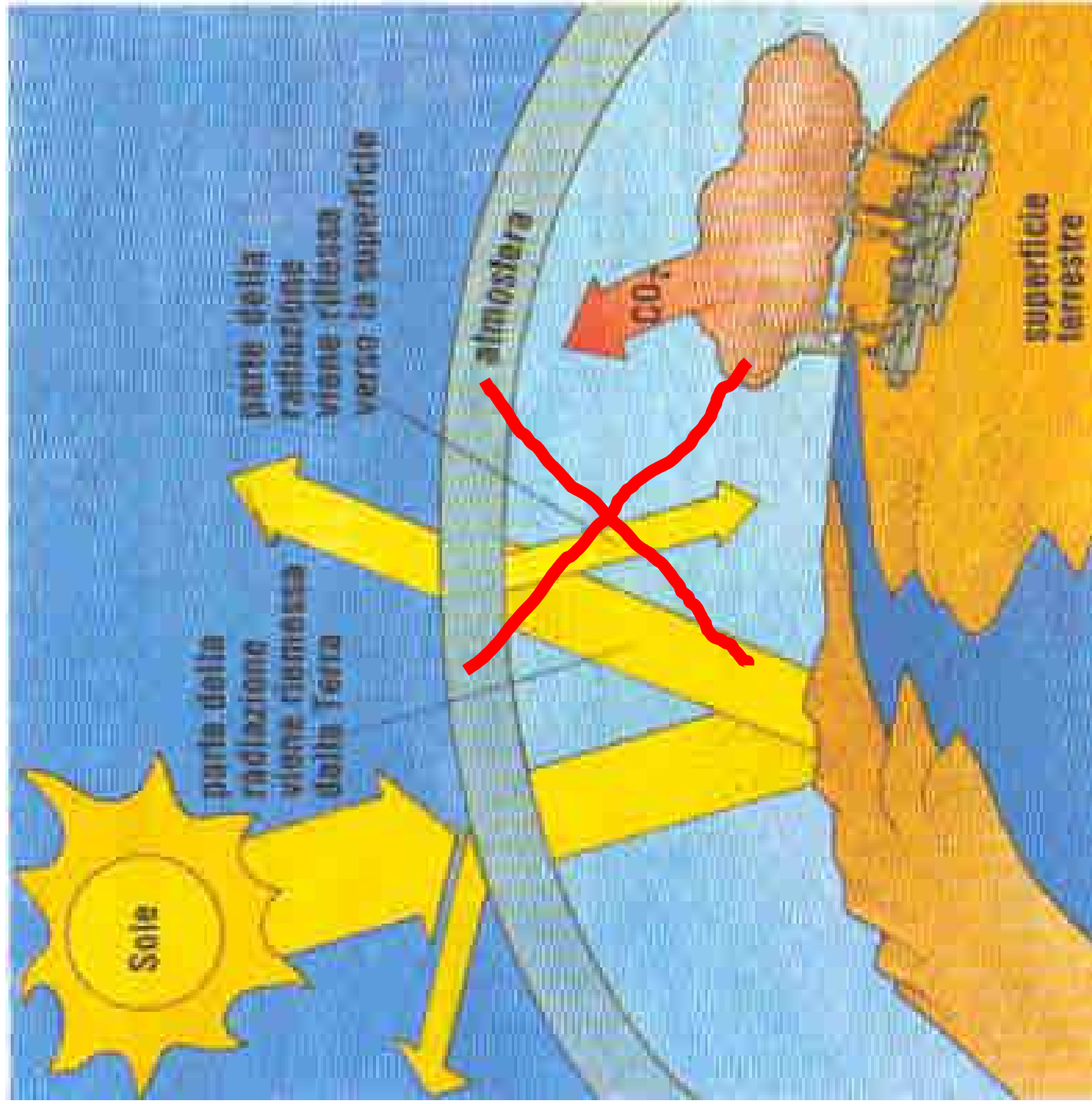


Taglio
delle
foreste



Consumo
di combustibili
fossili









L'effetto serra

A T M O S F E R A



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**

G A S S E R R A

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) ...
166 Watt per m²

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

T E R R A



forzanti – aerosol I

definizioni



Con aerosol si intende il particolato atmosferico:
piccole particelle solide o liquide sospese in aria.

dimensioni (r):	da 0.001 a 10 μm
numero di Reynolds:	da 10^{-12} ad 10^{-3}
velocità terminale:	da 10^{-6} ad 1 cm s^{-1}
vita media:	da 1 a 400 giorni

forzanti – aerosol II

effetti diretti sul clima



l'aerosol diffonde ed assorbe la radiazione solare incidente, variando il bilancio radiativo del sistema.

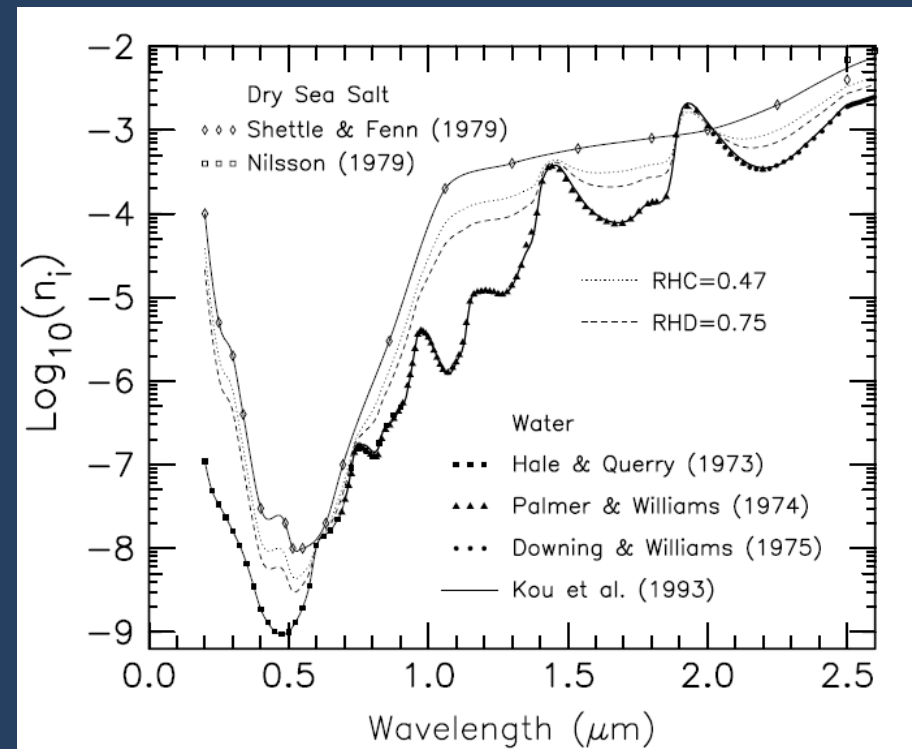
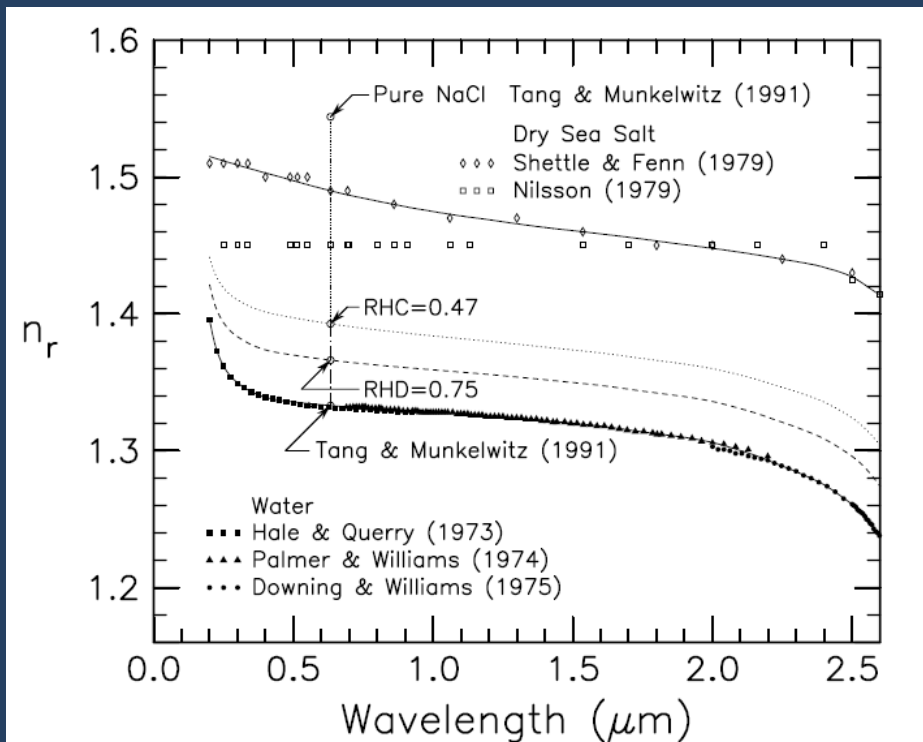
L'importanza relativa di questi meccanismi dipende dalle caratteristiche radiative del particolato (materiale, forma, fase), dalla concentrazione in atmosfera, dalla quota e dallo stato del suolo.

forzanti – aerosol III

effetti diretti: dipendenza dall'indice di rifrazione complesso



$$n = n_r + in_i$$



Andrew Lacis' Database of Aerosol Spectral Refractive Indices (GACP-GISS NASA)

forzanti – aerosol IV *effetti indiretti*

Radiative Forcing of
Climate Change:
Expanding the Concept
and Addressing
Uncertainties

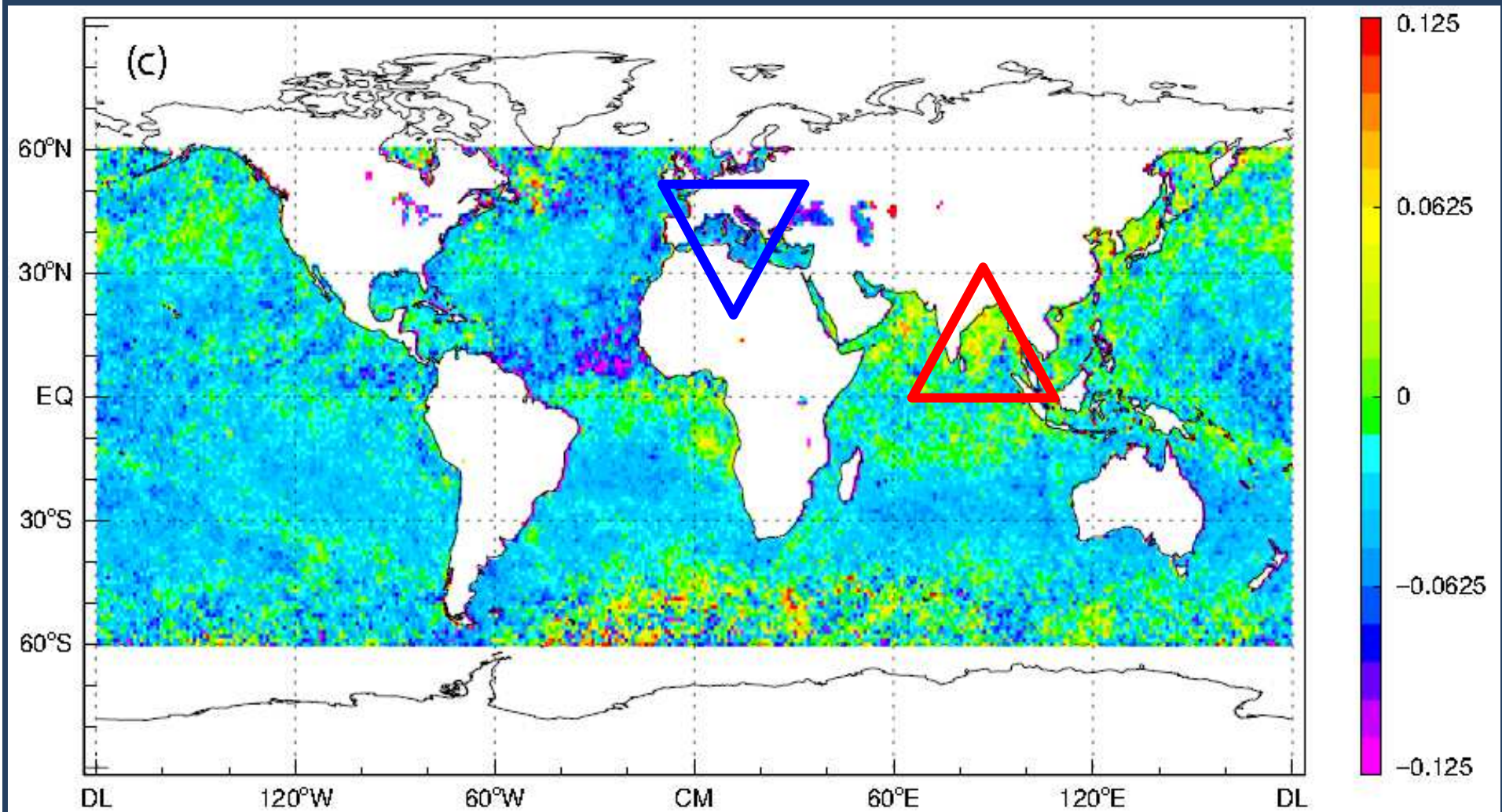
Committee on
Radiative Forcing
Effects on Climate,
Climate Research
Committee, National
Research Council

National Academy of
Sciences (2005)

Effect	Cloud Type	Description	Radiative Forcing
First indirect aerosol effect (cloud albedo or Twomey effect)	All clouds	For the same cloud water or ice content, more but smaller cloud particles reflect more solar radiation	Negative
Second indirect aerosol effect (cloud lifetime or Albrecht effect)	All clouds	Smaller cloud particles decrease the precipitation efficiency, thereby prolonging cloud lifetime	Negative
Semidirect effect	All clouds	Absorption of solar radiation by soot leads to evaporation of cloud particles	Positive
Glaciation indirect effect	Mixed-phase clouds	An increase in ice nuclei increases the precipitation efficiency	Positive
Thermodynamic effect	Mixed-phase clouds	Smaller cloud droplets inhibit freezing, causing supercooled droplets to extend to colder temperatures	Unknown
Surface energy budget effect	All clouds	The aerosol-induced increase in cloud optical thickness decreases the amount of solar radiation reaching the surface, changing the surface energy budget	Negative

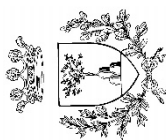


forzanti – aerosol V
emissioni, contenuto - satellite

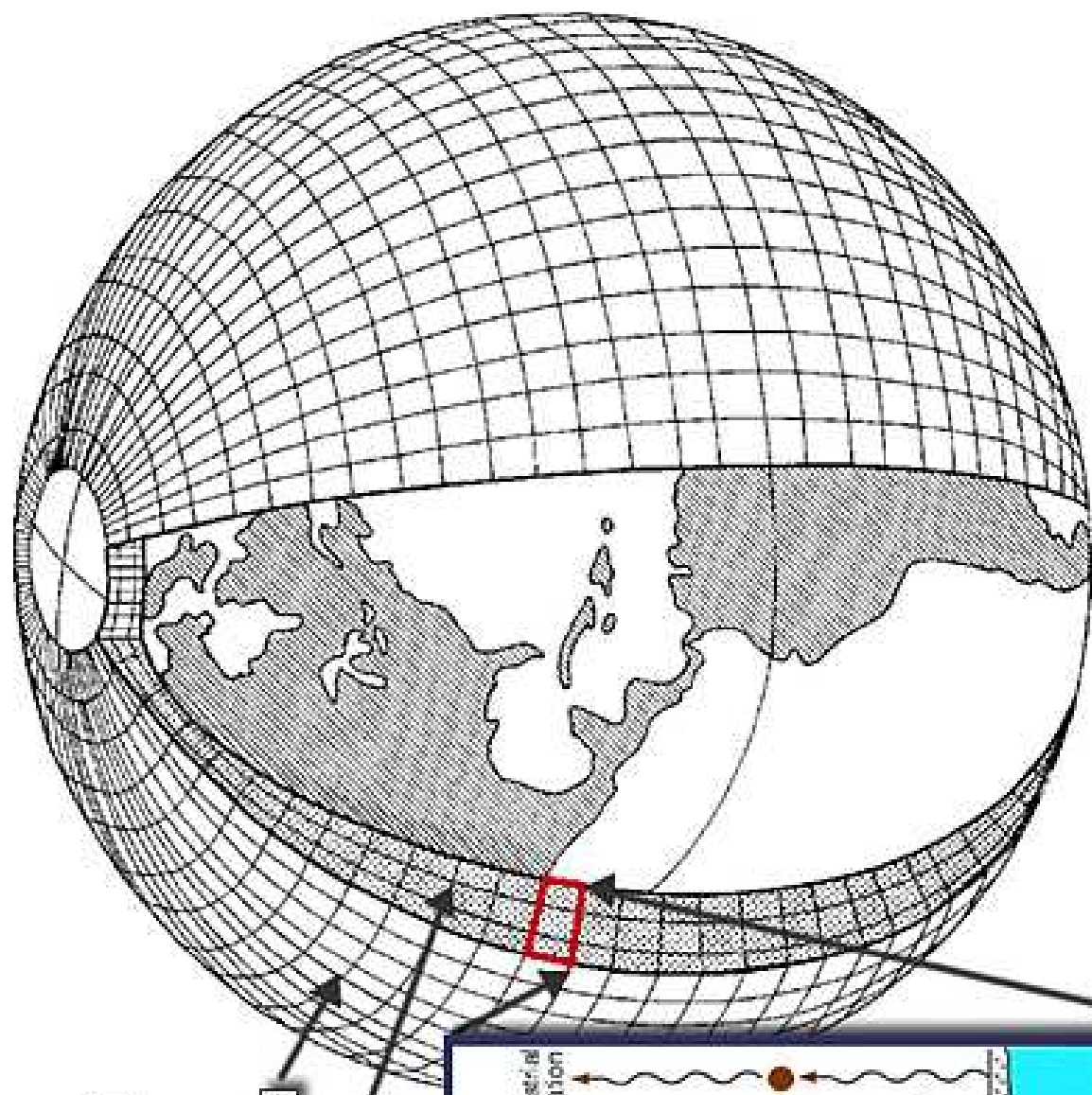


AOT(2002-2005) – AOT(1988-1991)

Mishchenko and Geogdzhayev (2008)



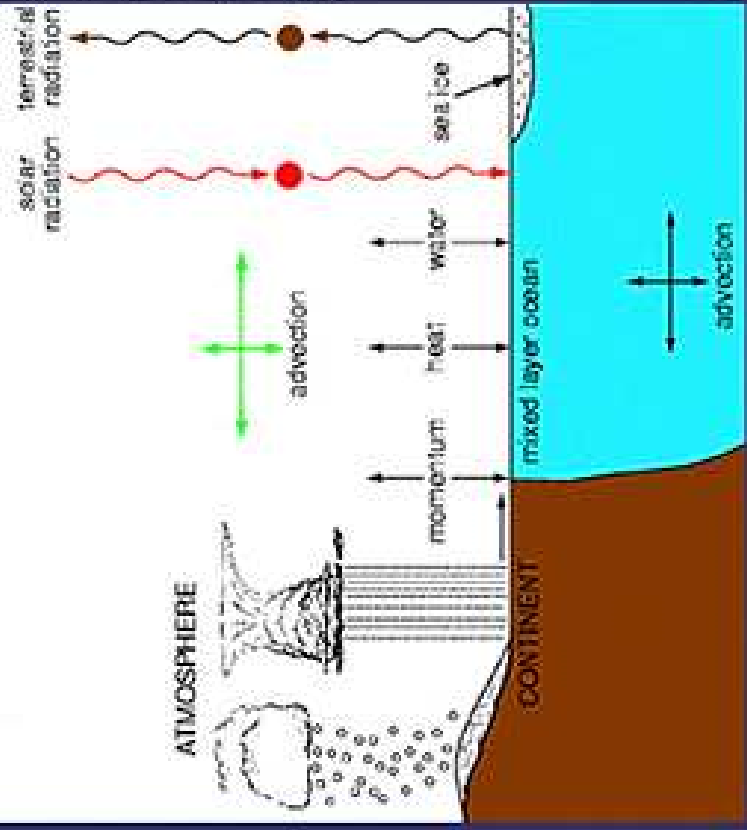
Schematic for Global Atmospheric Model



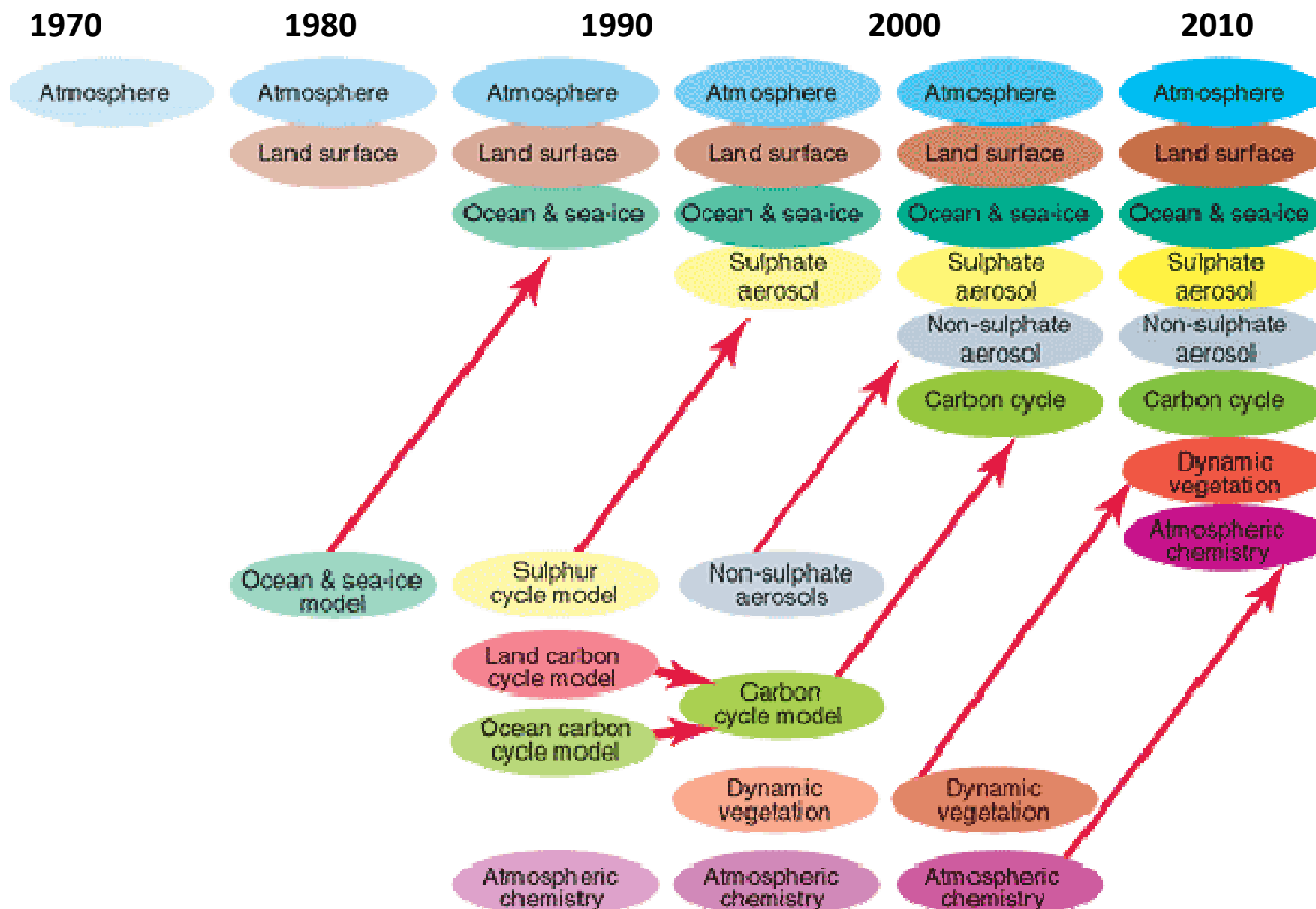
Horizontal Grid (latitude - longitude)

Vertical Grid (height or pressure)

Physical Processes in a Model

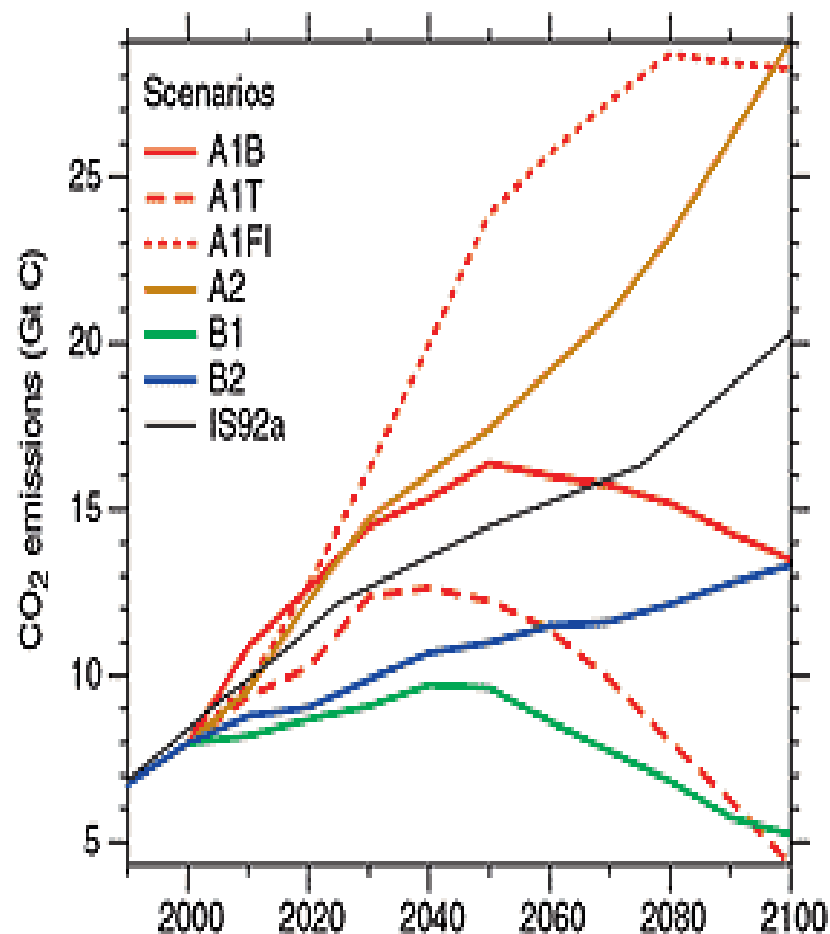


evoluzione dei modelli climatici

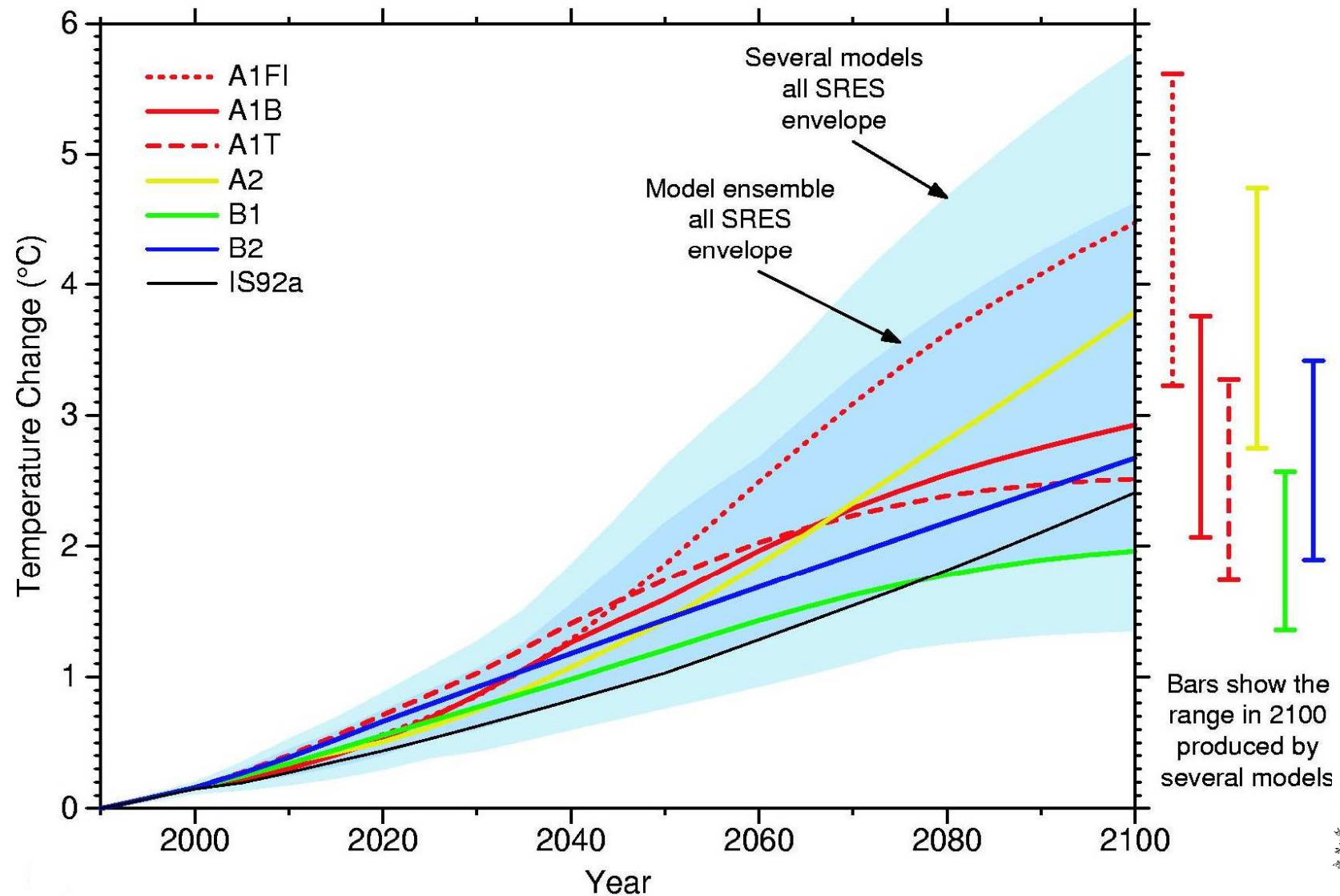


Future Climate Change

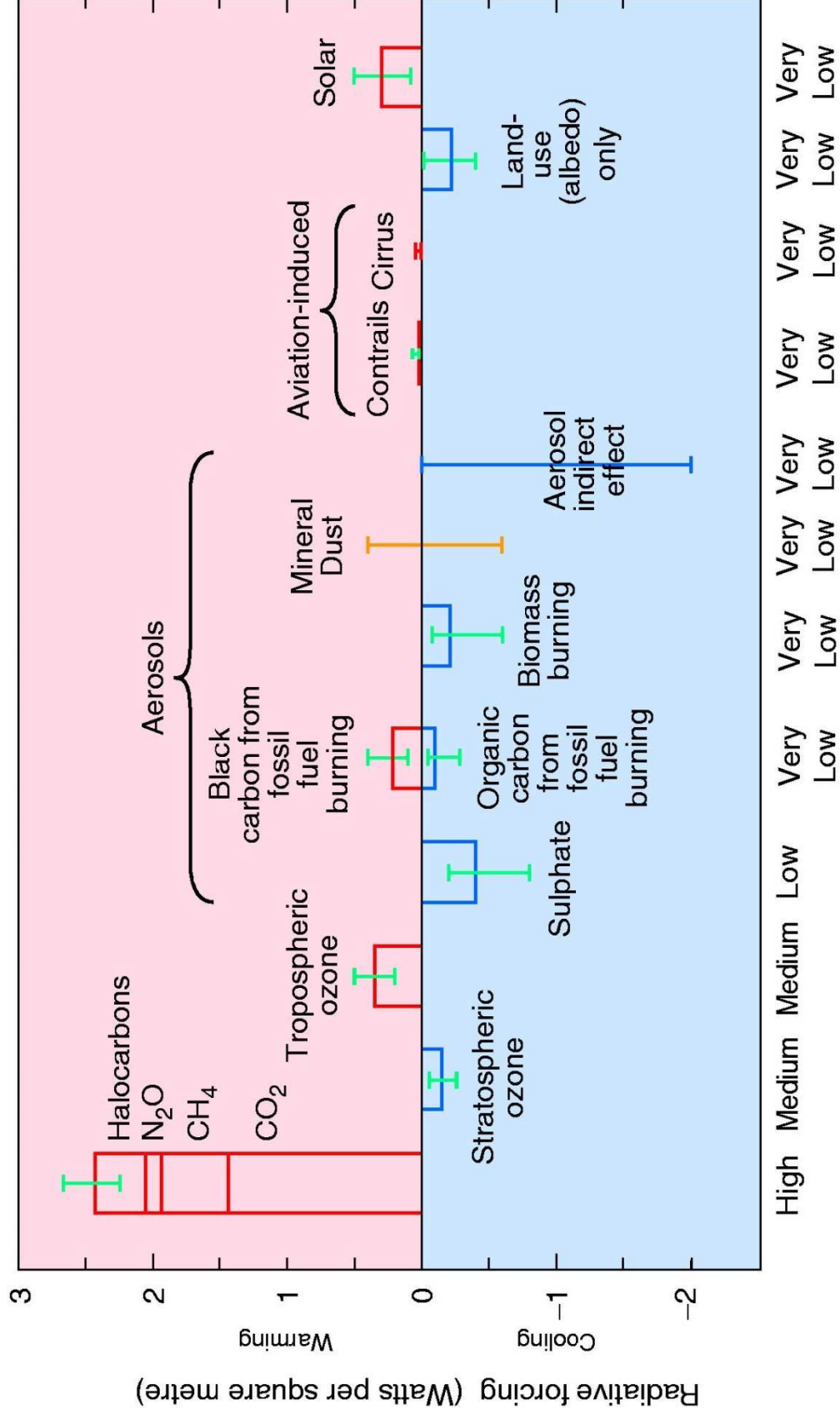
- A1: rapida crescita economica con sviluppo tecnologico
 - A1FI: uso intensivo di combustibili fossili
 - A1T: uso di combustibili non-fossili
 - A1B: bilancio di fonti di energia
- A2: espansione demografica
- B1: piu' attenzione ai problemi ambientali
- B2: piu' attenzione alle tematiche locali



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



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



Level of Scientific Understanding

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

-Nils Bohr-