



**IL CLIMA e le sue VARIAZIONI
OGGETTIVITÀ SCIENTIFICA ed
EFFETTI SULLA SOCIETÀ**

Prof. Franco PRODI

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima



PARAMETRI CLIMATICI E SCALE SPAZIO-TEMPORALI

PER STUDIARE LE VARIAZIONI CLIMATICHE BISOGNA DEFINIRE:

Quale delle osservabili meteorologiche è più adatta per rappresentare il clima



Nessuna osservabile a priori è “migliore” di altre per rappresentare il clima; una possibile risposta consiste in una scelta mirata sulla base del tema sotto studio.

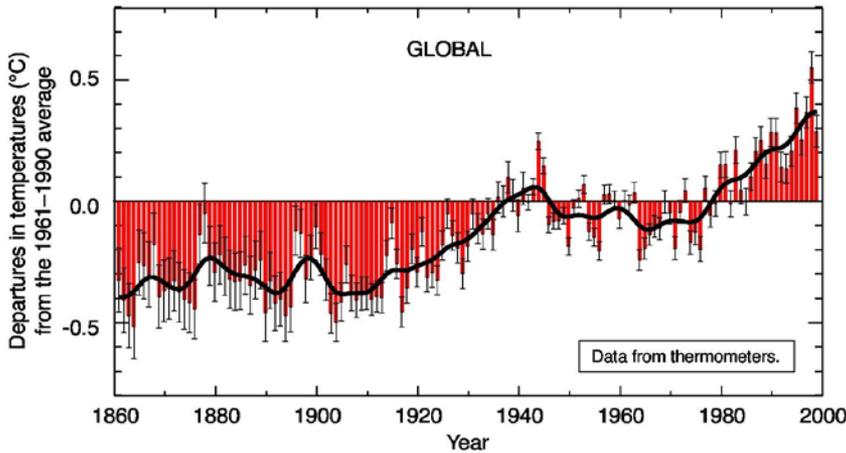
Su quale scala temporale (anni, decenni, secoli) analizzare il fenomeno



In questo caso la risposta si costruisce per tentativi, affinando con l'esperienza algoritmi e concettualizzazioni. La scelta resta comunque legata al fenomeno che si vuole studiare.



RICOSTRUZIONE DEL CLIMA DEL PASSATO



DATI STRUMENTALI

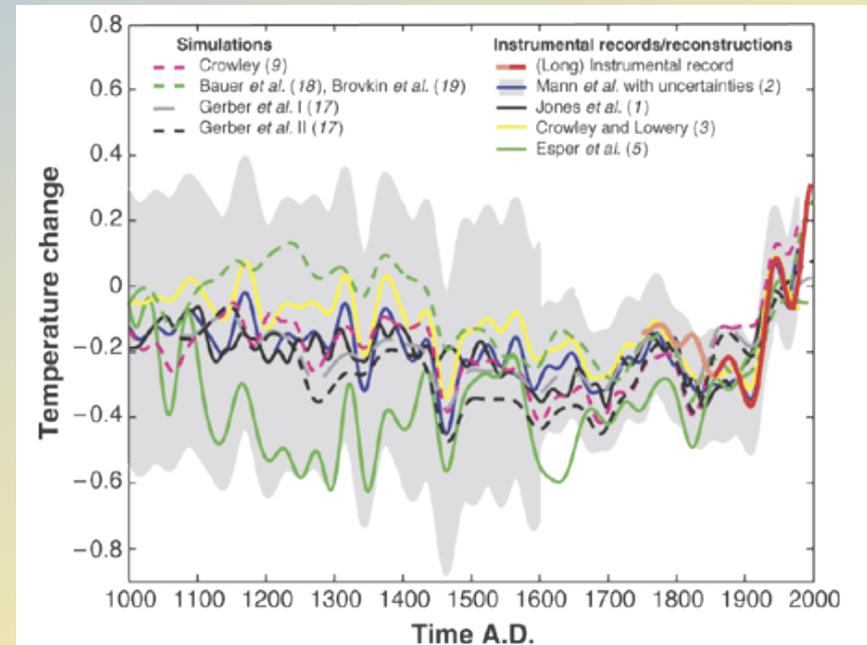
- **Ricostruzione più precisa** delle variazioni a breve termine (dopo omogeneizzazione!)
- **Limitati nel tempo** (le serie sono disponibili da quando esistono gli strumenti)

Adatti per studiare le **variazioni climatiche a breve e medio termine**

Adatti per studiare le **variazioni climatiche a lungo periodo** (fino a scale geologiche)

- Permettono di risalire al clima in **epoche remote**
- Hanno un'incertezza **maggiore** dei dati strumentali

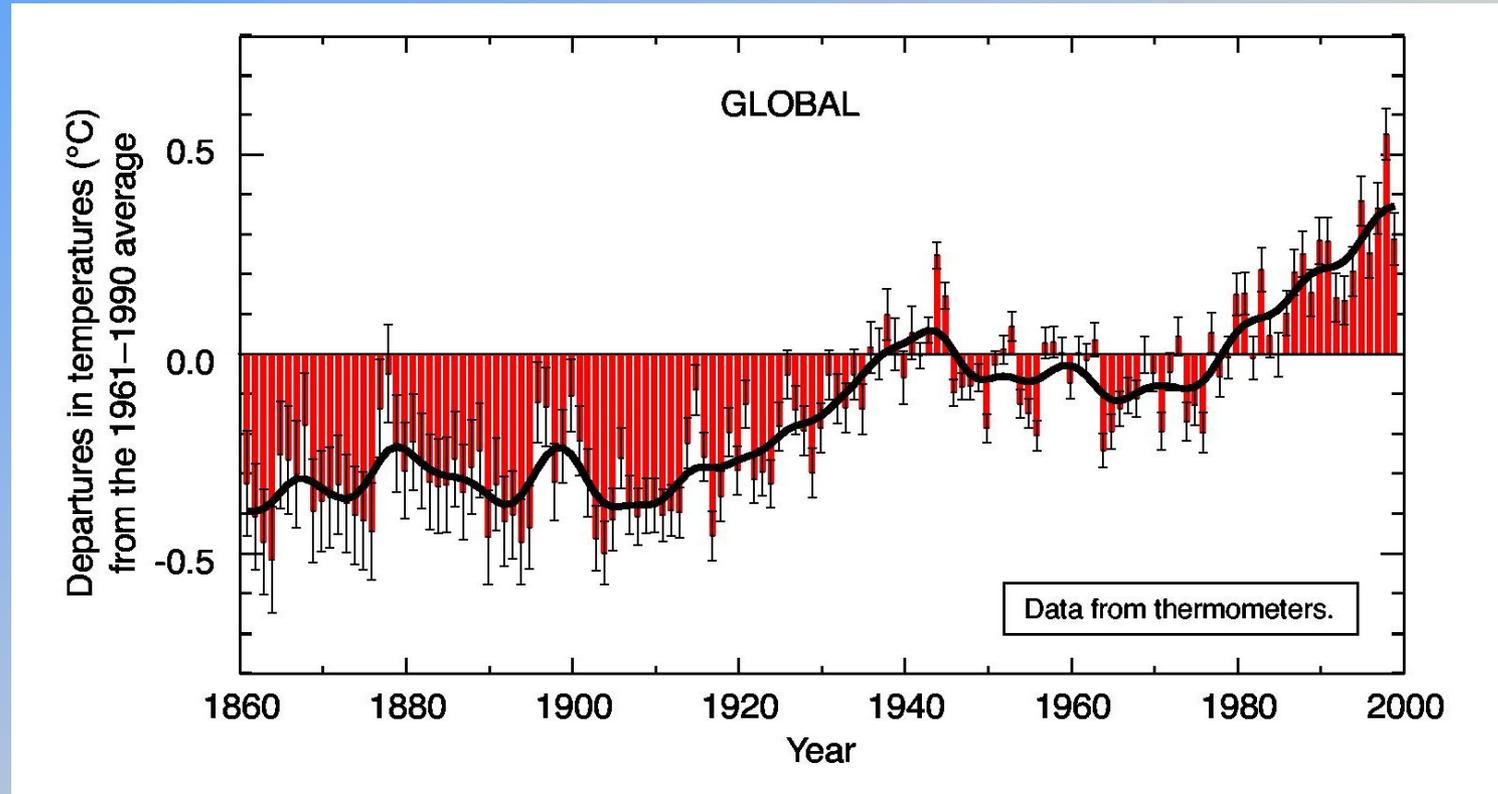
PROXY DATA





DATI STRUMENTALI

GLI ULTIMI 150 ANNI

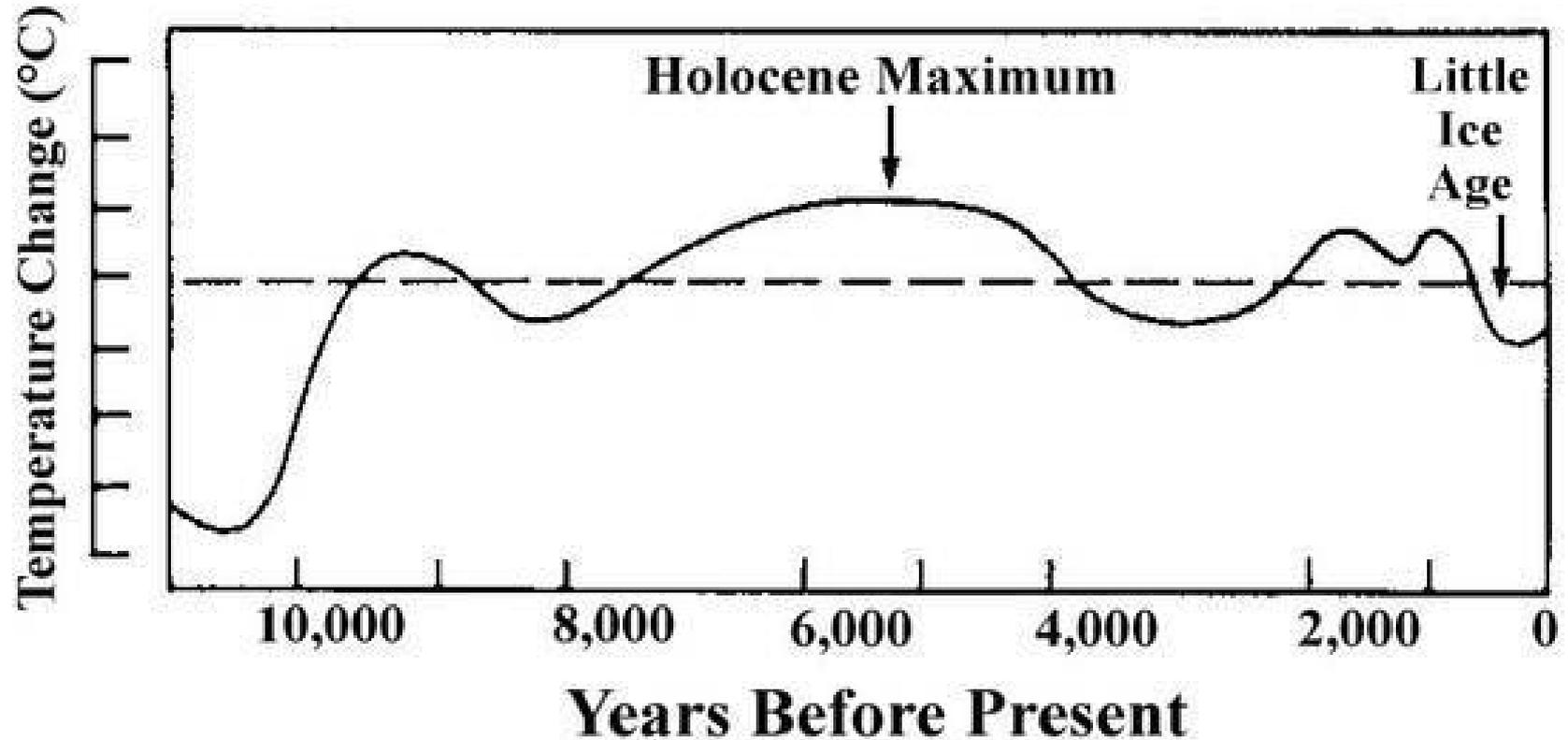


La **temperatura** media della Terra è **aumentata** di **0.6 °C** a partire **dal 1900**.



PROXY DATA

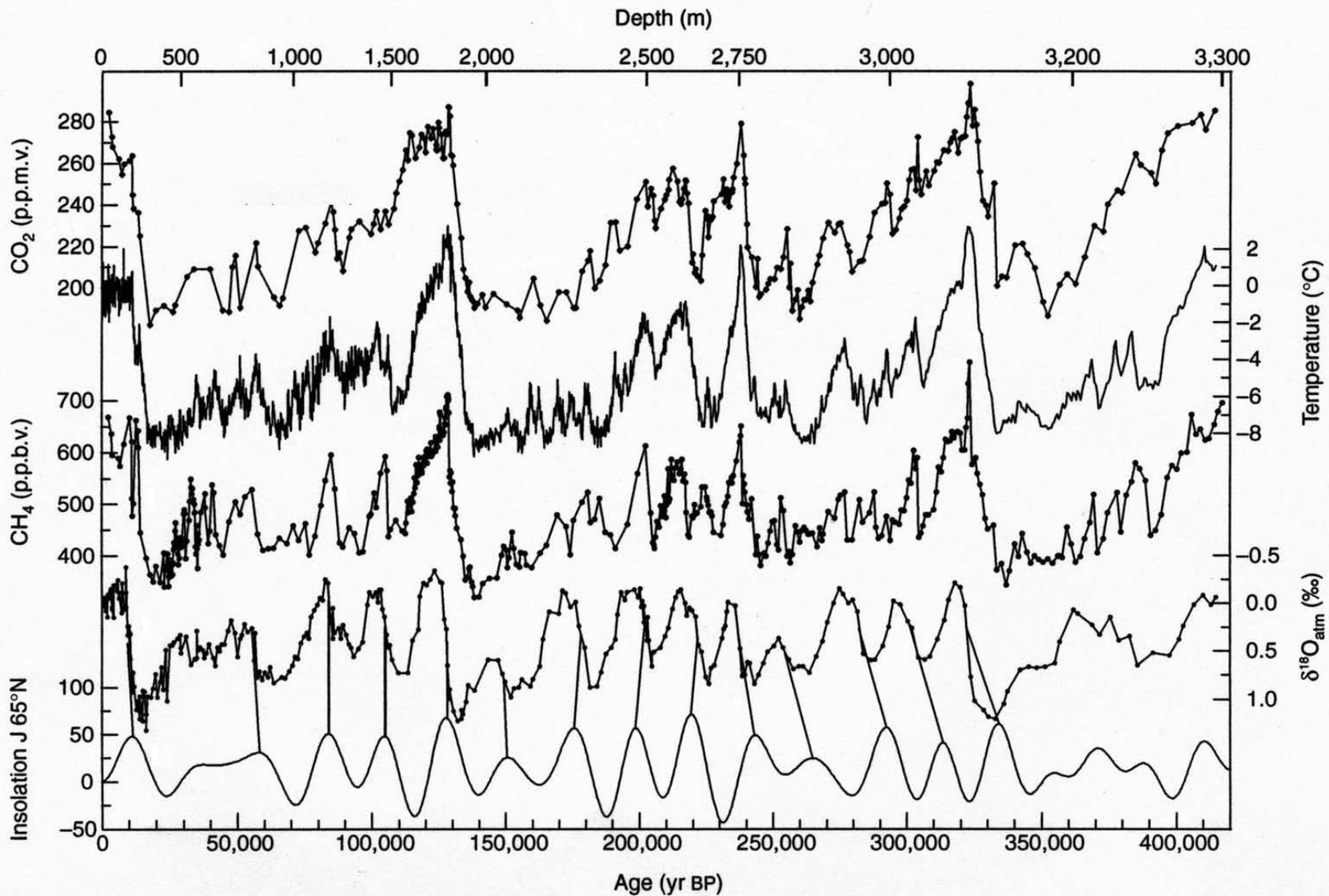
GLI ULTIMI 10.000 ANNI



- In figura, l'Optimum Medievale e la Piccola Era Glaciale. Questi due periodi corrispondono ad epoche di alta e bassa attività solare rispettivamente.
- Negli ultimi anni si sono raggiunte le temperature più alte del millennio.

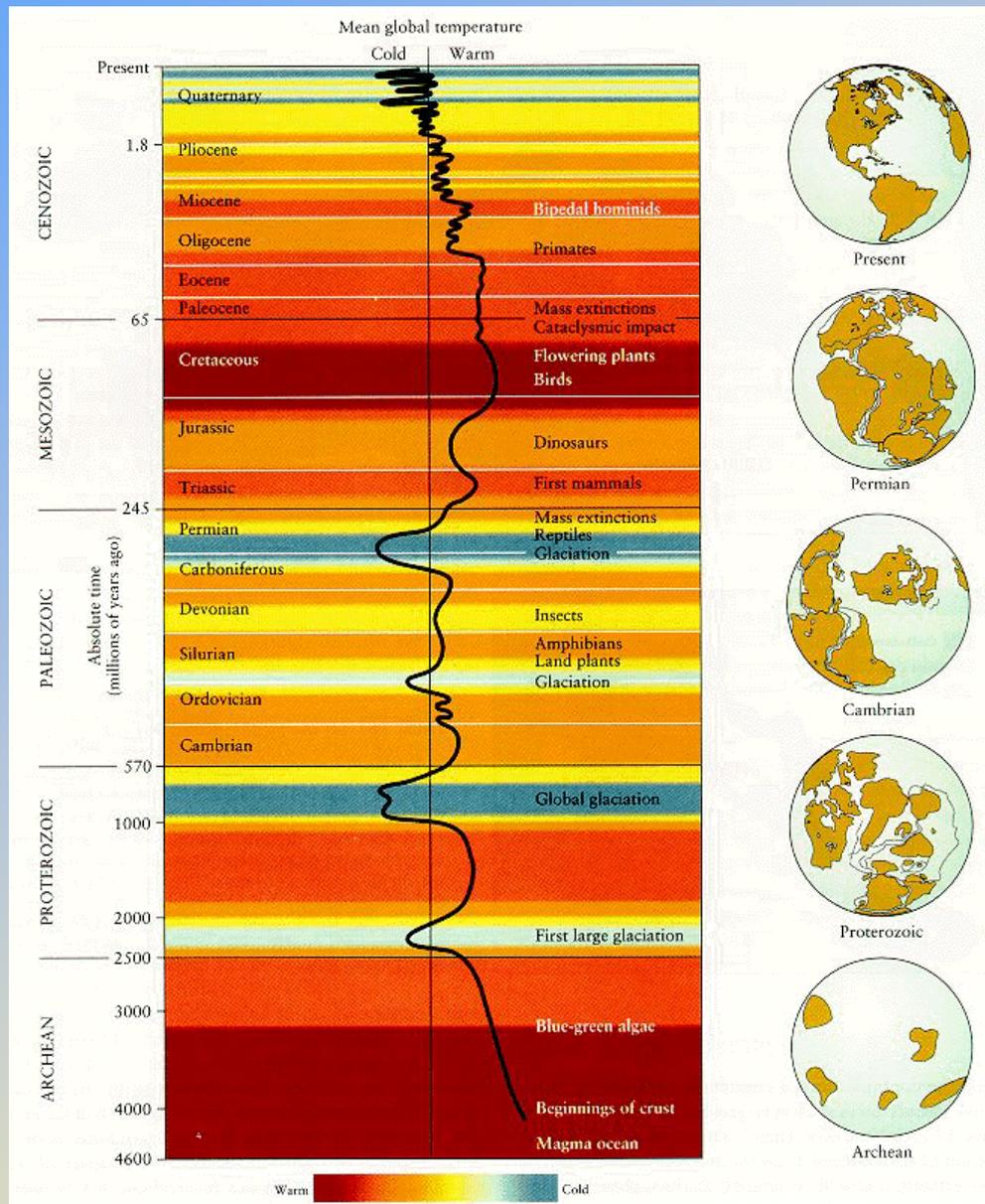


420.000 ANNI





4.5 MILIARDI (L'INTERA STORIA DEL PIANETA)





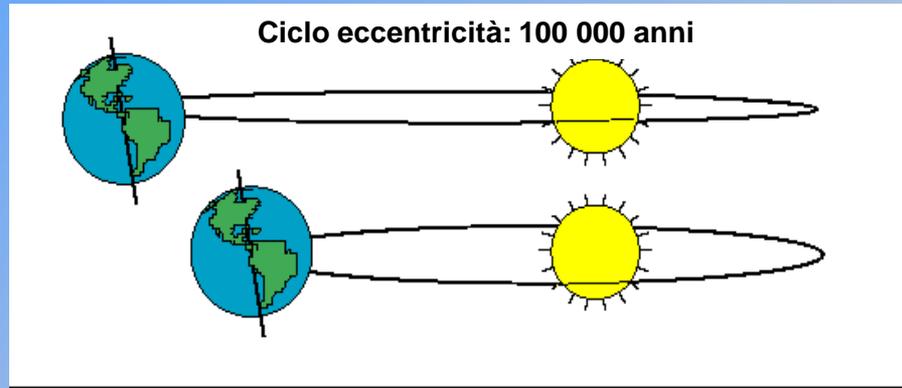
PROCESSI ASTRONOMICI (TEORIA DI MILANKOVITCH)



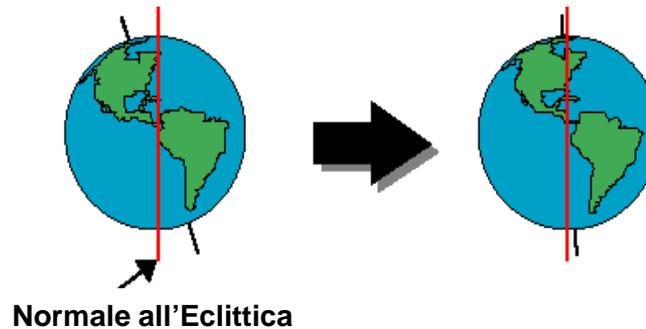
ECCEMTRICITÀ

L'attrazione gravitazionale della Terra con gli altri pianeti causa variazioni nell'eccentricità dell'orbita con un periodo di **100.000 anni**.

La Terra si allontana e avvicina al Sole.



Ciclo inclinazione asse terrestre: 41 000 anni

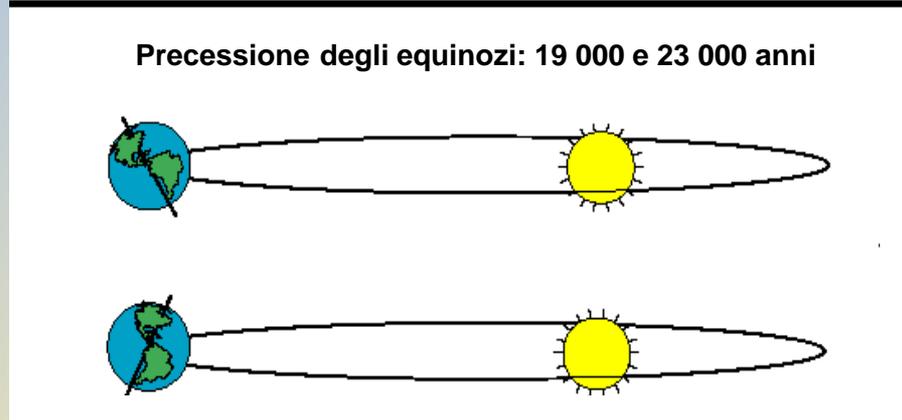


OBLIQUITÀ
L'inclinazione dell'asse terrestre rispetto all'Eclittica non è costante ma oscilla tra un massimo di 24° 20' e un minimo di 21° 55' con un periodo di circa **41.000 anni**. *Se la Terra non fosse inclinata non ci sarebbero le stagioni.*

PRECESSIONE

L'asse terrestre, descrive un cono, con vertice nel centro della Terra, in un periodo tra i **19.000 ed i 23.000 anni**.

Insomma tra circa 20.000 anni a gennaio a Bologna sarà estate. Chi vivrà vedrà!

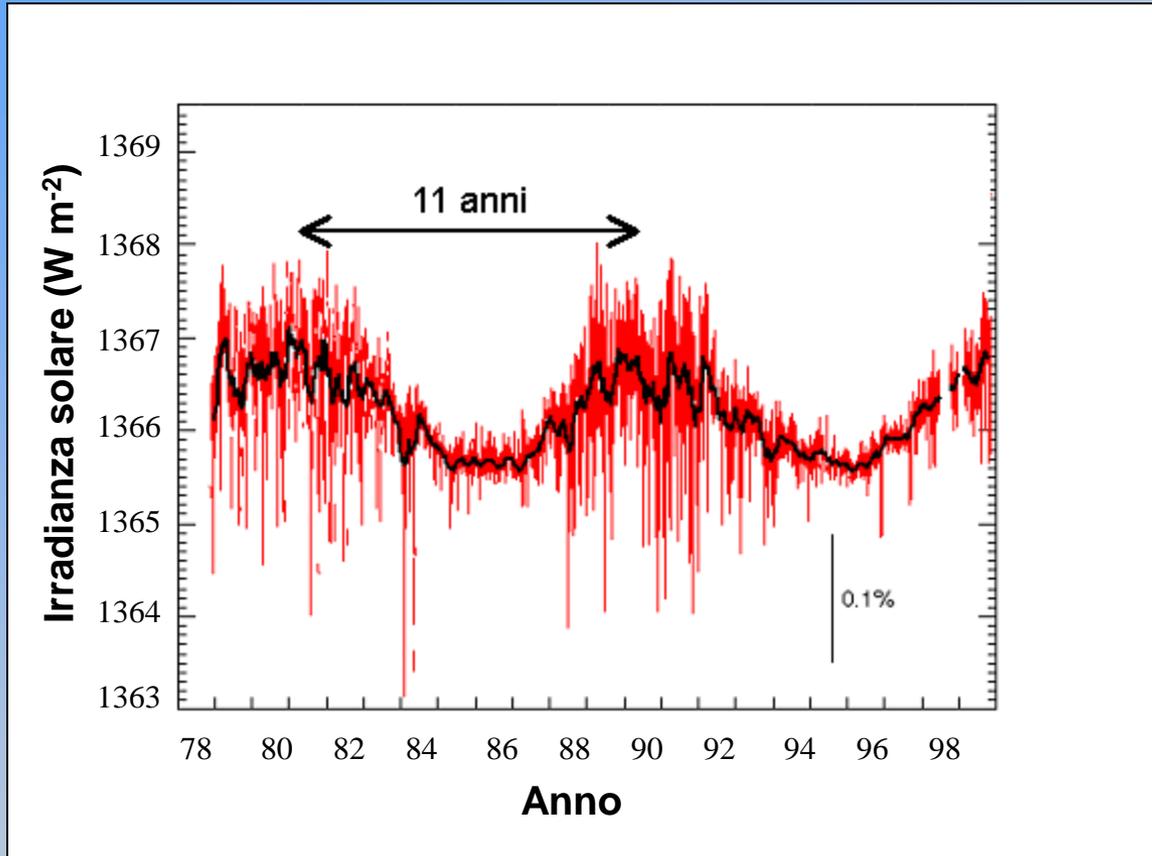




PROCESSI ASTROFISICI (variazione dell'attività solare)



L'energia che il Sole emette varia con una periodicità di circa 11 anni. Di conseguenza la radiazione che raggiunge il nostro pianeta (mediamente di 1367 W m^{-2}) presenta le stesse variazioni.



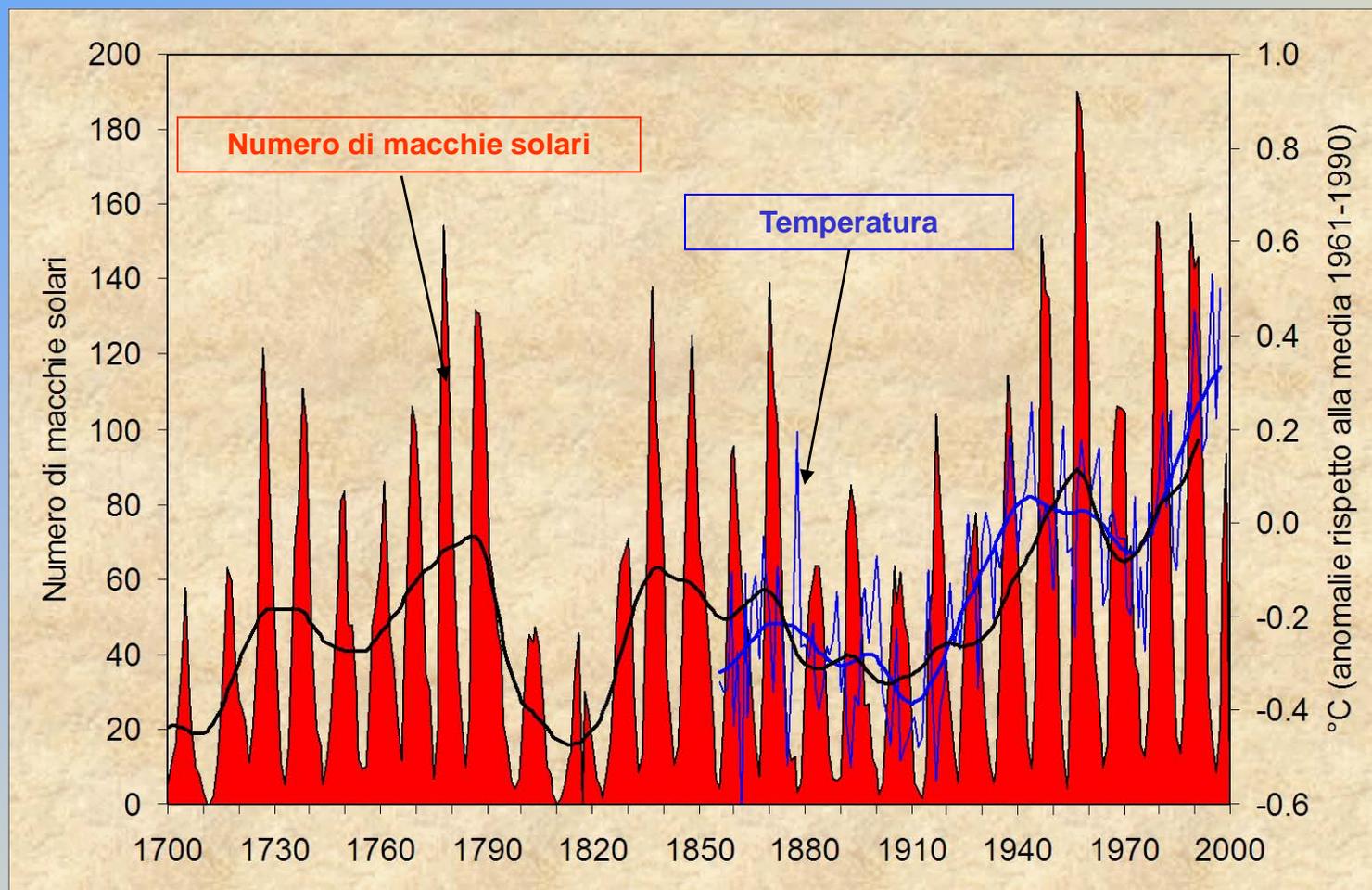
Misure dirette della radiazione solare esistono solamente dalla fine degli anni '70, cioè da quando esistono i satelliti. Quindi per ricostruire le sue variazioni si ricorre a misure indirette.

La tecnica più usata si basa sul **numero di macchie solari** (osservate fin dal XVII secolo) che si presentano in numero elevato quando l'attività solare è molto intensa, in numero molto minore quando essa è più debole.



CONFRONTO TRA L'ATTIVITÀ SOLARE E LA TEMPERATURA DELLA TERRA

Confrontando l'andamento del numero di macchie solari con quello della temperatura del nostro pianeta si notano infatti **alcune analogie**



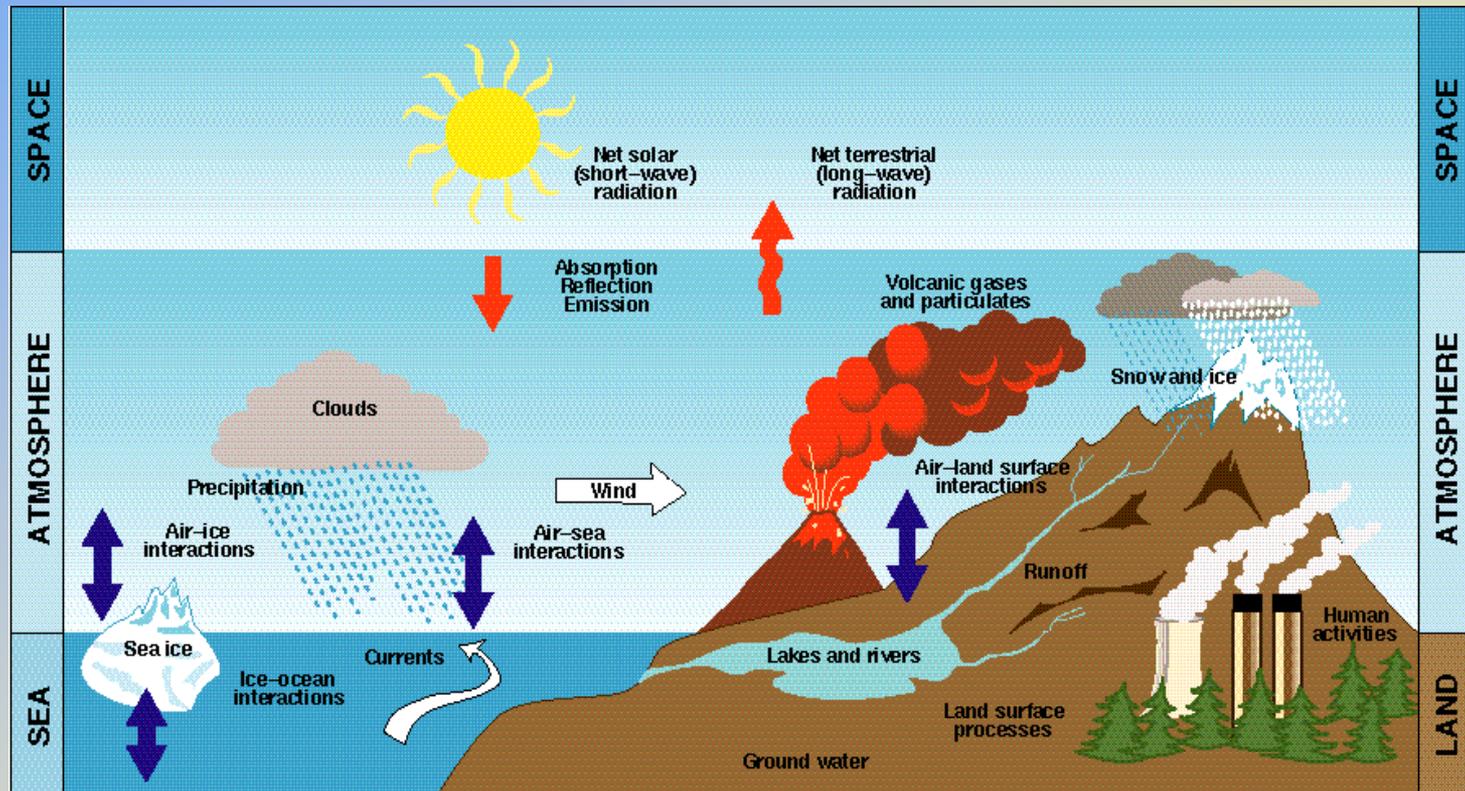


IL SISTEMA CLIMA

Dal punto di vista climatico la Terra può essere suddivisa in 5 componenti tutte interagenti tra di loro su diverse scale temporali



Bisogna poi considerare la sorgente esterna di energia costituita dal Sole





VARIAZIONI CLIMATICHE

CAUSE

NATURALI

ANTROPICHE

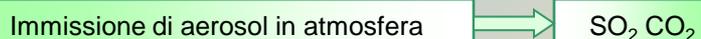
VARIAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE



INTERAZIONI TRA LE DIVERSE COMPONENTI DEL SISTEMA CLIMA

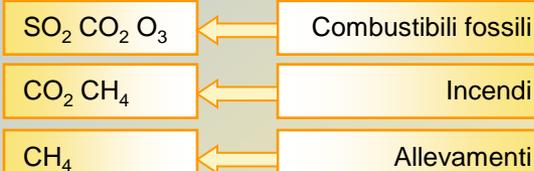


ERUZIONI VULCANICHE



DERIVA DEI CONTINENTI

IMMISSIONE DI GAS SERRA IN ATMOSFERA



BUCO DELL'OZONO

IMMISSIONE DI AEROSOL IN ATMOSFERA



SFRUTTAMENTO DEL TERRENO





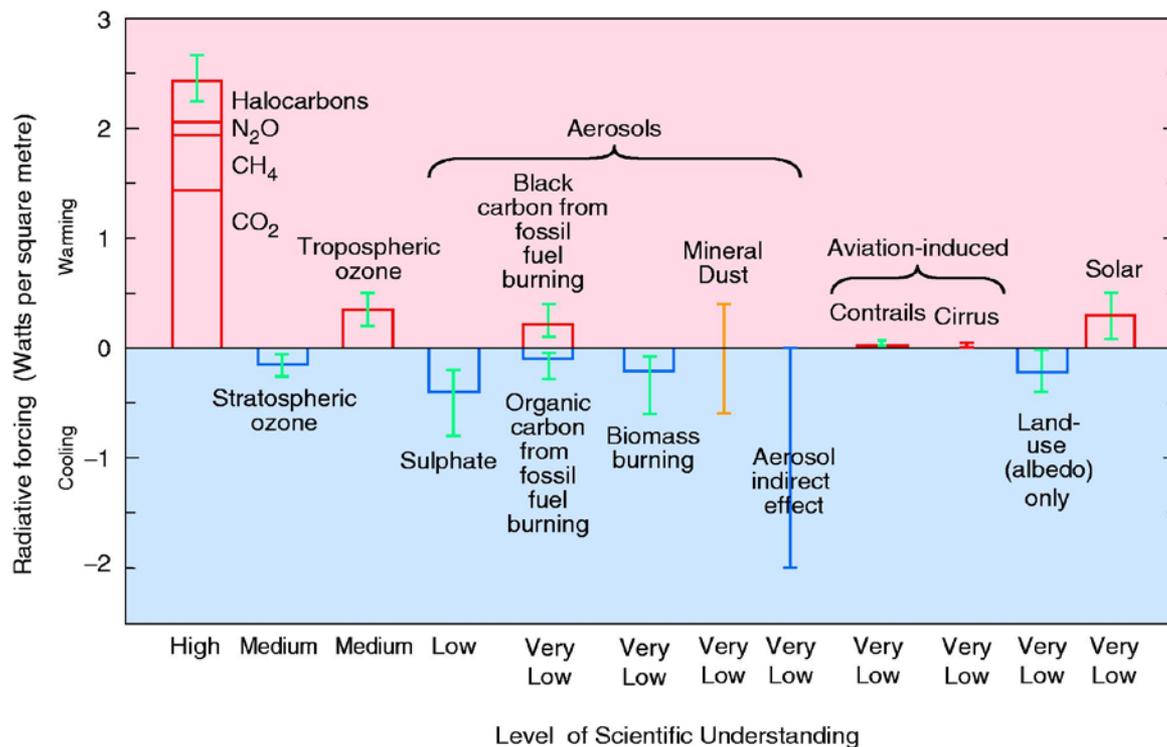
FORCING RADIATIVO

Dal 1750 al 2000:

-Il forcing radiativo dovuto alla **crescita dei gas serra** è stato stimato essere di **2.43 Wm^{-2}** (**1.46 Wm^{-2}** dalla **CO₂**; 0.48 Wm^{-2} dal **CH₄**; 0.34 Wm^{-2} dagli **halocarbon**; 0.15 Wm^{-2} dall'**N₂O**)

-Il forcing radiativo dovuto alla **riduzione dello strato di O₃** è stato stimato essere di **-0.15 Wm^{-2}** , mentre l'**aumento di O₃ troposferico** ha causato un forcing radiativo di **0.35 Wm^{-2}**

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

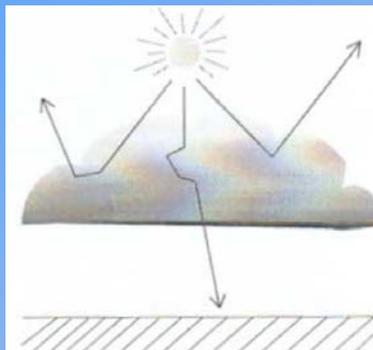


- Per quanto riguarda gli **aerosol** e le **forzanti naturali**, il loro contributo al forcing radiativo è piuttosto basso; rimane tuttavia una **grossa incertezza dovuta ad una scarsa conoscenza del fenomeno**.

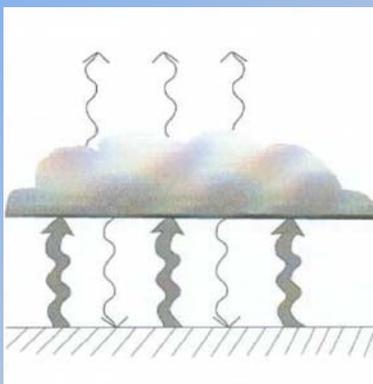


EFFETTO RADIATIVO DELLE NUBI

- Le nubi causano un incremento dell'albedo (**cloud albedo forcing**).
- Le nubi causano effetto serra (**cloud greenhouse forcing**).



- Si stima che le nubi **augmentino**, in media, il flusso uscente di **radiazione solare** di circa 48 Wm^{-2} su scala globale.

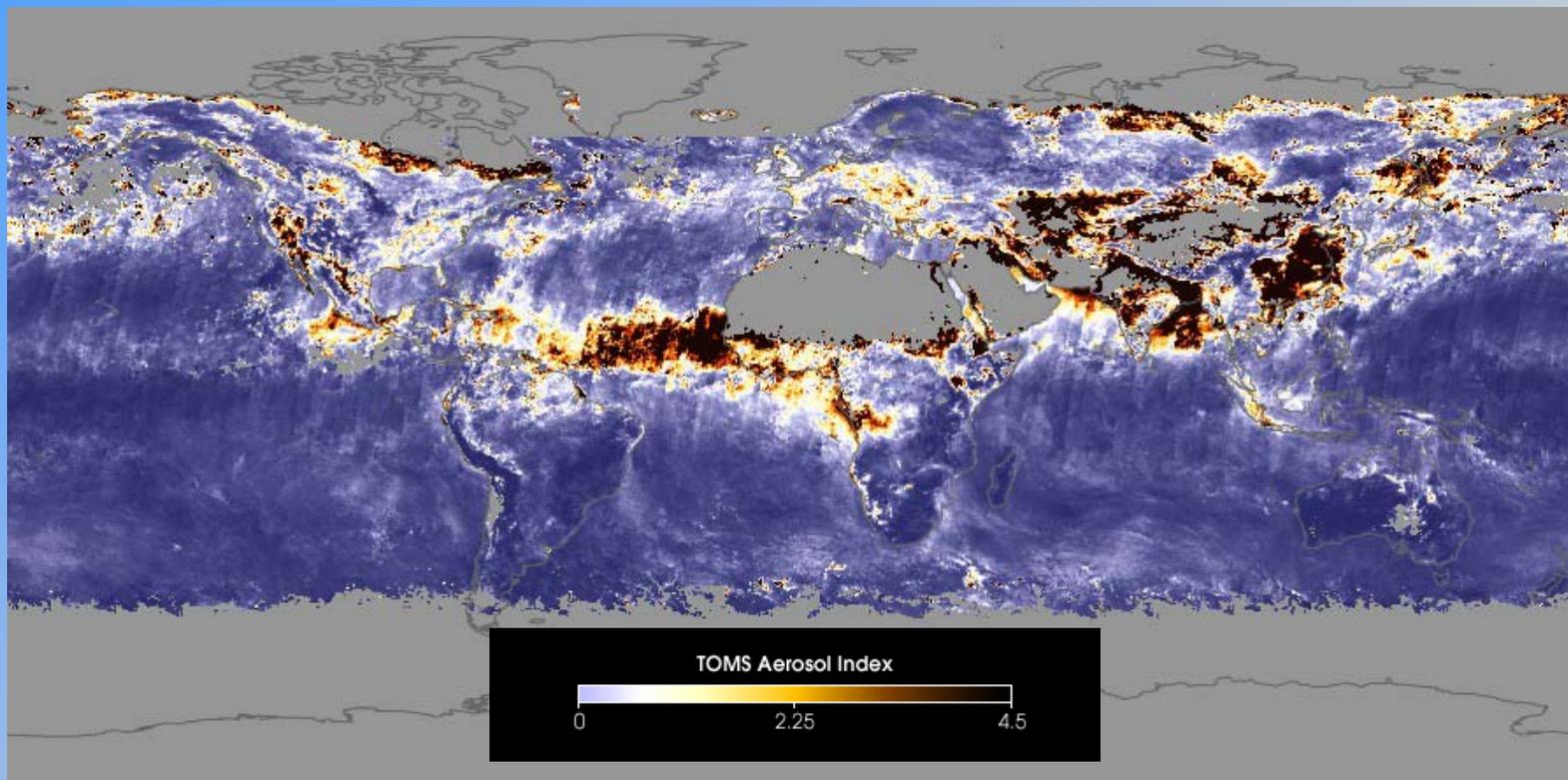


- Si stima che le nubi **diminuiscano**, in media, il flusso uscente di **radiazione infrarossa** di circa -31 Wm^{-2} su scala globale.

Quindi, l'effetto delle nubi sul **flusso radiativo netto** e' pari a di -17 Wm^{-2} , ovvero un effetto medio globale di raffreddamento dell'atmosfera.



GLI AEROSOLS



- Gli aerosols sono particelle liquide e solide sospese nell'aria.
- Essi variano largamente nello spazio e nel tempo.
- Apportano un effetto radiativo sia positivo che negativo.
- Influenzano il clima in maniera:
 - diretta, per diffusione e assorbimento della radiazione solare e terrestre.
 - indiretta, modificando le proprietà ottiche delle nubi.



EFFETTI RADIATIVI DEGLI AEROSOLS



38, 4 / REVIEWS OF GEOPHYSICS

Haywood and Boucher: ESTIMATES OF RADIATIVE FORCING • 527

Sulphate aerosols



Organic carbon and black carbon from biomass burning



Organic carbon and black carbon from fossil fuel burning



Mineral dust

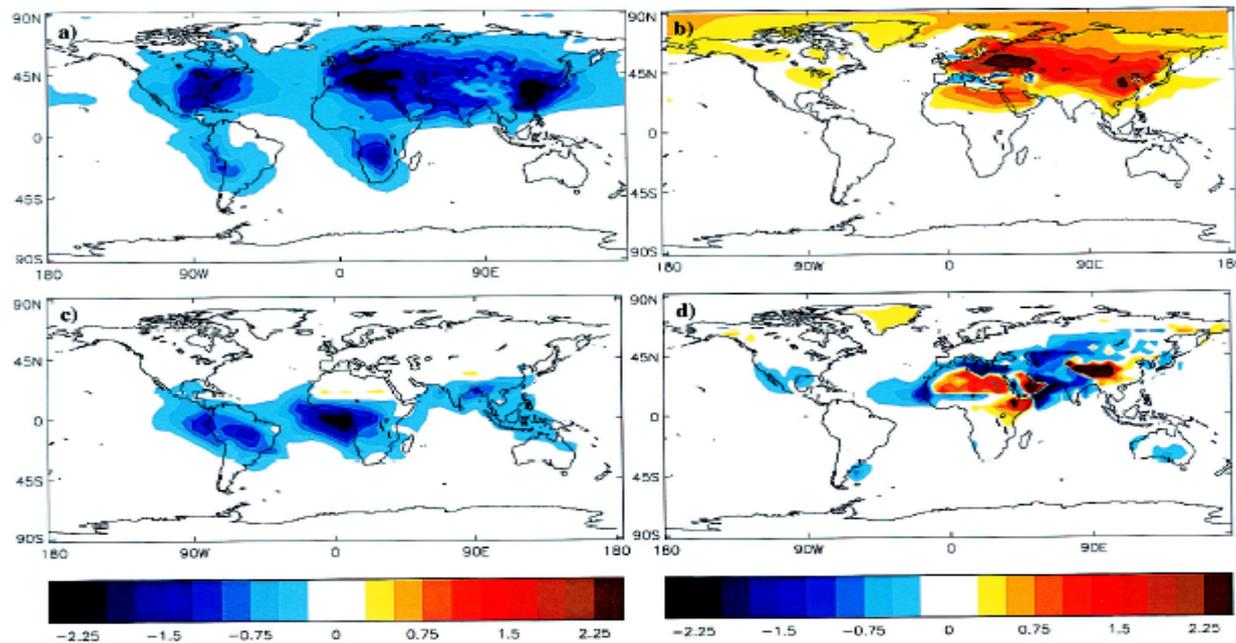
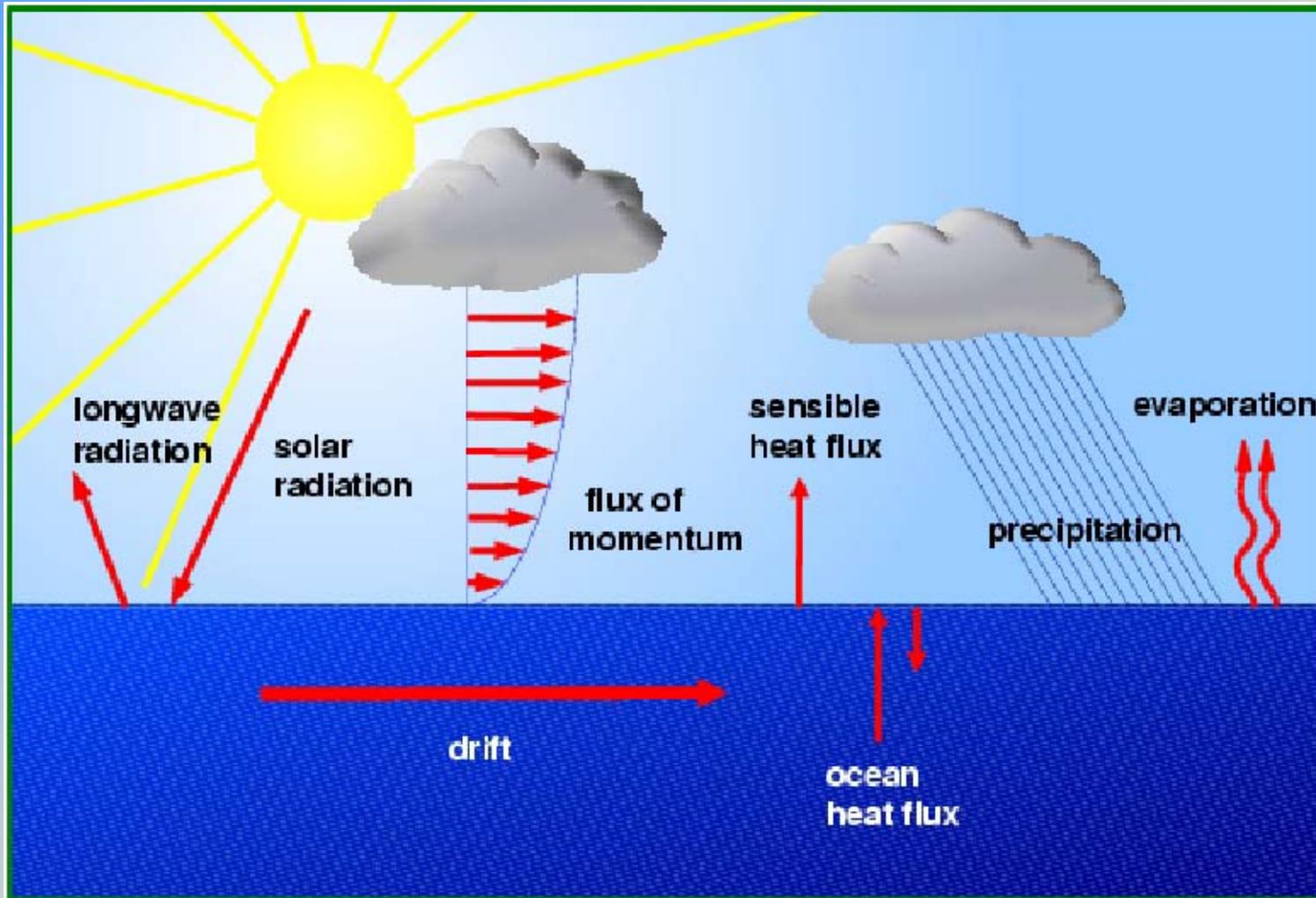


Plate 1. Examples of the radiative forcing (W m^{-2}) due to (a) the direct effect of sulphate aerosol [Haywood *et al.*, 1997a], (b) the direct effect of organic carbon and black carbon from fossil fuel burning [Penner *et al.*, 1998; Grant *et al.*, 1999], (c) the direct effect of organic carbon and black carbon from biomass burning [Penner *et al.*, 1998; Grant *et al.*, 1999], and (d) the direct effect of anthropogenic emissions of mineral dust [Tegen *et al.*, 1996]. Different modeling studies may show substantially different spatial patterns, as described in the text.



INTERAZIONE ATMOSFERA-OCEANO

L'oceano e l'atmosfera interagiscono attraverso i flussi di calore e vapore acqueo che determinano la dinamica dei due fluidi

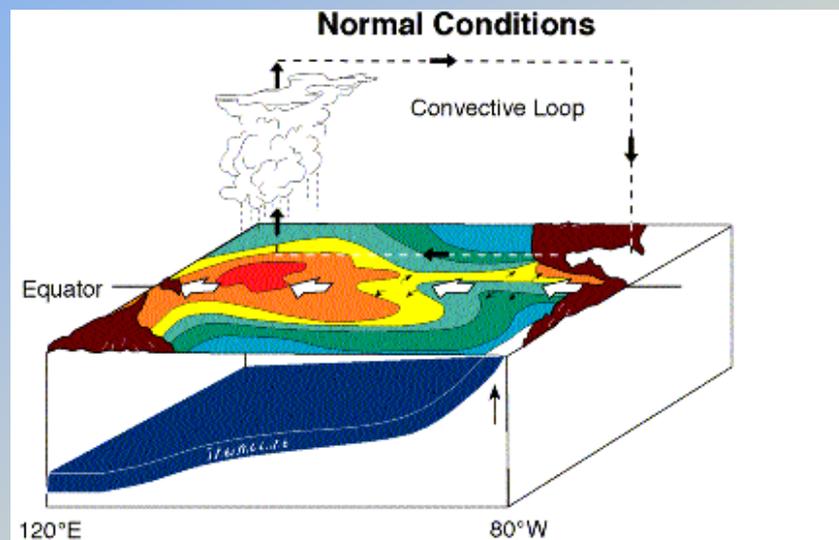




EL NIÑO – LA NIÑA

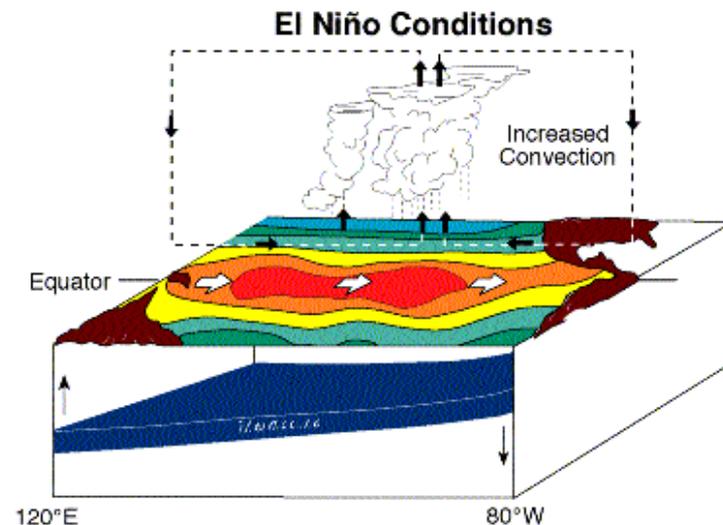
In normal, non-El Niño conditions

- Trade winds blow towards the west.
- Sea surface is about 1/2 meter higher at Indonesia than at Ecuador.
- SST is about 8 degrees C lower in the east supporting marine ecosystems fisheries.
- West Pacific regions are wet while east Pacific is relatively dry.



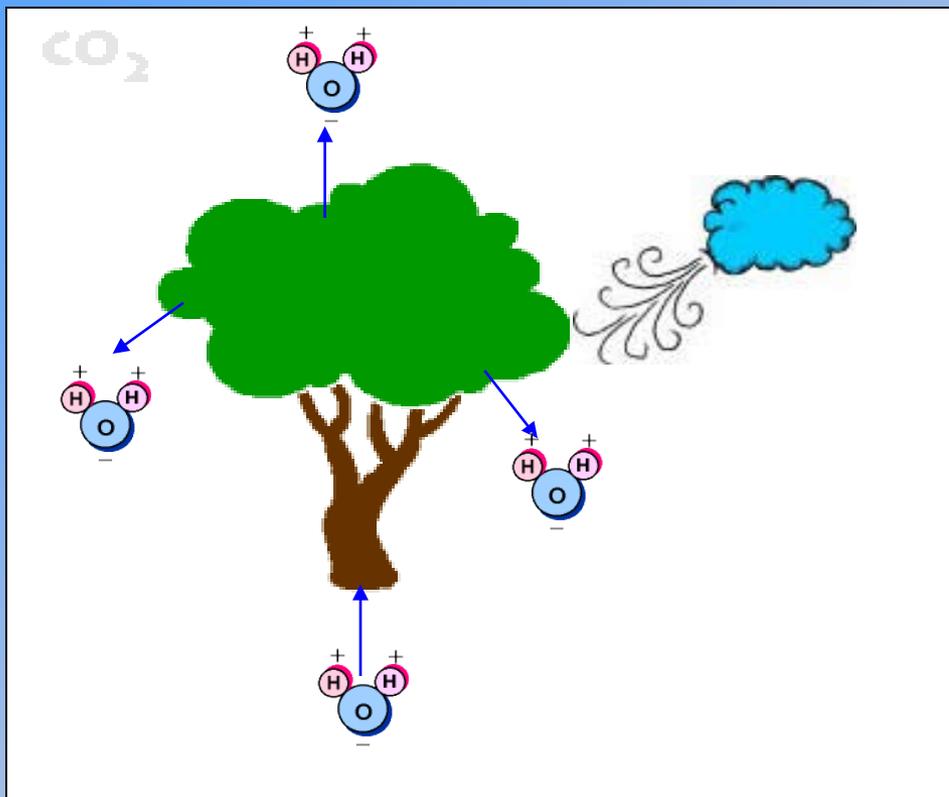
During El Niño

- Trade winds relax in the western Pacific
- Depression of the thermocline in the eastern Pacific and elevation of the thermocline in the west.
- Rise in SST and a drastic decline in primary productivity.
- Rainfall follows the warm water eastward, flooding in Peru and drought in Indonesia and Australia.
- Large changes in the global atmospheric circulation.





La vegetazione influenza il clima in diversi modi



EQUILIBRIO RADIATIVO

Il potere riflettente della vegetazione (albedo) è inferiore a quello della terreno.

FOTOSINTESI

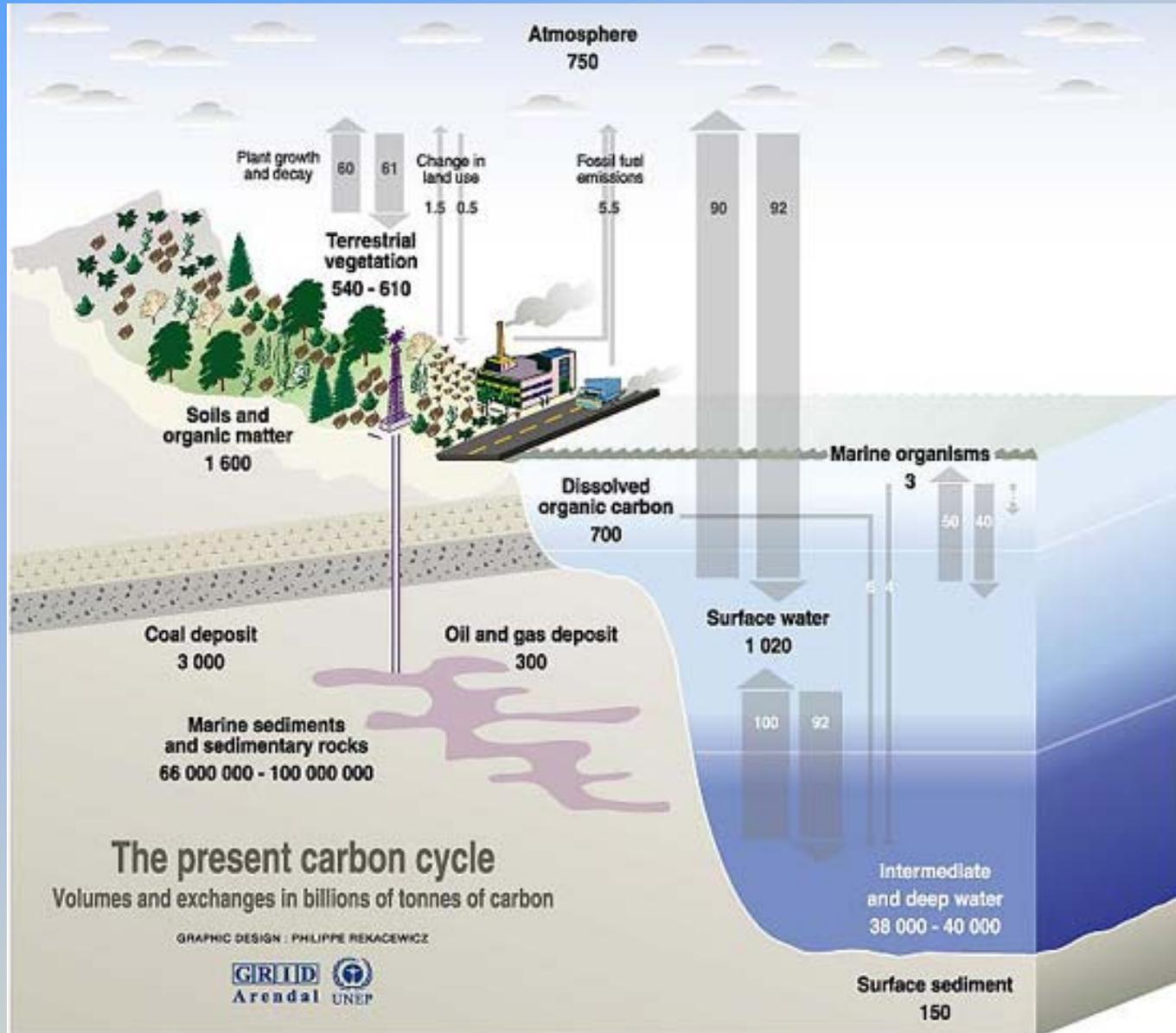
Gli alberi assorbono anidride carbonica (CO_2), trattenendo il carbonio (C) dalla molecola di CO_2 e rilasciando l'ossigeno (O_2) in atmosfera. La biosfera contribuisce alla rimozione della CO_2 dall'atmosfera.

EVAPORAZIONE

Sulle aree ricoperte da foreste si ha una maggiore evaporazione poiché le radici degli alberi assorbono acqua dal terreno e la trasferiscono all'atmosfera sotto forma di vapore.



THE CARBON CYCLE



Sources: Center for climatic research, Institute for environmental studies, university of Wisconsin at Madison; Okanagan university college in Canada, Department of geography; World Watch, November-December 1998; Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge press university, 1996.



CARBON BUDGET



	1980s	1990s
Atmosphere increase	3.3 ± 0.1	3.2 ± 0.1
Emissions (fossil fuel, cement)	5.4 ± 0.3	6.3 ± 0.4
Ocean-atmosphere flux	-1.9 ± 0.6	-1.7 ± 0.5
Land atmosphere flux*	-0.2 ± 0.7	-1.4 ± 0.7
*partitioned as follows		
Land use change	1.7 (0.6 to 2.5)	NA
Residual terrestrial sink	-1.9 (-3.8 to 0.3)	NA

Global CO₂ budgets (in PgC/yr) based on intra-decadal trends in atmospheric CO₂ and O₂. Positive values are fluxes to the atmosphere; negative values represent uptake from the atmosphere. Error bars denote uncertainty ($\pm 1s$), not interannual variability, which is substantially greater.

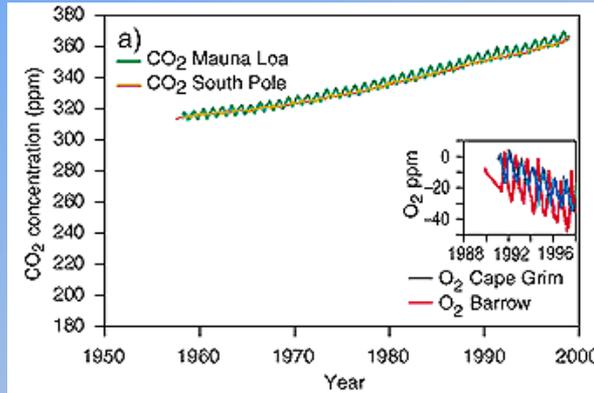


CO₂ CONCENTRATION RECORDS

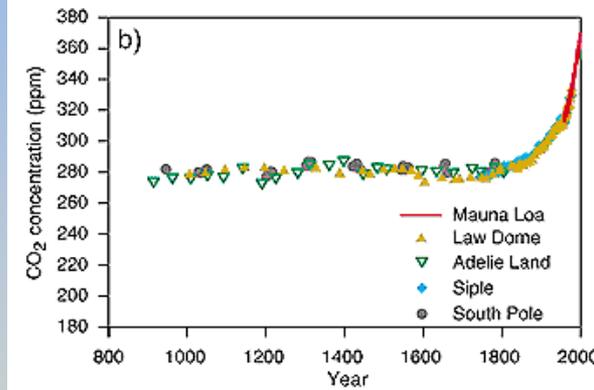


Variations in atmospheric CO₂ concentration on different time-scales.

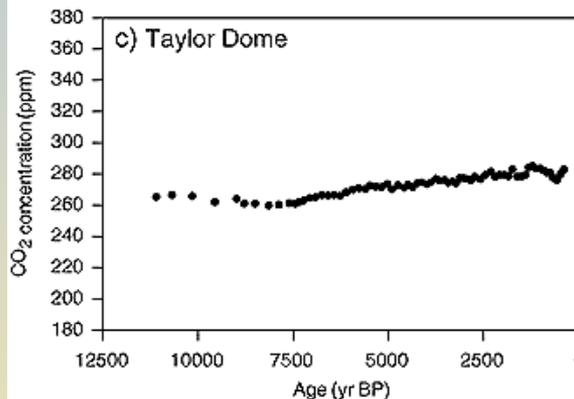
(a) Direct measurements.



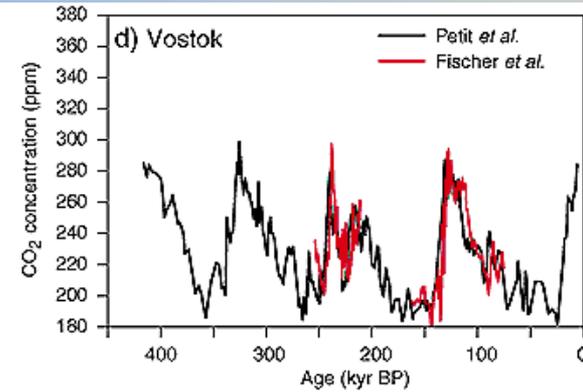
(b) Antarctic ice cores.



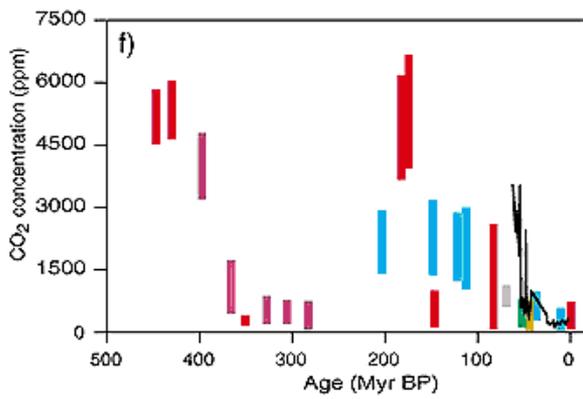
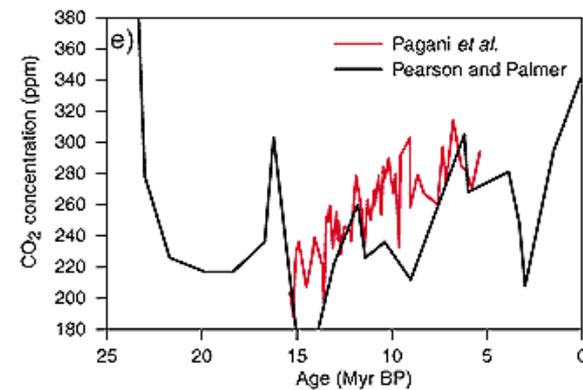
(c) Taylor Dome Antarctic ice core.



(d) Vostok Antarctic ice core.



(e, f) Geochemically inferred concentrations.





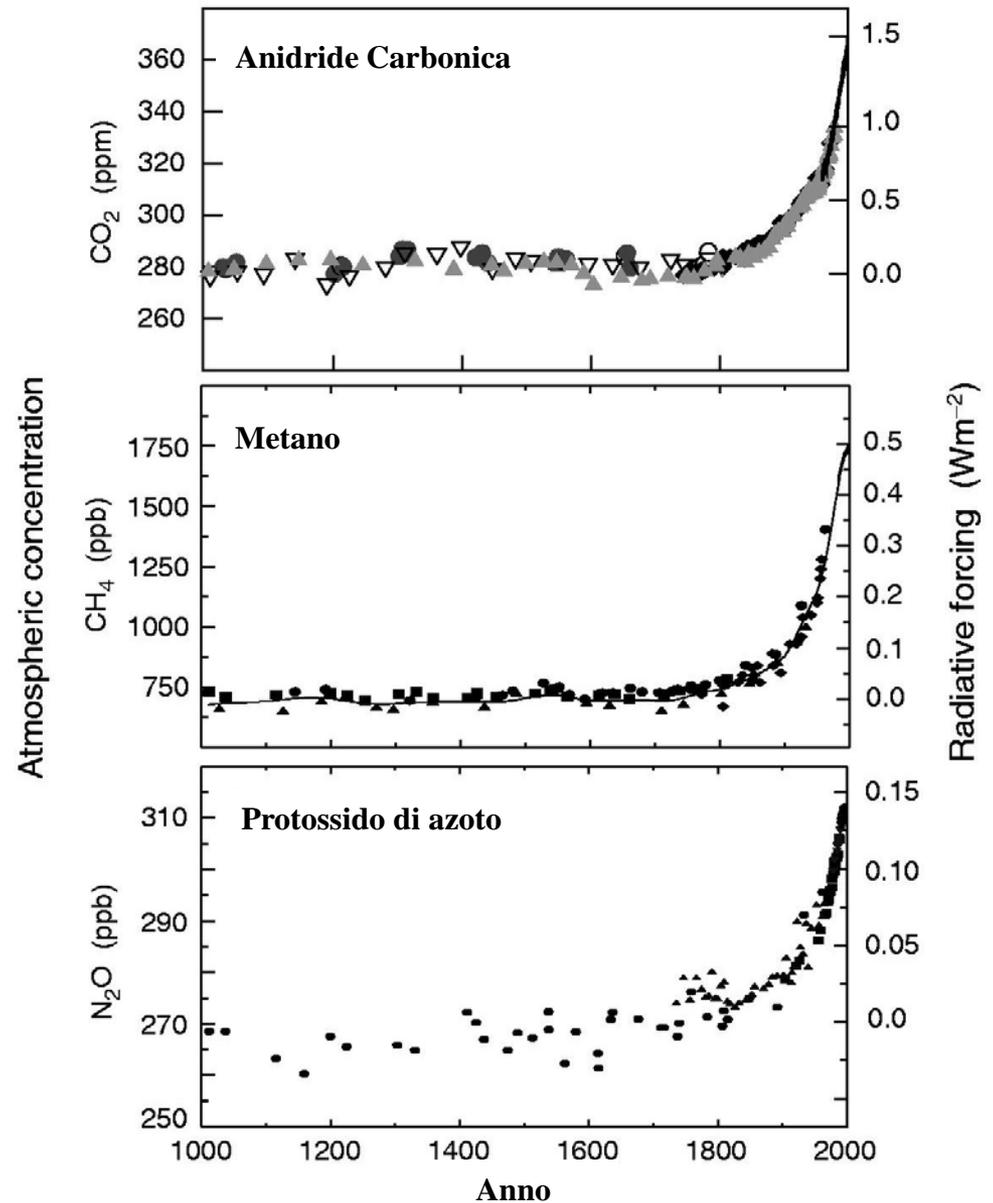
L'INFLUENZA UMANA SUL CLIMA

Dal 1750 ad oggi:

- **L'anidride carbonica (CO₂) è aumentata del 31%** e continua a salire ad un tasso di **0.4% per anno**

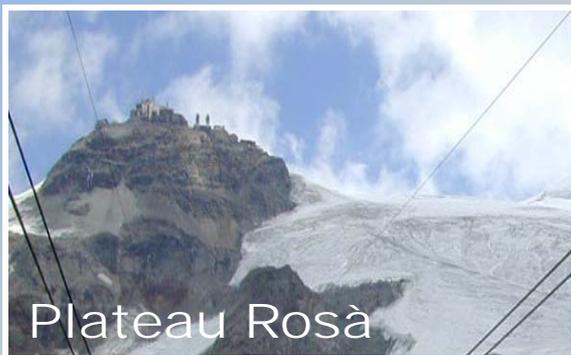
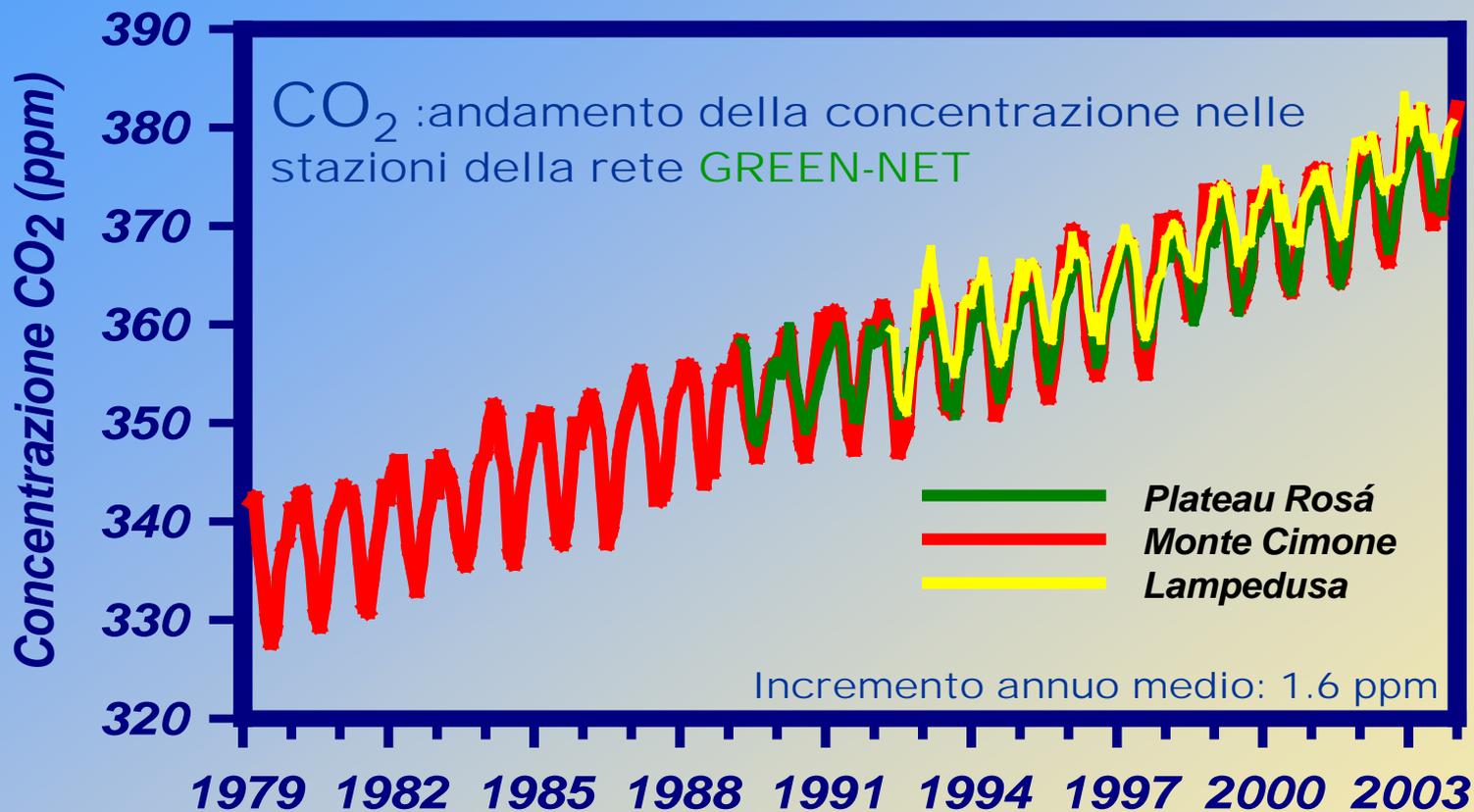
- **Il metano (CH₄) è cresciuto del 151%**; la crescita è rallentata negli anni '90 rispetto agli anni '80.

- **Il protossido di azoto (N₂O) è cresciuto del 17%**; un terzo per causa dell'attività umana.





Rete Nazionale dei Gas ad Effetto Serra



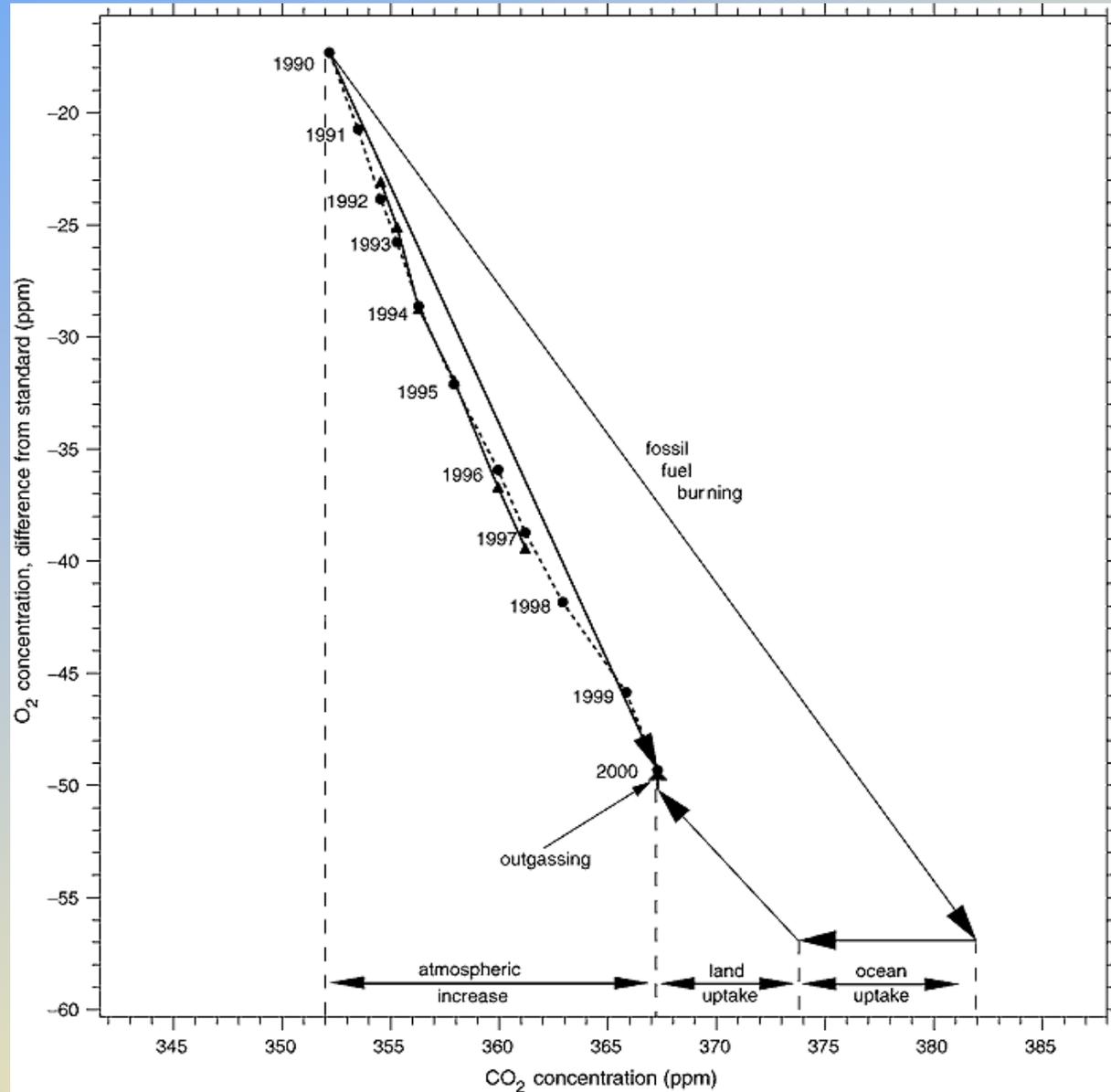


PARTITIONING OF CARBON

Relationship between changes in CO_2 (horizontal axis) and O_2 (vertical axis).

“fossil fuel burning” denotes the effect of the combustion of fossil fuels based on the relatively well known $\text{O}_2:\text{CO}_2$ stoichiometric relation of the different fuel types.

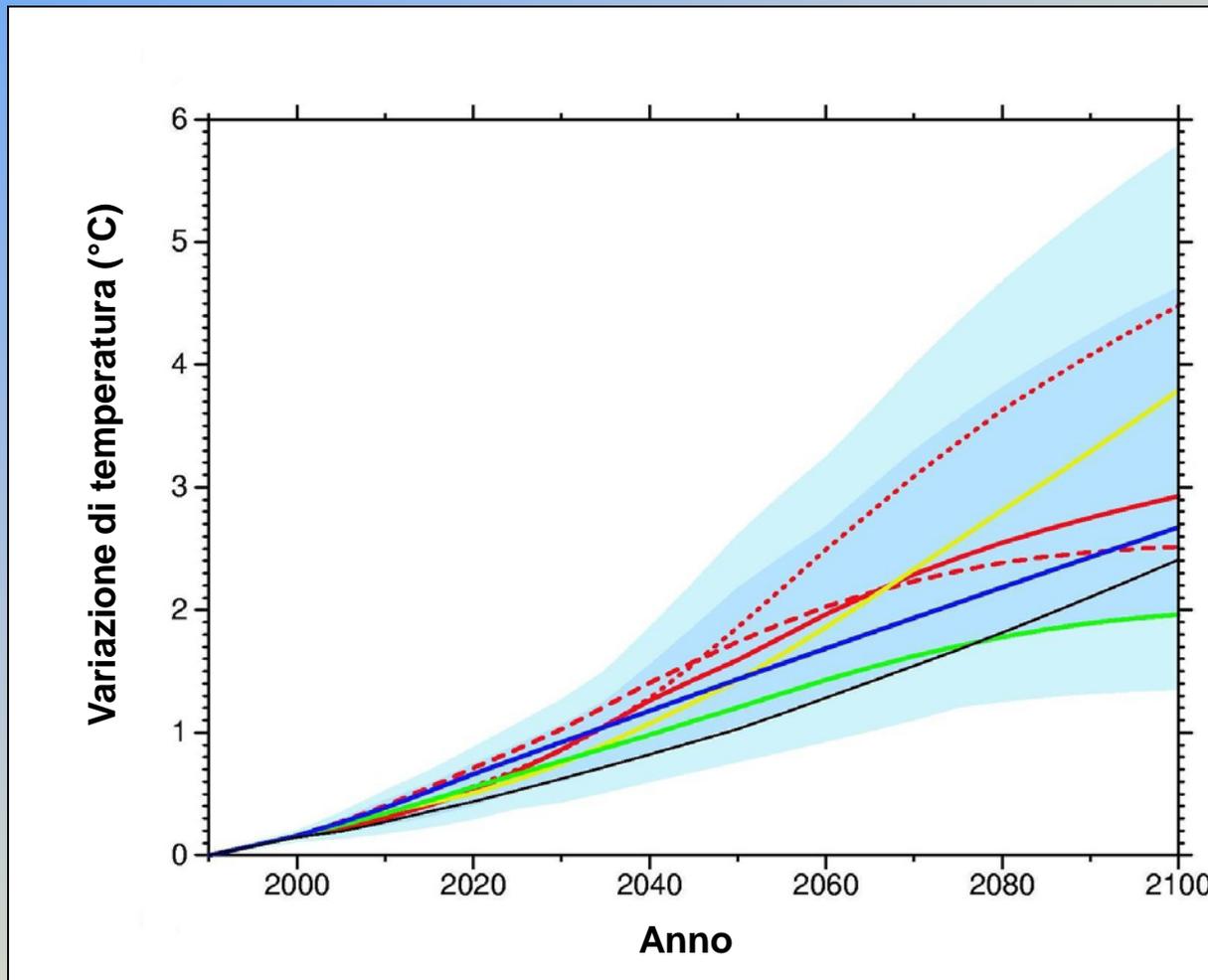
Uptake by land and ocean is constrained by the known $\text{O}_2:\text{CO}_2$ stoichiometric ratio of these processes, defining the slopes of the respective arrows.





LA TEMPERATURA TRA 100 ANNI

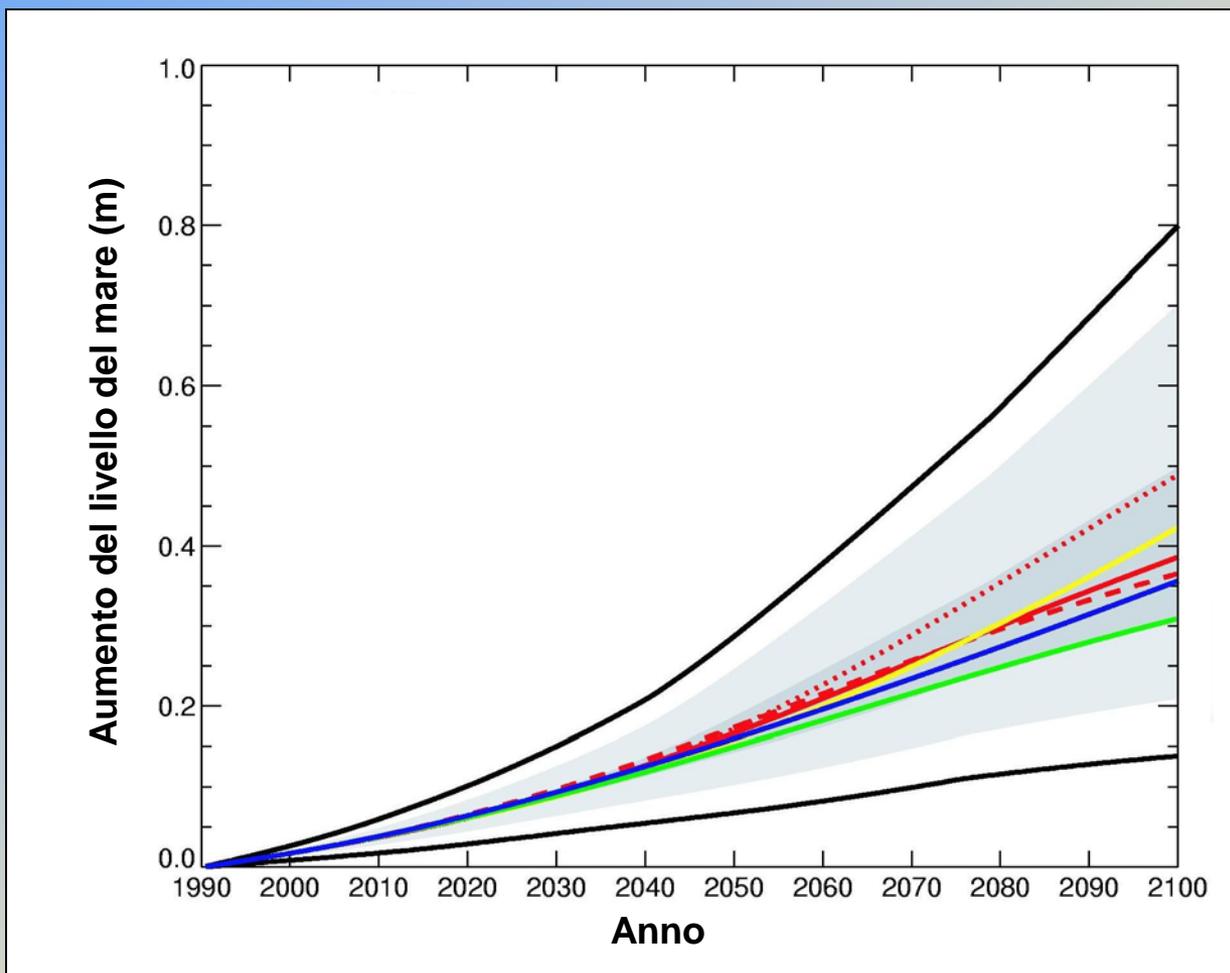
Per la **temperatura globale** si prevede una **crescita** che può variare da **1.4 a 5.8°C** nel periodo **1990-2100**





IL LIVELLO DEI MARI TRA 100 ANNI

Le proiezioni per la **variazione del livello dei mari** prevedono per il periodo 1990-2100 una **crescita** che può variare **tra 11 e 77 centimetri**, la causa principale è l'espansione termica (l'acqua aumenta di volume quando si riscalda).

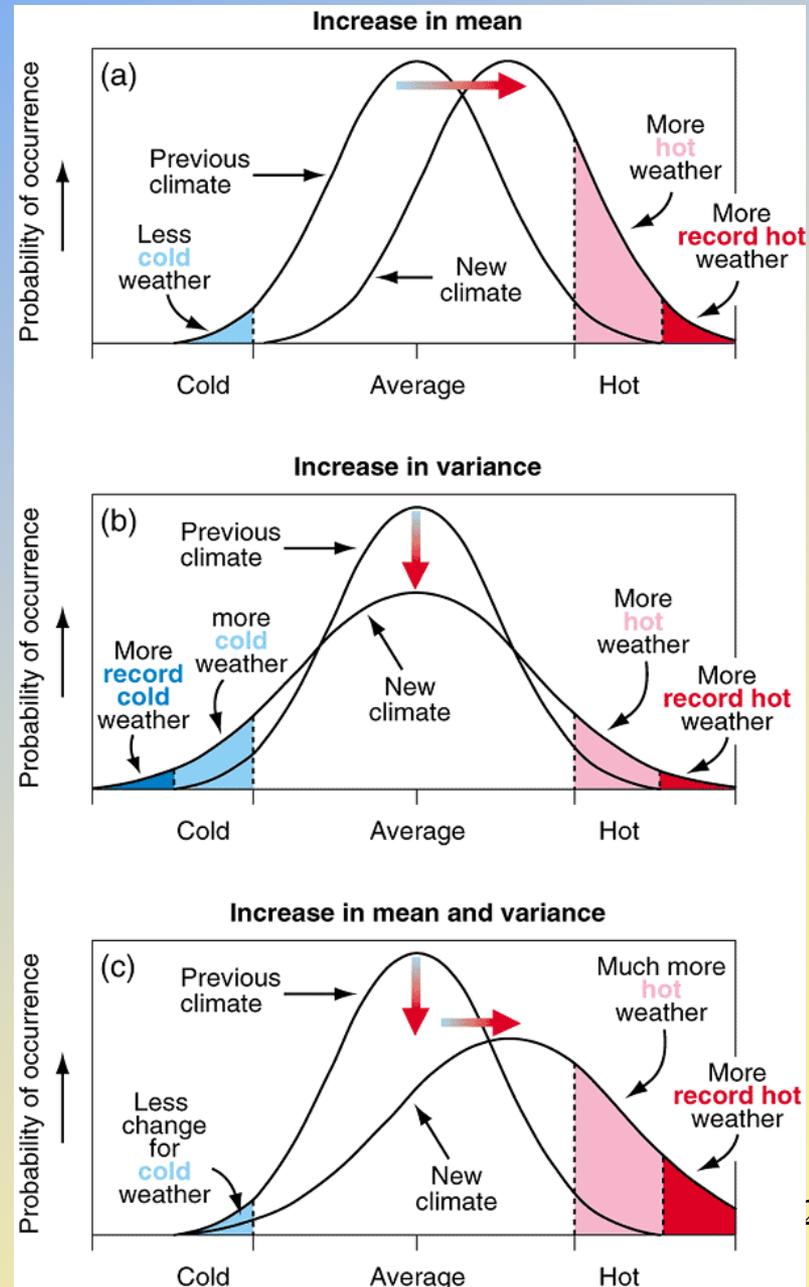




CLIMATE VARIABILITY AND MEAN STATE

The effect on extreme temperatures when:

- (a) the mean temperature increases,
- (b) the variance increases,
- (c) when both the mean and variance increase for a normal distribution of temperature.

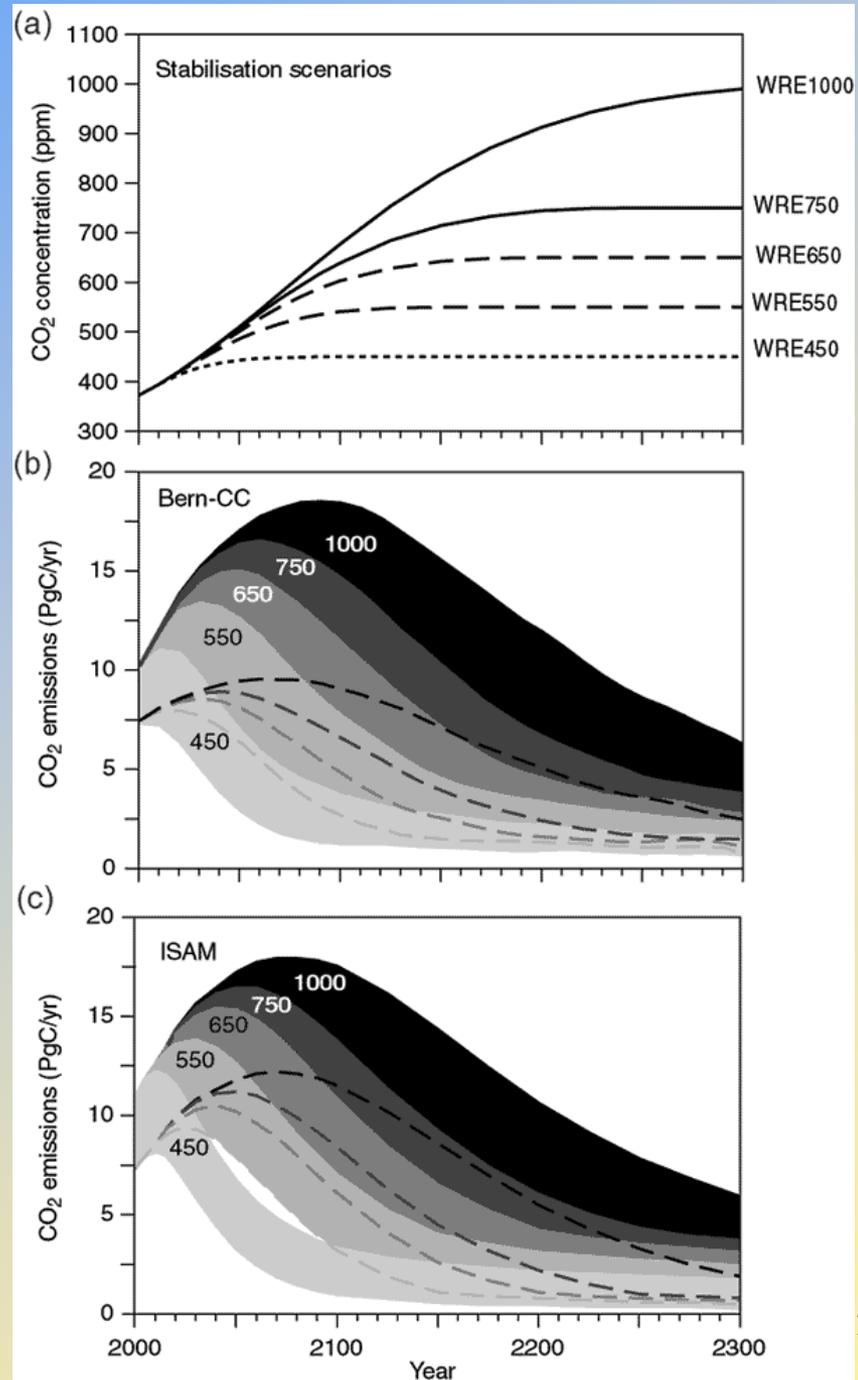




ECONOMIC EFFORT

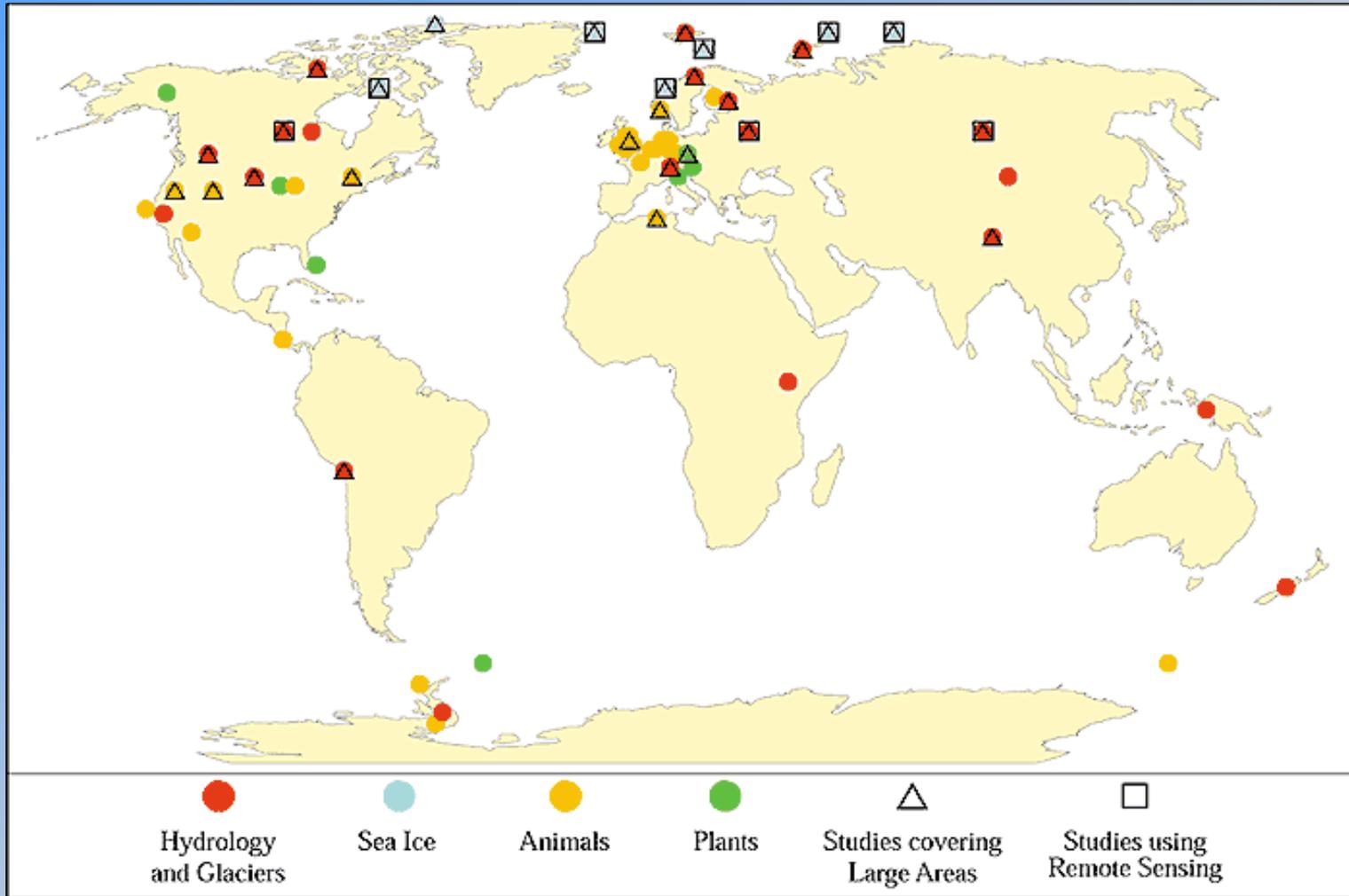
Projected CO₂ emissions permitting stabilisation of atmospheric CO₂ concentrations at different final values.

- (a) assumed trajectories of CO₂ concentration.
- (b, c) implied CO₂ emissions, as projected with two fast carbon cycle models. For each model, the upper and lower bound estimates are indicated by the top and bottom of the shaded area. Alternatively, the lower bound (where hidden) is indicated by a hatched line.





GLOBAL IMPACT



Locations at which systematic long-term studies meet stringent criteria documenting recent temperature-related regional climate change impacts on physical and biological systems.



IMPACT OF CLIMATE EVENTS / 1



Higher maximum temperatures; more hot days and heat waves^d over nearly all land areas (Very Likely^a)

- Increased incidence of death and serious illness in older age groups and urban poor
- Increased heat stress in livestock and wildlife
- Shift in tourist destinations
- Increased risk of damage to a number of crops
- Increased electric cooling demand and reduced energy supply reliability

Higher minimum temperatures; fewer cold days, frost days, and cold waves^d (Very Likely^a)

- Decreased cold-related human morbidity and mortality
- Decreased risk of damage to a number of crops, and increased risk to others
- Extended range and activity of some pest and disease vectors
- Reduced heating energy demand

More intense precipitation events (Very Likely^a over many areas)

- Increased flood, landslide, avalanche, and mudslide damage
- Increased soil erosion
- Increased flood runoff could increase recharge of some floodplain aquifers
- Increased pressure on government and private flood insurance systems and disaster relief

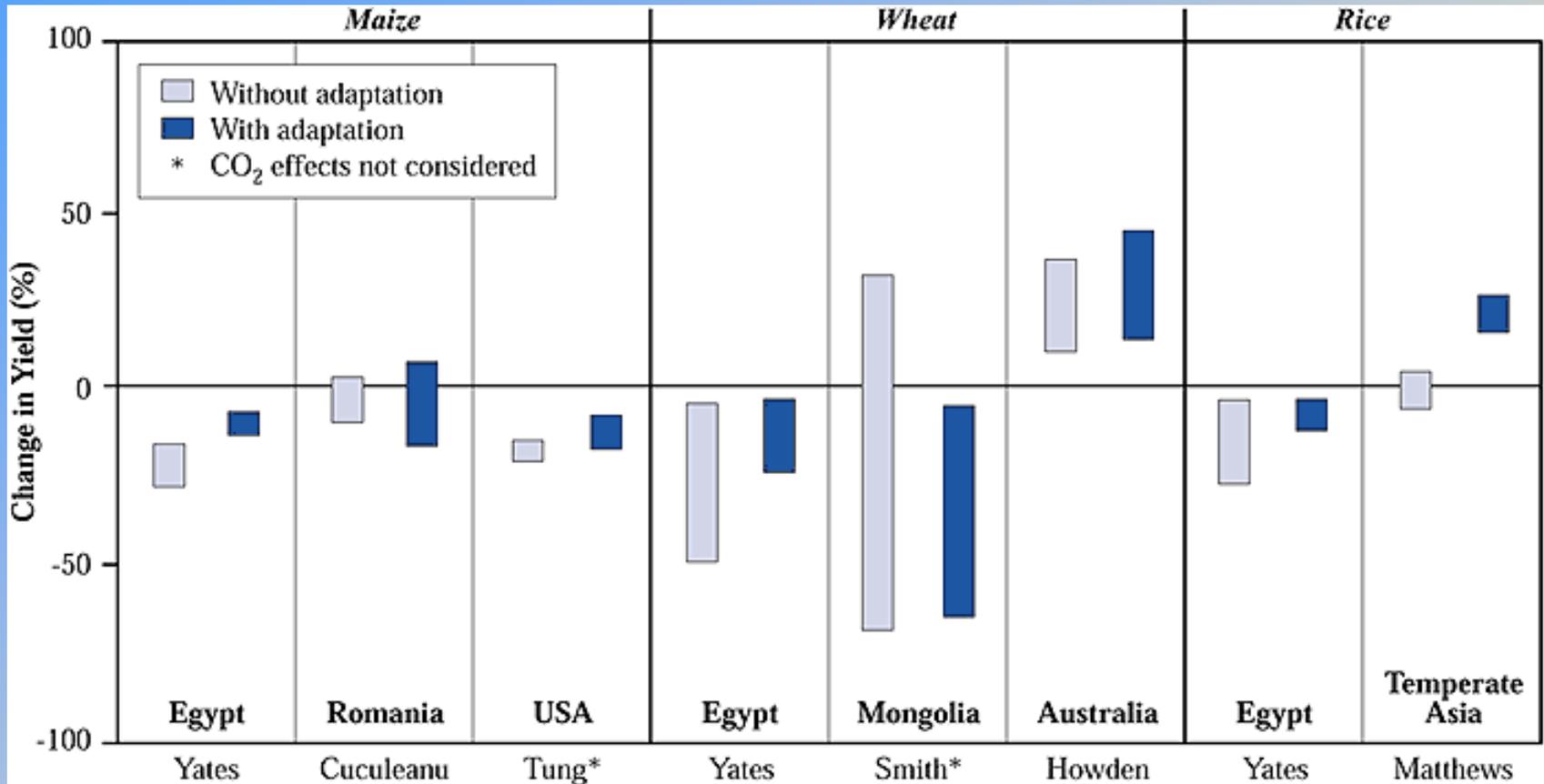


IMPACT OF CLIMATE EVENTS / 2



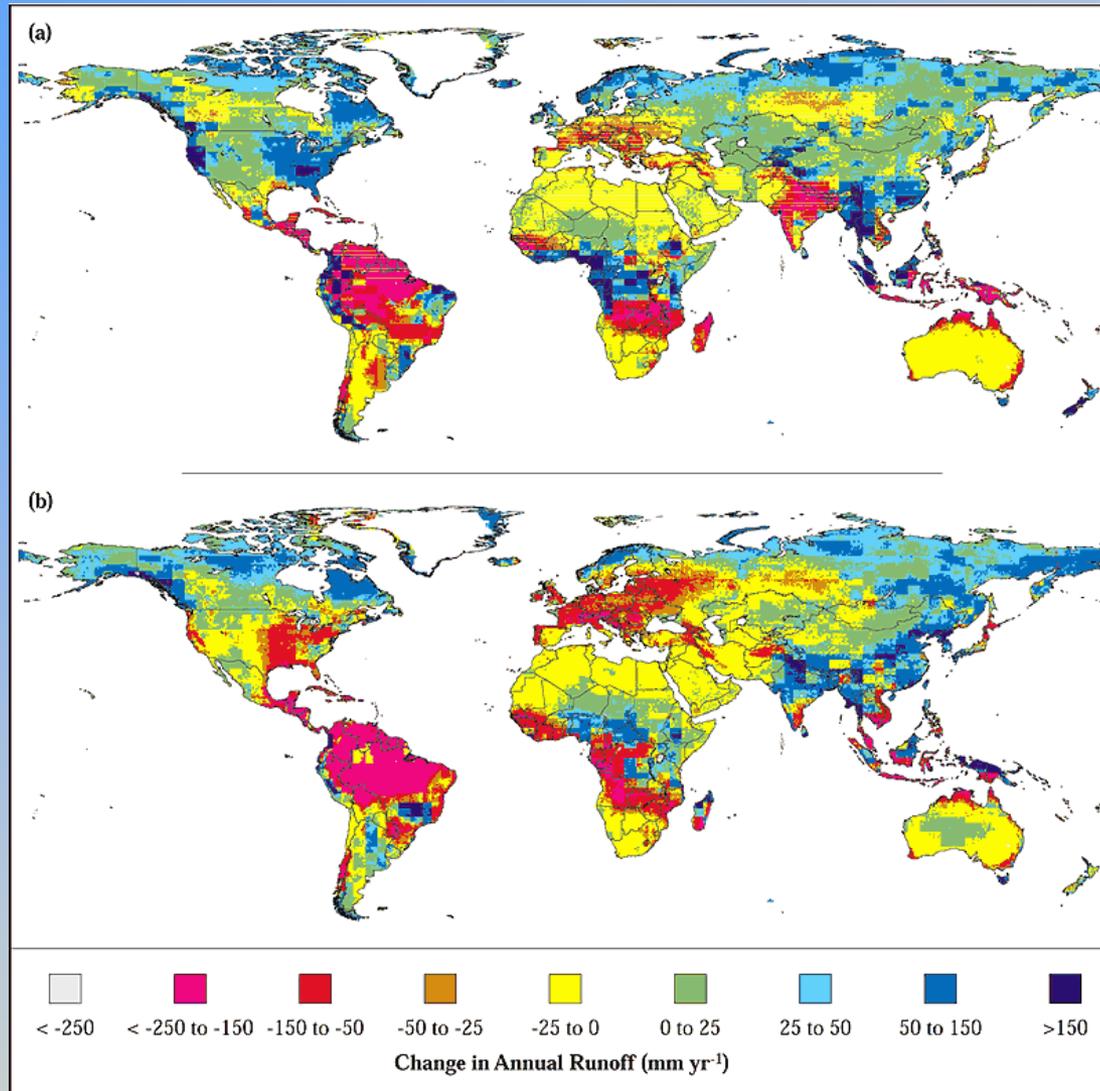
<p>Increase in tropical cyclone peak wind intensities, mean and peak precipitation intensities (Likely)</p>	<ul style="list-style-type: none">•Decreased crop yields•Increased damage to building foundations caused by ground shrinkage•Decreased water resource quantity and quality•Increased risk of forest fire
<p>Intensified droughts and floods associated with El Niño events (Likely^a)</p>	<ul style="list-style-type: none">•Decreased agricultural and rangeland productivity in drought- and flood-prone regions•Decreased hydro-power potential in drought-prone regions
<p>Increased Asian summer monsoon variability (Likely^a)</p>	<ul style="list-style-type: none">•Increased flood and drought magnitude and damages in temperate and tropical Asia
<p>Increased intensity of mid-latitude storms (little agreement)</p>	<ul style="list-style-type: none">•Increased risks to human life and health•Increased property and infrastructure losses•Increased damage to coastal ecosystems

CROP



Ranges of percentage changes in crop yields (expressed in vertical extent of vertical bars only) spanning selected climate change scenarios—with and without agronomic adaptation

RUNOFF PROJECTION



The pattern of changes in runoff largely follows the pattern of simulated changes in precipitation, which varies between climate models. Modeled increases in runoff shown for two versions of the Hadley Centre model.



FLOODS



Estimates of flood exposure and incidence for Europe's coasts in 1990 and the 2080s. Estimates of flood incidence are highly sensitive to assumed protection standard and should be interpreted in indicative terms only.

Region	<i>1990</i> Exposed Population (millions)	<i>1990</i> Average Number of People Experiencing Flooding (thousands yr⁻¹)	<i>2080s</i> Increase due to Sea-Level Rise, Assuming No Adaptation (%)
Atlantic Coast	19.0	19	50 to 9,000
Baltic Coast	1.4	1	0 to 3,000
Mediterranean Coast	4.1	3	260 to 12,000



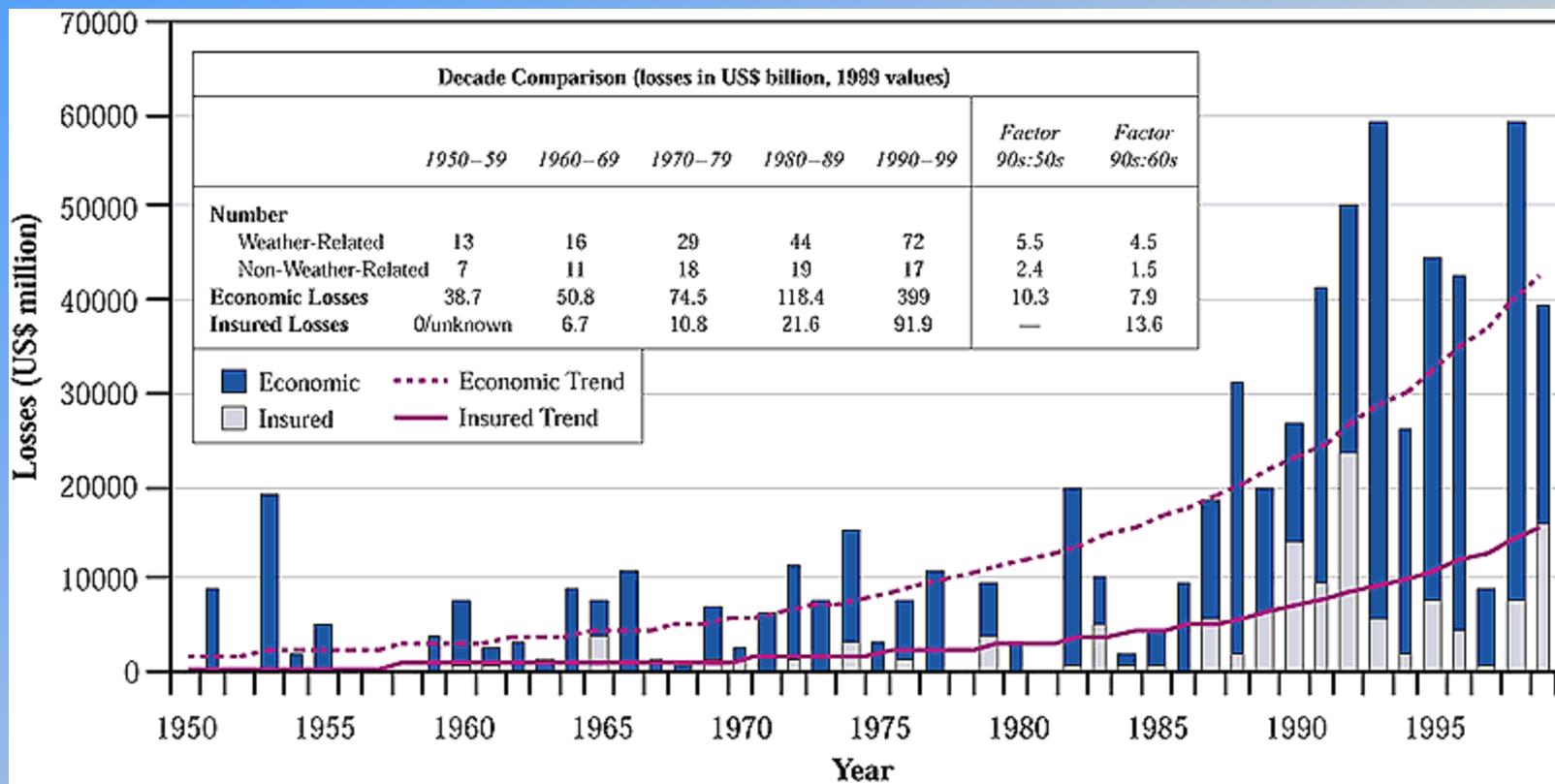
Potential land loss and population exposed



Asian countries for selected magnitudes of sea-level rise, assuming no adaptation.

Country	Sea-Level Rise (cm)	Potential Land Loss		Population Exposed	
		(km²)	(%)	(million)	(%)
Bangladesh	45	15,668	10.9	5.5	5.0
	100	29,846	20.7	14.8	13.5
India	100	5,763	0.4	7.1	0.8
Indonesia	60	34,000	1.9	2.0	1.1
Japan	50	1,412	0.4	2.9	2.3
Malaysia	100	7,000	2.1	>0.05	>0.3
Pakistan	20	1,700	0.2	n.a.	n.a.
Vietnam	100	40,000	12.1	17.1	23.1

CATASTROPHIES AND INSURANCE



The costs of catastrophic weather events have exhibited a rapid upward trend in recent decades. The insured portion of these losses rose from a negligible level to US\$9.2 billion annually during the same period, and the ratio of premiums to catastrophe losses fell by two-thirds. Notably, costs are larger by a factor of 2 when losses from ordinary, noncatastrophic weather-related events are included.



FINE



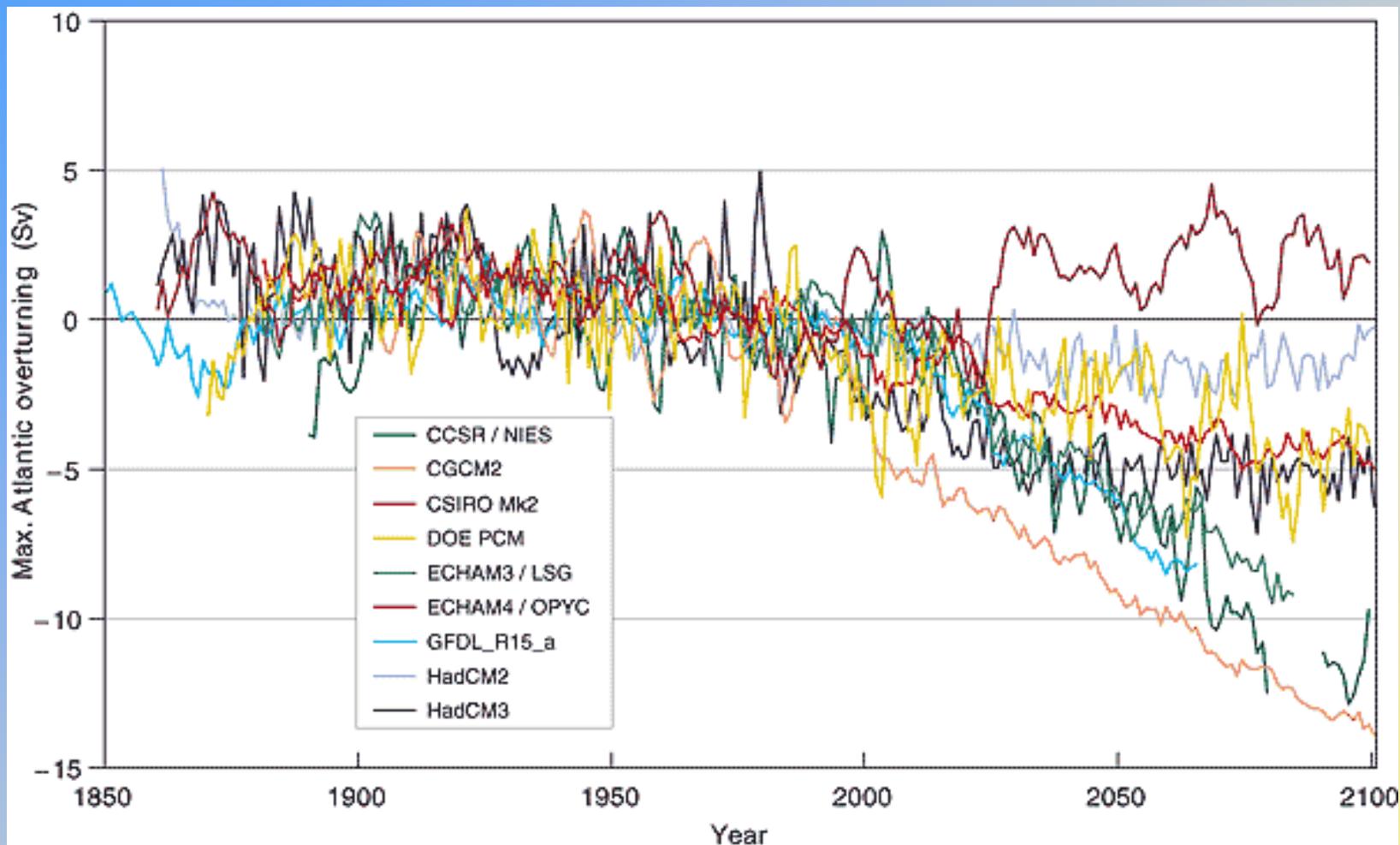
CONCLUSIONI



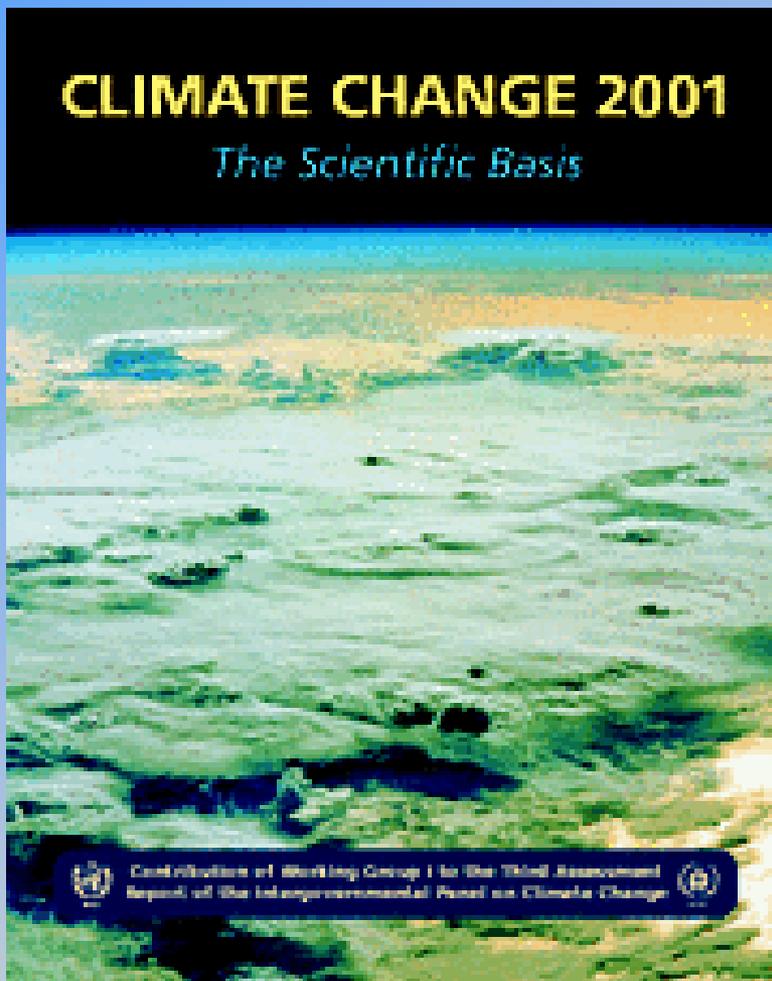
- ✓ Il clima è un sistema complesso in continua evoluzione.
- ✓ Il bilancio radiativo terrestre dipende anche dalla concentrazione in atmosfera dei gas serra (H_2O , CO_2 , O_3) e dagli aerosols.
- ✓ Il ciclo dell'acqua e del carbonio mettono in stretta relazione la componente oceanica ed atmosferica del sistema clima.
- ✓ Il cambiamento del bilancio radiativo terrestre può innescare processi a catena.
- ✓ La presenza di numerosi feedback e diverse scale temporali rende difficile prevedere i cambiamenti climatici.
- ✓ Per prevedere gli scenari futuri si utilizzano prevalentemente i modelli climatici.
- ✓ L'incertezza nelle simulazioni climatiche deriva principalmente dalla scarsa comprensione dei processi su scale non risolte dai modelli, sia nell'atmosfera (microfisica delle nubi) che nell'oceano (eddies e diffusione).



THC PROJECTION



Simulated water-volume transport change of the Atlantic “conveyor belt” (Atlantic overturning) in a range of global warming scenarios computed by different climate research centres. Relative to the annual mean of the years (1961 to 1990)



Ogni 5 anni, le **Nazioni Unite** e l'**Organizzazione Mondiale per la Meteorologia** riassumono i maggiori avanzamenti nel campo della ricerca climatica in tre volumi:

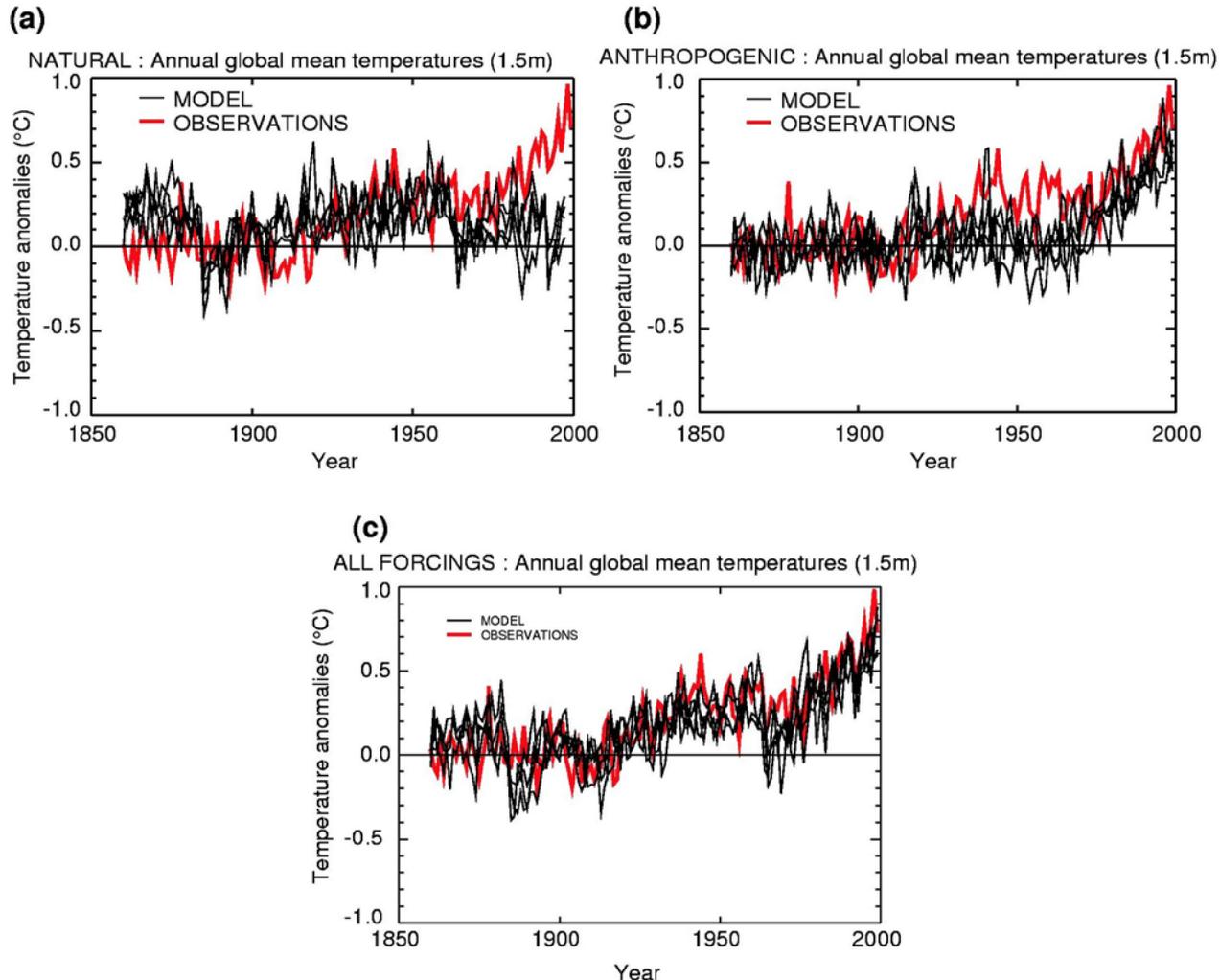
- **I progressi della scienza**
- **L'impatto e l'adattamento**
- **La mitigazione**

Inoltre viene redatta una sintesi finale che serve di **riferimento per le politiche ambientali** dei paesi industrializzati ed i paesi in via di sviluppo.



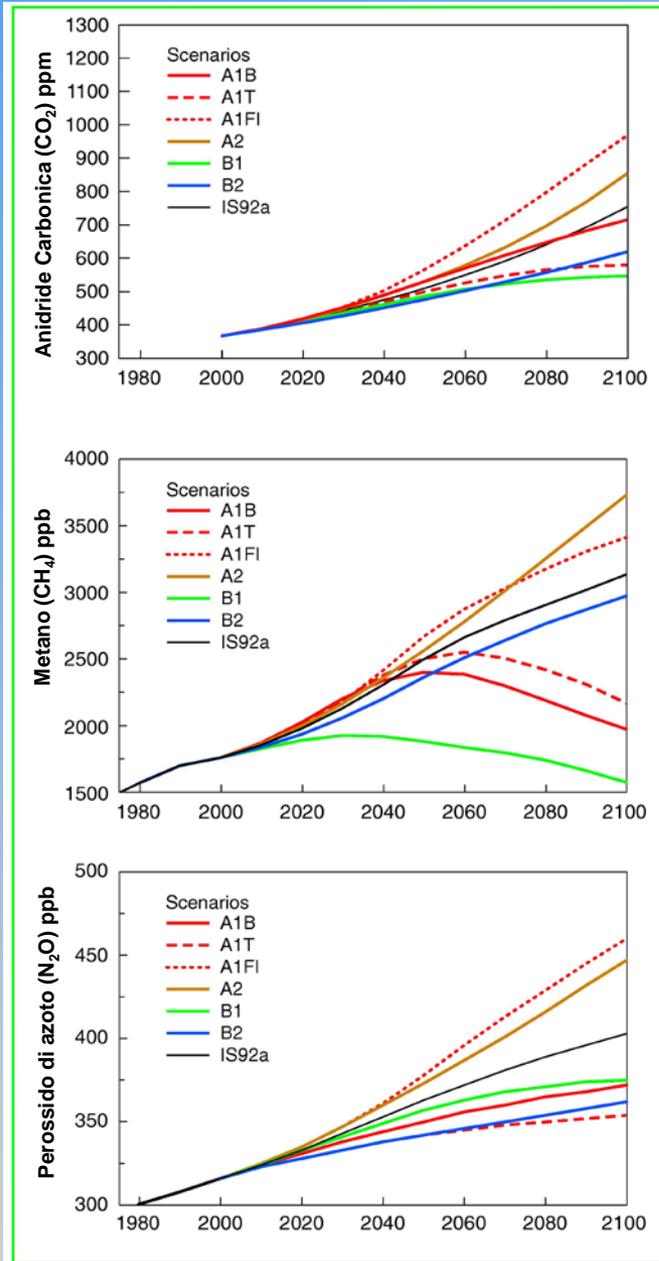
CONTRIBUTO ANTROPICO AL GLOBAL WARMING

Ci sono forti evidenze, in base alle simulazioni dei modelli, sul fatto che **la maggior parte del riscaldamento globale osservato per gli ultimi 50 anni sia dovuto all'attività umana.**





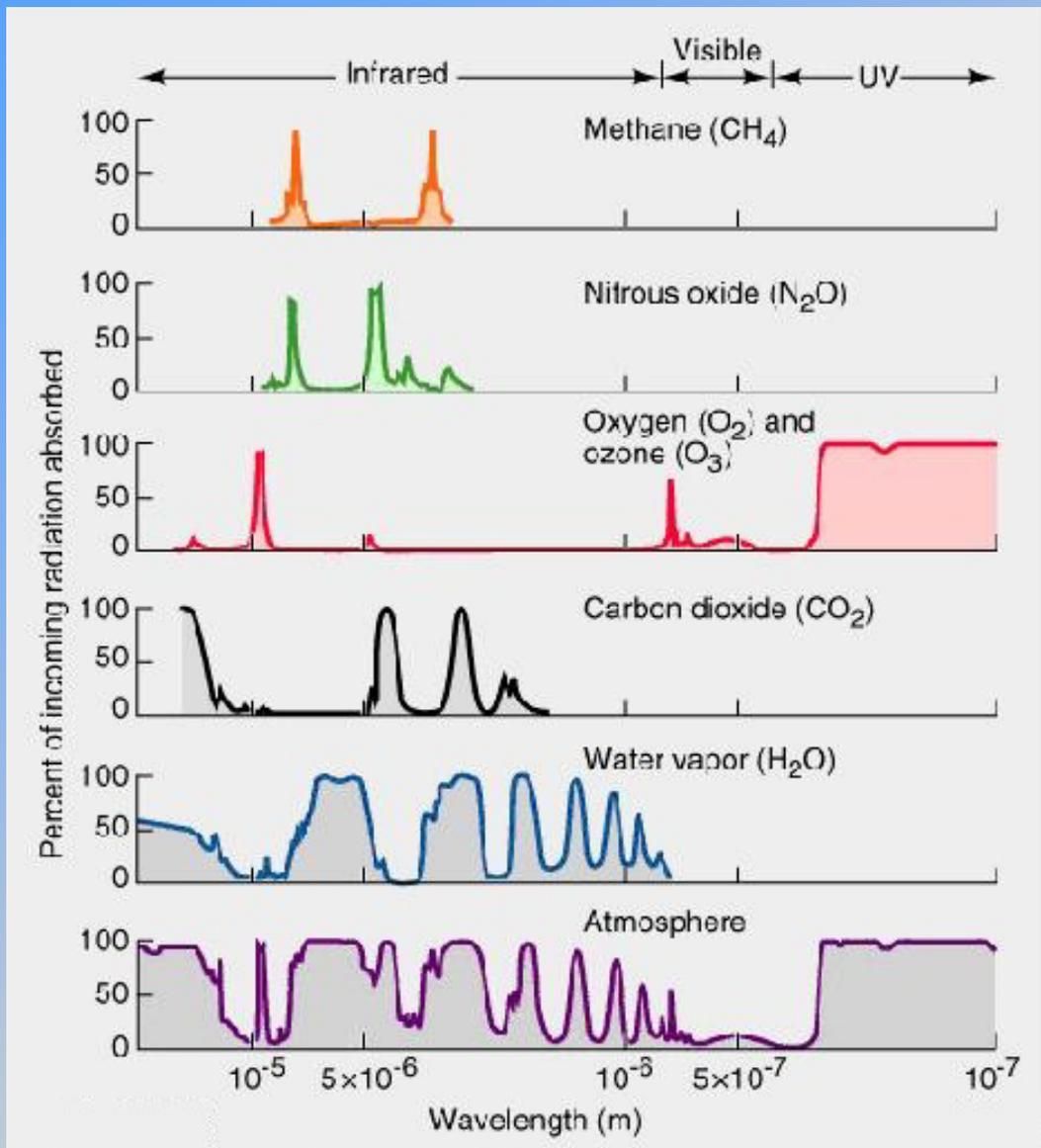
EMISSIONI ANTROPICHE



Simulazioni con modelli di economia mondiale

A seconda della politica che i paesi industrializzati seguiranno, la concentrazione dei gas serra in atmosfera potrebbe aumentare dal 90 al 250% (da 450 a 970 ppm) nei prossimi 100 anni rispetto al livello preindustriale del 1750 (pari a 280 ppm).

In questa figura vediamo le previsioni di concentrazione per tre gas serra e per sette possibili politiche ambientali (linee colorate)

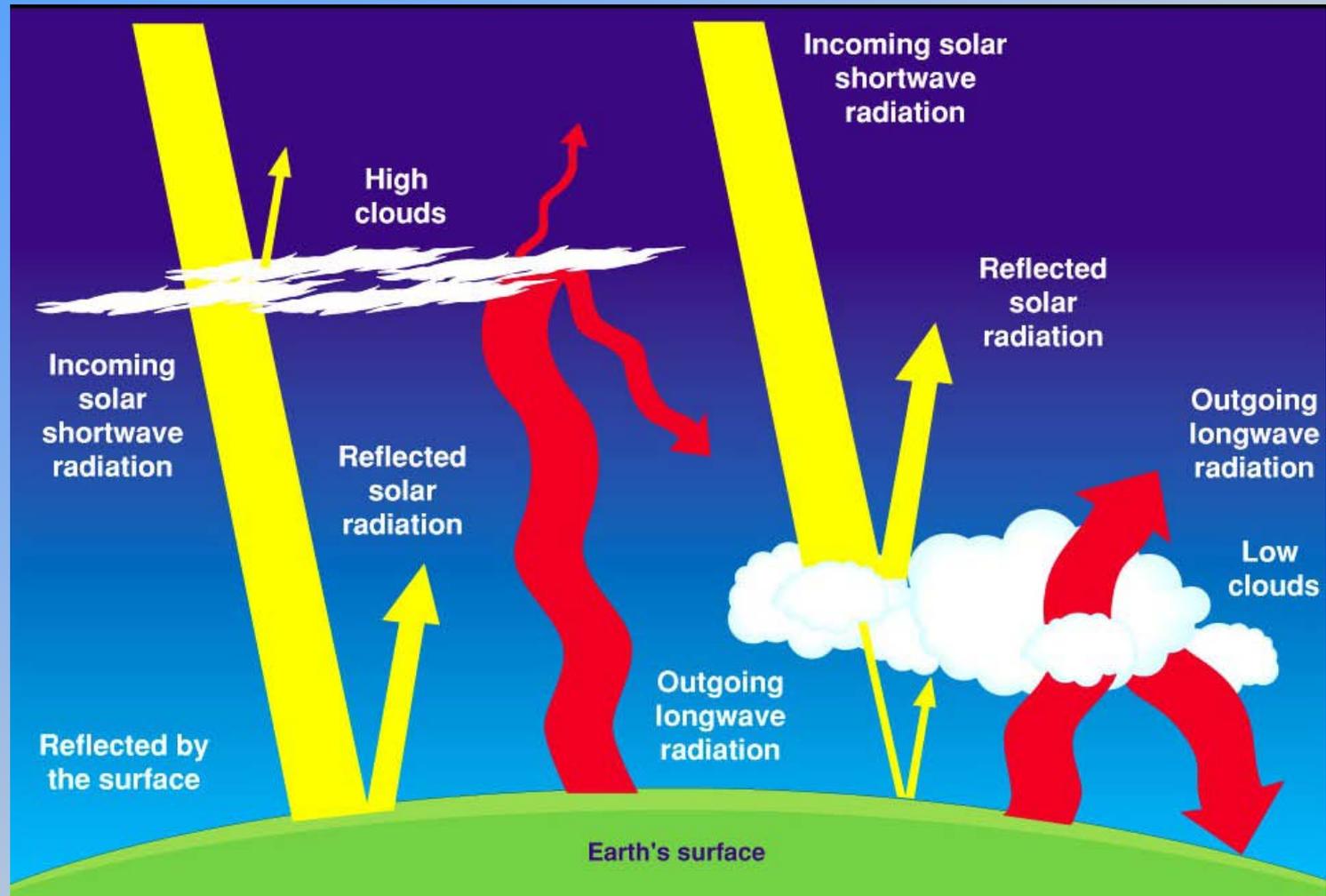


Il vapore acqueo, l'anidride carbonica e l'ozono sono i principali gas serra. Essi assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre e la riemettono in tutte le direzioni.

Cambiamenti nella composizione dei gas serra alterano il bilancio radiativo terrestre e possono provocare notevoli cambiamenti climatici su scala globale.



VAPORE ACQUEO E NUBI



- Le nubi alterano il bilancio radiativo terrestre in quanto assorbono, emettono e diffondono la radiazione solare e terrestre. Tali effetti dipendono dalle proprietà fisiche della nubi (composizione interna), nonché dalla loro altezza e temperatura.



POSSIBILI SEGNALI DI CAMBIAMENTO CLIMATICO



- Le precipitazioni annuali sono **cresciute alle medie e alte latitudini** e sono **calate nella regione tropicale**.

- Inoltre è stato osservato un **significativo aumento degli eventi intensi ed estremi**.



- Si è stimata una **diminuzione della copertura nevosa del 10%** a partire dagli anni '60.

- I **ghiacci marini dell'emisfero nord sono diminuiti del 10-15%** a partire dagli anni '50



Sierra Nevada, California: 1883



1985





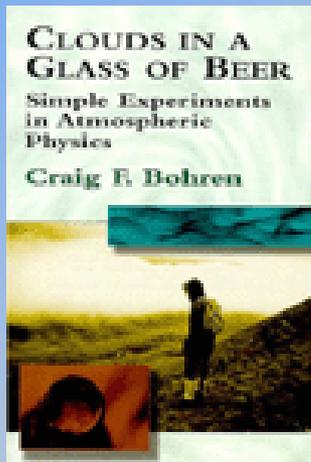
L'EFFETTO DELLE NUBI SUL CLIMA



- Influenzano il bilancio radiativo terrestre attraverso lo scattering e l'assorbimento della radiazione.
- Giocano un ruolo fondamentale nel bilancio idrico del pianeta.
- Considerate essere tra le maggiori cause di incertezza nelle simulazioni climatiche di modelli numerici, dovute principalmente a:

la determinazione delle proprietà radiative delle nubi in modelli climatici: morfologia e microfisica.

simulazione adeguata dei feedback legati al mutamento delle proprietà delle nubi in simulazioni di cambiamento climatico.





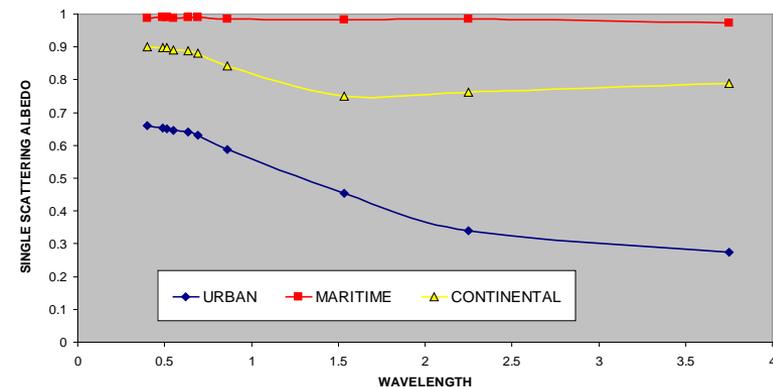
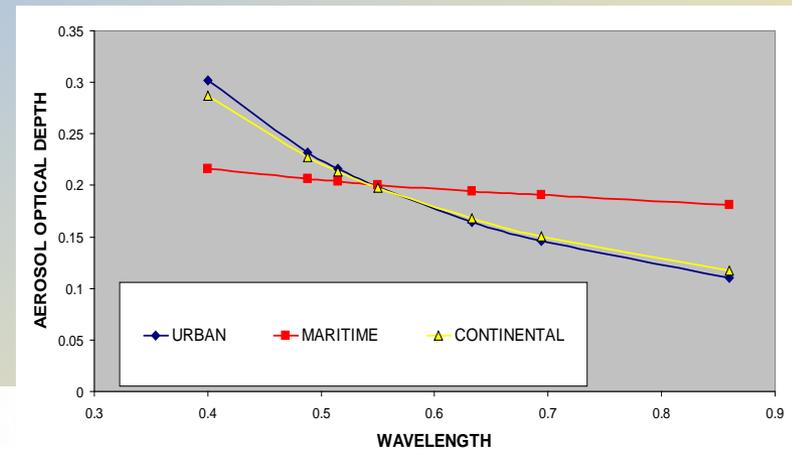
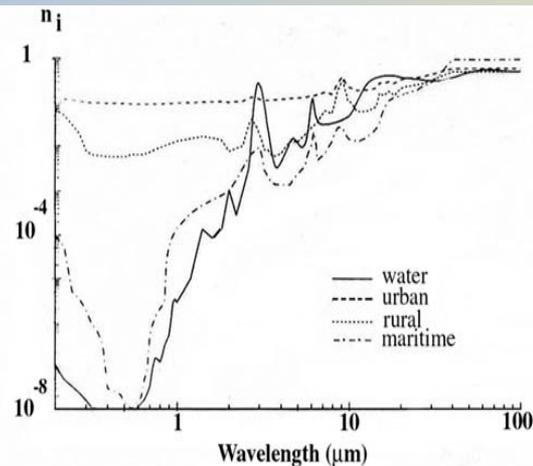
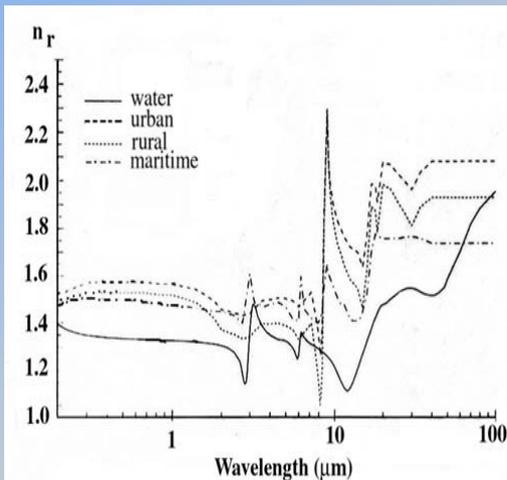
EFFETTI RADIATIVI DEGLI AEROSOLS

Gli aerosols:

- 1. Alterano la direzione in cui la radiazione si propaga (diffusione)**
- 2. Rimuovono energia radiante (assorbimento)**

I parametri principali sono:

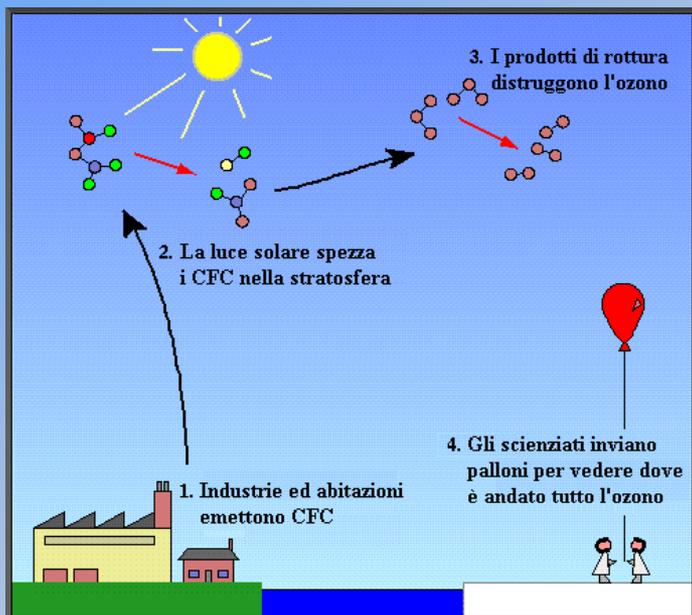
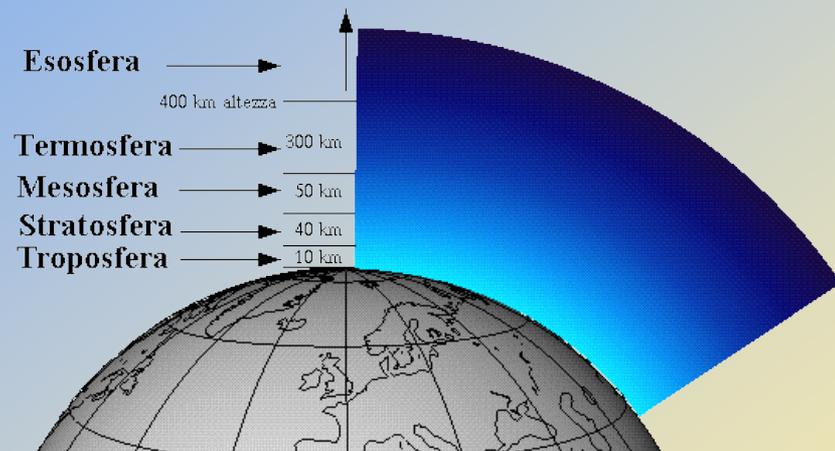
- i) Lunghezza d'onda della radiazione,**
- ii) Dimensione delle particelle,**
- iii) Composizione chimica delle particelle,**
- iv) Indice rifrattivo,**
- v) Single scattering albedo ω .**





OZONO

L'ozono stratosferico (primi 15 – 40 km di atmosfera) funge da *schermo protettivo* per la Terra in quanto assorbe la radiazione ultravioletta che proviene dal Sole. Quest'ultima fornisce l'energia necessaria per la sintesi della vitamina D, ma in dosi più elevate provoca tumori della pelle e gravi danni agli occhi.

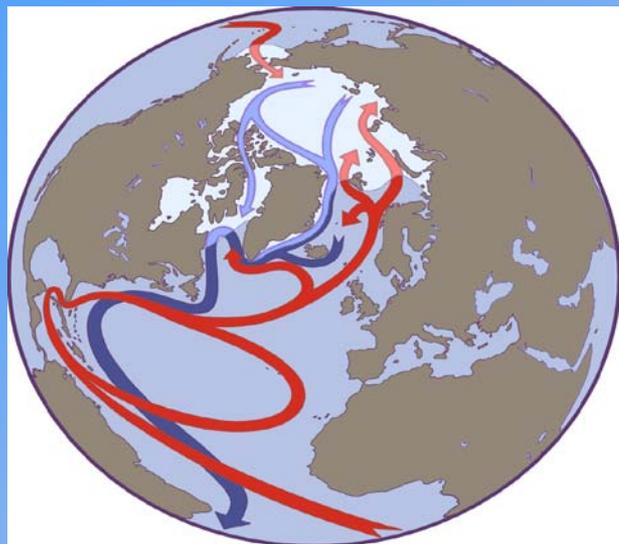


Nell' inverno polare si crea una forte circolazione circumpolare nella bassa stratosfera. L'aria fredda all'interno del vortice polare permette la formazione le *nuvole stratosferiche polari* (PSC); queste nuvole sono l'ambiente idoneo alle reazioni di distruzione dell'ozono stratosferico durante la primavera antartica quando il Sole riappare all'orizzonte.

Sotto l'azione della radiazione solare i CFC si spezzano e rilasciano atomi di **cloro** che reagiscono con l'ozono (O_3) spezzandolo in O_2 ed O . Quest'ultimo reagisce molto rapidamente con i composti atmosferici non permettendo la nuova formazione di O_3 . 49

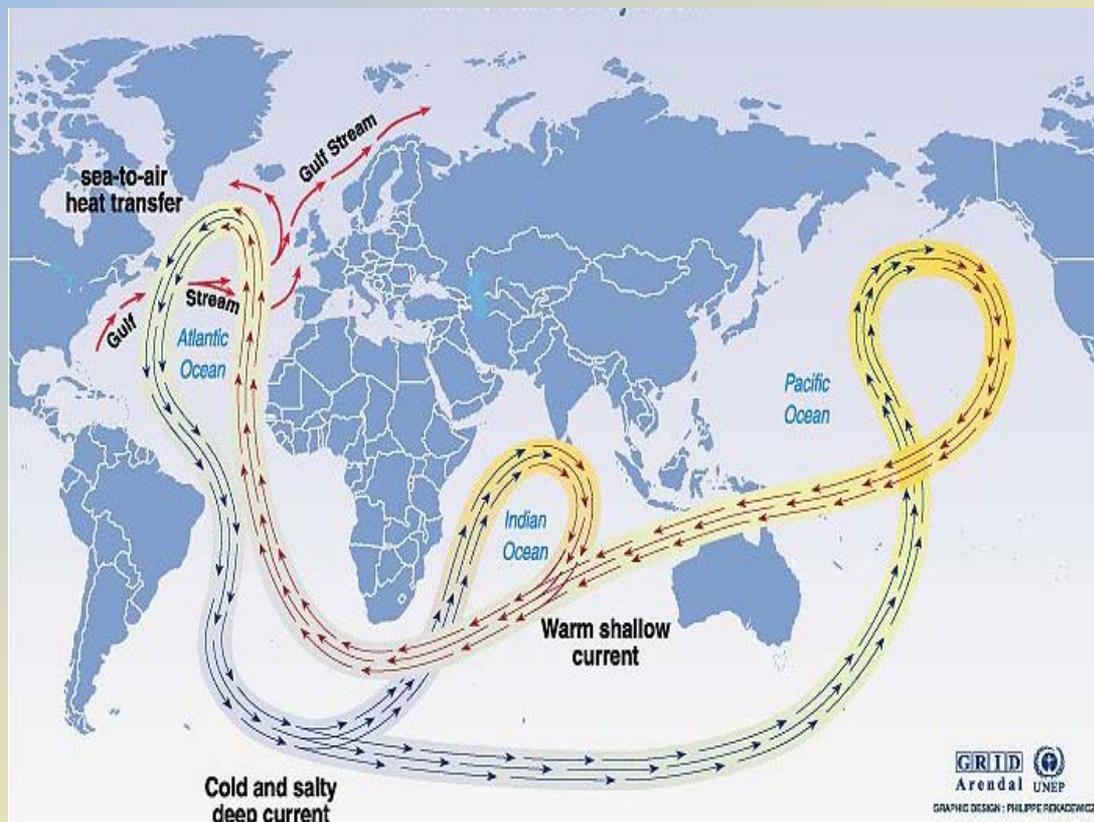


LA CIRCOLAZIONE OCEANICA



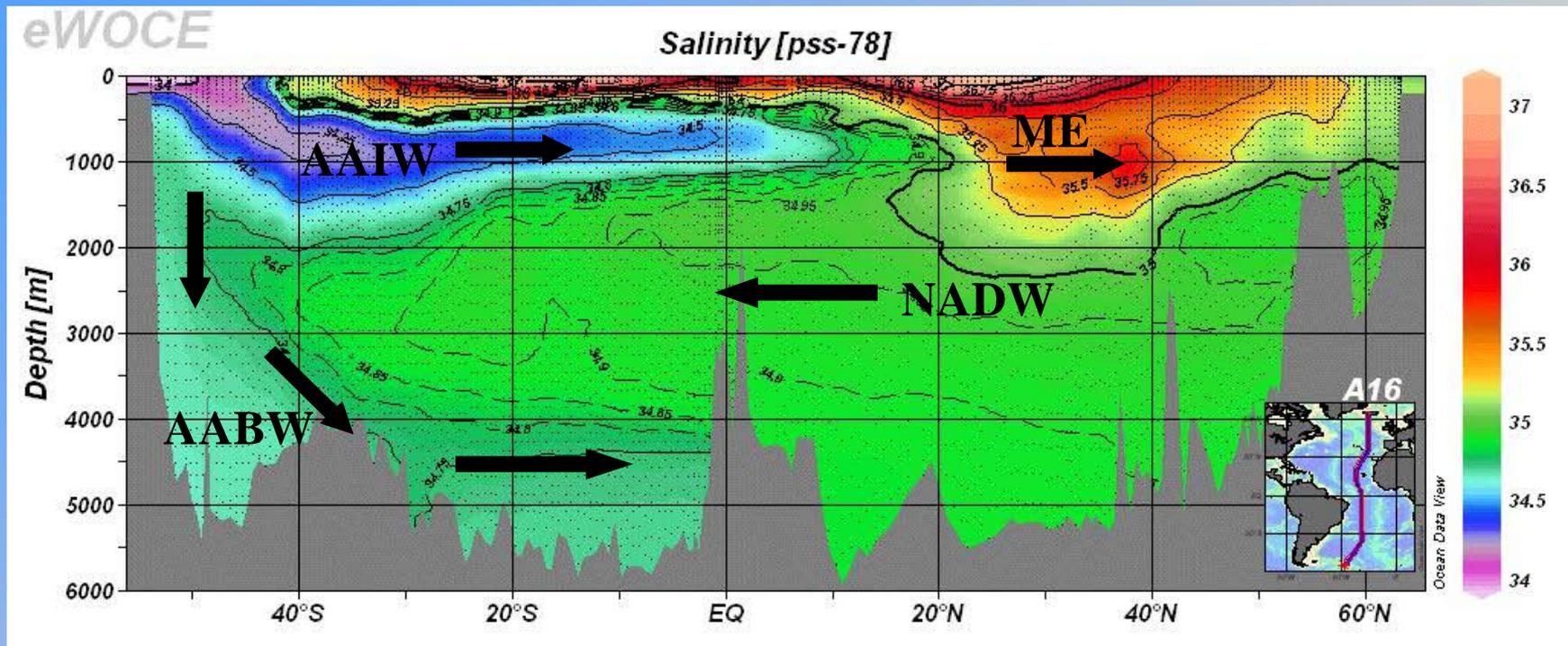
← La circolazione oceanica generale e' descritta schematicamente dalla cosiddetta "conveyor belt". La corrente del Golfo, giunta ai mari marginali, cede calore all'atmosfera e sprofonda nel fondo dell'oceano.

La corrente profonda collega le masse d'acqua degli oceani. Il tempo di rimescolamento degli oceani ha una scala temporale di circa 1000 anni.





MASSE D'ACQUA OCEANICHE



A seconda del luogo di formazione, le masse d'acqua assumono caratteristiche diverse. Dal profilo di salinità dell'oceano Atlantico ad esempio si riconoscono:

ME – Acqua Mediterranea - molto salata.

NADW – North Atlantic Deep Water – mediamente salata e fredda

AAIW – Antarctic Intermediate Water – molto dolce.

AABW – Antarctic Bottom Water – mediamente salata e molto fredda.

La circolazione Termoalina si riferisce esclusivamente alla NADW



COLLEGAMENTI TRA OCEANI

La NADW di origine atlantica passa agli oceani Indiano e Pacifico tramite la corrente antartica circumpolare (ACC).

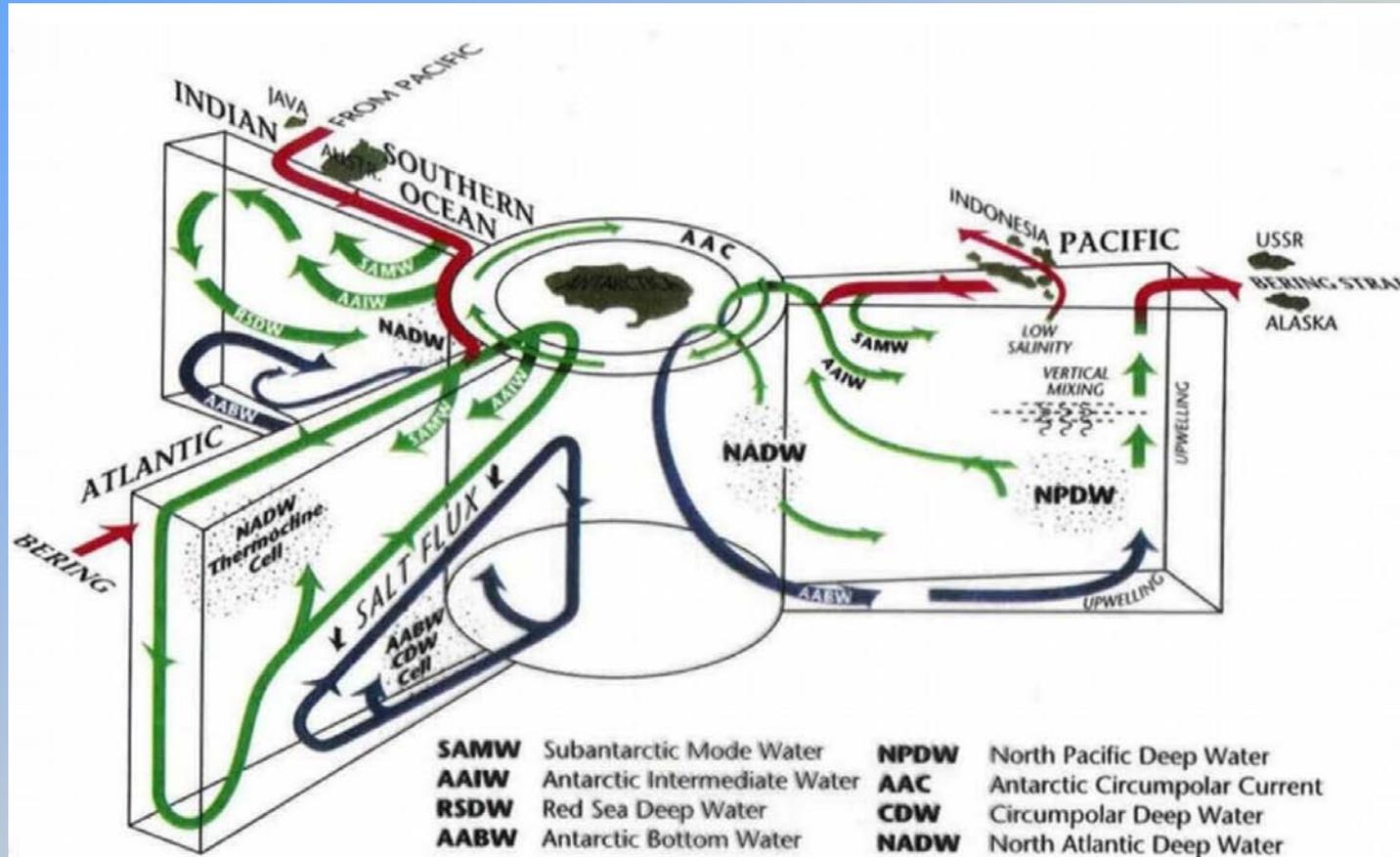


Figure I-90: Three-dimensional meridional global ocean slices that depict NADW formation and replacement, adapted with minor changes from A. Gordon (personal communication).

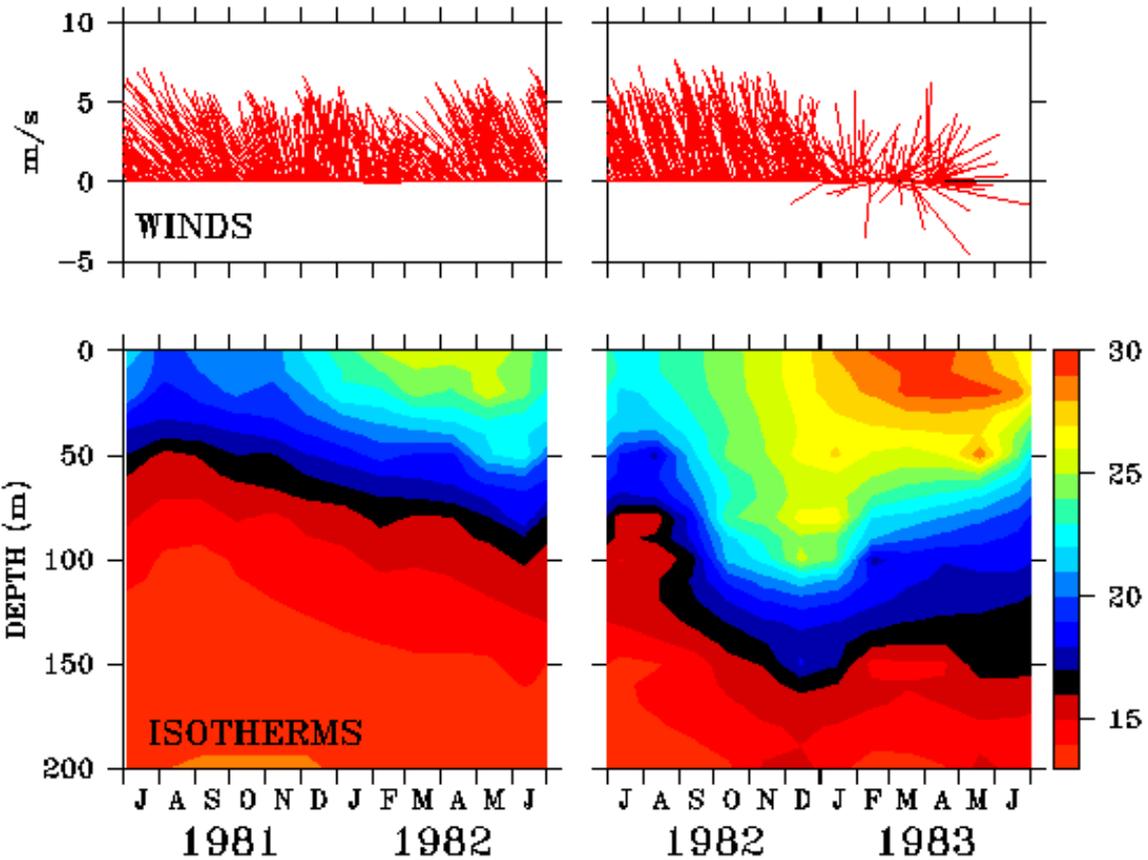


MORE NIÑOs

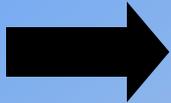
Wind and Temperature at EQ, 110°W

NORMAL

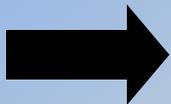
EL NINO



**TRADE
WINDS**

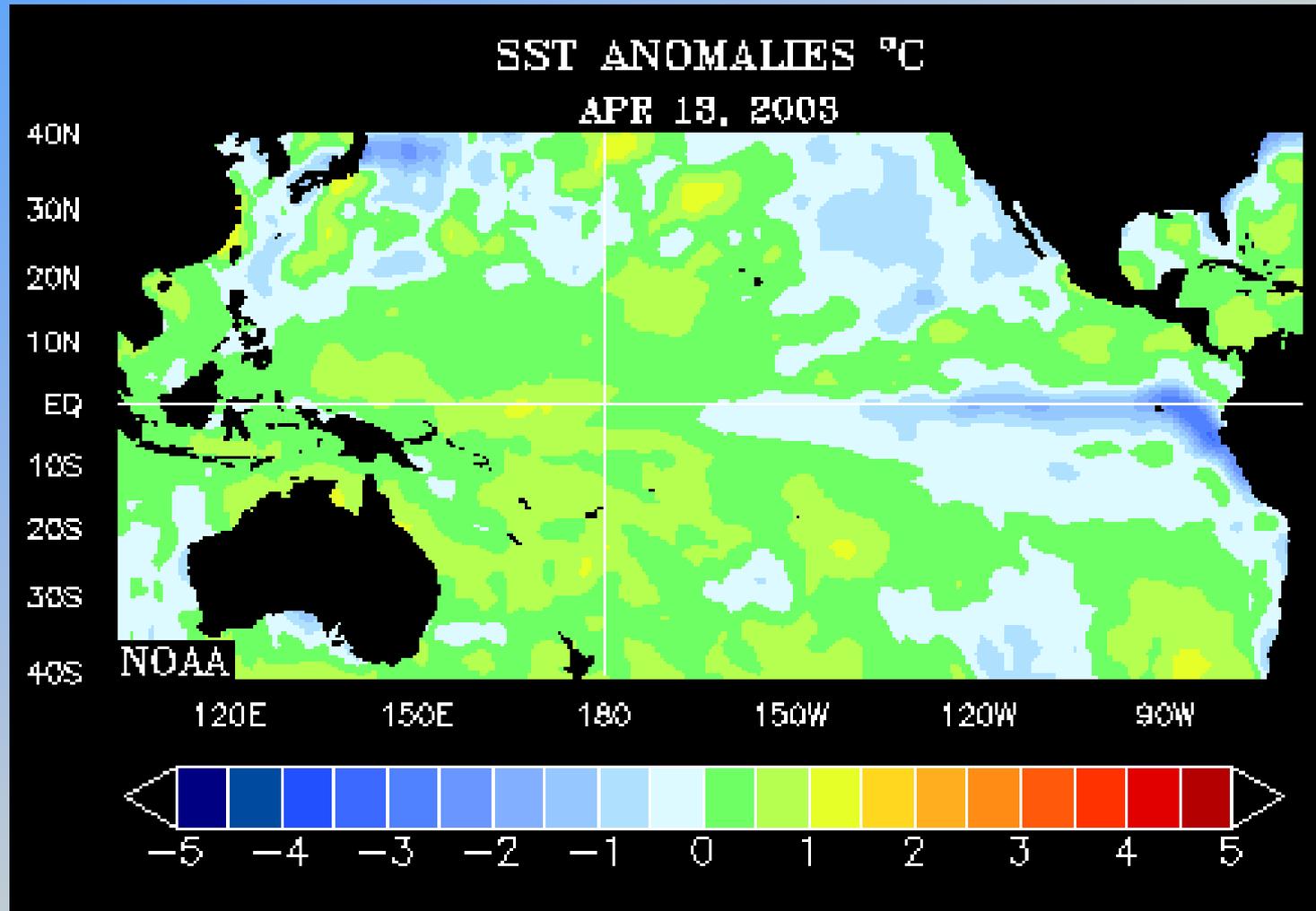


**THERMOCLINE
TEMPERATURE**





EL NIÑO: THE MOVIE!



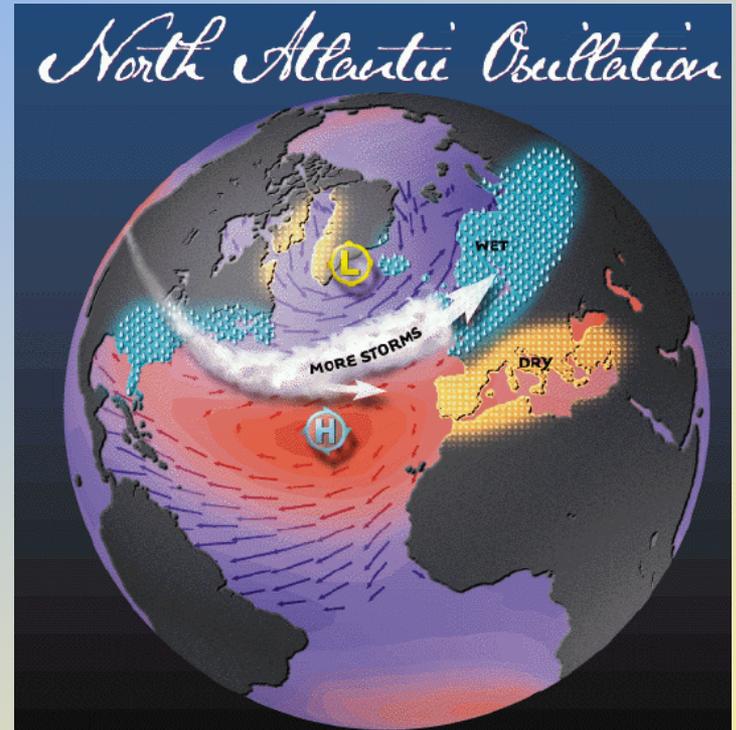


and NOW the NAO

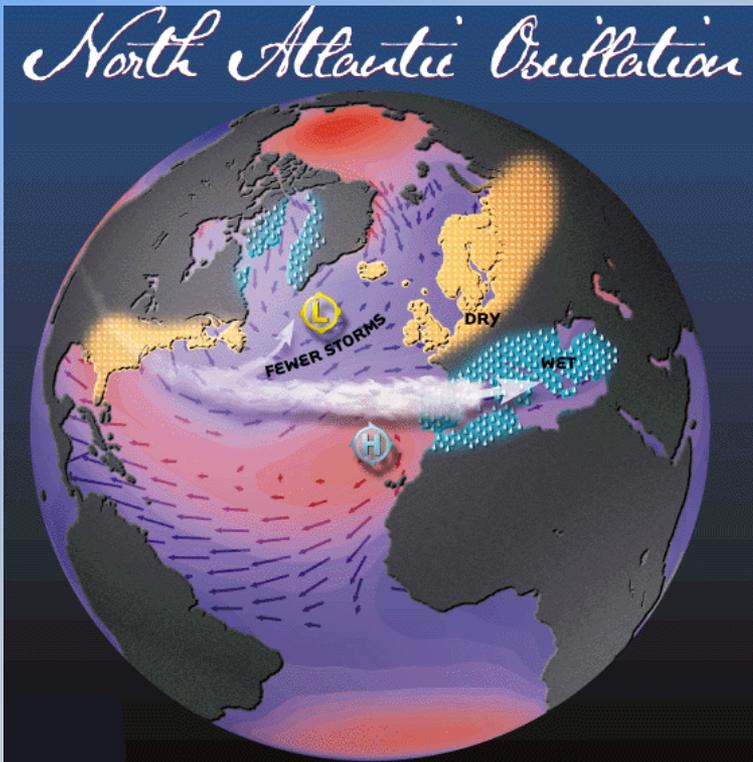
Positive NAO



- The increased pressure difference between Azores high pressure center and Icelandic low.
- More and stronger winter storms crossing the Atlantic Ocean on a more northerly track.
- Warm and wet winters in Europe.
- Cold and dry winters in northern Canada and mild/wet winter in eastern US



North Atlantic Oscillation



Negative NAO

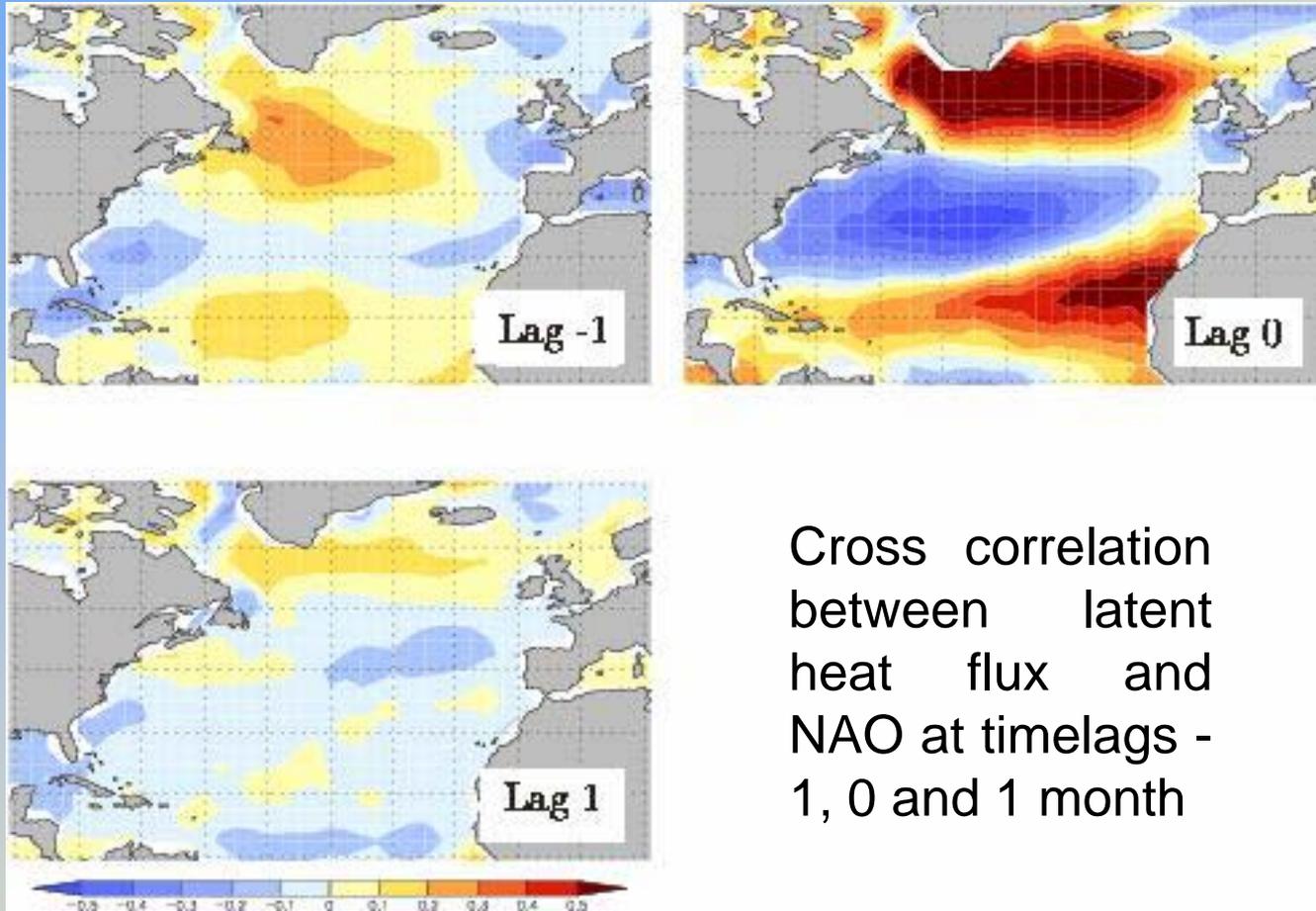
- Weak subtropical high and a weak Icelandic low.
- Fewer and weaker winter storms crossing on a more west-east pathway.
- Moist air into the Mediterranean and cold air to northern Europe
- Snowy weather conditions in US east coast and milder winter temperatures over Greenland.





NAO and OCEAN FEEDBACK

The NAO fluctuates on all timescales, even though the atmosphere has got only a short-time memory. One possible explanation of the long time-scale variation of the NAO, which also provides a potential forecast possibility, would be an influence through the ocean, in particular through the SST.



Cross correlation between latent heat flux and NAO at timelags - 1, 0 and 1 month



NAO and SOLAR ACTIVITY

a recent hypothesis



- **SOLAR CYCLE MODULATION OF THE SEASONAL LINKAGE OF THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION (NAO)**, M. Ogi, K. Yamazaki, Y. Tachibana. *Geophysical Research Letters*, VOL. 30, NO. 22, 2170, 2003.
- **LENGTH OF THE SOLAR CYCLE INFLUENCE IN THE RELATIONSHIP NAO-NORTHERN HEMISPHERE TEMPERATURE.** L. de la Torre, L. Gimeno, M. Tesouro, J.A. Añel, R. Nieto, P. Ribera, R. García, E. Hernández, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 02865, 2003.
- **SOLAR MODULATION OF THE NAO THROUGH STRATOSPHERIC PROCESSES.** K. Kodera and Y. Kuroda, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 04587, 2004.

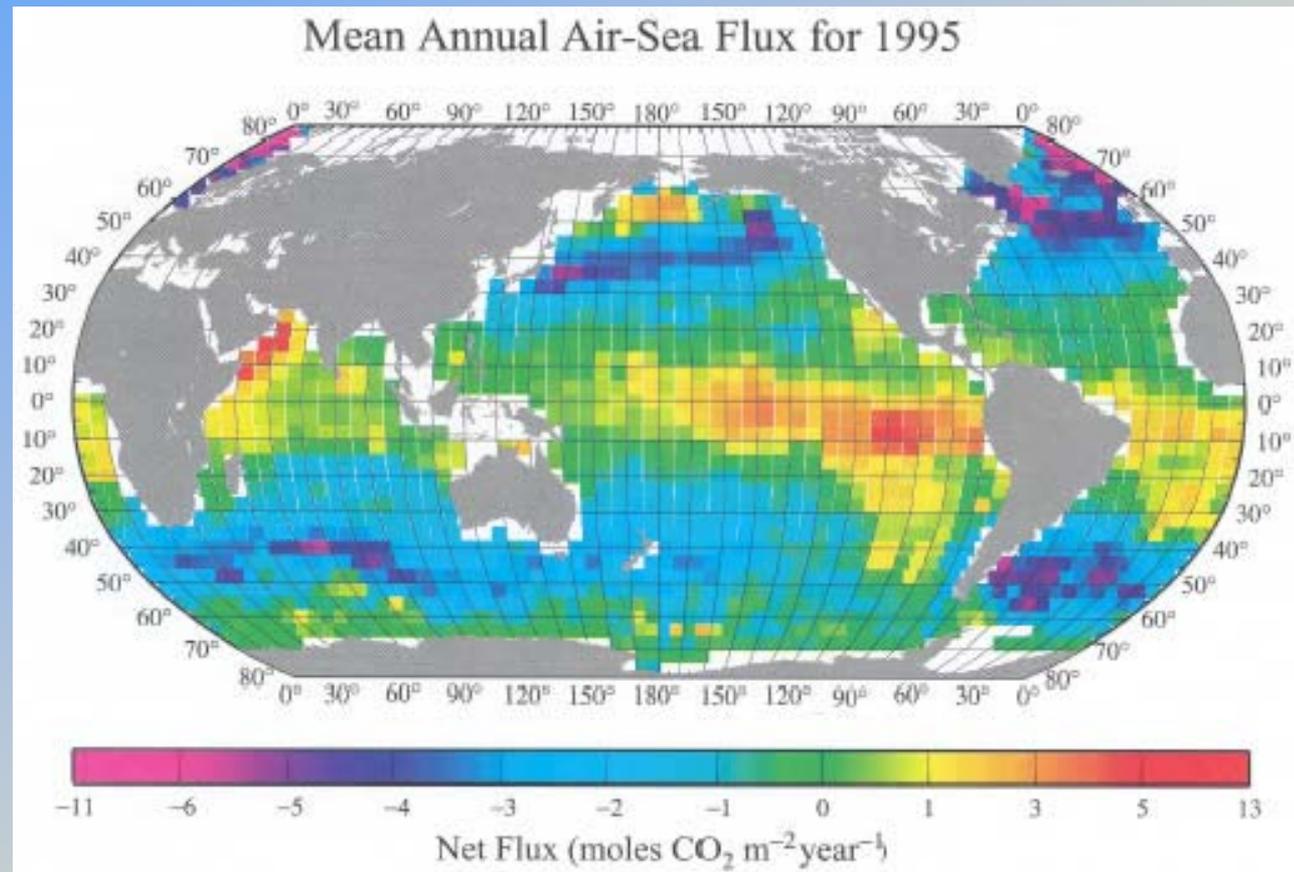


FLUSSI DI CO₂ ATMOSFERA-OCEANO

Molto importante dal punto di vista climatico sono i flussi di CO₂ tra atmosfera ed oceano.

I processi principali che determinano tali flussi sono:

- la pompa di solubilità (scala temporale breve)
- la pompa biologica (scala temporale lunga)



Pompa di solubilità: la CO₂ è maggiormente solubile in acqua fredda.

Pompa biologica: considera il ciclo vitale della biologia marina.