

Corso di Fisica dell'Atmosfera

**Cenni di climatologia  
e  
cambiamenti climatici**

Gaiotti Dario

## Sommario

- ◉ Cos'è il clima del pianeta Terra
- ◉ I cambiamenti climatici nella storia del nostro pianeta
- ◉ Le cause dei cambiamenti climatici
- ◉ L'evoluzione attuale del clima e sua interpretazione
- ◉ Le proiezioni sull'evoluzione del clima in questo secolo
- ◉ Gli impatti dei cambiamenti climatici sull'intero globo
- ◉ Alcune conseguenze dei cambiamenti climatici a scala locale
- ◉ Considerazioni sulle specie viventi e l'ambiente
- ◉ Quali prospettive ci sono nel rapporto tra Uomo e clima?

# Che cosa si intende per clima, quando ci si riferisce al nostro pianeta

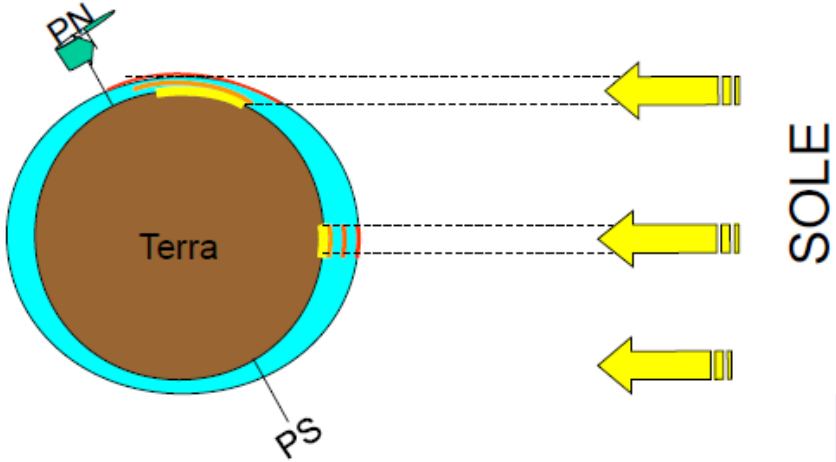
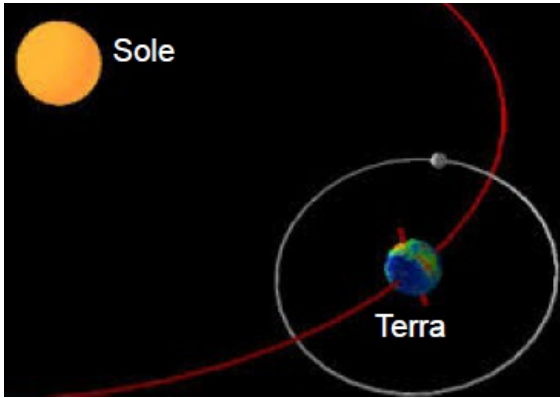
## Definizione classica – Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO)

*Il clima è il **comportamento medio dell'atmosfera** e viene descritto da valori statistici (medie, massimi, minimi, ecc.) di misure meteorologiche (pioggia, temperatura, umidità, soleggiamento, vento, ecc.), che sono calcolati su periodi di almeno **30 anni**.*

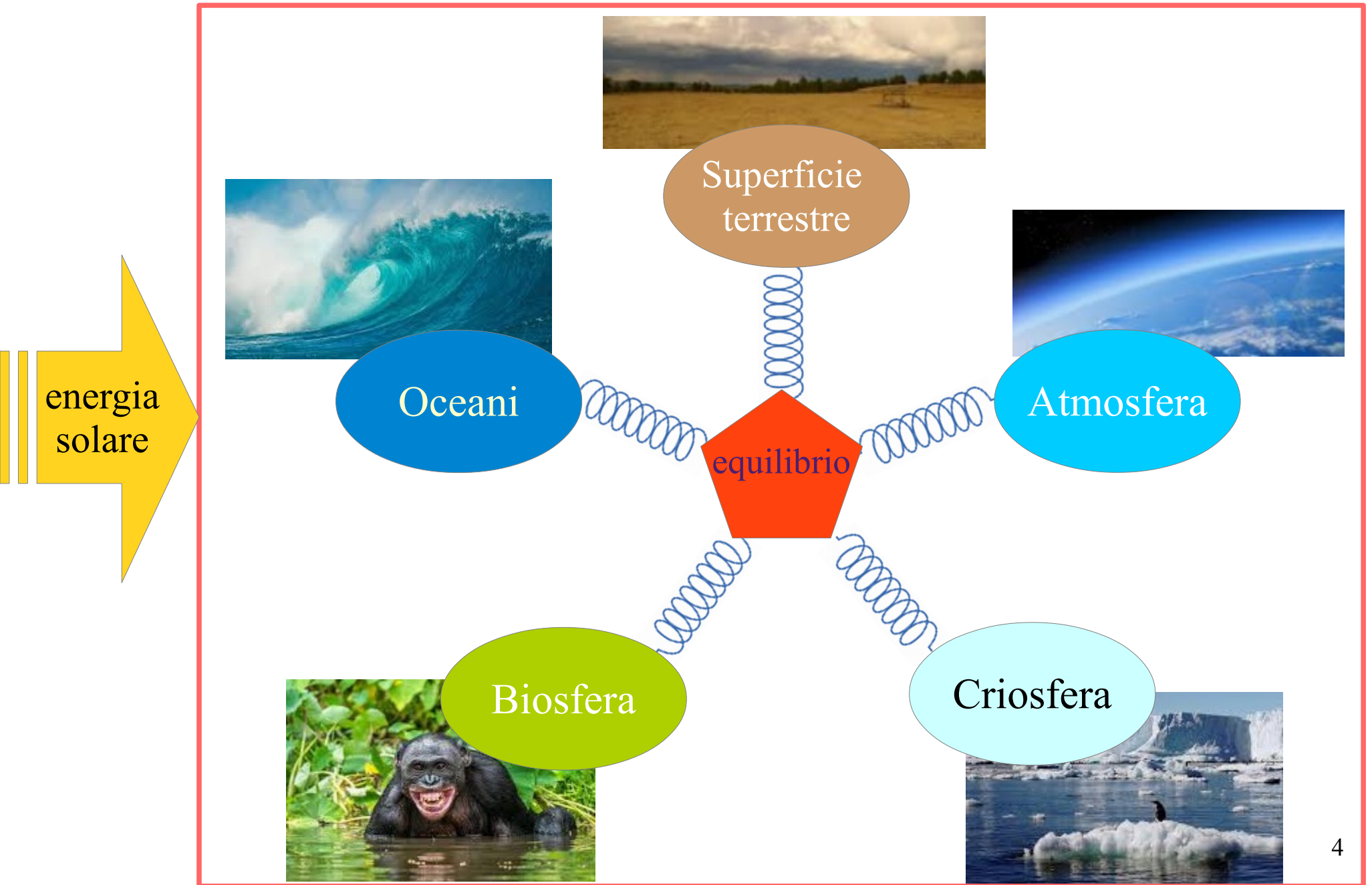


## Definizione moderna e multidisciplinare di **sistema climatico**

*La Terra è dotata di un **sistema climatico** formato da **più componenti** che concorrono a **mantenere l'equilibrio** dell'intero sistema, **influenzandosi a vicenda**, sotto la **forzante esterna** dell'energia proveniente dal Sole*

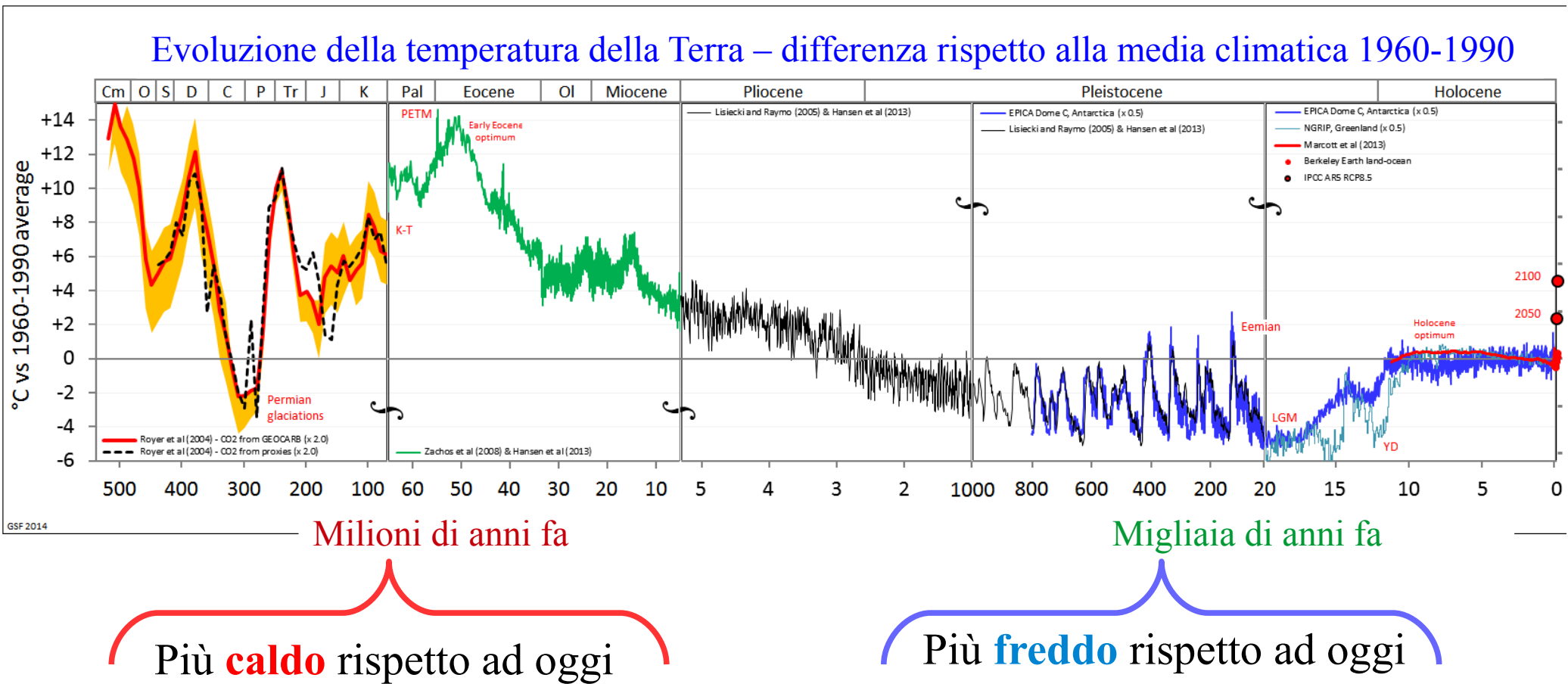


# Il sistema climatico terrestre



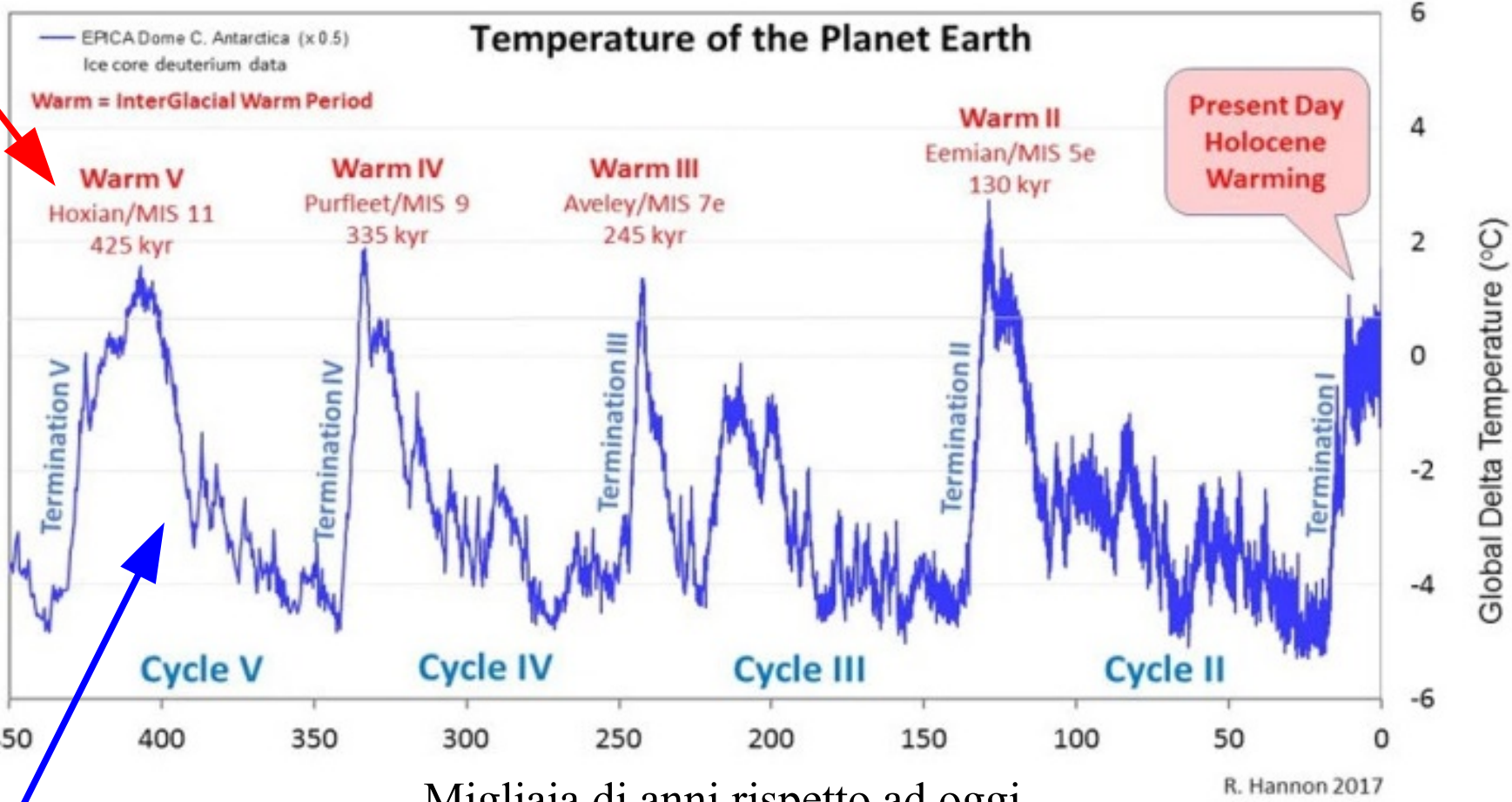
## Il clima passato del nostro pianeta – visione d'insieme

Abbiamo informazioni attendibili sul clima passato della Terra fino a circa 300 milioni di anni fa. Il limite viene dall'età dei fondali oceanici. Altre stime per periodi più lontani derivano da analisi di rocce continentali



# Il clima passato del nostro pianeta – dettaglio dei 500 mila anni più recenti

Periodi interglaciali (caldi)



Periodi glaciali (freddi)

Tempo totale di permanenza del pianeta in uno dei due stati: 80% glaciale – 20% interglaciale

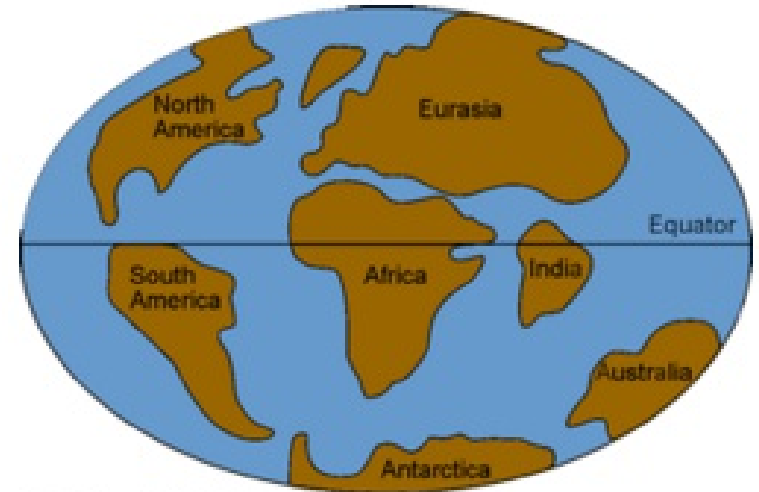


## Cause di cambiamenti climatici: la posizione dei continenti e delle catene montuose

La **posizione delle terre emerse**, rispetto agli oceani e all'asse di rotazione terrestre, inoltre la presenza delle principali catene montuose, **condizionano la distribuzione dell'energia solare sul nostro pianeta**

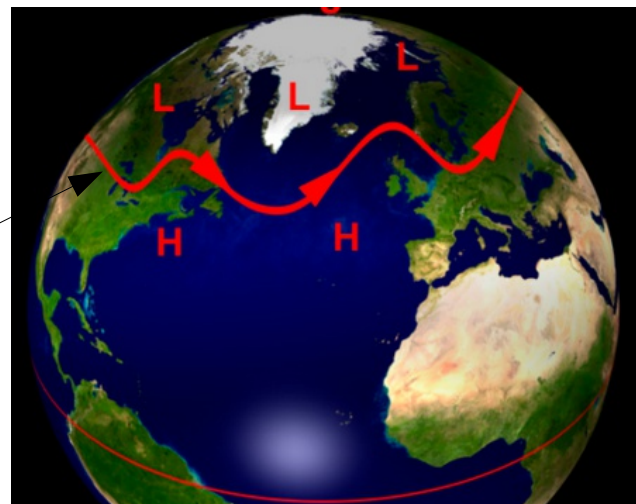


Pangea 250 milioni di anni fa



Da 65 milioni di anni fa ad oggi

Ondulazione del flusso atmosferico alla medie latitudini



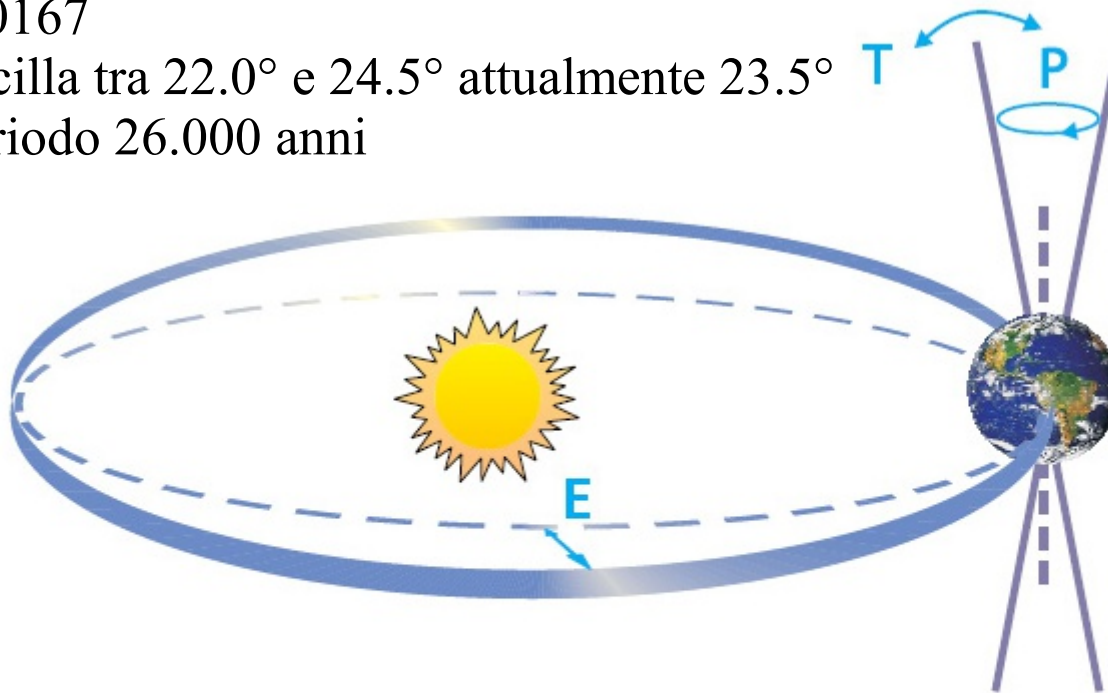
Queste variazioni climatiche sono su scala di **centinaia di milioni di anni**

## Cause di cambiamenti climatici: variazioni dell'orbita terrestre e dell'asse di rotazione

$$E = 0.0167$$

T = oscilla tra  $22.0^\circ$  e  $24.5^\circ$  attualmente  $23.5^\circ$

P = periodo 26.000 anni



Elementi essenziali

**E** = eccentricità orbita  
(periodo di 100.000 anni)

**T** = inclinazione asse rotazione  
(periodo di 41.000 anni)

**P** = precessione equinozi  
(periodo di 26.000 anni)

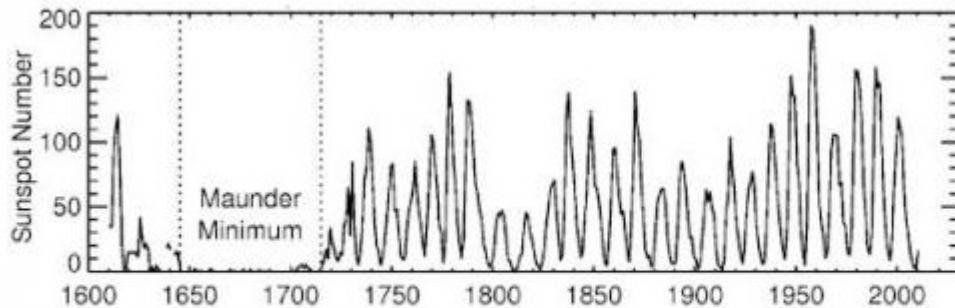
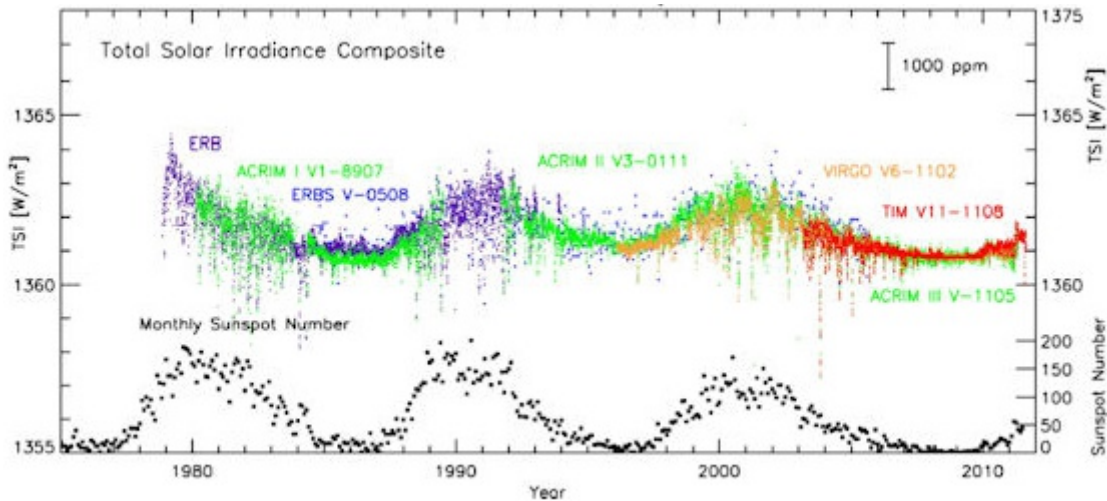
Questi effetti solo ciclici e prendono il nome di cicli di Milankovitch.

Cambiano le **condizioni di esposizione** della superficie terrestre **al flusso solare**, in particolare degli emisferi e delle terre emerse.

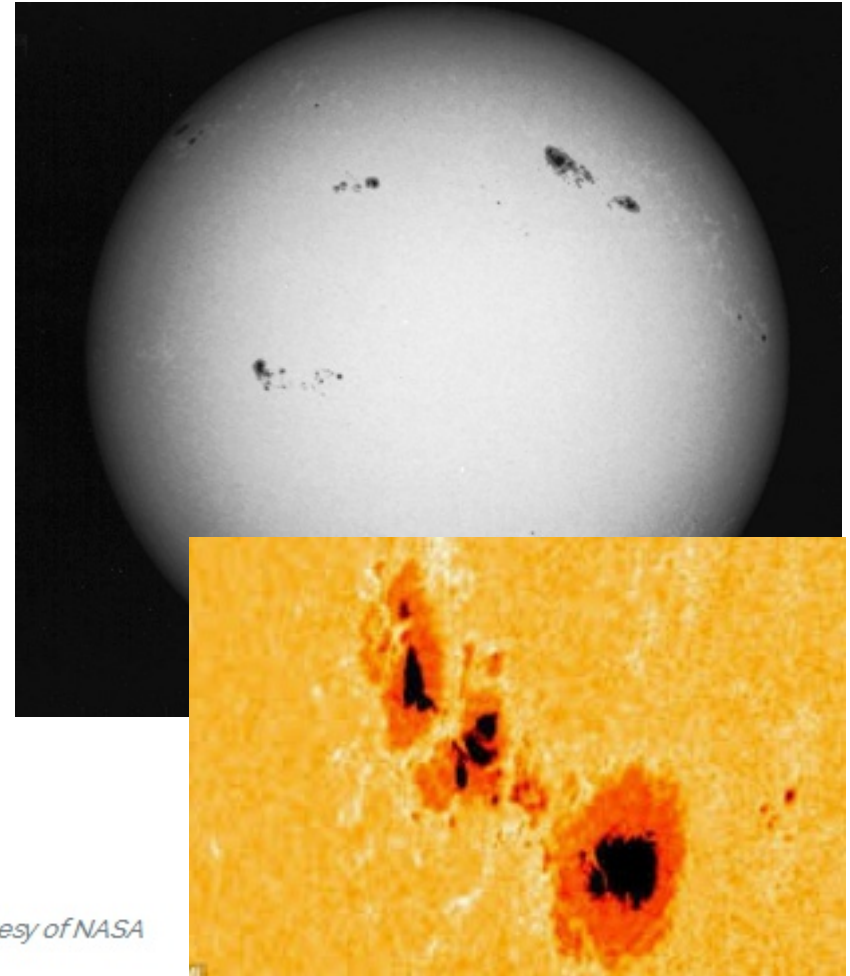
Queste variazioni climatiche sono su scala di **centinaia e decine di migliaia di anni**



## Cause di cambiamenti climatici: variazioni del flusso di radiazione solare



The yearly averaged sunspot number for a period of 400 years (1610-2010). SOURCE: Courtesy of NASA Marshall Space Flight Center.



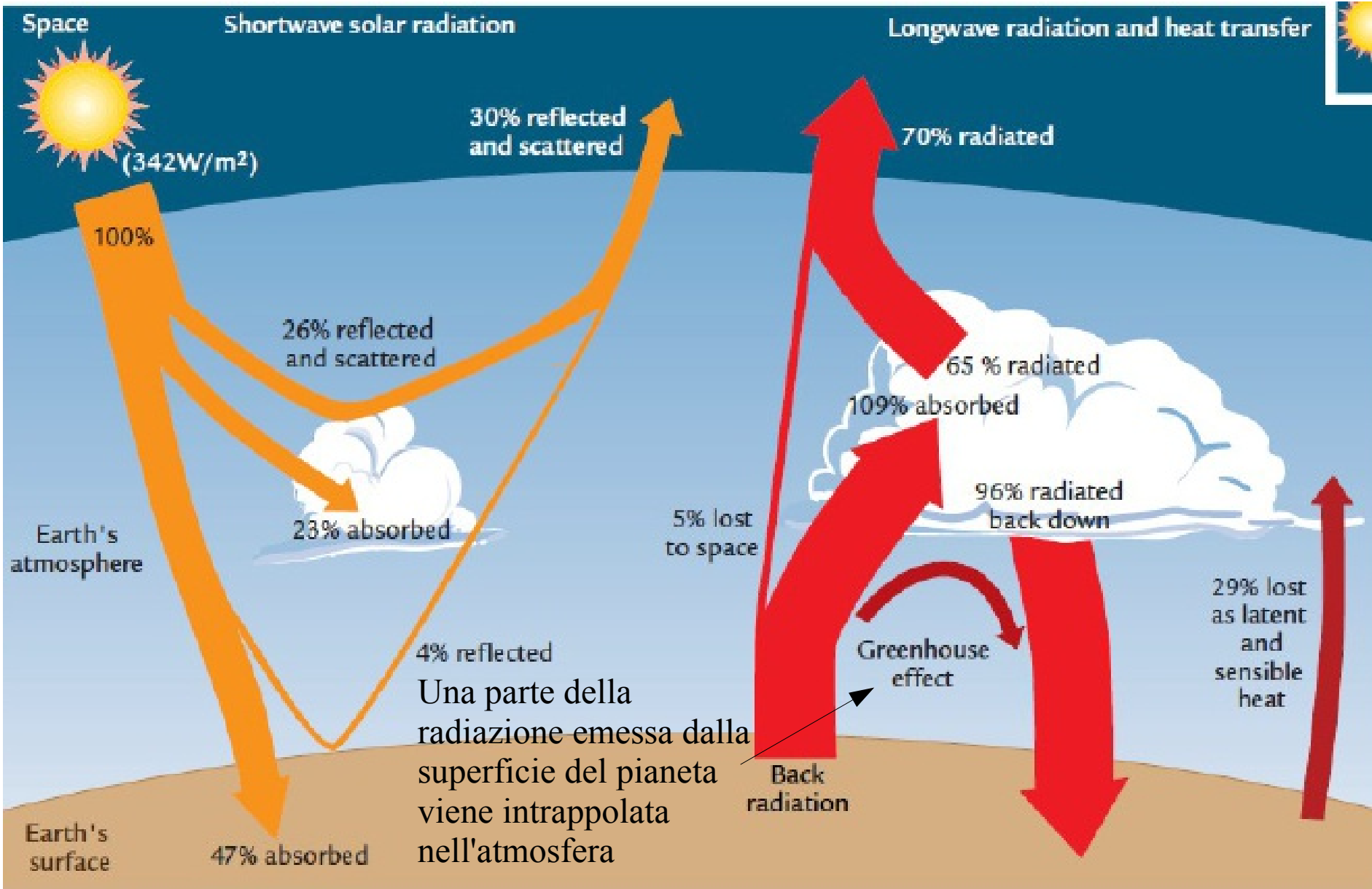
Il flusso di energia che proviene dal Sole cambia perchè la nostra stella è una fucina termonucleare, quindi è soggetta a fluttuazioni nella produzione e nel trasporto dell'energia dal suo interno verso la superficie

Le fluttuazioni hanno una periodicità principale di circa 11 anni e sono del 0.1% dell'energia media (flusso medio di energia solare in entrata nell'atmosfera  $1360 \text{ W}/\text{m}^2$ )

Il flusso è maggiore quando l'attività solare è massima (più macchie visibili sul disco solare)

# Cause dei cambiamenti climatici interne al sistema climatico: l'effetto serra

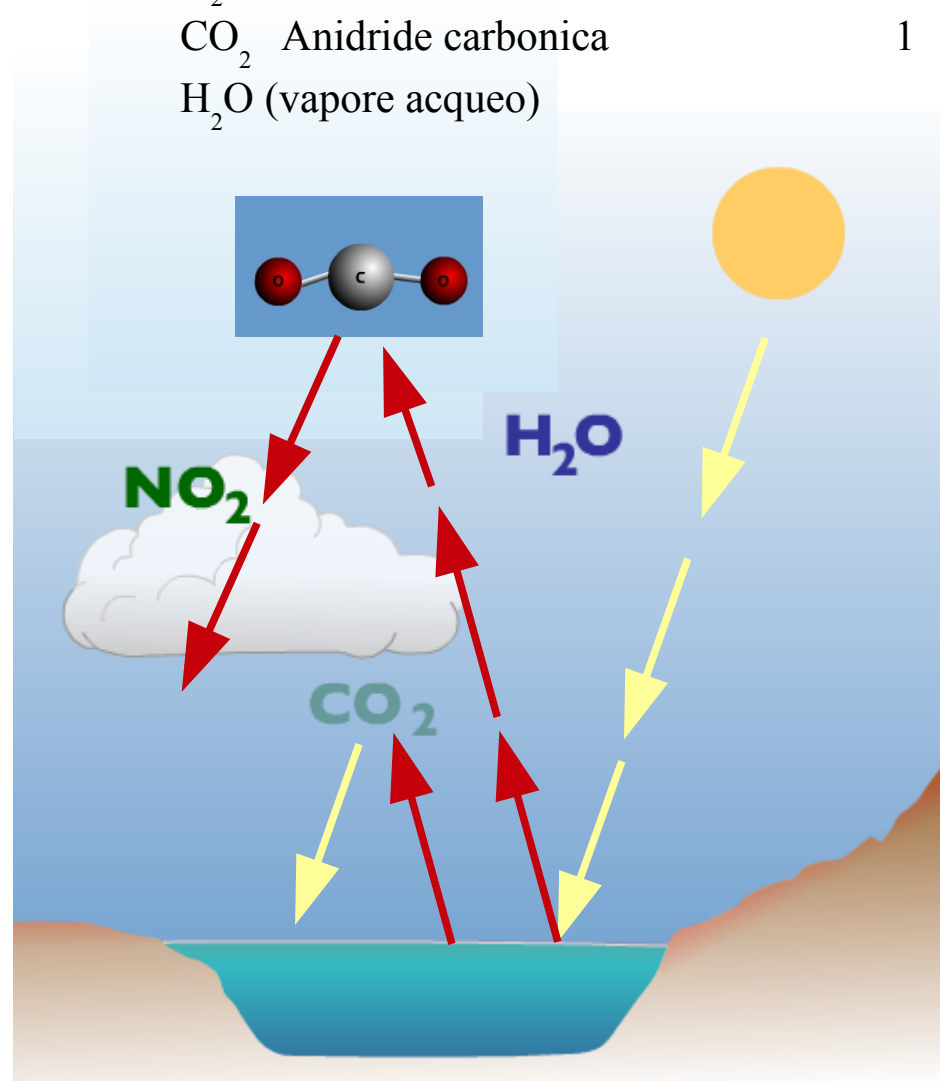
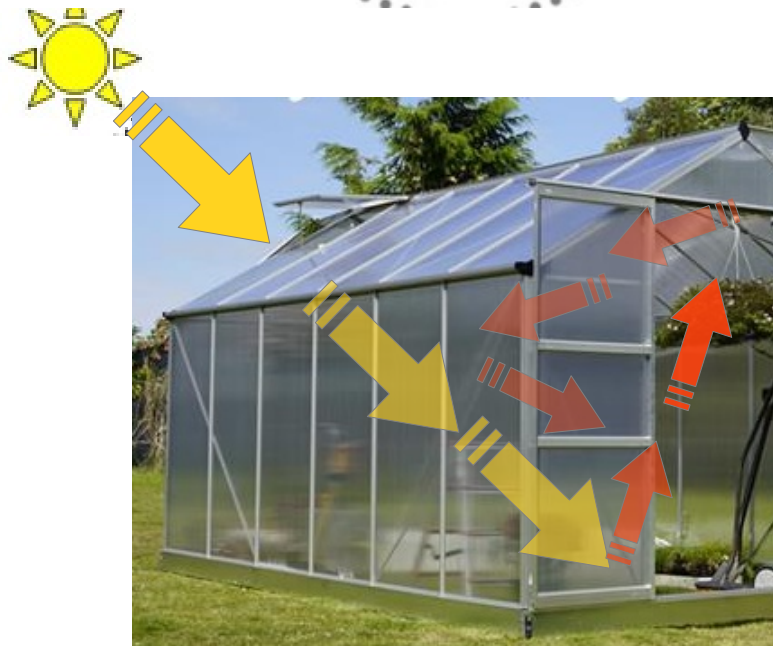
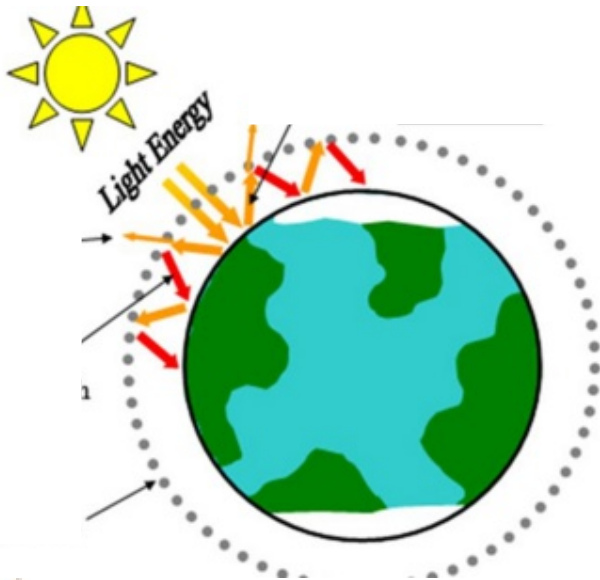
Valori medi annui di energia entrante ed uscente sull'intero globo terrestre



## Cause e funzionamento dell'effetto serra

I principali gas che causano effetto serra sono:

GAS		potenziale
CH <sub>4</sub>	Metano	298
N <sub>2</sub> O	Ossido nitroso	25
CO <sub>2</sub>	Anidride carbonica	1
H <sub>2</sub> O	(vapore acqueo)	





## Cause dei cambiamenti climatici interne al sistema climatico: l'albedo

L'albedo è la frazione di energia solare che viene riflessa nello spazio, **senza essere assorbita dal pianeta.**

L'albedo della Terra è circa **30%**. Buona parte della riflessione è imputabile alle nubi

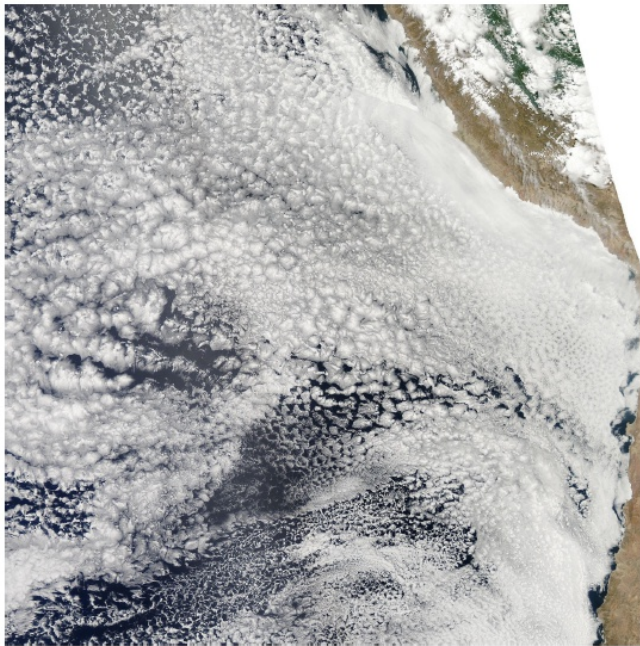


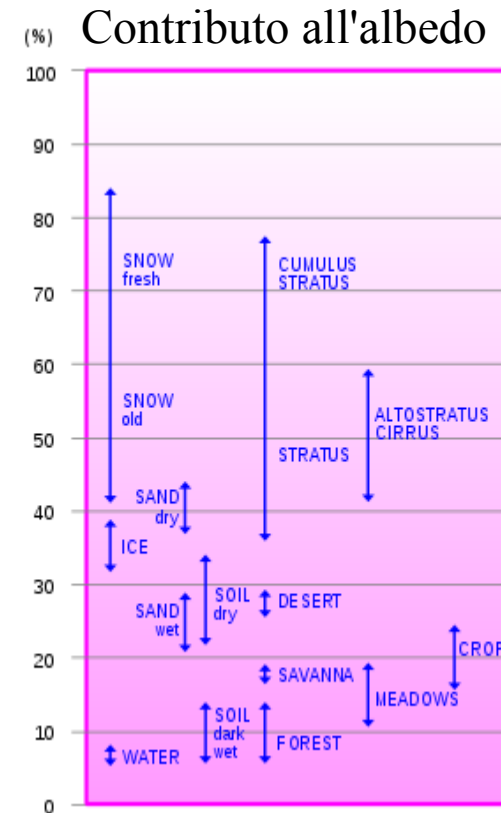
FIGURE 2: Visible satellite image from the NASA Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer to the west of South America showing closed and open cell stratocumulus clouds. A band of stratus clouds is present along the Peruvian coastline. The image scale is approximately 2000 km across.

Gli stratocumuli sono le nubi più frequenti sul nostro pianeta e coprono mediamente 1/5 della superficie:

- 23% sugli oceani
- 12% sulla terra

Gli strati sono nubi frequenti sul nostro pianeta e coprono mediamente 1/10 della superficie:

- 12% sugli oceani
- 5% sulla terra



Gli strati e gli stratocumuli riflettono buona parte della radiazione solare entrante nell'atmosfera terrestre, quindi sono **attori principali nel bilancio radiativo.**

**OSSERVAZIONE:** Gli aerosol presenti nell'aria favoriscono la formazione delle nubi

## Cause dei cambiamenti climatici interne al sistema climatico: eventi eccezionali

Tra le cause della variazione del clima, nelle ultime decine di migliaia di anni, sono da considerare anche eventi eccezionali che cambiano le proprietà dell'atmosfera terrestre su scala globale.

- **Eruzioni vulcaniche**
- **Impatto di corpi celesti con il nostro pianeta**

Questi tipi di eventi immettono nell'atmosfera terrestre (**troposfera e stratosfera**) grandi quantità di polveri e gas che modificano l'assorbimento della radiazione solare alla superficie del pianeta o nell'atmosfera stessa

Eruzioni vulcaniche a cui sono seguiti effetti sullo stato dell'atmosfera negli anni successivi:

- Tambora 1815
- Krakatoa 1883
- Pinatubo 1991

Impatti meteorici importanti degli ultimi secoli

- Tunguska 1908

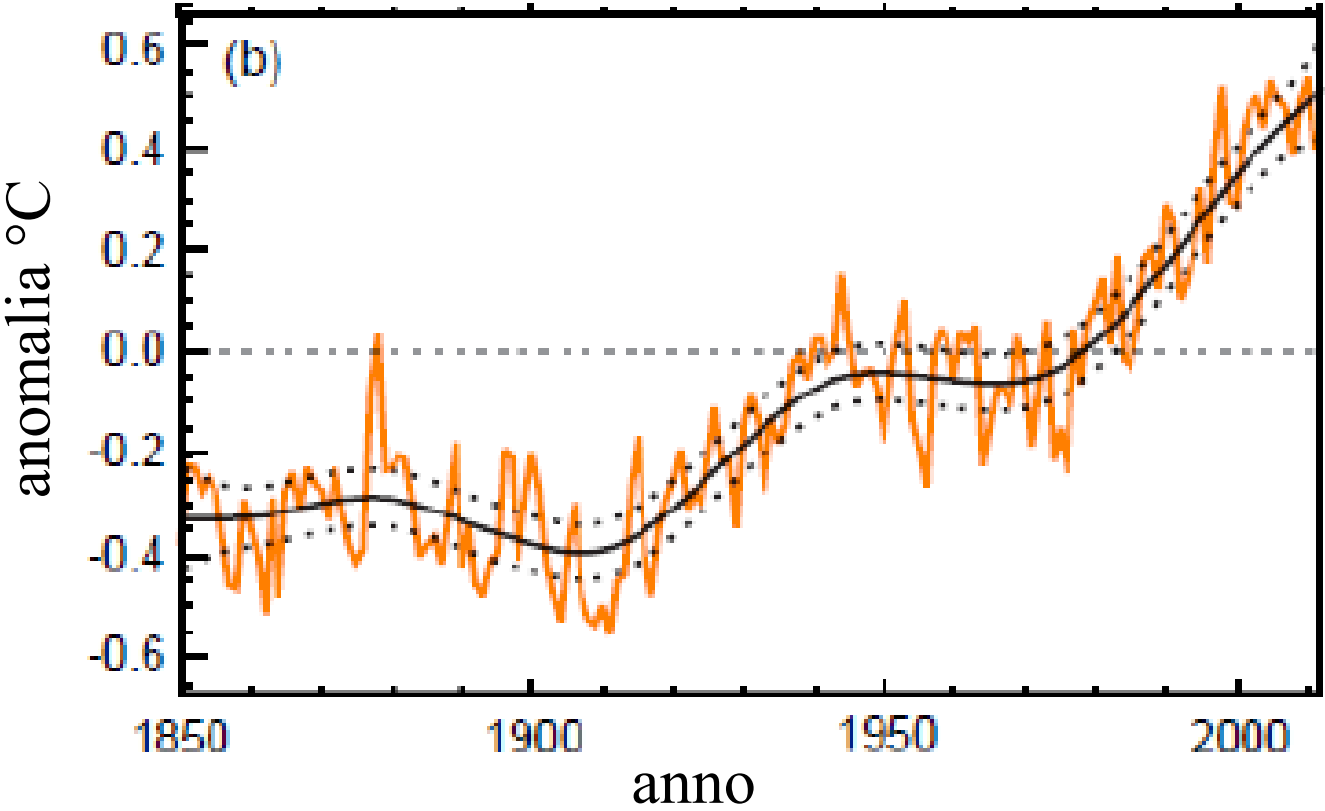




# L'evoluzione attuale del clima: la temperatura superficiale media del pianeta

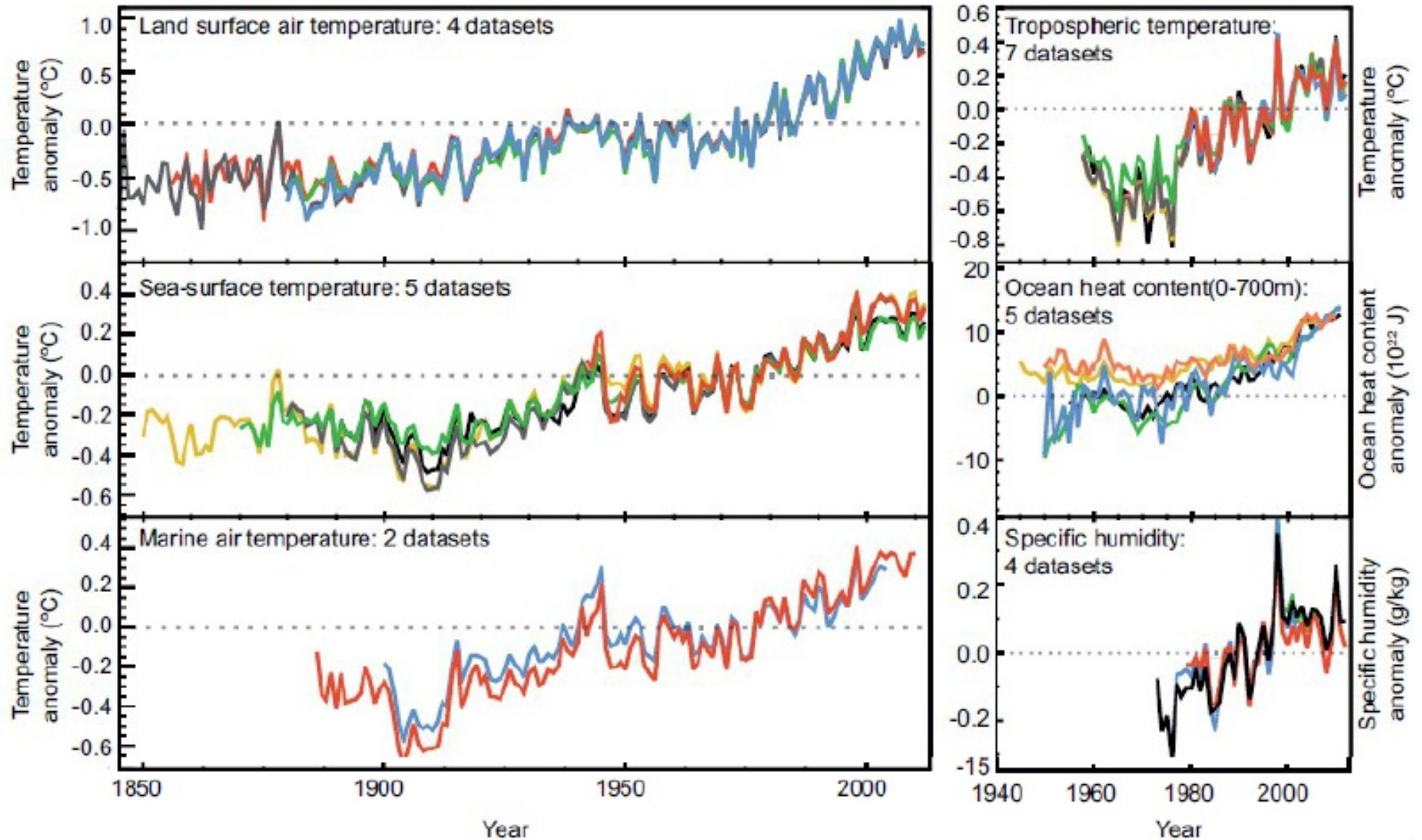
## Anomalia della temperatura media superficiale del pianeta rispetto alla media climatica del periodo 1961-1990

$\text{anomalia} = \text{temperatura} - \text{temperatura media 1961-1990}$

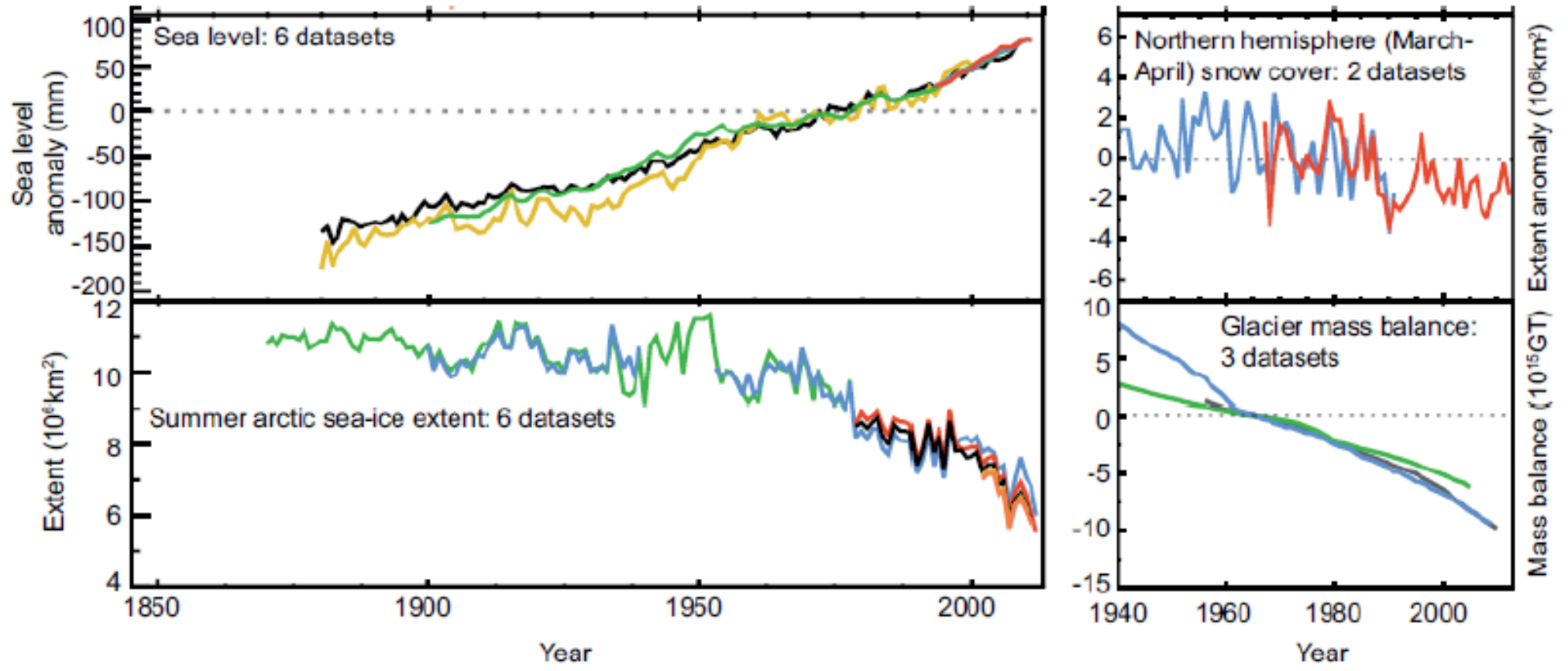


Fonte: Chapter 2 IPCC WGI Fifth Assessment Report (2013) <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>

## L'evoluzione attuale del clima: altri elementi di valutazione tramite temperature



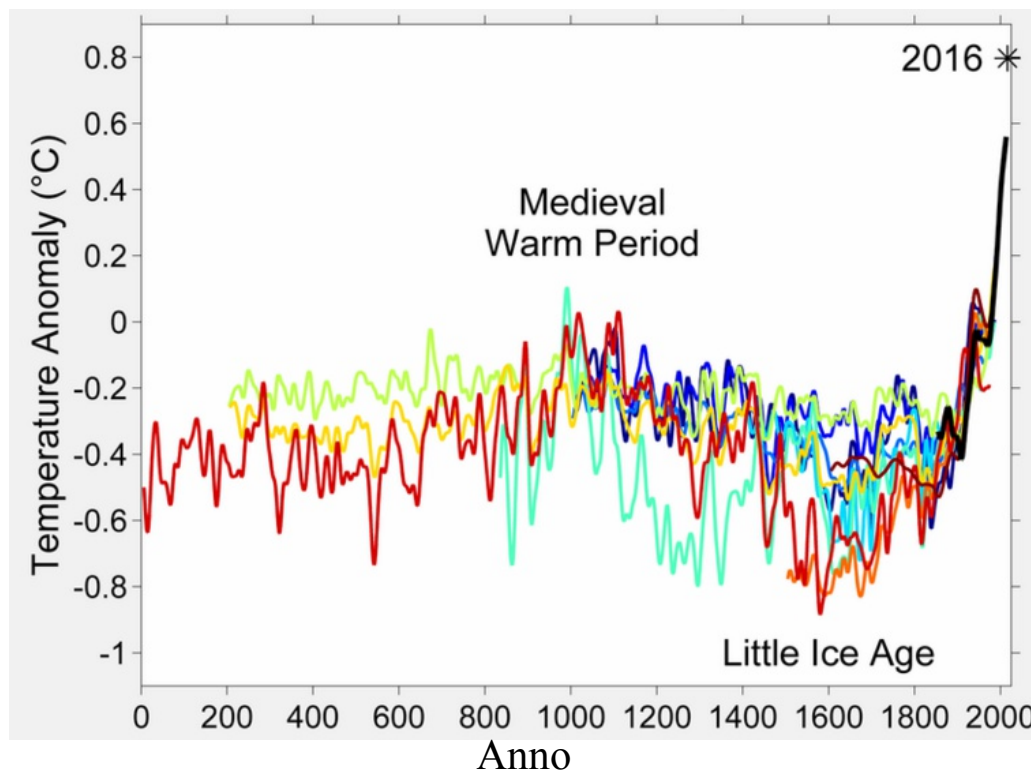
# L'evoluzione attuale del clima: livello medio del mare e copertura dei ghiacci



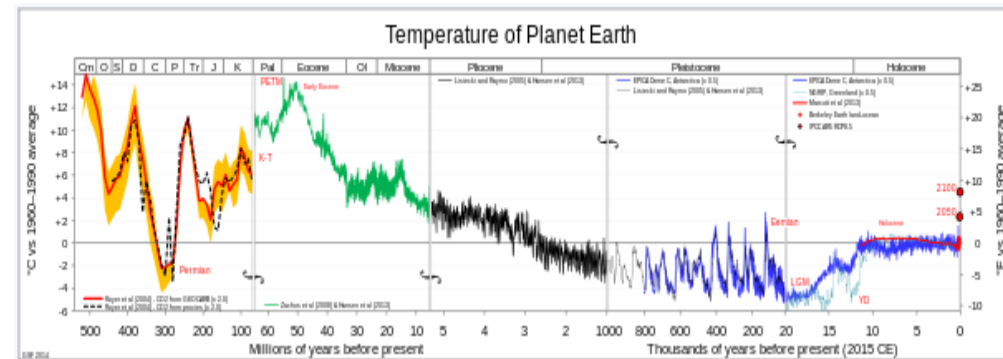
Fonte: Technical Summary IPCC WGI Fifth Assessment Report (2013) <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>

## L'evoluzione attuale del clima: cosa ci dicono le misure e le osservazioni

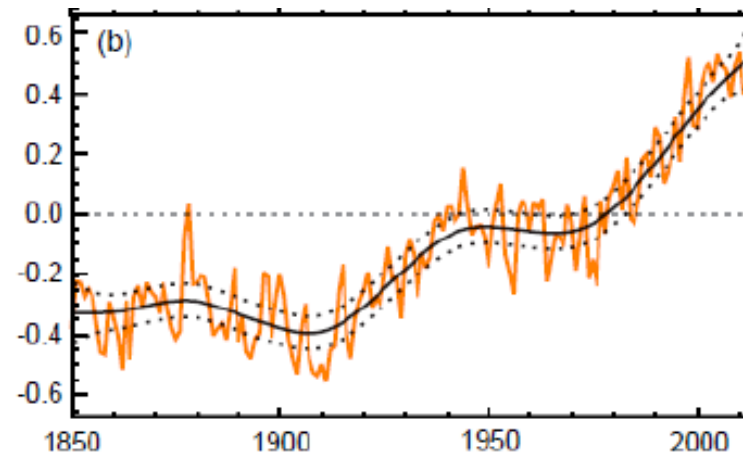
- Tutte le misure e le osservazioni raccolte negli ultimi 200 anni ci dicono che la **temperatura media del nostro pianeta sta aumentando**.
- La crescita della temperatura è molto **più rapida negli ultimi 50 anni** rispetto ai precedenti.
- Non ci sono evidenze di aumenti della temperatura così bruschi in passato.**



Fonte Wikipedia [https://it.wikipedia.org/wiki/Controversia\\_dell%27hockey\\_stick](https://it.wikipedia.org/wiki/Controversia_dell%27hockey_stick)



Fonte Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Geologic\\_temperature\\_record](https://en.wikipedia.org/wiki/Geologic_temperature_record)

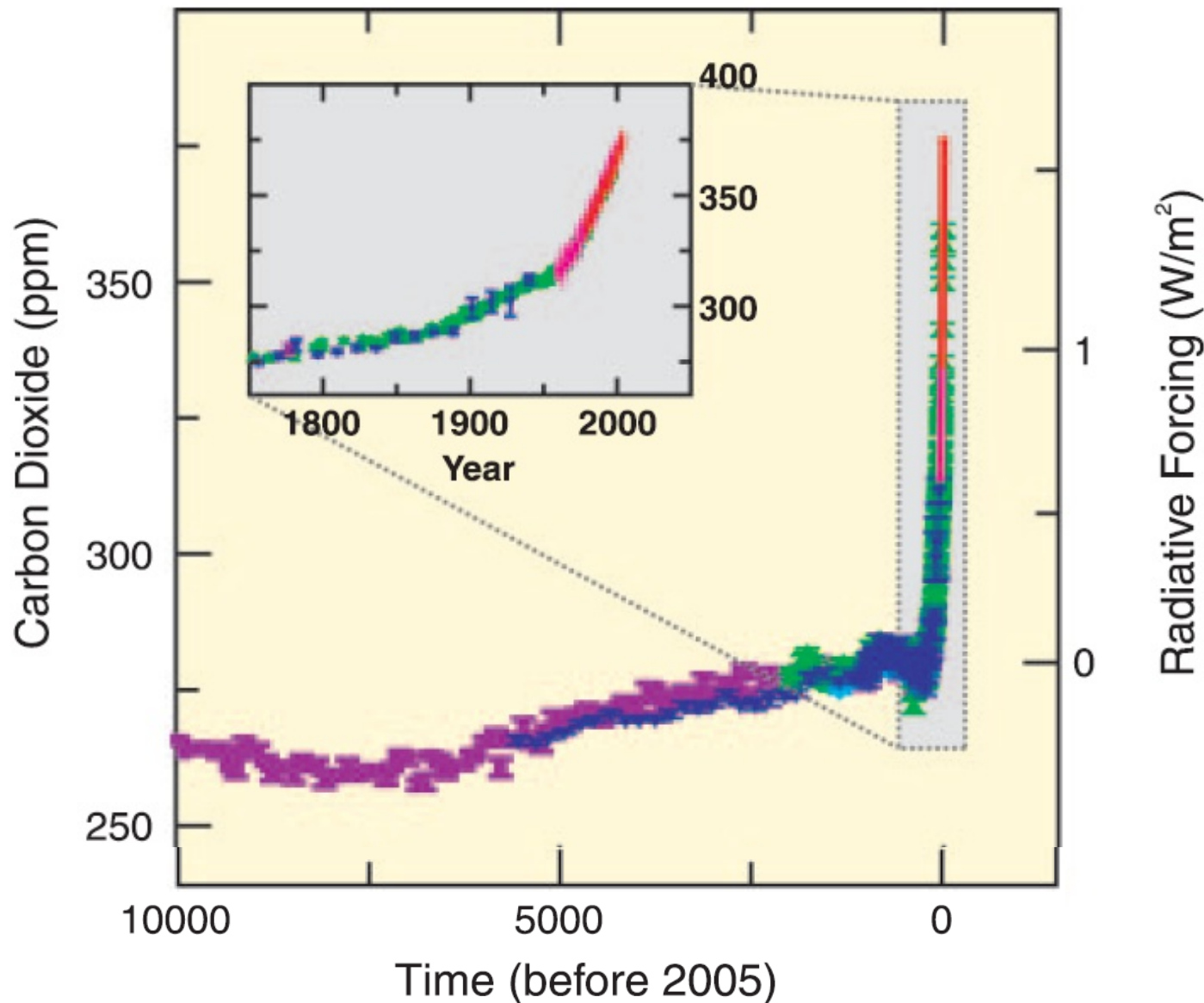


Fonte: IPCC WGI Fifth Assessment Report (2013) <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>



## Interpretazione dell'attuale rapido aumento della temperatura media planetaria

Variazioni della concentrazione di CO<sub>2</sub> in aria derivanti dai ghiacci permanenti e da misure dirette in aria



Dall'anno 1750 in poi la serie viene presentata ingrandita.

Colori diversi indicano risultati tratti da diverse ricerche.

In rosso sono riportate misure dirette, negli altri colori sono presentate stime dedotte da carote di ghiacci permanenti.

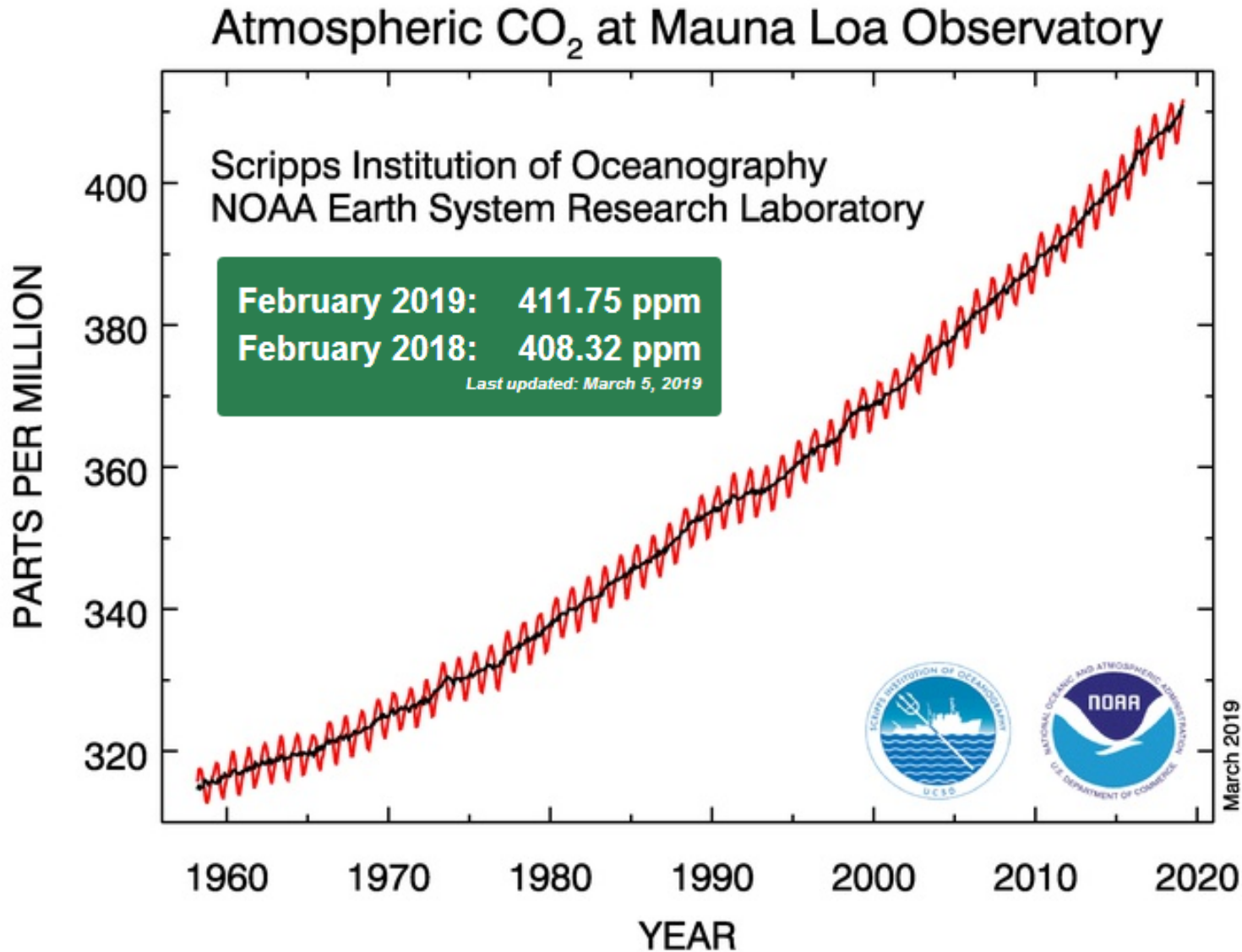
La forzante radiativa è relativa ai valori del 1750.

Figura tratta da: IPCC's Fourth Assessment Report (AR4) 2007

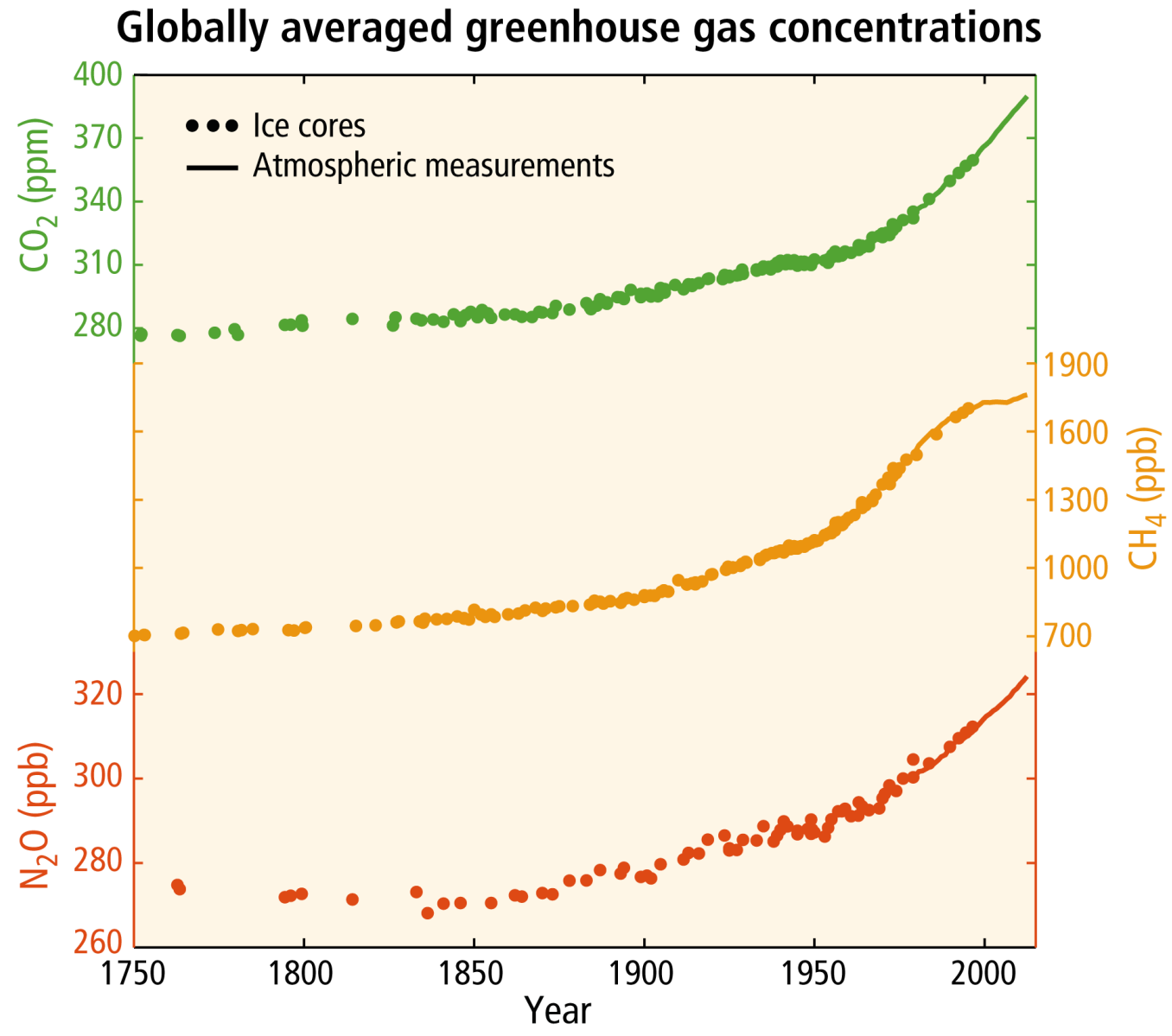


## Misure dirette della concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera negli ultimi cinquant'anni

Medie mensili della concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata in aria all'osservatorio Mauna Loa (Hawaii)



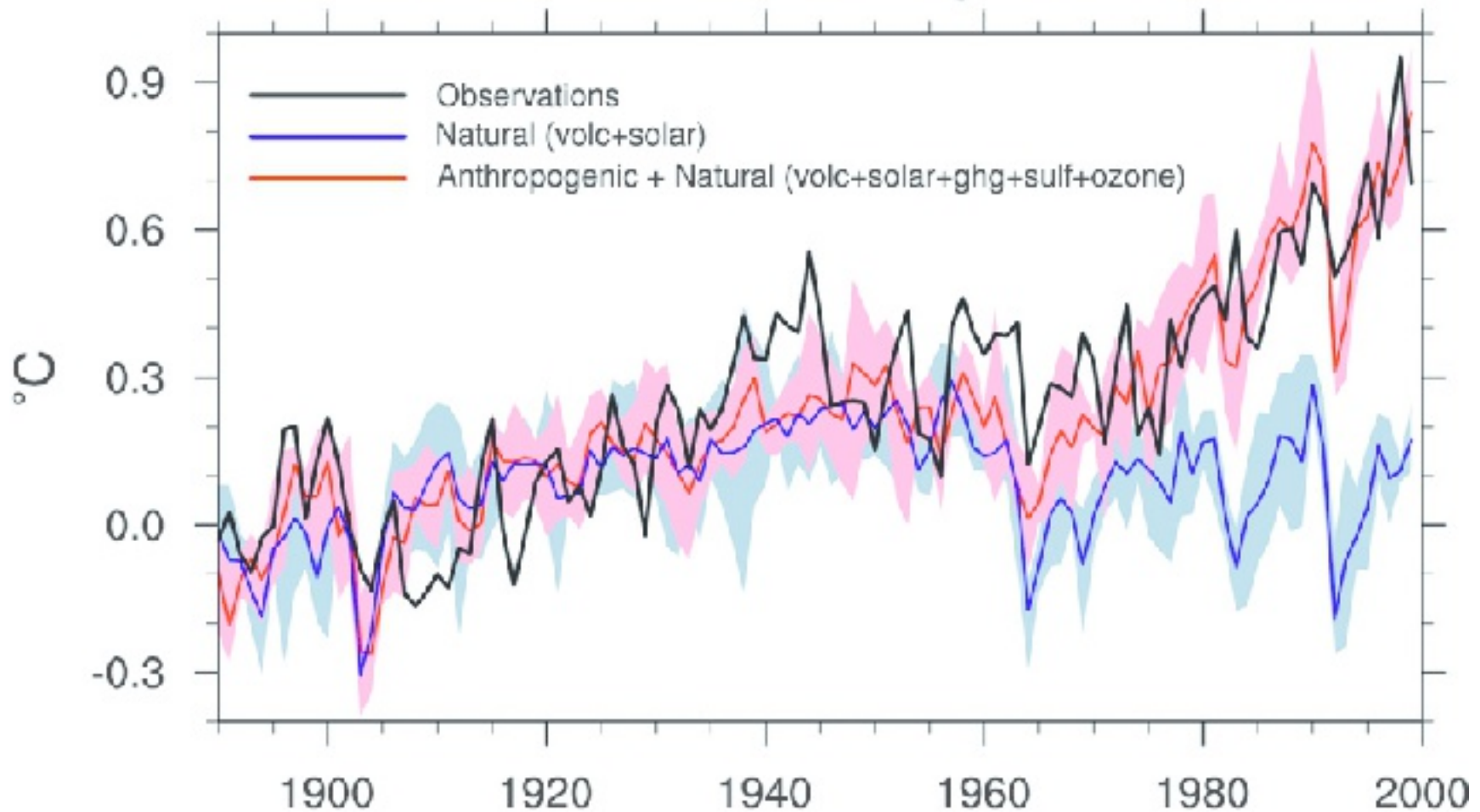
# Misure riguardanti altri gas responsabili dell'effetto serra



## Quantificazione del contributo antropico al cambiamento climatico in atto

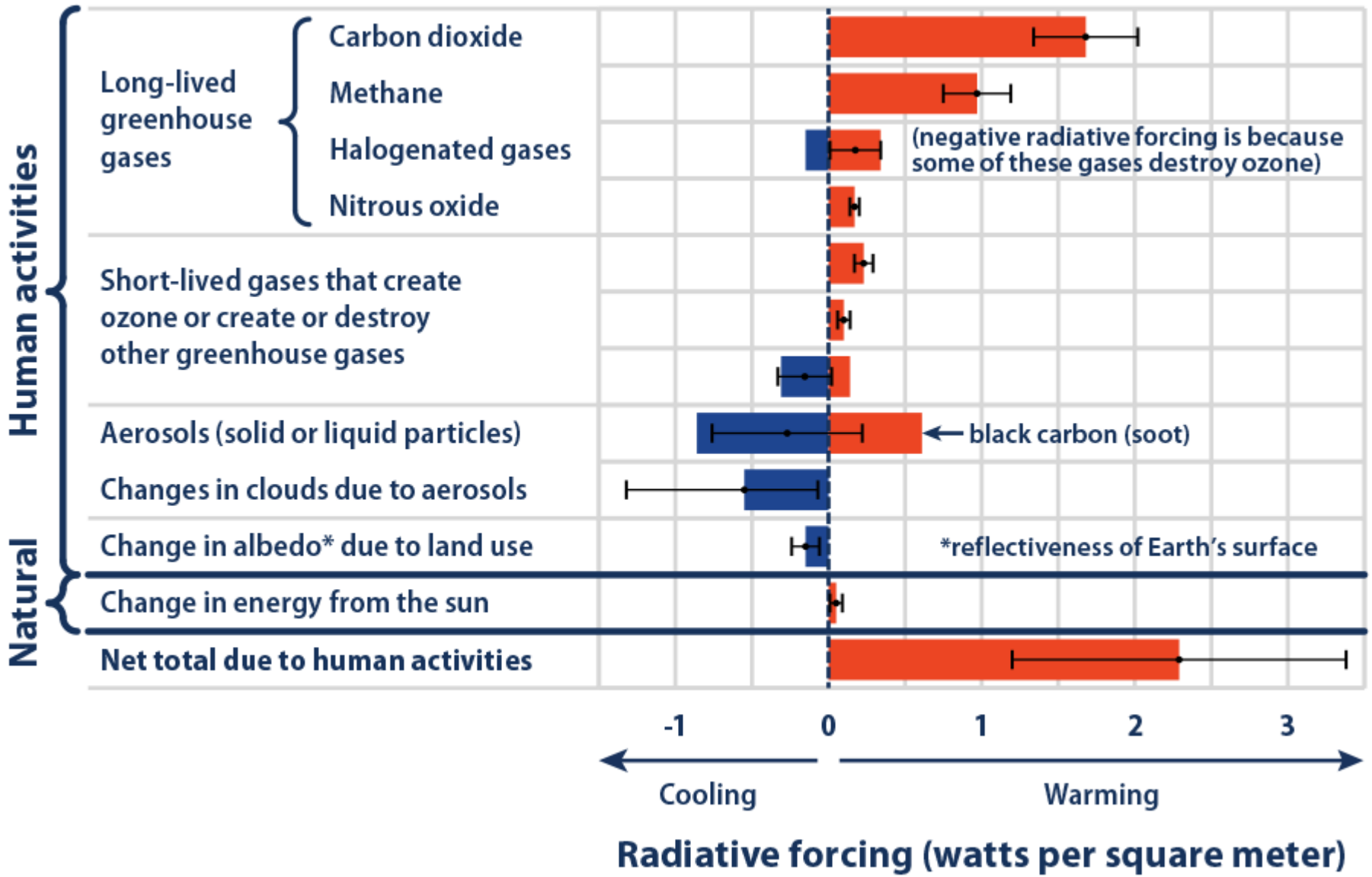
Utilizzando simulazioni numeriche è possibile quantificare gli effetti dell'aumento dei gas serra in atmosfera rispetto gli altri forzanti

Parallel Climate Model Ensembles  
Global Temperature Anomalies  
from 1890-1919 average



# Stima dei contributi al riscaldamento globale per ciascun forzante del sistema climatico

Stima del contributo umano sui forzanti interni del sistema climatico a partire dal 1750



Fonte EPA: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-climate-forcing>

## Le proiezioni sull'evoluzione del clima nel XXI secolo

Innanzitutto vanno considerati gli scenari emissivi dei gas che causano l'effetto serra

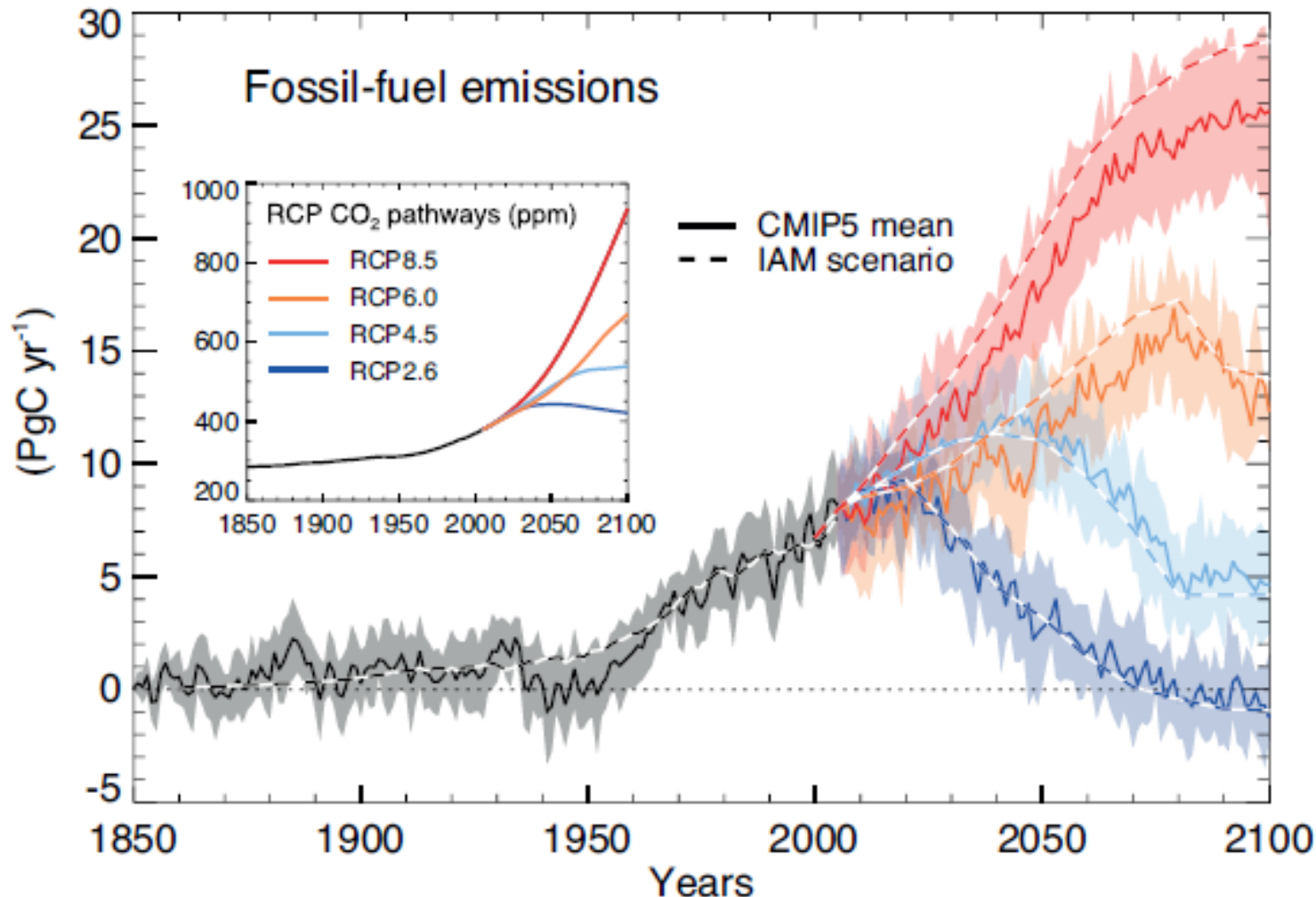
RCP 2.6 scenario di mitigazione (riduzione emissioni molto elevate)

RCP 4.5 scenario di stabilizzazione (riduzioni consistenti)

RCP 6.0 scenario di stabilizzazione (riduzioni blande)

RCP 8.0 scenario ad alte emissioni (“business as usual”)

Accordo di Parigi (2015)  
RCP 2.6



“...mantenere l’aumento della temperatura media globale ben al **di sotto di 2 °C** rispetto ai livelli preindustriali, e proseguire l’azione volta a limitare l’aumento di temperatura a 1,5° C...” (art. 2)

“...**raggiungere il picco globale di emissioni di gas ad effetto serra al più presto possibile**... raggiungere un equilibrio tra le fonti di emissioni antropogeniche e gli assorbimenti di gas ad effetto serra nella seconda metà del corrente secolo...” (art. 4)

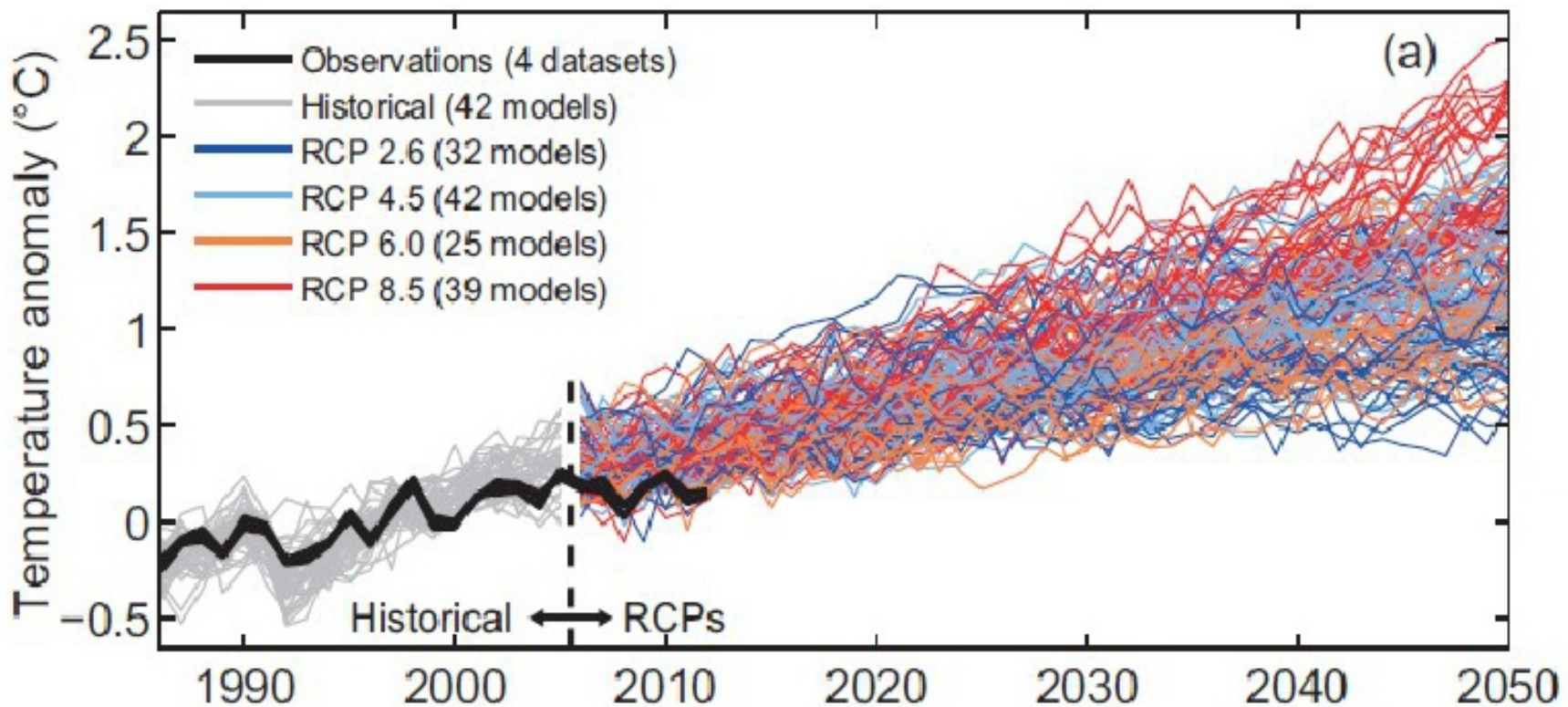


## Simulazioni numeriche globali con tutti i modelli numerici disponibili

Scenari a breve termine dell'aumento della temperatura media dell'atmosfera  
Si noti il gran numero di modelli utilizzati

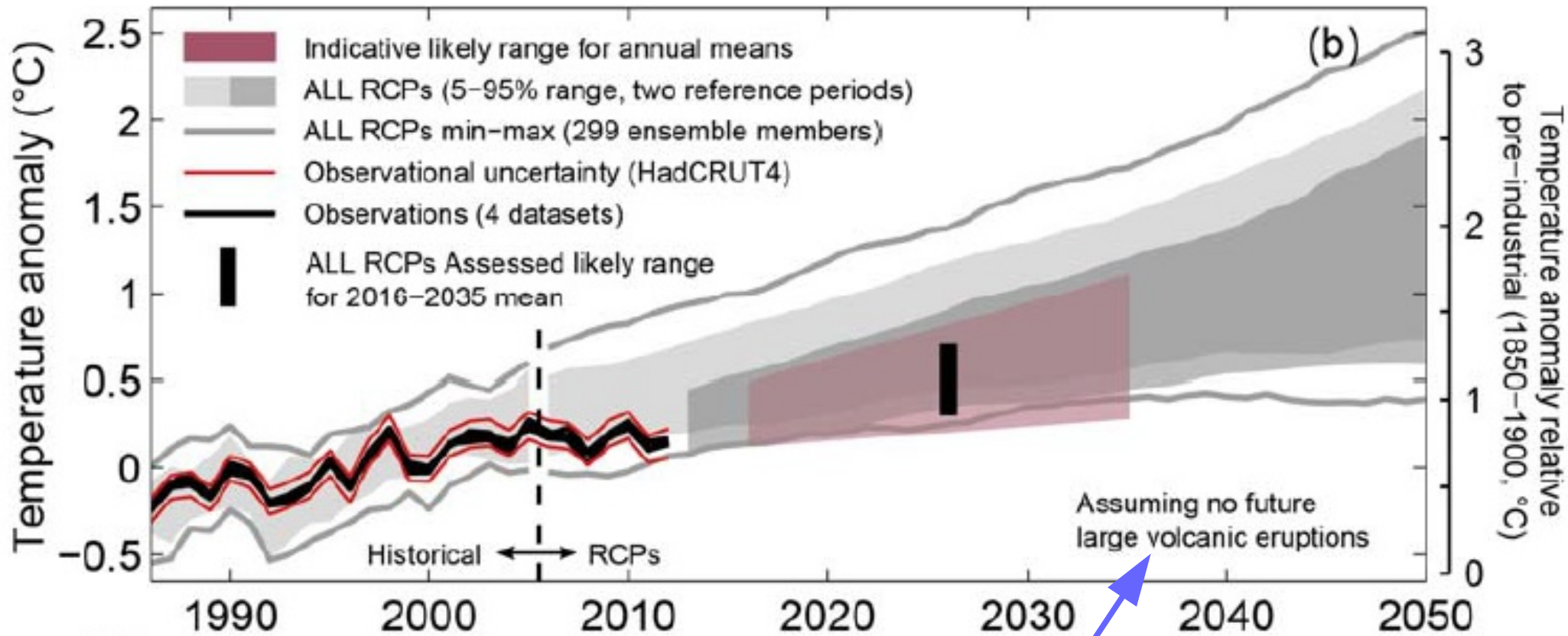
*Una proiezione sull'evoluzione di un processo naturale è utile solo se ad essa è associata l'incertezza dell'evoluzione simulata.*

Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005



## Incertezza nell'evoluzione della temperatura planetaria simulata

Sintesi di tutti i risultati delle simulazioni svolte, valutando la probabilità del verificarsi dello scenario

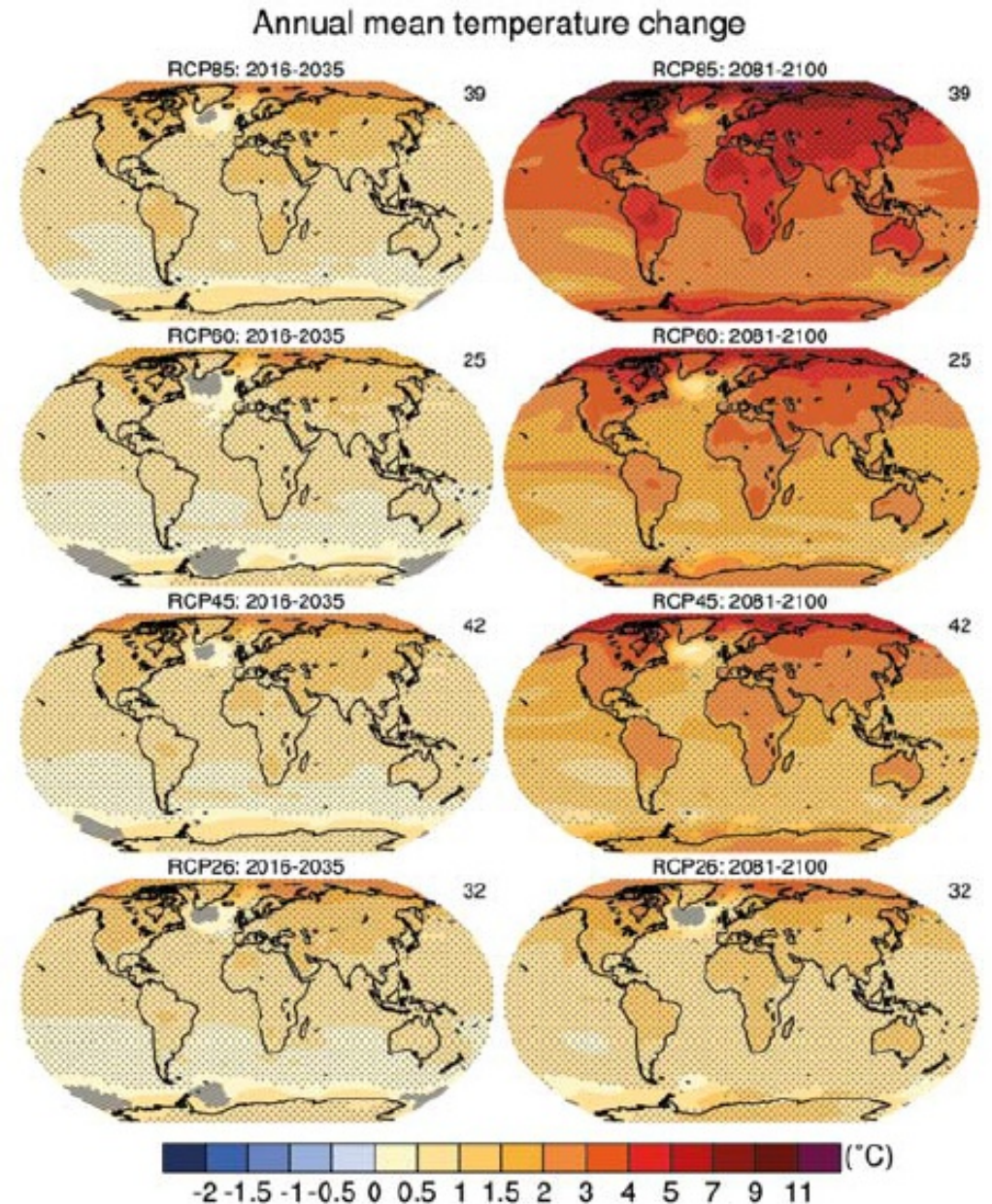
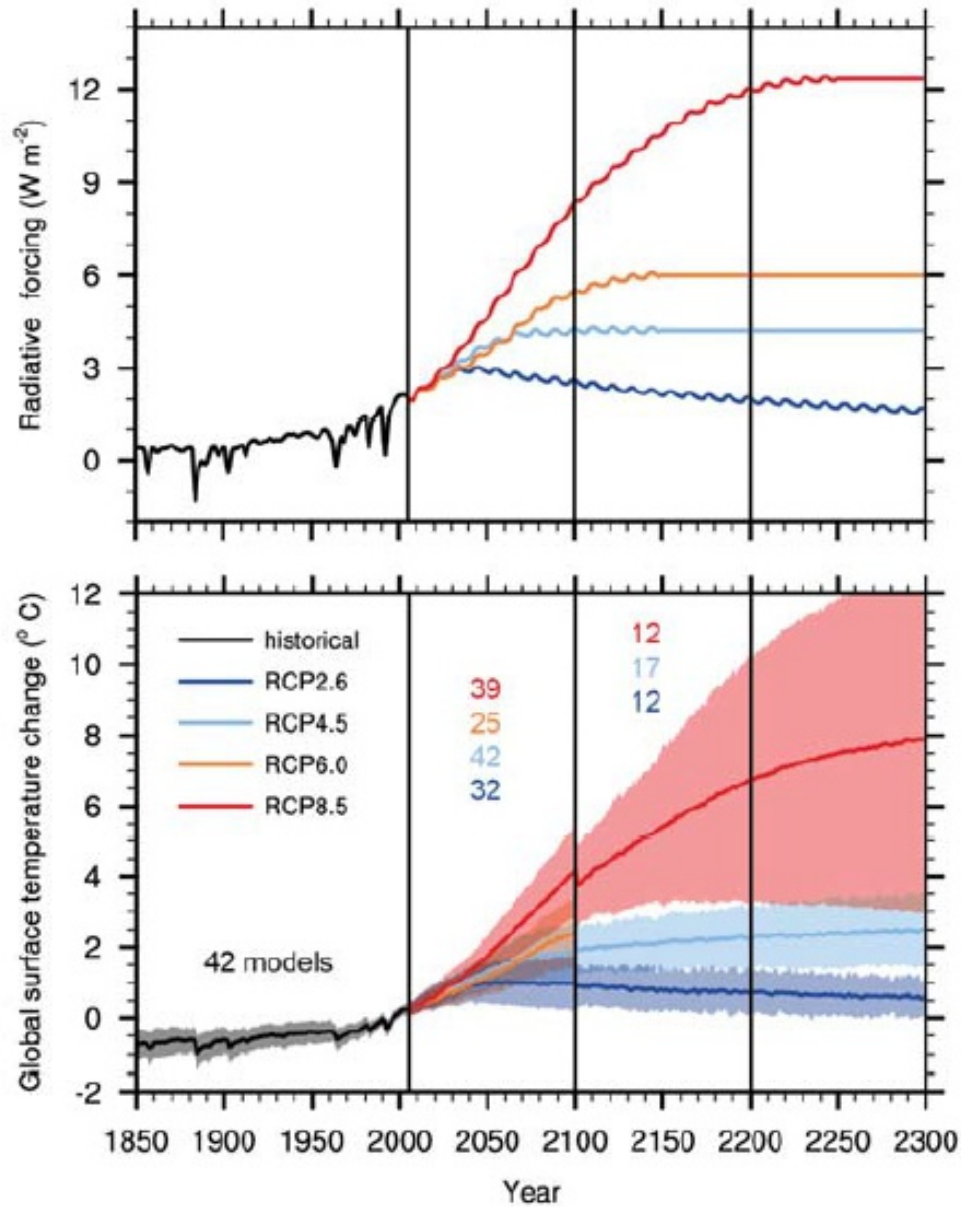


Importante tenere presente che queste simulazioni non assumono **eventi imponderabili** degli altri forzanti naturali del sistema clima, **oppure del comportamento dell'intera specie umana**



# Quali gli scenari a lungo termine per la temperatura superficiale del pianeta

## Anomalia della temperatura media annuale rispetto al periodo 1986-2005

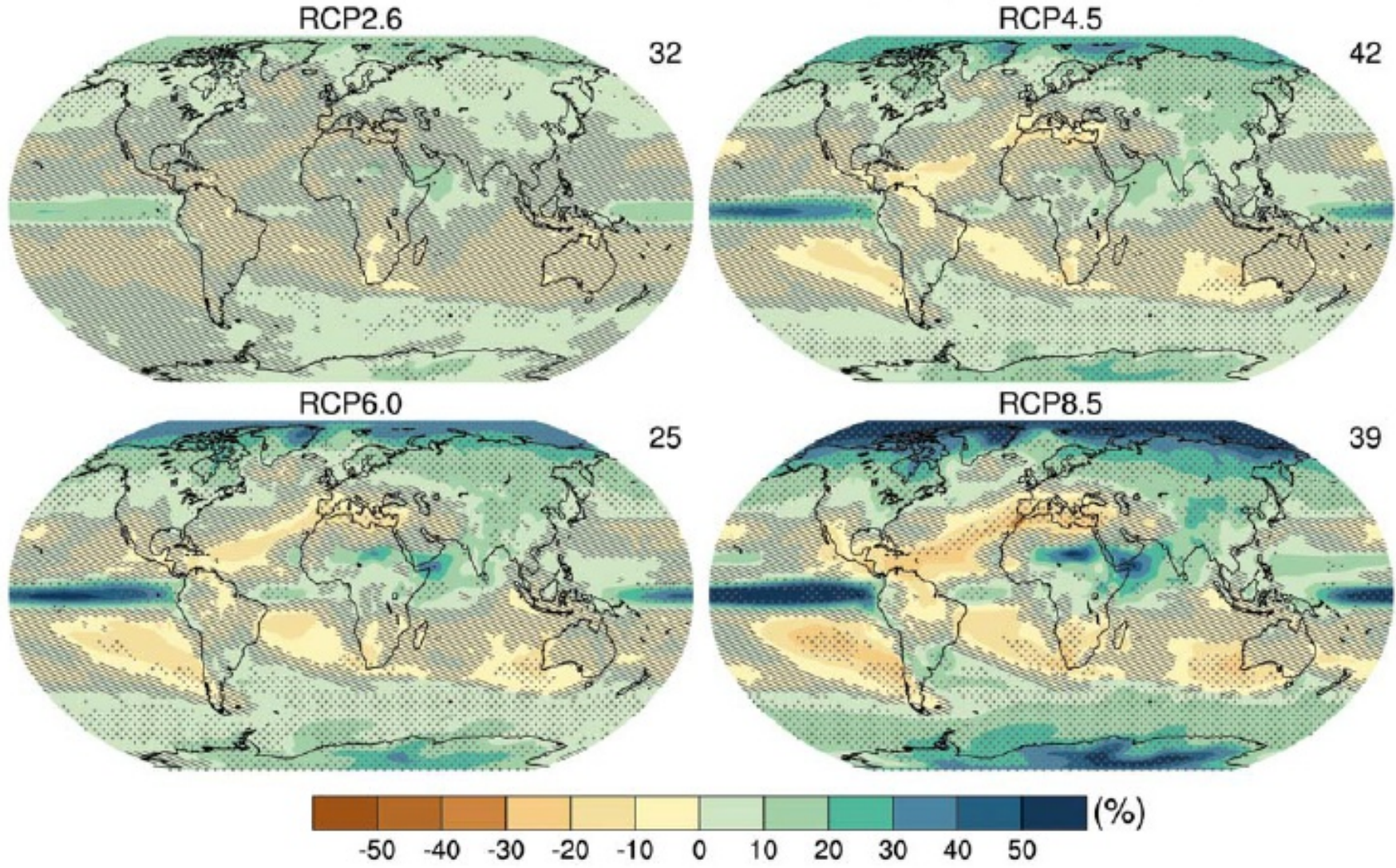




# Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala globale: le precipitazioni

Variatione percentuale delle precipitazioni medie annuali rispetto al valore 1986-2005

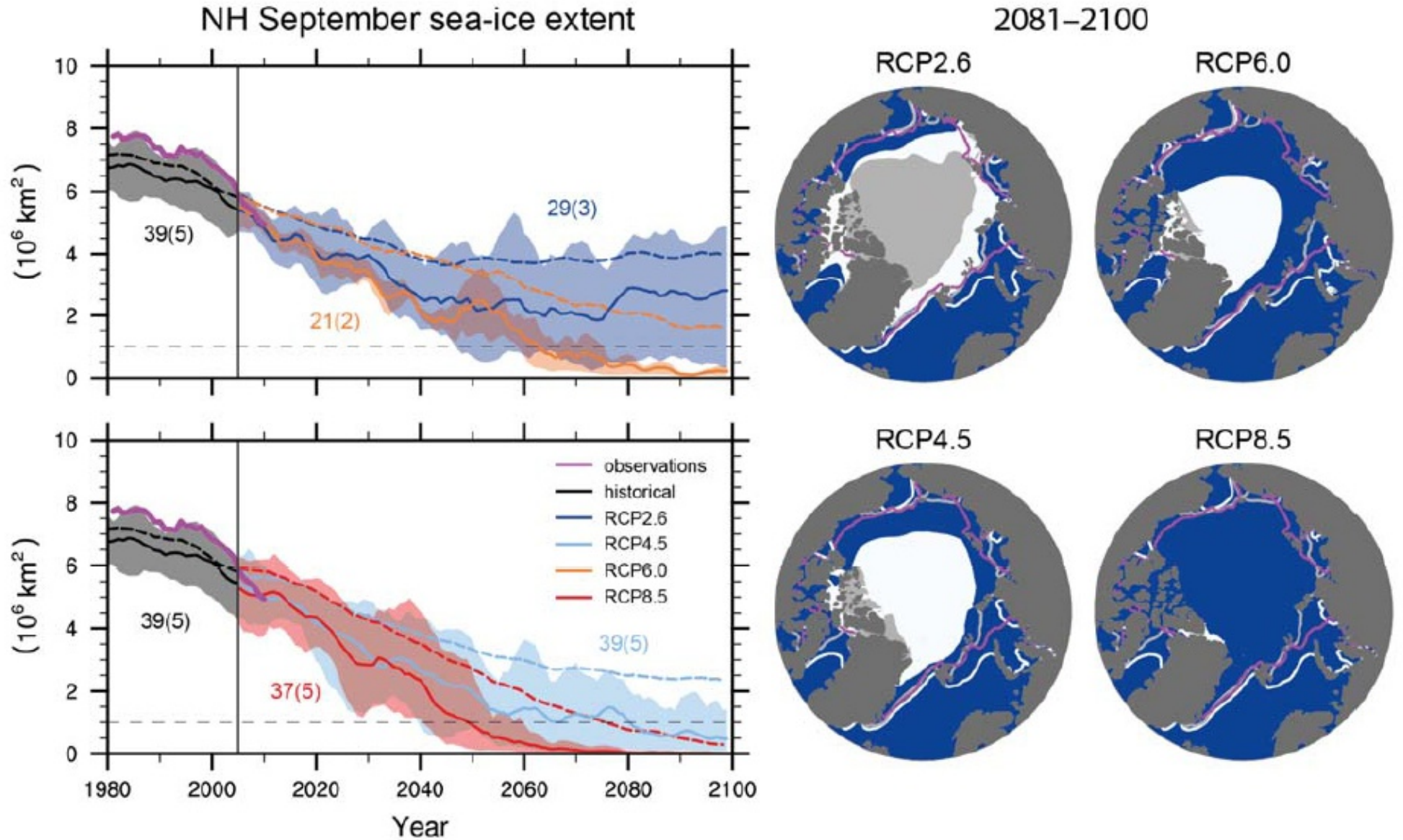
## Annual mean precipitation change (2081-2100)





## Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala globale: i ghiacci artici

Proiezione dell'estensione dei ghiacci artici nel mese di settembre (mese in cui è minore)

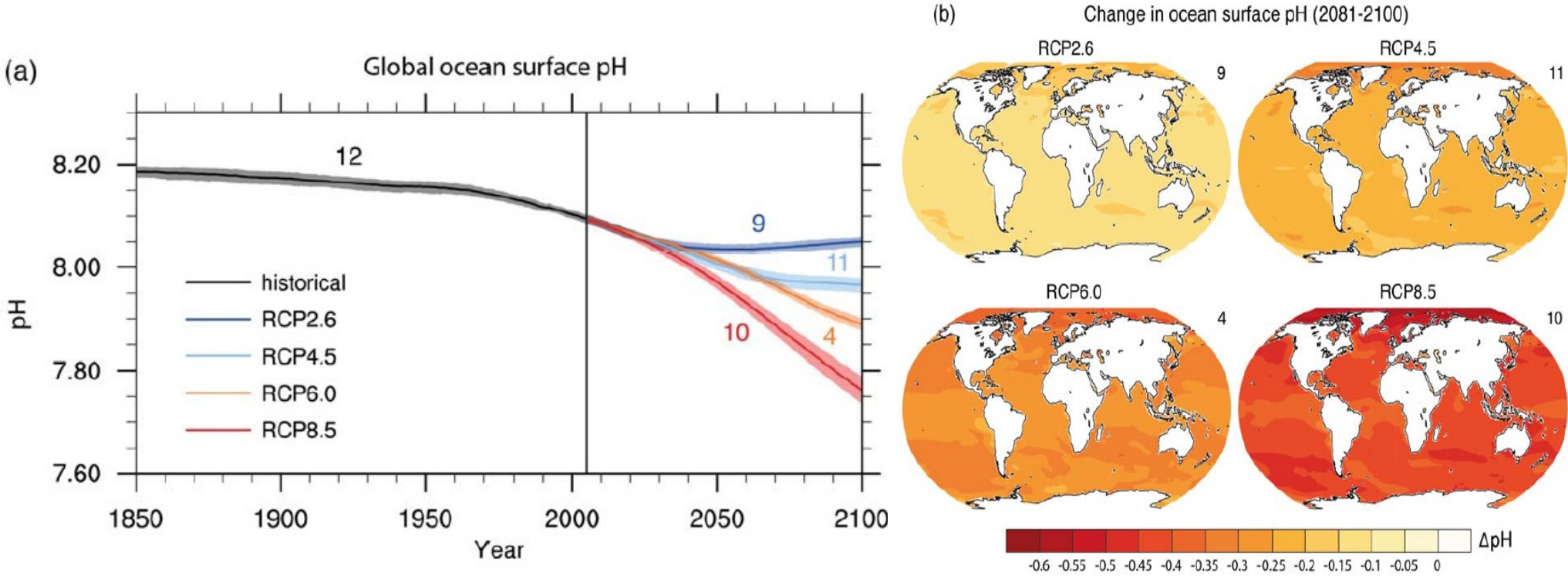




# Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala globale: l'acidificazione del mare

## Proiezione dell'acidificazione delle acque dei mari (mappe rispetto al periodo 1986-2005)

Aumentando la CO<sub>2</sub> nell'aria incrementerà anche il passaggio di tale gas nelle acque dei mari che reagendo chimicamente con l'acqua ne aumenta l'acidità. (il processo è già in corso)



# Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala globale: aumento del livello del mare?

Cosa accade del livello del mare se i ghiacci artici si sciolgono? E se dovessero sciogliersi quelli antartici? Bisogna fare molta attenzione a valutare quali saranno i fenomeni più verosimili nel breve e medio periodo

## L'aumento del livello medio del mare e della temperatura planetaria

Una prima risposta: il ghiaccio si scioglie e aumenta la quantità d'acqua presente nei mari

I ghiacci marini contribuiscono poco (2.5%)  
Sono già immersi nel mare



Rilevante è lo scioglimento dei ghiacci perenni continentali

Si stima che sciogliendo completamente i ghiacci di:

Groenlandia → equivalente ad aumento livello marino medio di ~ 6 m

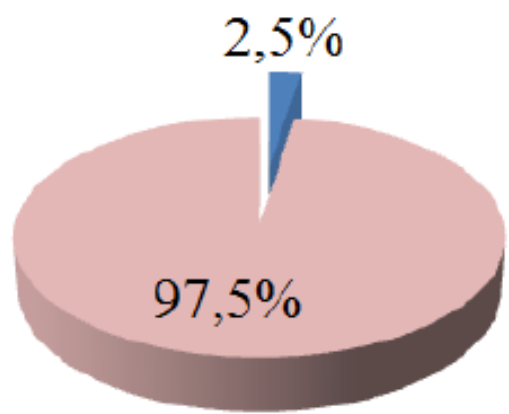
Antartide → equivalente ad aumento livello marino medio di ~ 60 m

Fonte: National & Snow Data Center <https://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/icesheets.html>

# Una corretta valutazione del livello del mare futuro tiene conto della distribuzione dell'acqua sul pianeta

## Attuale distribuzione dell'acqua sul pianeta Terra

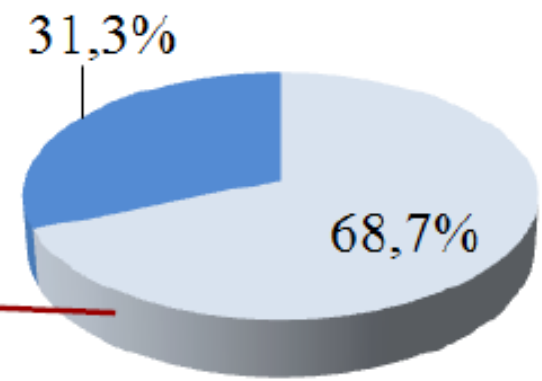
La maggior parte dell'acqua presente su nostro pianeta è presente nei mari



- Acqua dolce
- Acqua salata



La maggior parte dell'acqua dolce è allo stato solido

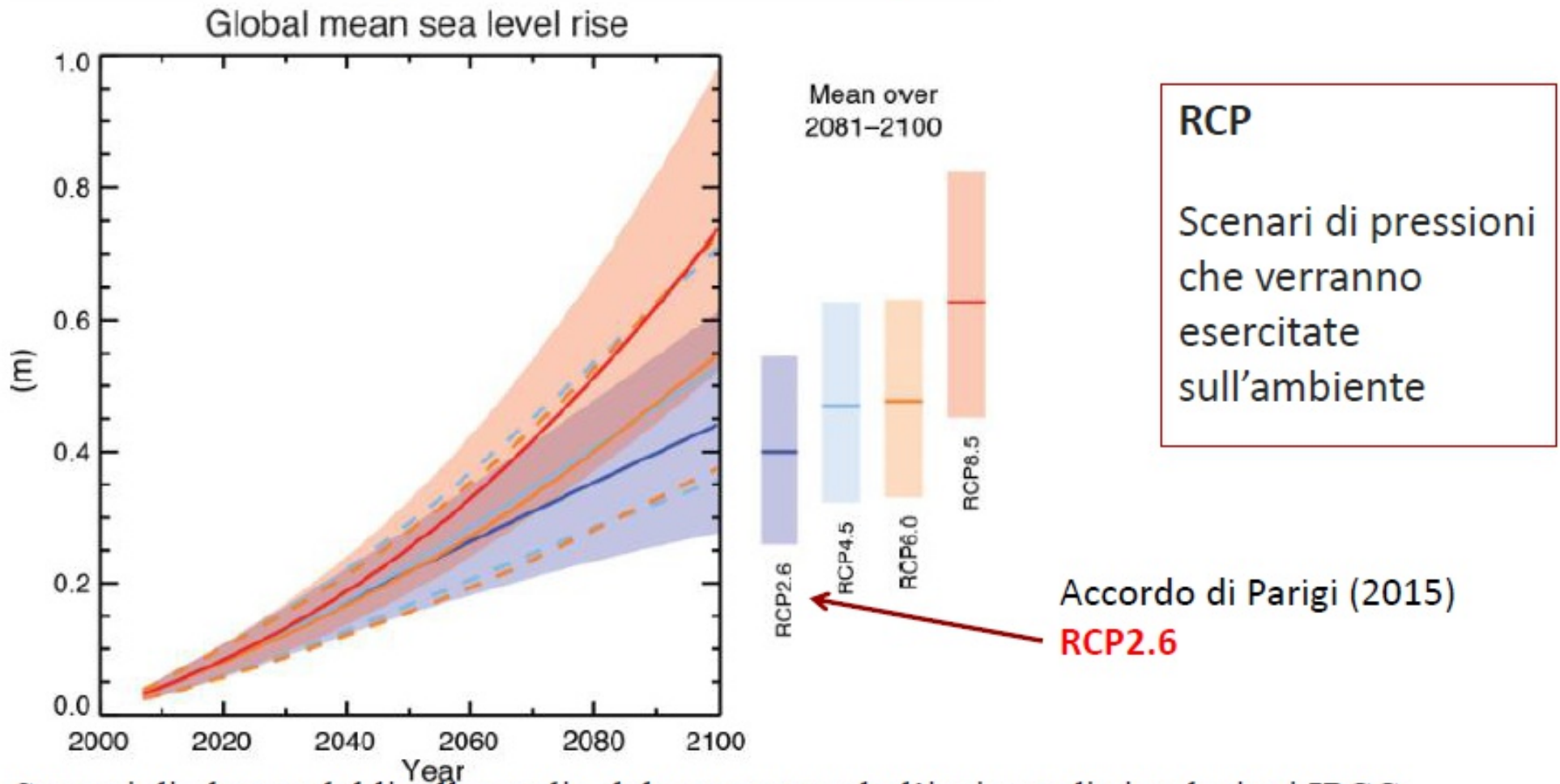


- Ghiacci permanenti
- Acqua liquida

<b>Ghiacci permanenti</b>	
Antartide	90%
Groenlandia	10%

## Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala globale: espansione dell'acqua del mare

L'espansione dell'acqua marina, conseguenza dell'aumento della temperatura del mare negli strati superficiali è la principale causa dell'innalzamento del livello del mare nei prossimi decenni



Scenari di altezza del livello medio del mare secondo l'insieme di simulazioni IPCC

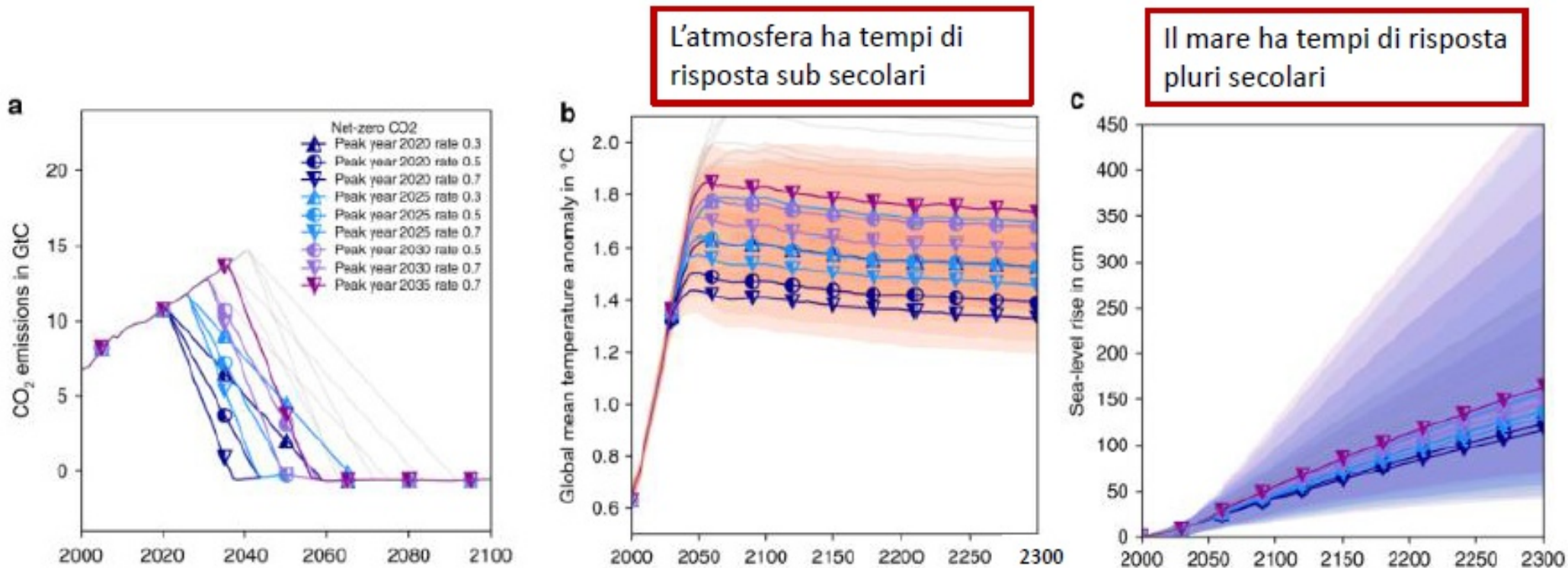
Fonte: ARW5 (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/>)



Gli impatti dei cambiamenti climatici a scala globale: il mare ha tempi di risposta più lunghi rispetto all'atmosfera, a causa della sua grande capacità termica

Risposte del mare alle riduzioni delle emissioni di gas serra

Per quanto tempo e di quanto continuerà a salire il livello del mare se verrà rispettato l'accordo di Parigi?



Adattato dalla fonte: Nature Commun. 2018; 9: 601.

Published online 2018 Feb 20. doi: [10.1038/s41467-018-02985-8](https://doi.org/10.1038/s41467-018-02985-8)



# Conseguenze dell'innalzamento del livello del mare in Regione: evidenze e ipotesi

## I fatti riguardanti l'andamento del livello del mare a Trieste

Aumento del livello medio su lungo periodo  $1.3 \pm 0.2$  mm/anno (Zerbini et al., 2017).

Ricordiamo la stima globale secolare di  $1.7 \pm 0.2$  mm/a relativa al 1901-2010 (Church et al., 2013),

Nel Mediterraneo il livello del mare è aumentato con discontinuità (minimo tra 60' e i 90' del secolo XX)

Aumento rapido,  $4.4$  mm/anno nel 1992-2016 a Trieste (Marcos e Tsimplis, 2008)

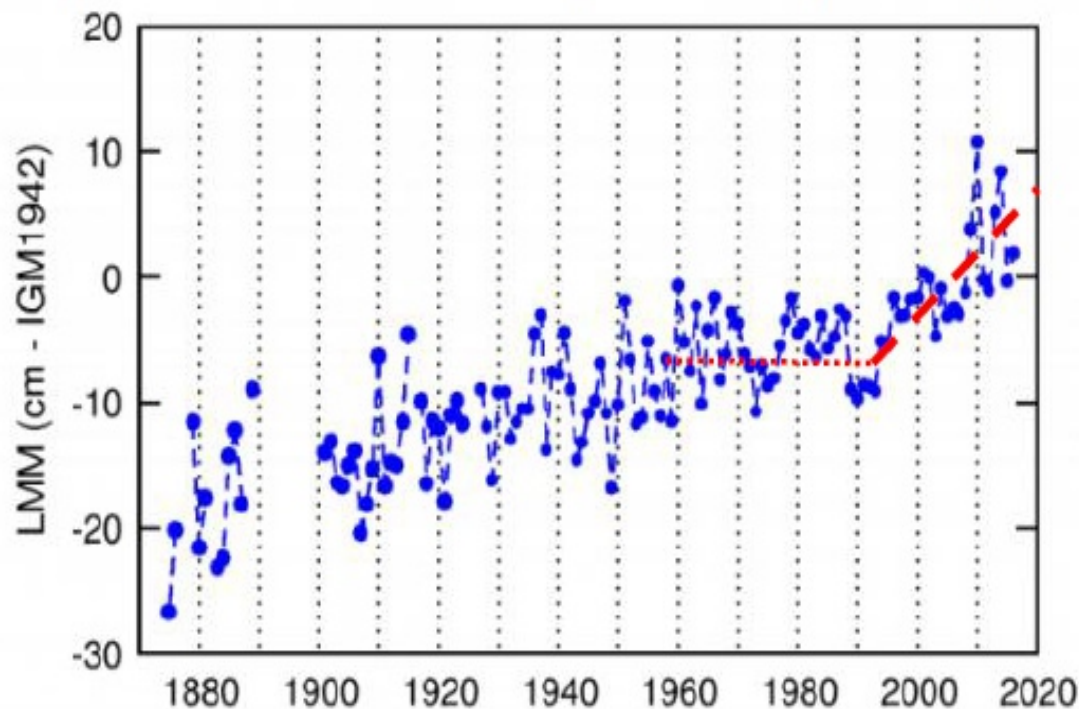


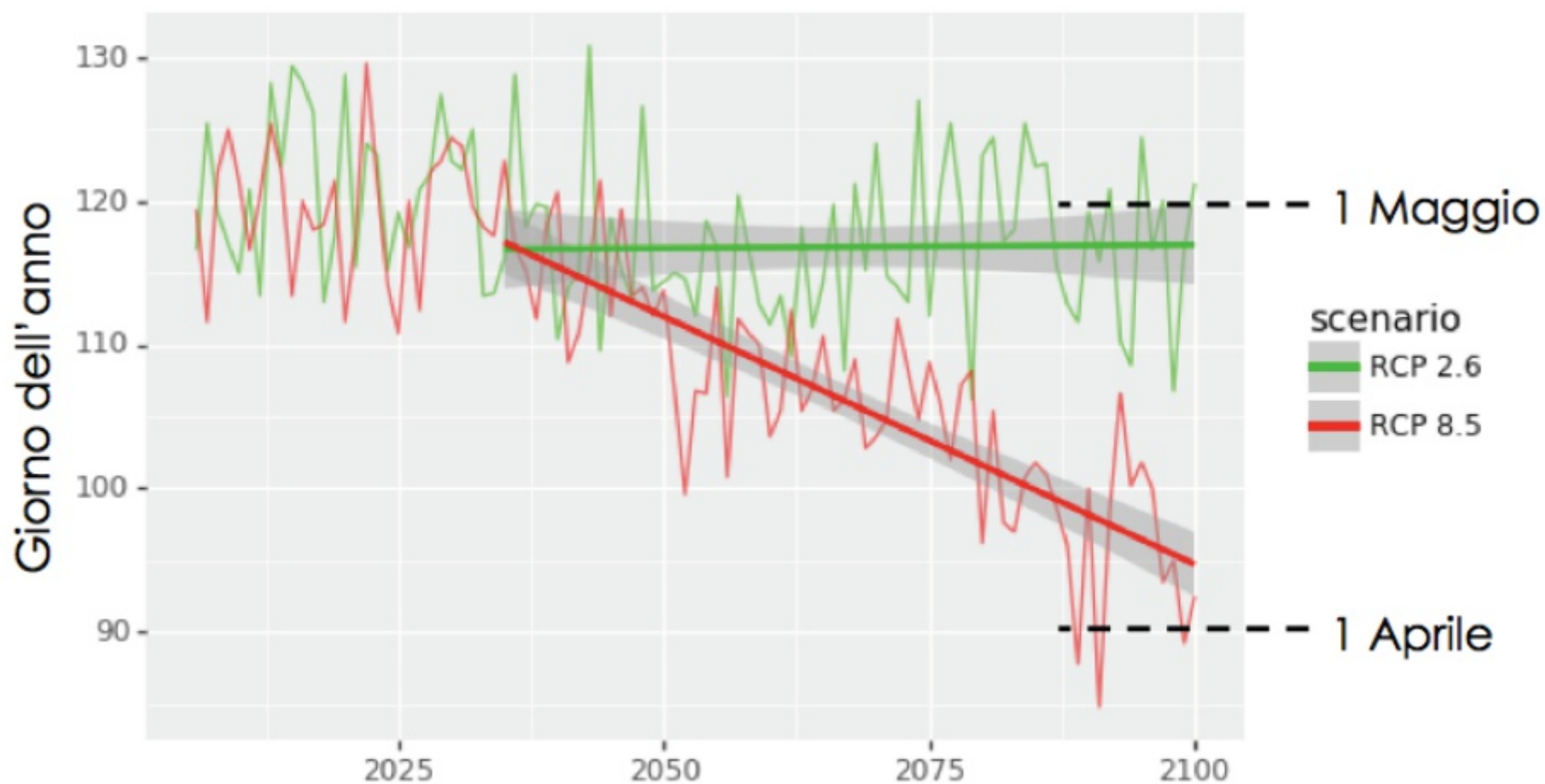
Fig. 1.1.5.8 – Livello marino medio annuale a Trieste rispetto allo Zero IGM1942. Dati CNR, Istituto di Scienze Marine.

Dal recente focus sui cambiamenti climatici – Regione FVG e ARPA FVG (2017) Credit to: Raicich F. e Colucci R. ISMAR CNR Trieste

- ❏ Aumento degli eventi estremi di acqua alta e di erosione costale accentuata
- ❏ Variazioni nei deflussi dei fiumi alla foce
- ❏ Modifica dei flussi d'acqua e delle proprietà termiche delle lagune
- ❏ Intrusione cuneo salino

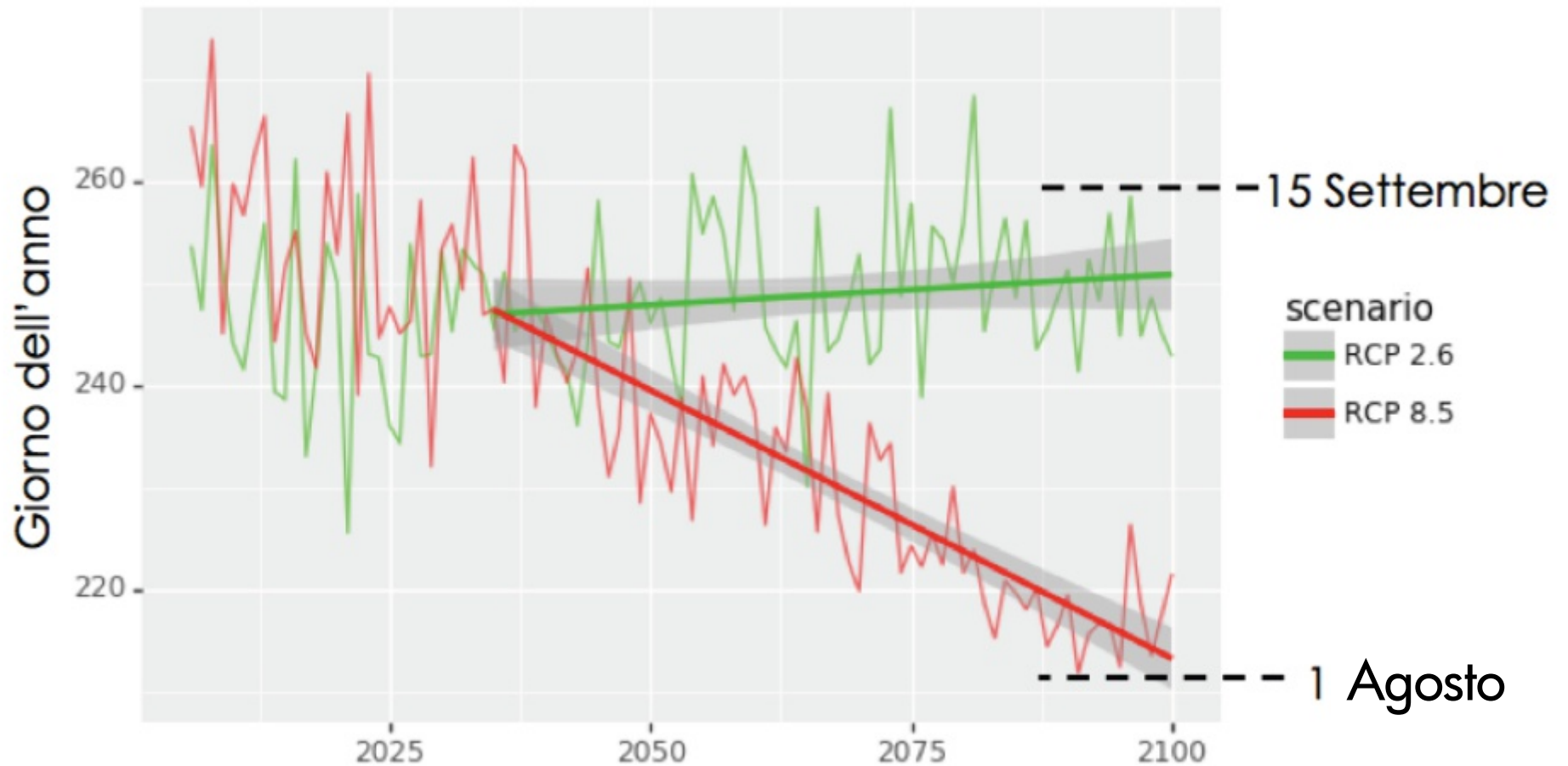
## Conseguenze del cambiamento climatico in Regione: la gemmazione della vite

Usando opportunamente i risultati dei modelli meteorologici sui cambiamenti climatici e i modelli di crescita delle piante è possibile costruire degli scenari di impatto su colture economicamente rilevanti, come la vite, il mais ecc.



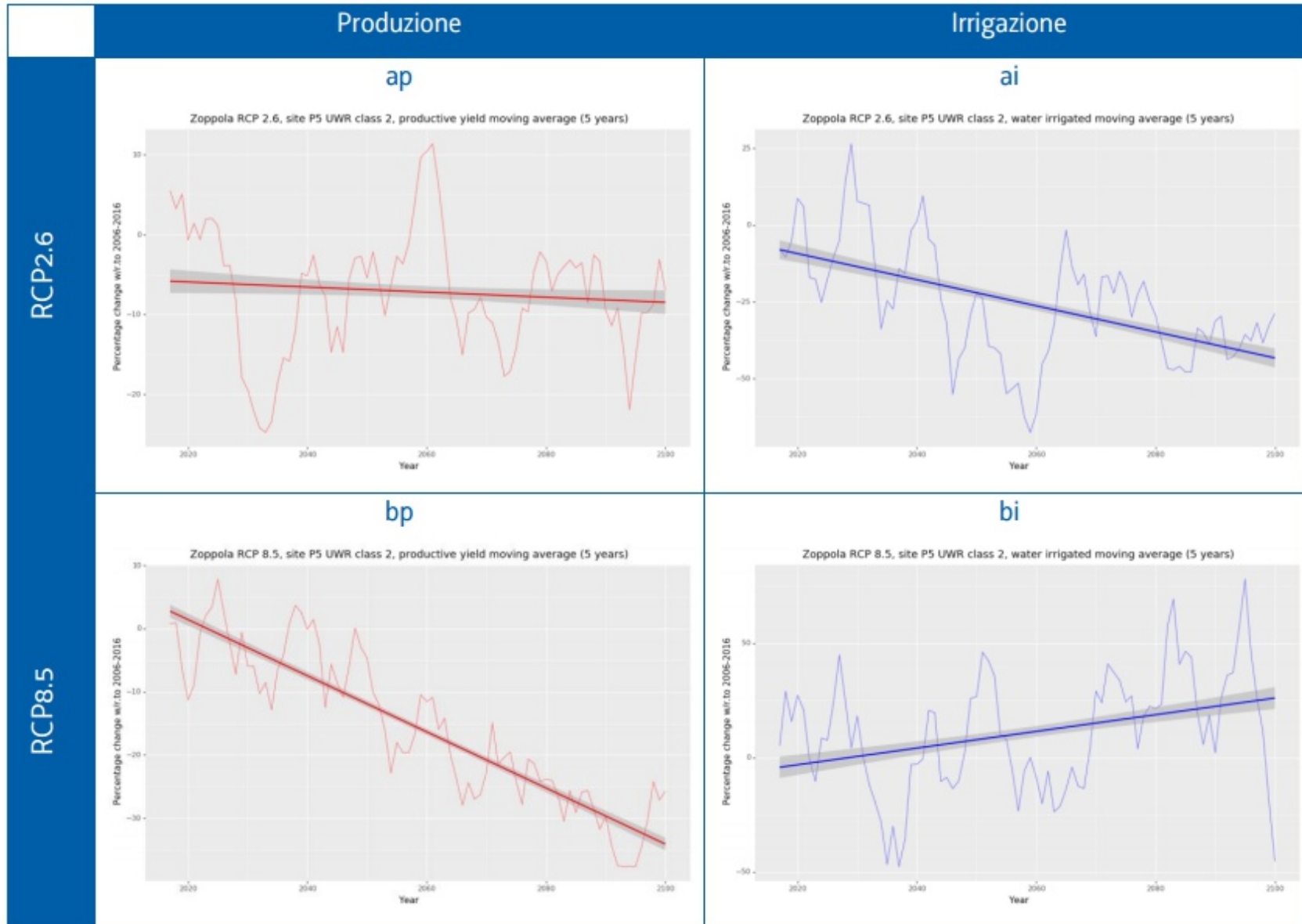
## Conseguenze del cambiamento climatico in Regione: la maturazione dell'uva

La maturazione dell'uva (vitigno Friulano) potrebbe anticipare di oltre un mese rispetto a quanto avviene attualmente, nel caso di scenario Business as usual.



## Conseguenze del cambiamento climatico in Regione: produzione di mais

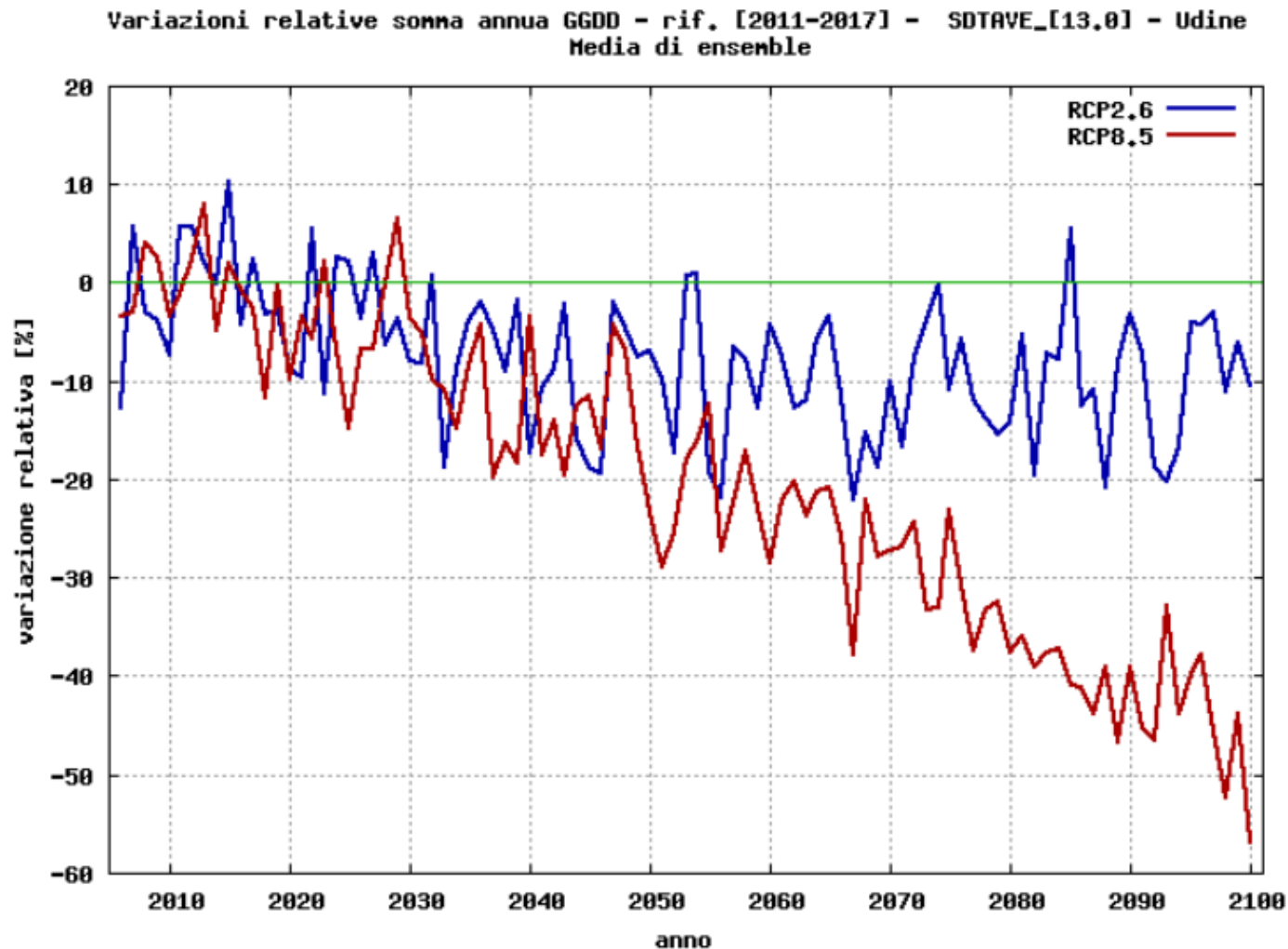
Scenari di produzione del mais, per particolari terreni, e consumi d'acqua necessari per evitare lo stress alla piante ottenuti applicando scenari di cambiamento climatico e modelli di crescita culturale.





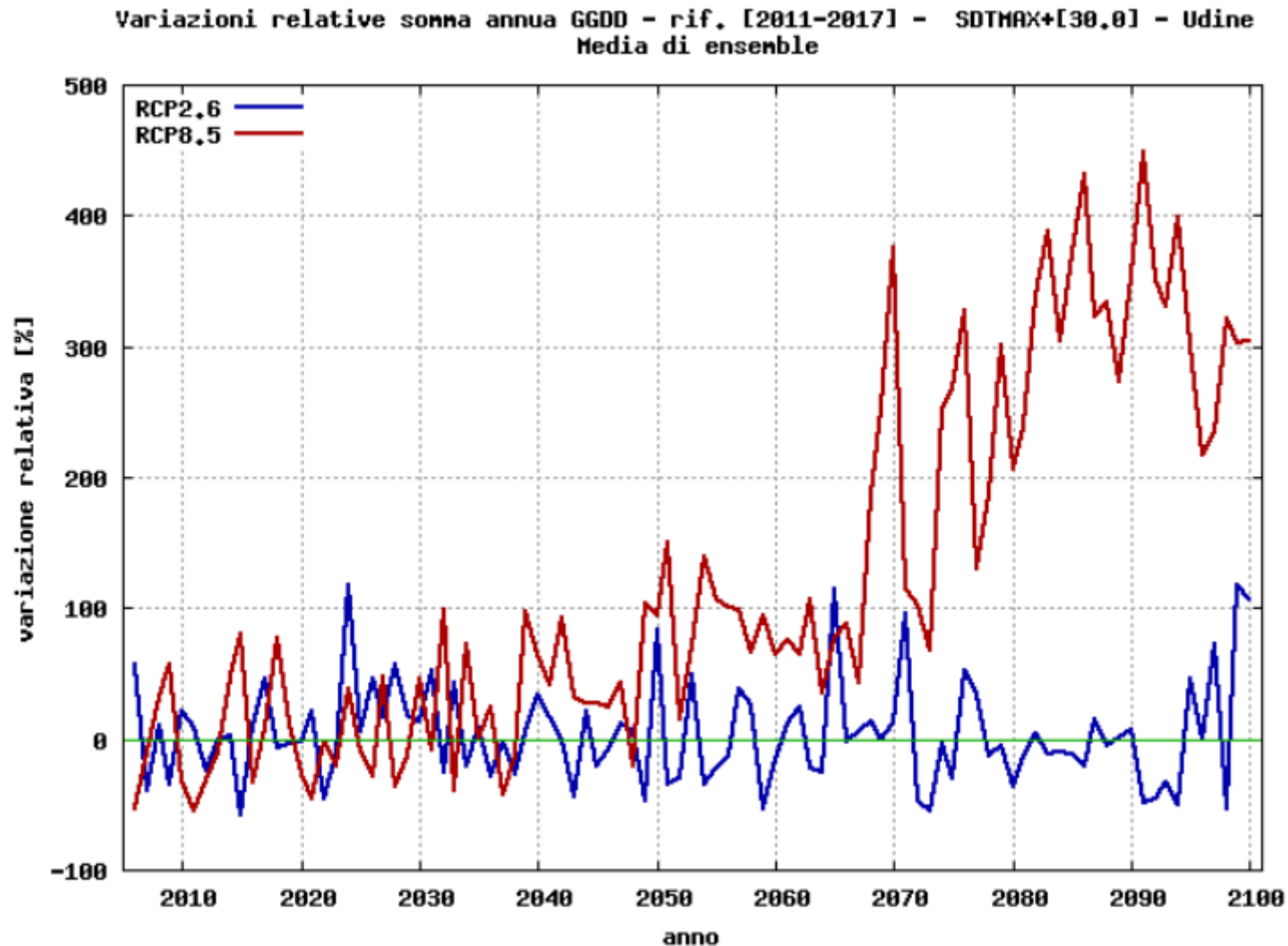
## Conseguenze del cambiamento climatico in Regione: la riduzione del riscaldamento domestico invernale

Esiste correlazione lineare tra consumi mensili di gas metano e i gradi giorno, in base alla quale è possibile realizzare scenari di risparmio energetico per mancato riscaldamento domestico, nella stagione fredda



## Conseguenze del cambiamento climatico in Regione: l'aumento per il raffrescamento domestico estivo

Analogamente a quanto descritto per il riscaldamento è possibile realizzare scenari di aumento del consumo energetico per esigenze di raffrescamento domestico, nella stagione calda



## Conseguenze del cambiamento climatico: gli eventi meteorologici estremi; cosa dire?

**Gli eventi meteorologici estremi sono di diversi tipi, quindi la loro variazione in frequenza ed intensità in rapporto al cambiamento climatico in atto va valutata per ciascun tipo**

**Eventi a larga scala e associati alle variazioni della temperatura e delle piogge medie**

*Gli elementi di proiezione futura di cui siamo in possesso indicano un verosimile incremento*

**Eventi estremi e localizzati**

**Cicloni extra-tropicali, cicloni tropicali, temporali, tornado, colpi di vento, ecc**

**Attenzione:** *Non siamo ancora in grado di stabilire con un ragionevole livello di confidenza che il numero di eventi e la loro intensità aumenterà nel corso dei prossimi anni*

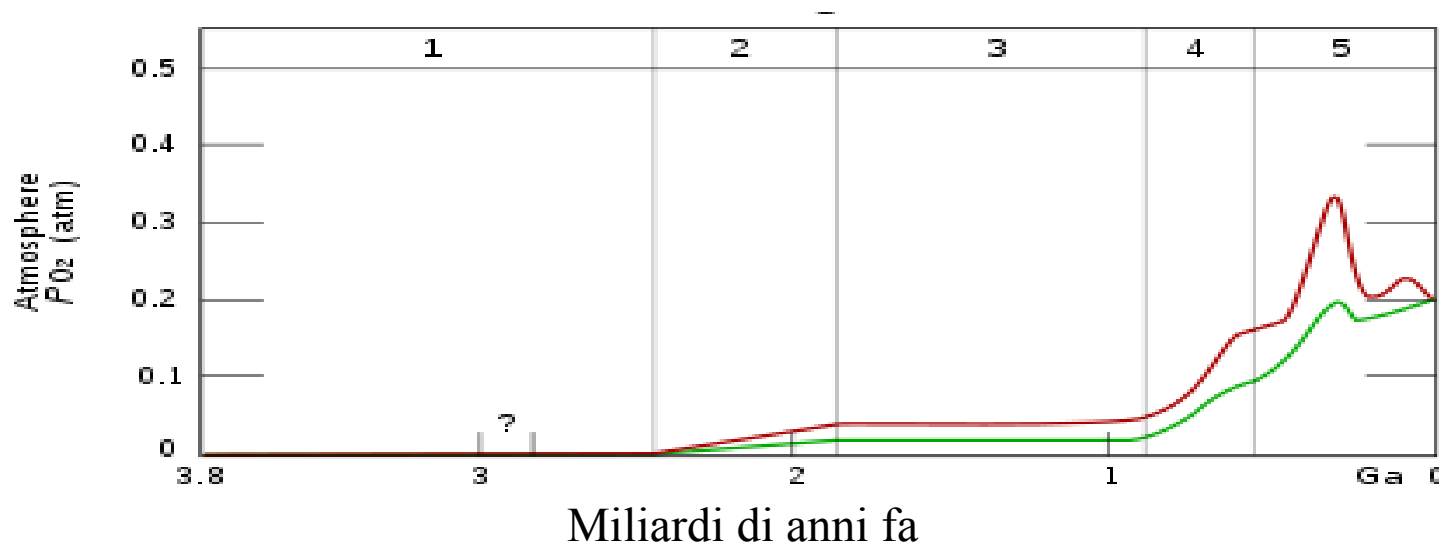


## Le specie viventi sul nostro pianeta contribuiscono all'equilibrio del sistema clima

Gli **esseri viventi** **traggono risorse dal pianeta** per vivere e riprodursi. Inoltre **rilasciano nell'ambiente** in cui vivono sostanze di cui debbono liberarsi per prosperare al meglio.

Questi **flussi in entrata** ed **in uscita** da ciascun essere vivente vanno tenuti in considerazione tra gli elementi che contribuiscono all'equilibrio complessivo del pianeta, quindi anche dal sistema climatico.

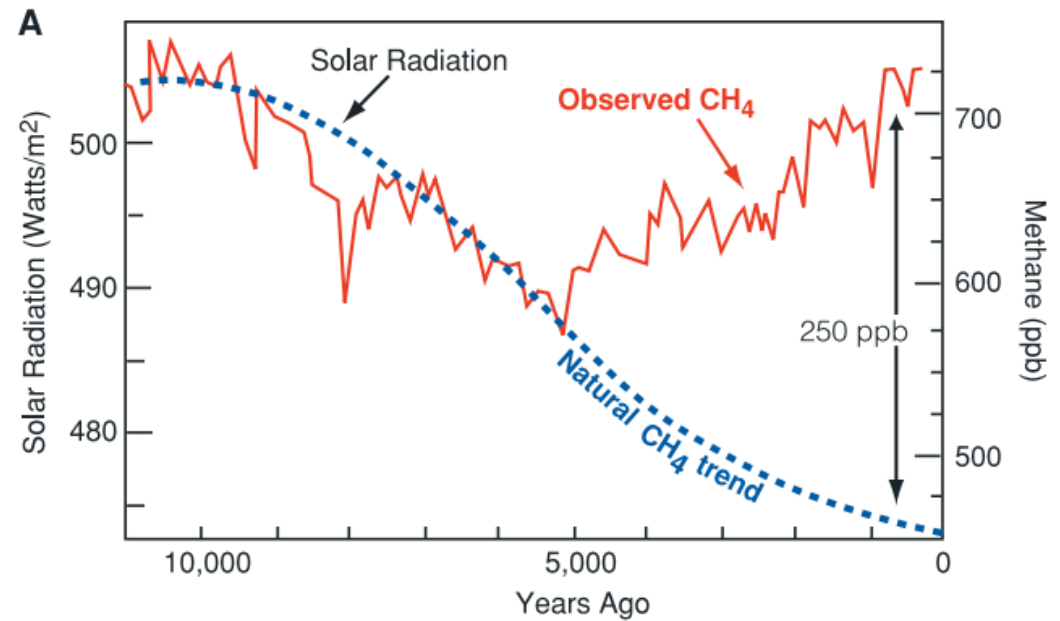
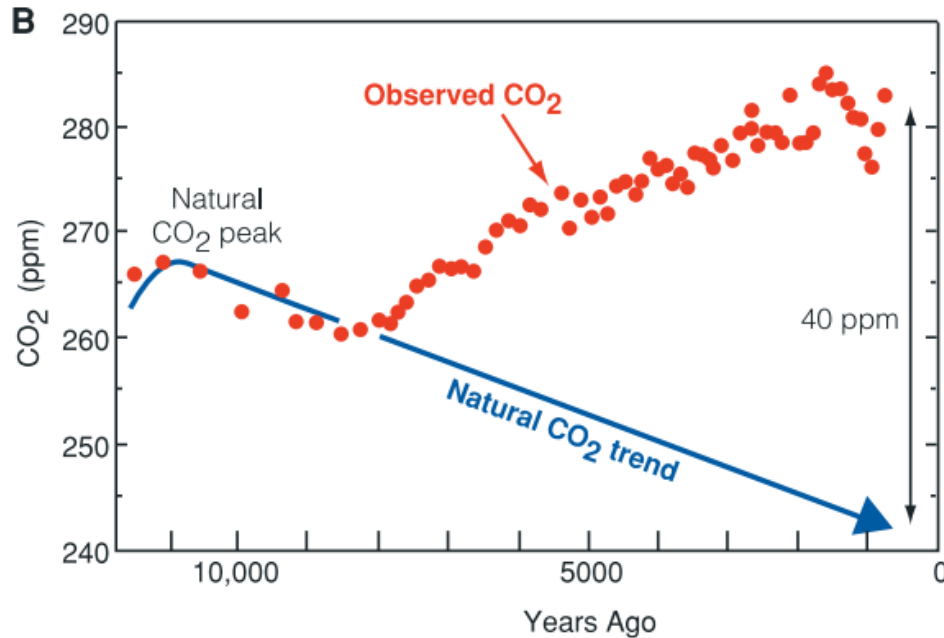
*La storia della Terra probabilmente ne ha già sperimentati altri (es. la grande ossidazione, determinata dai cianobatteri, che verosimilmente ha prodotto buona parte dell'ossigeno che oggi troviamo nell'atmosfera)*





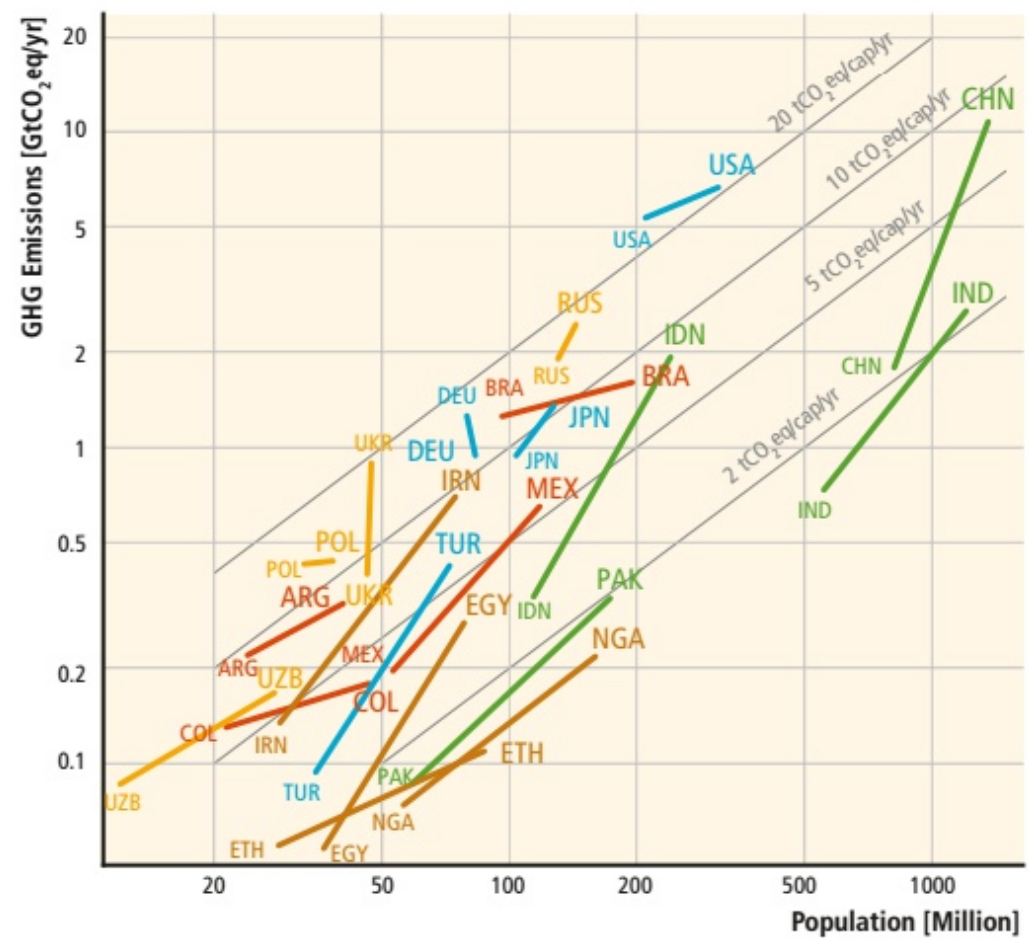
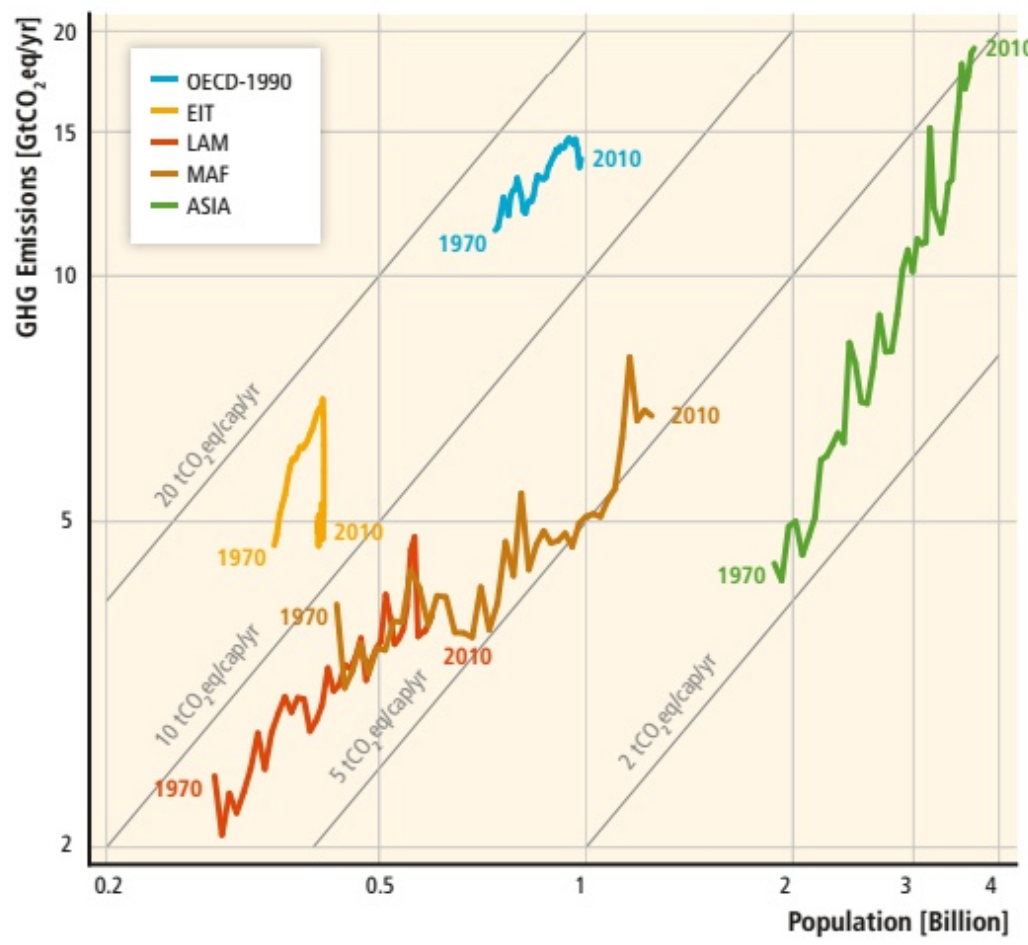
## L'ipotesi di inizio precoce dell'impatto umano sul sistema clima: l'Antropocene

Secondo tale ipotesi, le attività umane hanno invertito la naturale tendenza dei gas serra sin dall'inizio dell'utilizzo delle tecniche agricole e di allevamento.



# Considerazioni sulle emissioni di gas serra e la popolazione mondiale

MAF = Middle East and Africa (MAF)  
 LAM = Latin America  
 OECD-1990 = OCSE  
 EIT = Economies in Transition



**Figure 5.11** | Regional trends in population and GHG emissions (left panel) and for each region the four most populous countries in 2010 (right panel). Regions are defined in Annex II.2 | Grey diagonals connect points with constant emission intensity. Major GHG-emitting regions or countries are in the upper half. A shift to the right presents population growth. A steep line presents a growth in per capita emissions, while a flat line presents decreasing per capita emissions between 1971 and 2010 | Right panel: The small labels refer to 1970, the large labels to 2010 | Data from JRC/PBL (2013) and IEA (2012). (Note the log-log plot.)

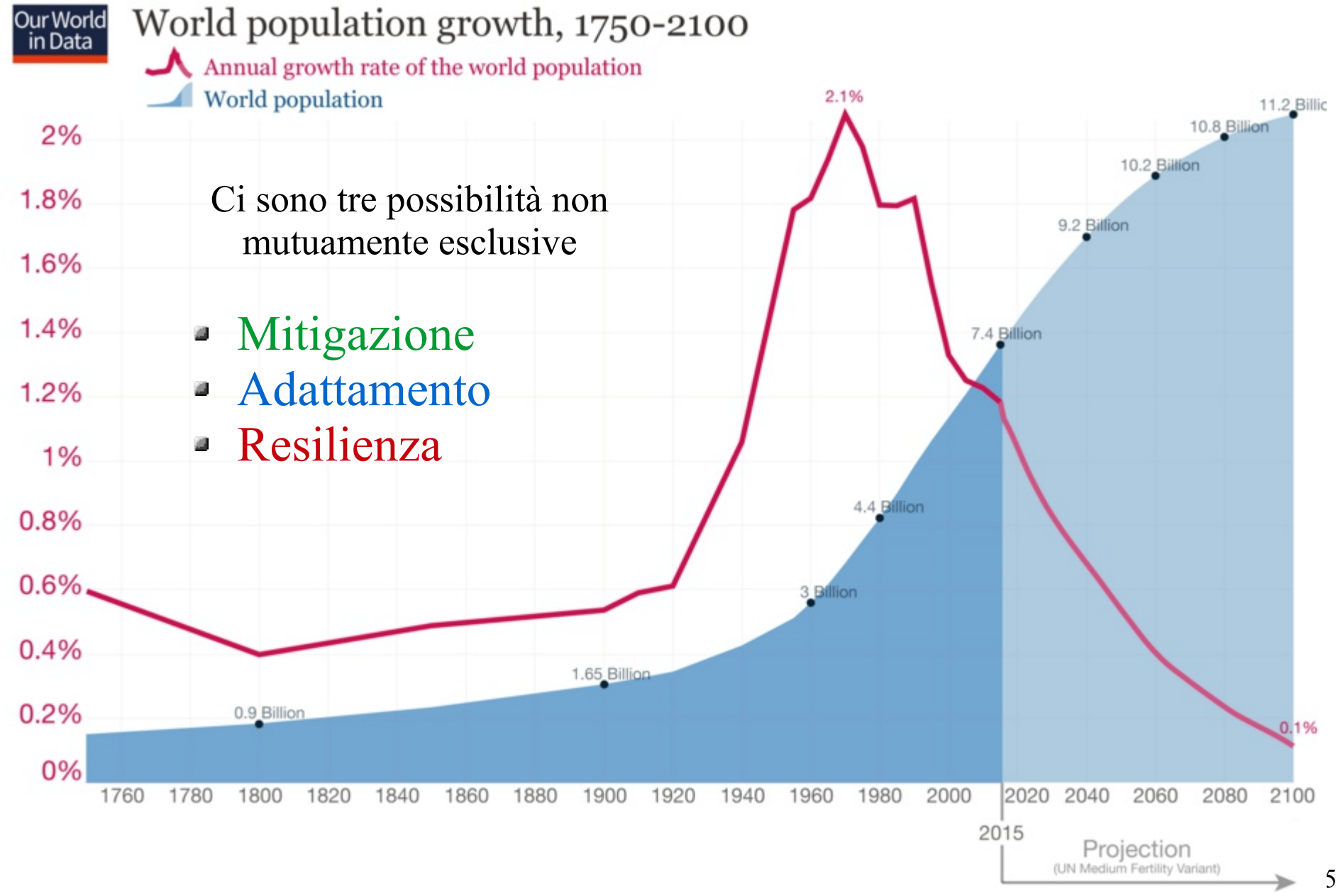
## Proiezioni sulla crescita della popolazione mondiale e considerazioni sul futuro del sistema clima e della specie umana

- ☑ La **popolazione mondiale** è prevista **in ulteriore aumento** nei prossimi decenni
- ☑ Le **risorse** utilizzate dalla specie umana sono **limitate** ed in rapido esaurimento
- ☑ Le **immissioni** nel sistema clima da parte della specie umana sono **in crescita**
- ☑ Il sistema clima troverà sicuramente un punto di equilibrio
- ☑ Il problema fondamentale è comprendere se questo punto di equilibrio prevede **condizioni adeguate**, o perlomeno sufficienti, **per la vita** delle specie viventi attualmente presenti sulla Terra. L'**Homo sapiens** è tra queste.

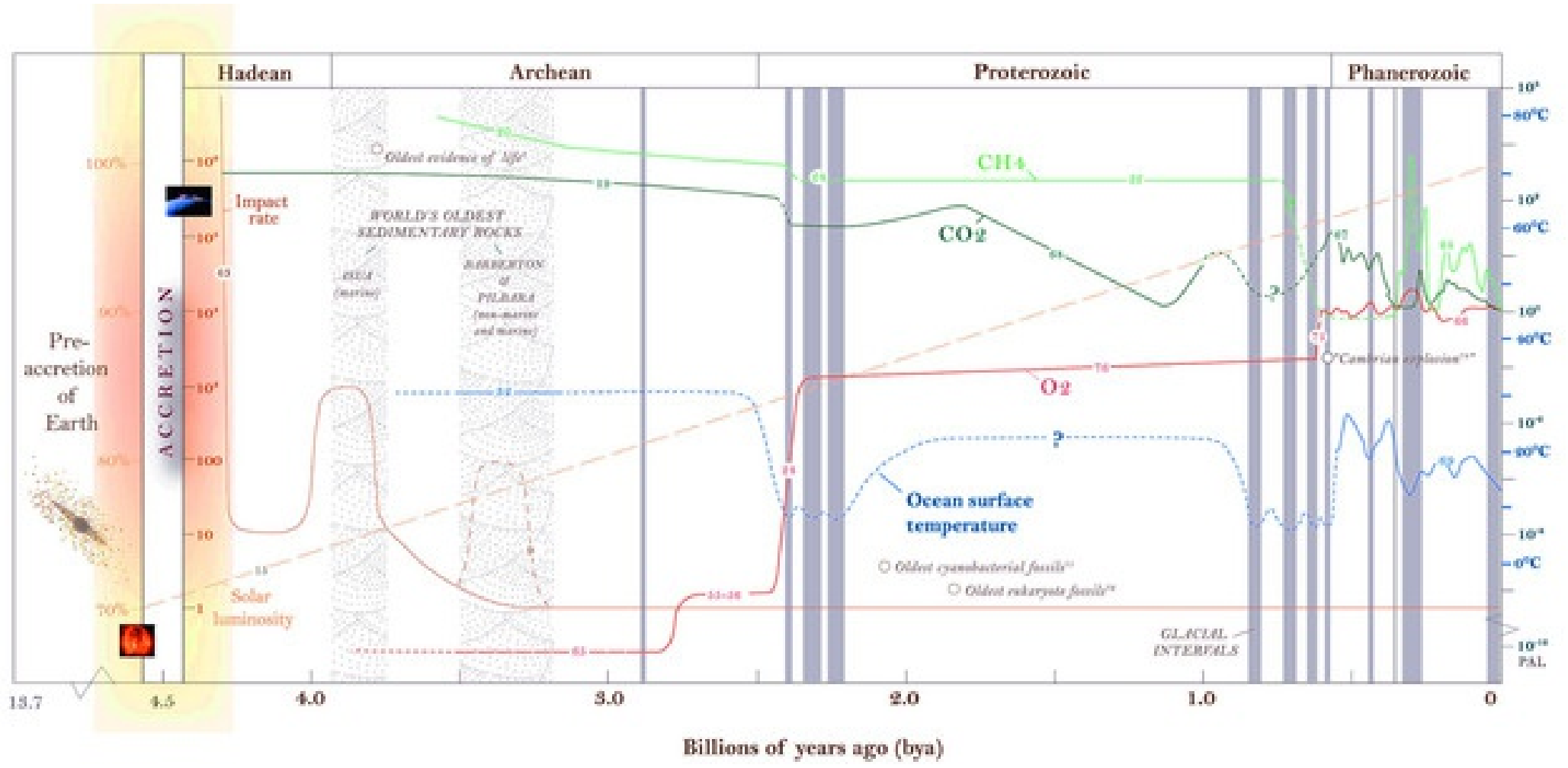
La nostra specie ha consapevolezza di questi fatti, quindi ha anche la responsabilità delle scelte che intenderà adottare nel gestire il raggiungimento del nuovo punto di equilibrio.



# Quali prospettive ci sono nel rapporto tra Uomo e clima?



# Titolo della diapositiva



Hessler, A. M. (2011) Earth's Earliest Climate. Nature Education Knowledge 3(10):24