

Il Sistema climatico della terra

Dalla descrizione alla comprensione

NADIA PINARDI E ANTONIO NAVARRA,
UNIVERSITA' DI BOLOGNA
E
CENTRO EUROMEDITERRANEO SUI
CAMBIAMENTI CLIMATICI

Aristotele

Raffello, *la Scuola di Atene*

De Meteorologica

...

Quindi è chiaro, dal momento che non ci sarà fine al tempo e il mondo è eterno, che né il Tanais né il Nilo scorrono da sempre, ma che la regione da cui fluiscono era una volta asciutta: perché i loro effetti possono essere finiti, ma il tempo non può. E questo sarà ugualmente vero per tutti gli altri fiumi. Ma se i fiumi nascono e periscono e le stesse parti della terra non sono sempre umide, il mare deve cambiare di conseguenza. E se il mare avanza sempre un luogo e retrocede in un altro è chiaro che le stesse parti di tutta la terra non sono sempre né mare né terra, ma che tutto ciò cambia nel corso del tempo.



Giacomo Leopardi

A Silvia.

Silvia, sovienti ancora
 Quel tempo de la tua vita mortale,
 Quando beltà splendea
~~Ne la fronte e nel seno verginale,~~
 E ne gli ^{occhi tuoi, ridenti} sguardi incerti e fuggitivi,
 E tu, lieta e ^{serena,} pudica, il limitare
 Di gioventù salivi?

Zibaldone, 1827

Egli e' pur certo che l'antico ordine delle stagioni par che vada pervertendosi. Qui in Italia e' querela comune che i mezzi tempi non vi son piu', e in questo smarrimento di confini, non vi e' dubbio che il freddo acquista terreno. Io ho udito dire a mio padre che in sua gioventu' a Roma, la mattina della Pasqua di resurrezione si rivestiva da estate. (Magalotti, 1683).

(...)

Quello che tuti noi sappiamo, e che io mi ricordo bene, e' che ne la mia fanciullezza il mezzogiorno d'Italia non aveva anno senza grosse nevi, e che ora non ha quasi anno senza nevi che durino piu' di poche ore

Talor lasciando e le sudate carte,†
 D' in su i ^{veroni} balconi, del paterno ostello
 Porgea gli orecchij al suon de la tua voce,
 Ed a la man veloce
 Che ~~percorrea~~ la faticosa tela.

Il Problema scientifico del clima

Cos'è il clima

- Il clima descrive le condizioni meteorologiche **medie (potremmo dire anche piu' probabili?)** di un determinato luogo, prendendo un periodo di tempo lungo rispetto ai fenomeni meteorologici stessi. (Organizzazione Mondiale della Meteorologia propone un minimo di 30 anni).
- Il clima è caratterizzato da “strutture” nel medio/lungo termine.

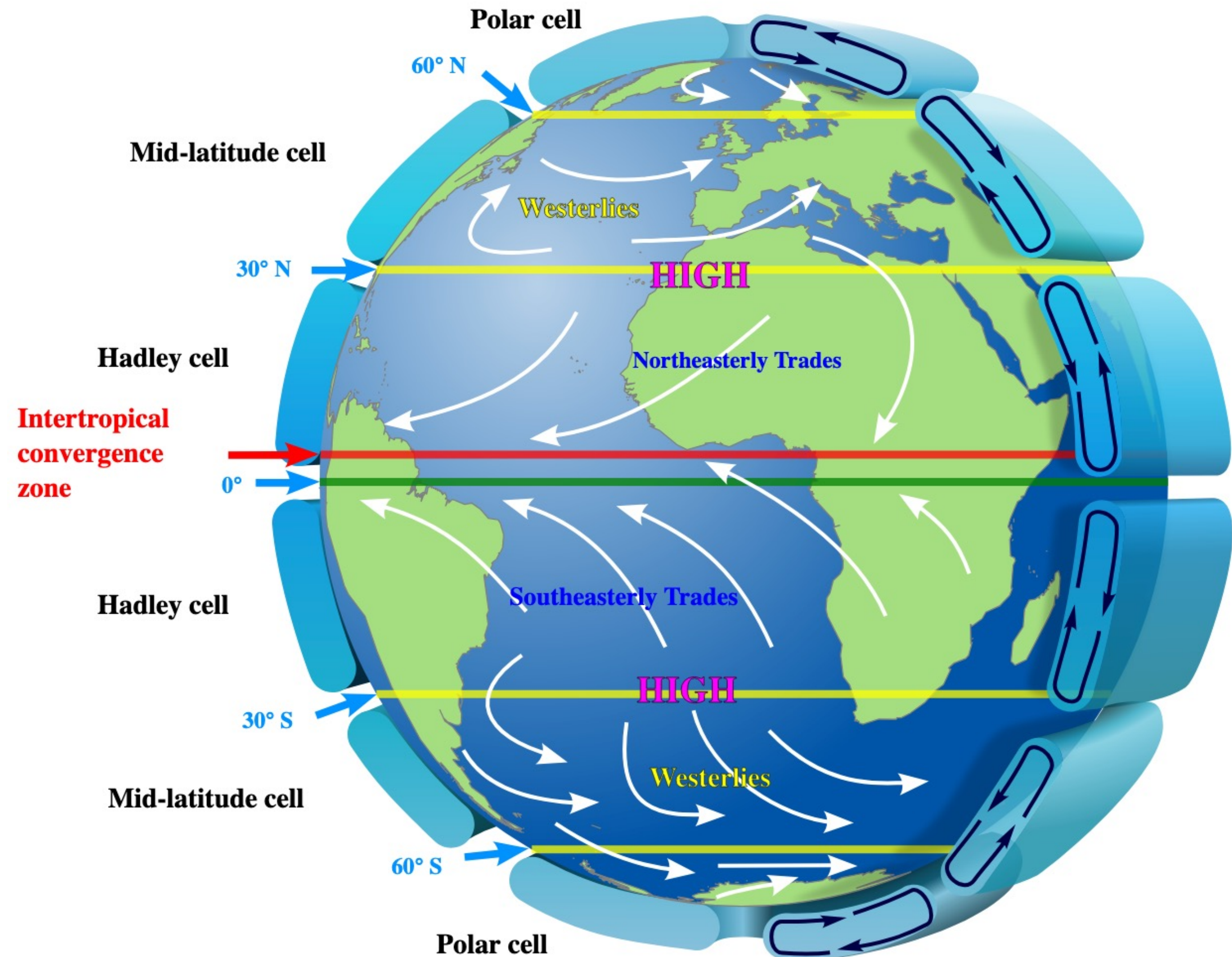
Cosa sono le “strutture” del clima (patterns)?

per l'atmosfera:

la cella di Hadley

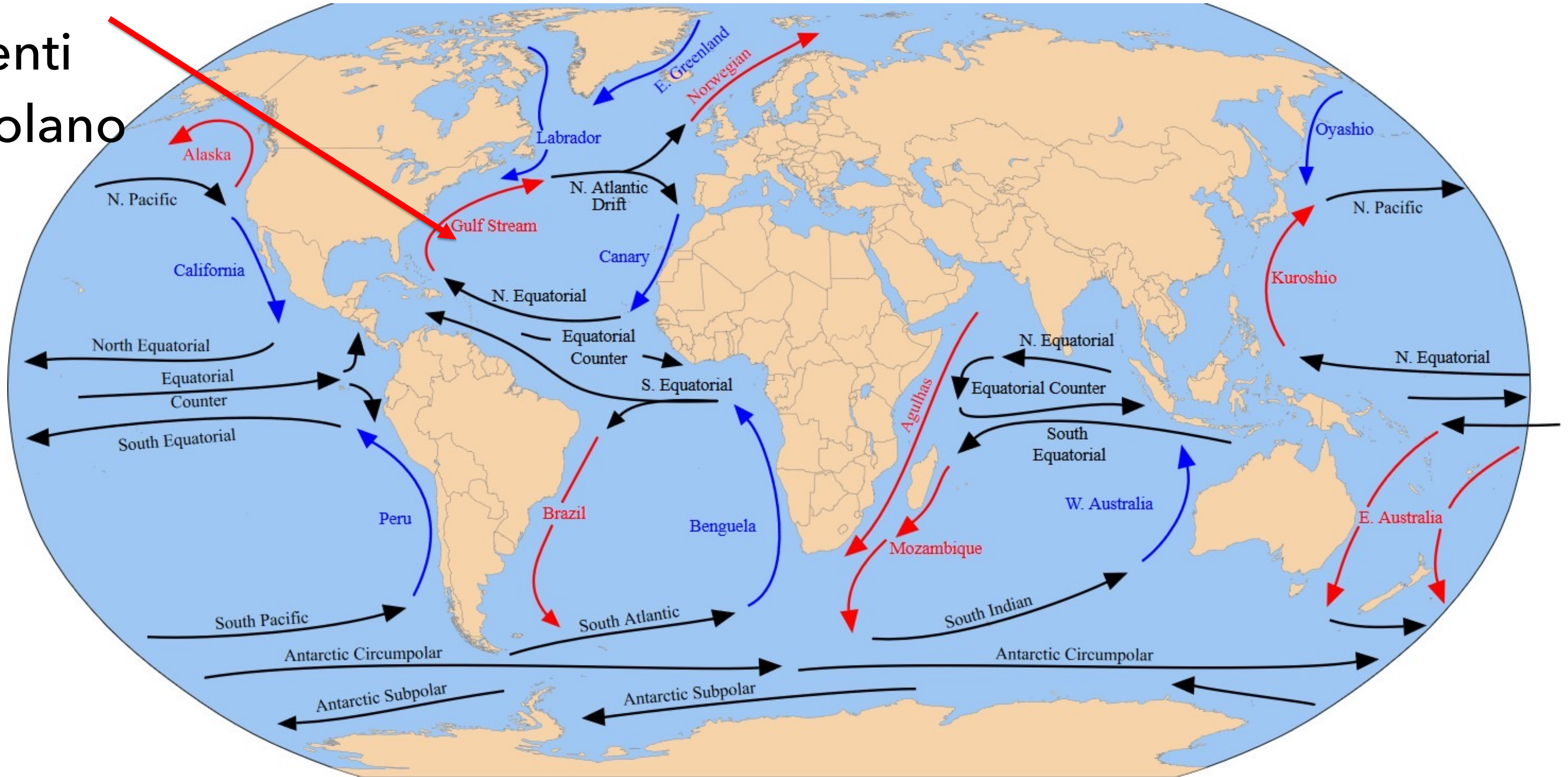
e

la direzione dei venti
alle varie latitudini



Cosa sono le “strutture” del clima (patterns)?

per l'Oceano:
le correnti
che ricircolano



Le scale temporali delle “strutture” del clima

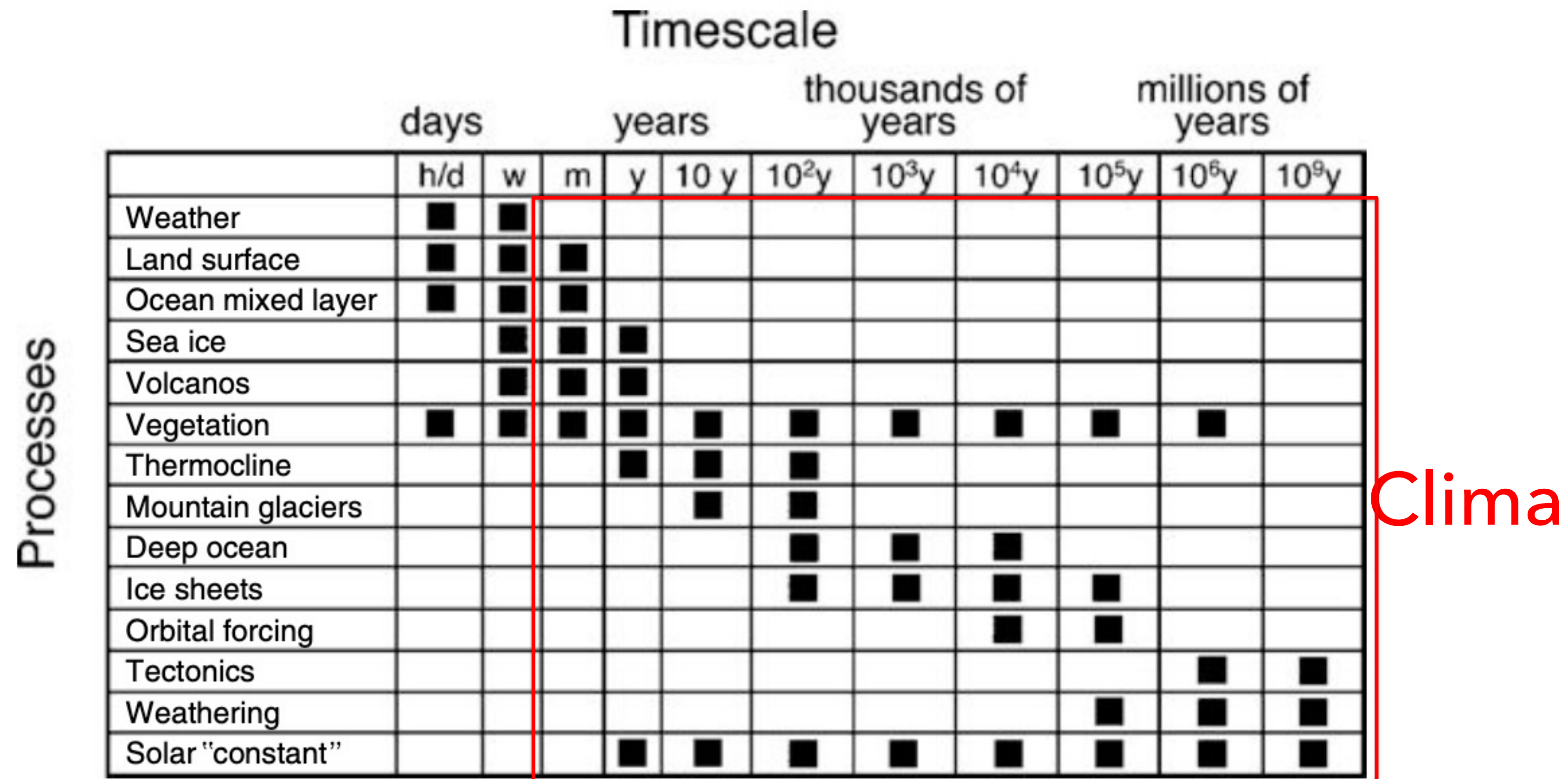


FIGURE 12.1. The instrumental and paleorecord shows that “weather” and “climate” vary on all timescales, from hours and days to millions of years. Here we tabulate the mechanisms operating at different timescales. Greenhouse gases might also be added to the table: natural CO₂ cycles occur on timescales up to 1k–10ky and longer and the human (100 y) timescale for CO₂ is now important; methane changes can occur at 10 y timescales out to 10k y and beyond. It should also be noted that nonlinearities make the true separation of timescales impossible.

Le sei sfere del clima

LITHOSPHERE



BIOSPHERE



ATMOSPHERE



HYDROSPHERE



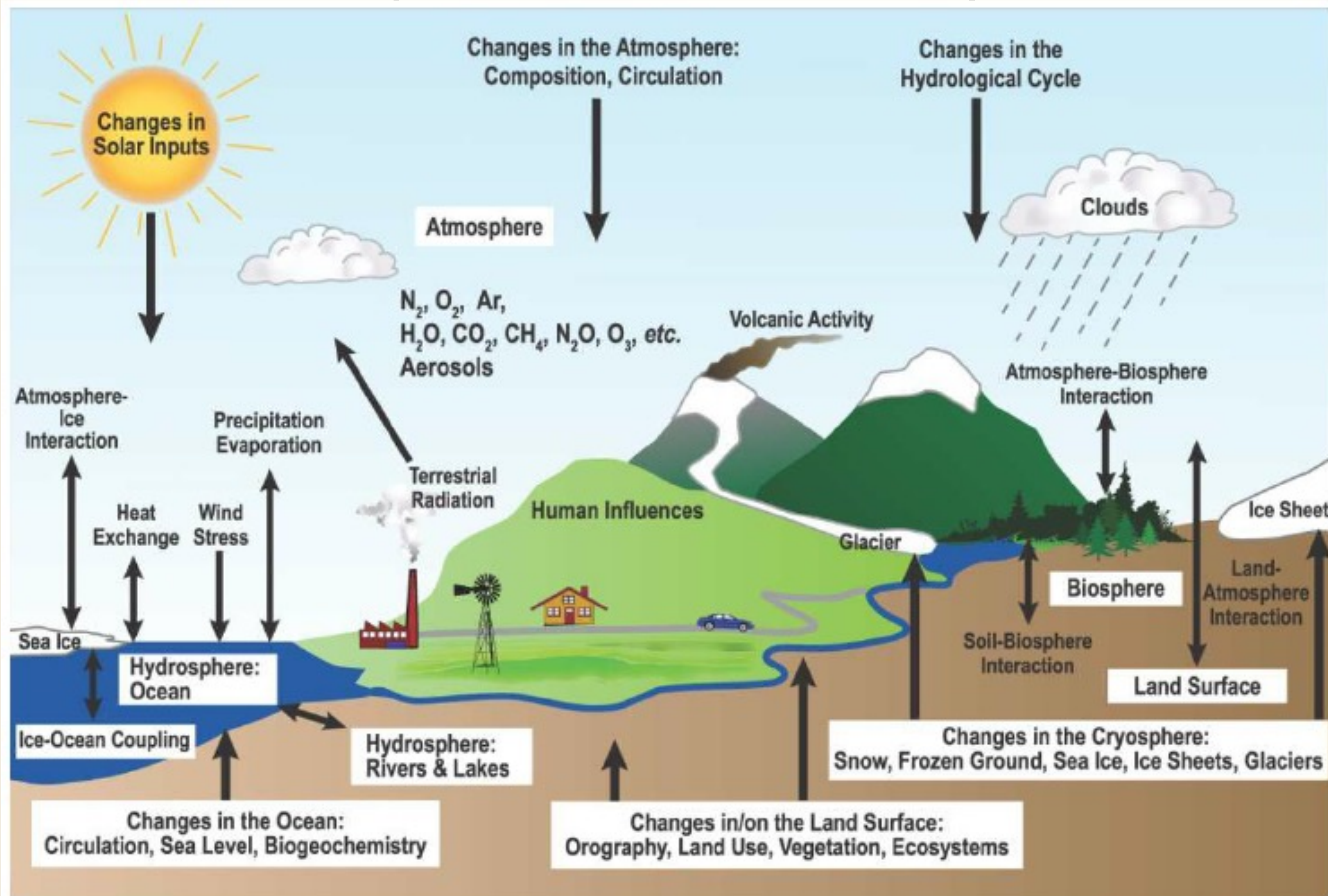
CRYOSPHERE



HUMAN SYSTEM:
ANTHROPOSHERE



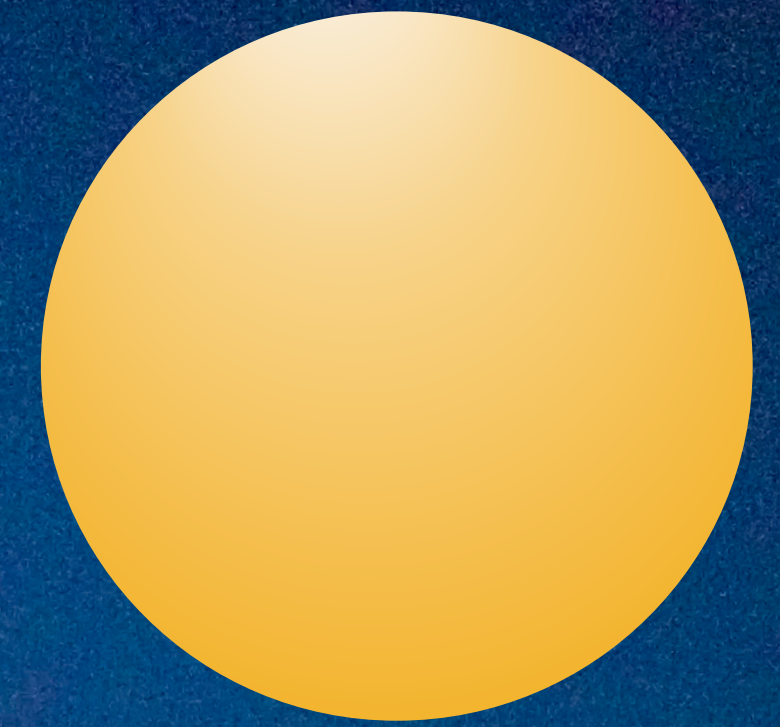
Il clima: un sistema con complesse interazioni tra strutture e processi a scale multiple



Il Sistema Climatico

Atmosfera

COMPONENTI CHIMICHE



Radiazione
Solare



CICLO DELL'ACQUA



PIOGGIA



EVAPORAZIONE



DEFLUSSO



VENTO



CORRENTI

Oceani

BIOSFERA TERRESTRE
SUOLO

ECOSISTEMI MARINI

Ghiaccio

La “teoria” del clima e’ iniziata nel XIX secolo con la meteorologia

USA, 1838-1916

Cleveland Abbe



Abbe nel 1901
scrisse per la prima
volta che:

«La meteorologia e’
essenzialmente
l’applicazione
dell’idrodinamica e
della temodinamica
all’atmosfera»

Bjerkness nel 1904
defini' per la prima
volta come fare le
«previsioni del
tempo»

Norway, 1862-1951

Vilhelm Bjerknes



La "teoria" del clima e' poi arrivata a compimento nel XX secolo

Milutin Milanković 1924-1958



Scienziato serbo-croato spiego' la successione delle ere glaciali e la loro successione in ragione di cambiamenti dell'orbita e dell'asse Terrestre

Mikhail Budyko 1920-2001



Scienziato sovietico scrisse nel 1956:
Heat Balance of the Earth's Surface
spiegando alcuni processi fondamentali di assorbimento e riflessione dell'energia solare

Nel 2021 il primo scienziato del clima ha avuto il Premio Nobel



© Nobel Prize Outreach.
Photo: Clément Morin.

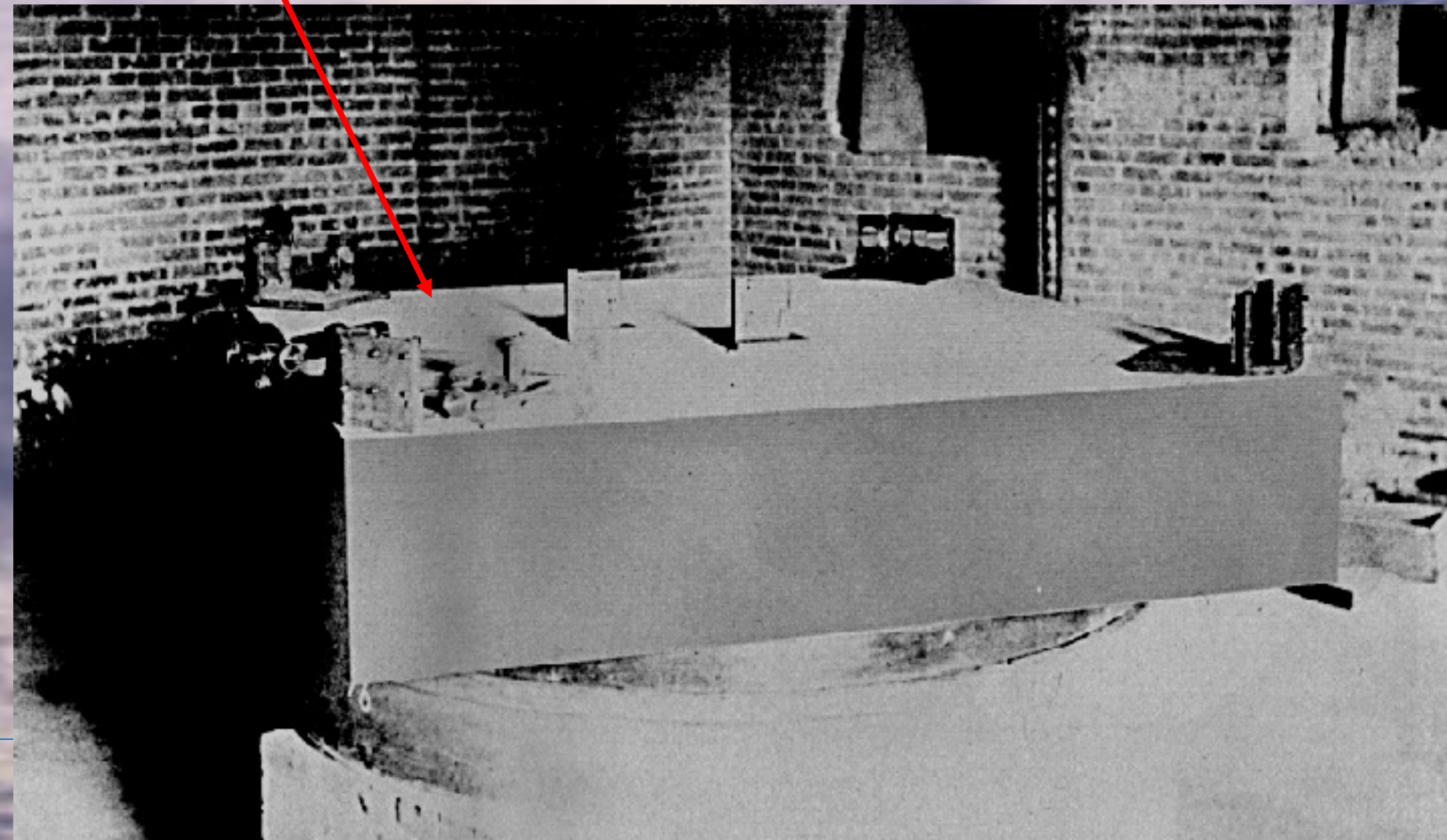
Motivazione del premio: «per la modellistica fisica del clima terrestre, la quantificazione della variabilità e la previsione affidabile del riscaldamento globale»

La modellistica fisica che Manabe ha usato e' quella numerica che sara' descritta nel seguito

La considerazione scientifica del clima (I)

Esperimenti cruciali come il famoso esperimento di Michelson e Morley (dimostrazione dell'inesistenza dell'etere) non sono possibili nella scienza del clima

Com'è possibile un'indagine scientifica sul clima?



La considerazione scientifica del clima (II)

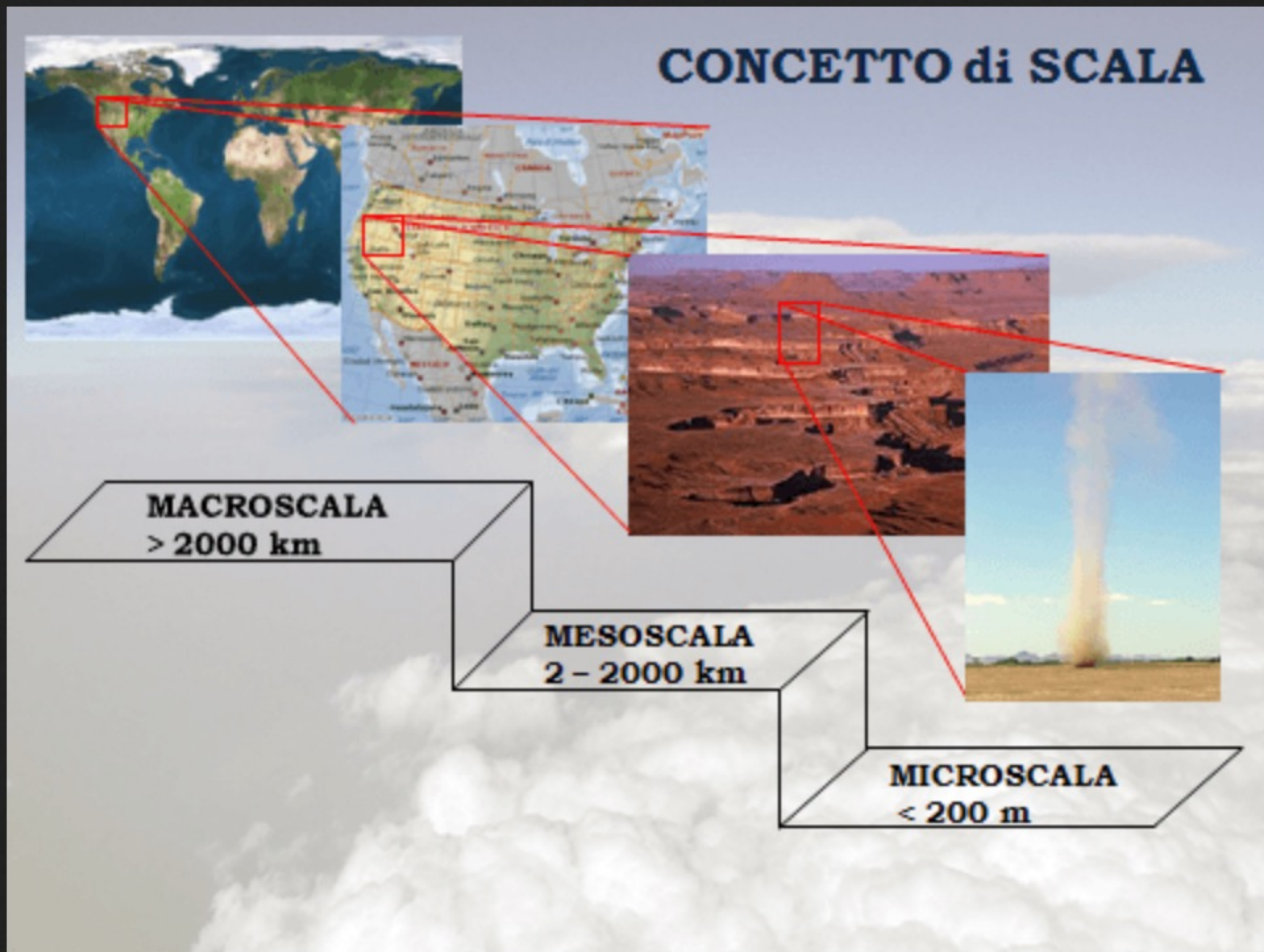
Possiamo fare esperimenti se rappresentiamo il sistema climatico attraverso un insieme di relazioni matematiche: le equazioni del clima.

Le equazioni del clima sono molto difficili, non esiste una soluzione analitica, ma si possono risolvere con metodi numerici.

Possiamo quindi trattare equazioni matematiche molto complesse, pagando il prezzo di un numero enorme di operazioni elementari.

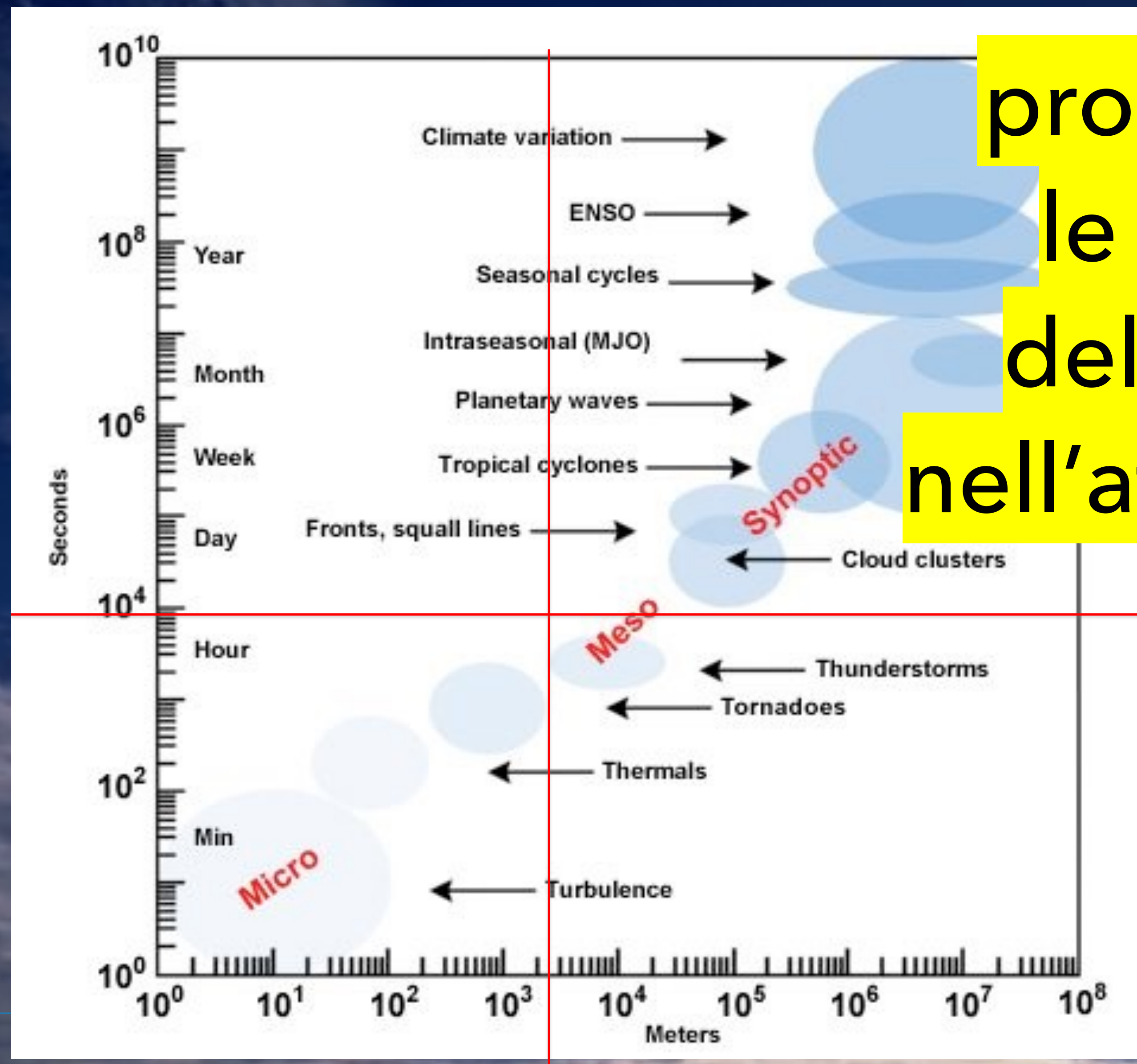
La considerazione scientifica del clima (III)

IL. concetto di “scala”



La considerazione scientifica del clima (III)

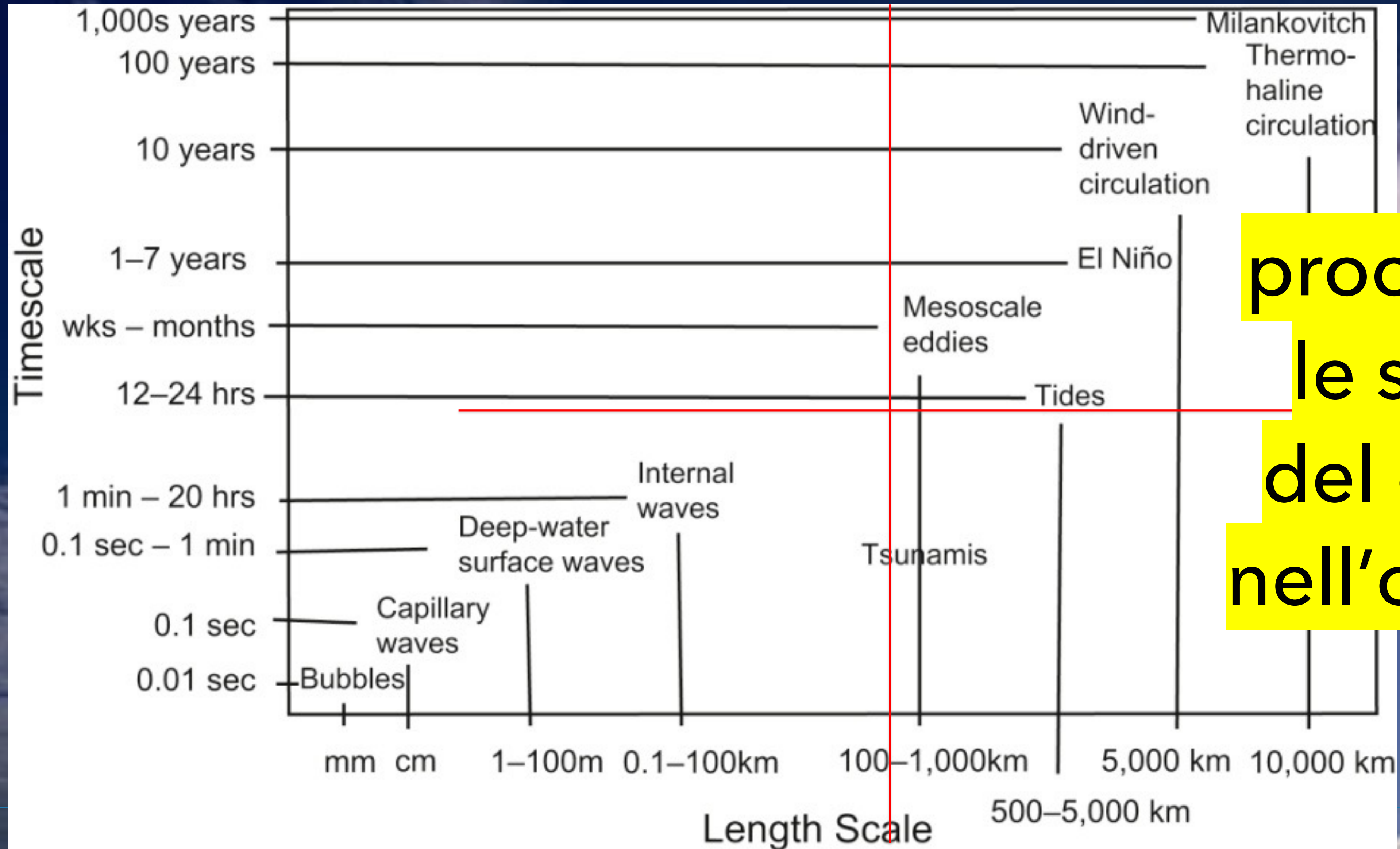
L'intervallo di scale dei vari processi nell'atmosfera e' ampio



processi e
le scale
del clima
nell'atmosfera

La considerazione scientifica del clima (III)

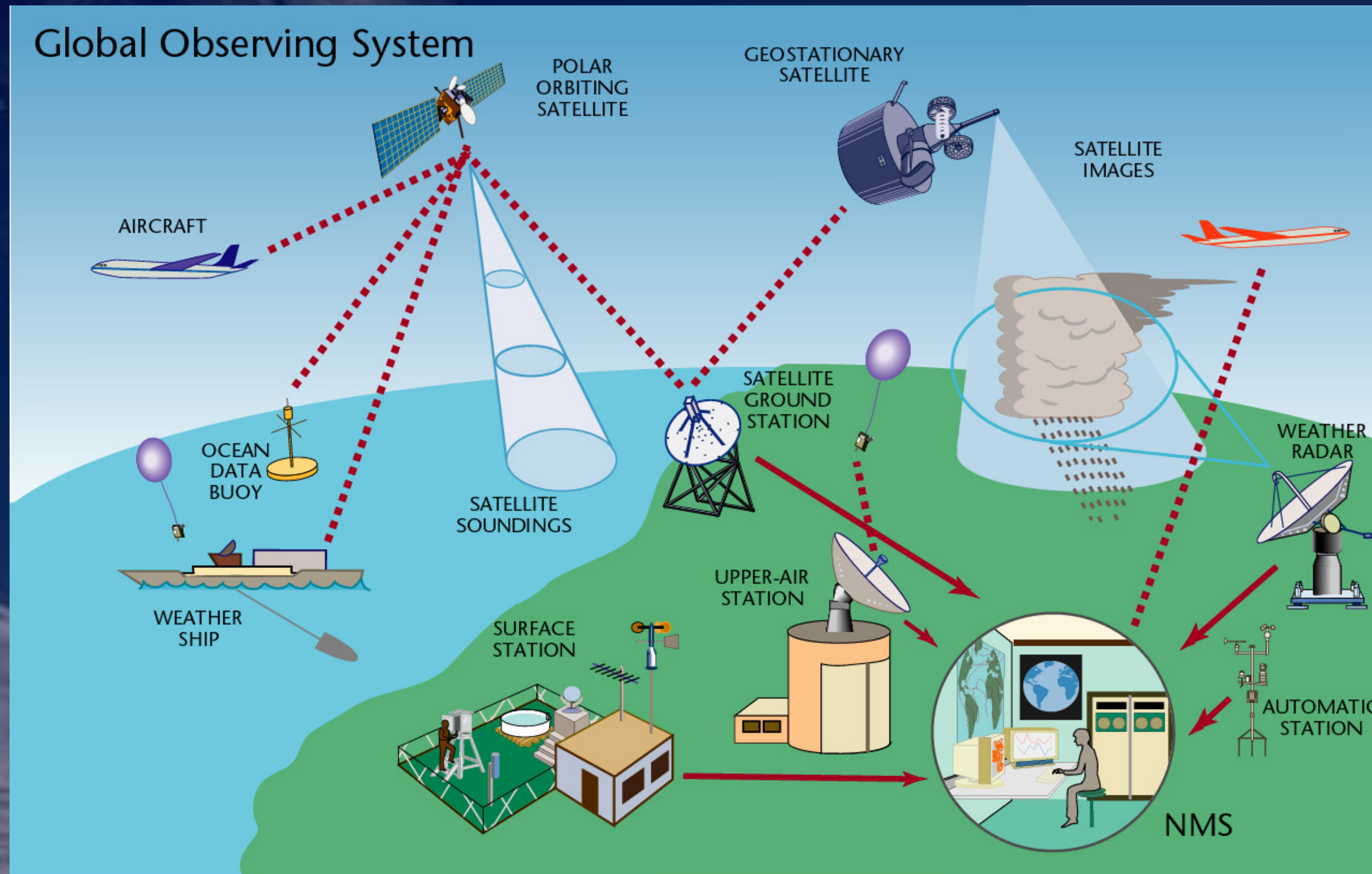
L'intervallo di scale dei vari processi nell'oceano e' ampio



processi e
le scale
del clima
nell'oceano

La considerazione scientifica del clima (IV)

L'osservazione usa sia misure in campo che da satellite



ma non si possono fare previsioni con solo le misure!

La soluzione/metodologia di studio

Come si studia il Sistema climatico della terra

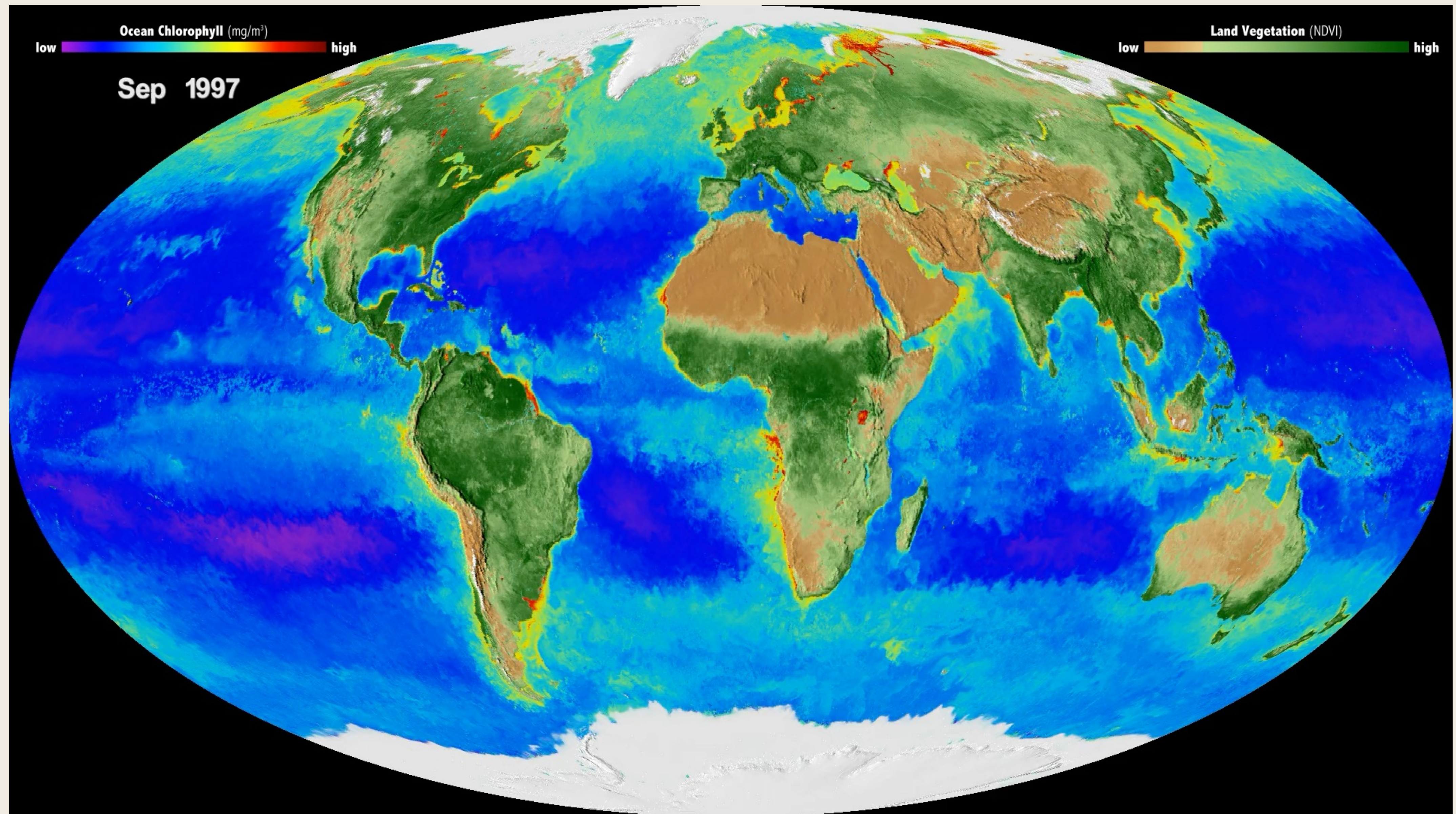
Osservazioni: da satellite e “in situ” (sul campo) con differenti tecnologie

Simulazioni: modelli numerici che incorporano le leggi della dinamica, termodinamica, la chimica e l’ecosistema

Teoria: leggi fondamentali che regolano alcune delle componenti del Sistema e le loro interazioni

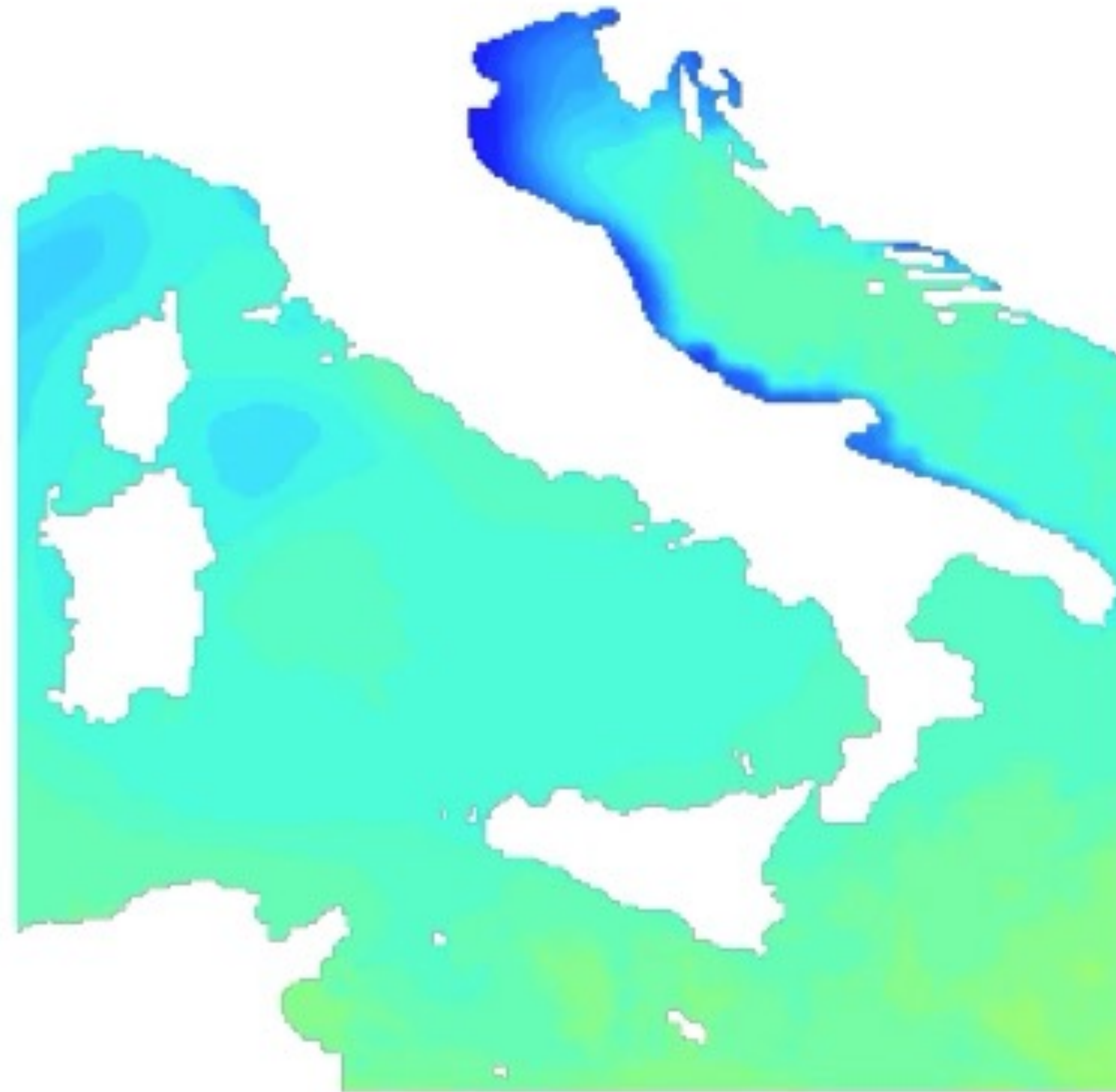
Machine learning: usando i dati osservativi e di modelli estraendo le relazioni fondamentali

Osservazioni da satellite: la biosfera Terrestre e oceanica



Osservazioni da satellite: l'orbita e la traccia sulla terra





Teoria: Equazioni del Clima (atmosfera)

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\zeta + f)\mathbf{k} \times \mathbf{V} - \nabla(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}/2) - \dot{\sigma} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \sigma} - \nabla \Phi - RT_v \nabla q + F_v$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{RT}{C_p} \frac{\omega}{p} + F_T + \frac{Q_{rad}}{C_p} + \frac{Q_c}{C_p}$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla r - \dot{\sigma} \frac{\partial r}{\partial \sigma} + R_r + C$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\tilde{\mathbf{V}} \cdot \nabla q - \nabla \cdot \tilde{\mathbf{V}}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \log \sigma} = -RT_v$$

$$T_v = T + 0.61 \bar{T}_v$$

$$\omega = p \left[\frac{\dot{\sigma}}{\sigma} + (\mathbf{V} - \tilde{\mathbf{V}}) \cdot \nabla q - \nabla \cdot \tilde{\mathbf{V}} \right]$$

$$\dot{\sigma} = - \int_0^\sigma (\nabla \cdot \mathbf{V} - \nabla \cdot \tilde{\mathbf{V}}) d\sigma - \int_0^\sigma (\mathbf{V} - \tilde{\mathbf{V}}) \cdot \nabla q d\sigma$$

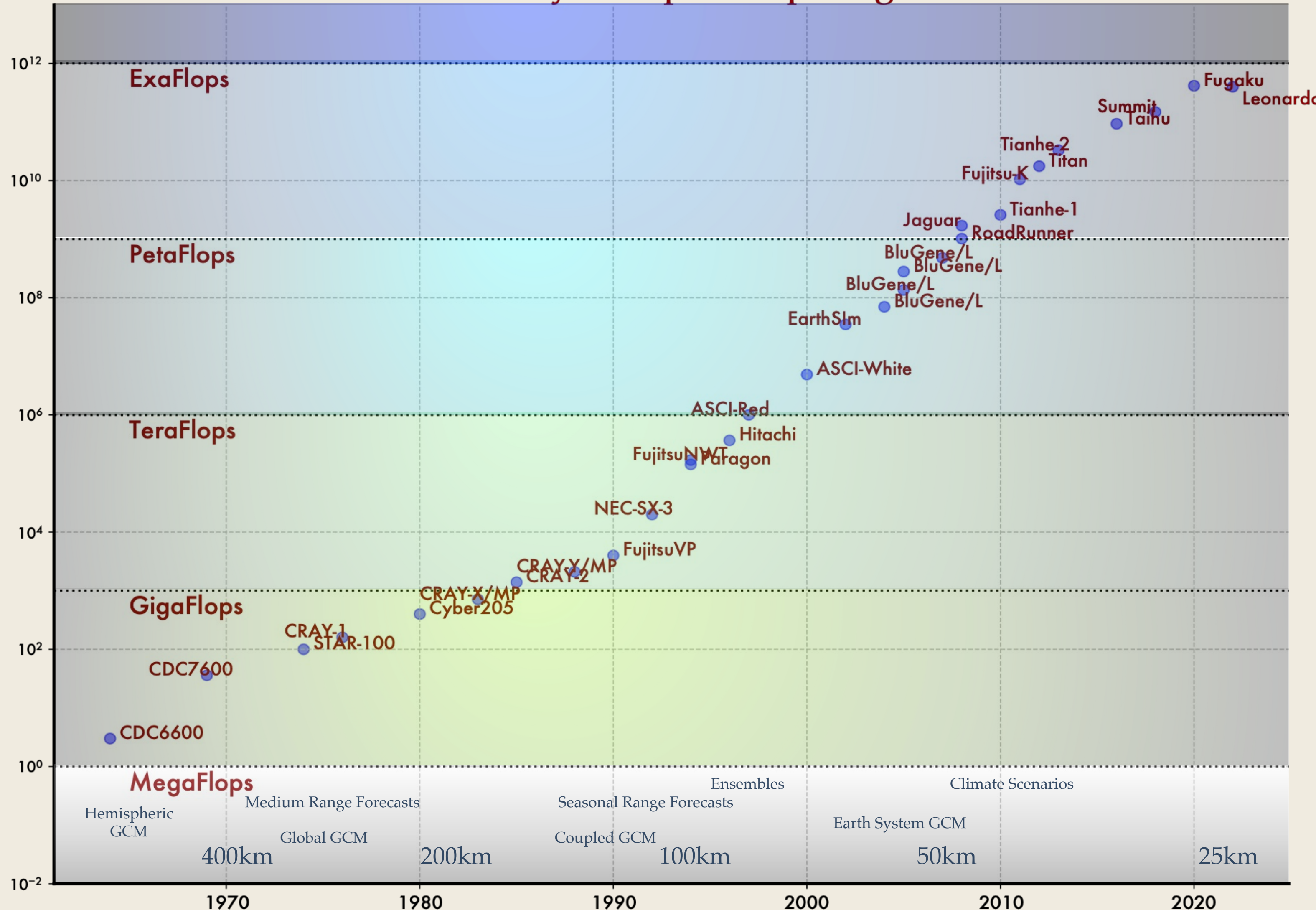
$$q = \log p_s$$

$$\sigma = \frac{p}{p_s}$$

$$\zeta = \hat{\mathbf{k}} \cdot \nabla \times \mathbf{V}$$

I supercomputers ci permettono di fare le previsioni del clima

History of Supercomputing



FLOPS

(floating-point
operations per second-
operazioni decimali al
secondo)

MegaFlops: 10^6 flops

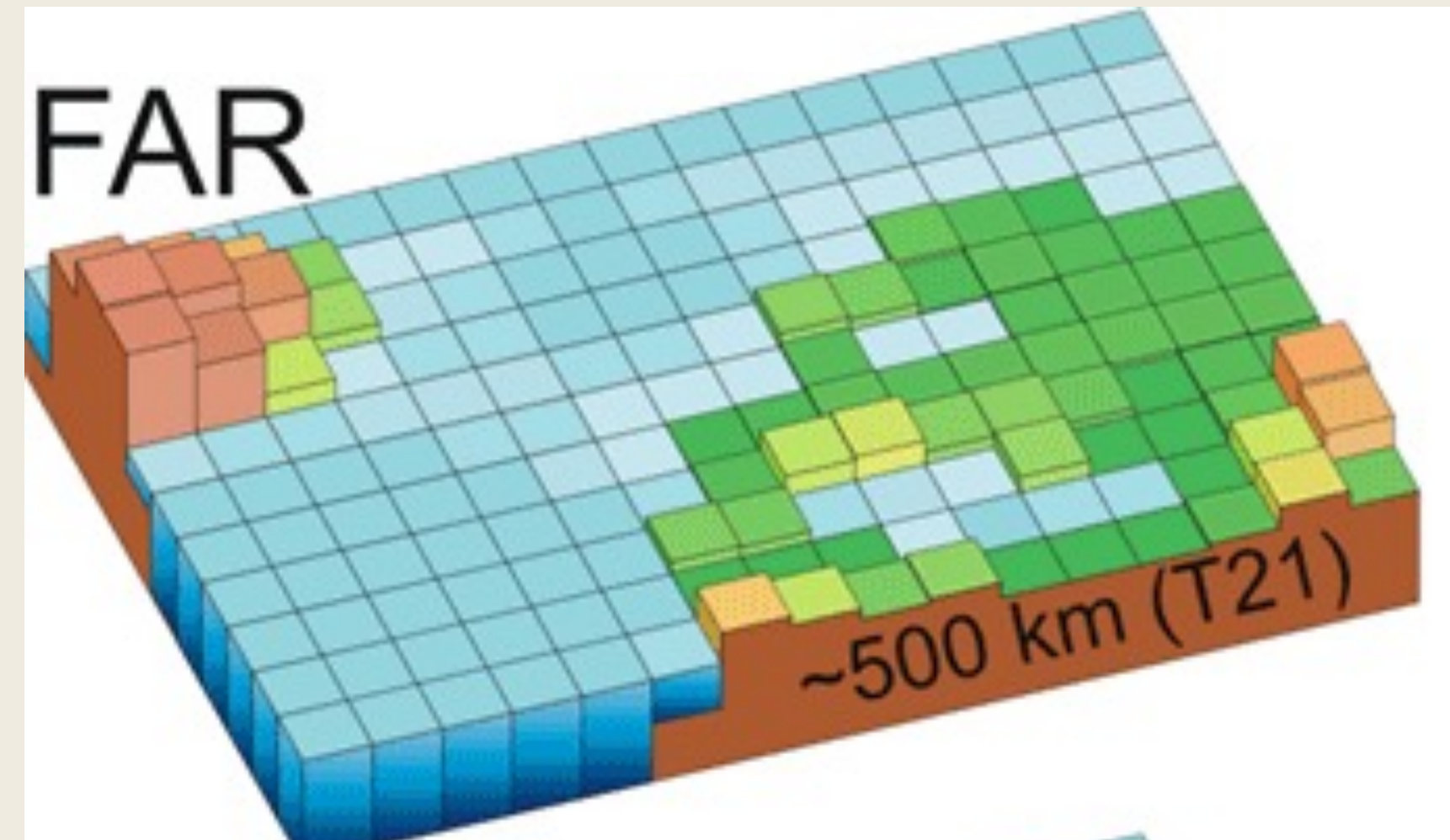
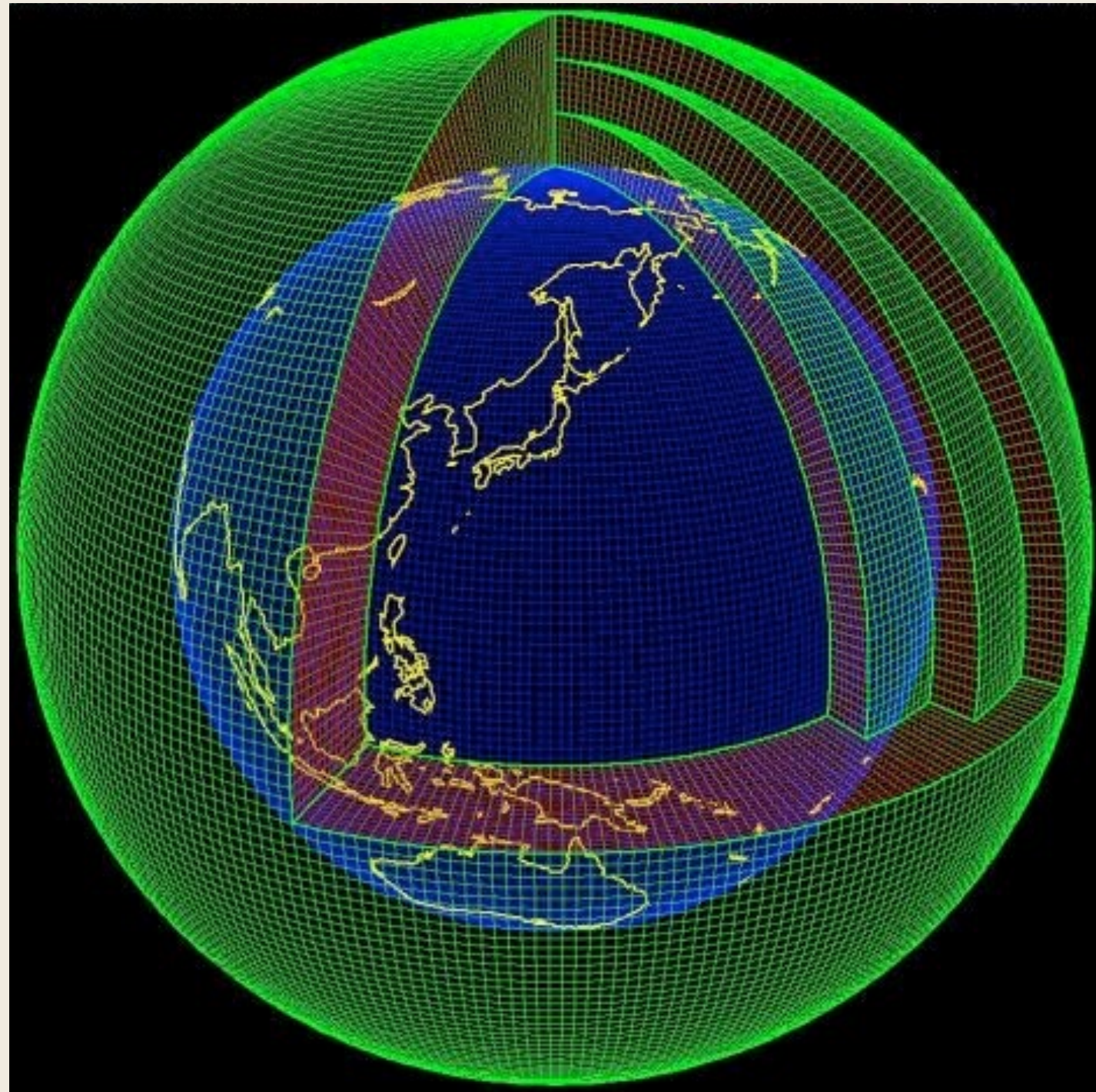
GigaFlops: 10^9 flops

TeraFlops: 10^{12} flops

PetaFlops: 10^{15} flops

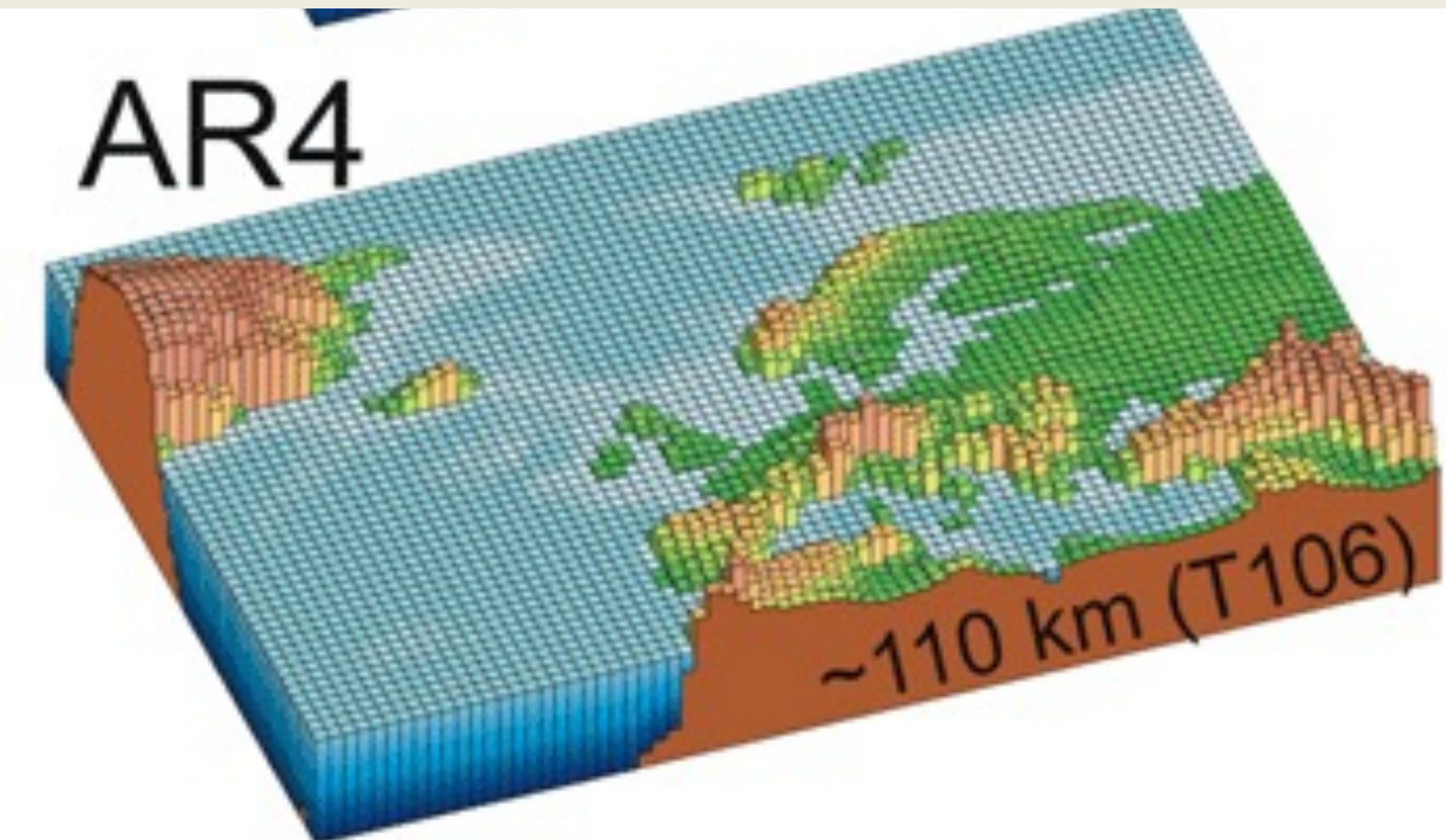
ExaFlops: 10^{18} flops

Griglie per i modelli numerici:
un quadrato e' la "risoluzione"



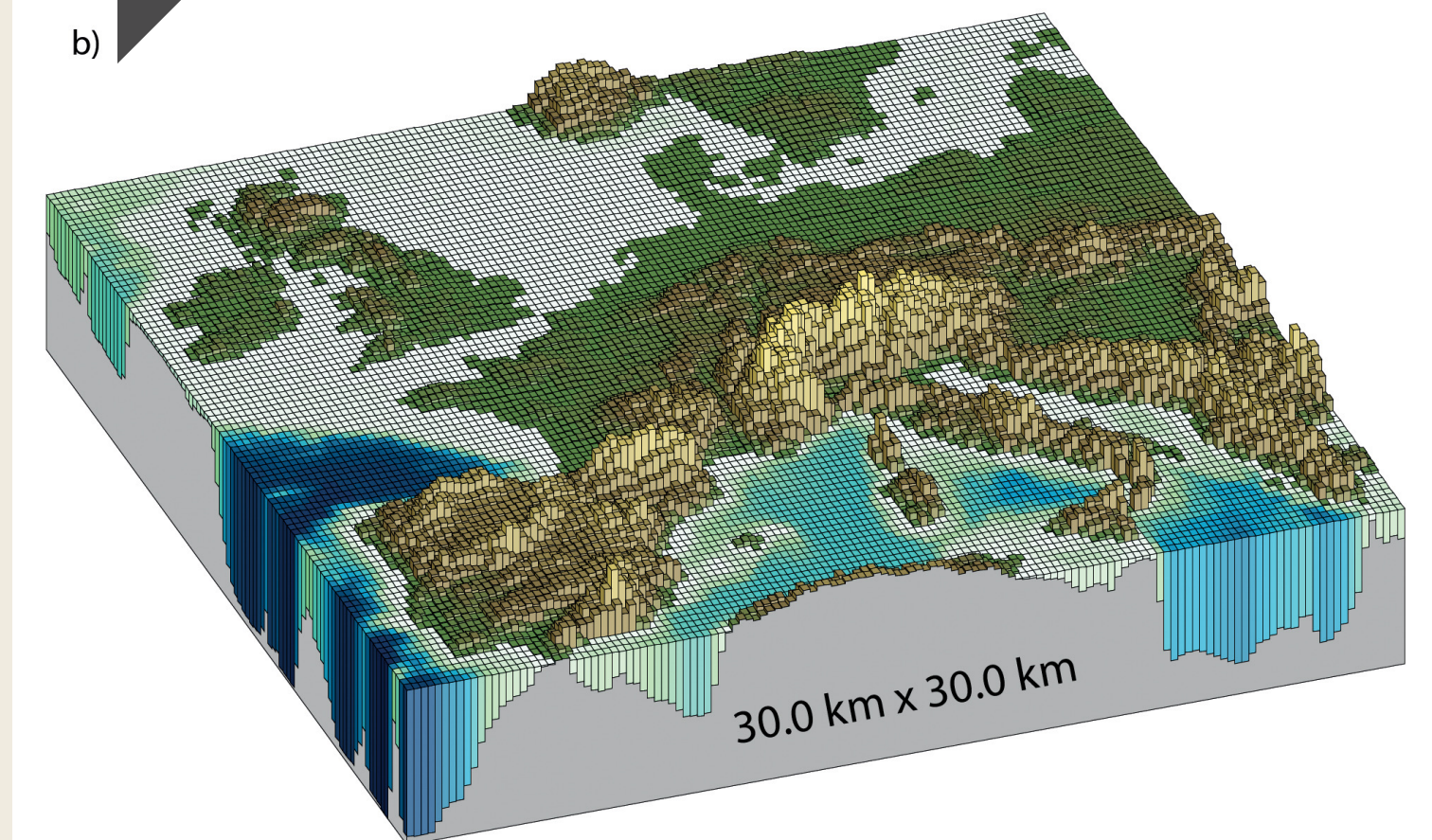
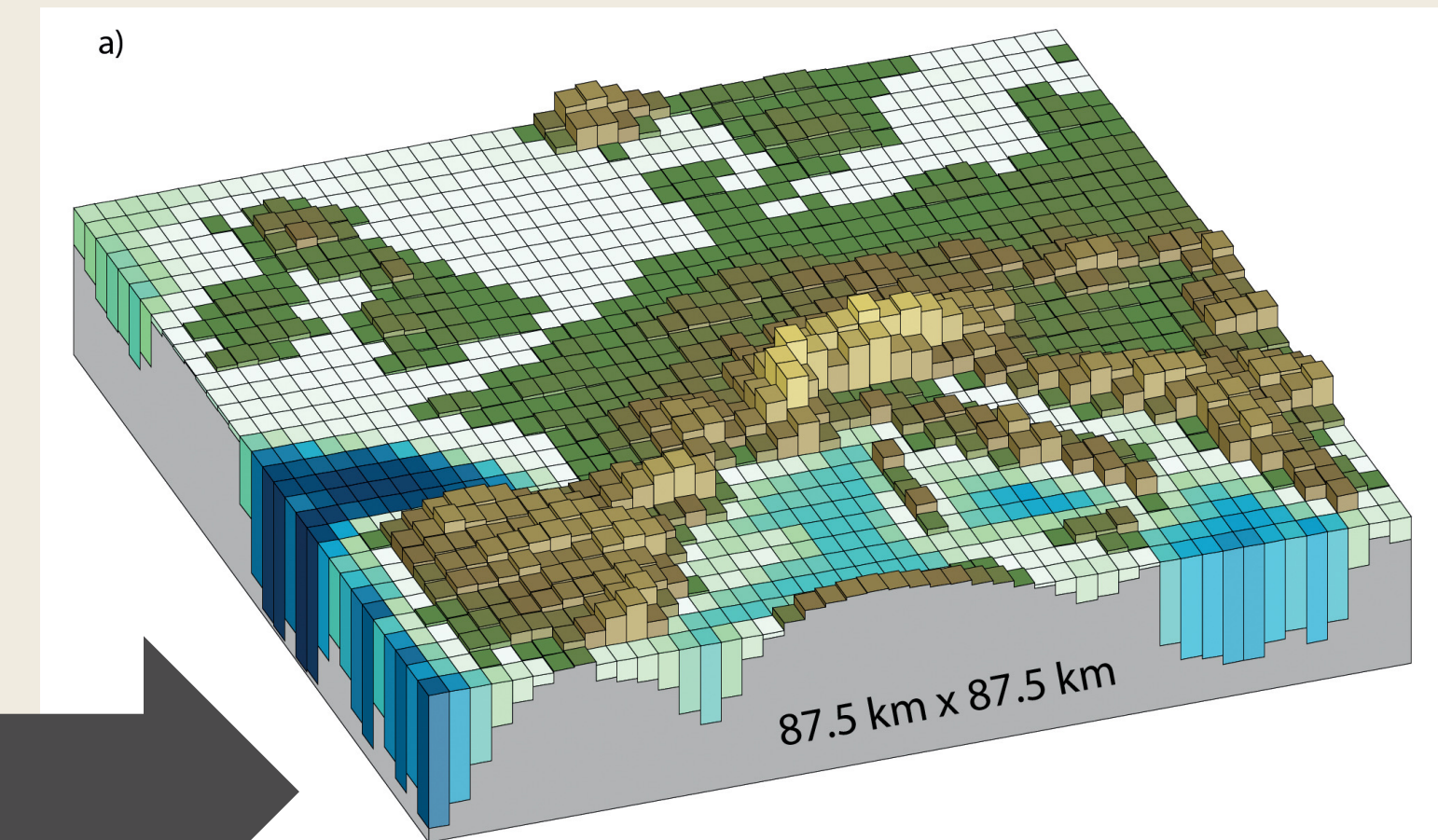
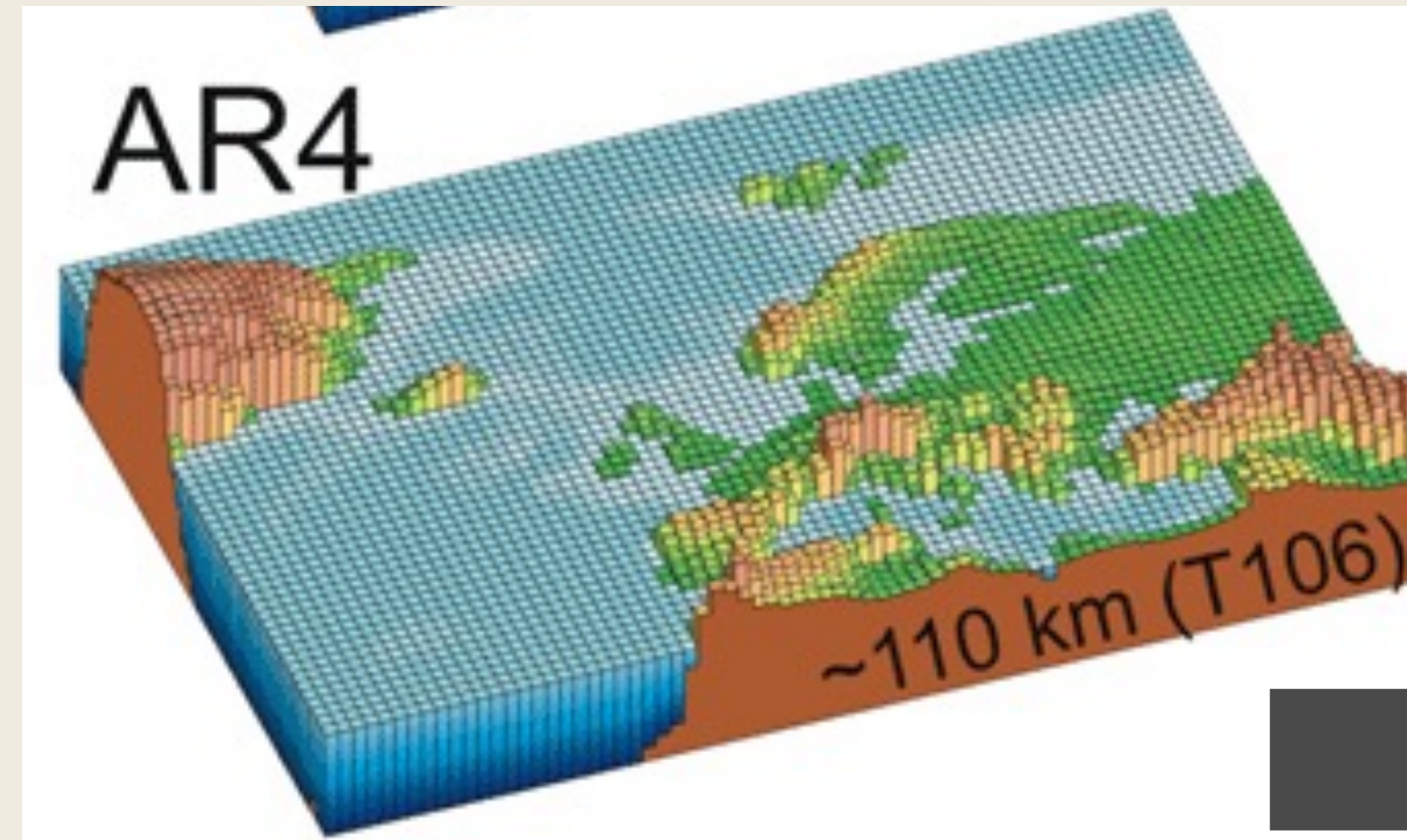
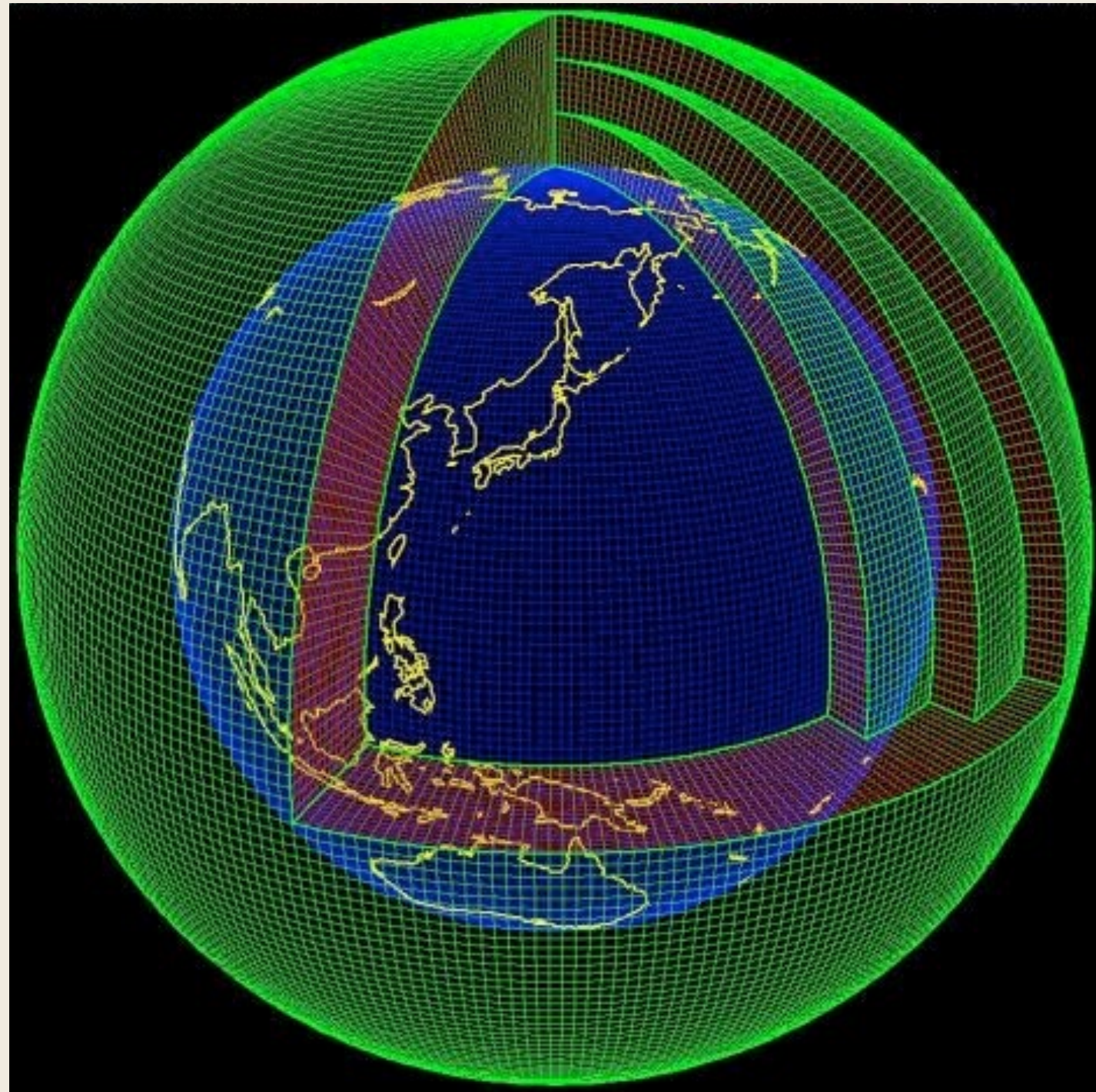
Anni 90

Anni 2000



Modelli numerici e simulazioni

Griglie per i modelli numerici:
si usano modelli “annidati” a sempre piu’ alta risoluzione

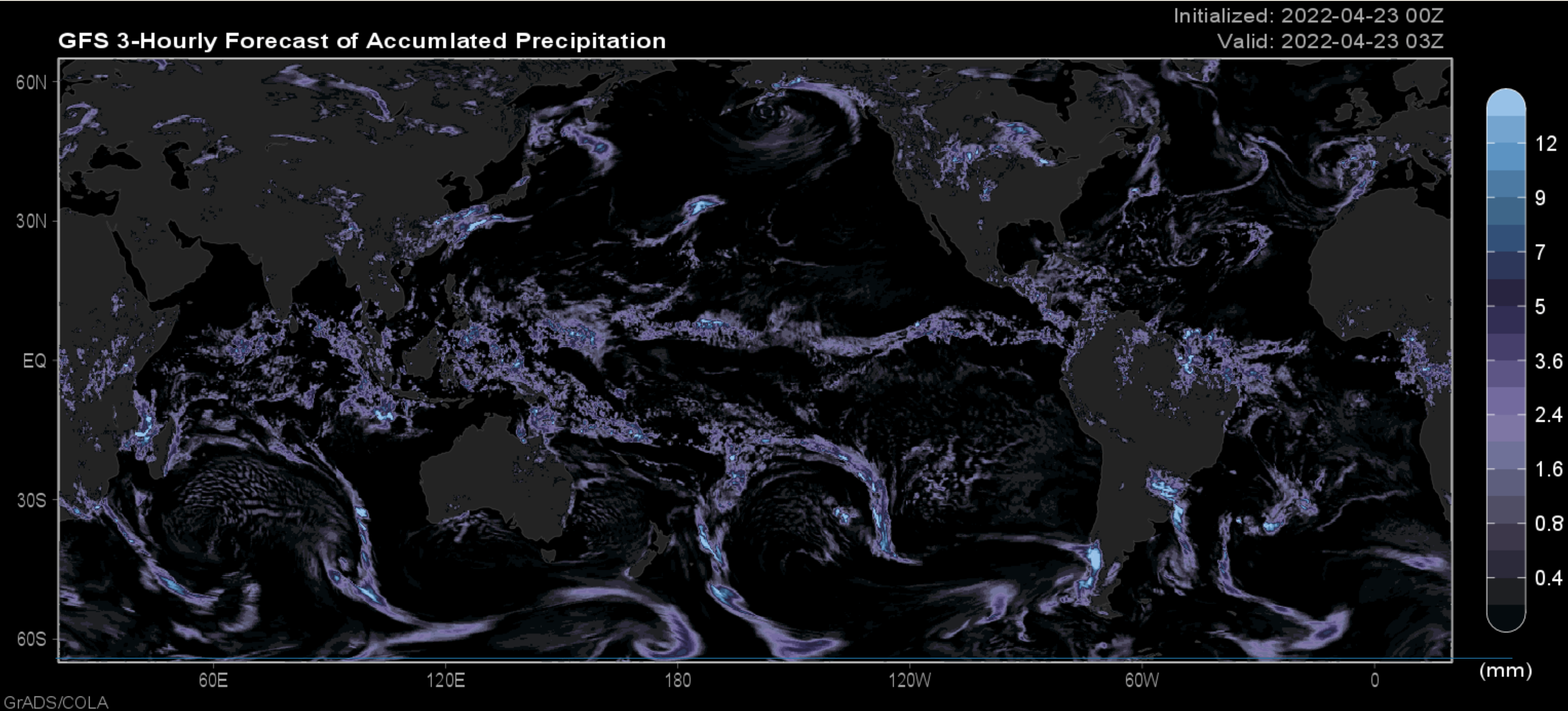


Modelli annidati
anni 2020

Modelli
annidati
dell'oceano:
Dall'oceano
aperto alla
scala urbana:
un sistema di
modellazione
per la città di
Savannah e le
coste della
Georgia



Previsioni Numeriche Atmosferiche: precipitazione



Previsioni Numeriche oceaniche: correnti



Scienza dei dati

La scienza del Machine Learning elabora algoritmi in grado di apprendere automaticamente dai dati le relazioni esistenti tra diverse grandezze.



Quanto e' buona la previsione con I nuovi modelli ML?

Luglio 2024, L'AI ha superato i modelli numerici

The New York Times

Weather Forecasters a New Edge

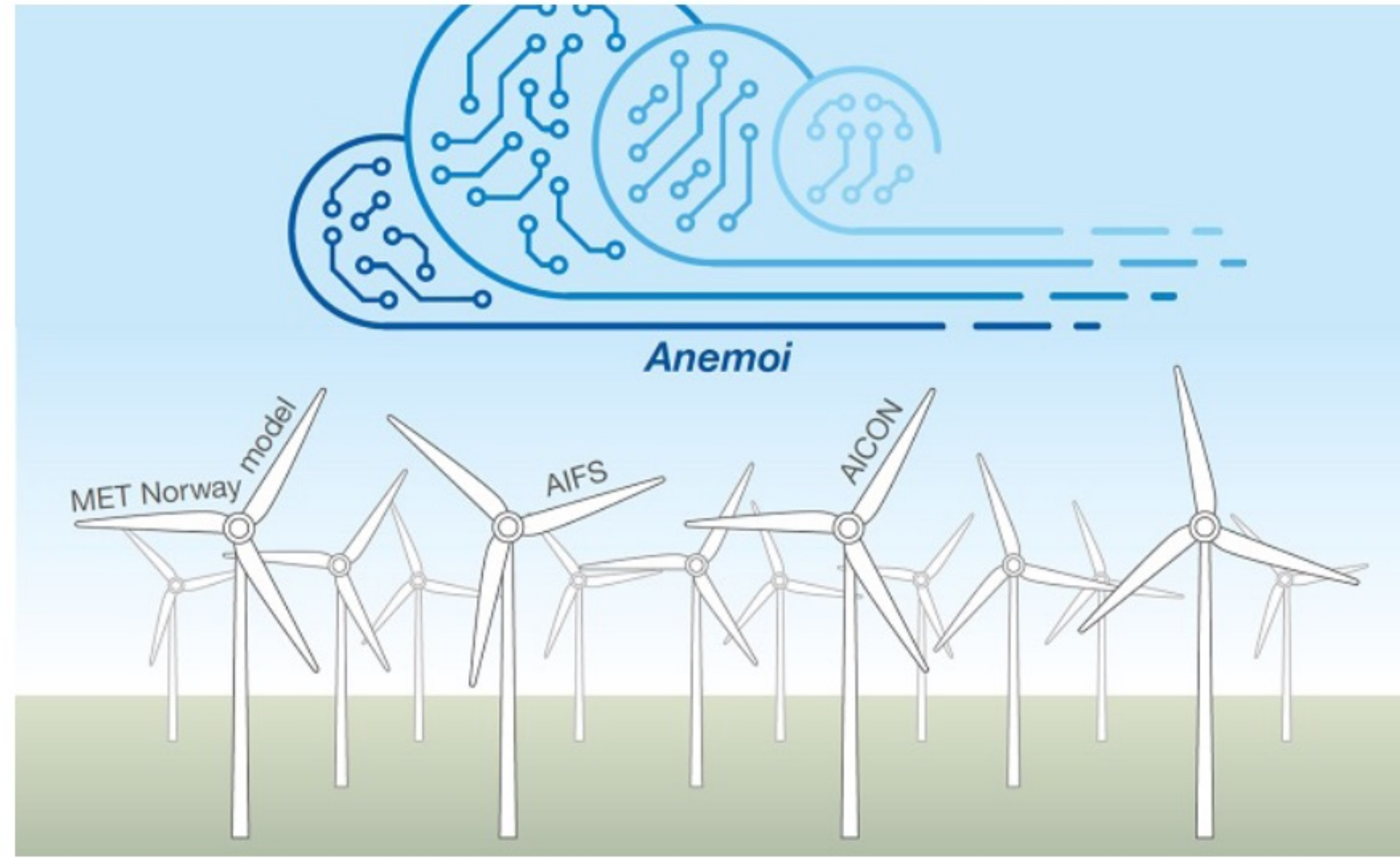
The brainy machines are predicting global weather patterns with new speed and precision, doing in minutes and seconds what once took hours.

By William J. Broad July 29, 2024

[Share full article](#)



Ora le previsioni del tempo atmosferico si fanno con l'intelligenza artificiale dal 25 Febbraio 2025



A range of national meteorological services across Europe and ECMWF have launched Anemoi, a framework for creating machine learning (ML) weather forecasting systems. Named after the Greek gods of the winds, Anemoi is a collaborative, open-source initiative.

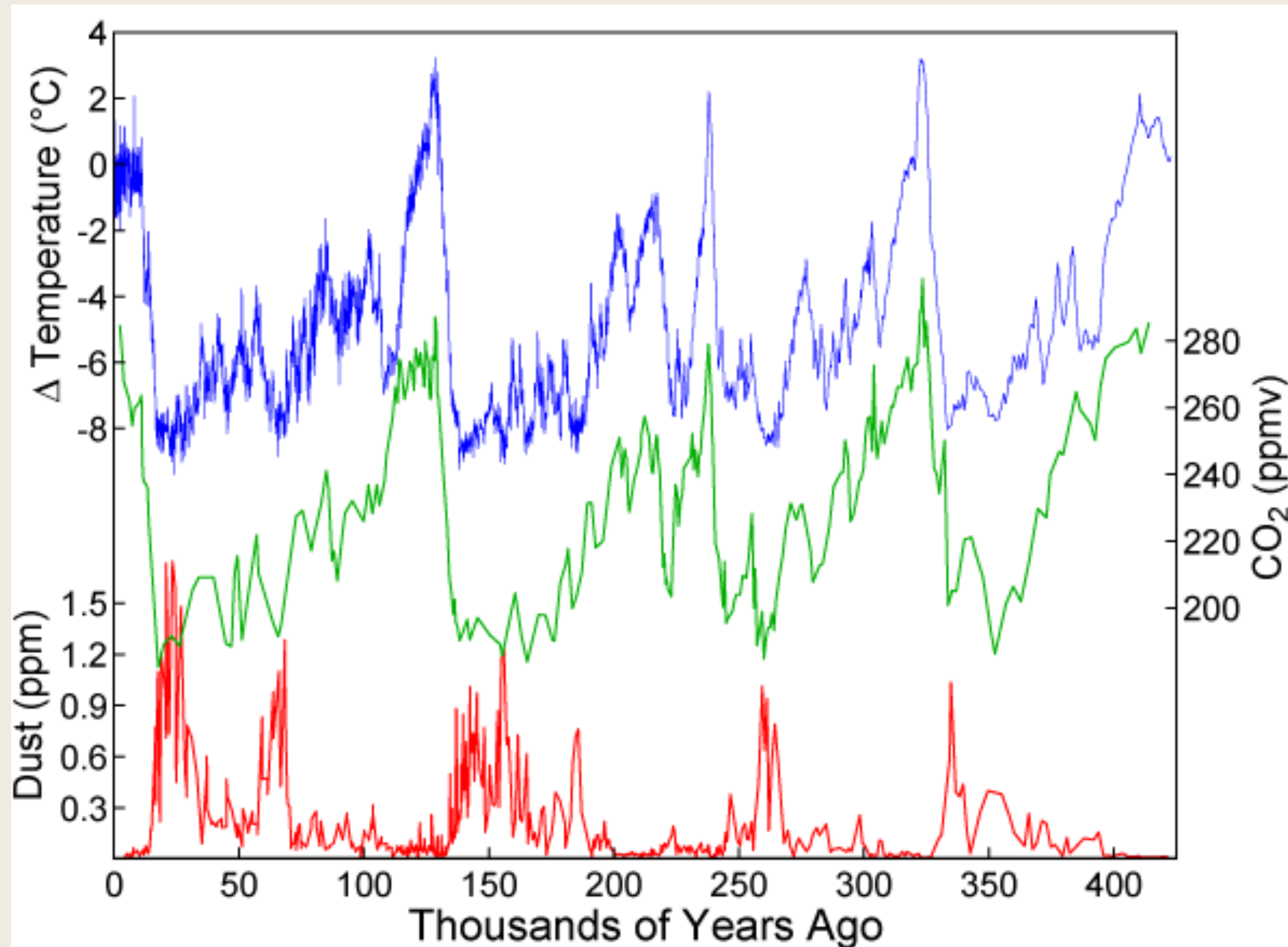
IL Centro Europeo di previsioni del tempo e' al tecnopolo di Bologna!

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts>

La CO₂ e l'effetto serra: il riscaldamento della terra

Il passato della CO2 e la temperatura

<https://www.pbslearningmedia.org/resource/nvdtwm-sci-climaterecord/interpreting-earths-climate-record-decoding-the-weather-machine/>



I cicli di Milanković

Blue: Temperatura dell'aria

Verde: CO₂ nell'atmosfera

Vostok ice core record

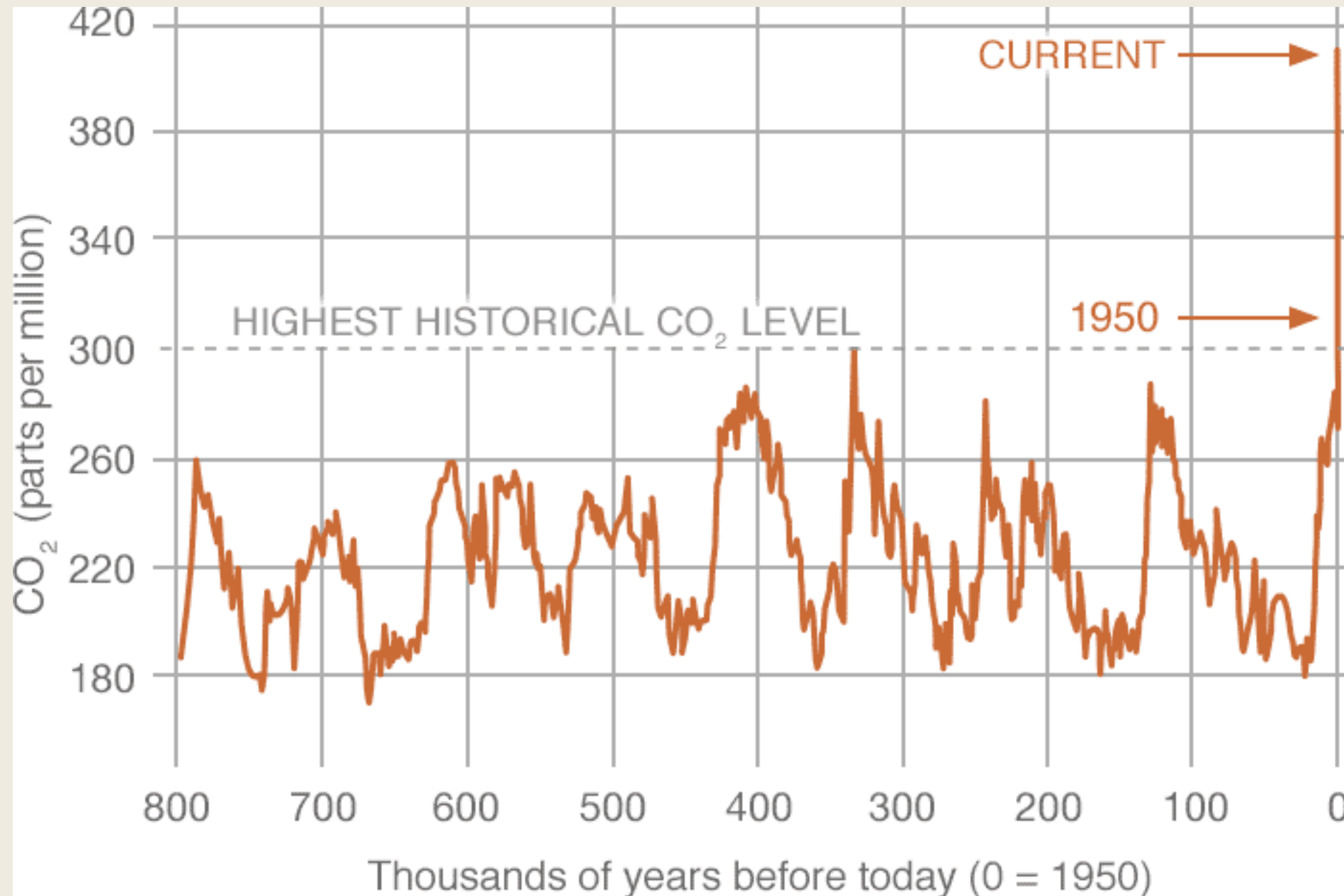
(Antarctica

78°28' S, 106°48' E

3488 m above MSL)



Il livello della CO₂ ai giorni nostri: l'impatto umano



<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

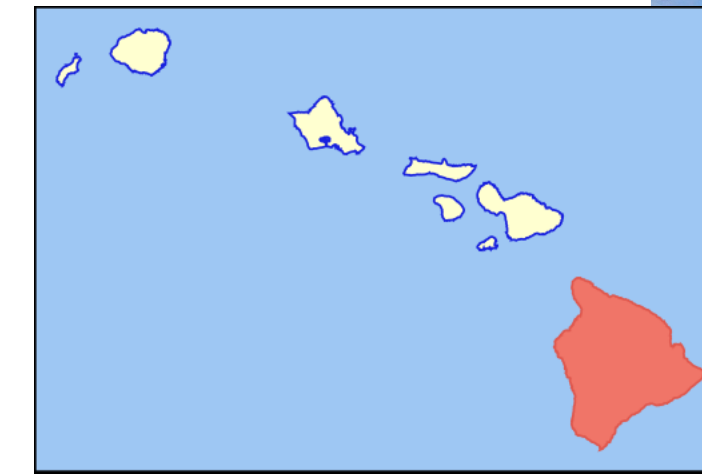
<https://www.youtube.com/watch?v=Yb3NsMJ-YQ8>

Il livello della CO₂ ai giorni nostri: l'impatto umano

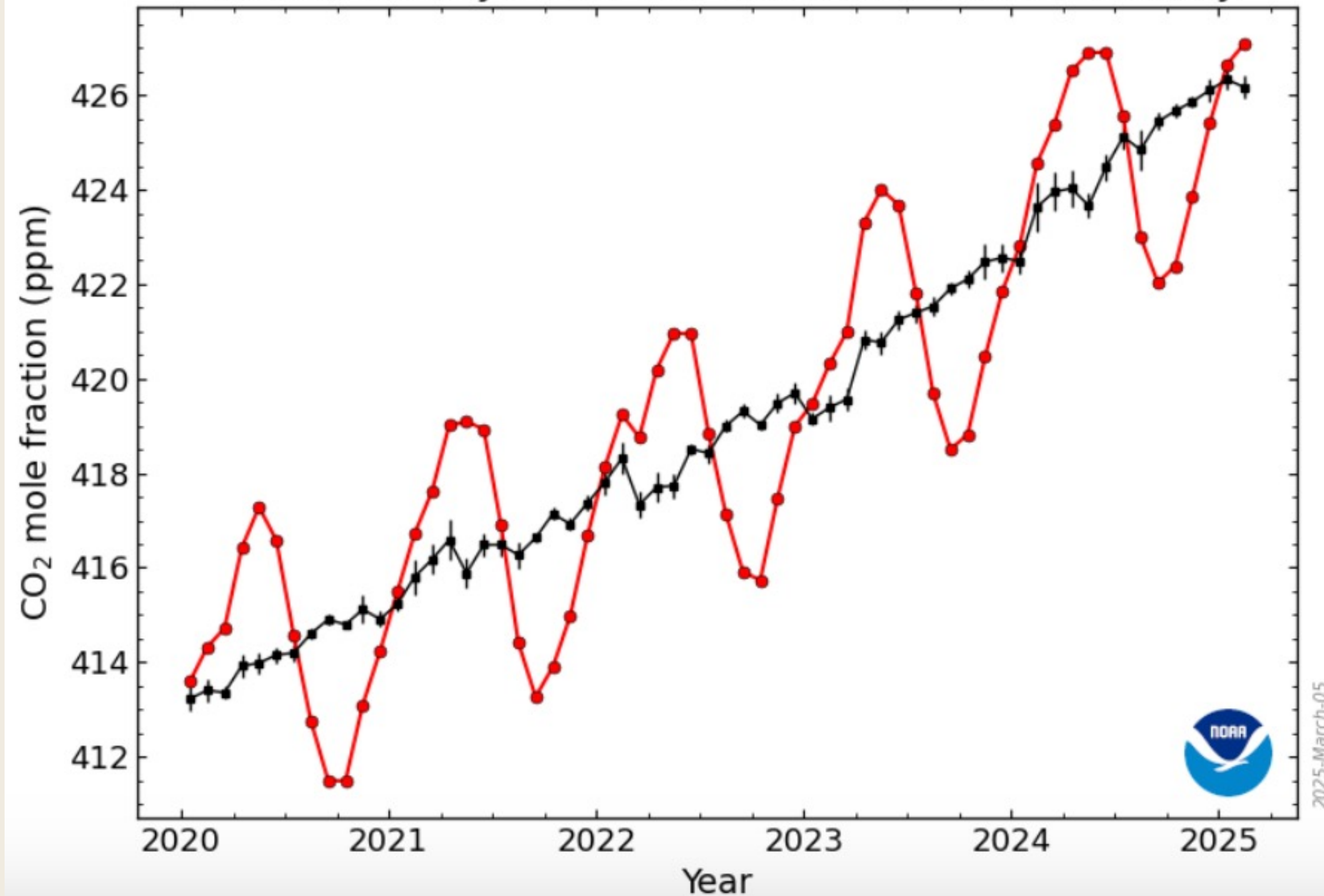
February 2026: 429.35 ppm

February 2025: 427.09 ppm

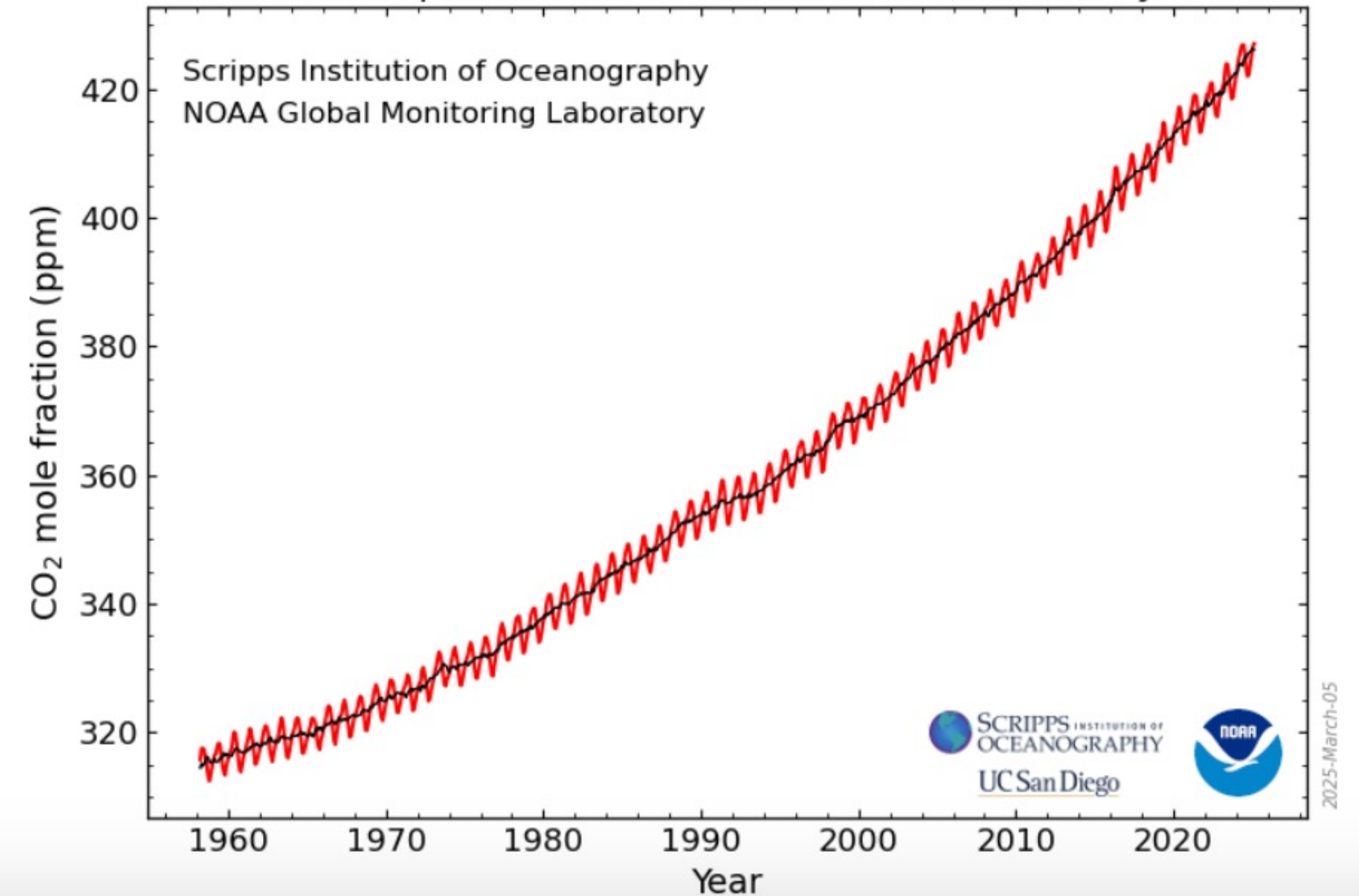
Last updated: Mar 05, 2026



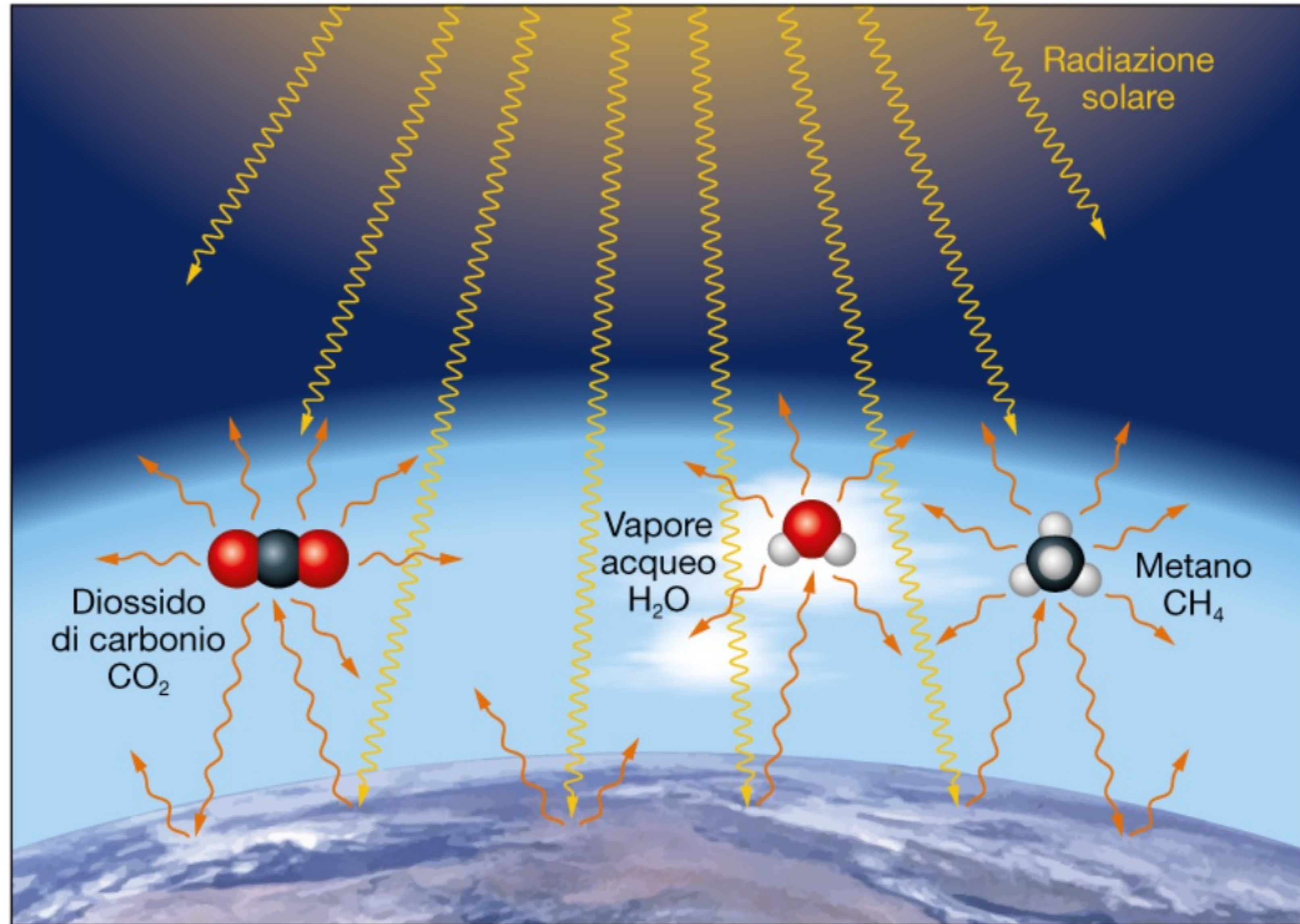
Recent Monthly Mean CO₂ at Mauna Loa Observatory



Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



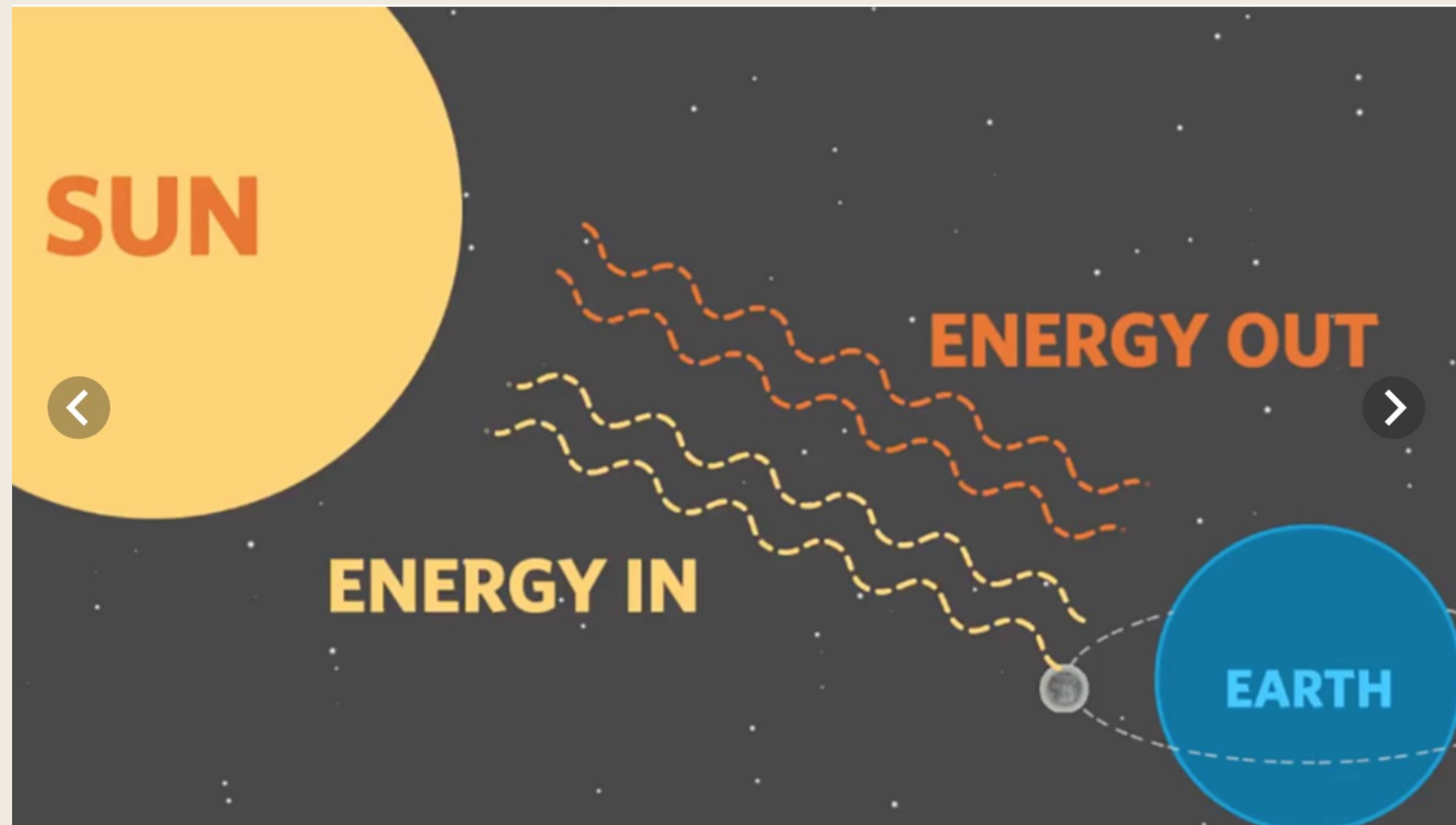
I principali gas in atmosfera



I principali gas-serra dell'atmosfera terrestre

Il bilancio globale di energia della terra

«Bilancio» significa che al netto di quello che entra e quello che esce un «sistema» cambia le sue proprietà, in questo caso la temperatura

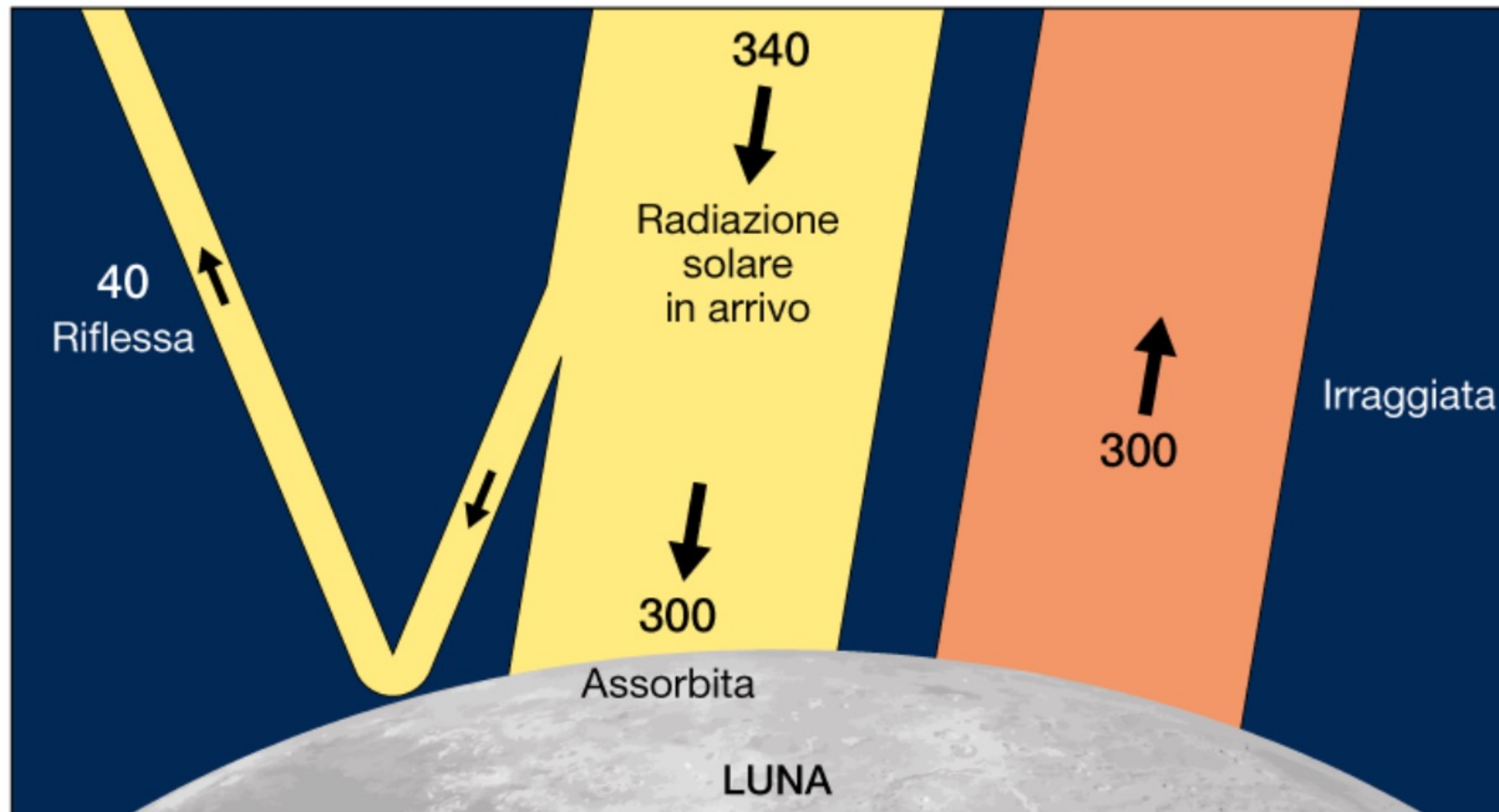


<https://www.calacademy.org/educators/earths-delicate-energy-balance>

Il bilancio globale di energia della terra

bilancio di energia sulla LUNA

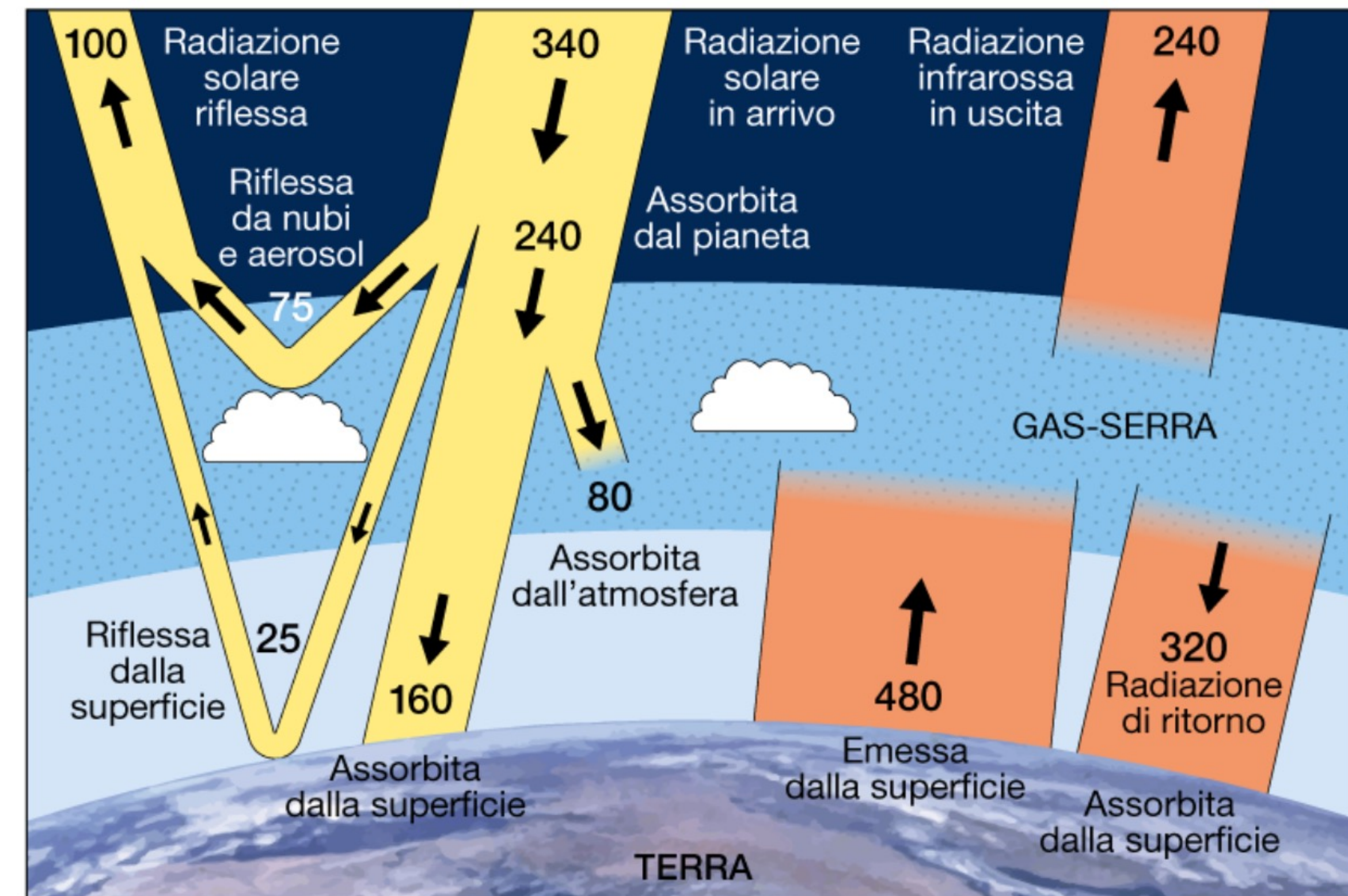
(che non ha l'atmosfera)



Il bilancio energetico della Luna (tutti i valori sono in W/m^2)

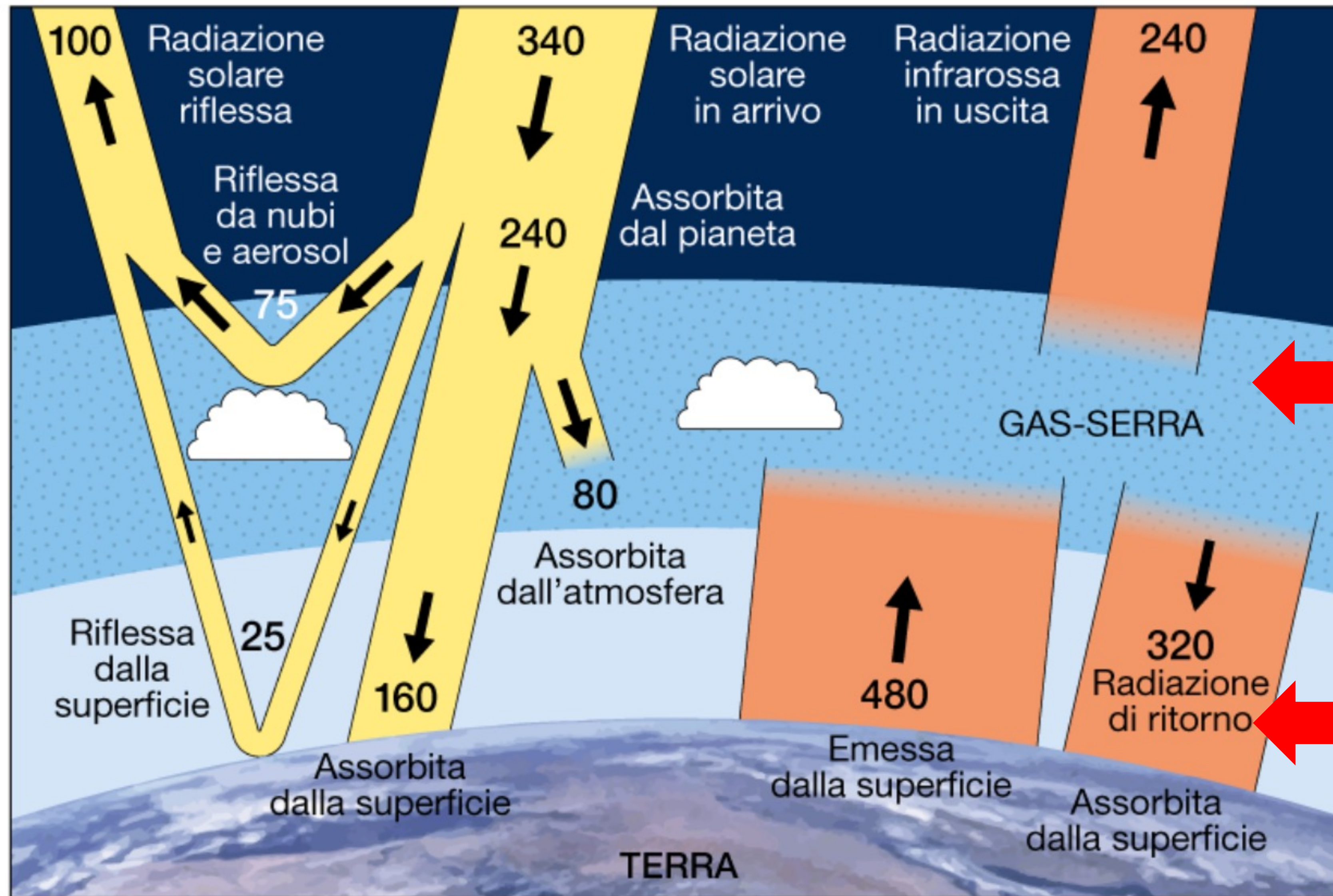
bilancio di energia sulla TERRA

(che ha l'atmosfera)



Il bilancio energetico della Terra (tutti i valori sono in W/m^2)

I gas clima-alteranti: l'effetto serra



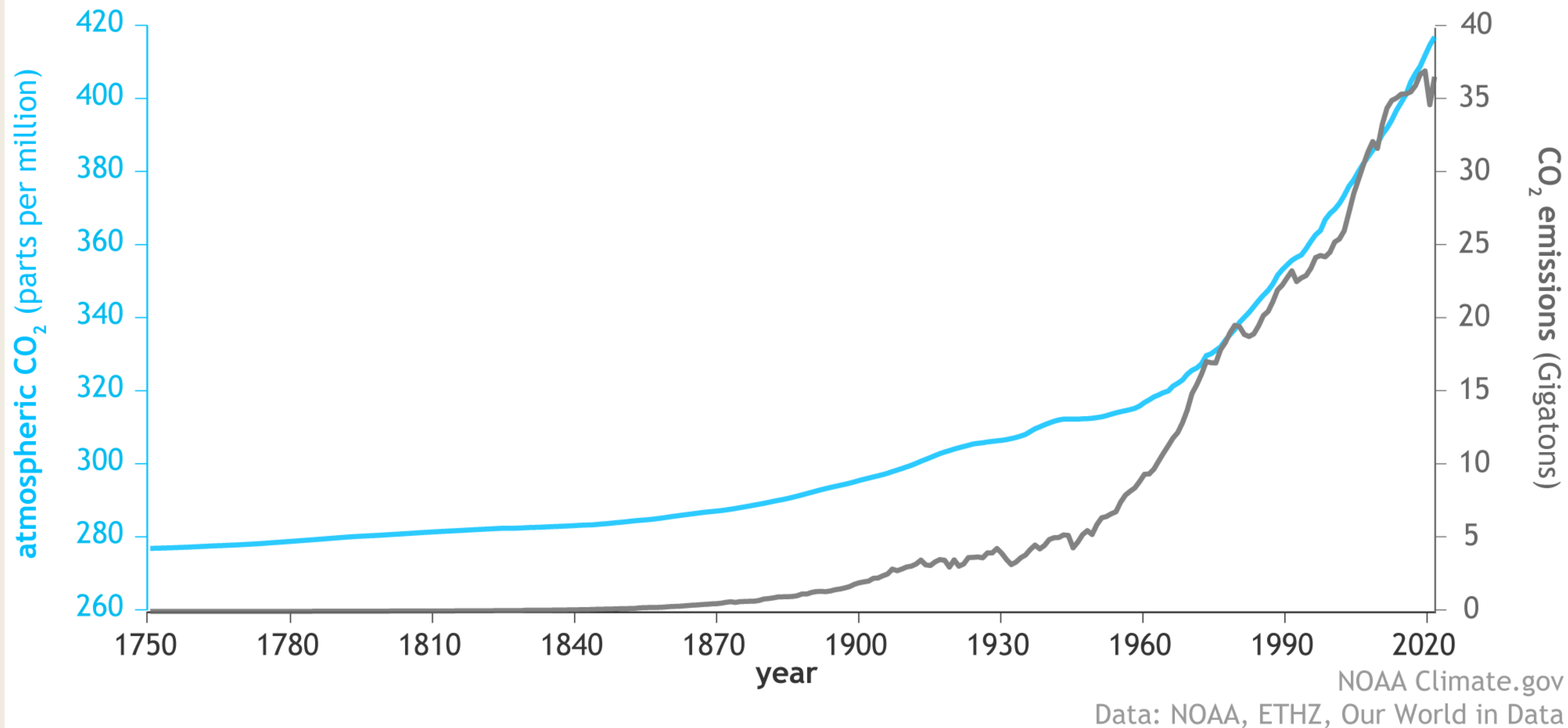
Il bilancio energetico della Terra (tutti i valori sono in W/m^2)

Gas clima-alteranti
 CO_2 CH_4
 N_2O e HFC
PFC e SF_6

L'effetto serra

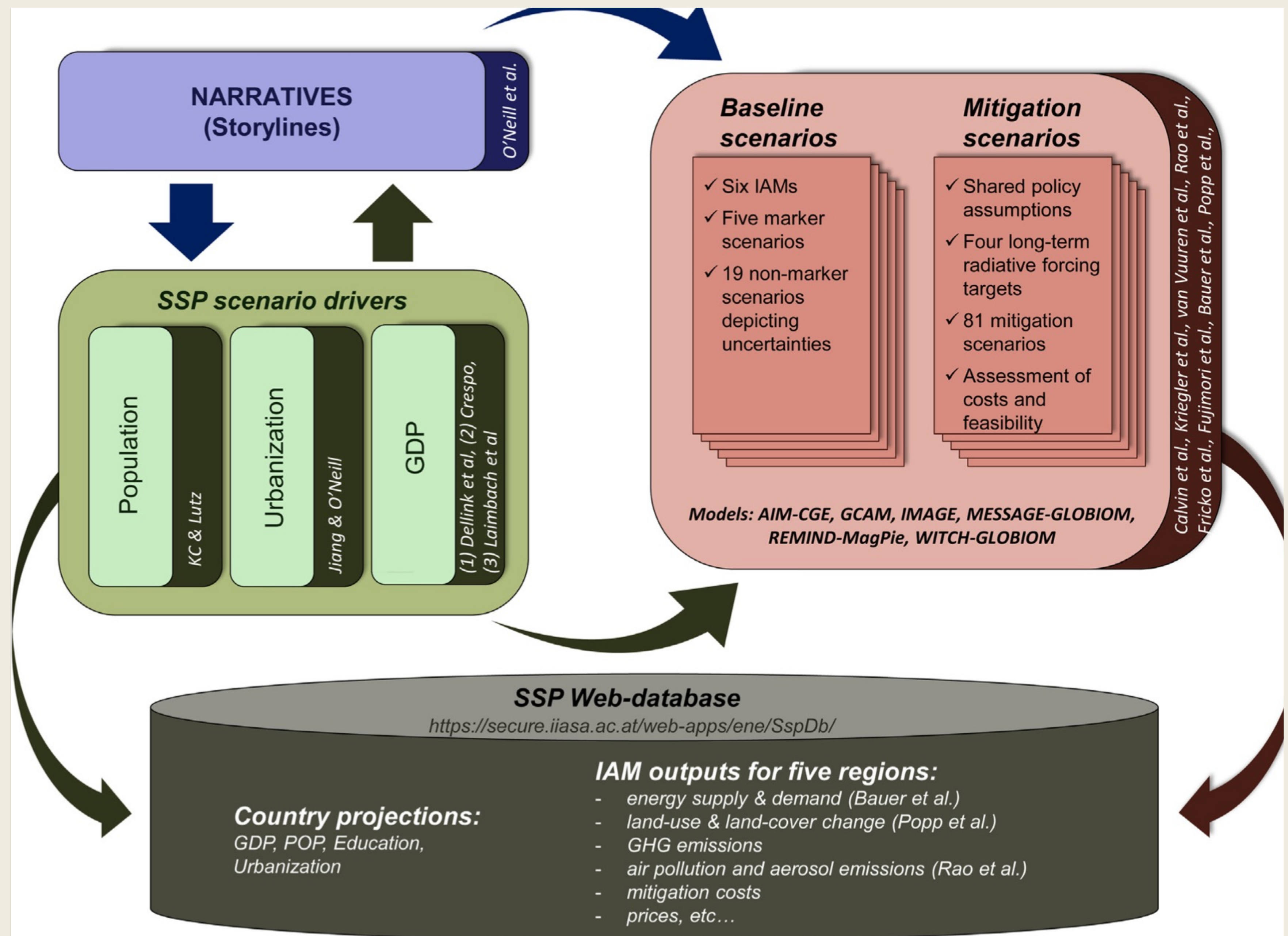
Concentrazione di CO₂ in atmosfera e emissioni

Atmospheric carbon dioxide amounts and annual emissions (1750-2021)



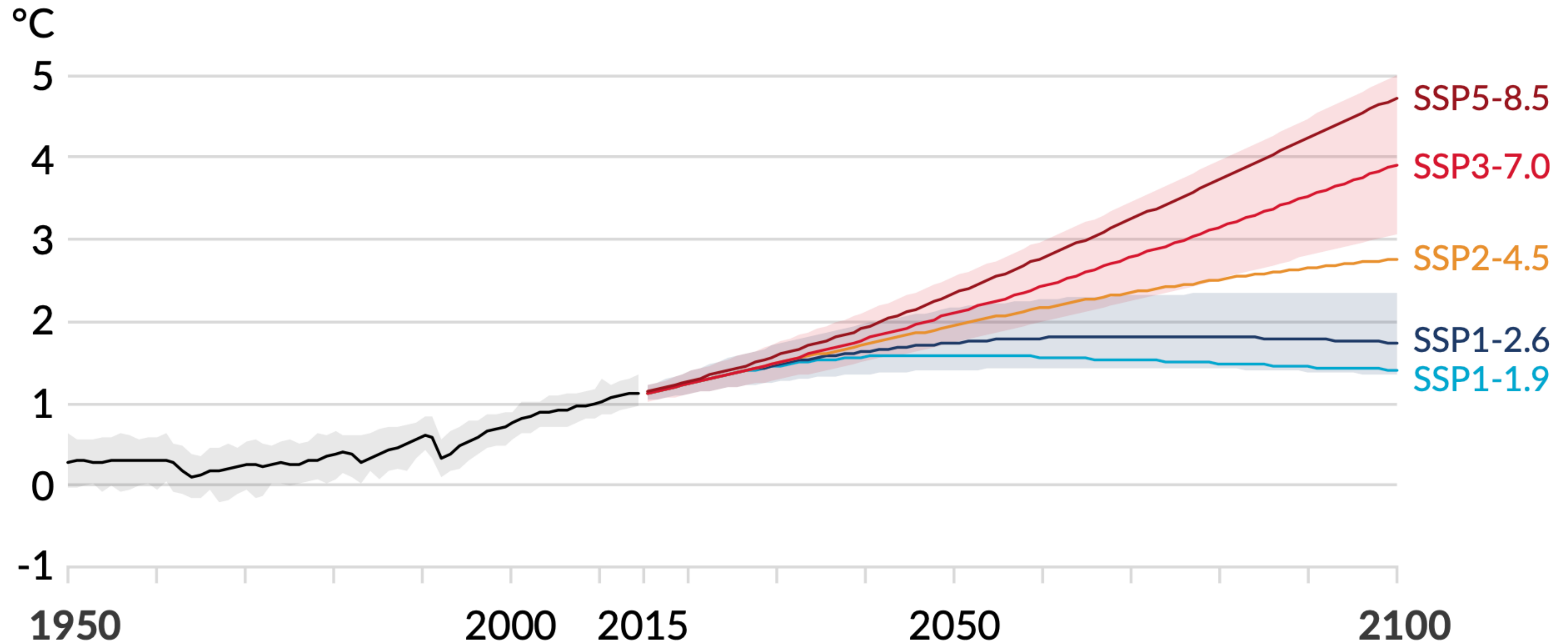
Le proiezioni del
clima usano
I percorsi
socioeconomici
previsti
(SSP)

Illustrazione
schematica dei
passaggi principali
nello sviluppo degli
scenari
socioeconomici



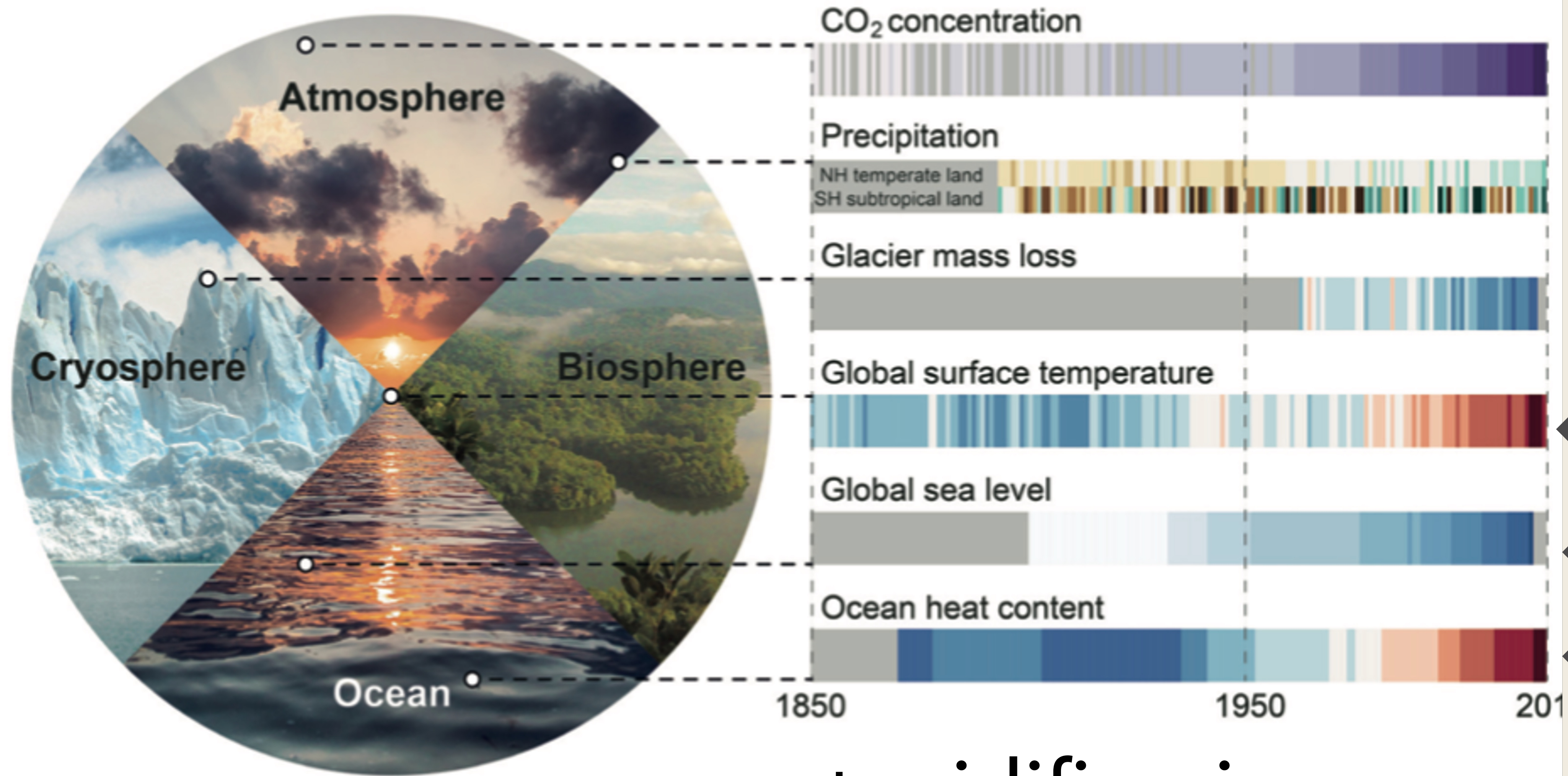
L'aumento di temperatura conseguente a diversi SSP

a) Global surface temperature change relative to 1850-1900



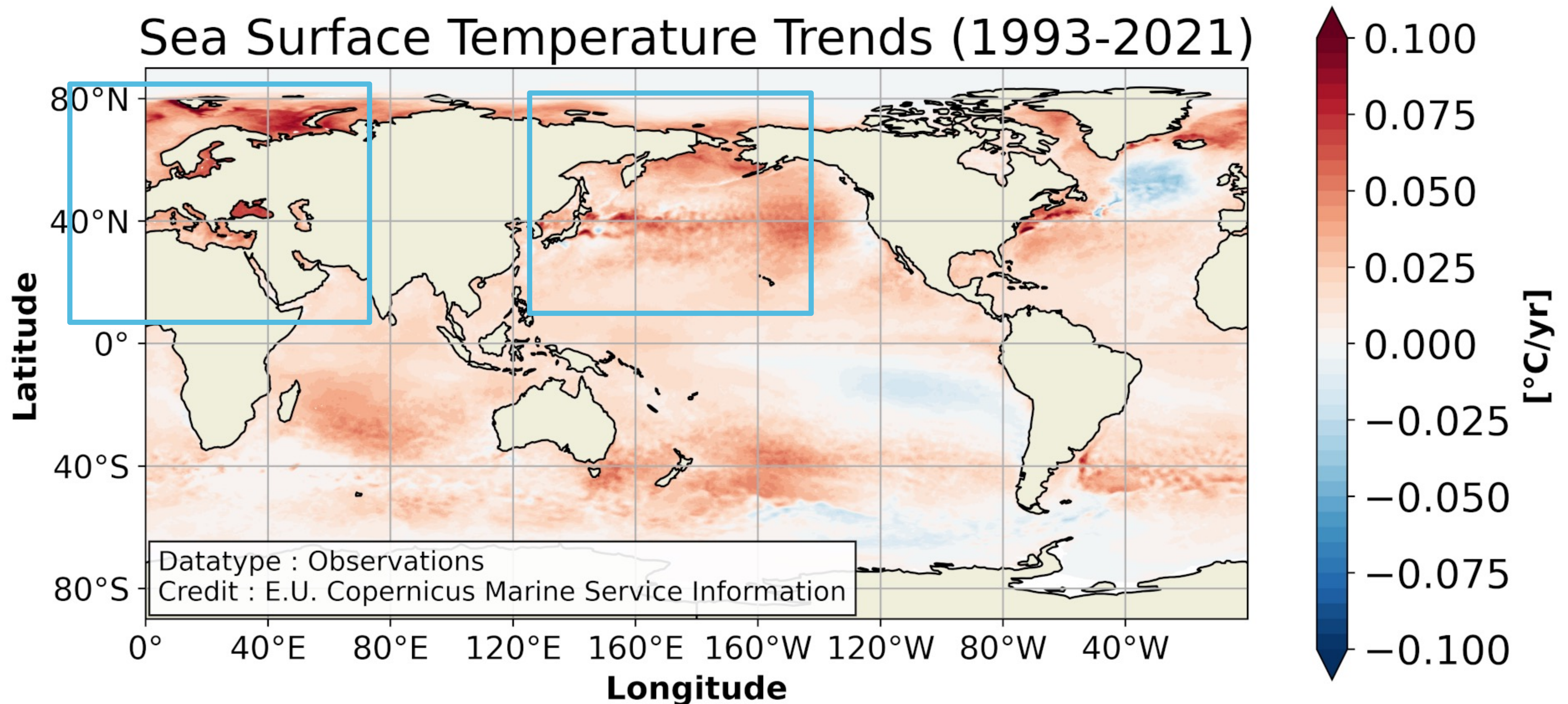
Che cosa succede all'oceano a causa del cambiamento climatico?

Cosa succede all'oceano?

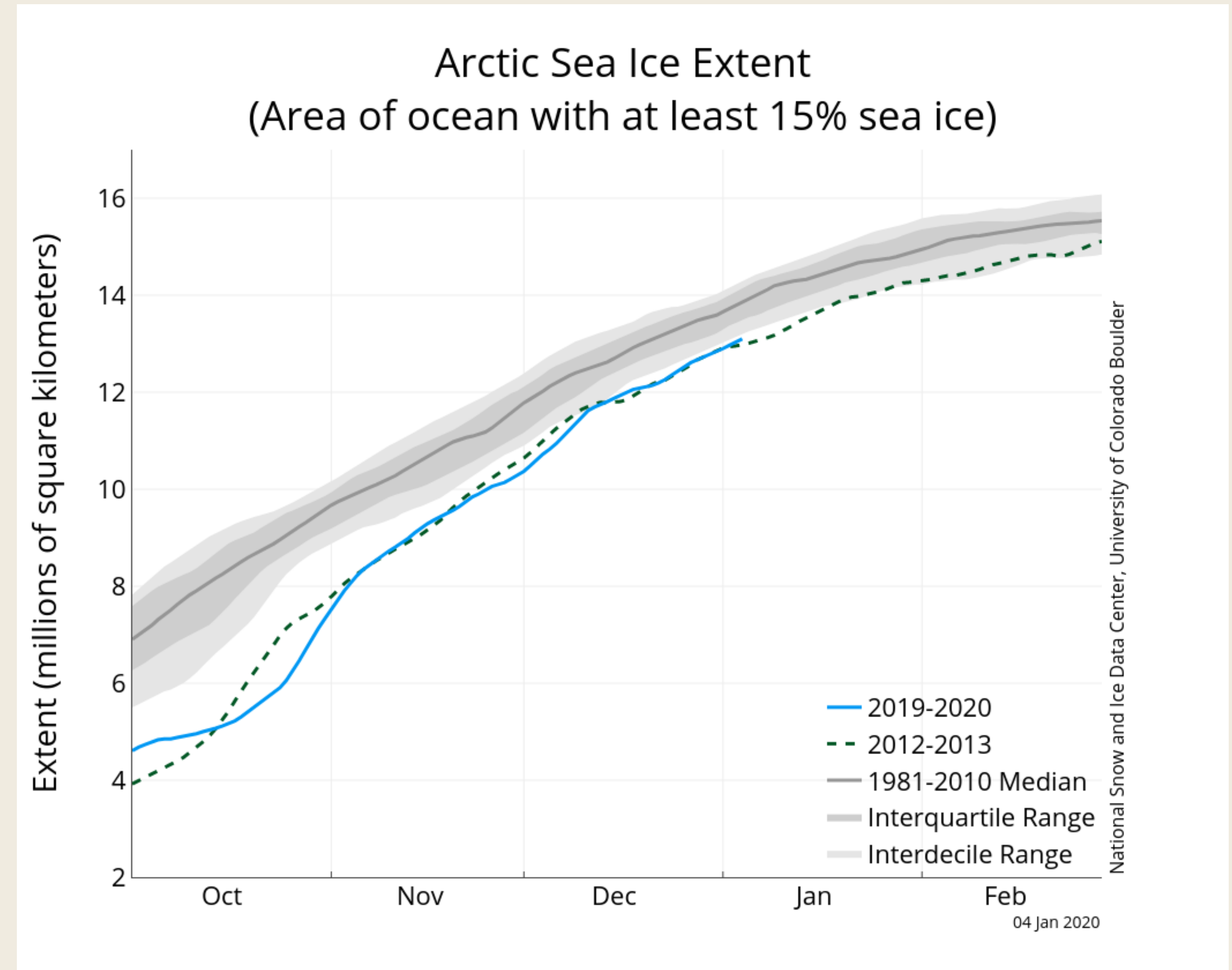
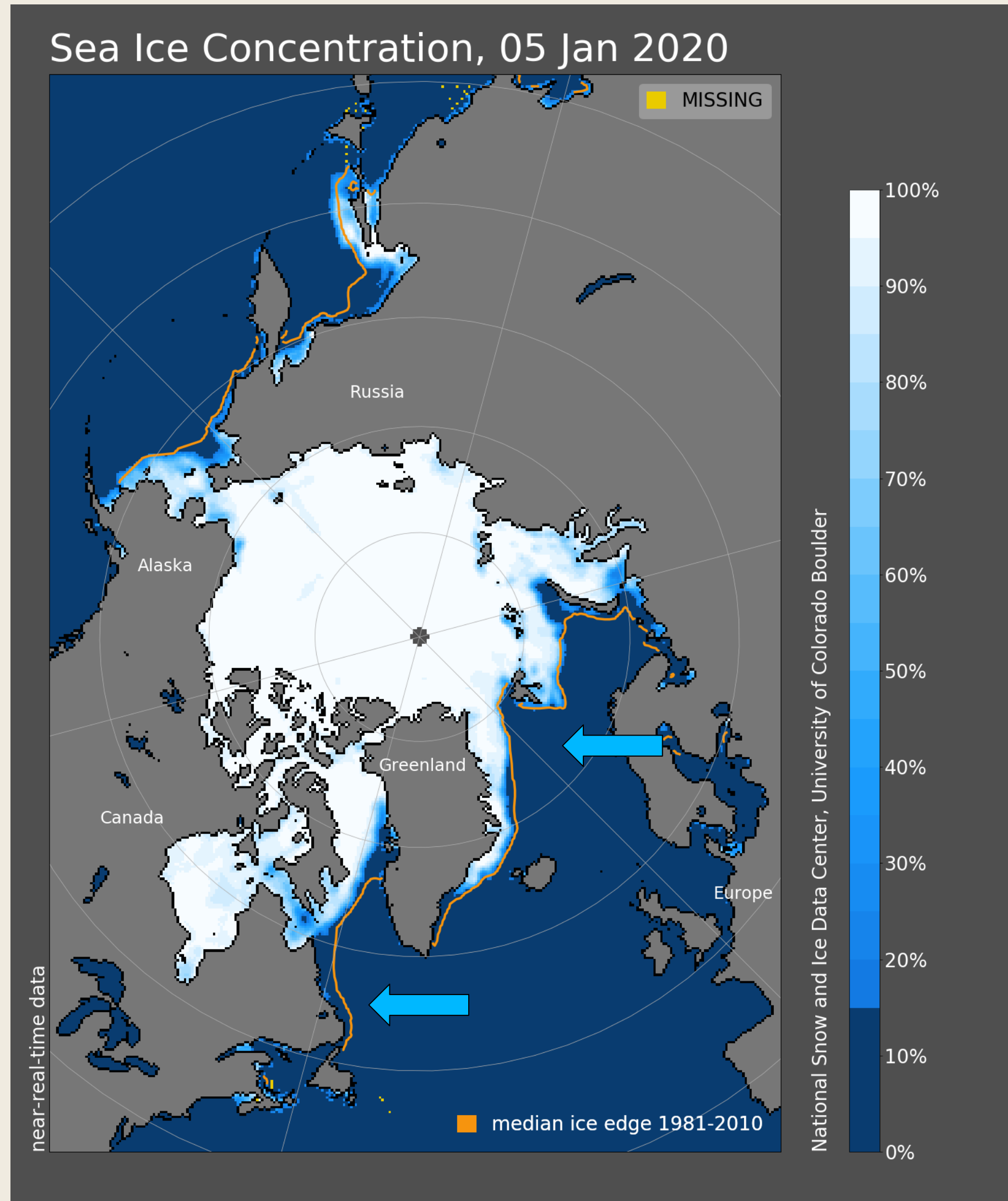


+acidificazione

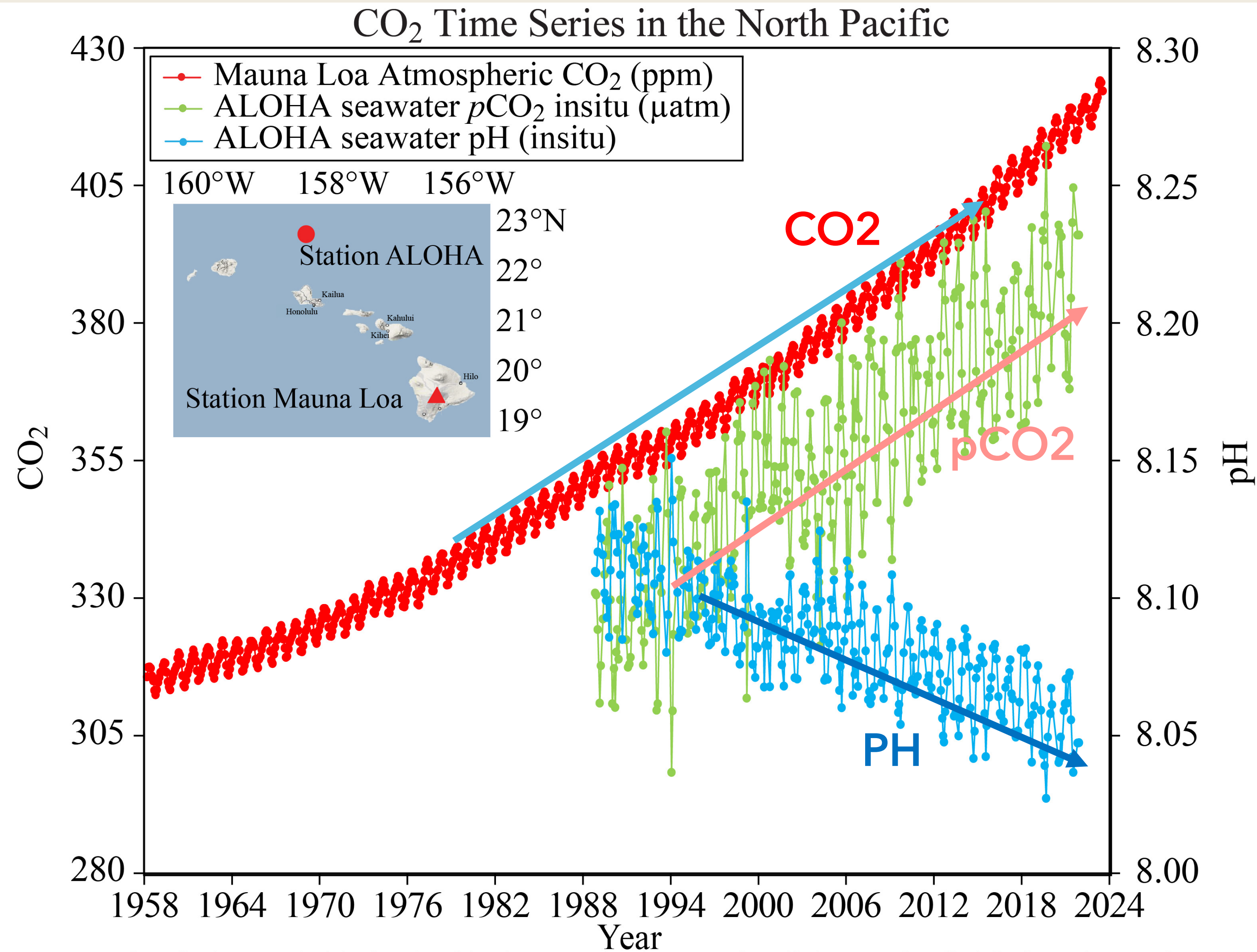
La temperatura superficiale cresce



Il ghiaccio marino scompare



L'oceano si "acidifica"



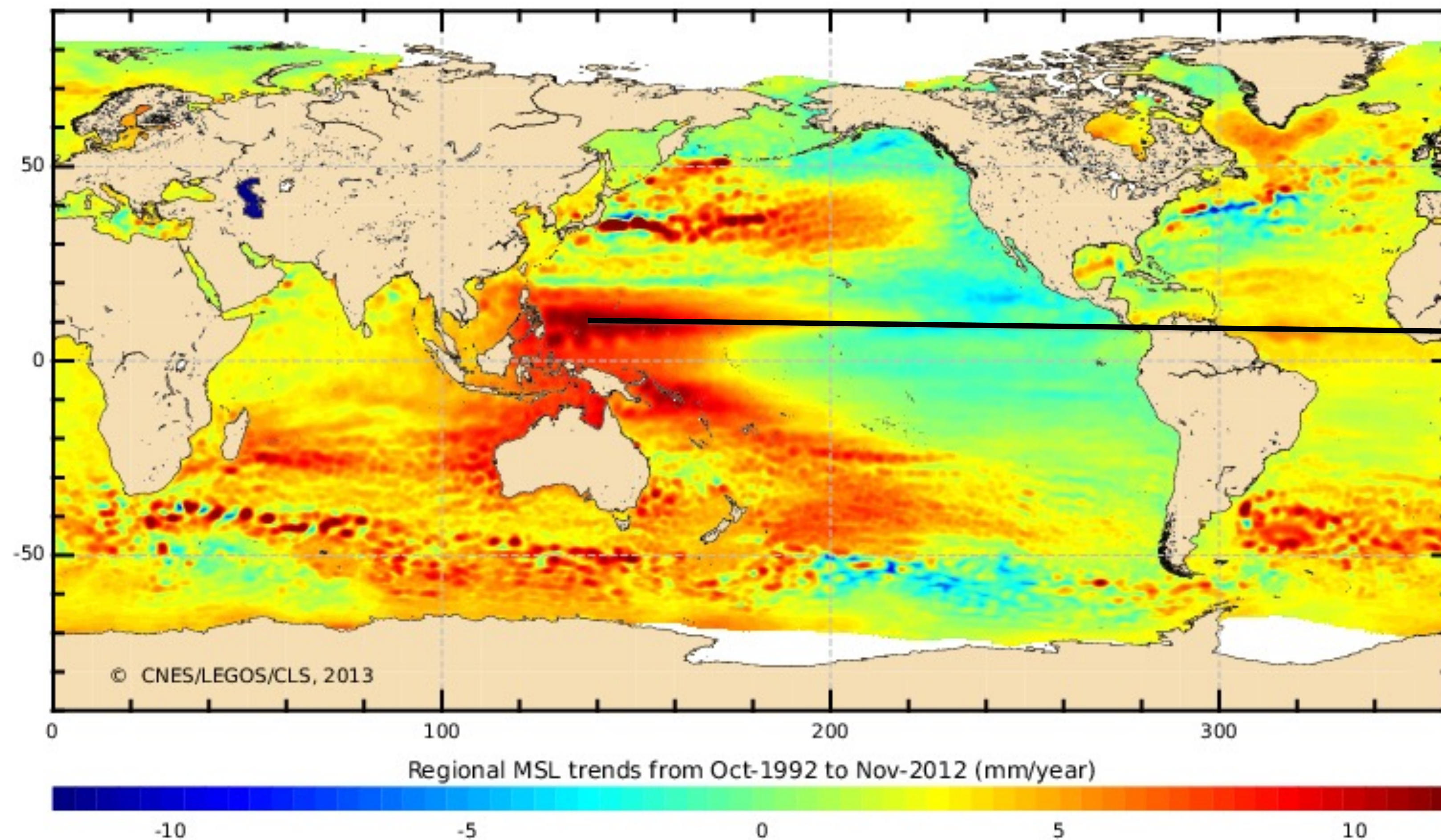
pCO₂ e' la
pressione parziale
di CO₂ nell'acqua
ed e' legata
alla concentrazione
della CO₂
nell'acqua
il PH e' legato alla
concentrazione
di ioni H⁺

Impatti dell'acidificazione sulla biologia marina

Taxa	Response	Mean Effect	
 alghe calcificanti	Survival		Not tested or too few studies
	Calcification		Enhanced <25%
	Growth		95% CI overlaps 0
	Photosynthesis	-28%	Reduced <25%
	Abundance	-80%	Reduced >25%
 coralli	Survival		95% CI overlaps 0
	Calcification	-32%	Reduced >25%
	Growth		95% CI overlaps 0
	Photosynthesis		95% CI overlaps 0
	Abundance	-47%	Reduced >25%
 coccolitoforidi (alghe)	Survival		Not tested or too few studies
	Calcification	-23%	Reduced <25%
	Growth		95% CI overlaps 0
	Photosynthesis		95% CI overlaps 0
	Abundance		95% CI overlaps 0
 molluschi	Survival	-34%	Reduced >25%
	Calcification	-40%	Reduced >25%
	Growth	-17%	Reduced <25%
	Development	-25%	Reduced <25%
	Abundance		95% CI overlaps 0

Il livello del mare cresce

2 sono le ragioni piu' importanti: lo scioglimento dei ghiacciai terrestri e l'espansione termica



CRESCE
MOLTO

L'accelerazione della crescita del livello del mare

Accelerazione significa che non e' una RETTA

la migliore approssimazione alla curva di crescita

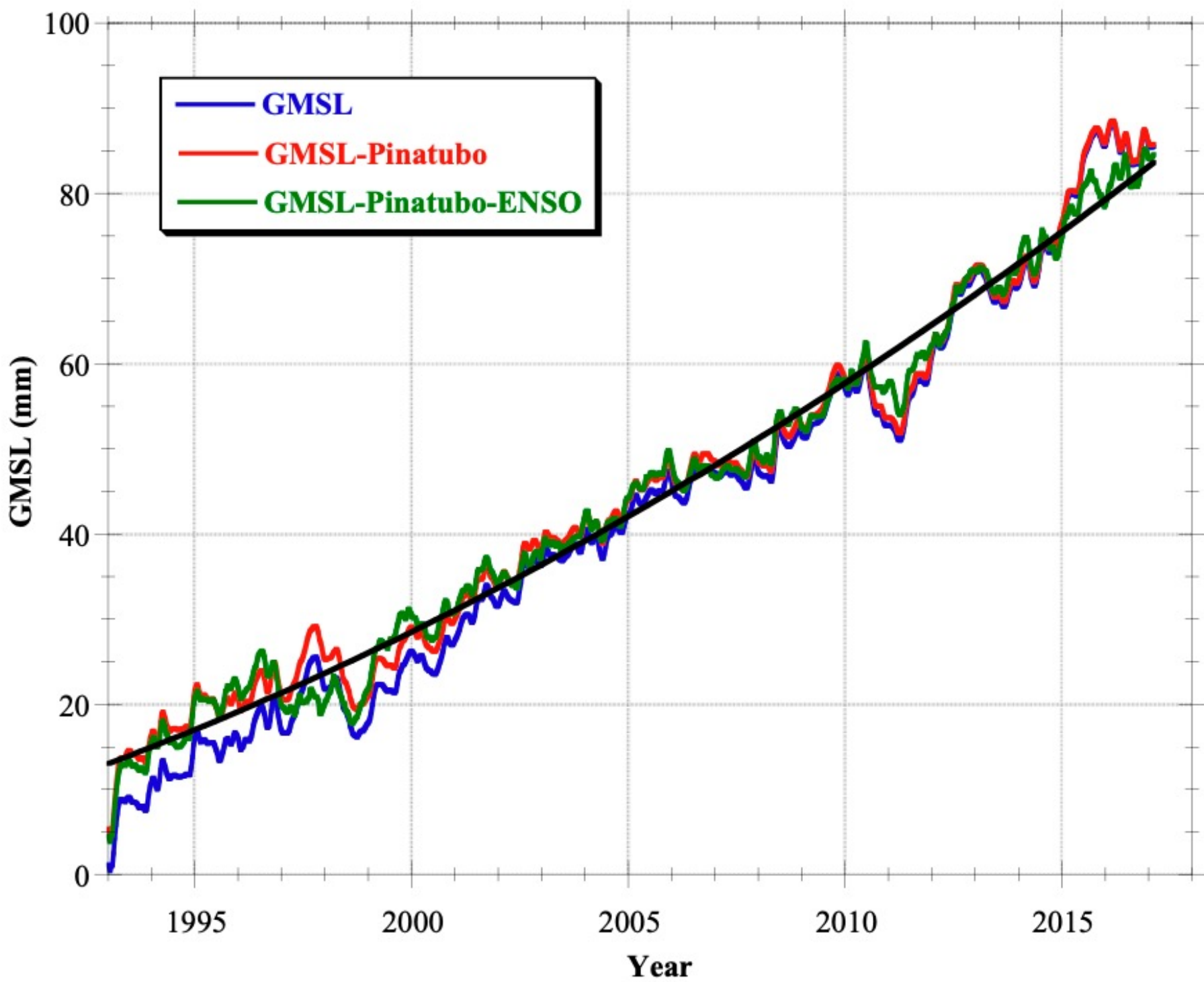


Fig. 1. GMSL from the adjusted processing of ref. 15 (blue) and after removing an estimate for the impacts of the eruption of Mount Pinatubo (12) (red), and after also removing the influence of ENSO (green), fit with a quadratic (black). The acceleration (0.084 mm/y^2) is twice the quadratic coefficient.

A che cosa e' dovuta
la crescita? ecco i numeri

Table 2. Validation of acceleration estimate

Component	Time period	Rate, mm/y; Epoch 2005.0	Acceleration, mm/y ²
Greenland	2002.3–2017.0	0.66	0.0236
Antarctica	200.32–2017.0	0.19	0.0332
Mountain glaciers and small ice caps	2002.3–2017.0	0.51	0.0094
Thermosteric*	1993.0–2016.0	1.65	0.0076
Components total		3.01	0.074
Altimeter observed	1993.0–2017.0	3.1	0.097
Altimeter observed*	1993.0–2017.0	2.9	0.117
Altimeter observed [†]	1993.0–2017.0	2.9	0.084

*Corrected for Pinatubo.

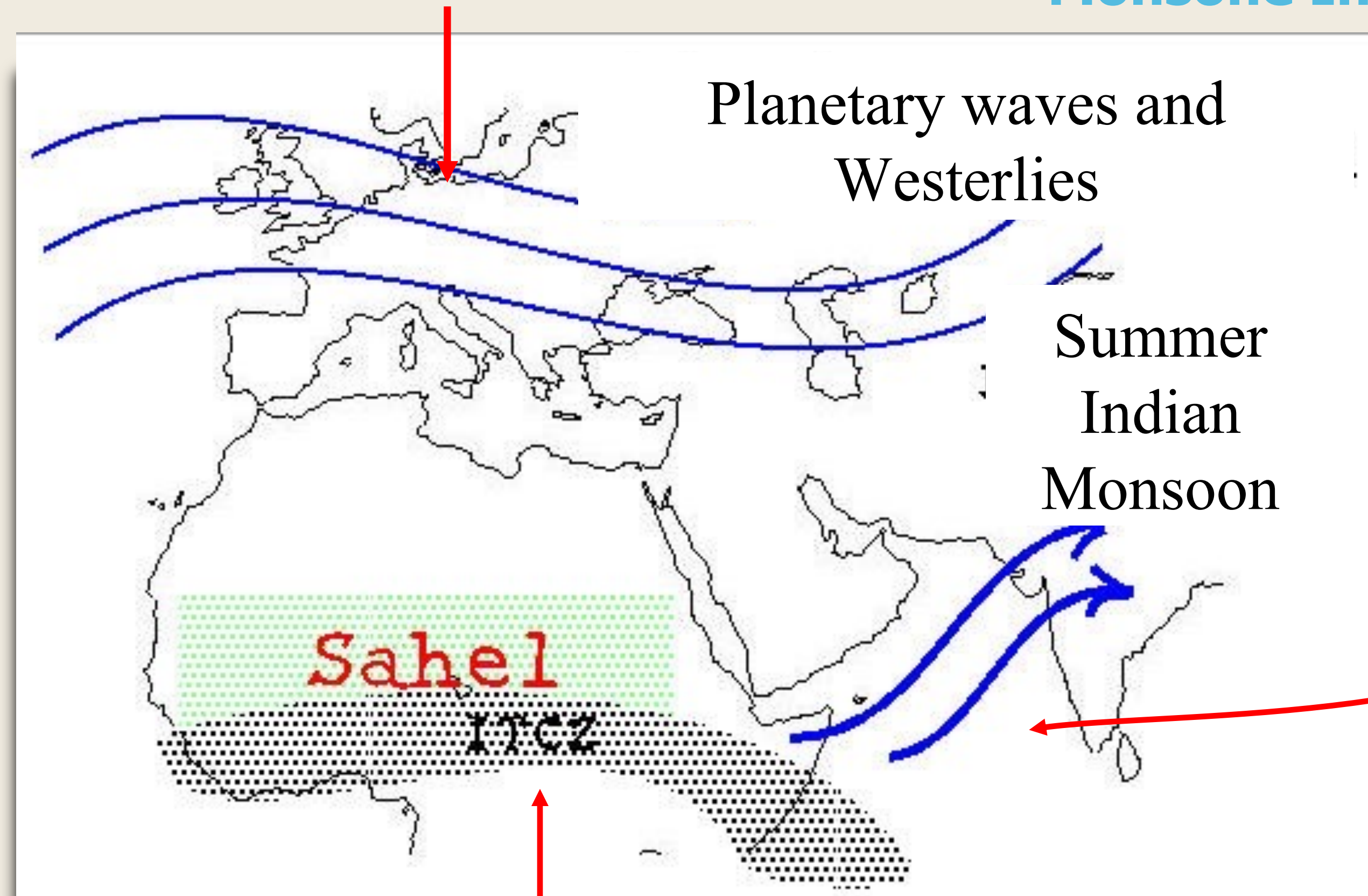
[†]Corrected for Pinatubo and ENSO effects (climate-change-driven acceleration).

Il Mediterraneo

La Regione Mediterranea

Medie Latitudini

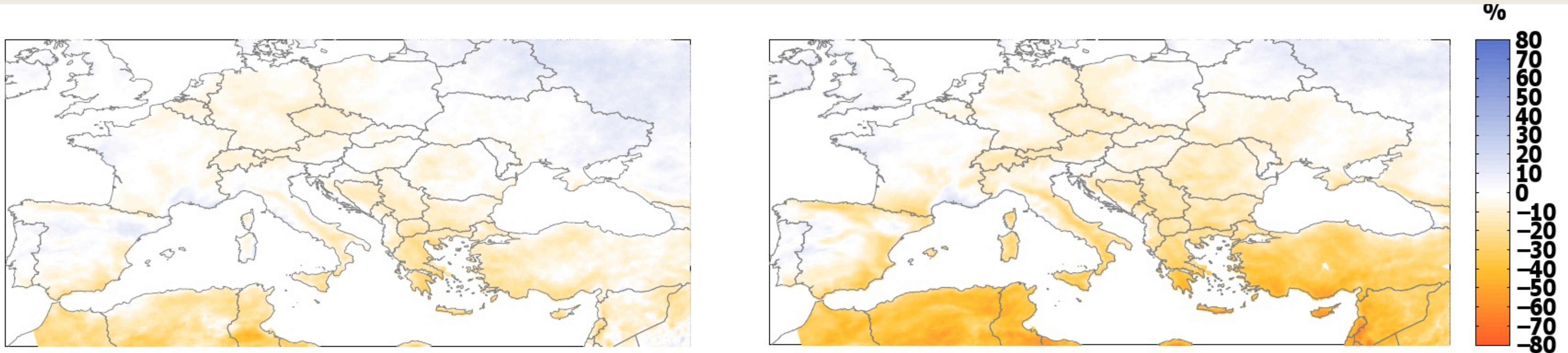
Monzone Indiano



La zona di convergenza intertropicale

Scenari di precipitazione sul Mediterraneo

Variazione delle precipitazioni sul Mediterraneo
tra la fine del XXI secolo (2080-2100) e il XX secolo (1980-2000).



scenario con riduzione
delle emissioni

scenario senza riduzione

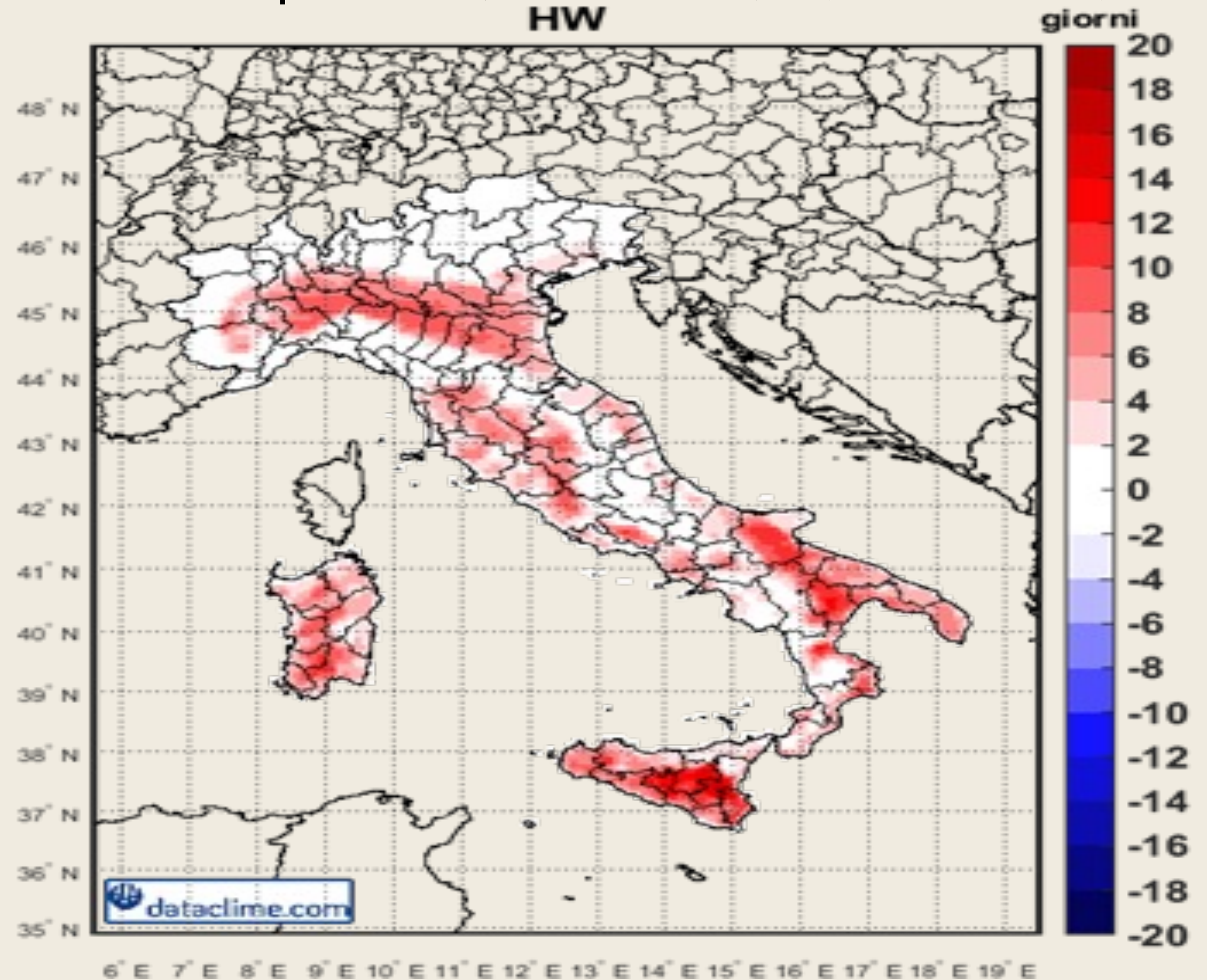


Estremi di temperatura sul Mediterraneo

differenza tra il periodo (1980-2010) e (2021-2050)

HW (giorni): Ondate di calore - Numero di giorni con temperatura massima superiore a 35°C

per gli scenari con parziale riduzione della CO2



Siamo pronti ?

Raggiungere l'obiettivo: l'accordo di Parigi



Un passaggio da "obiettivi" a "percorsi". I paesi presenteranno percorsi a lungo termine, indicativi e a basse emissioni combinati con percorsi operativi, multisettoriali e multi-temporali

INDC — Intended Nationally Determined Contribution

Ci stiamo preparando: Opzioni di mitigazione e adattamento

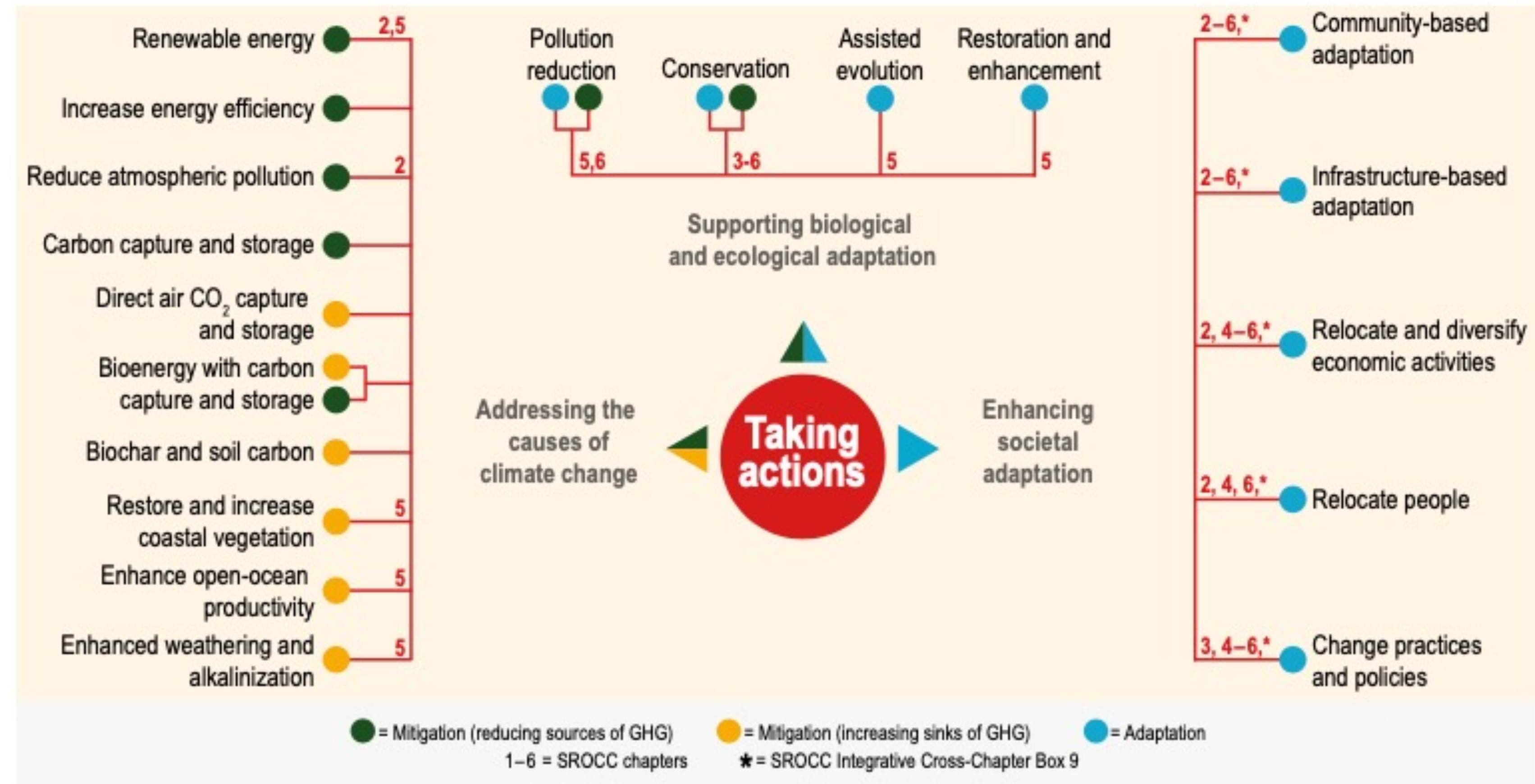


Figure 1.2 | Overview of the main ocean-cryosphere mitigation and adaptation measures to observed and expected changes in the context of this report. A longer description of these measures are given in SM1.3. Solar radiation management techniques are omitted because they are covered in other IPCC 6th Assessment Report (AR6) products. Governance and enabling conditions are implicitly embedded in all mitigation and adaptation measures. Some governance-based measures (e.g., institutional arrangements) are not included in this figure but are covered in Cross-Chapter Box 3 in Chapter 1 and in Chapters 2 to 6. GHG: greenhouse gases. Modified from Gattuso et al. (2018).

Ci stiamo preparando Sviluppo dell'oceano virtuale per l'esplorazione dei dati e accrescere la conoscenza

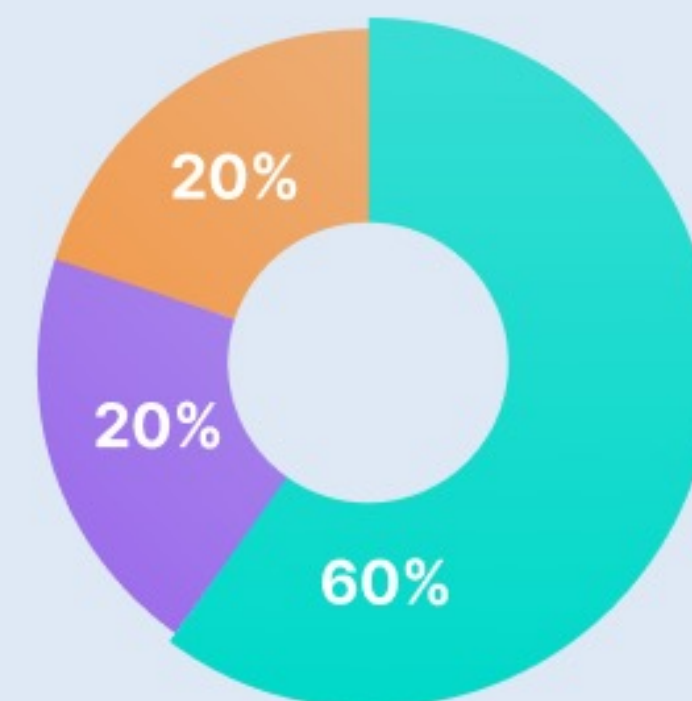
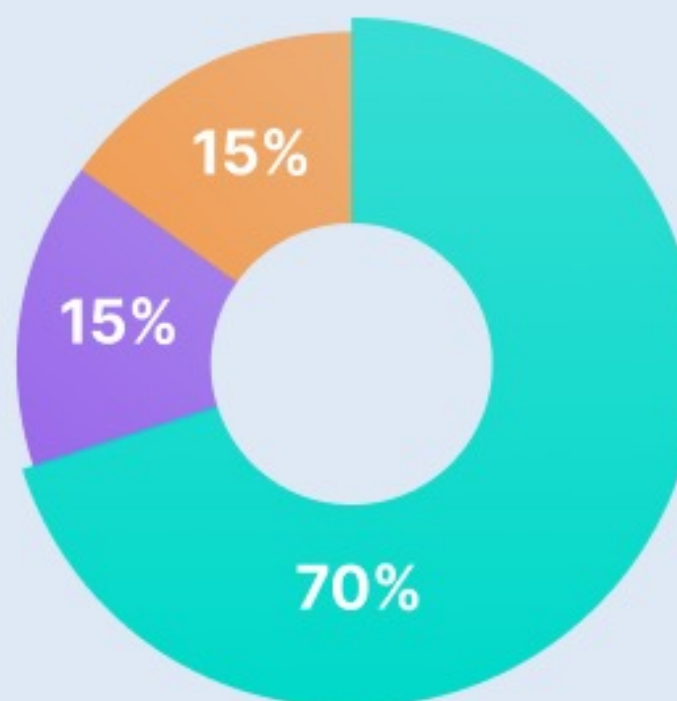
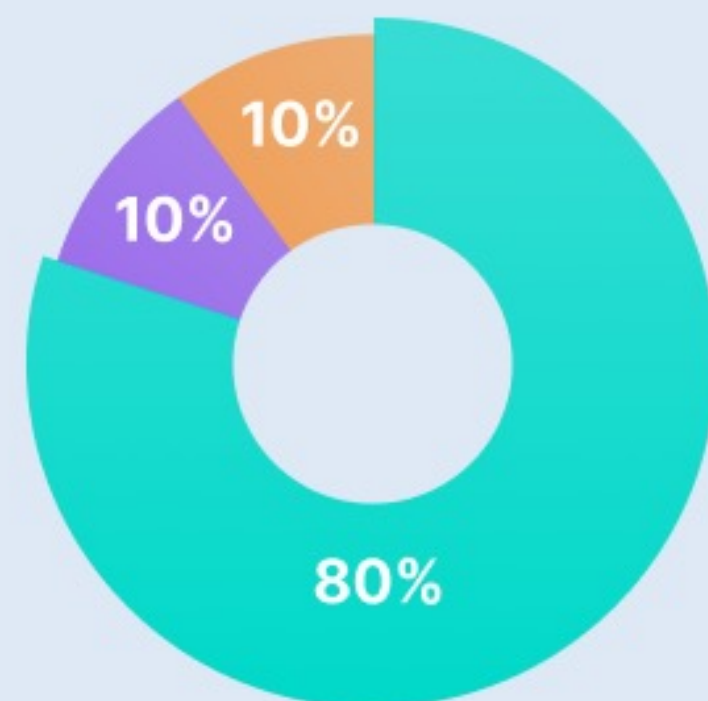
IEEE TRANSACTIONS ON
KNOWLEDGE AND
DATA ENGINEERING

IEEE Xplore®
Digital Library

<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore>

Theory-guided Data Science: A New Paradigm for Scientific Discovery from Data

● Training data ● Validation data ● Test data

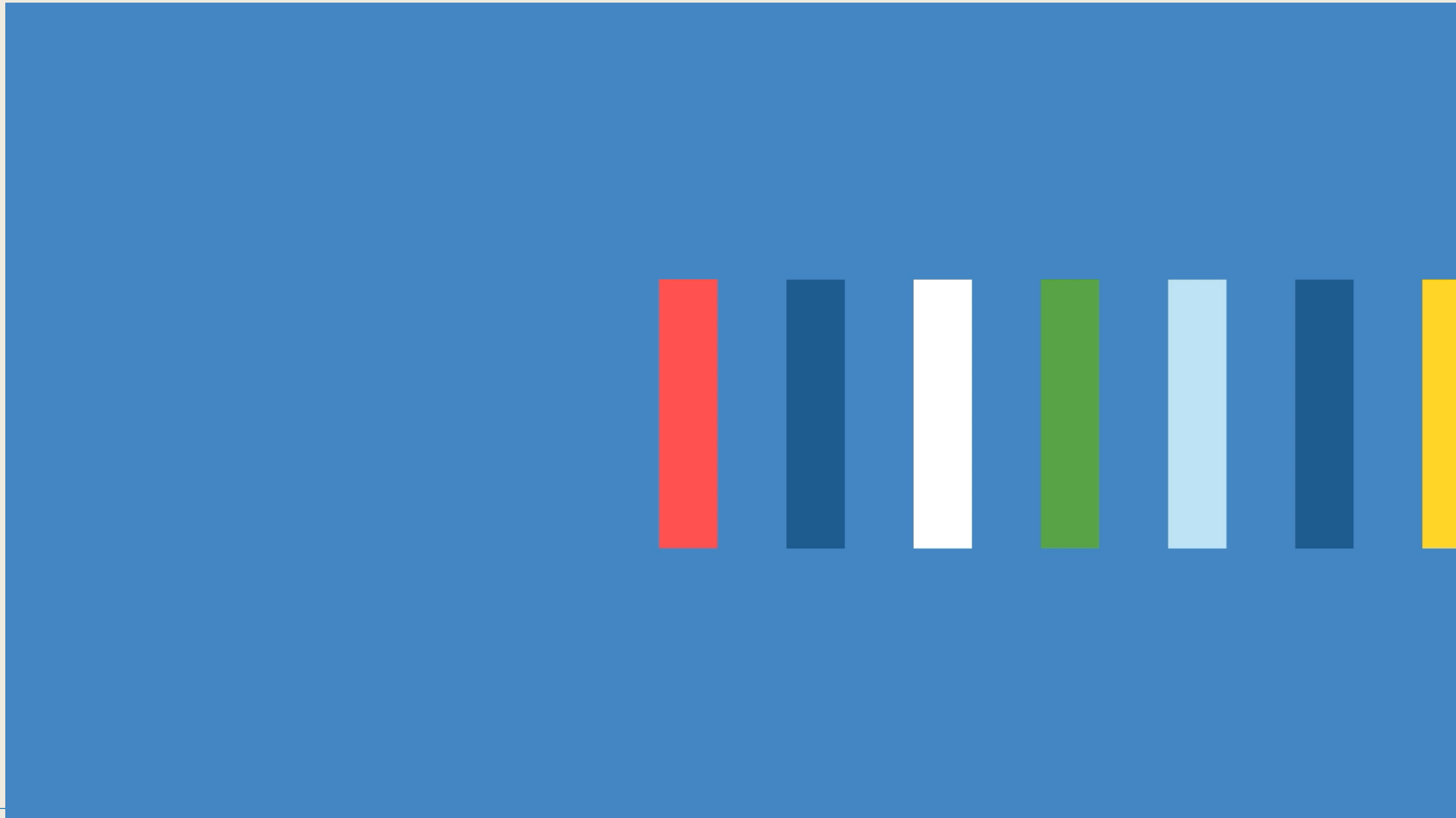




Ci stiamo preparando

Ci stiamo preparando

Il Decennio della scienza degli Oceani e' partito





Un lungo percorso

- Migrazione, rischi per la salute, conflitti per le risorse idriche
- Maggiore solidarietà
- Un'equa condivisione delle risorse
- Innovazione e tecnologia, crescita verde
- Le politiche non saranno formulate a causa dei cambiamenti climatici, ma sarà impossibile formulare una politica che non le tenga conto
- Il risultato dipenderà da noi e dalla nostra considerazione dei risultati scientifici

