

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 sen tuo verginale,~~
 E ^{occhi tuoi, ridenti} gli 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, ^{veroni}
 D' in su i balconi, del paterno ostello
 Porgea gli orecchi 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. (World Meteorological Organization- Organizzazione Mondiale della Meteorologia propone un minimo di 30 anni).
- Il clima è caratterizzato da “strutture” nel medio/lungo termine.

Le scale temporali delle “strutture” del clima

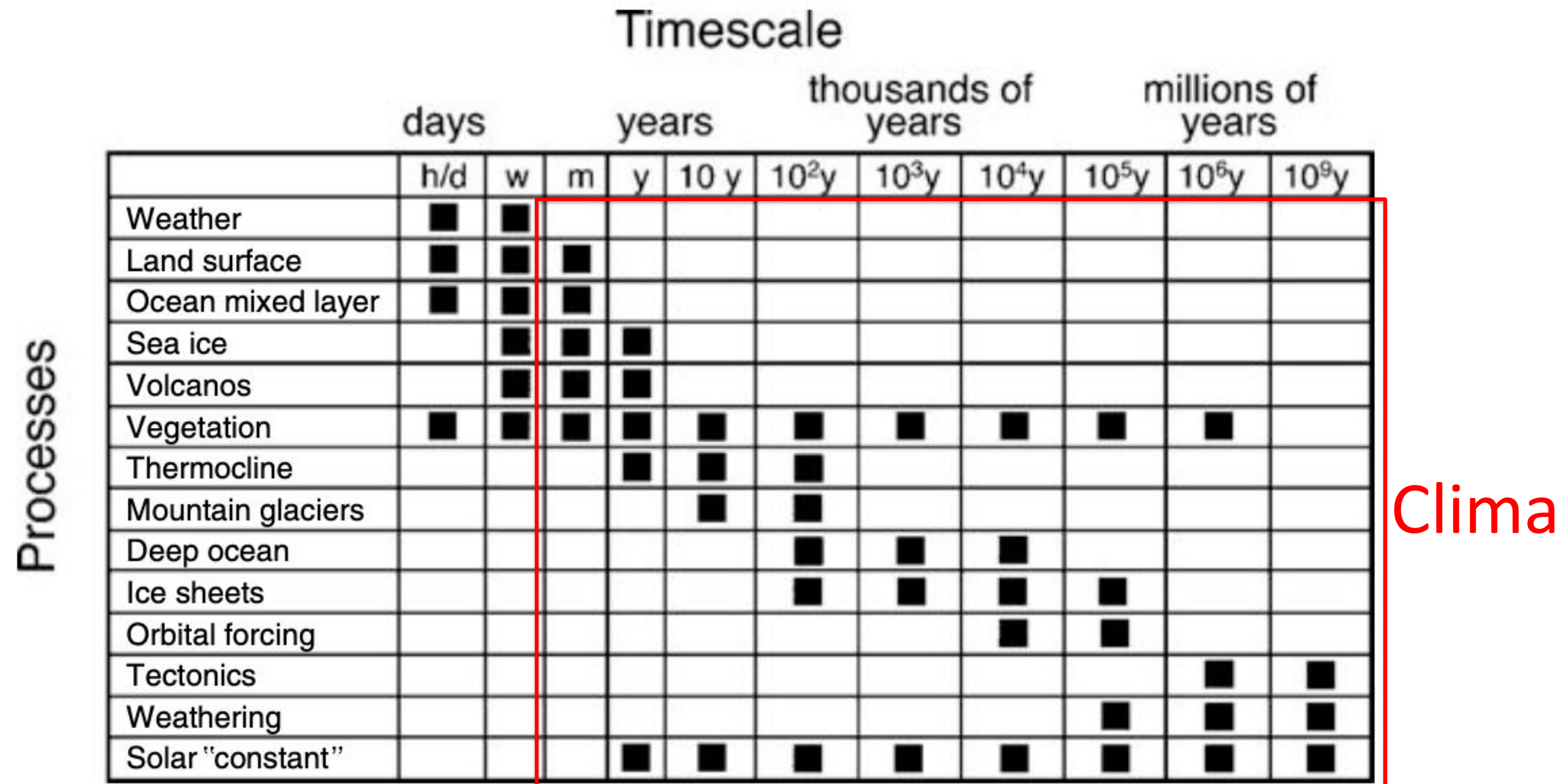


FIGURE 12.1. The instrumental and paleorecord shows that “weather” and “climate” vary on all timescales, from hours and days to millions of years. Here we tabulate the mechanisms operating at different timescales. Greenhouse gases might also be added to the table: natural CO₂ cycles occur on timescales up to 1k–10k y 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 cinque+1 sfere del clima

LITHOSPHERE



BIOSPHERE



ATMOSPHERE



HYDROSPHERE



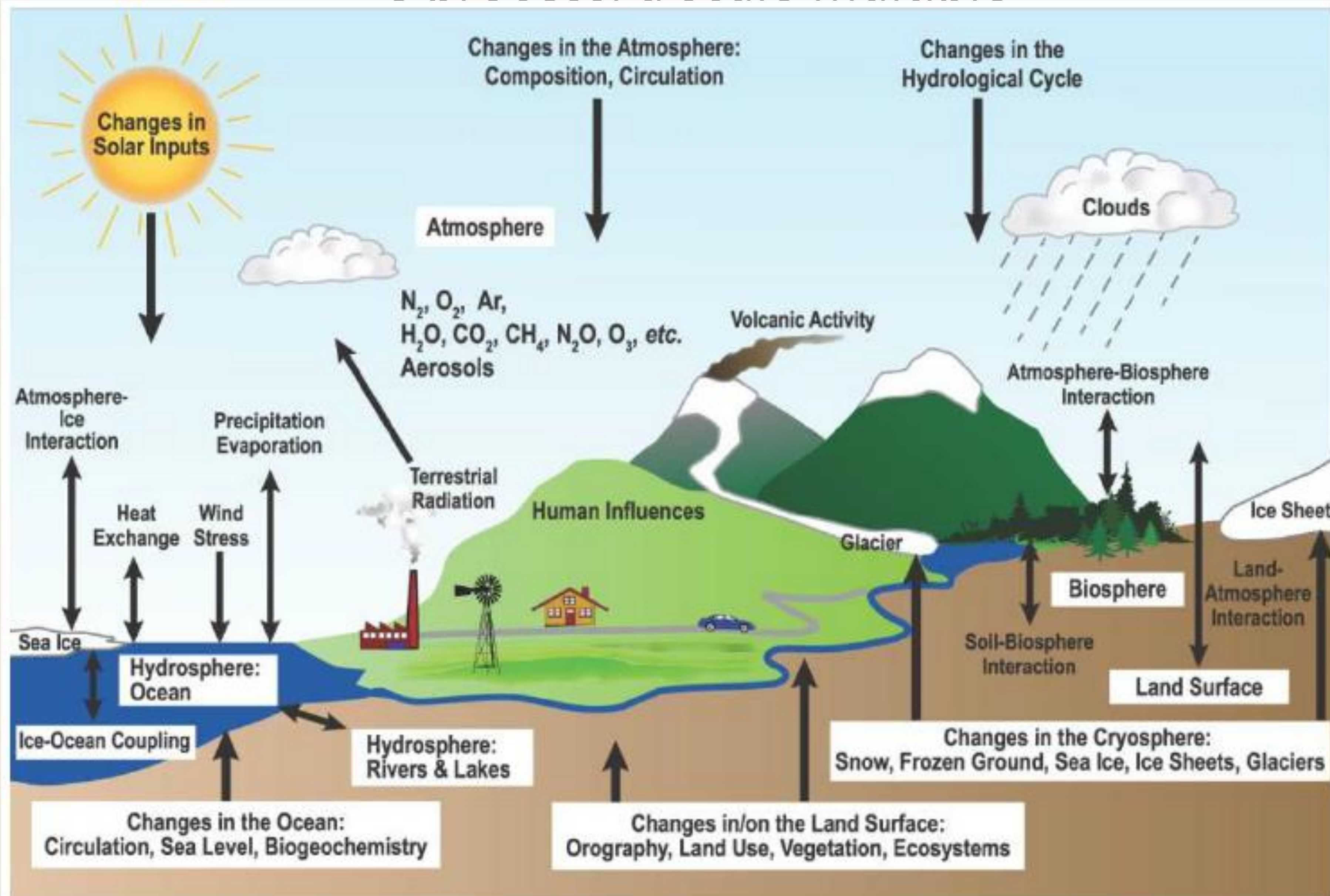
CRYOSPHERE



HUMAN SYSTEM:
ANTHROPOSHERE

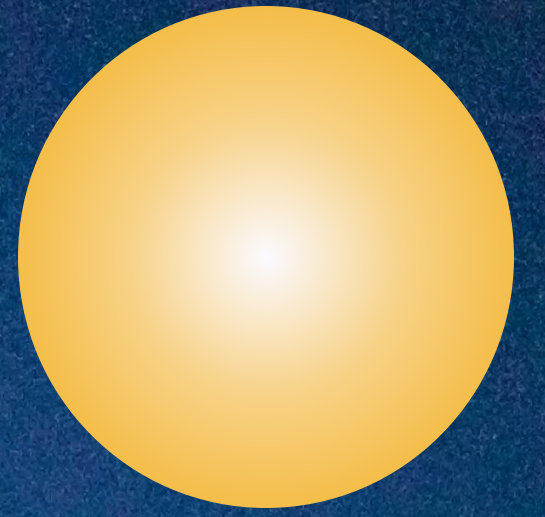


Il clima: un sistema con complesse interazioni e processi a scale multiple



Il Sistema Climatico

Atmosfera



Radiazione
Solare

COMPONENTI CHIMICHE



PIOGGIA

BIOSFERA TERRESTRE

SUOLO

DEFLUSSO

EVAPORAZIONE

VENTO

Ghiacci

ECOSISTEMI MARINI

Oceani



La “teoria” e’ iniziata nel secolo XIX e XX per la meteorologia

USA, 1838-1916

Cleveland Abbe



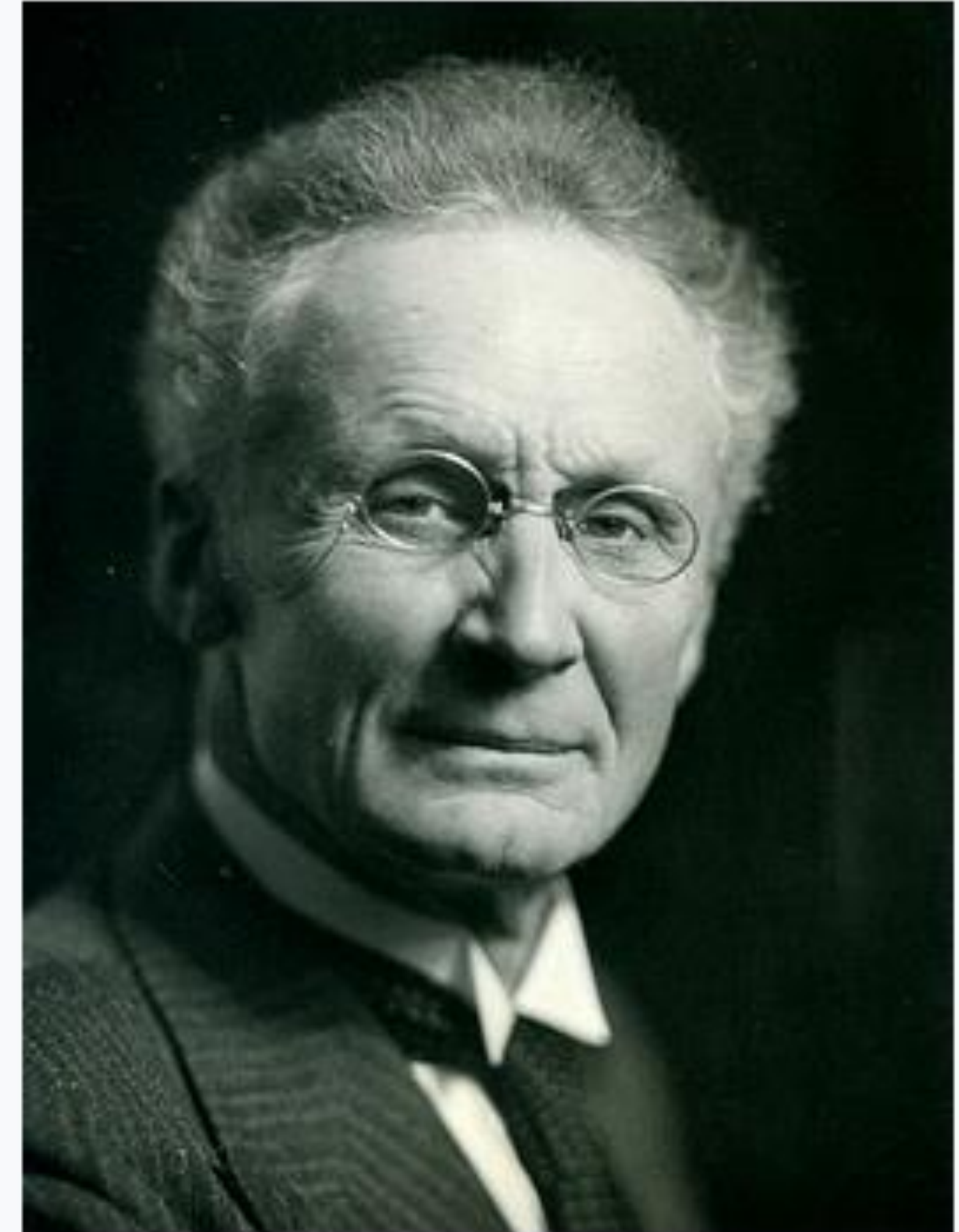
Abbe nel 1901
scrisse per la prima
volta che:

«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’ iniziata nel secolo XX

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

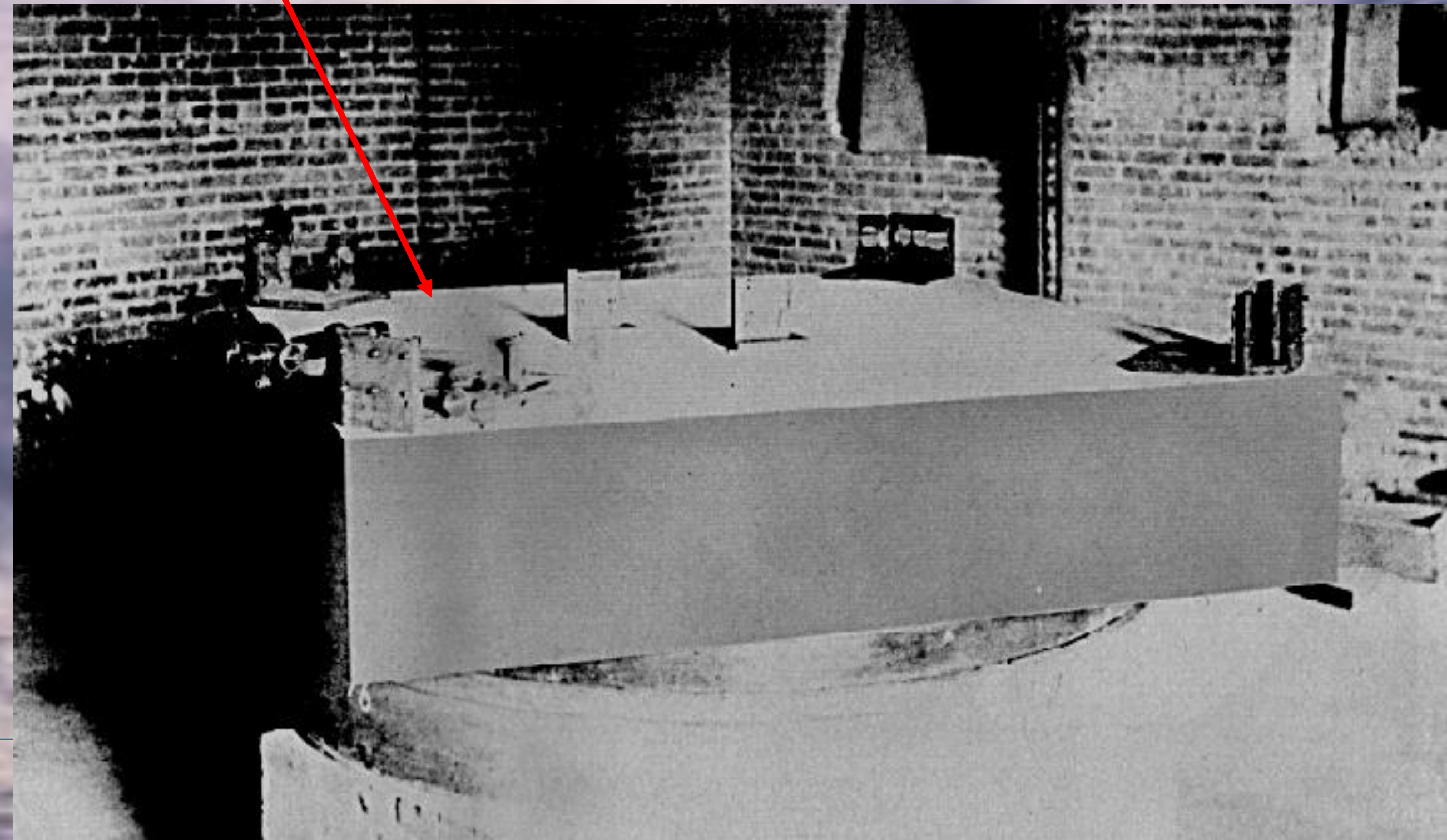


Scienziato sovietico scrisse nel 1956:
Heat Balance of the Earth's Surface
spiegando alcuni processi fondamentali
di assorbimento e riflessione dell’energia solare

La considerazione scientifica del clima (I)

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

Com'è possibile un'indagine scientifica sul clima?



La considerazione scientifica del clima (II)

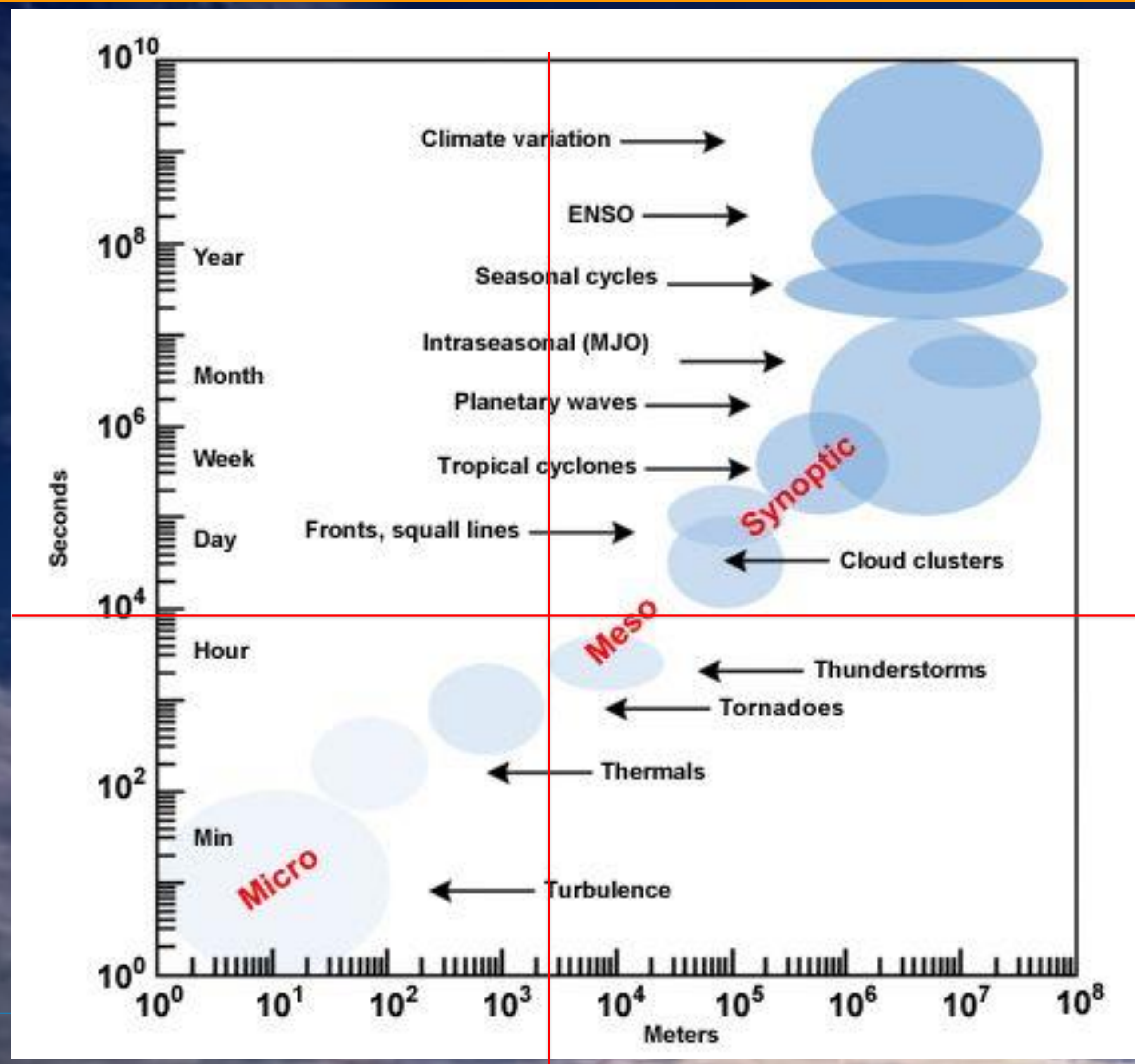
Possiamo fare esperimenti se rappresentiamo il sistema climatico attraverso un insieme di relazioni matematiche: le equazioni del clima.

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.

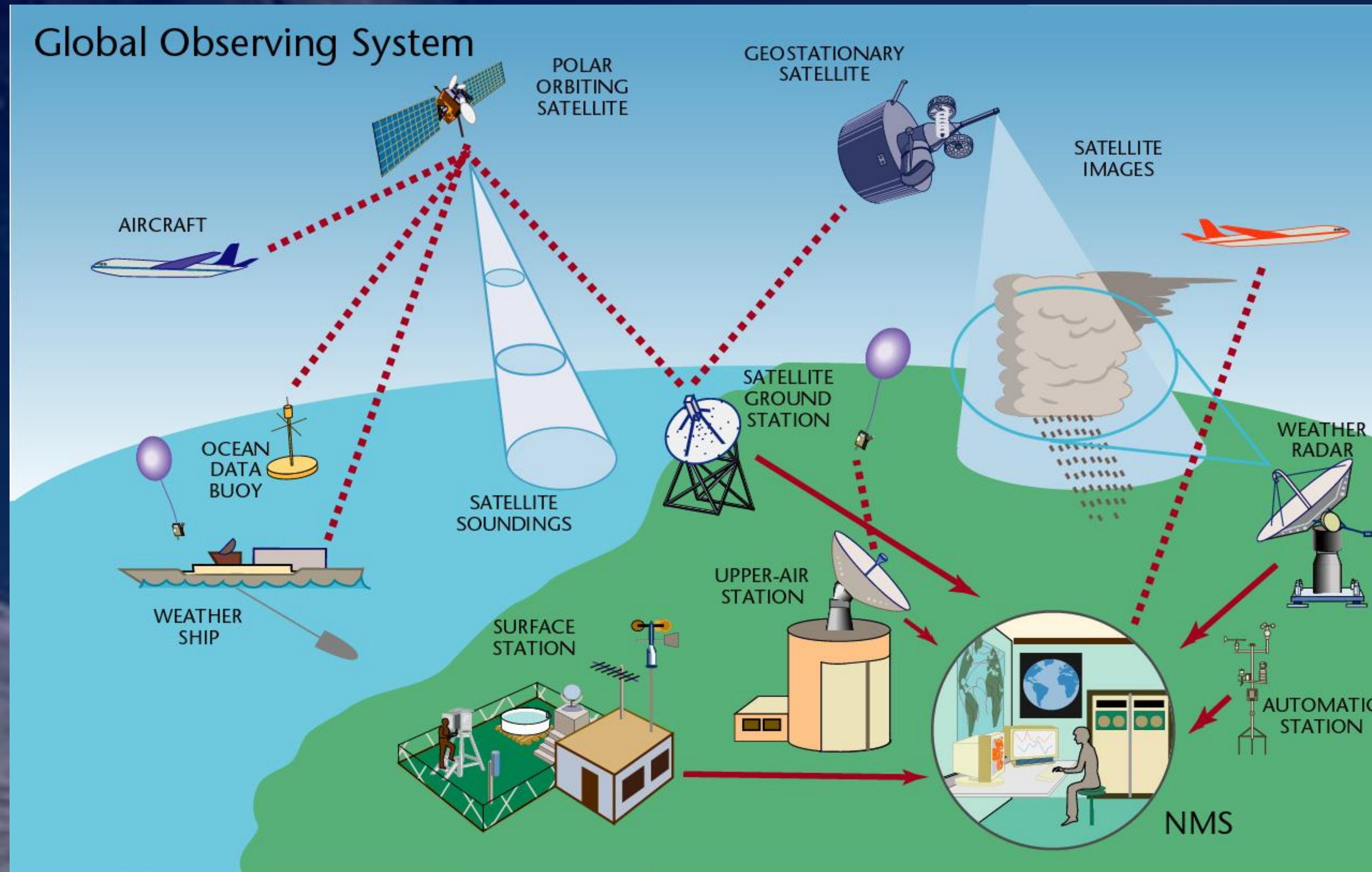
La considerazione scientifica del clima (III)

L'intervallo delle scale spazio-temporali del Sistema climatico e' molto ampio



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

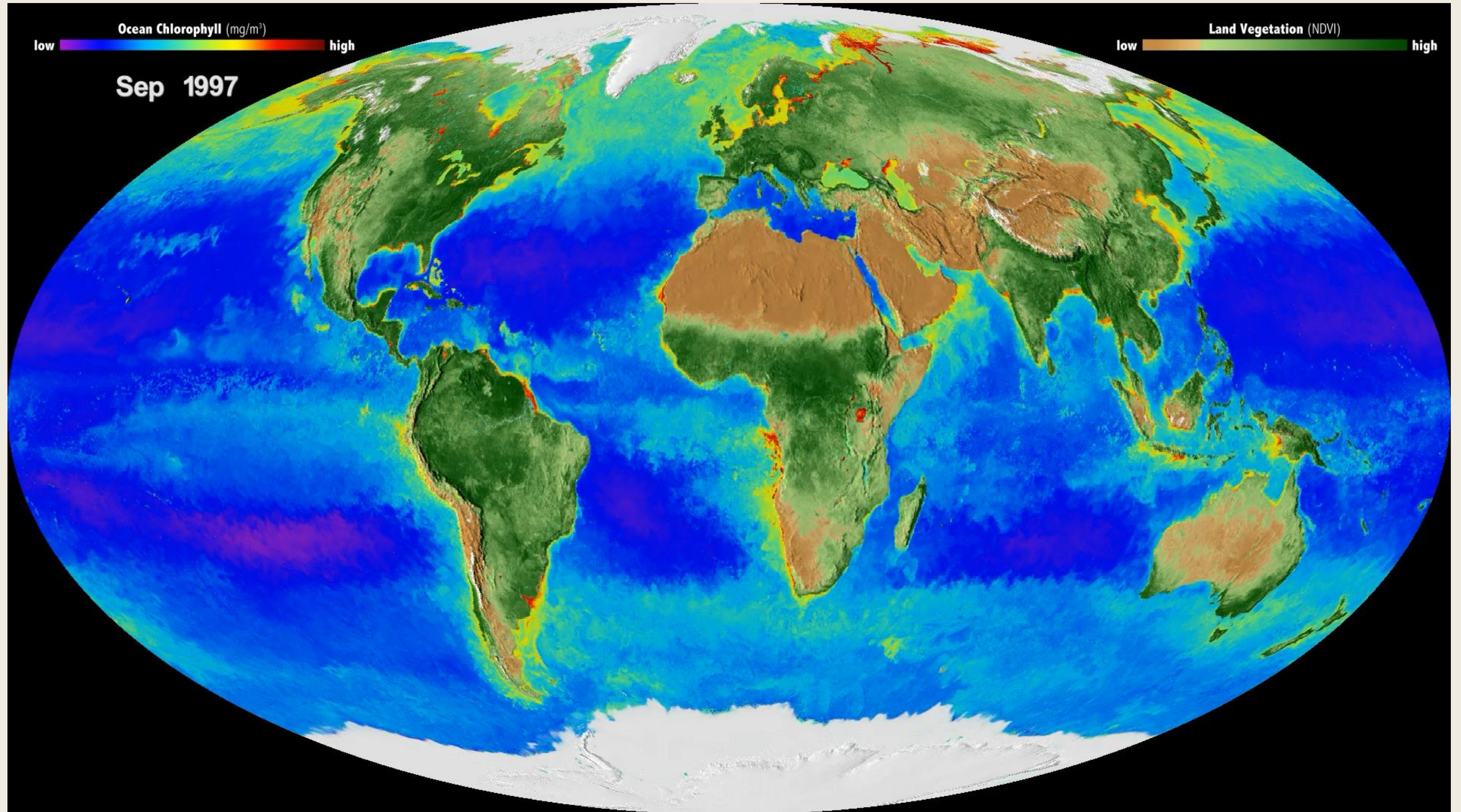
Osservazioni: da satellite e “in situ” (sul campo) con differenti tecnologie

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

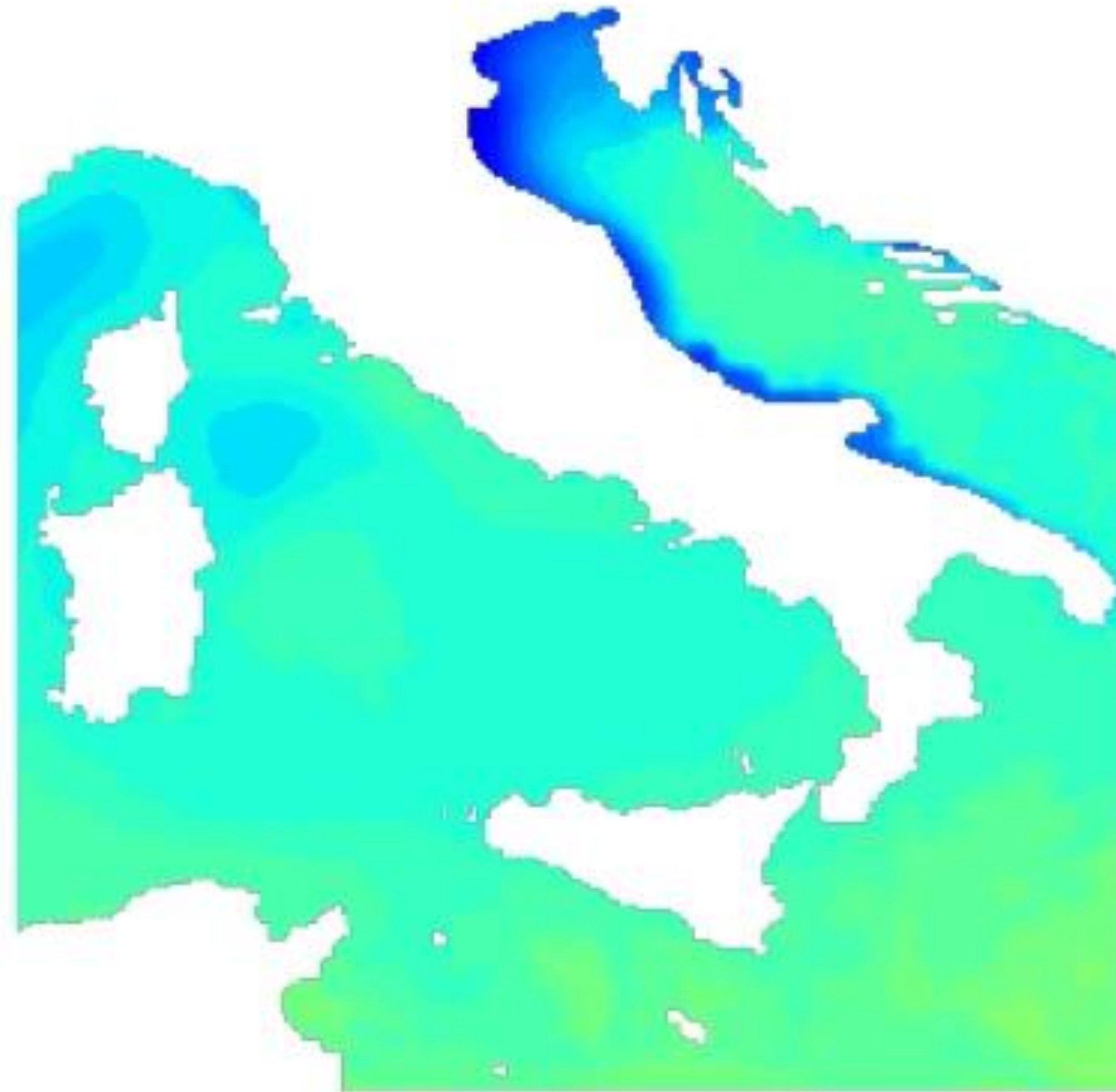
Machine learning: usando i dati osservativi e di modelli estraendo le relazioni fondamentali

Osservazioni da satellite: la biosfera Terrestre e oceanica



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





Teoria: Equazioni del Clima (atmosfera)

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

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

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

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

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

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

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

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

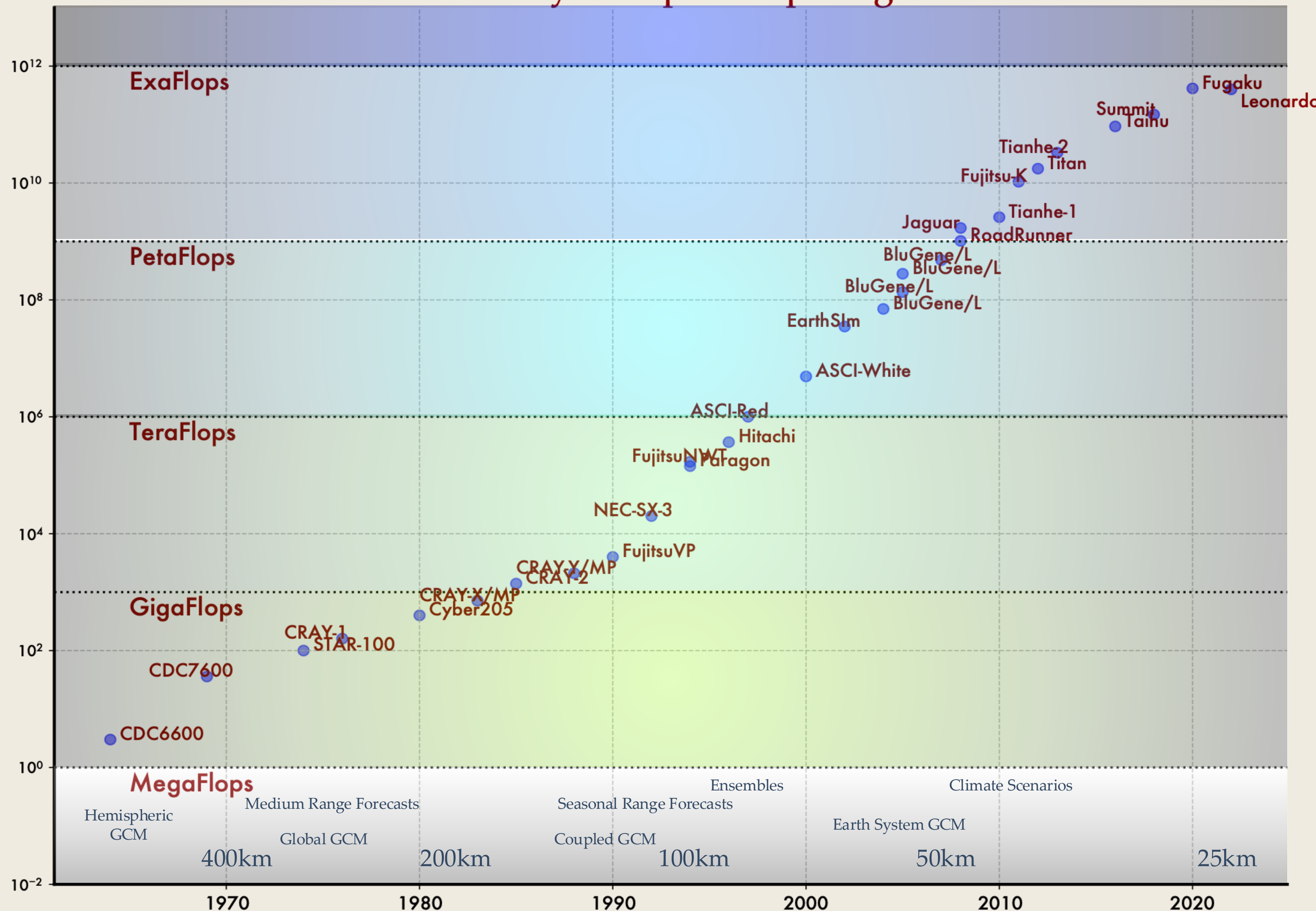
$$q = \log p_s$$

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

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

I supercomputers ci permettono di fare le previsioni del clima

History of Supercomputing



FLOPS

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

MegaFlops: 10^6 flops

GigaFlops: 10^9 flops

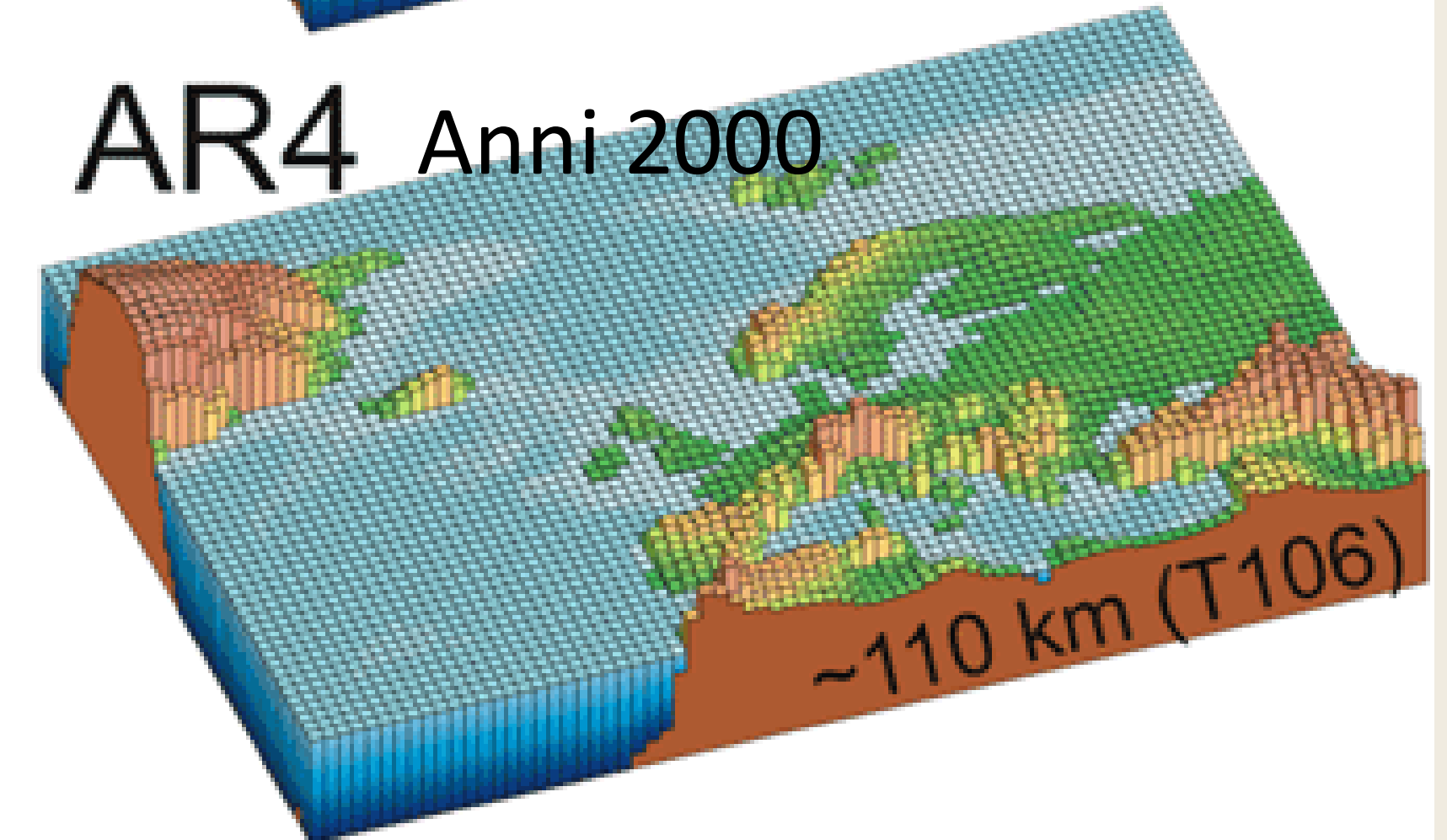
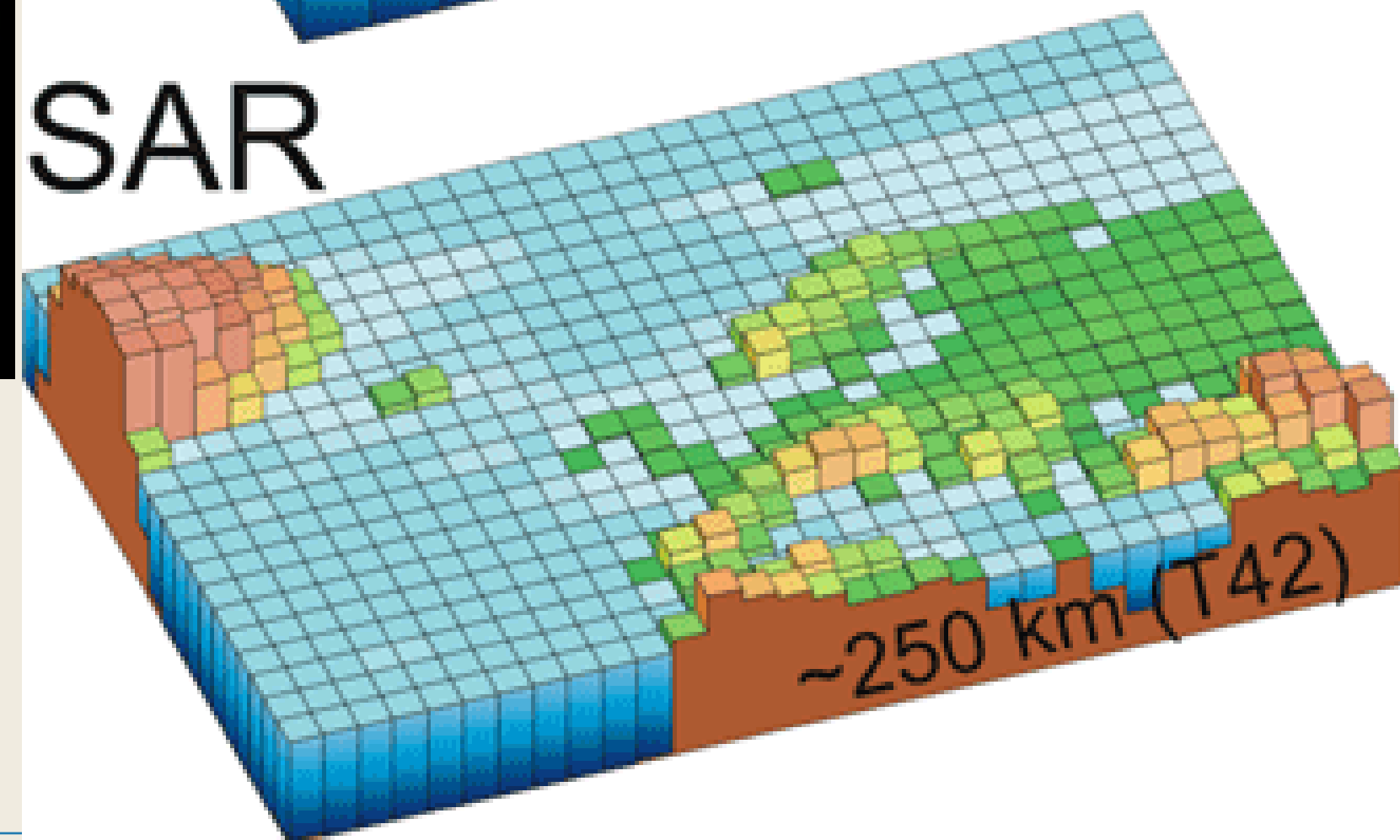
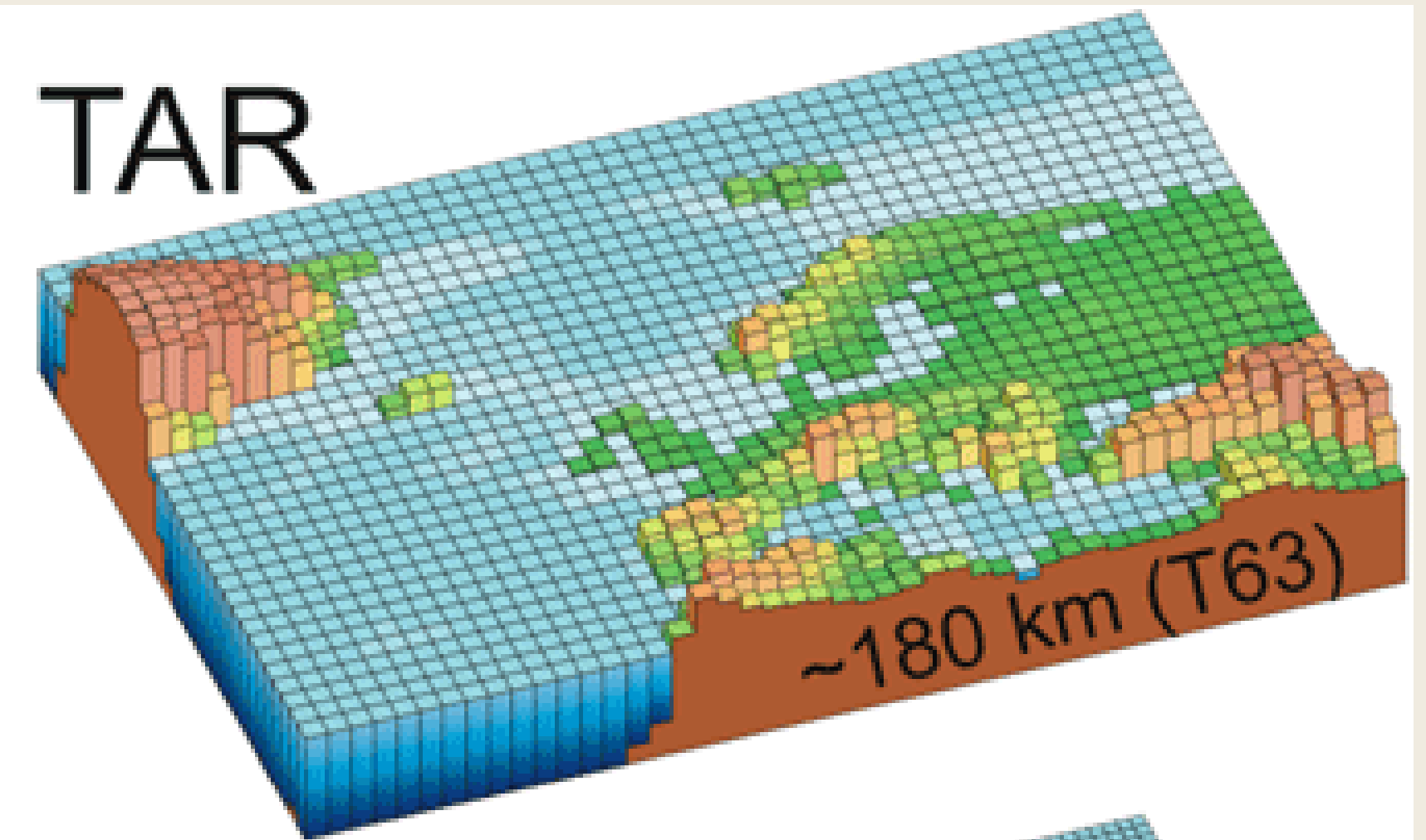
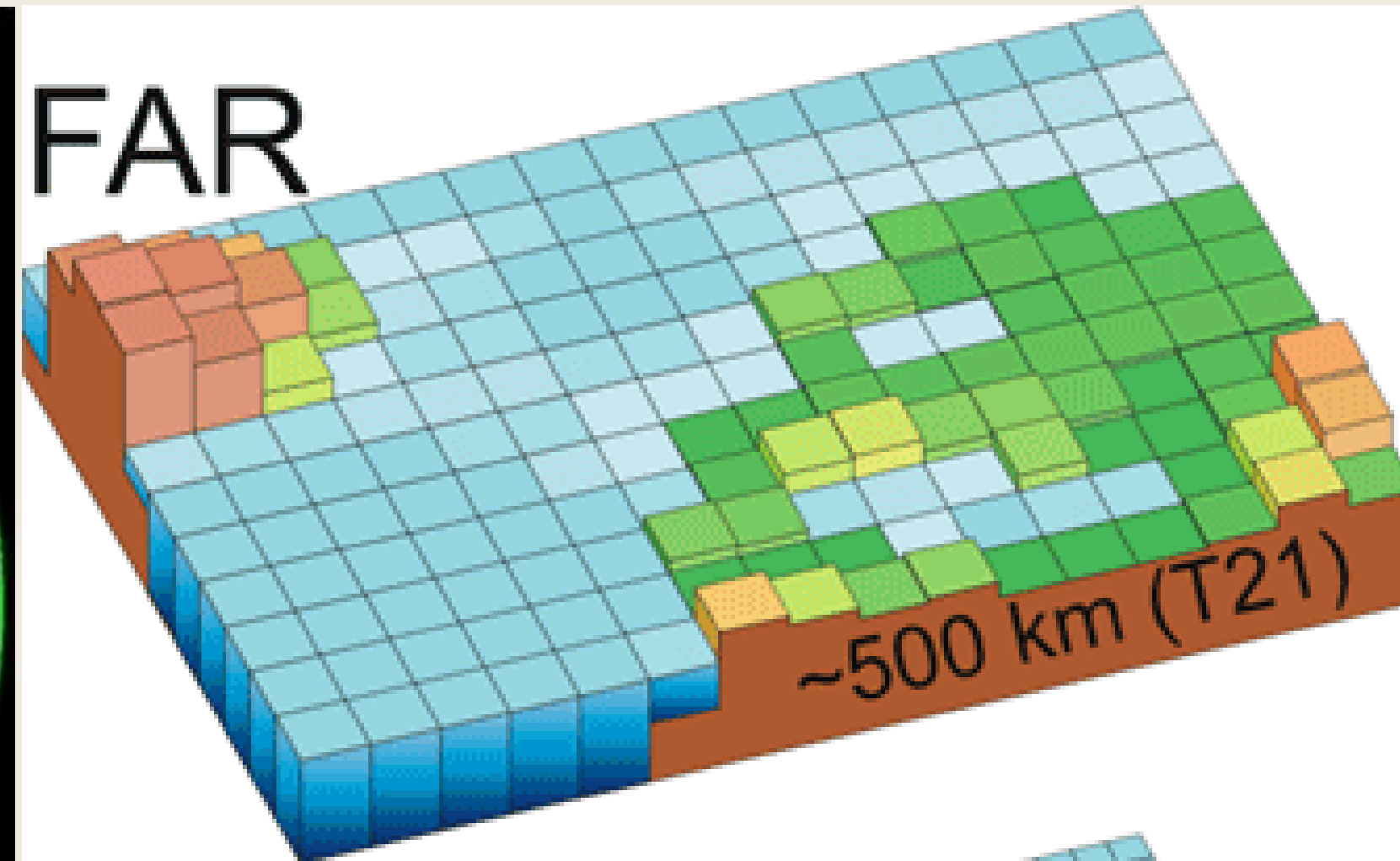
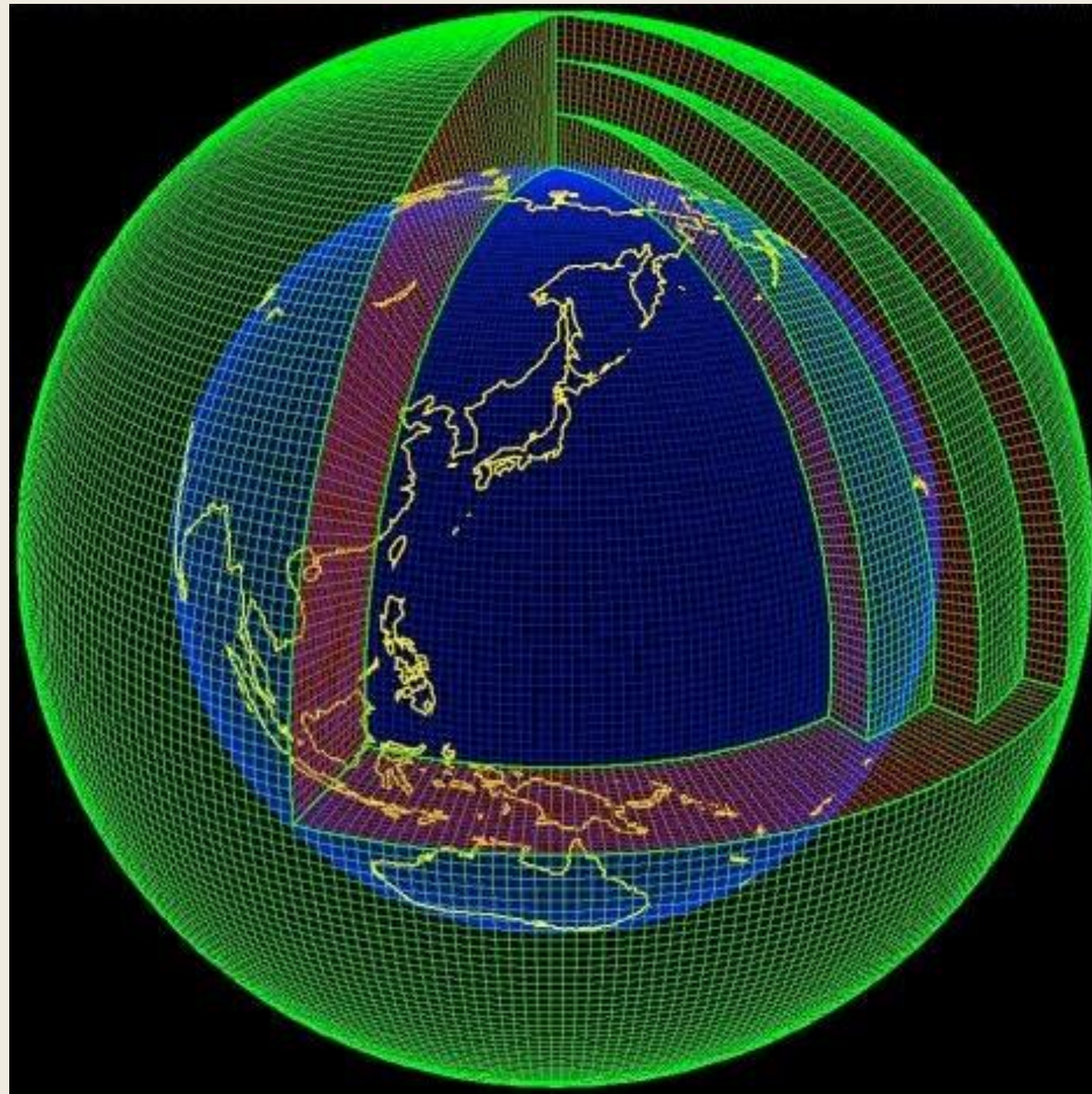
TeraFlops: 10^{12} flops

PetaFlops: 10^{15} flops

ExaFlops: 10^{18} flops

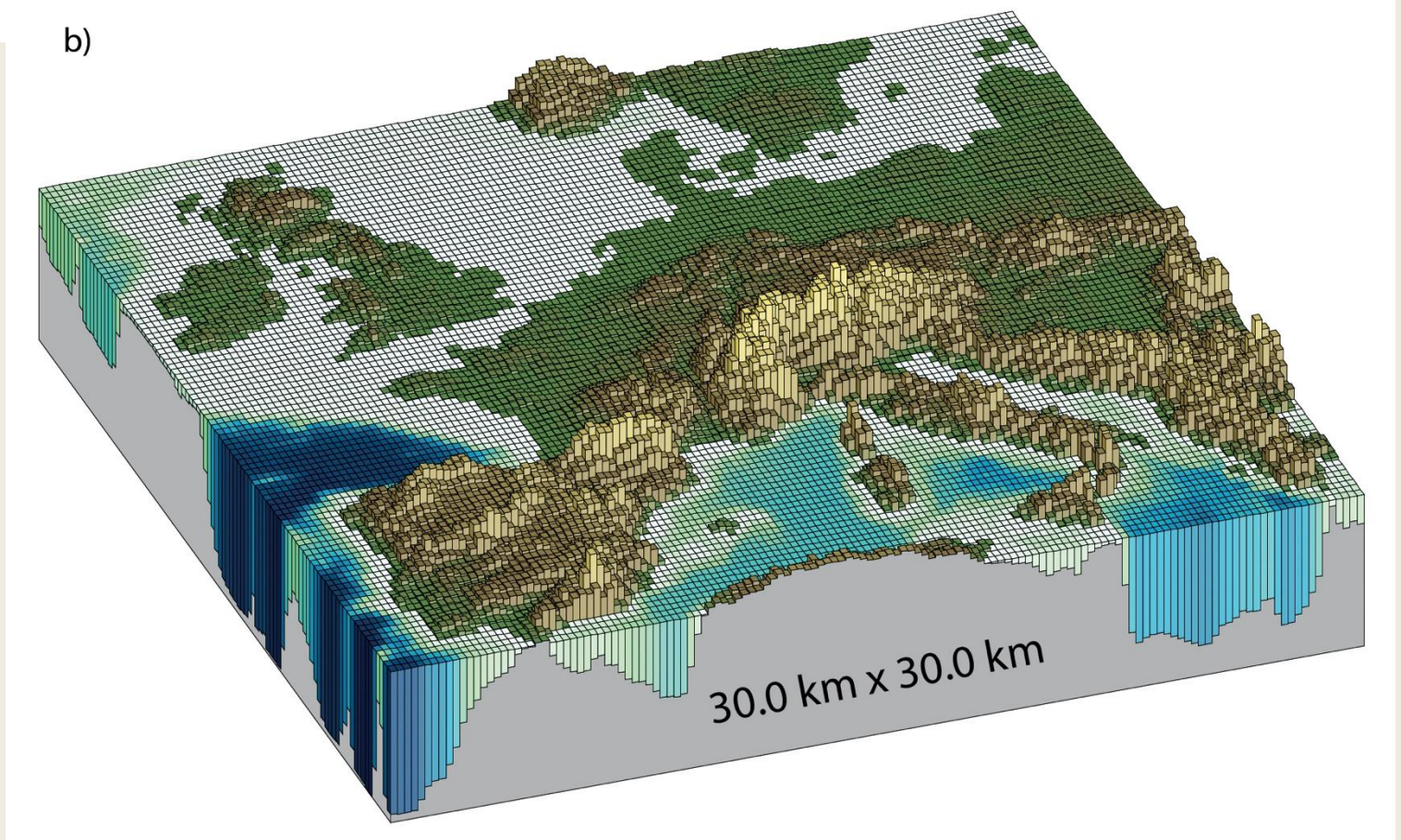
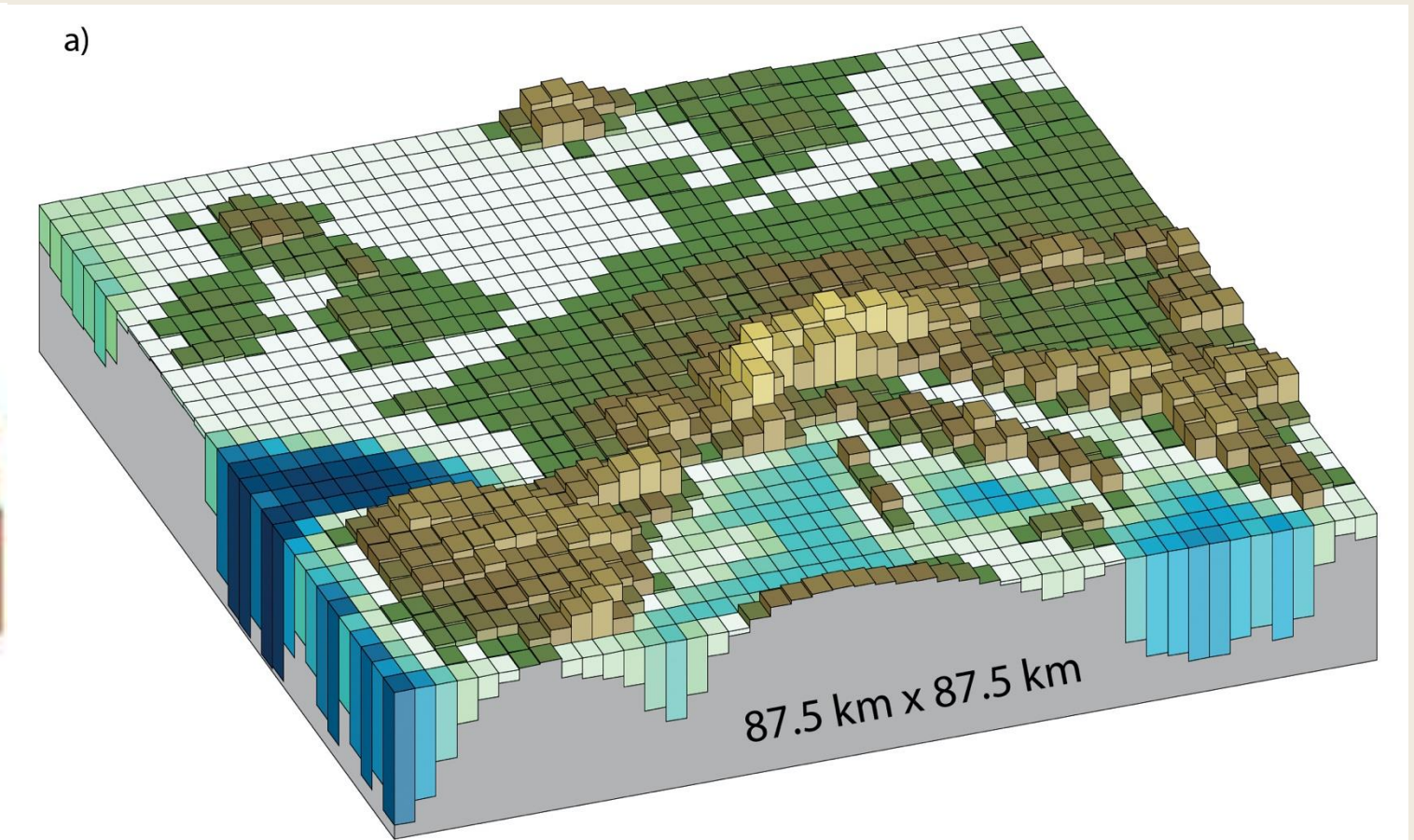
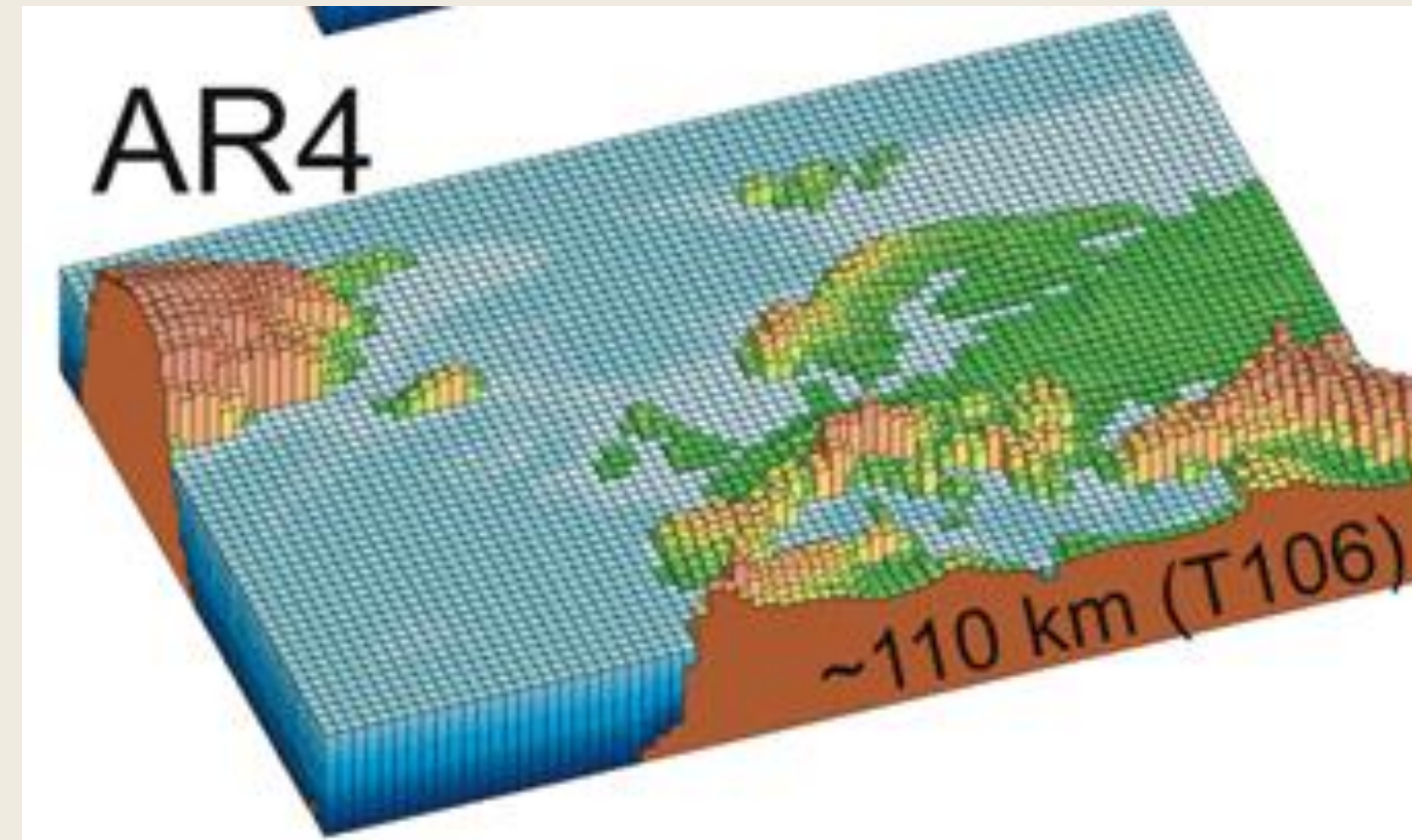
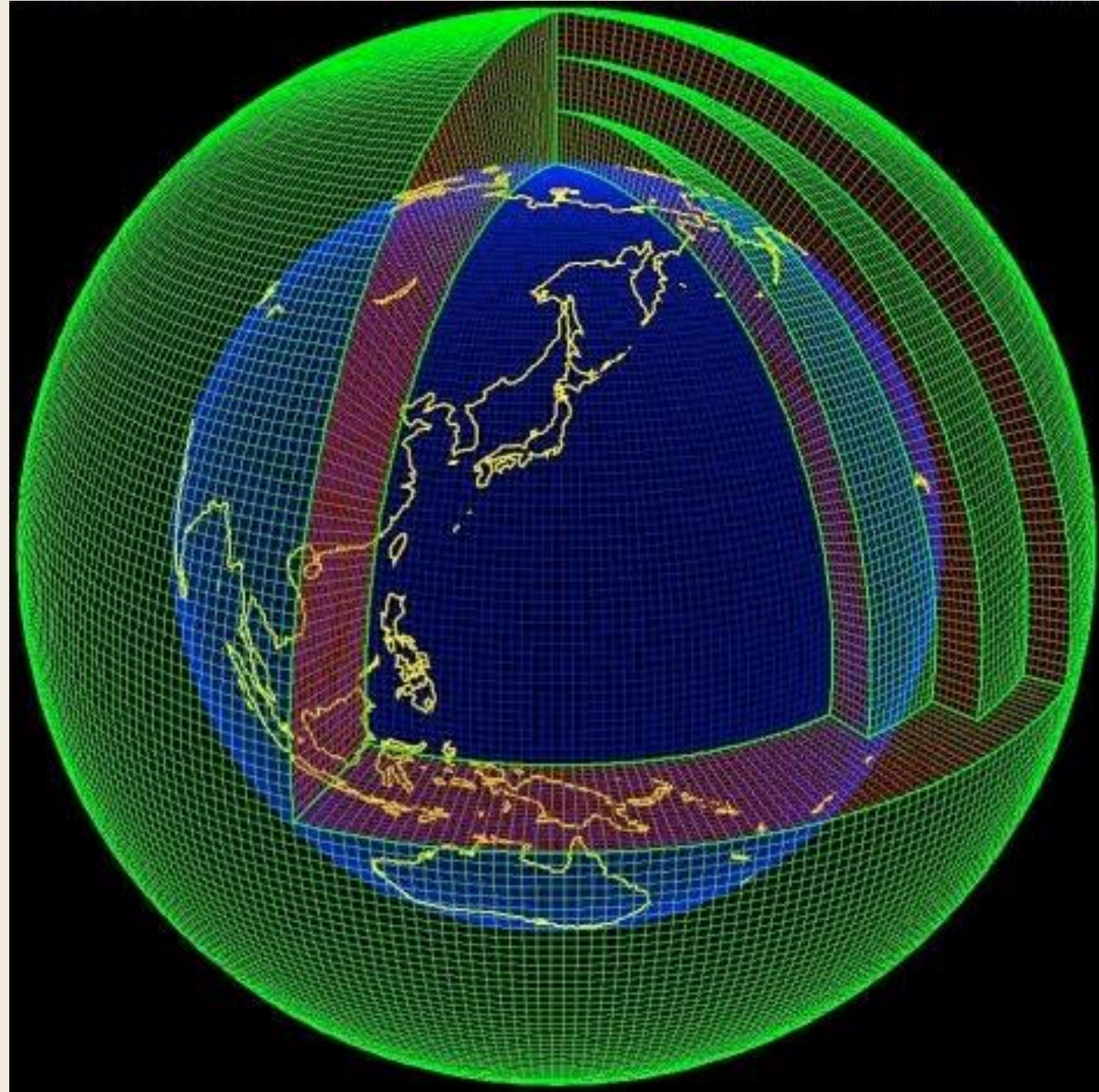
Modelli numerici e simulazioni

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



Modelli numerici e simulazioni

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

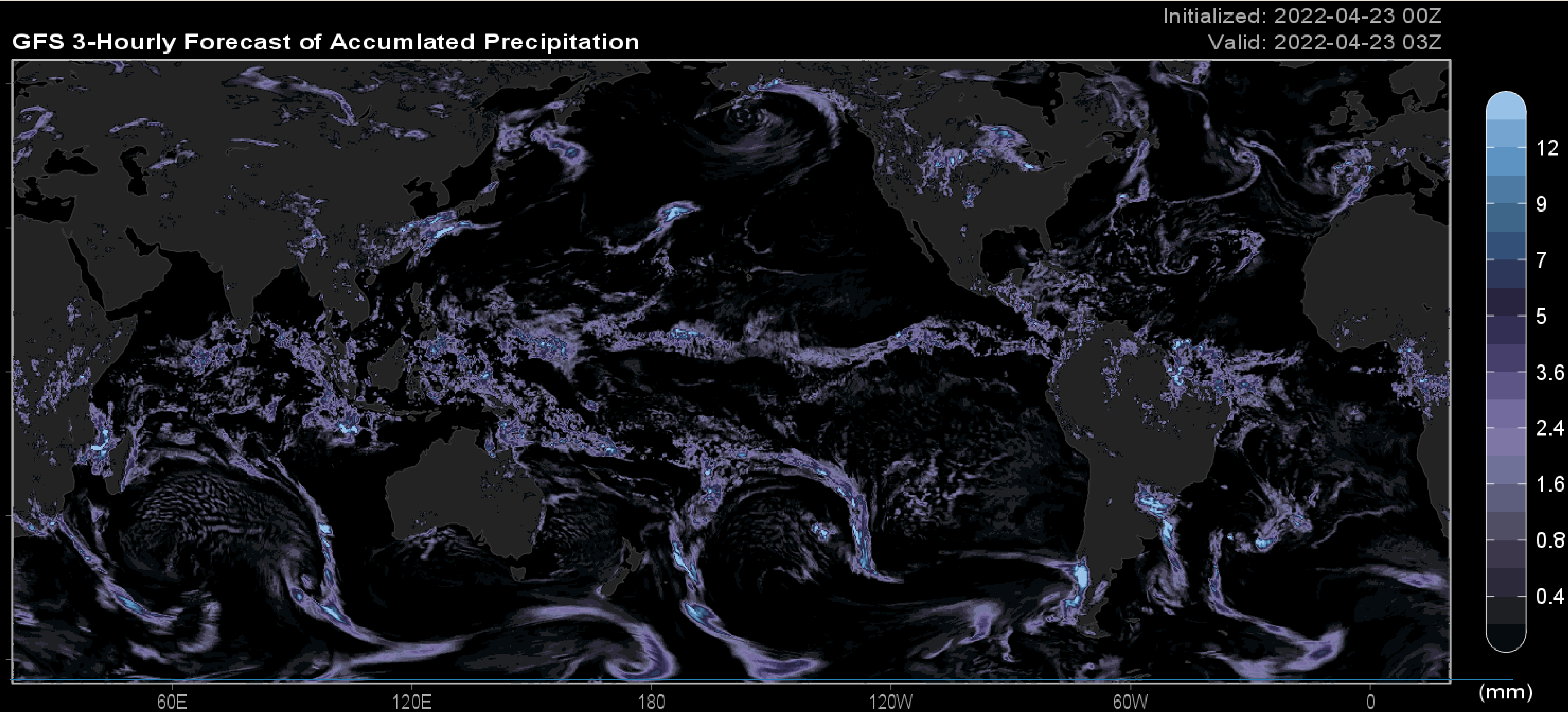


Dall'oceano aperto
alla scala urbana:
un sistema di
modellazione per la
città di Savannah e
le coste della
Georgia



Google Earth

Previsioni Numeriche Atmosferiche e Oceaniche



Scienza dei dati

Il Machine Learning consiste in algoritmi in grado di apprendere automaticamente dai dati le relazioni esistenti tra diverse grandezze.

L'AI può identificare relazioni e modelli nascosti nei dati, migliorando la previsione sismica, la modellazione del clima e altre applicazioni geofisiche.



Quanto e' buona la previsione AI?

Luglio 2024, L'AI ha superato i modelli numerici

The New York Times

Weather Forecasters a New Edge

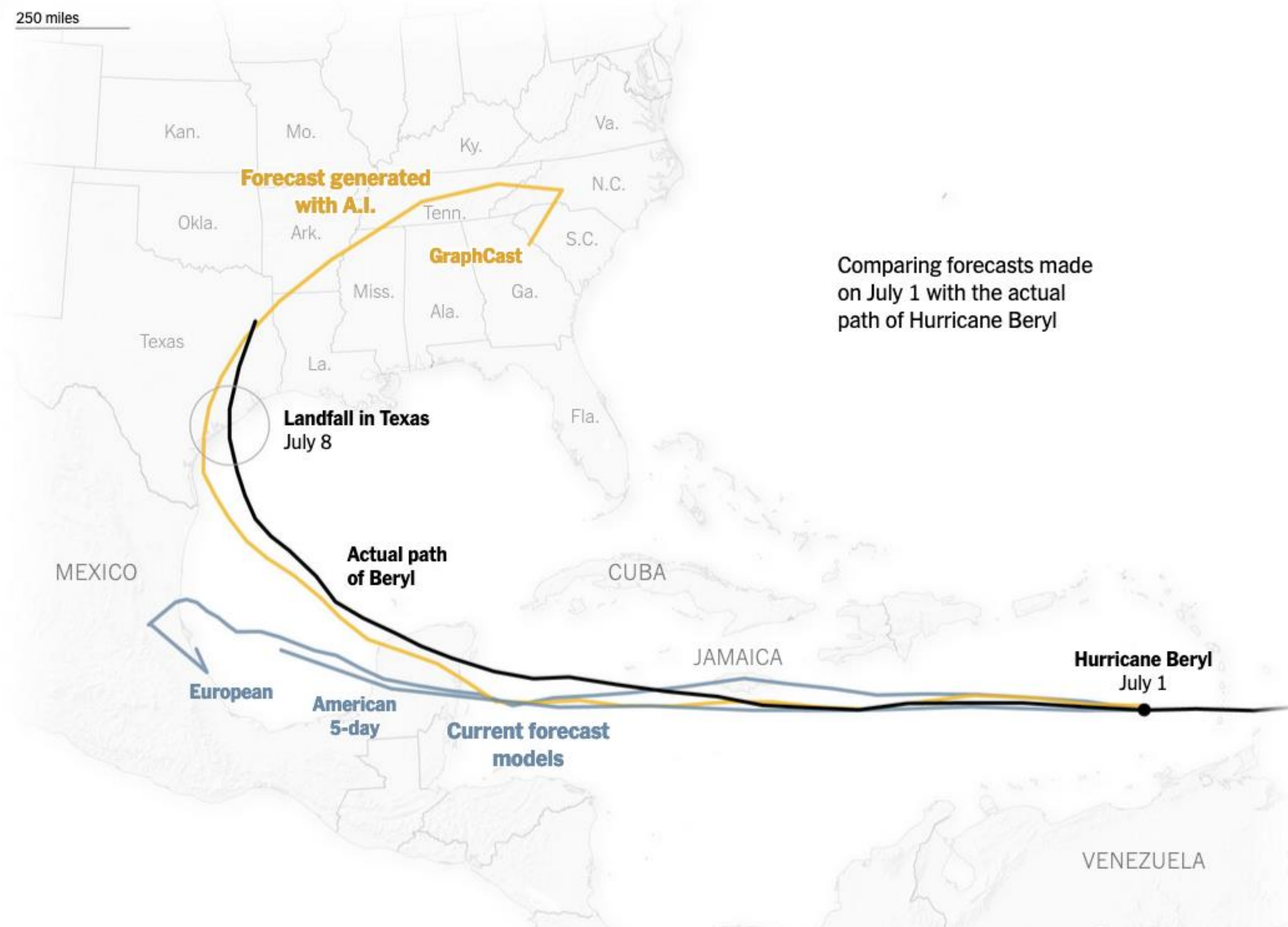
The brainy machines are predicting global weather patterns with new speed and precision, doing in minutes and seconds what once took hours.

By William J. Broad July 29, 2024

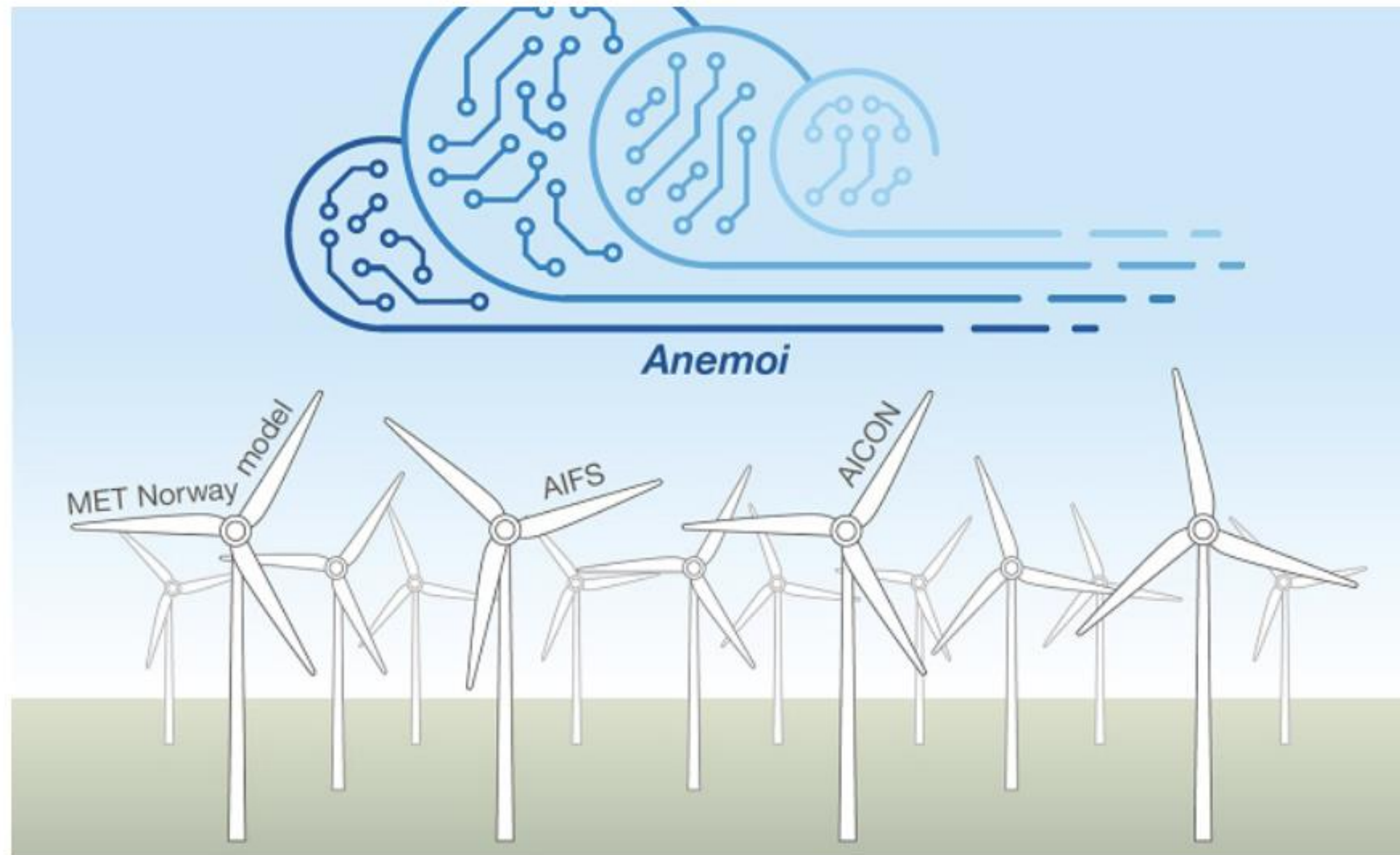
 Share full article



250 miles



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

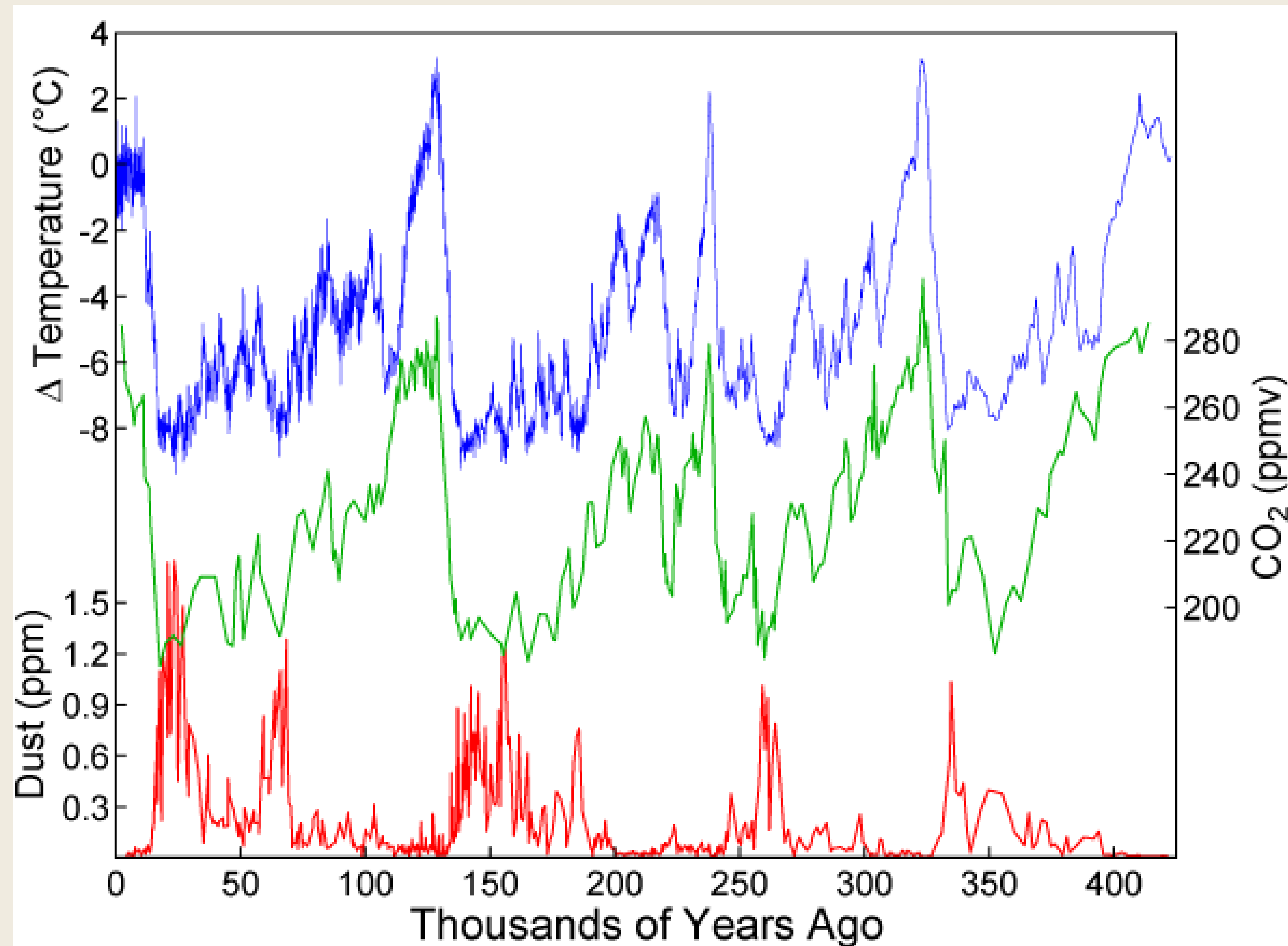


A range of national meteorological services across Europe and ECMWF have launched Anemoi, a framework for creating machine learning (ML) weather forecasting systems. Named after the Greek gods of the winds, Anemoi is a collaborative, open-source initiative.

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

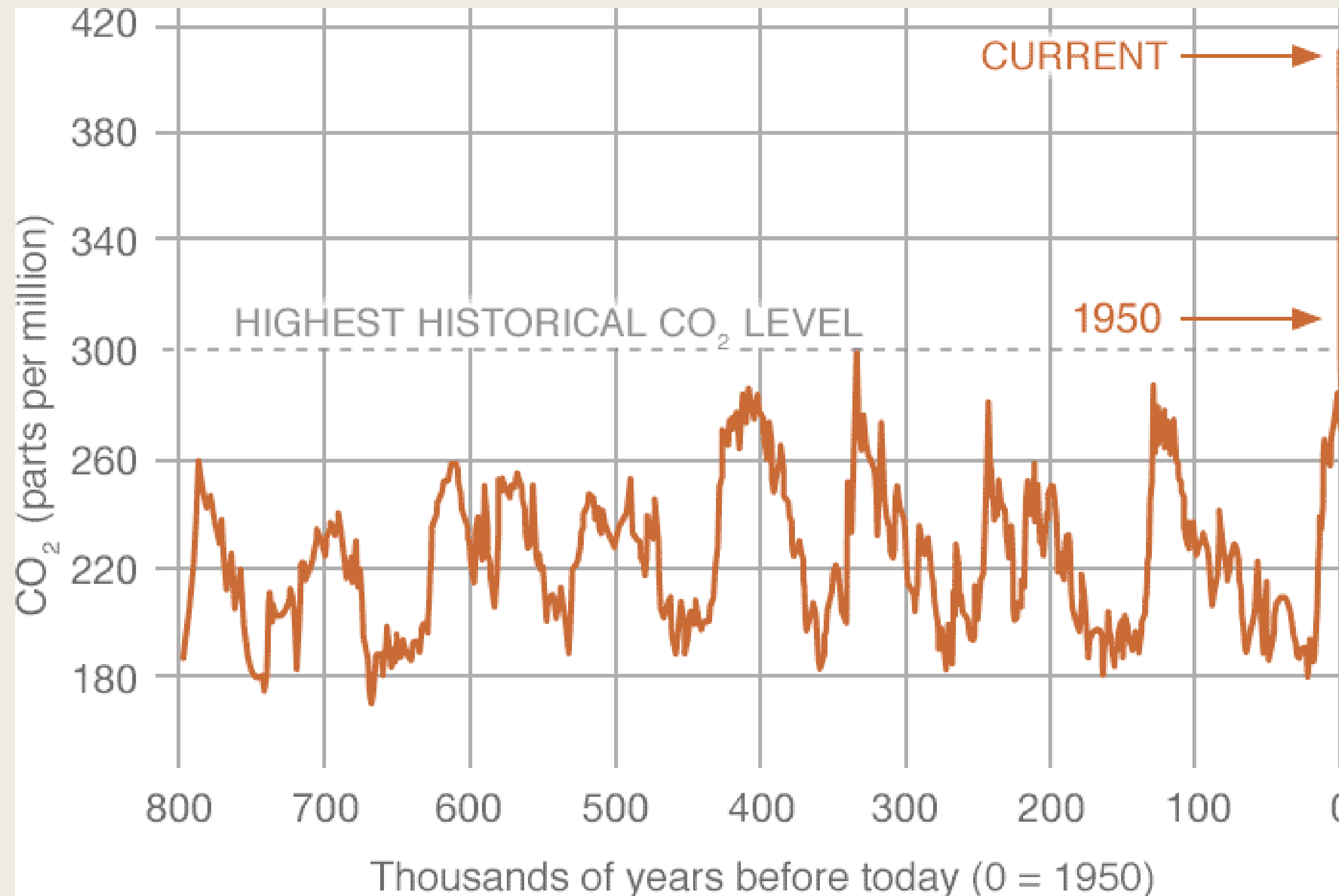
(Antarctica

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/>

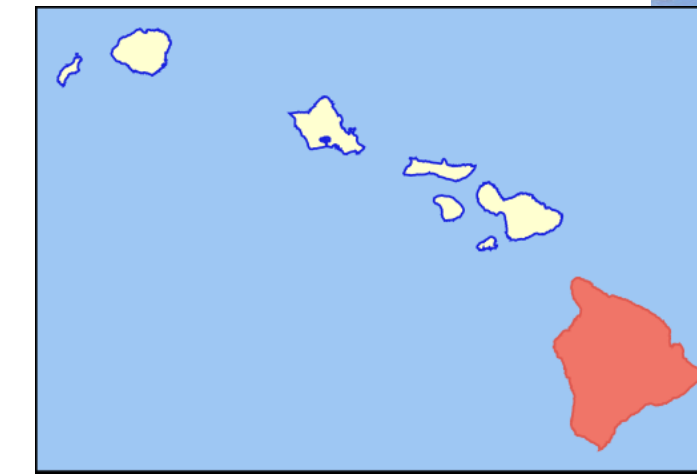
<https://www.youtube.com/watch?v=Yb3NsMJ-YQ8>

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

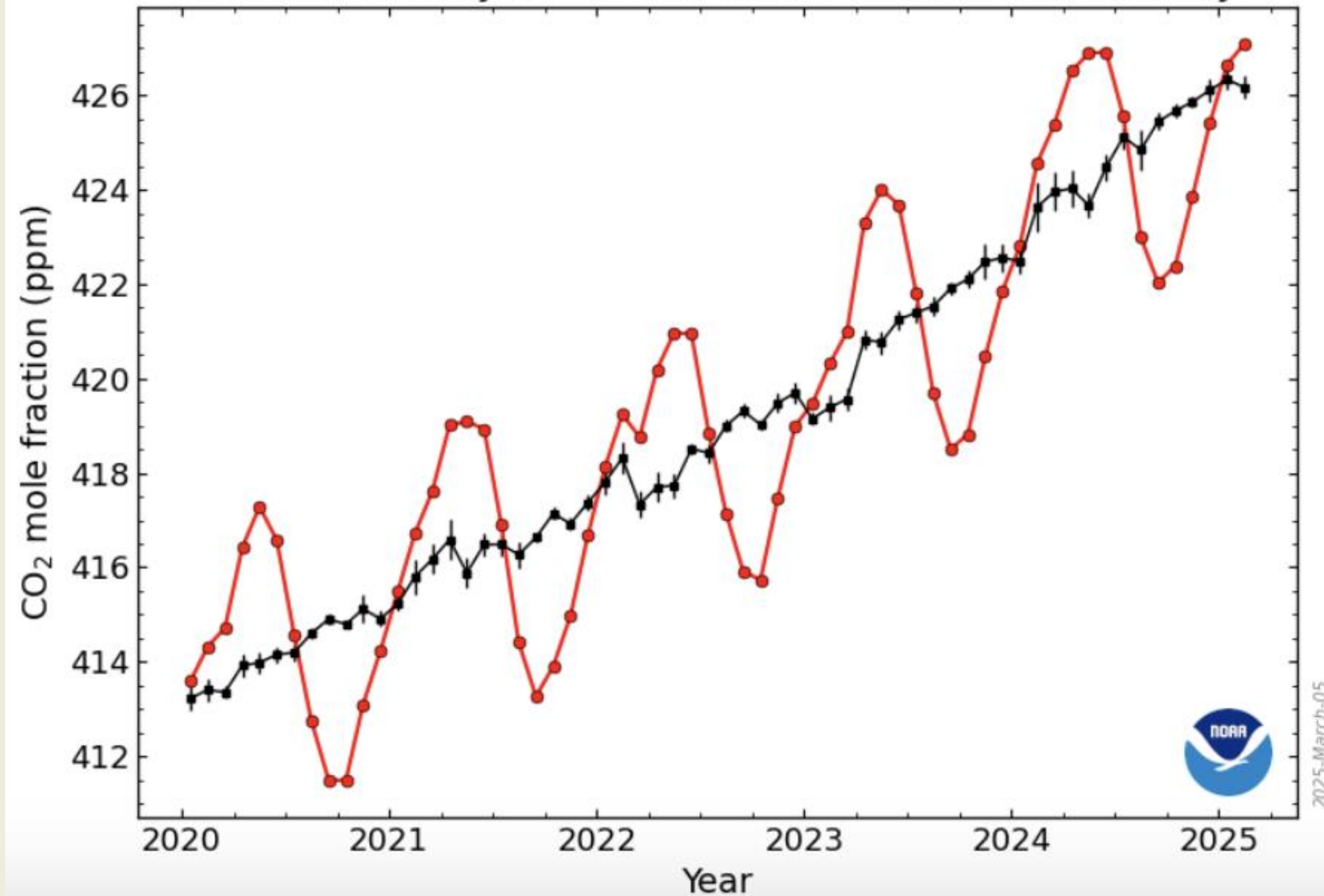
February 2025: 427.09 ppm

February 2024: 424.55 ppm

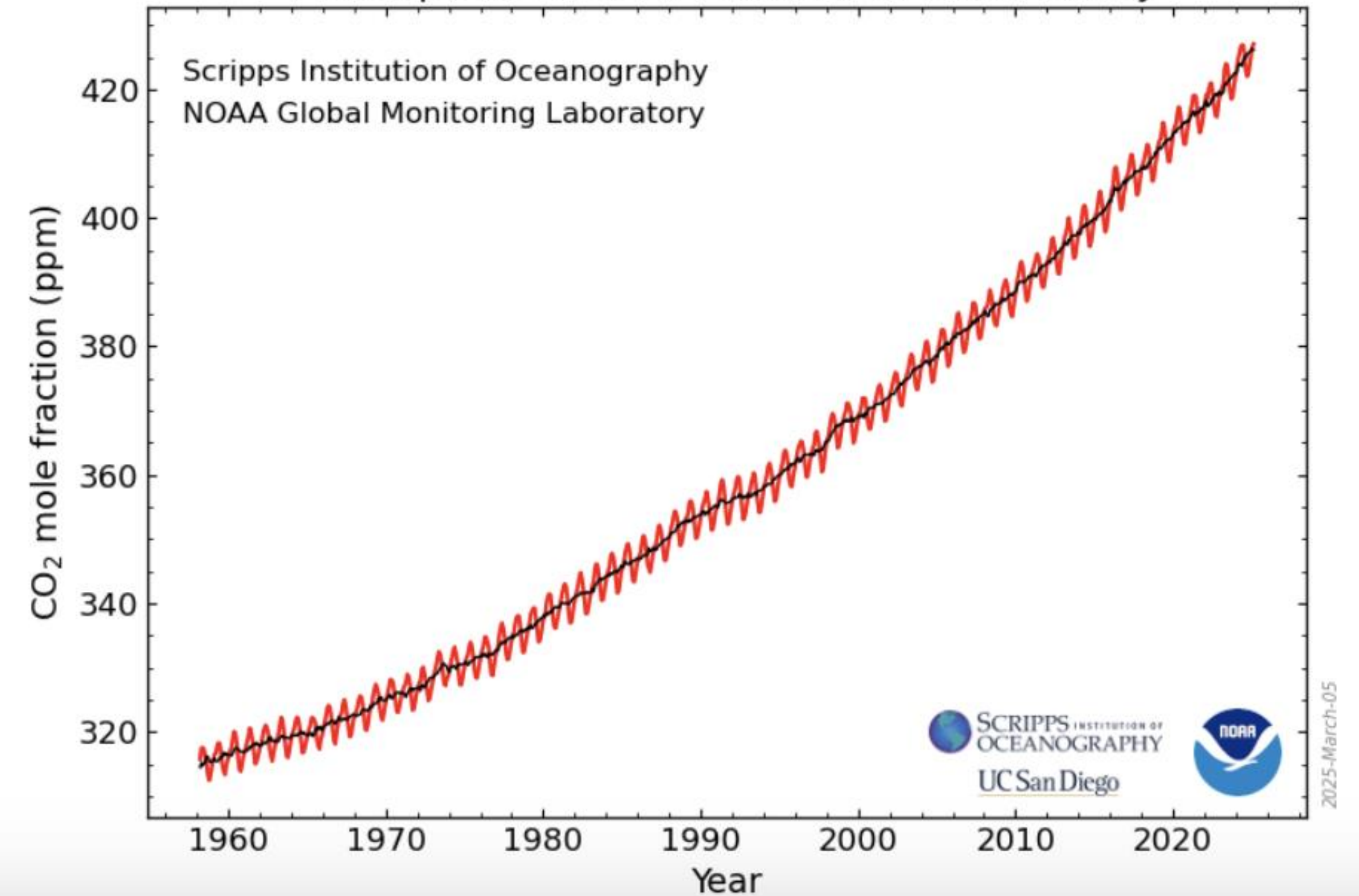
Last updated: Mar 05, 2025



Recent Monthly Mean CO₂ at Mauna Loa Observatory

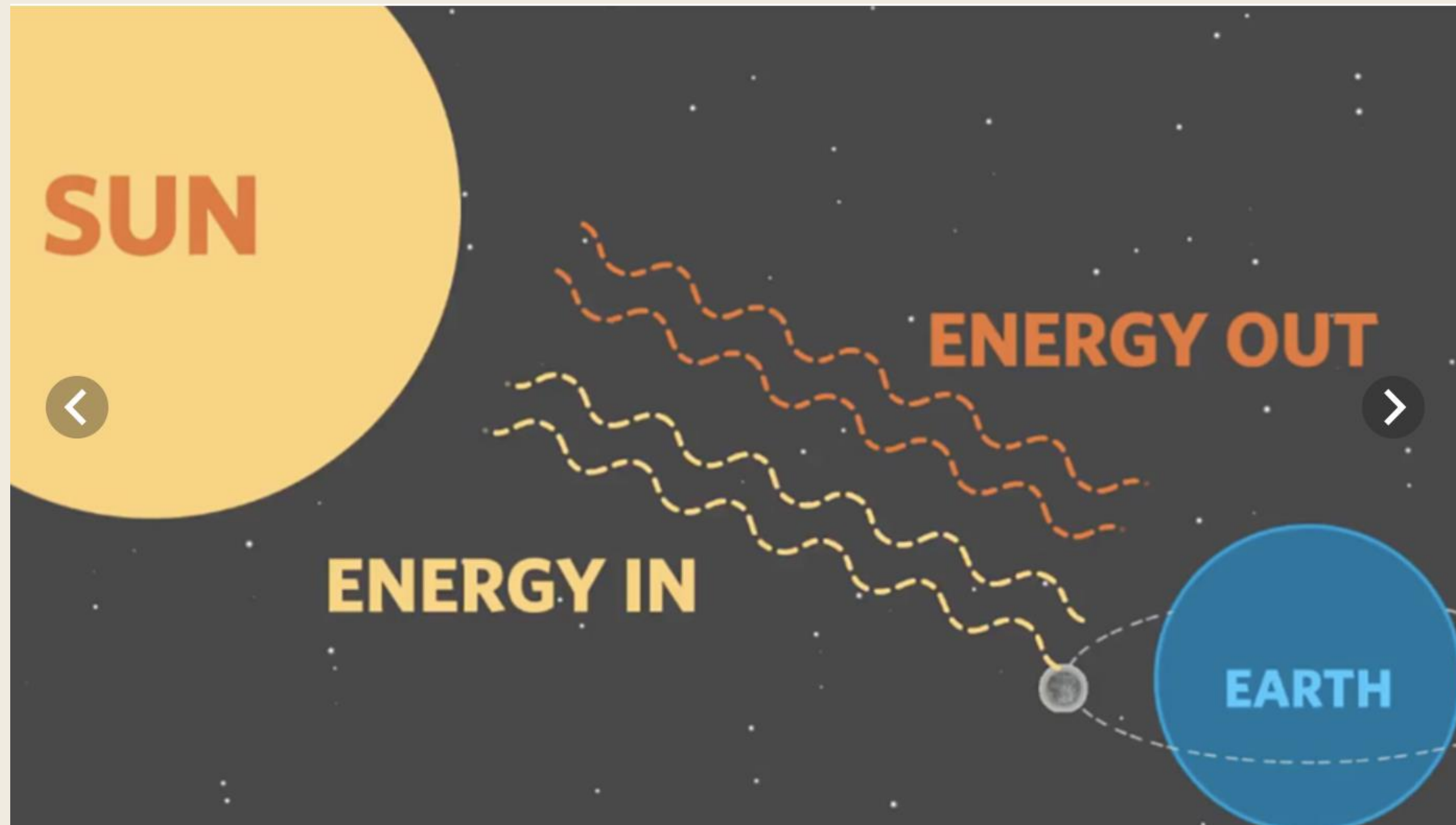


Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



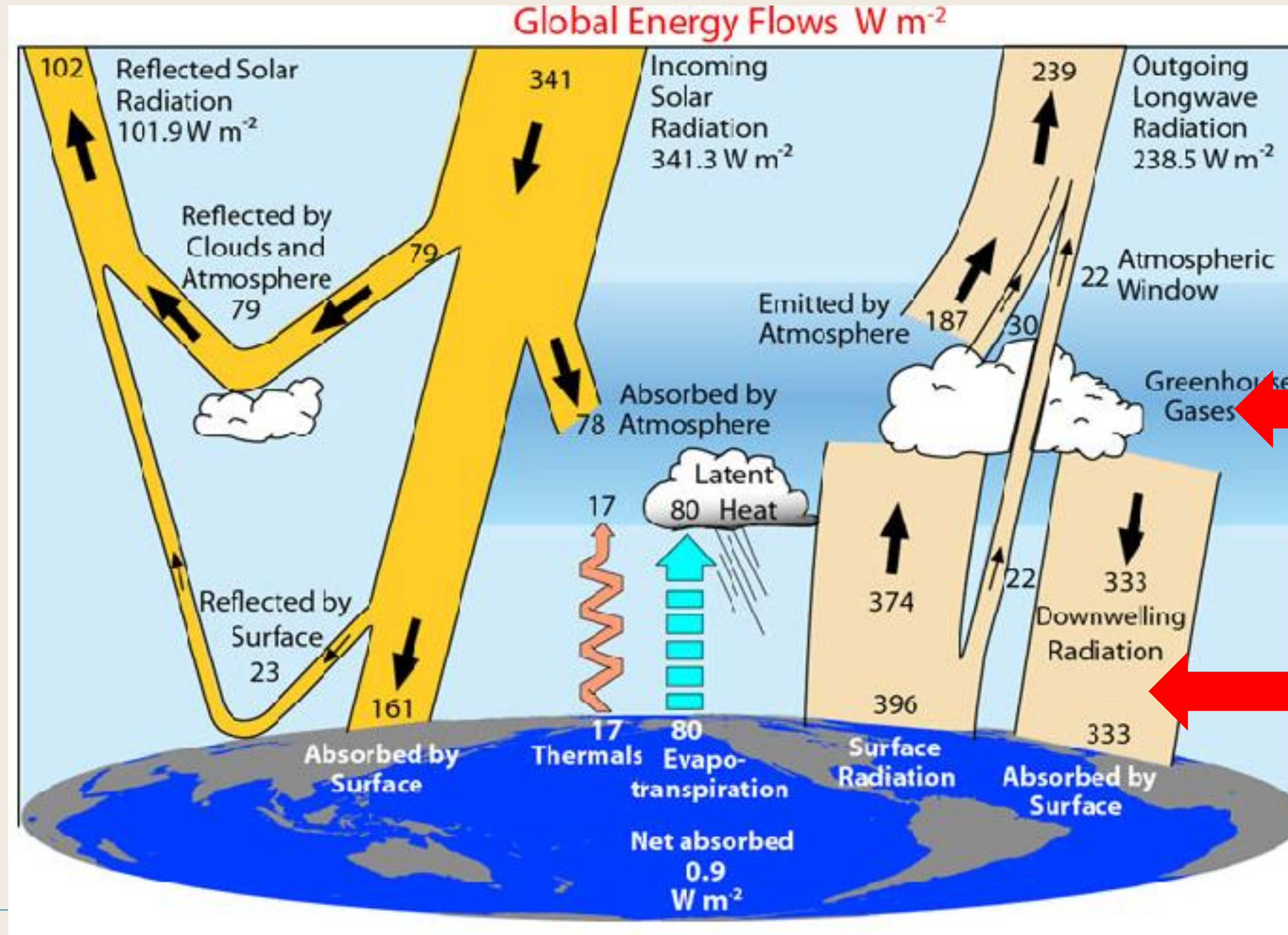
Il bilancio globale di energia della terra

«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>

I gas clima-alteranti: l'effetto serra

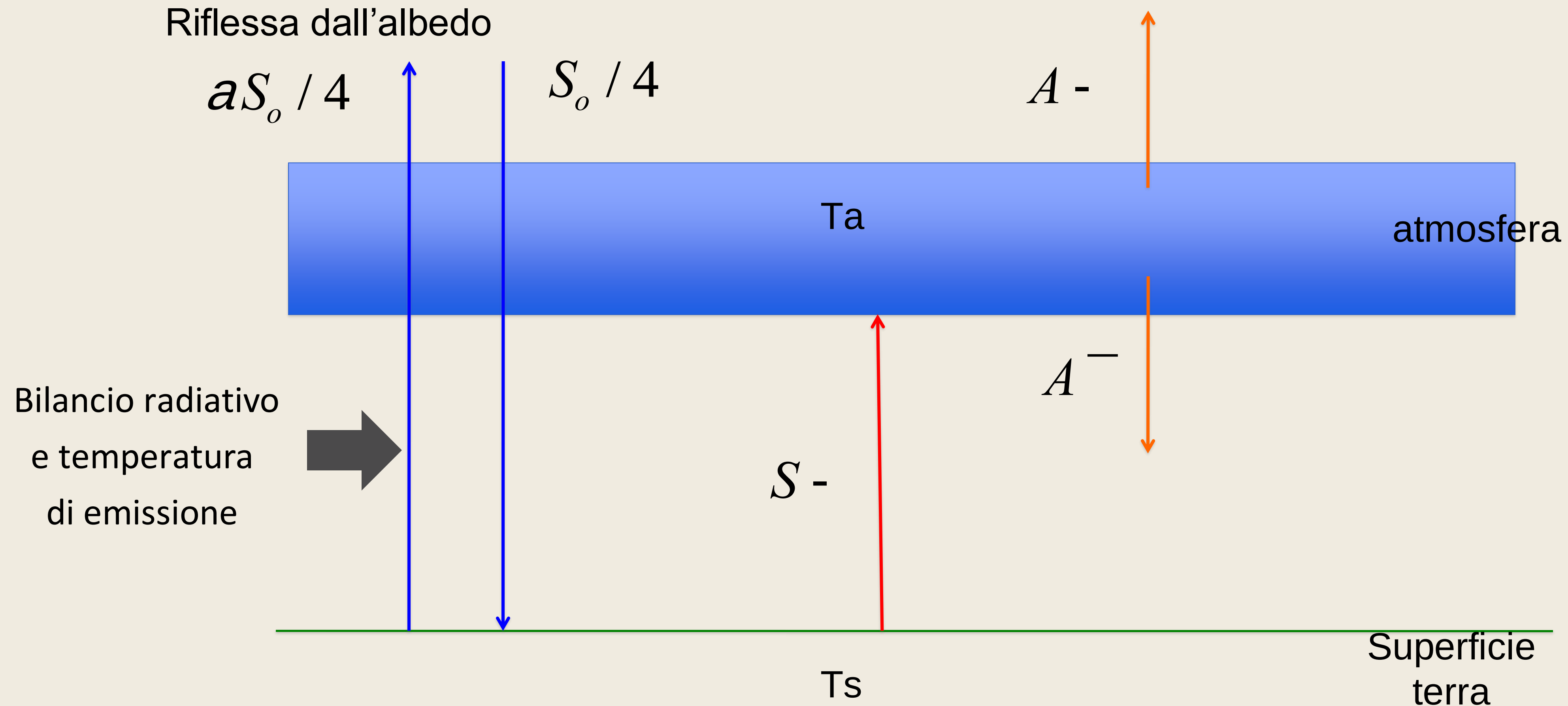


Gas clima-alteranti

(CO_2 CH_4 N_2O e HFC (idrofluorocarburi), PFC (perfluorocarburi) e SF_6 (esafluoruro di zolfo)).

L'effetto serra

Effetto SERRA: il modello “semplice” del processo



Materiale 'assorbente' in atmosfera: [vapore acqueo](#) (H_2O), il [biossido di carbonio](#) (CO_2), l'[ossido di diazoto](#) (N_2O) e il [metano](#) (CH_4)

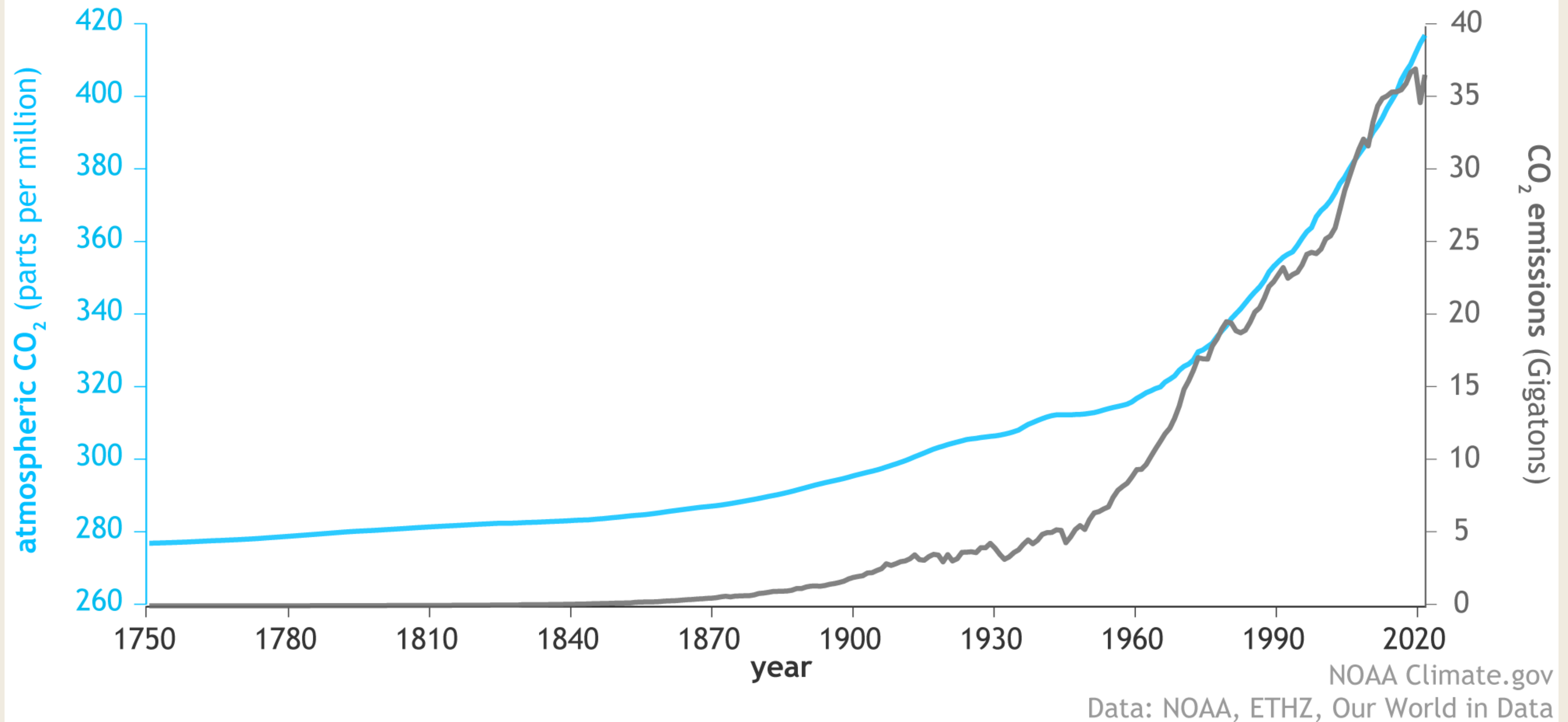
LA TEMPERATURA DI EMISSIONE : i pianeti SENZA atmosfera

	Raggio 10 ⁹ m	Costante solare Wm ⁻²	Albedo	Temp Emissione (K)	T superficie (K)	Periodo rotazione (giorni)
Venere	108	2632	0.77	227	760	243
Terra	150	1367	0.30	255	288	1
Marte	228	589	0.24	211	230	1.03
Giove	780	51	0.51	103	134	0,41

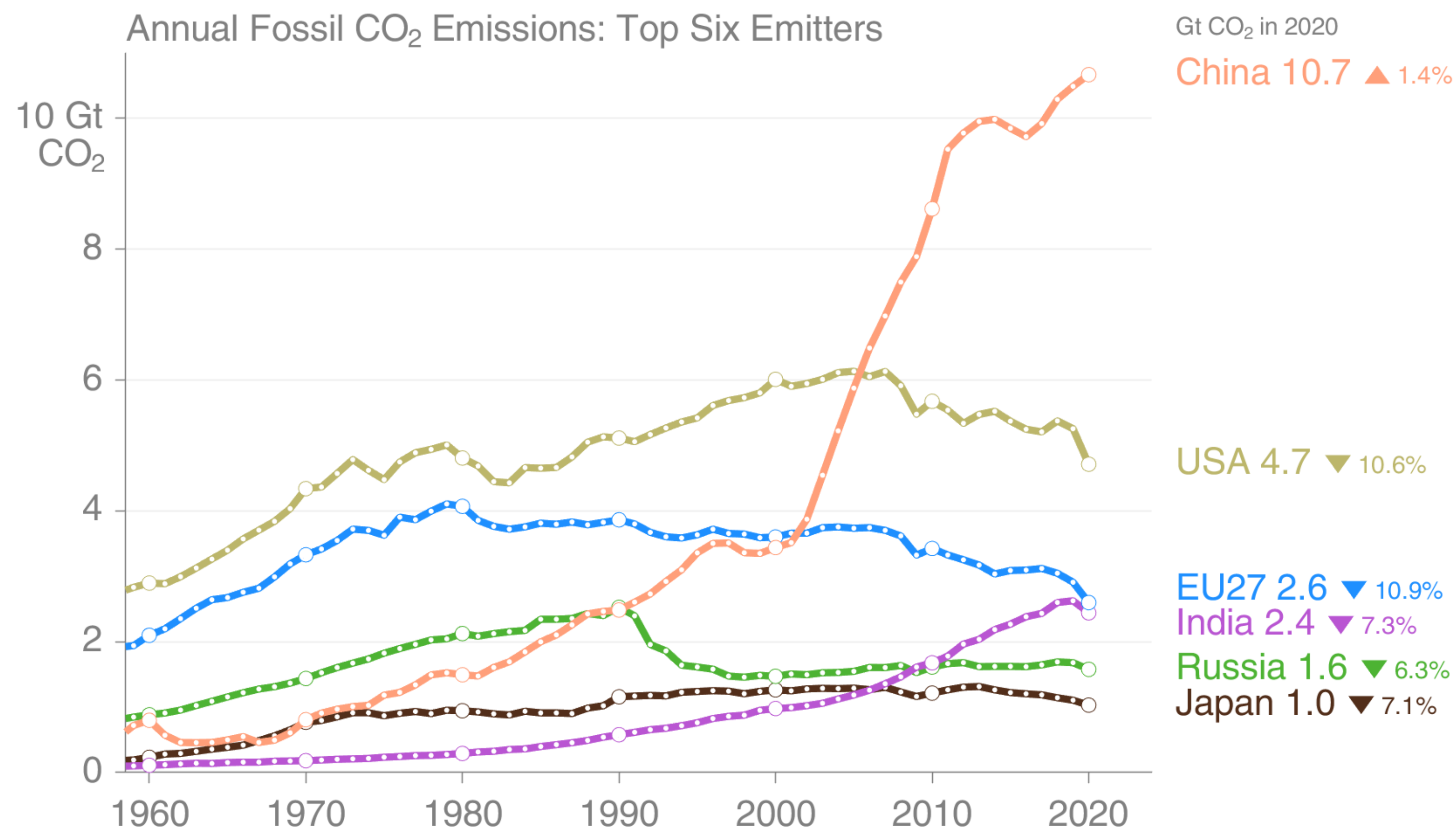
<https://scied.ucar.edu/interactive/earths-energy-balance>

Concentrazione di CO₂ in atmosfera e emissioni

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



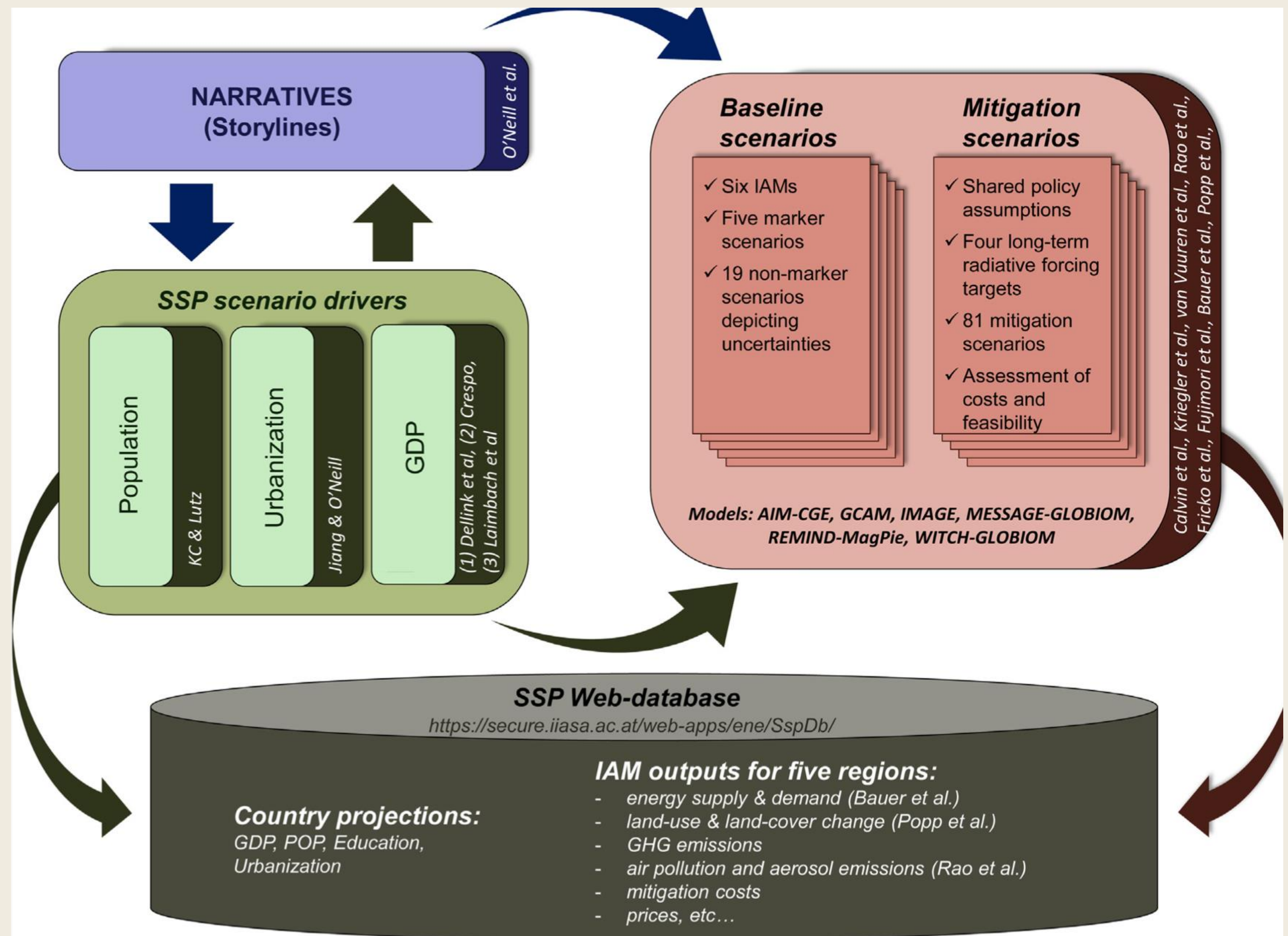
Principali emettitori di CO₂ da idrocarburi fossili



I primi sei emettitori nel 2020 hanno coperto il 66% delle emissioni globali
Cina 31%, Stati Uniti 14%, UE27 7%, India 7%, Russia 5% e Giappone 3%

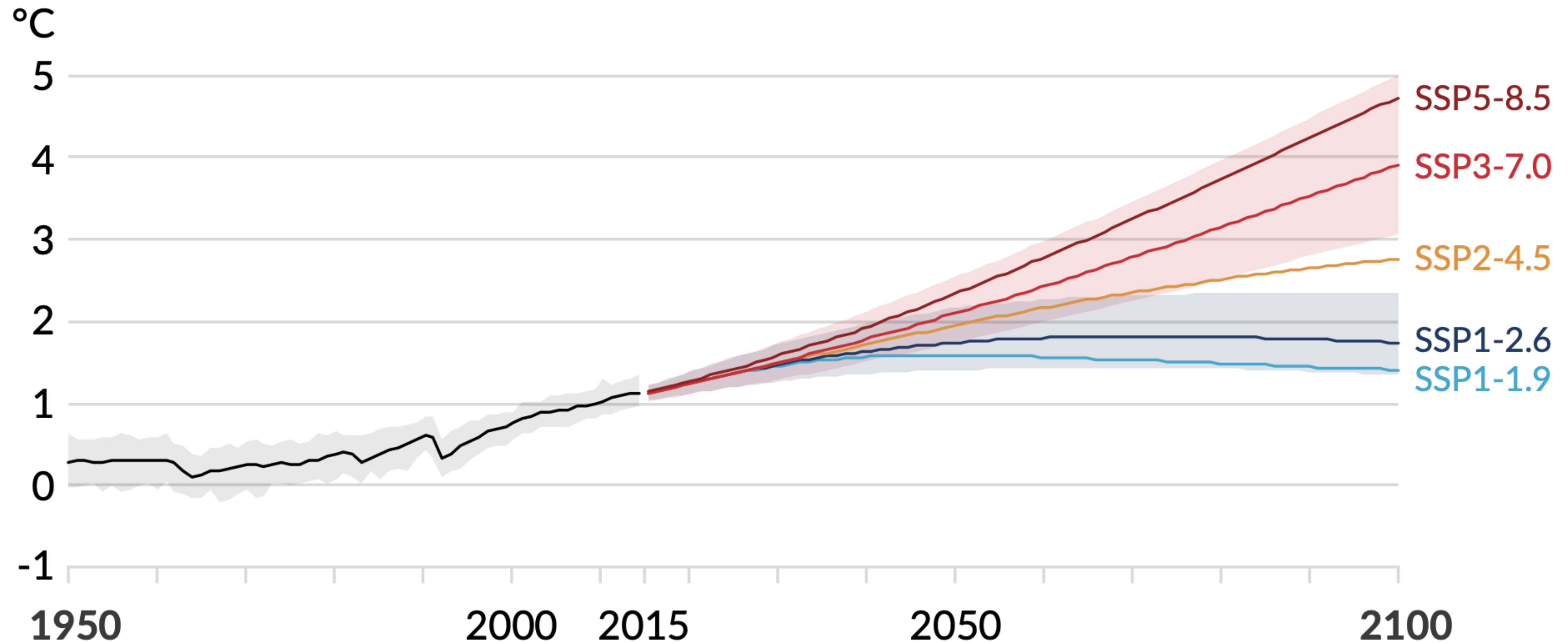
Shared Socioeconomic Pathways-SSP (Percorsi socioeconomici condivisi)

Illustrazione schematica dei passaggi principali nello sviluppo degli SSP, comprese le narrative, i driver di scenario socioeconomico (SSP) e gli scenari di base e di mitigazione. (Riahi et al., 2017)



L'aumento di temperatura conseguente a diversi SSP

a) Global surface temperature change relative to 1850-1900

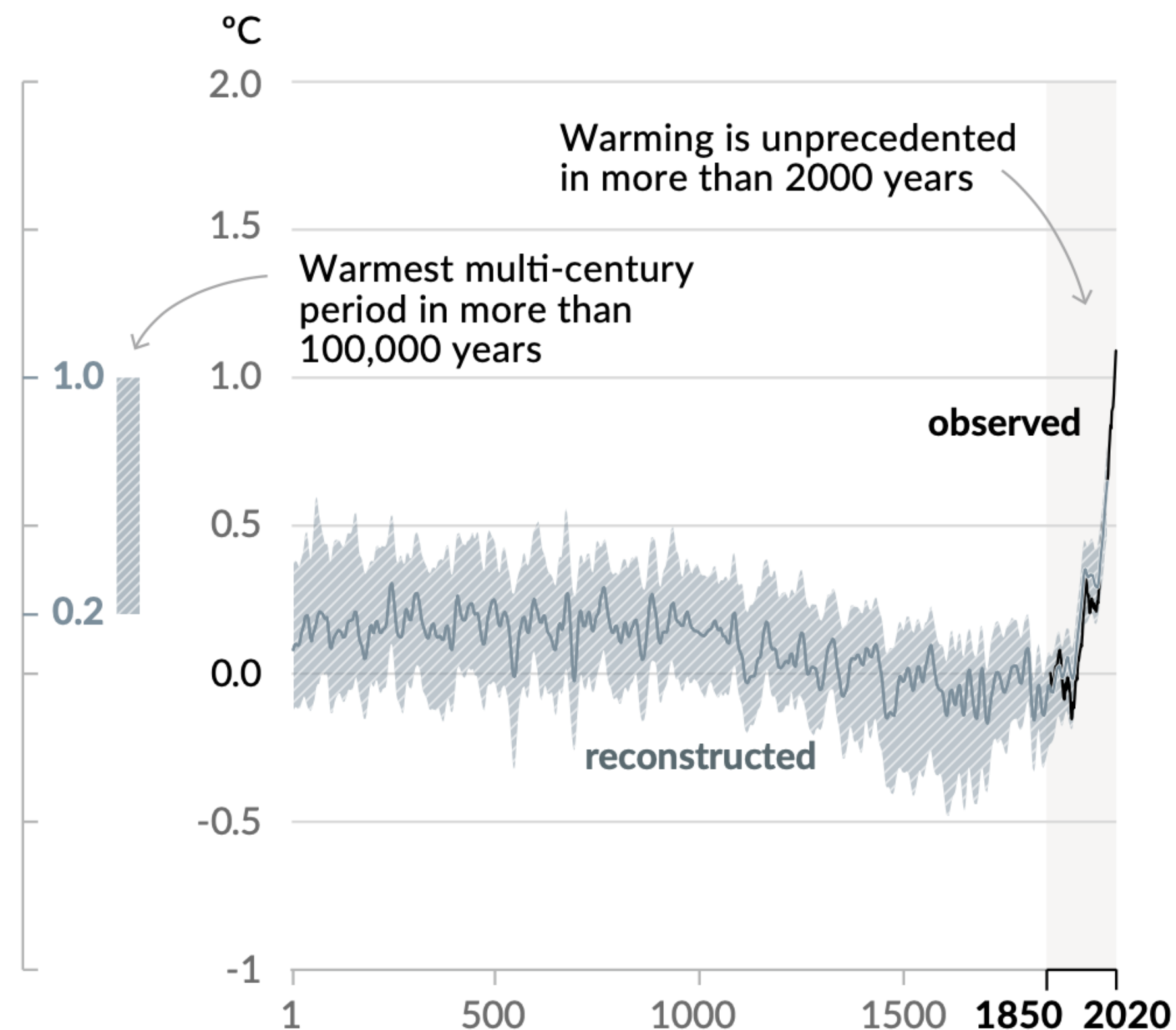


Osservazioni e Simulazioni

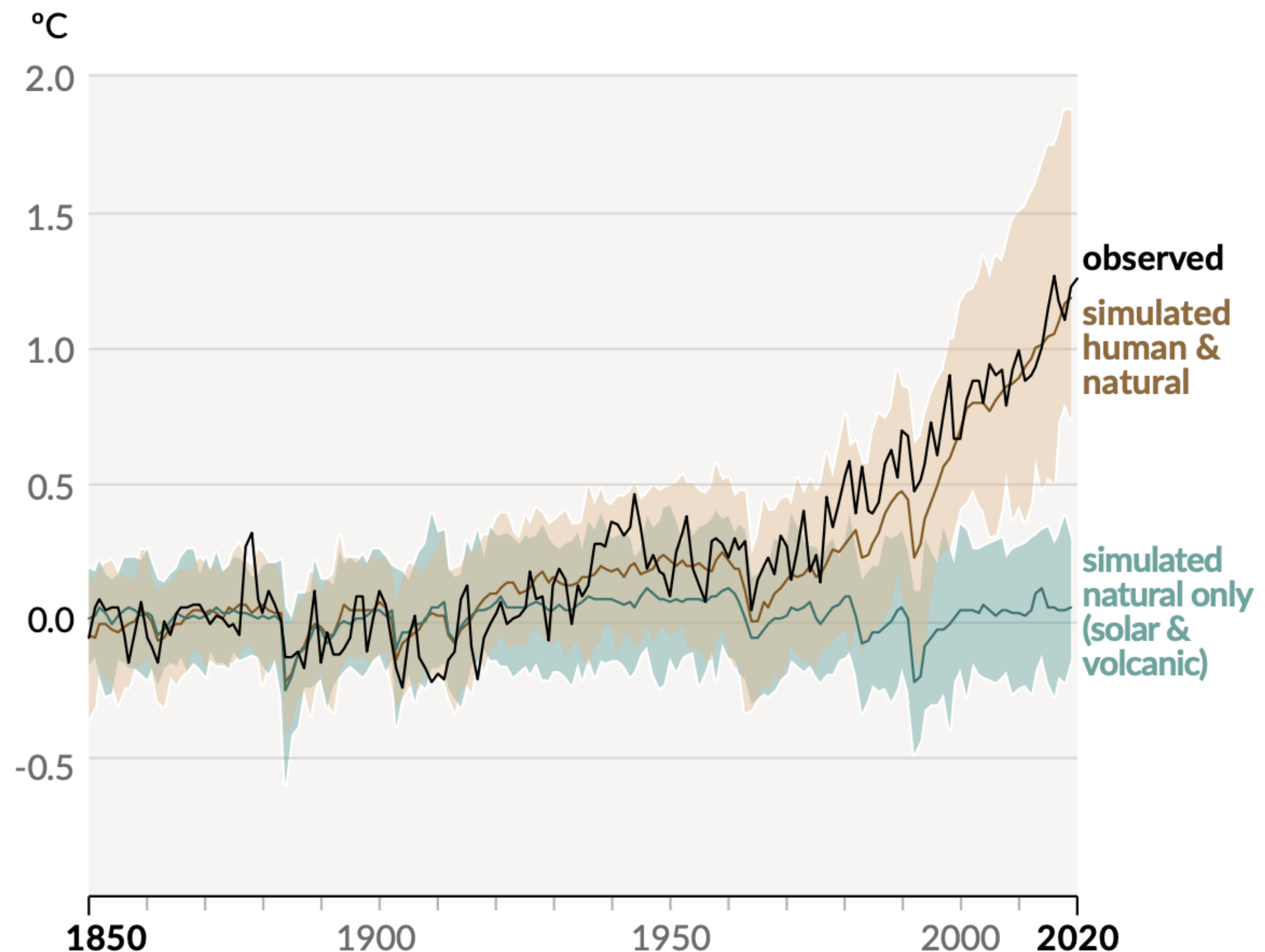
Human influence has warmed the climate at a rate that is unprecedented in at least the last 2000 years

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

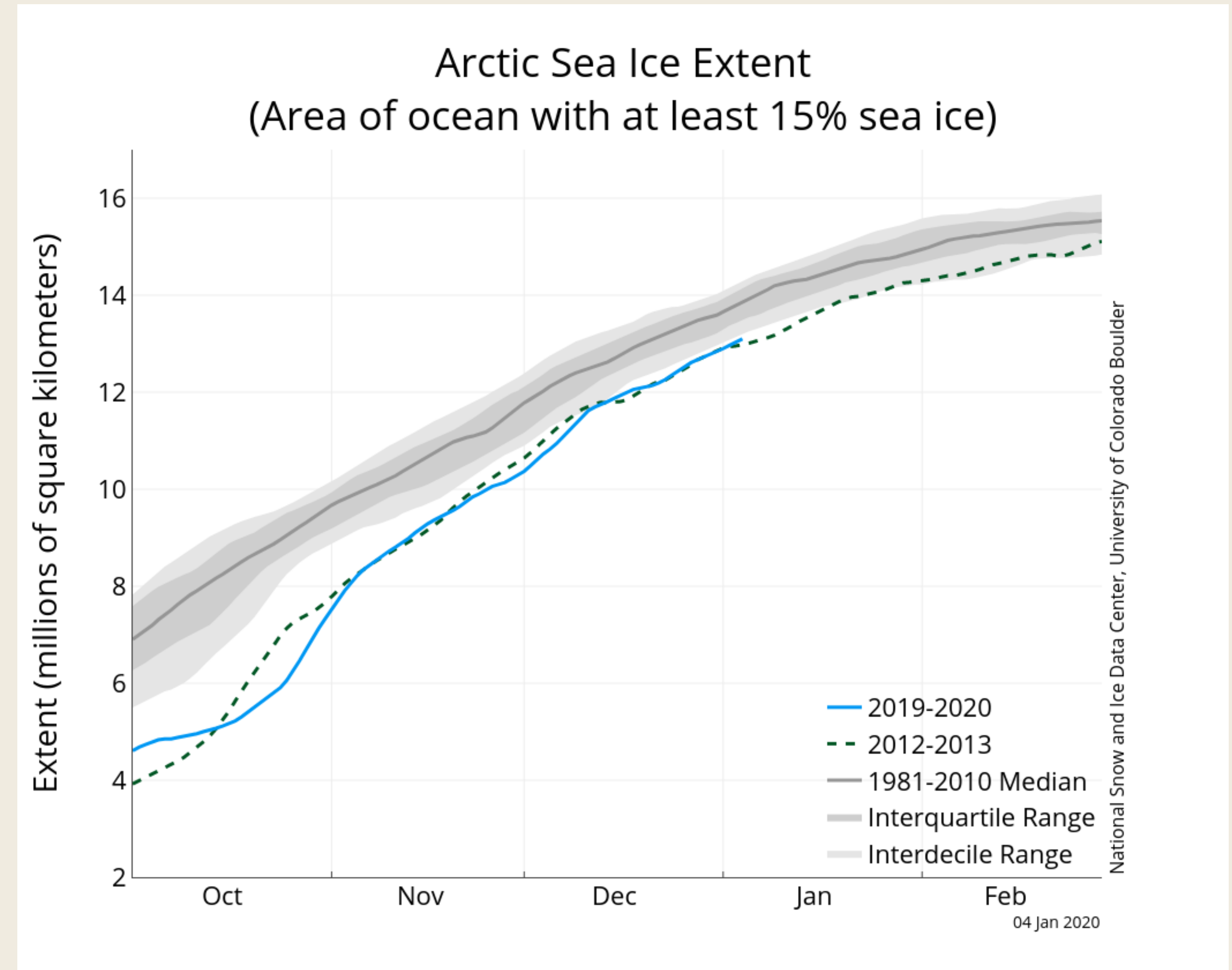
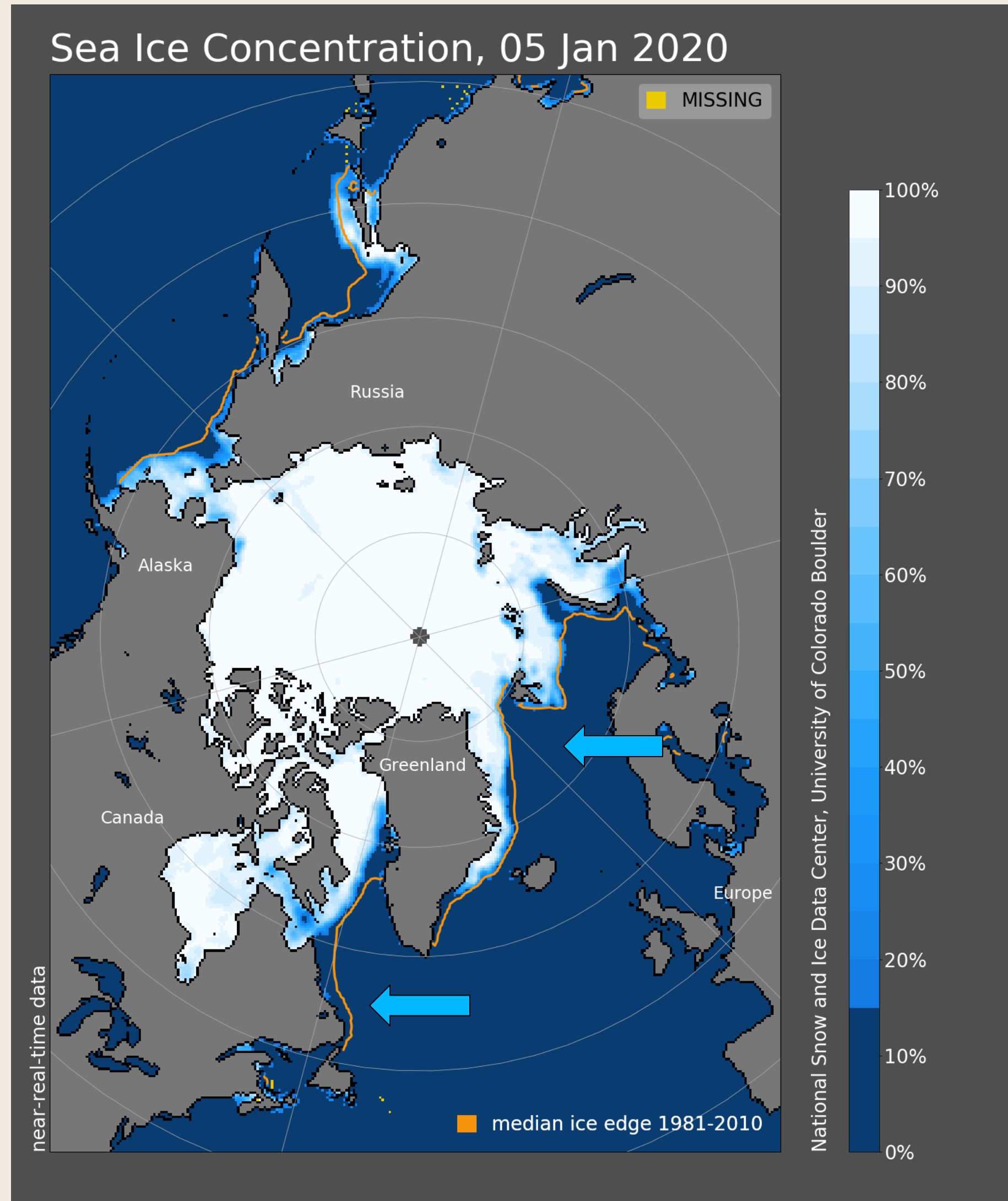
a) Change in global surface temperature (decadal average) as **reconstructed** (1-2000) and **observed** (1850-2020)



b) Change in global surface temperature (annual average) as **observed** and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850-2020)



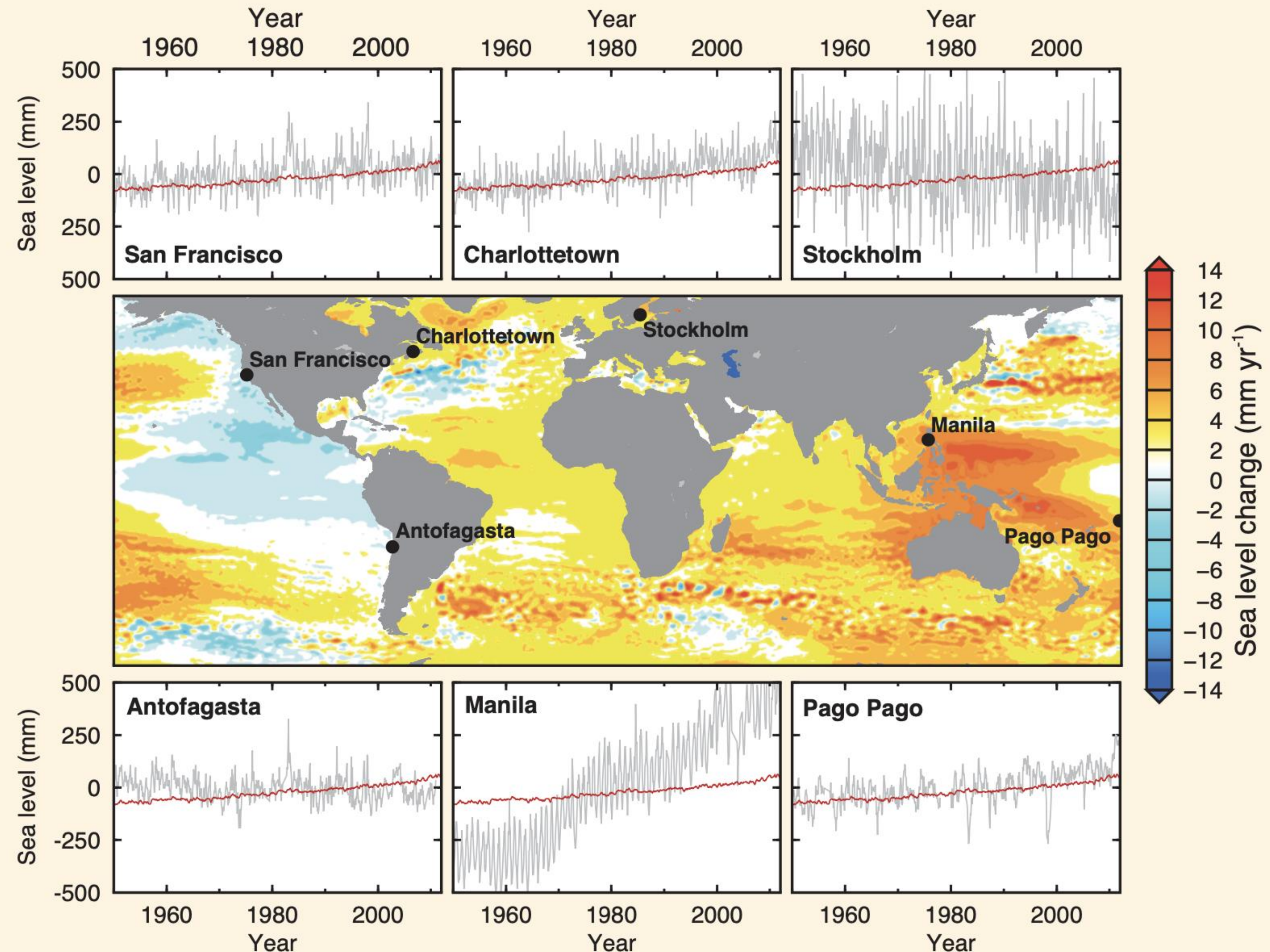
Il cambiamento del ghiaccio marino nell'Artico



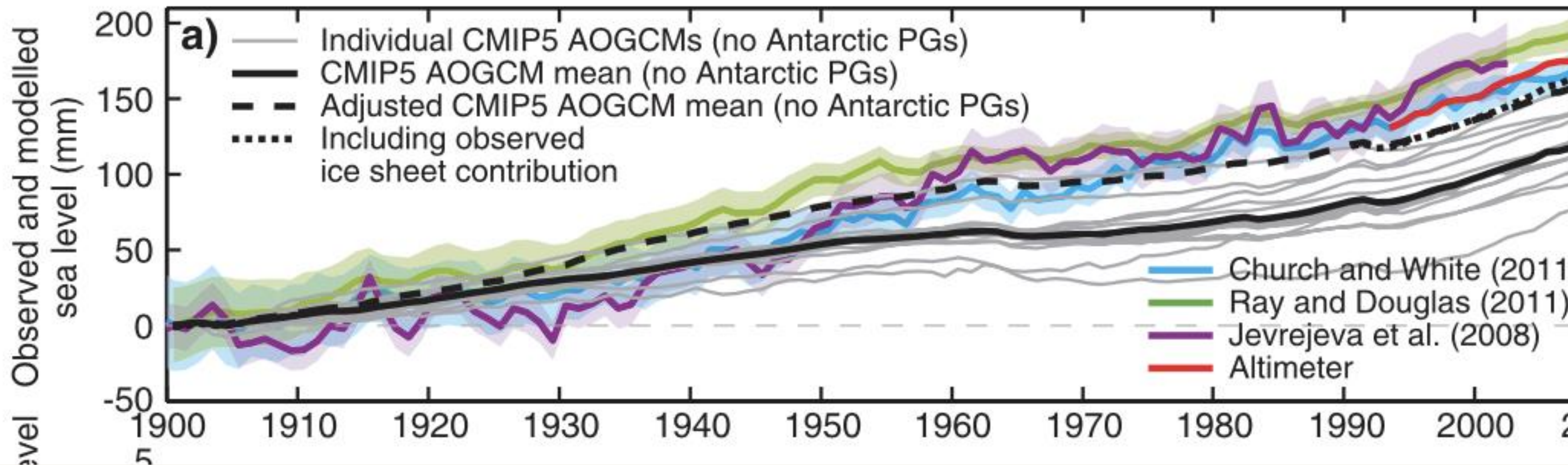
La crescita del livello del mare e' diversa nei vari oceani

Tasso di crescita
del livello del mare
per il periodo
1993–2012
dai satellite
altimetrici.

La linea rossa sulle
tendenze nei vari
punti e' la crescita
GLOBALE MEDIA



Le proiezioni climatiche della crescita confrontate con le osservazioni da satellite



L'accelerazione della crescita del livello del mare (Nerem et al., 2018)

Accelerazione significa che non e' una RETTA la Migliore approssimazione alla curva di crescita

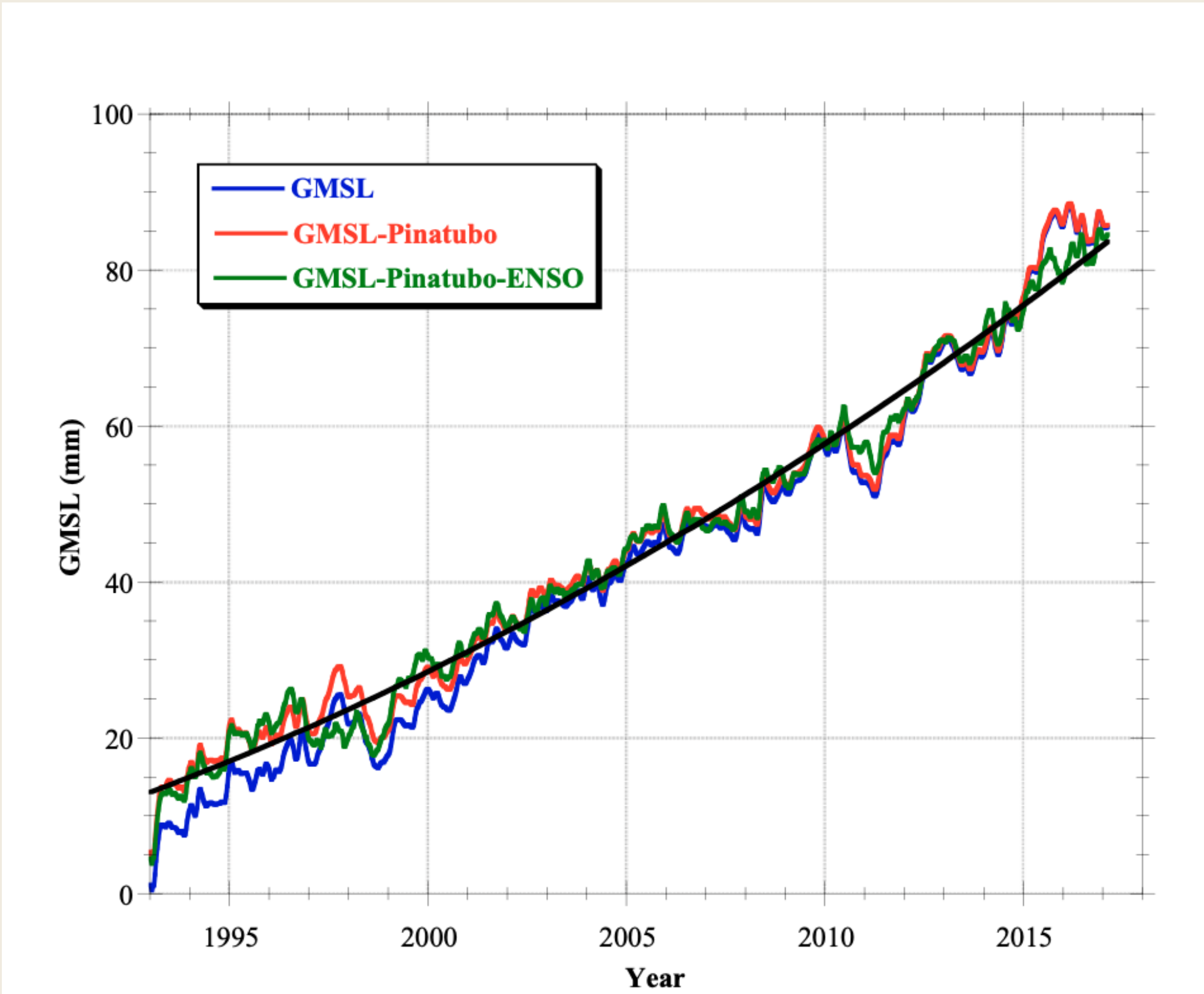


Fig. 1. GMSL from the adjusted processing of ref. 15 (blue) and after removing an estimate for the impacts of the eruption of Mount Pinatubo (12) (red), and after also removing the influence of ENSO (green), fit with a quadratic (black). The acceleration (0.084 mm/y^2) is twice the quadratic coefficient.

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.

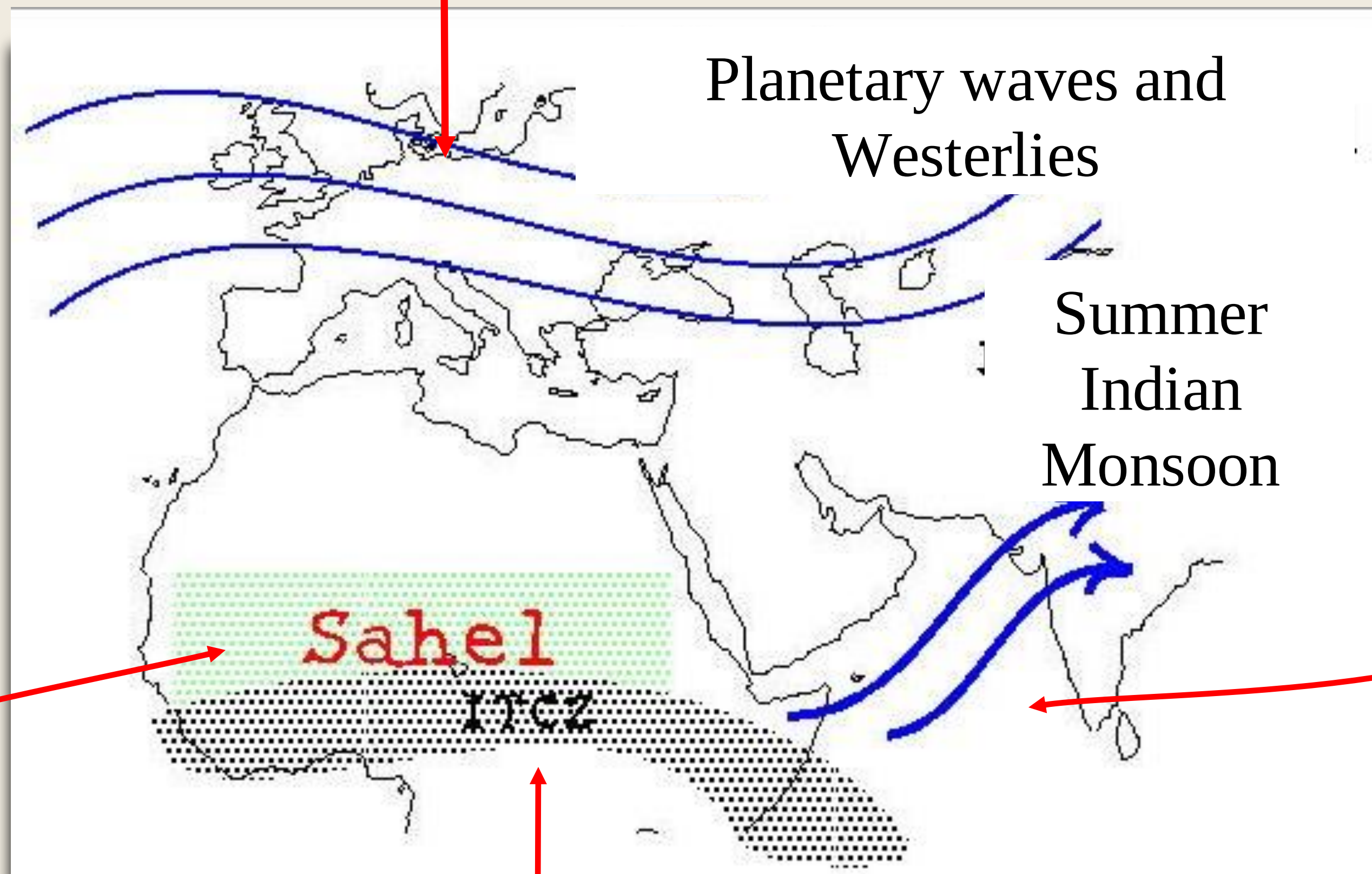
[†]Corrected for Pinatubo and ENSO effects (climate-change–driven acceleration).

Il Mediterraneo

La Regione Mediterranea

Medie Latitudini

Monzone Indiano



Sahel

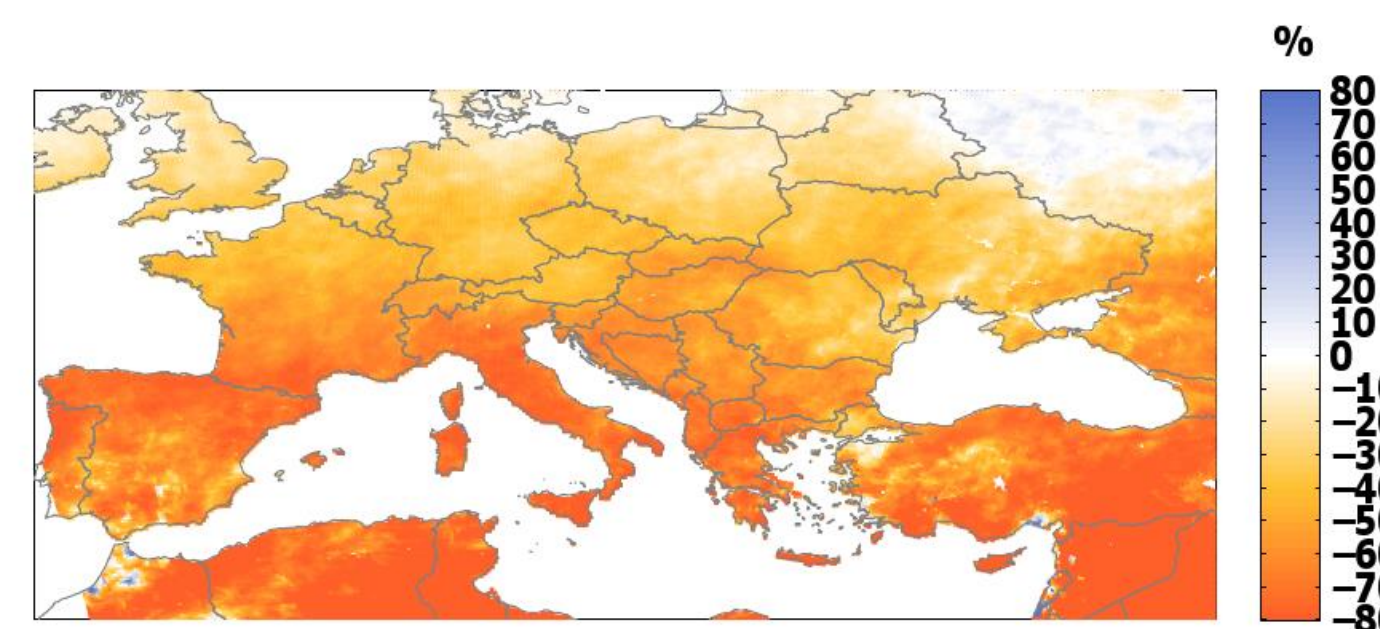
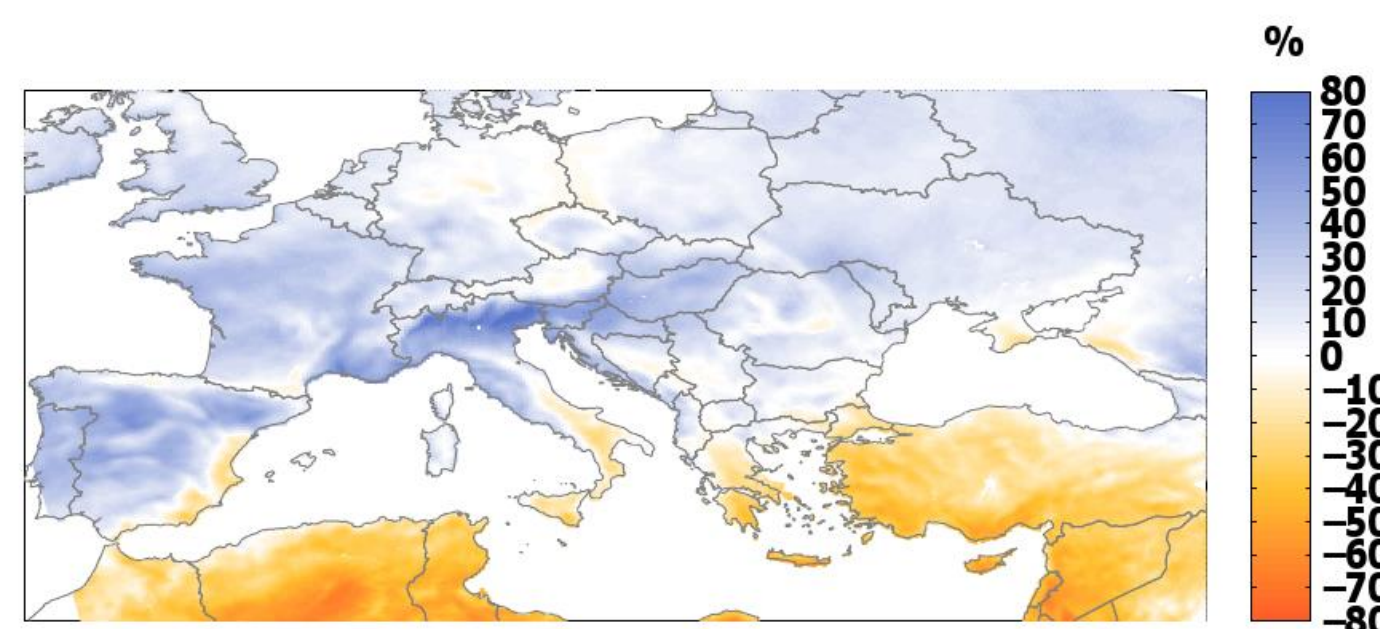
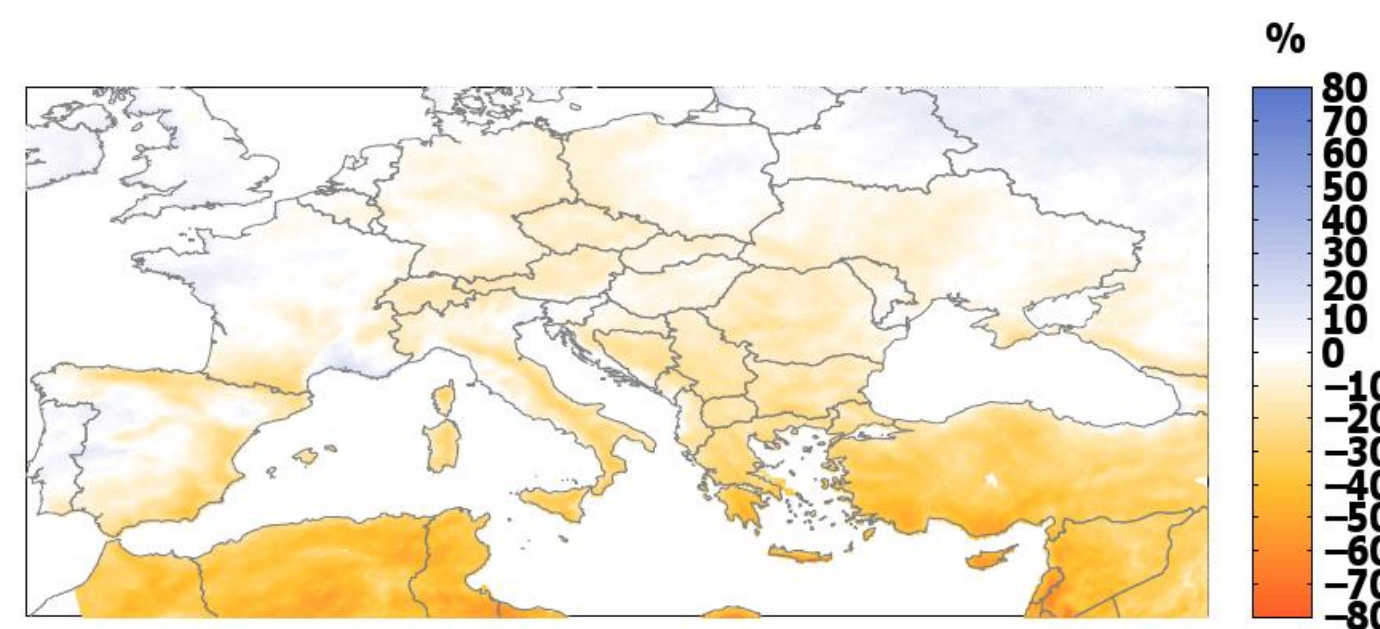
InterTropical Convergence Zone

Scenari di precipitazione sul Mediterraneo

scenario

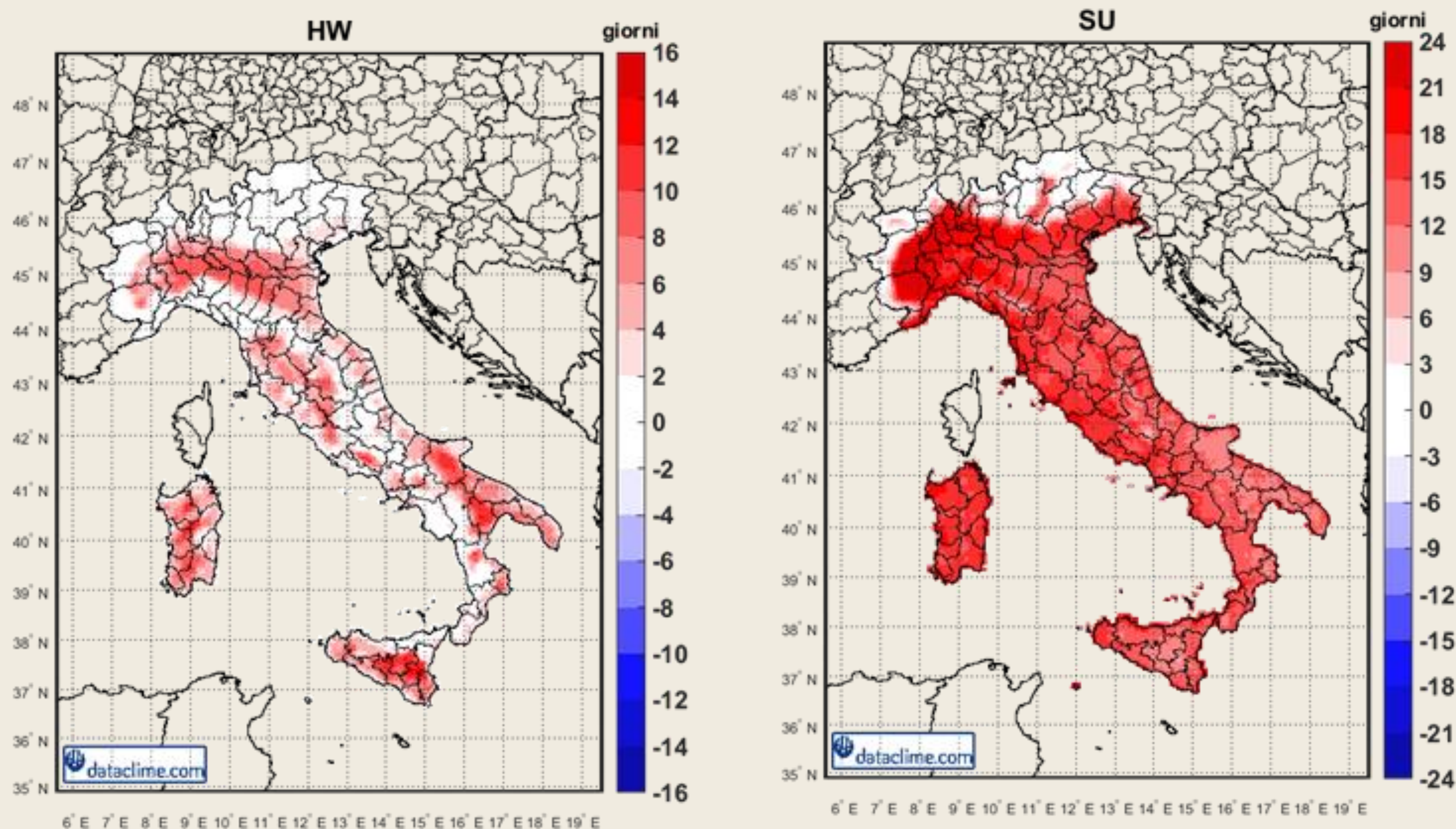
Variazione delle precipitazioni sul Mediterraneo tra la fine del XXI secolo e il XX secolo.

RCP8.5



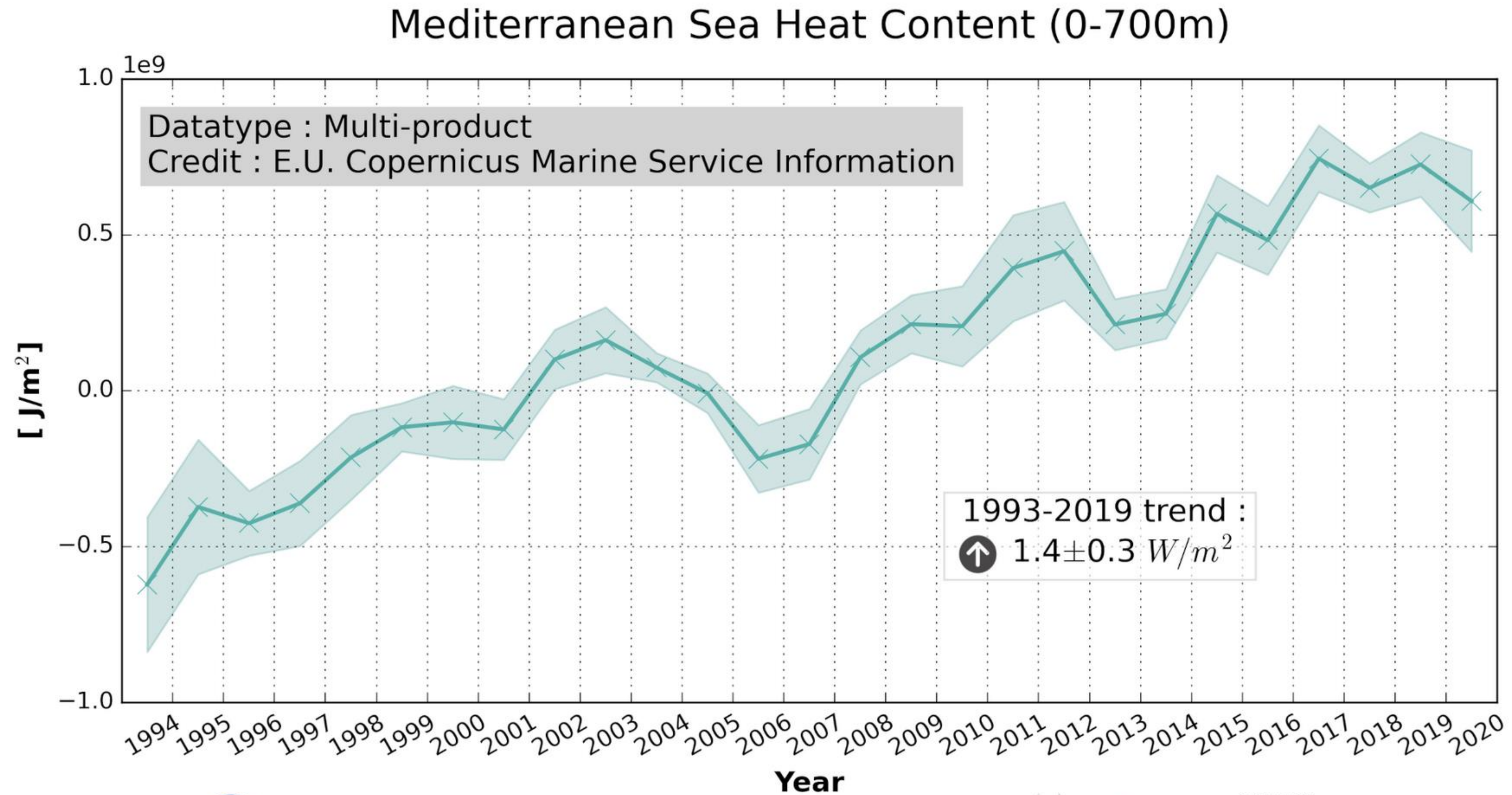
Estremi di temperatura sul Mediterraneo nel 2021-2050 rispetto al 1981-2010

scenario
RCP4.5



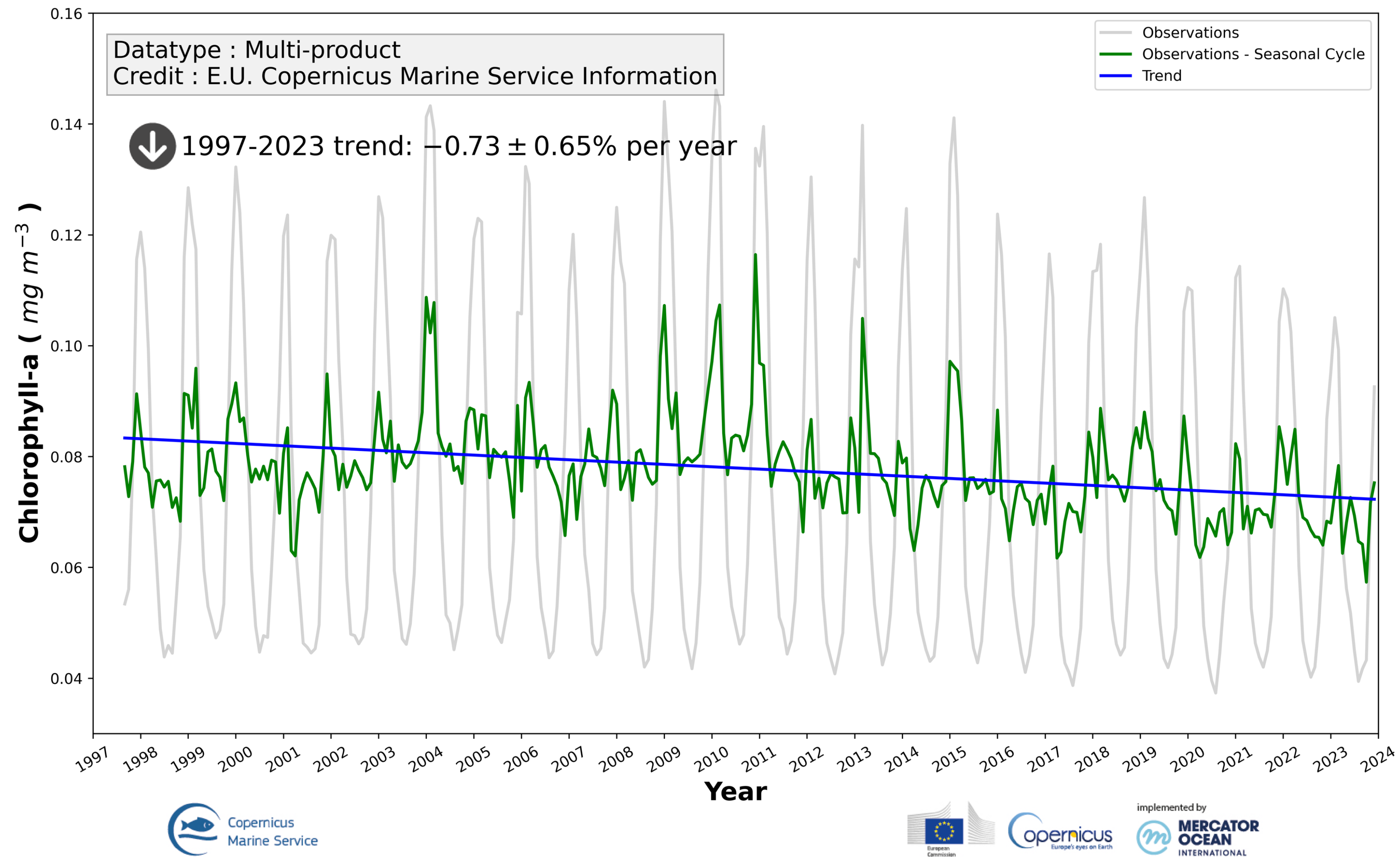
HW (giorni): Ondate di calore - Numero di giorni con temperatura massima superiore a 35°C
SU (giorni): Giorni estivi - Numero di giorni con temperatura massima giornaliera >25°C

Il contenuto di calore del Mare Mediterraneo



Il contenuto di clorofilla del Mare Mediterraneo

Chlorophyll-a time series and trend (1997-2023): Mediterranean Sea



Siamo pronti ?

Opzioni di mitigazione e adattamento

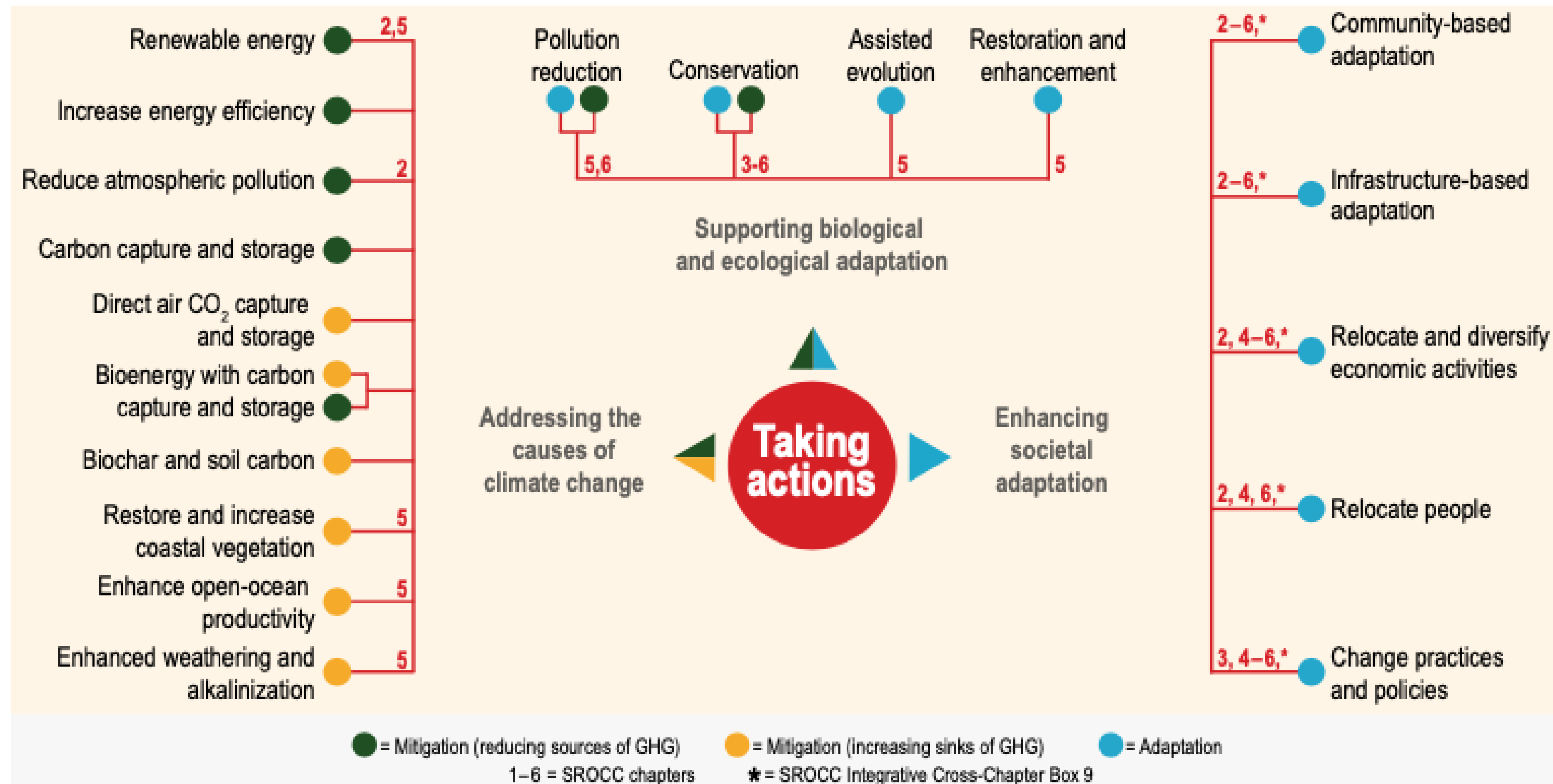


Figure 1.2 | Overview of the main ocean-cryosphere mitigation and adaptation measures to observed and expected changes in the context of this report. A longer description of these measures are given in SM1.3. Solar radiation management techniques are omitted because they are covered in other IPCC 6th 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).

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



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.



Per imparare possiamo usare anche un gioco

<https://www.changegame.org/>

