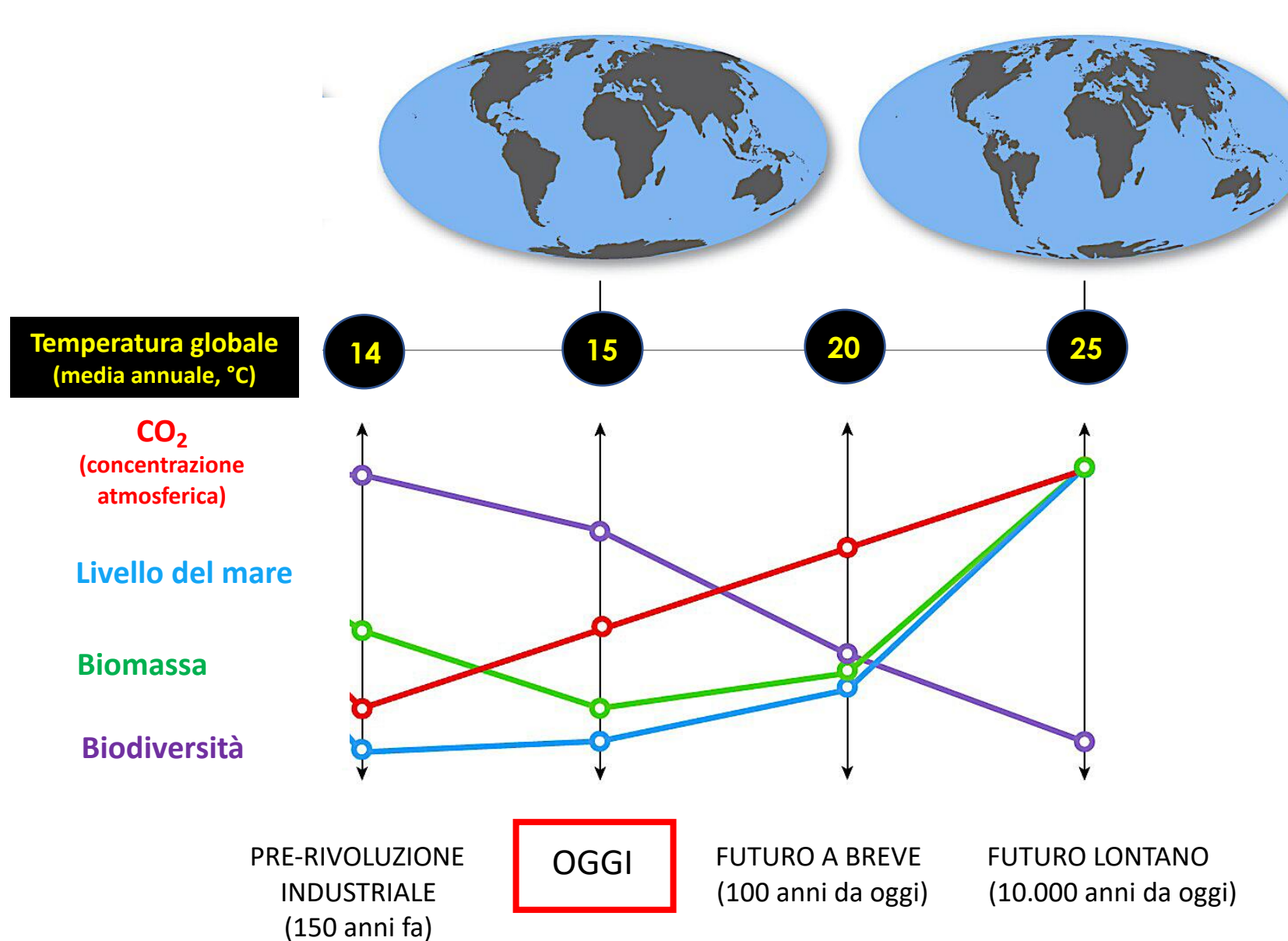


# La resilienza dell'ecosistema oceano: cosa ci insegna la geologia ?

*Elisabetta Erba*

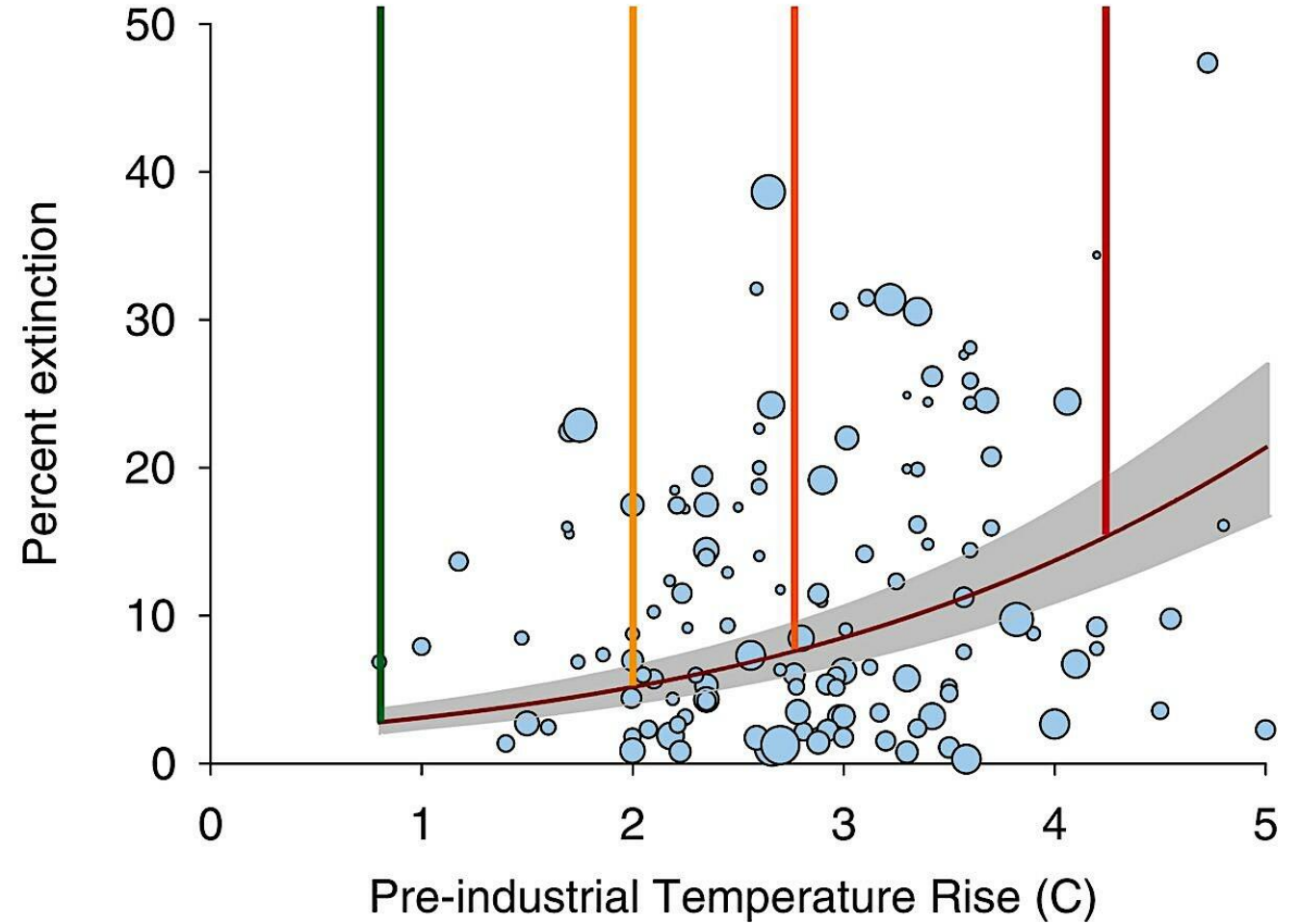


# Uno sguardo al presente e al futuro



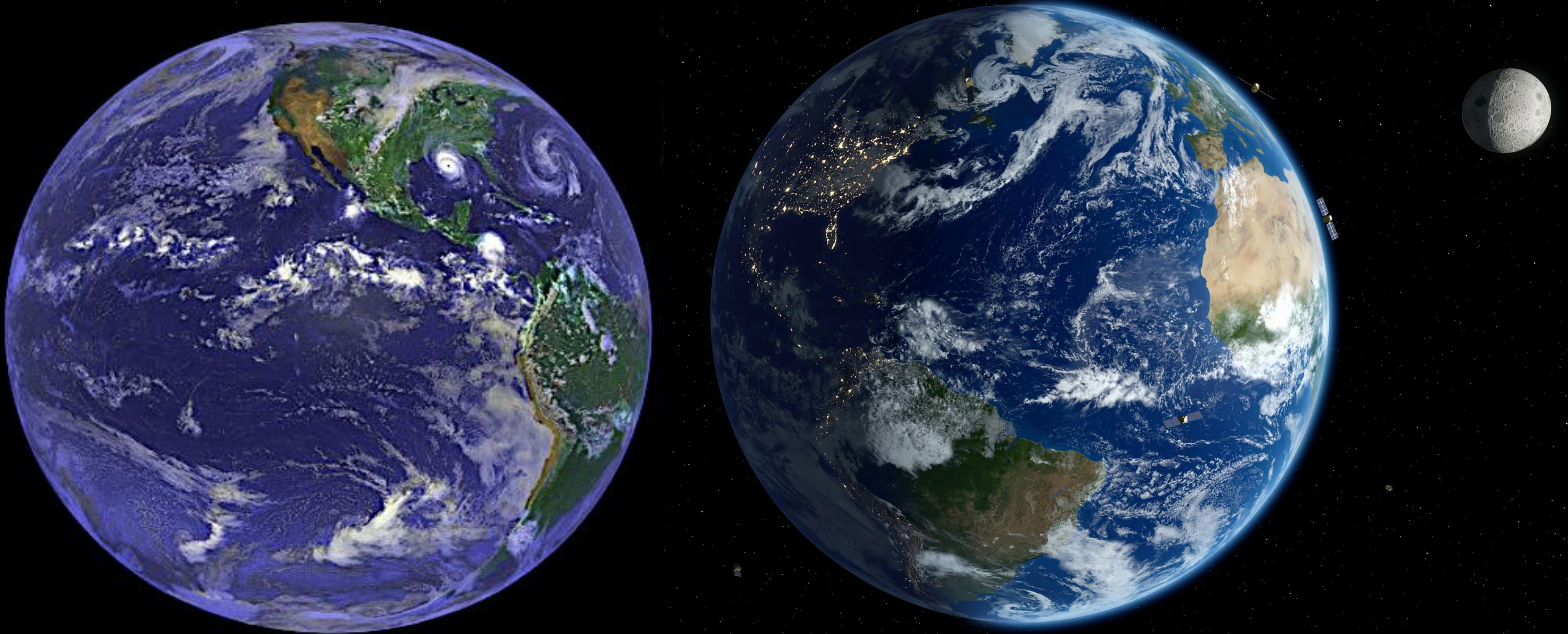
Molte preoccupazioni riguardano la possibilità che la **BIODIVERSITA'** possa diminuire gravemente causa dell'**incapacità degli organismi a sopravvivere in un clima surriscaldato.**

Scenario	Current	Target	RCP 6.0	RCP 8.5
Predicted extinction %	2.8	5.2	7.7	15.7



Key  
 • 2 species  
 ● 24,480 species

L'OCEANO è il più grande e il più antico ECOSISTEMA



L'OCEANO è il nostro POLMONE BLU

An underwater scene featuring a vibrant coral reef in the foreground and several dark fish swimming in the clear blue water above. The lighting is natural, creating a serene and healthy marine environment.

$O_2$

**70%**

dell'ossigeno che respiriamo  
provenie  
dalle piante marine

$H_2O$

**97%**

dell'approvigionamento idrico  
della terra è contenuto  
nell'oceano

$CO_2$

**30%**

delle emissioni di  $CO_2$  sono  
assorbite  
dagli oceani



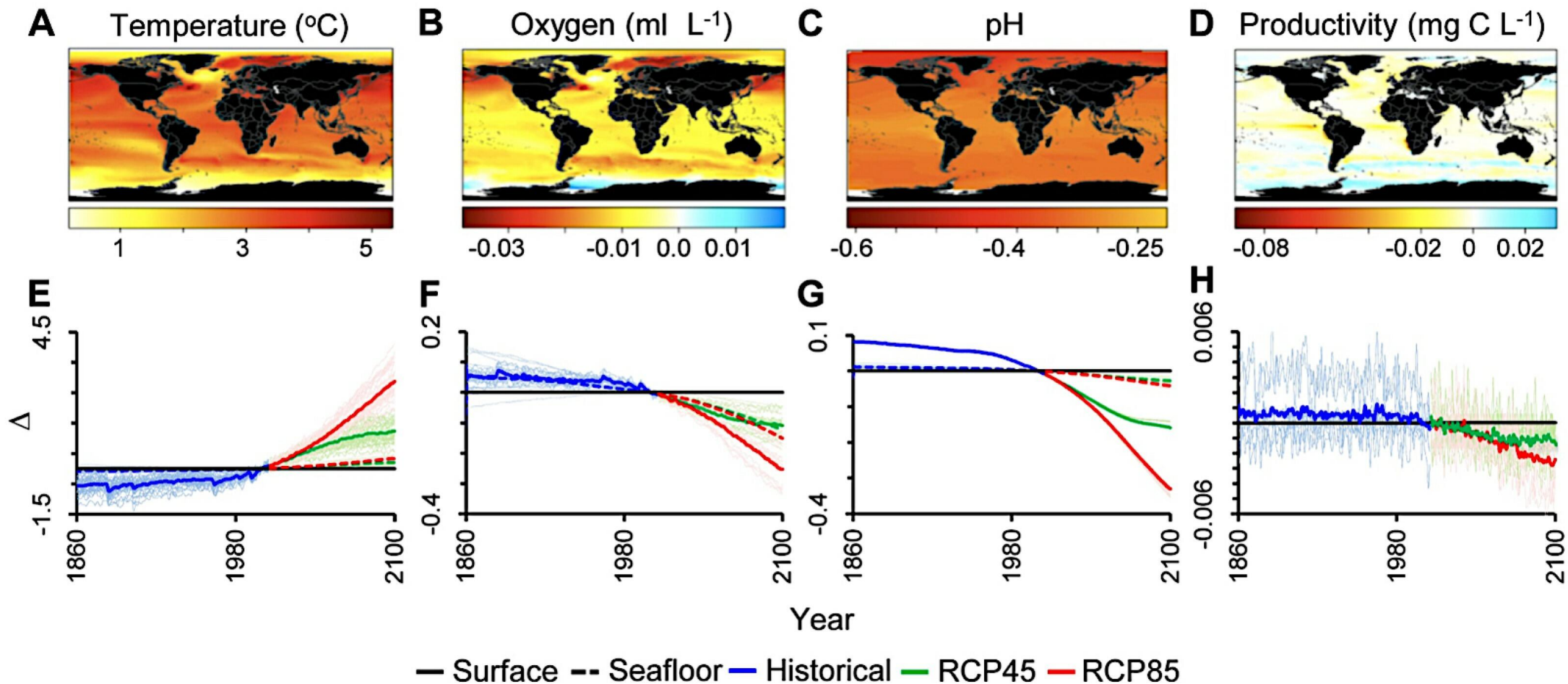
I cambiamenti  
ambientali fanno  
cambiare  
sensibilmente tutta la  
catena alimentare e  
la dinamica dell'  
oceano.

## TEMPERATURA

## OSSIGENO

## ACIDITA'

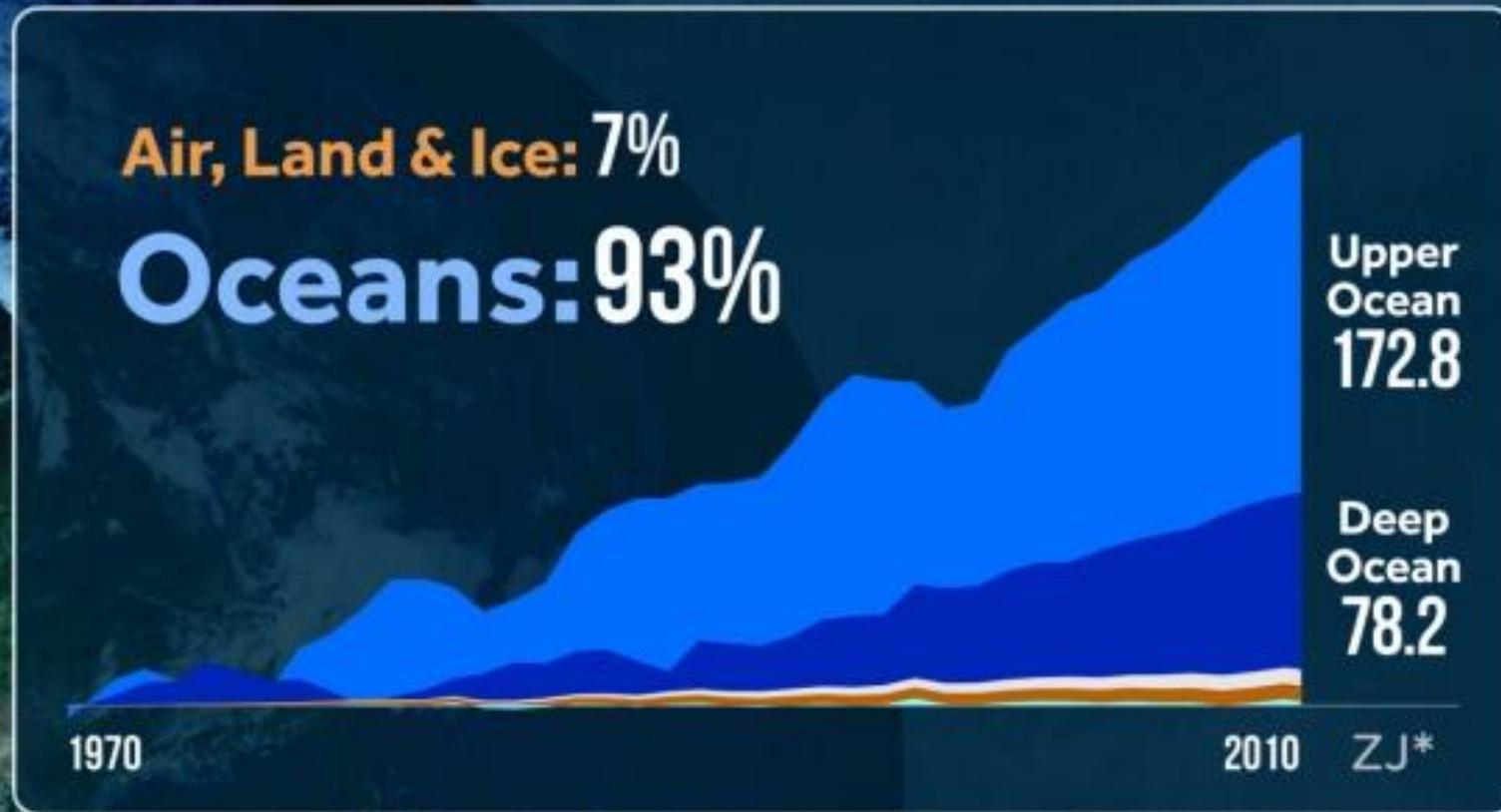
## PRODUTTIVITA'



## Futuro cambiamento dei parametri biogeochimici nell'oceano.

I grafici A-D mostrano la differenza tra i **valori futuri** (cioè la media dal 2091 al 2100) e quelli **contemporanei** (cioè gli anni medi dal 1996 al 2005) nello scenario RCP8.5.

# DOVE VA IL RISCALDAMENTO GLOBALE?



Zettajoule =  $10^{21}$  joule

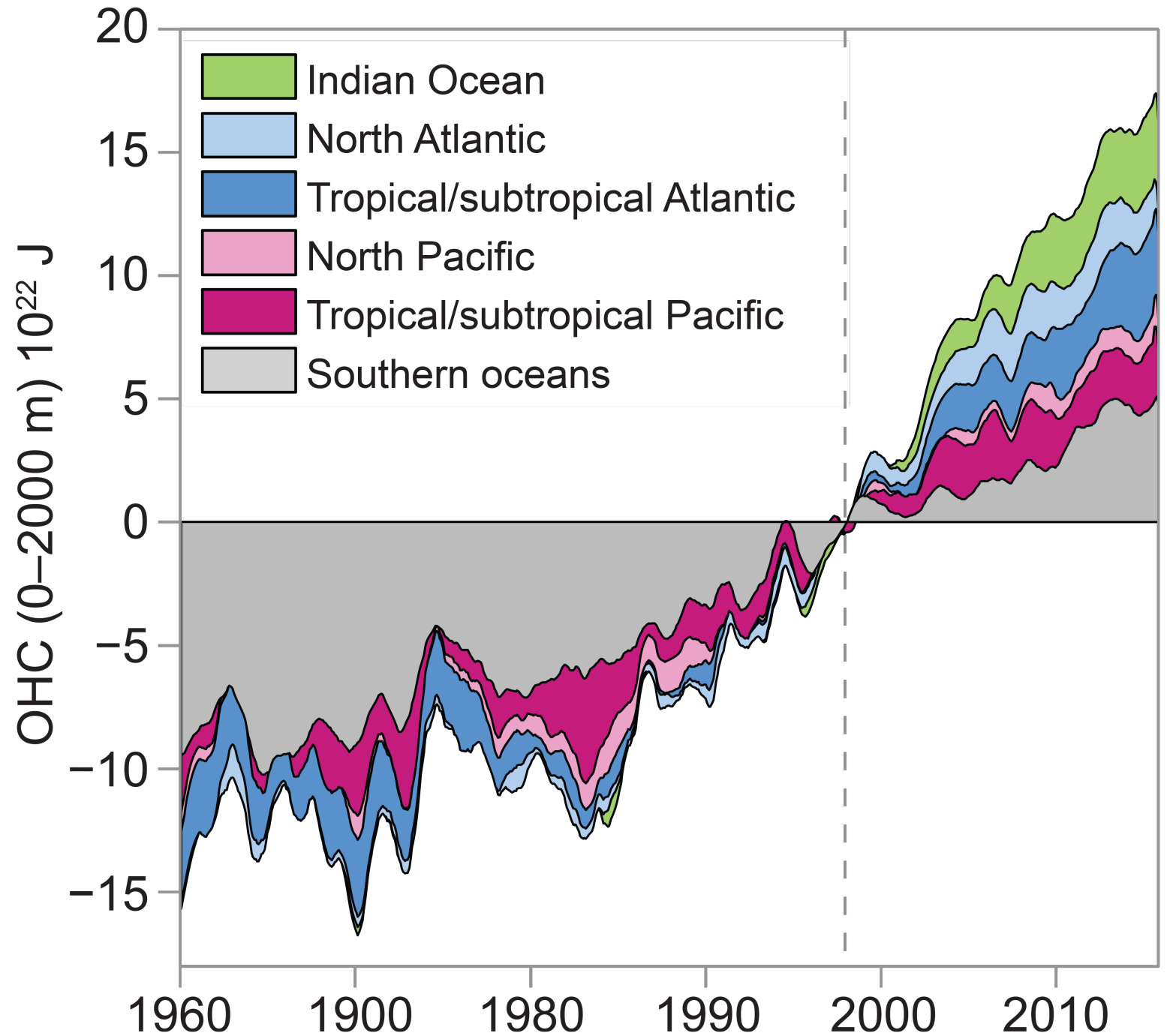
1 joule = 1 watt/sec

CENTRAL

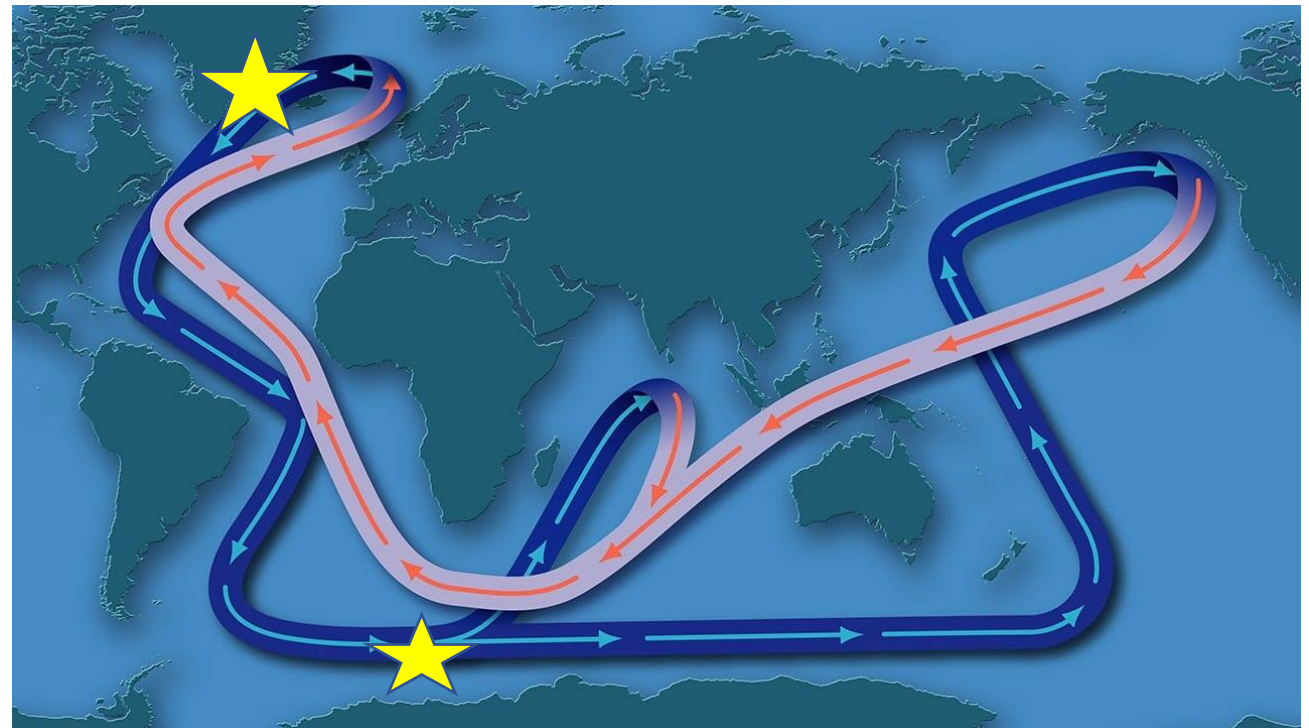
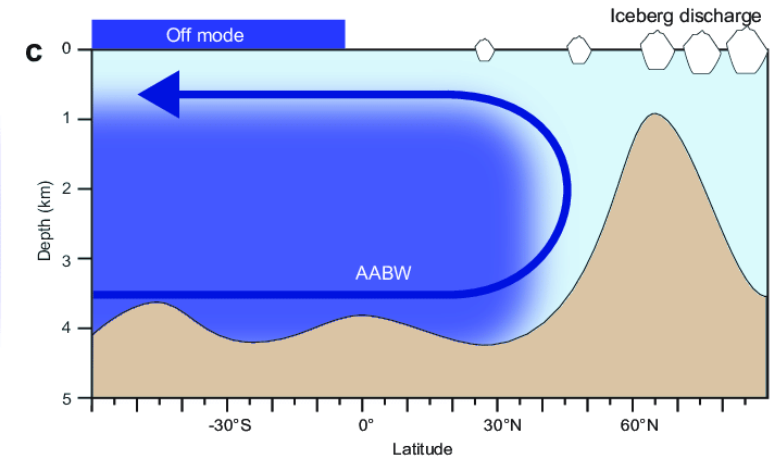
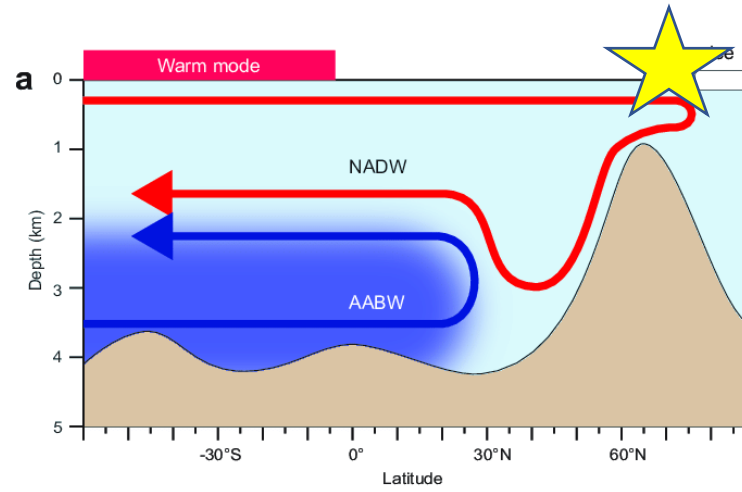
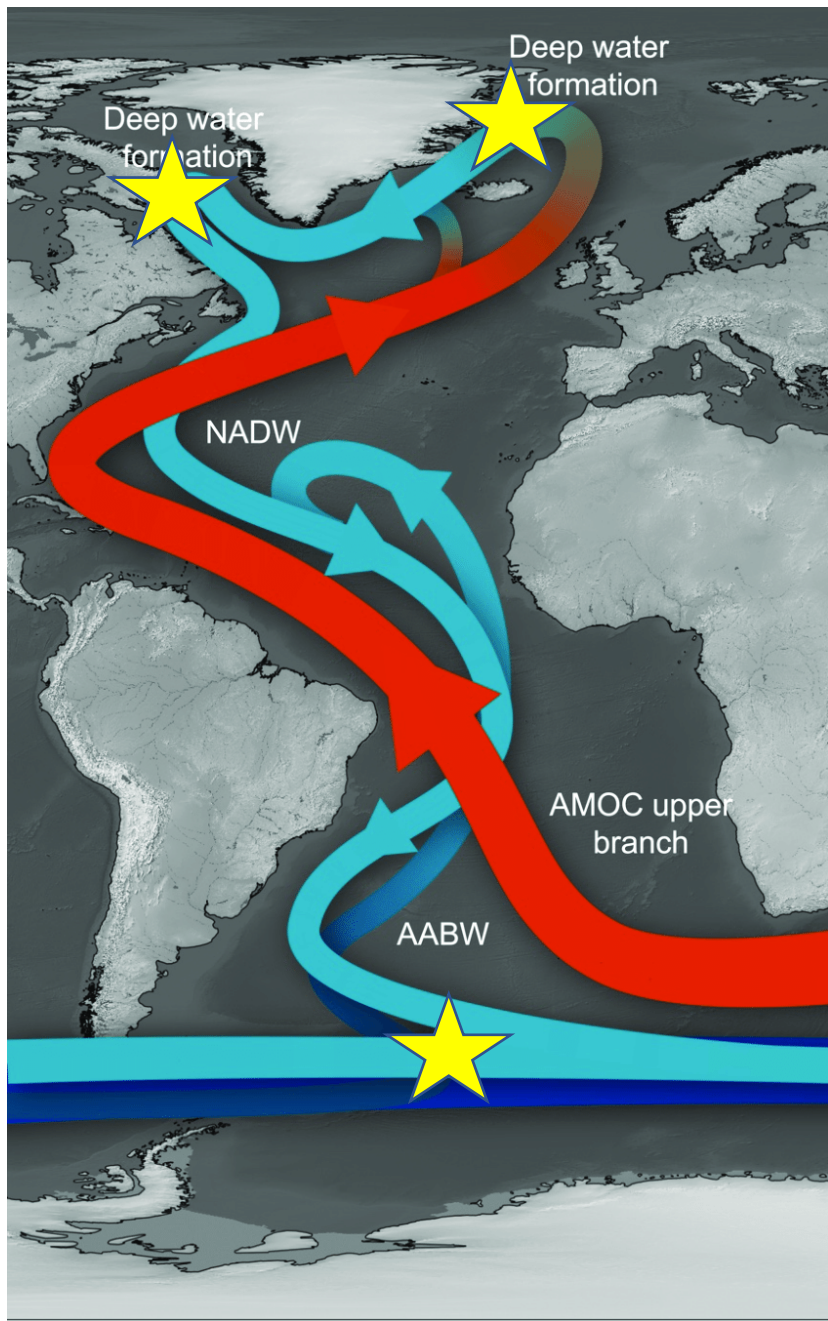


# RISCALDAMENTO DEGLI OCEANI

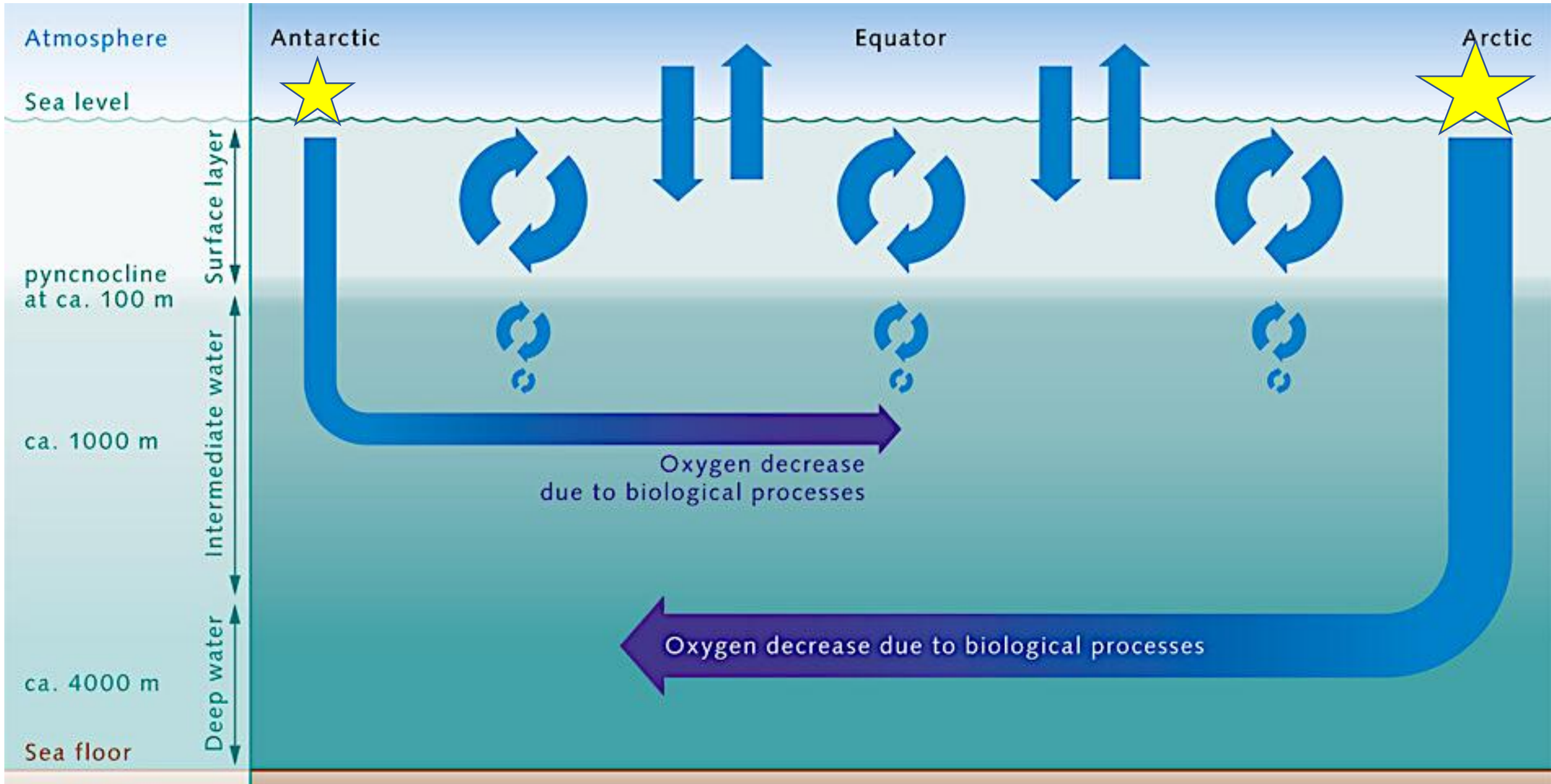
Ocean heat content changes from 1960 to 2015 for different ocean basins for 0 to 2.000 m depths (Figure source: Cheng et al. 2017 ).



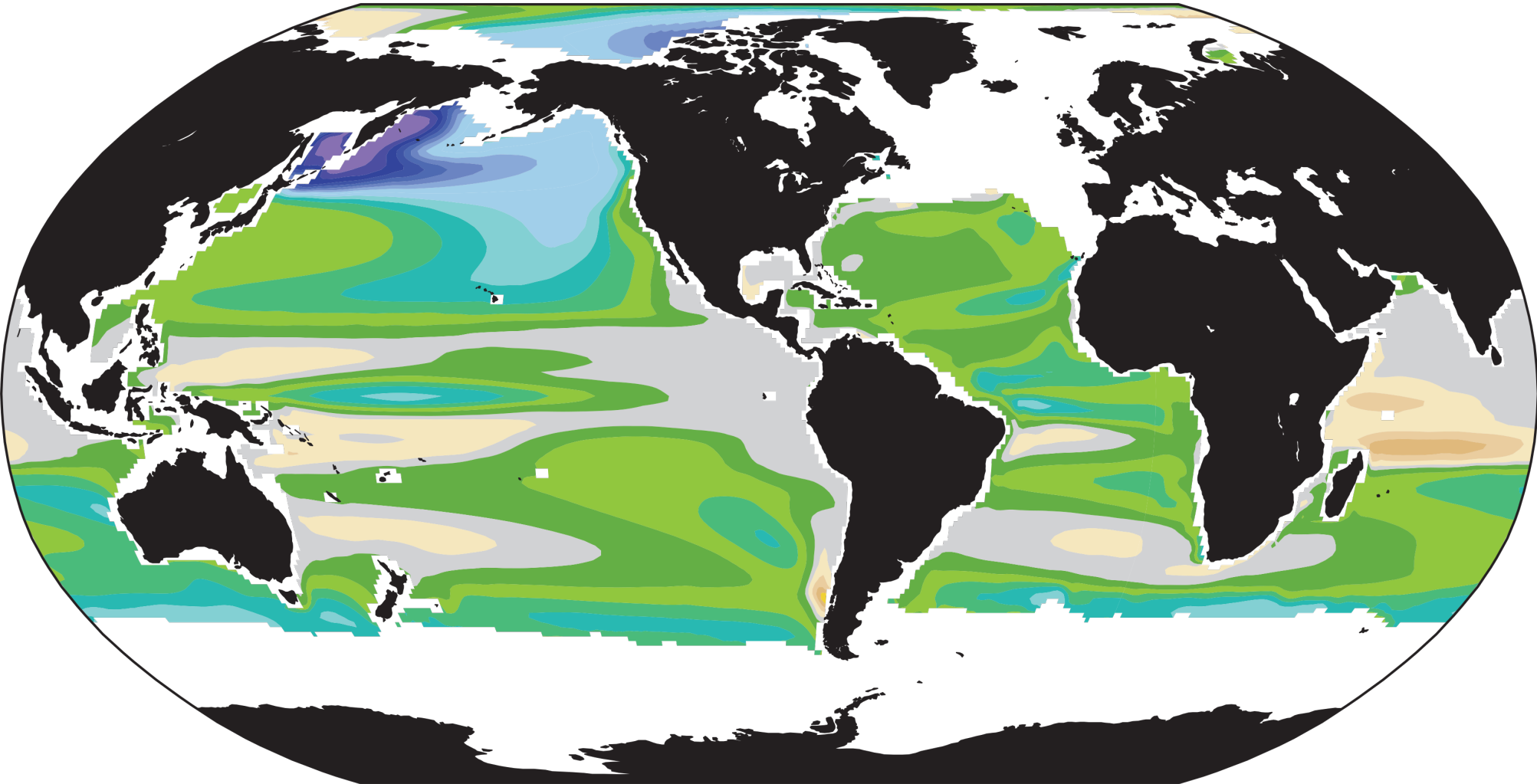
# Cambiamenti nella circolazione oceanica



# OSSIGENO NEGLI OCEANI



# OSSIGENO NEGLI OCEANI: VARIAZIONI PREVISTE PER IL 2100



diminuisce

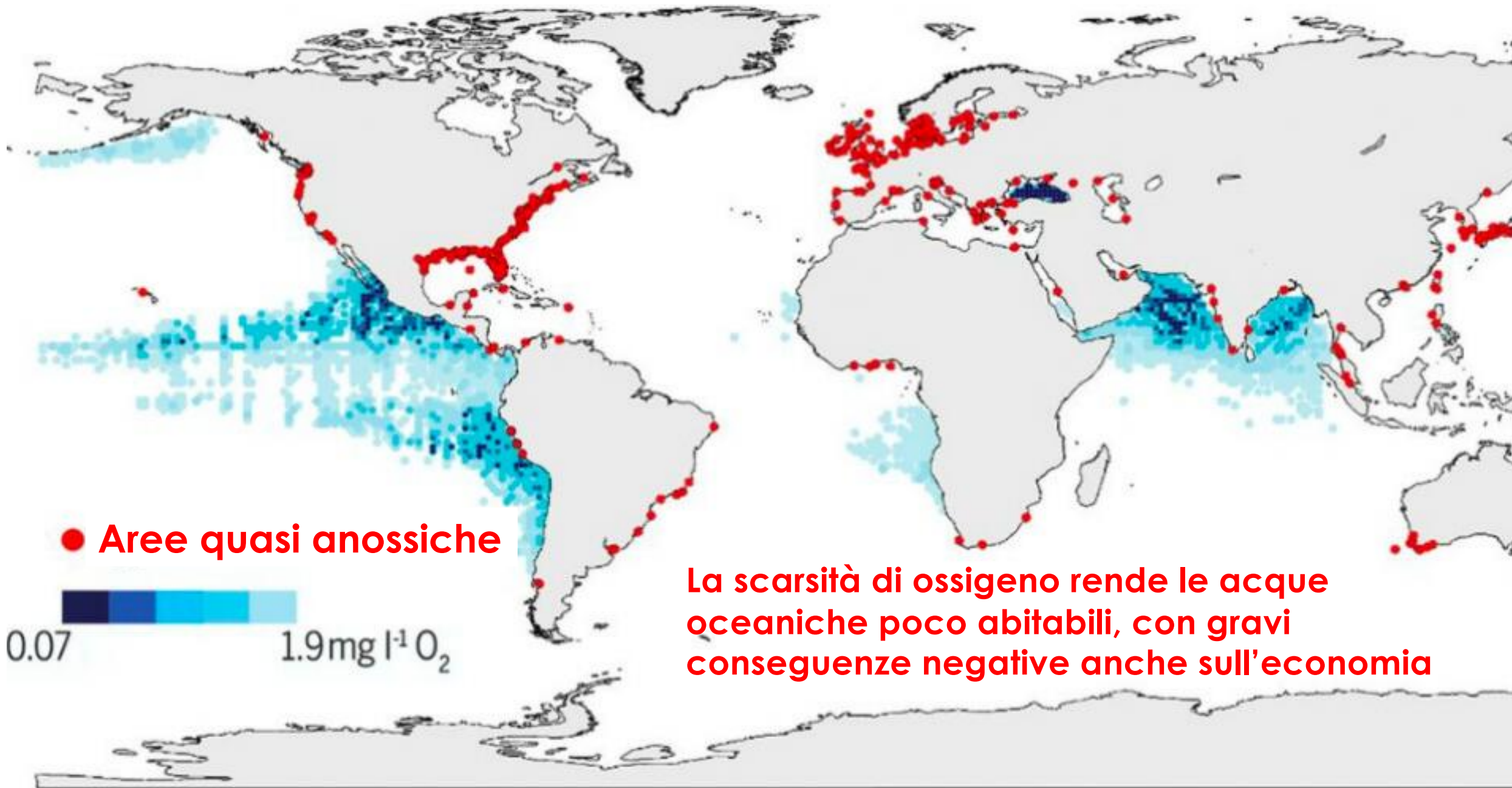
mmol/m<sup>3</sup>

aumenta

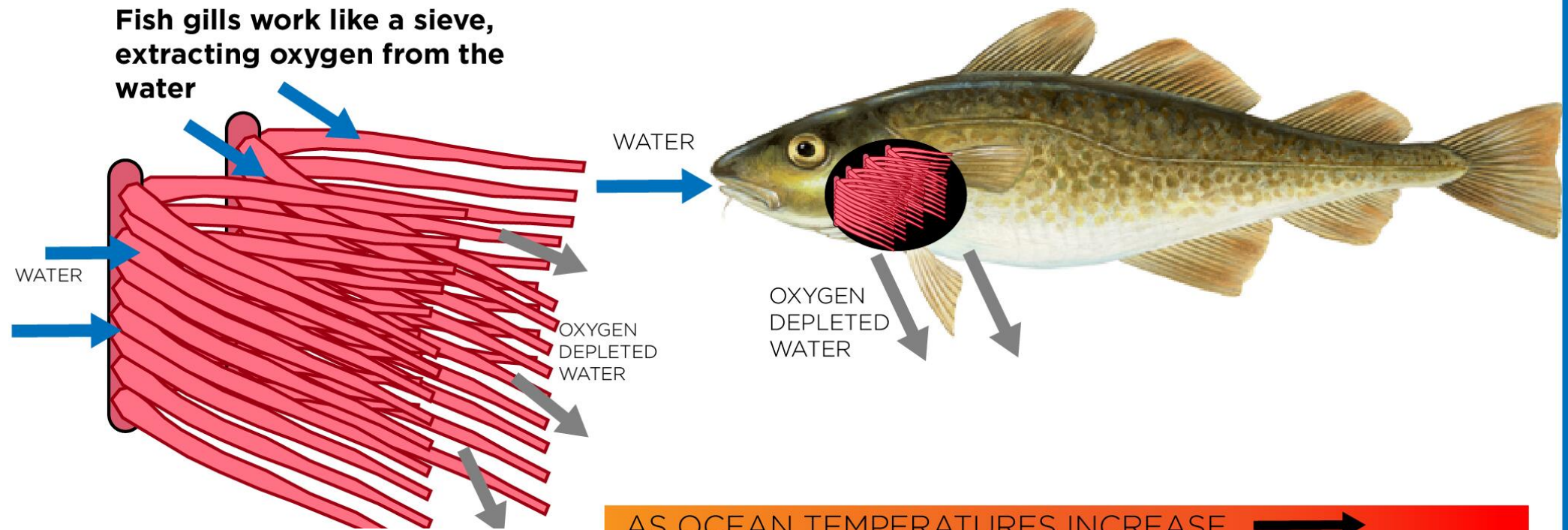


-200 -185 -170 -155 -140 -125 -110 -95 -80 -65 -50 -35 -20 -5 5 20 35 50 65 80 95 110 125 140 155 170 185 200

In zone costiere l'ossigeno quasi del tutto assente: **«ZONE MORTE»**

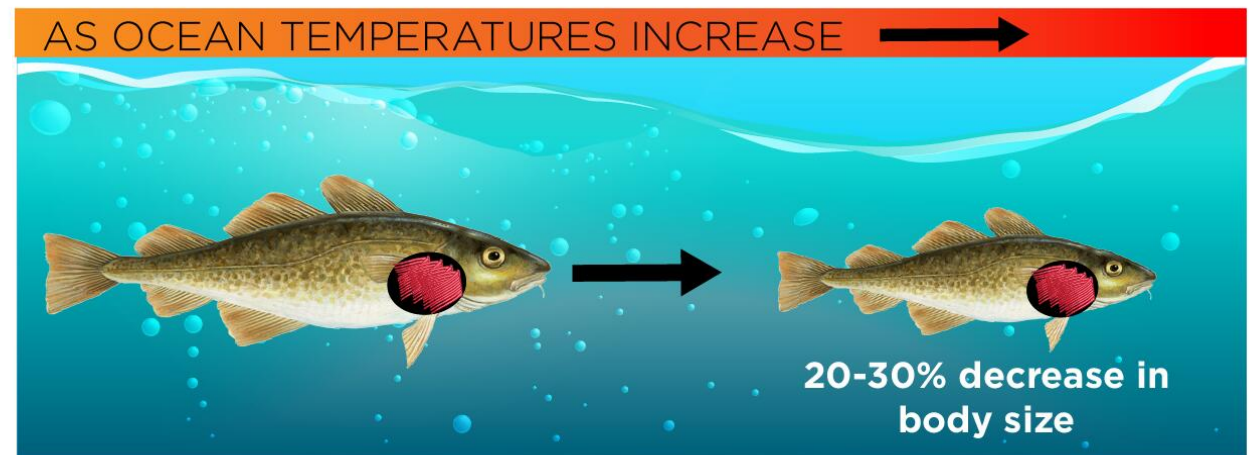


# Riscaldamento e diminuzione dell'ossigeno



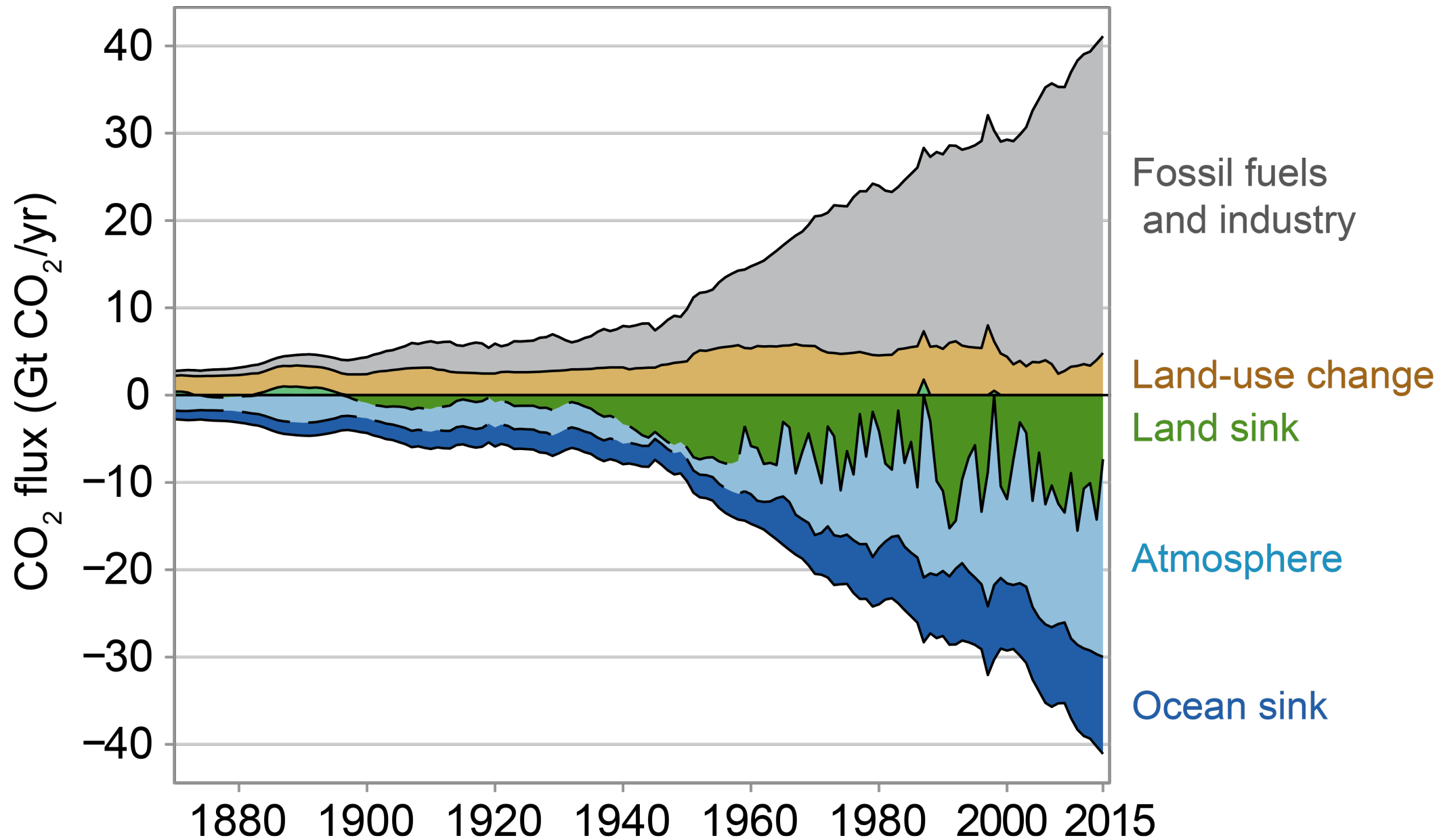
In acque più calde, i pesci necessitano di più ossigeno per mantenere le loro funzioni metaboliche.

Sono previste riduzioni di dimensioni del 20-30 %

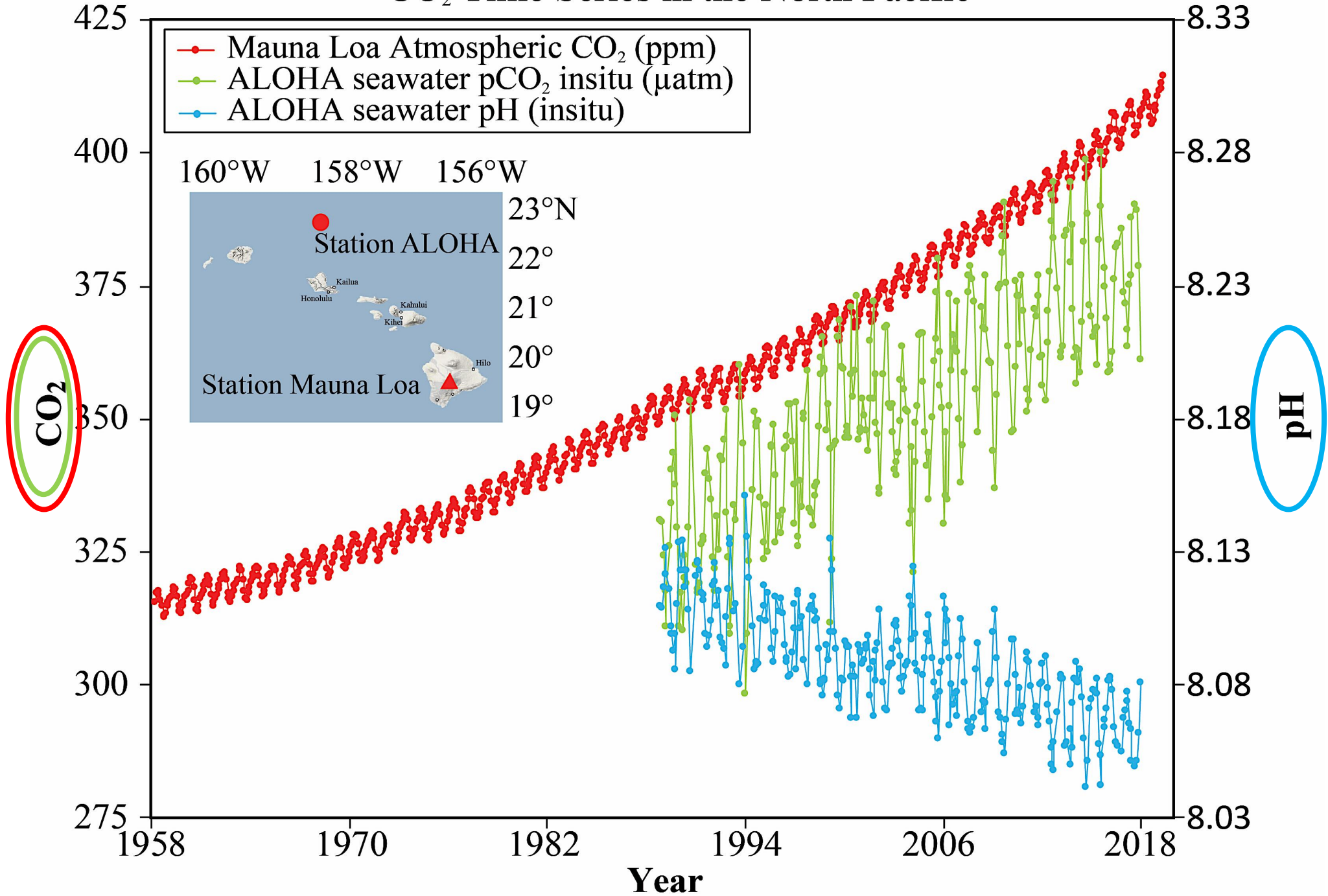


Pauly D, Cheung WWL. Sound physiological knowledge and principles in modeling shrinking of fishes under climate change. *Glob Change Biol.* 2017;00: 1-12. <https://doi.org/10.1111/gcb.13831>

# CO<sub>2</sub> sources and sinks

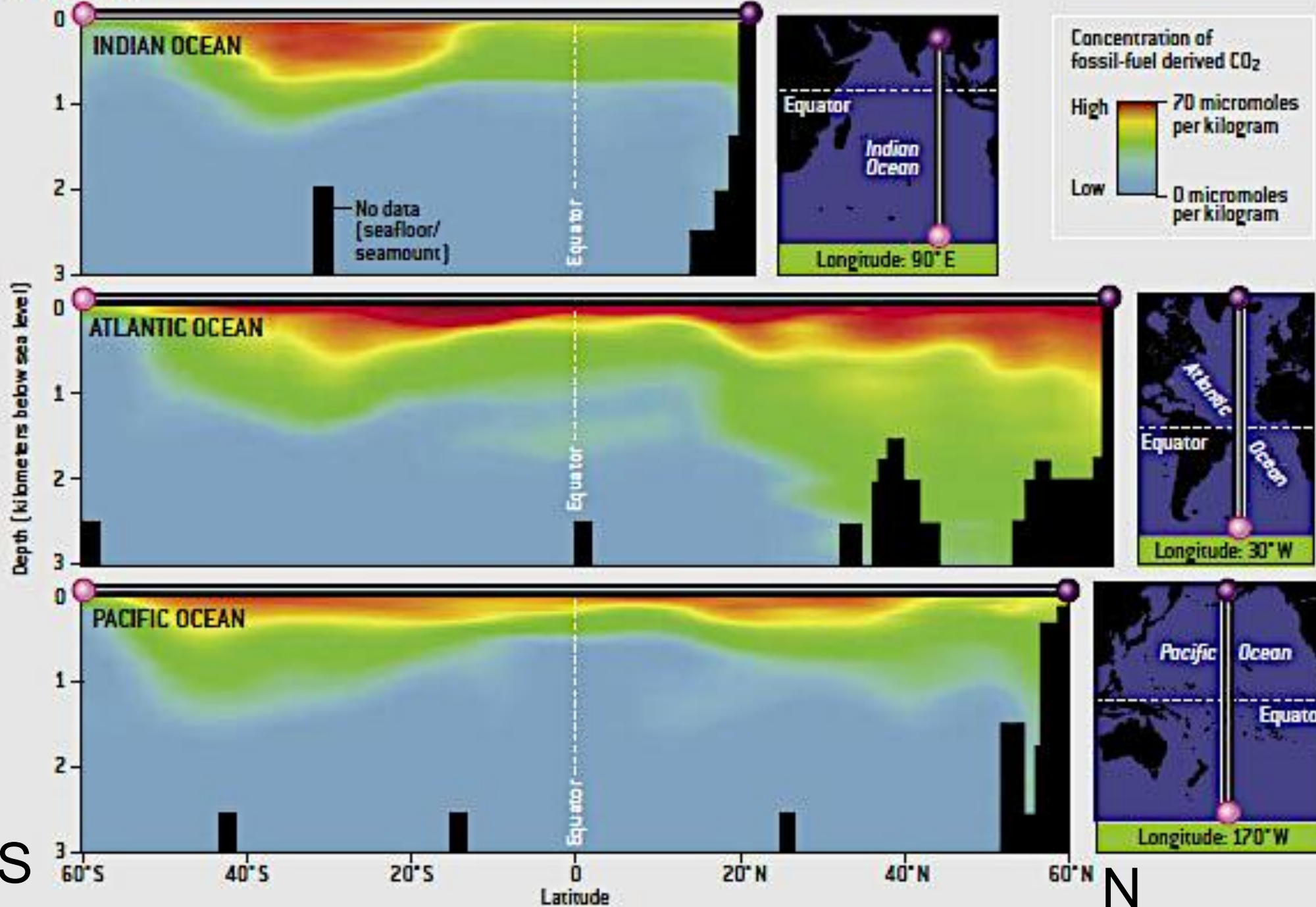


# CO<sub>2</sub> Time Series in the North Pacific





# OCEANIC CO<sub>2</sub>



# CO<sub>2</sub> e Biosfera Marina

**Concentrazioni elevate di CO<sub>2</sub>** nell'acqua marina possono indurre carenze neurologiche, fisiologiche e comportamentali negli animali marini.

**La sopravvivenza dei pesci esposti a livelli elevati di CO<sub>2</sub> nel prossimo futuro è minacciata** dalle loro risposte alterate agli stimoli sensoriali: una esposizione ad elevata concentrazione di CO<sub>2</sub> **riduce del 42% le capacità olfattive, rendendoli meno capaci di procurarsi cibo e meno attenti ad avvertire la presenza di predatori.**

Anche la **capacità di orientamento nelle migrazioni oceaniche di alcune specie diminuirebbe.**

# ACIDIFICAZIONE degli oceani

CO<sub>2</sub>  
atmospheric  
carbon dioxide

CO<sub>2</sub>  
carbon  
dioxide

H<sub>2</sub>O  
water

Acido carbonico

H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Ione  
bicarbonato

H<sup>+</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

pH

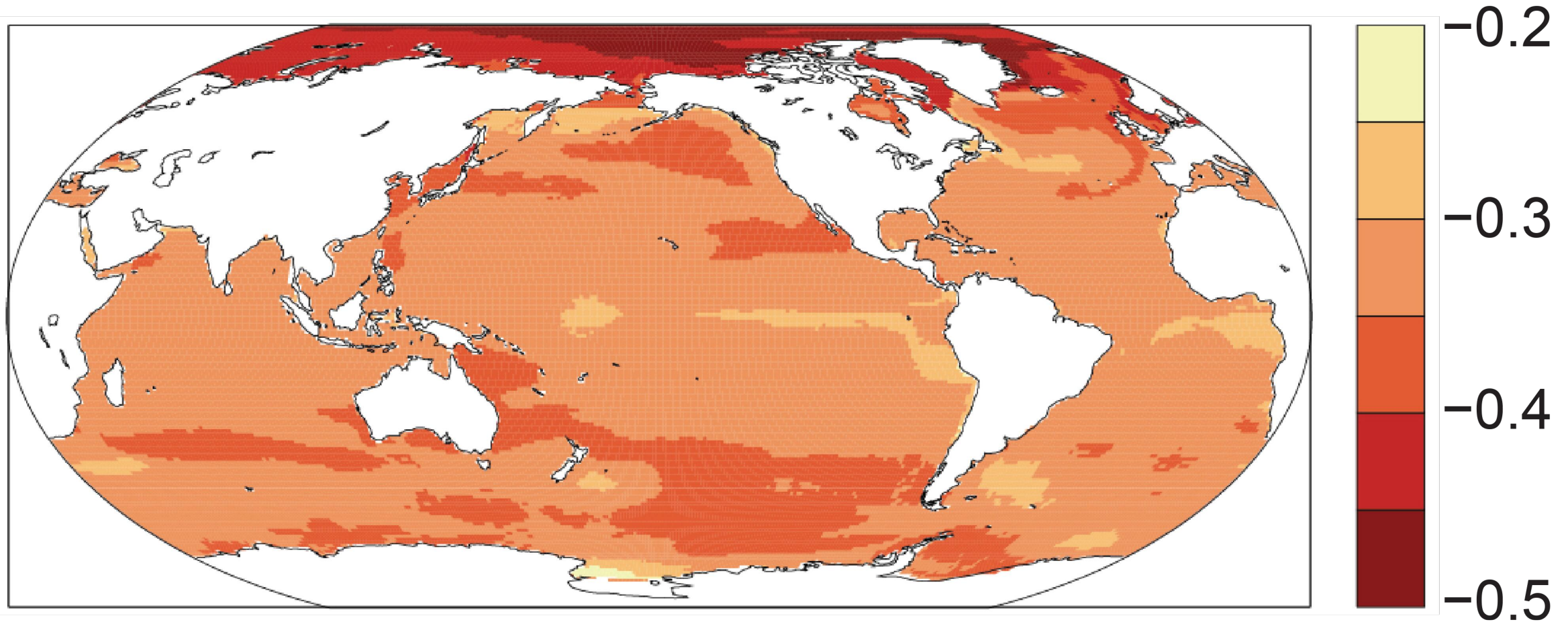
Ione  
idrogeno

H<sup>+</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>

Ione carbonato

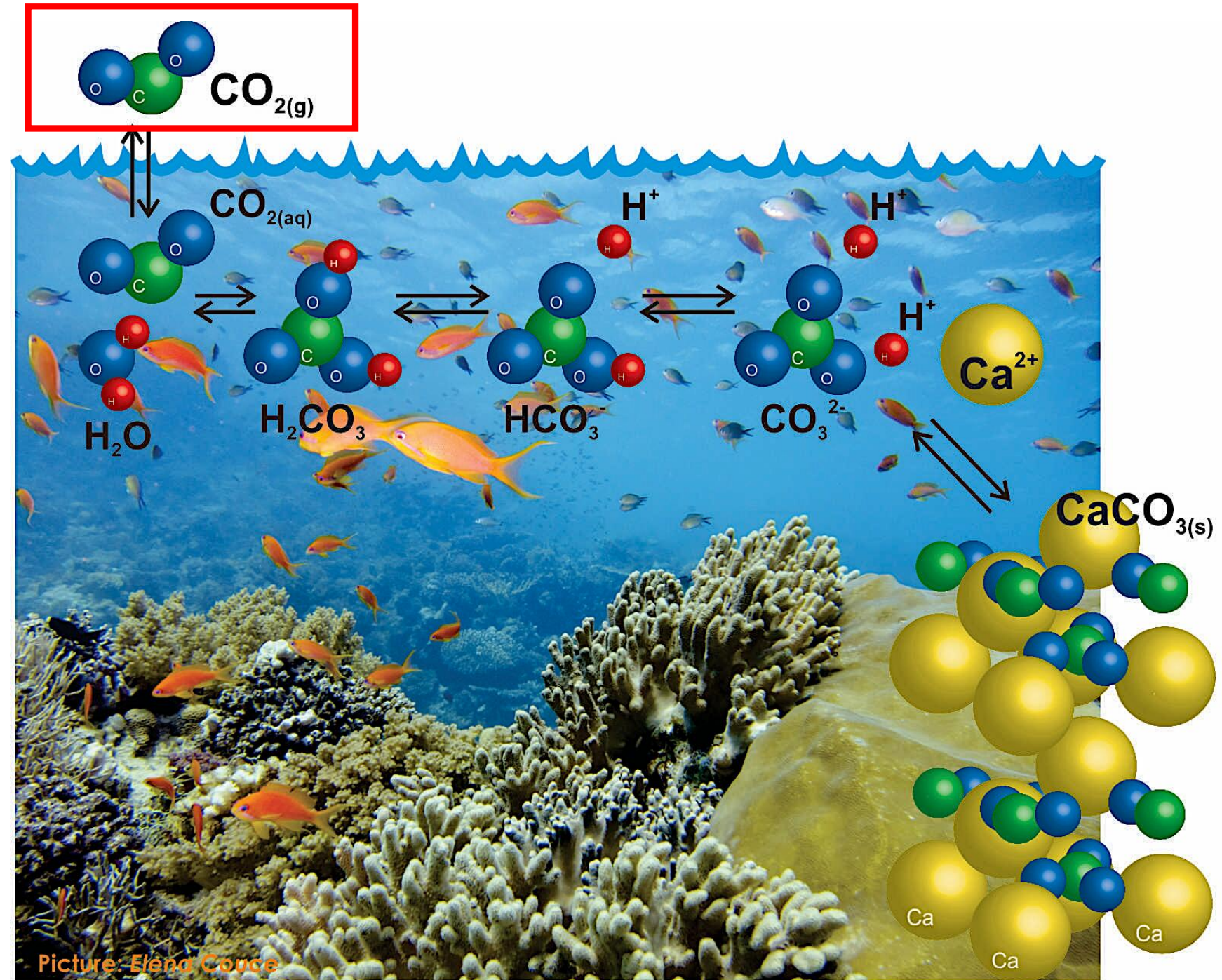
HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

# Surface pH in 2090s (RCP8.5, changes from 1990s)



Predicted change in sea surface pH in 2090–2099 relative to 1990–1999 under the higher scenario (RCP8.5), based on the Community Earth System Models–Large Ensemble Experiments CMIP5 (Figure source: adapted from Bopp et al. 2013)

Scogliere  
coralline  
Atolli



**OCEANI PIU' ACIDI**

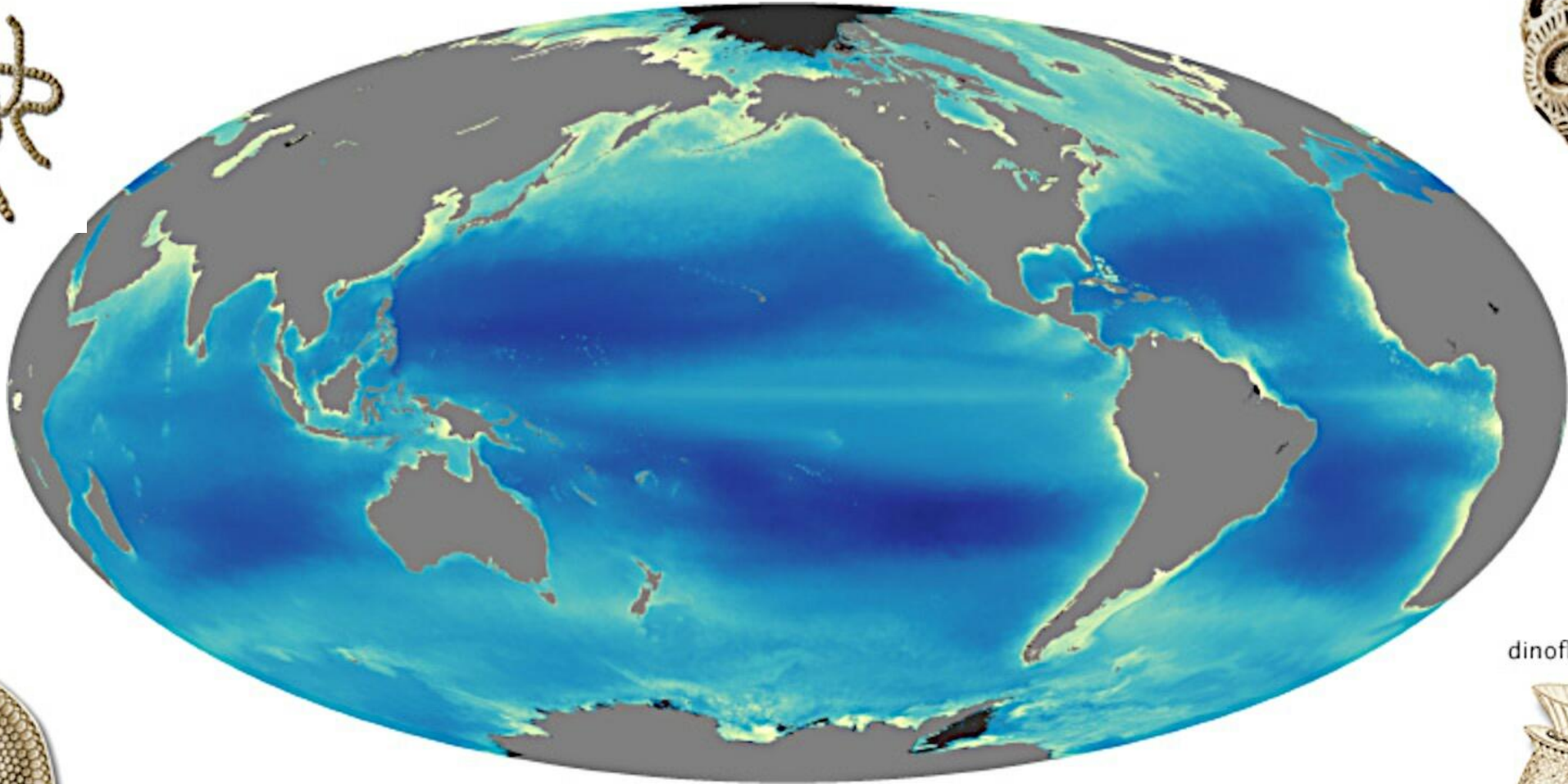


# FITOPLANCTON NEGLI OCEANI

cyanobacteria



coccolithophore



diatom

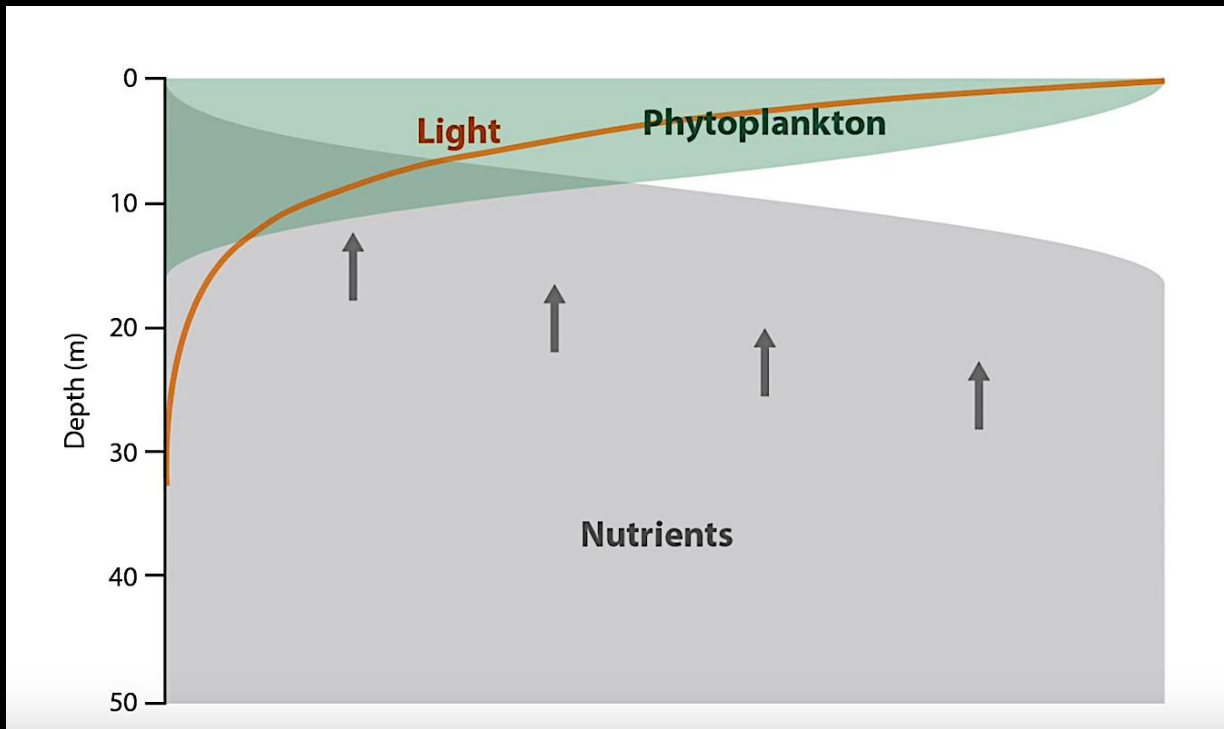


dinoflagellate



**Chlorophyll Concentration (mg/m<sup>3</sup>)**





# Fitoplancton Marino

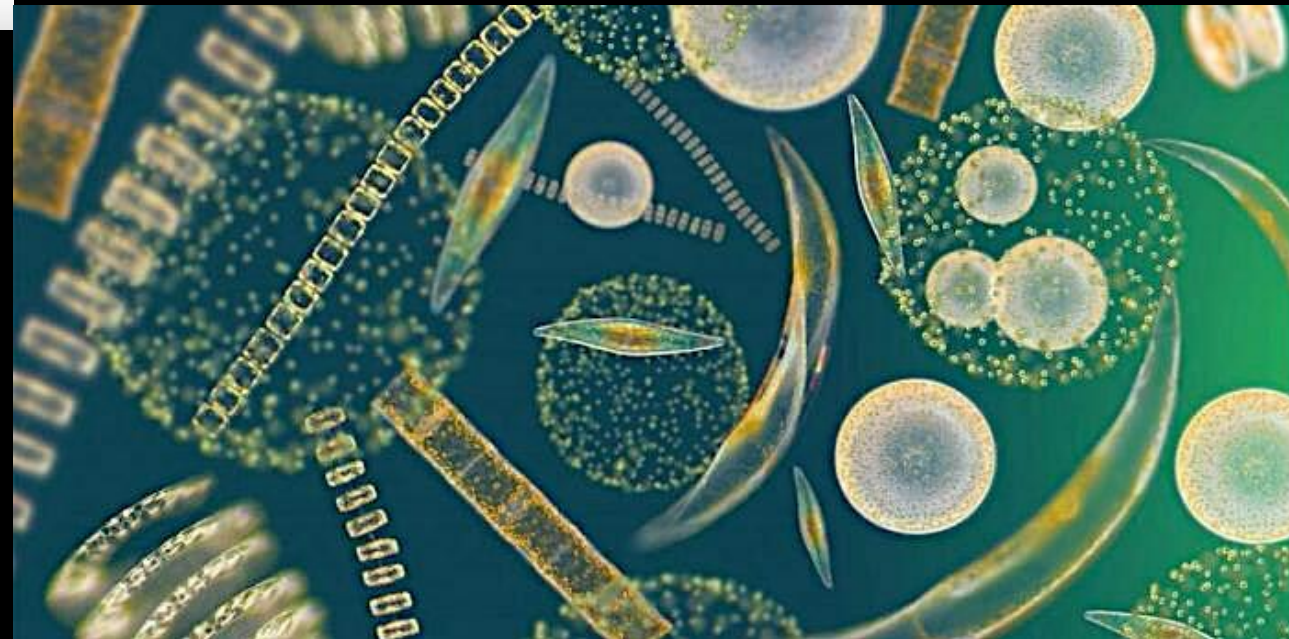
Alghè unicellulari, microscopiche.  
Più del 50% dell'ossigeno che respiriamo proviene dal fitoplancton.

La loro distribuzione dipende da due fattori principali:

1. La luce
2. La quantità di nutrienti

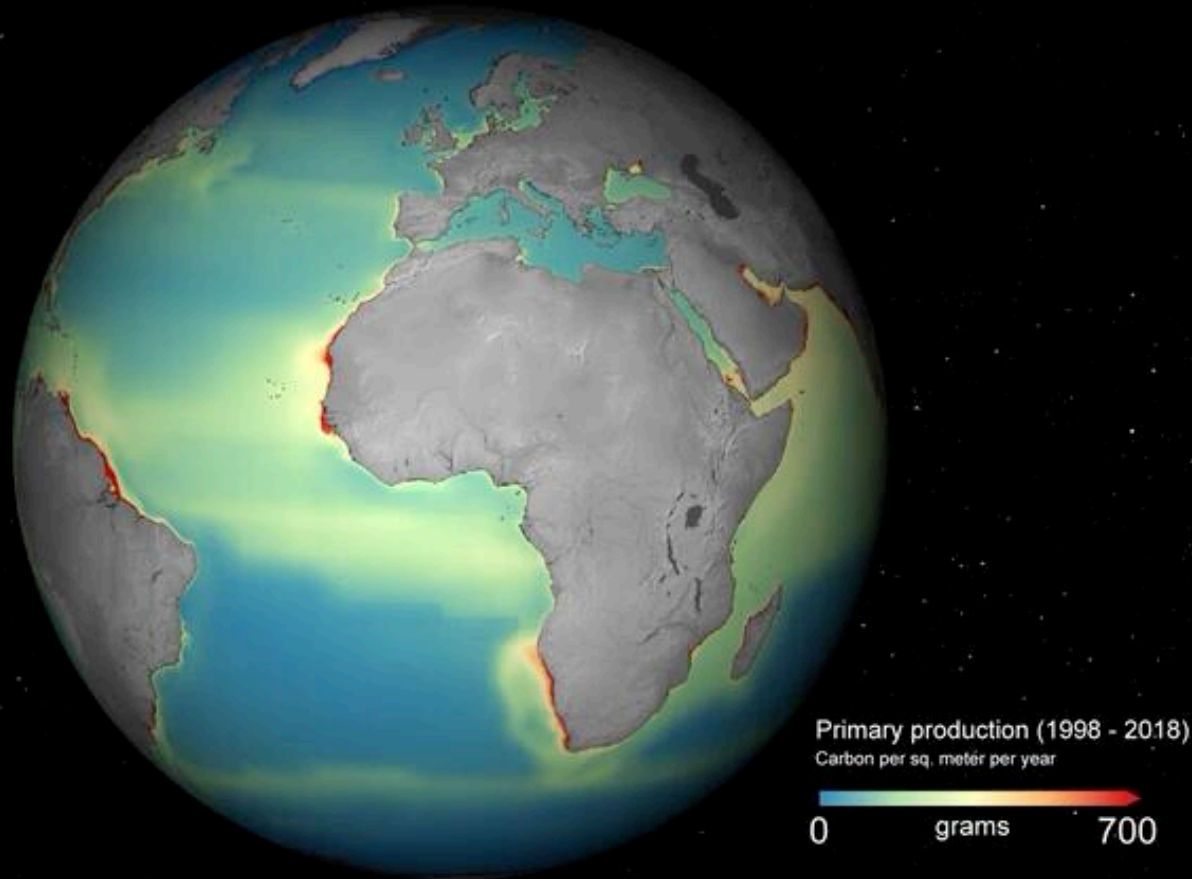
Una nuova generazione all'incirca ogni giorno.

La loro produzione di ossigeno compete con quella delle piante terrestri.





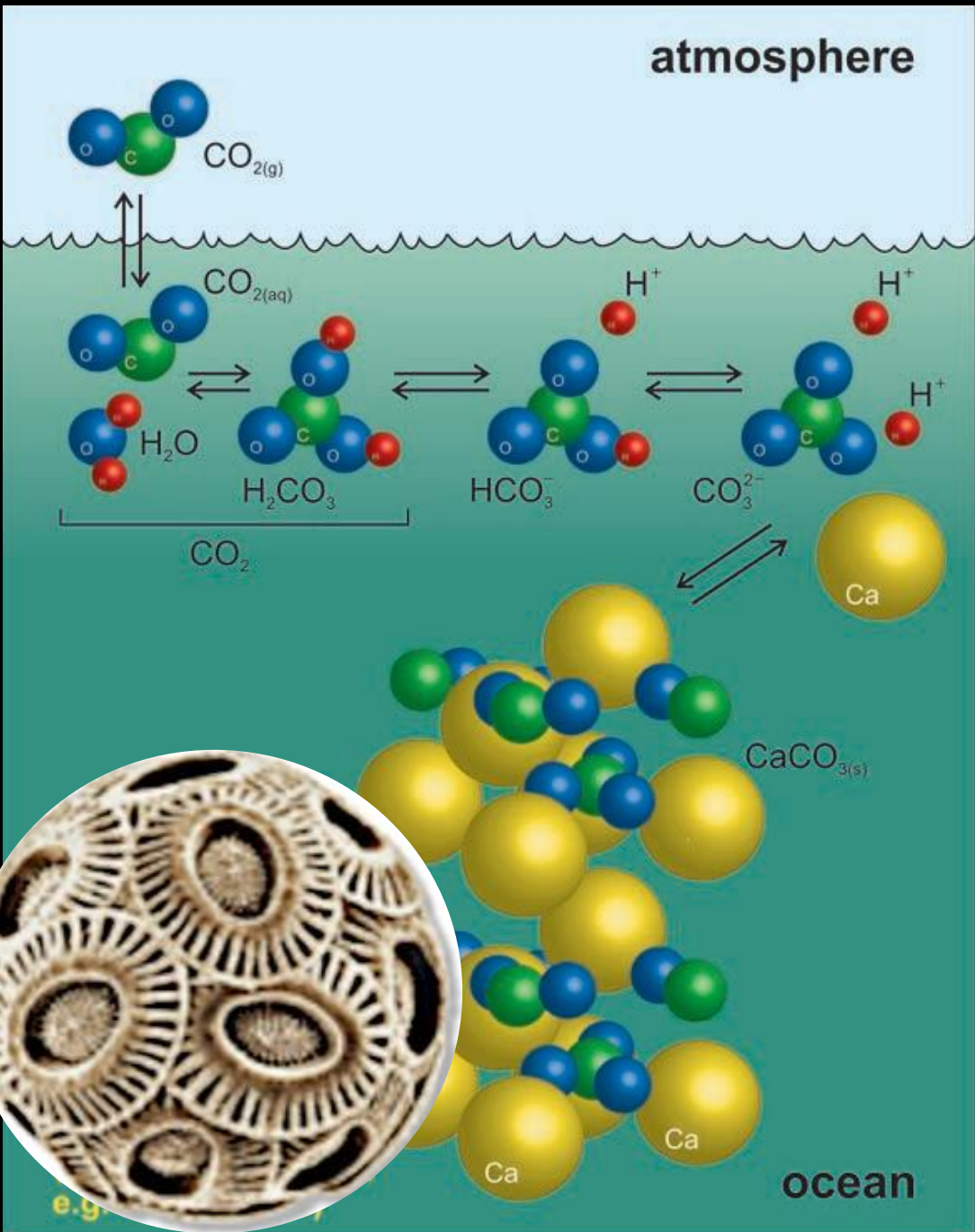
# PRODUTTIVITA' PRIMARIA negli OCEANI



In base alla disponibilità di nutrienti, la produttività primaria è diversa nelle diverse aree geografiche

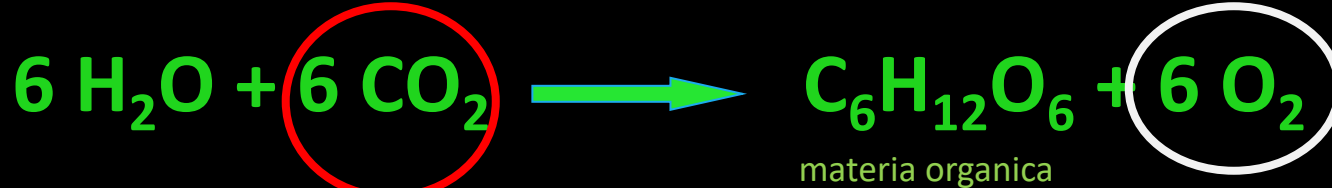
Questo è importante perchè il fitoplancton è alla base della catena alimentare

Quindi dà da mangiare a tutti i livelli trofici superiori

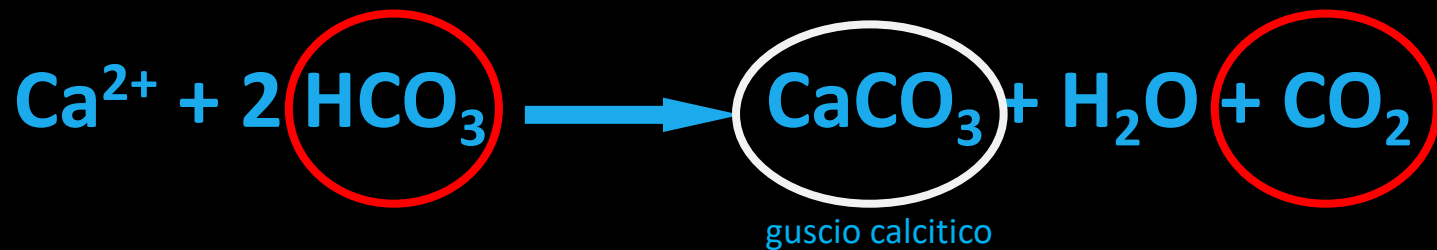


# Fitoplancton calcareo

## Fotosintesi

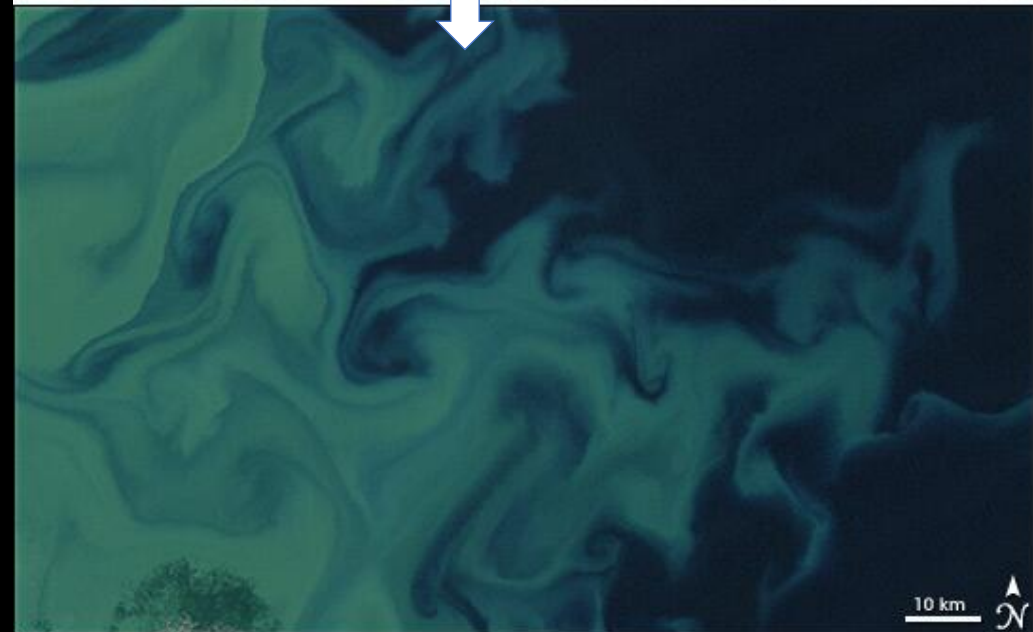
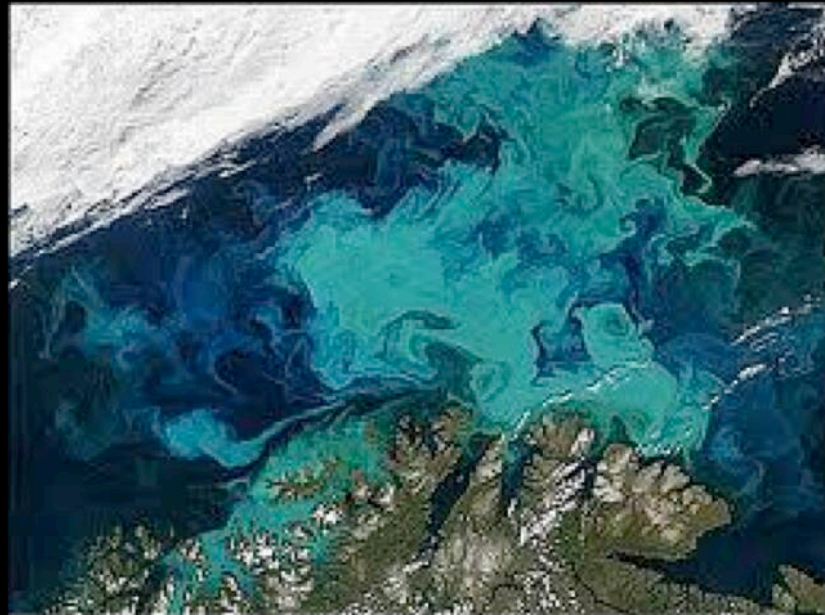
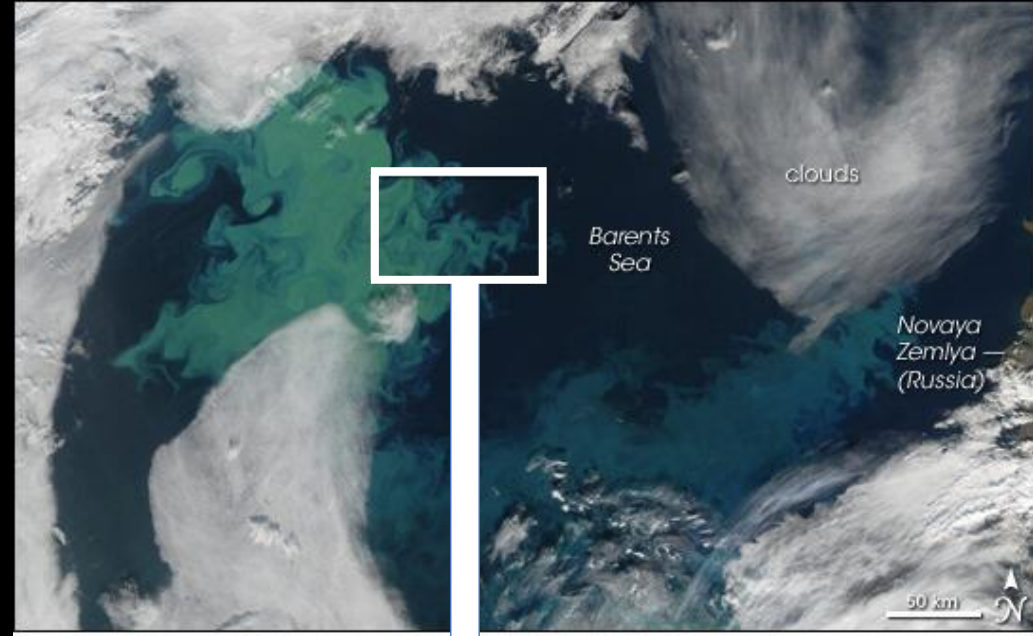


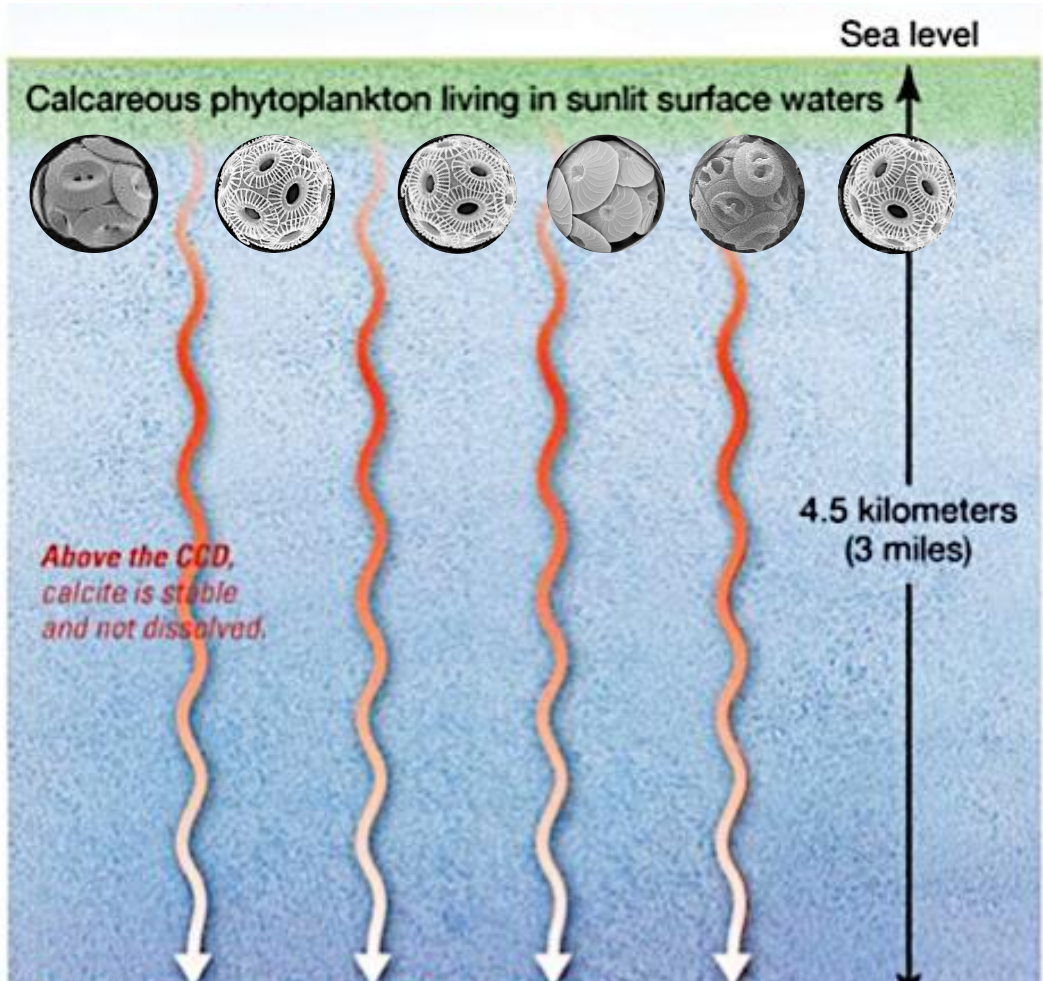
## Calcificazione



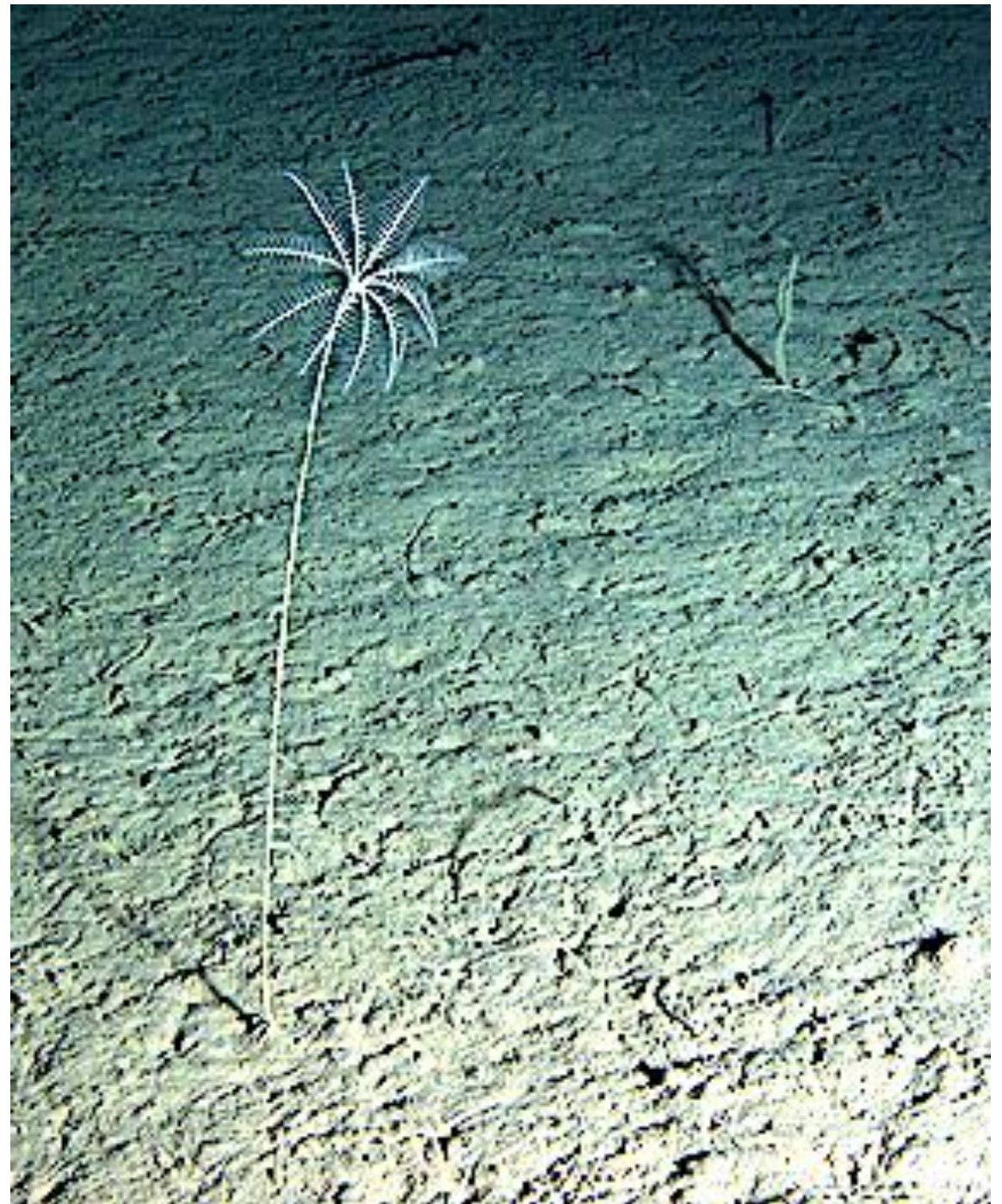
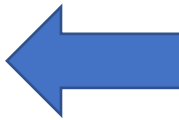
1 micron

# Maree bianche = Fioriture di Coccolitofore (*E. huxleyi*)

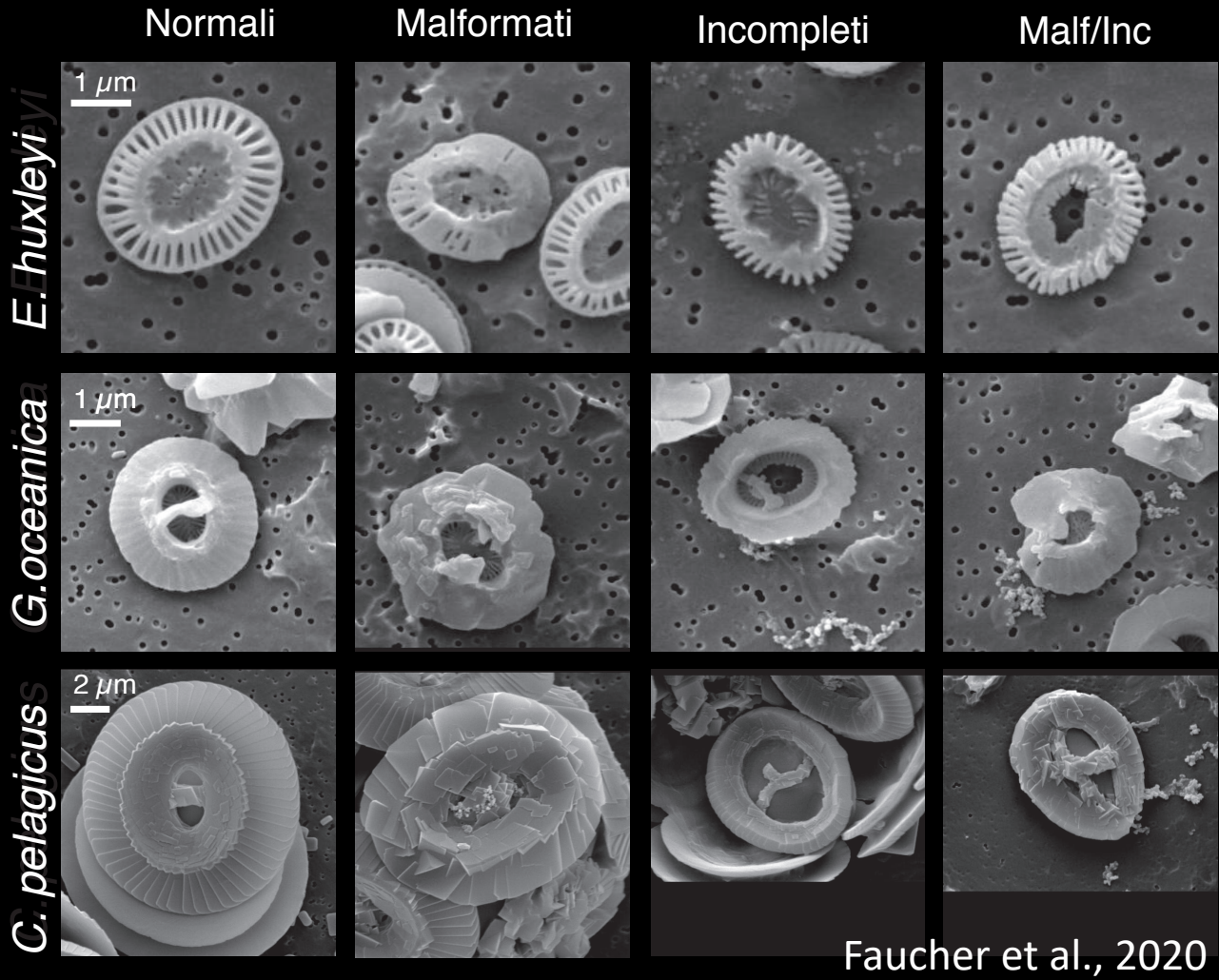




Sedimenti sui fondali oceanici

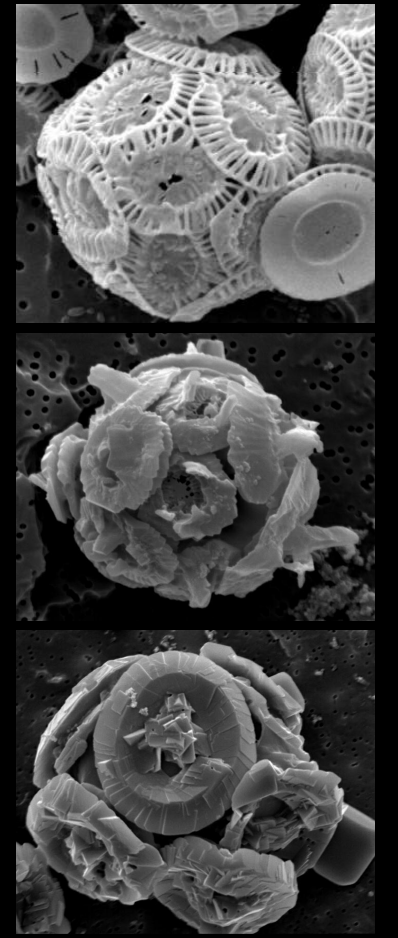


Aumento CO<sub>2</sub>



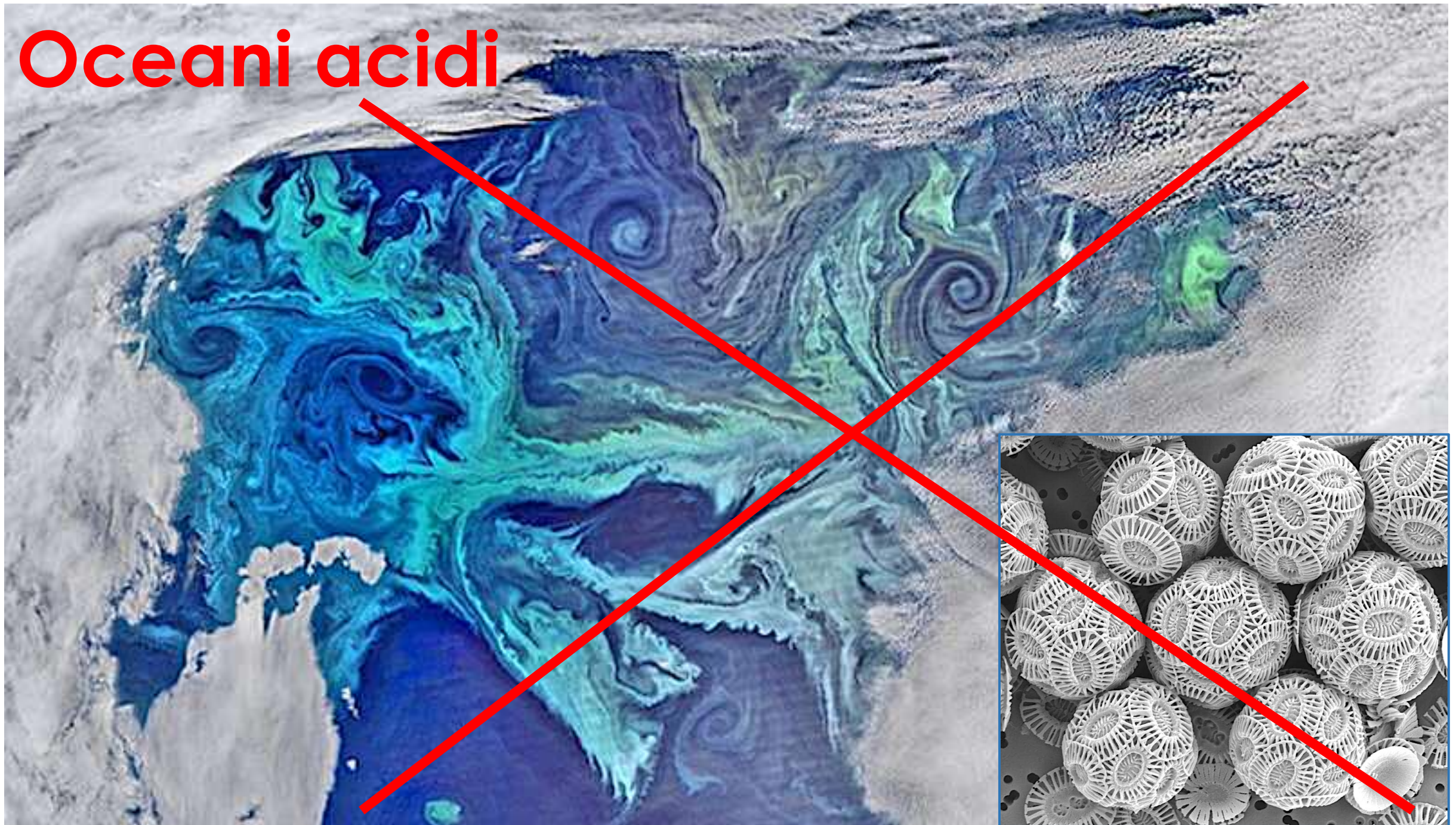
Esperimenti in laboratorio su alghe coccolitofore attuali per misurare gli effetti dell'aumento di CO<sub>2</sub>

**Diminuzione della calcificazione e malformazioni: errori nel processo di formazione dei coccoliti**



**Malformazioni sono state anche documentate per coccoliti fossili nei sedimenti marini**

# Oceani acidi



**CAMBIAMENTI GLOBALI  
E  
RESILIENZA DEGLI ECOSISTEMI**

# RESILIENZA

Dal latino **resalio**, ovvero il verbo che indica l'atto di risalire su un'imbarcazione che si è capovolta.





# RESILIENZA

**Ingegneria-metallurgia:** la resilienza è la capacità di un materiale di resistere agli urti senza spezzarsi.

**Ecologia:** la resilienza è la capacità di un ecosistema di sfuggire a un livello irreversibile di degrado.

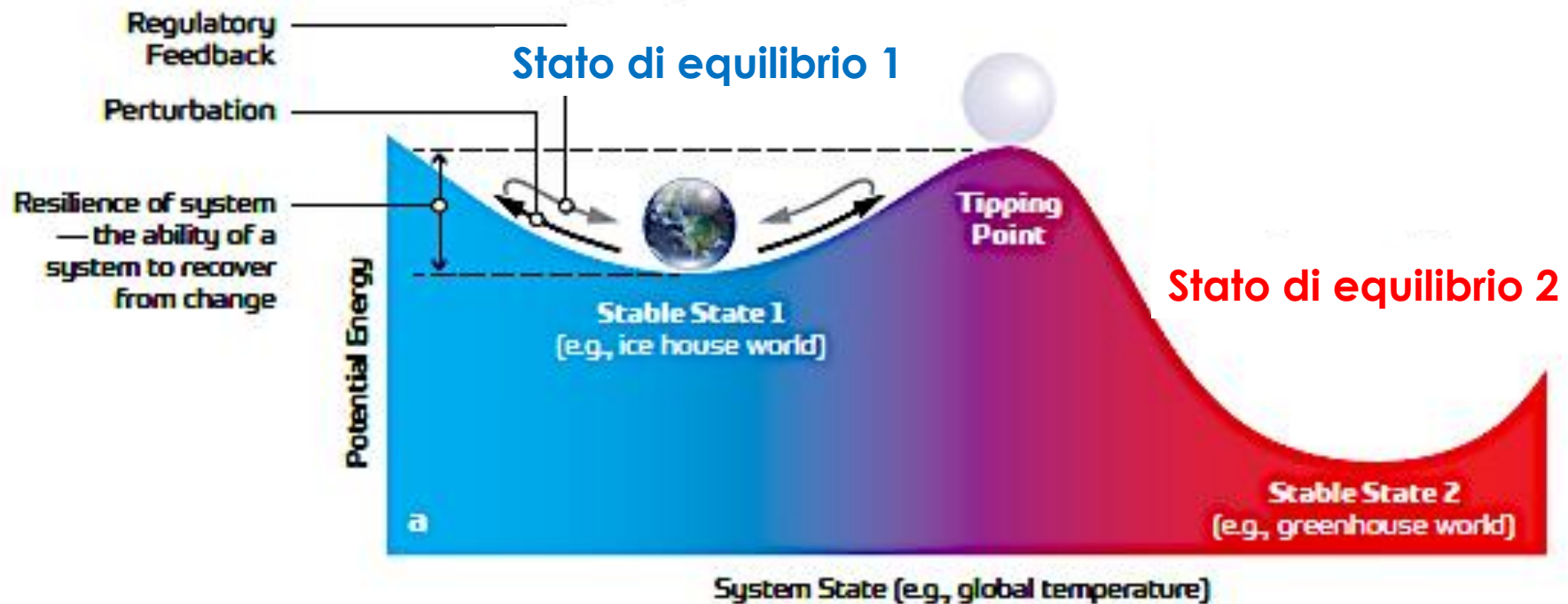
**Psicologia:** la resilienza è la capacità di un individuo di superare efficacemente un trauma, ripartendo in modo sano e positivo .

*le persone resilienti affrontano in maniera funzionale gli eventi traumatici riorganizzando la propria vita: la crisi diventa un momento privilegiato di sviluppo personale e quindi, pur nella fatica, un momento di arricchimento e in ultima istanza di benessere*



# La **RESILIENZA** è la capacità di un sistema di adattarsi al cambiamento.

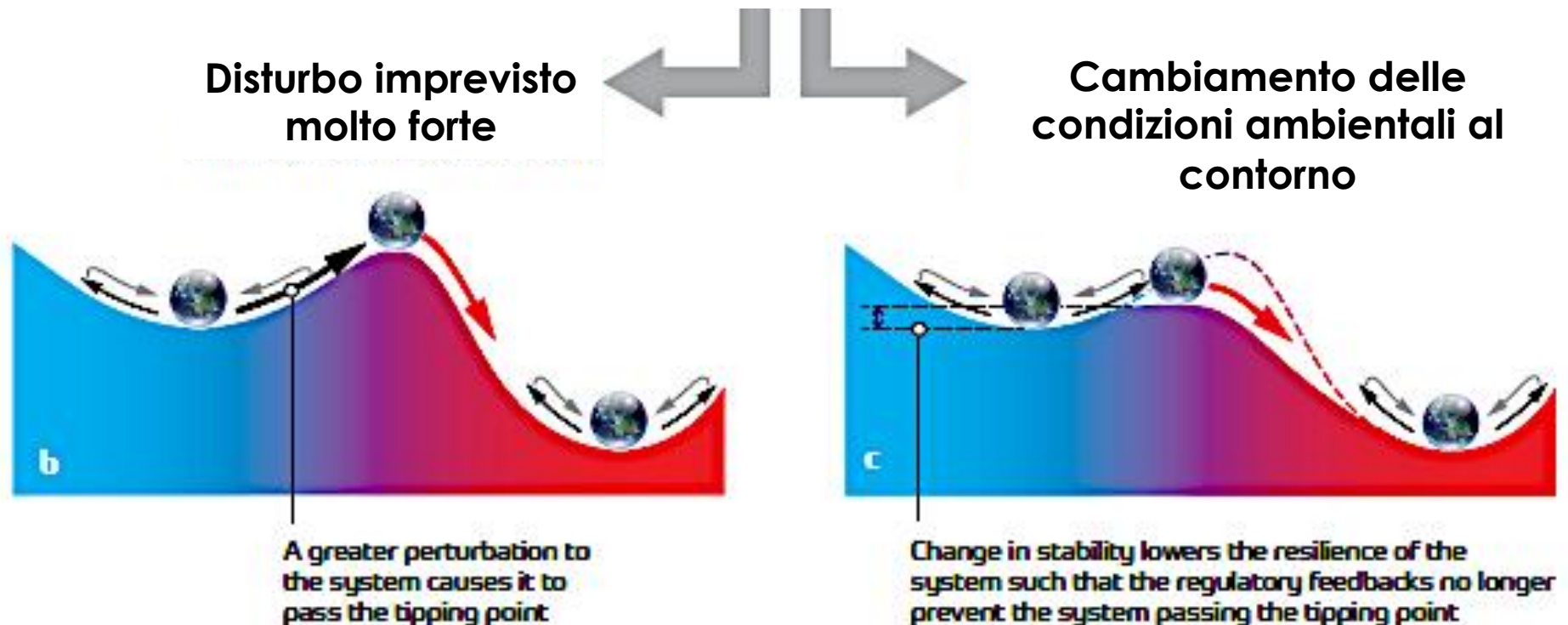
Disturbi di entità o durata sufficienti possono influenzare profondamente un ecosistema e costringere un ecosistema a raggiungere una **SOGLIA** (o **Tipping Point**) oltre la quale domina un regime diverso.



# C'è bisogno di un equilibrio tra resilienza e stabilità.

La **stabilità** è necessaria per far fronte ai **disturbi attesi**,  
mentre la **resilienza** è necessaria per sopravvivere a **eventi irregolari e non previsti**.

**Un sistema resiliente non deve fare un "perfetto recupero" da un disturbo, ma piuttosto accettare che possa essere temporaneamente disabilitato fintanto che sopravvive in una prospettiva più lunga.**



**Gli ecosistemi sono resilienti se sopravvivono a gravi disturbi.**

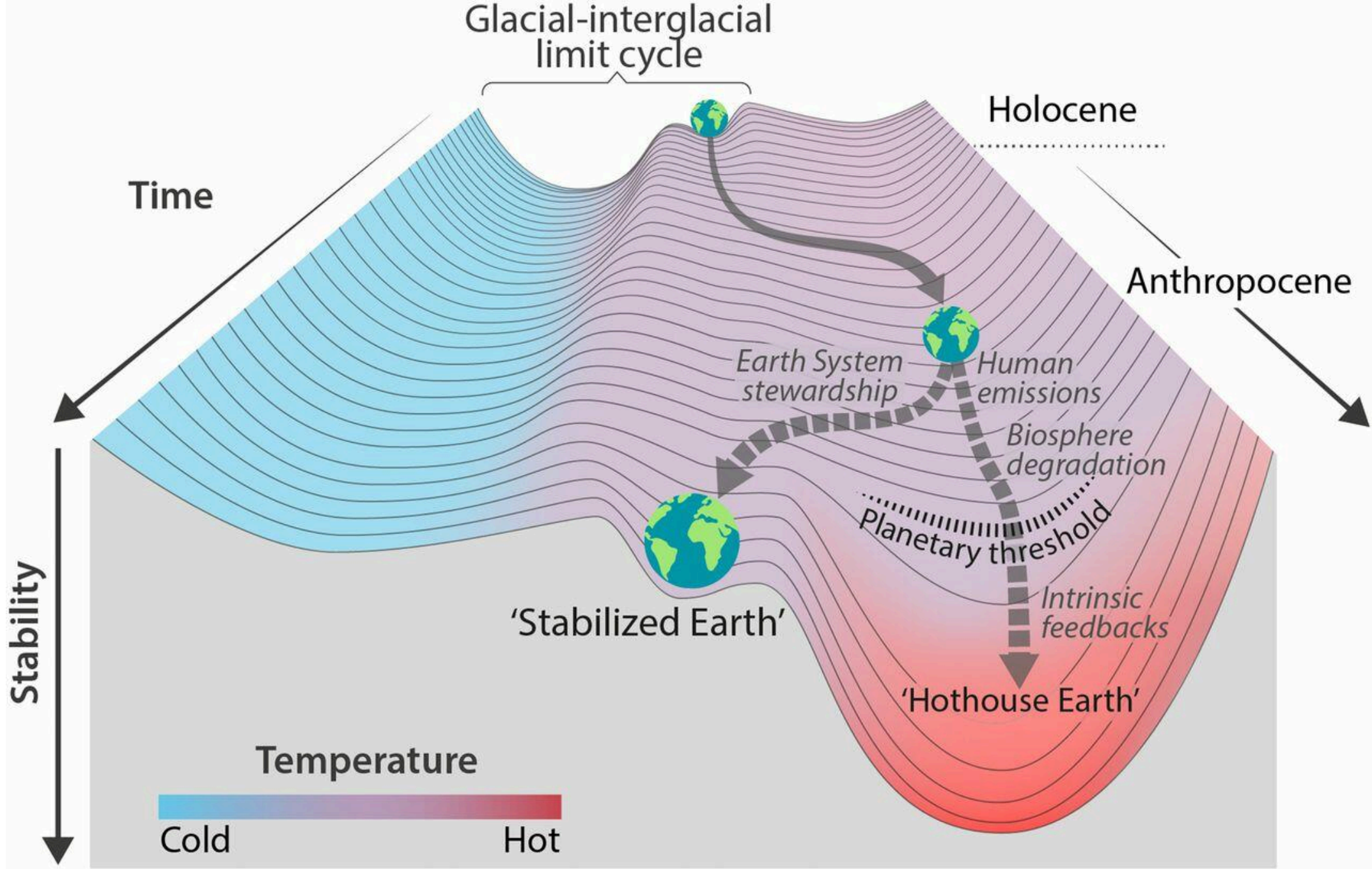
La **STABILITA'** implica **costanza**:

le cose restano più o meno le stesse.

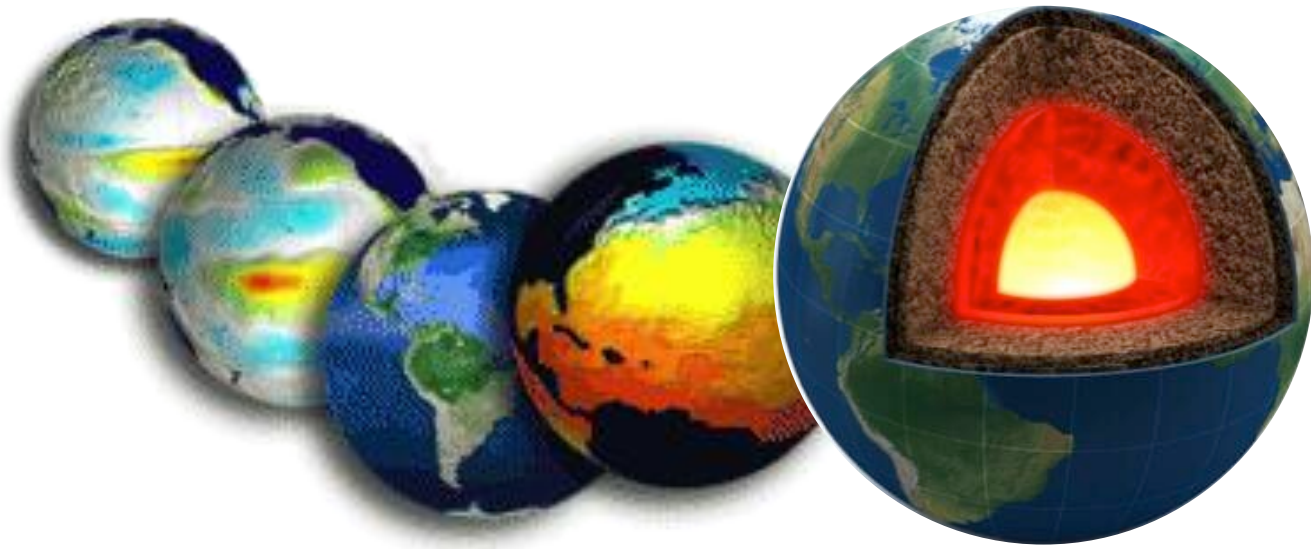
La stabilità è desiderabile se riduce le fluttuazioni indesiderate.

**Gli ecosistemi che cambiano raramente vengono spostati più facilmente in un diverso dominio di stabilità.**

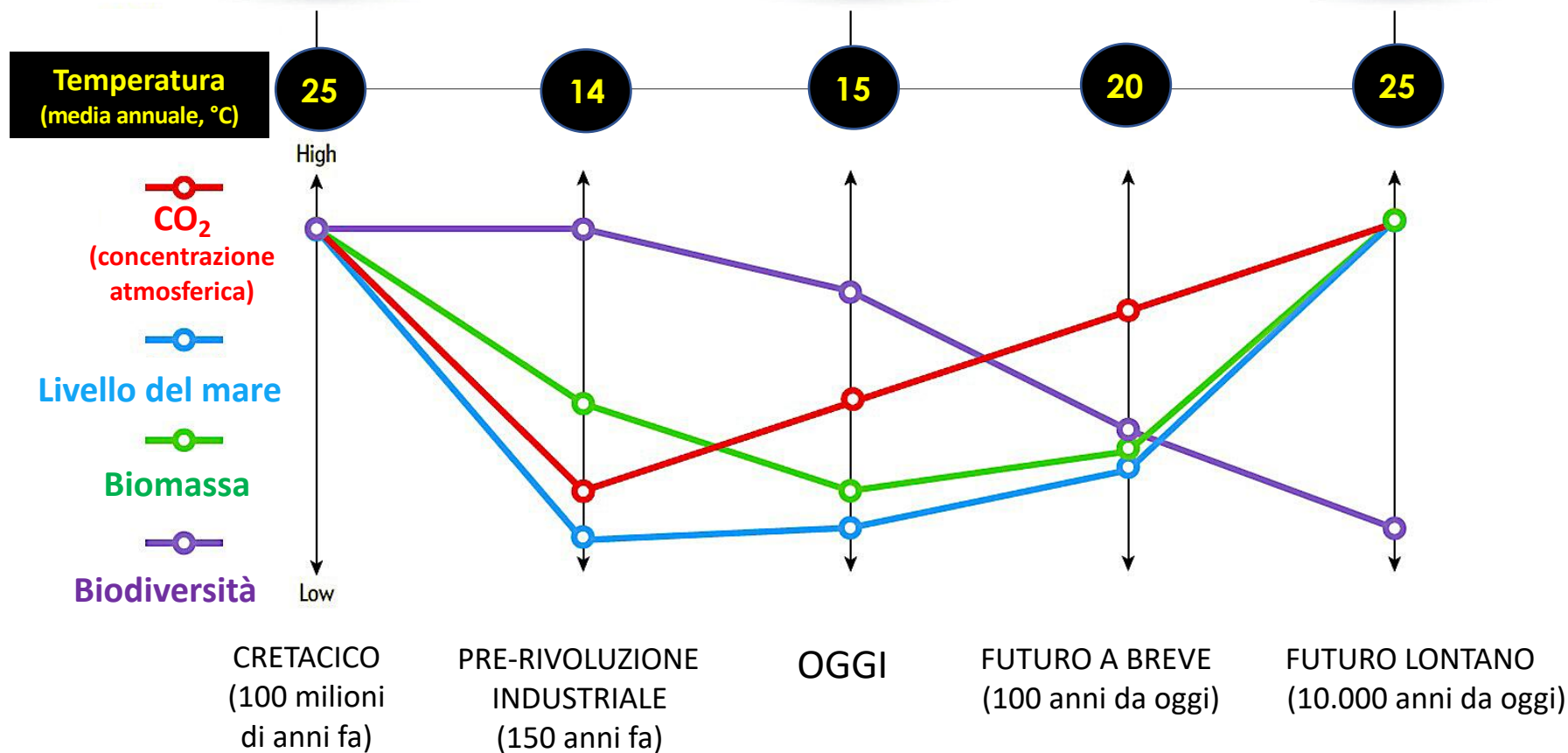
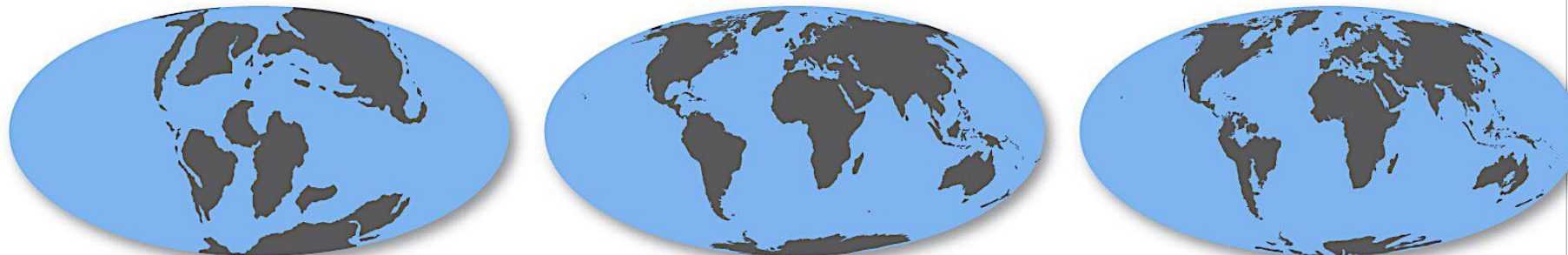
**La perdita di resilienza è tipica di un sistema molto stabile che non esercita la sua capacità di contrastare lo stress.**



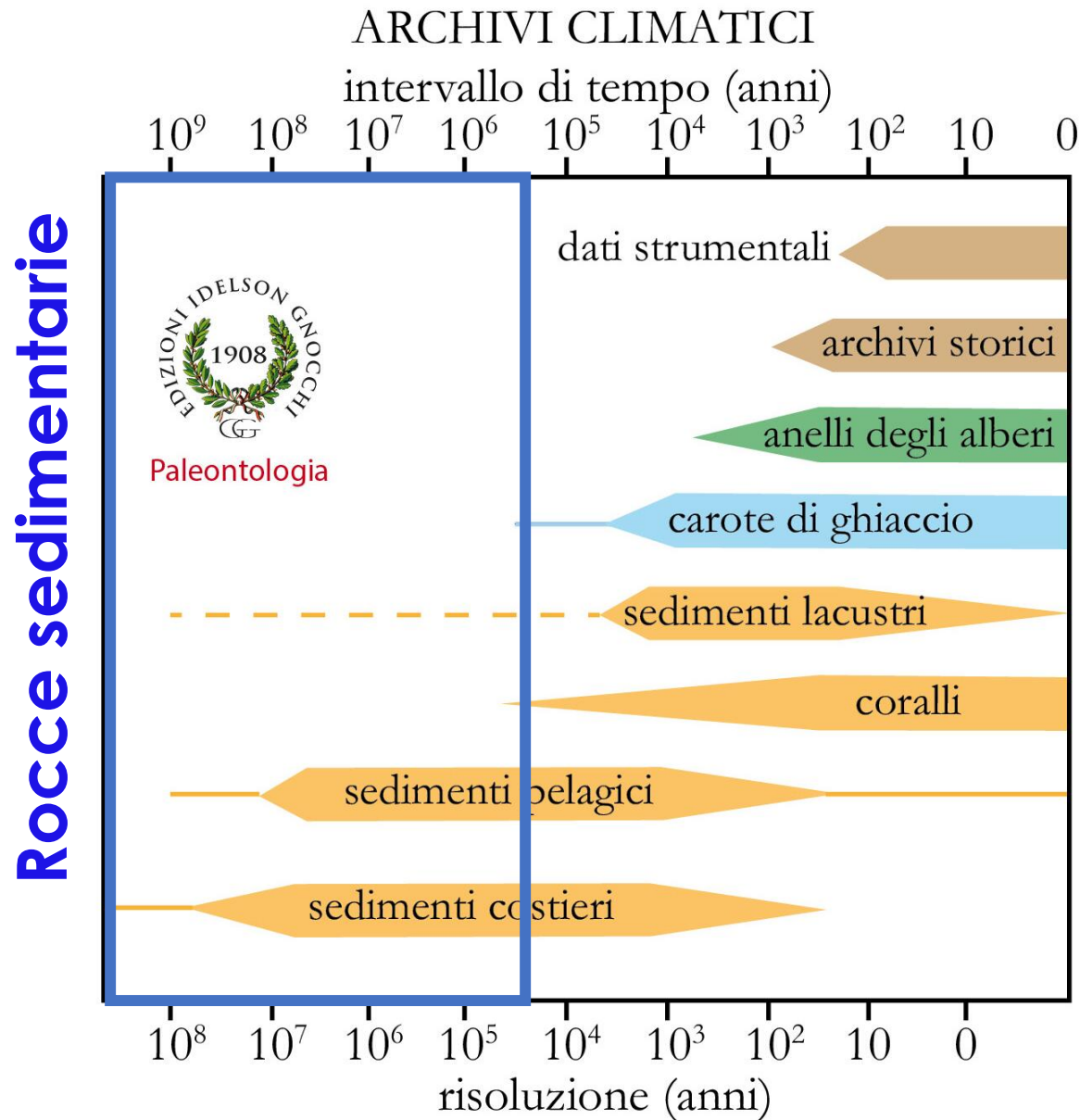
# **COSA SAPPIAMO DEI CAMBIAMENTI DEL PASSATO? LA PROSPETTIVA GEOLOGICA**



# Il passato come analogo del futuro



# QUALI SONO GLI ARCHIVI CLIMATICI?



## SEDIMENTI







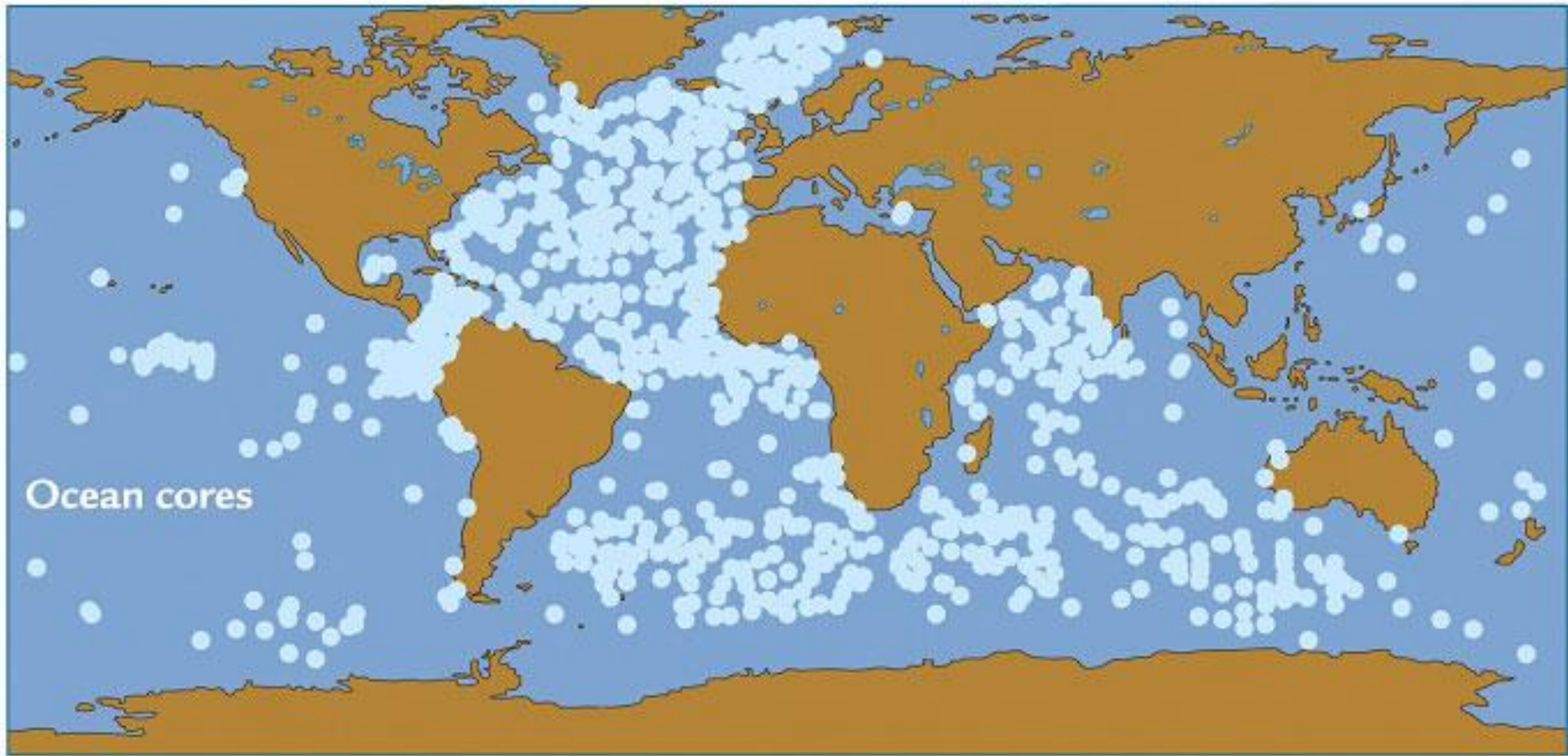
Cava Vispi - Gubbio

Le bianche scogliere  
di Dover



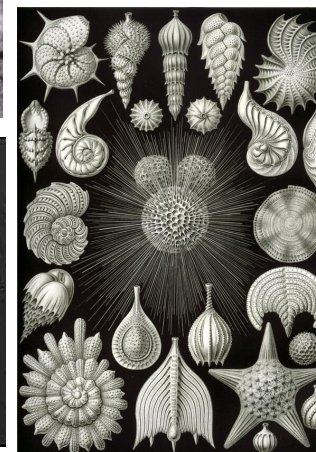
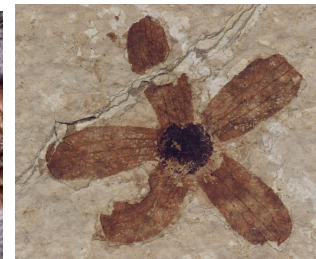
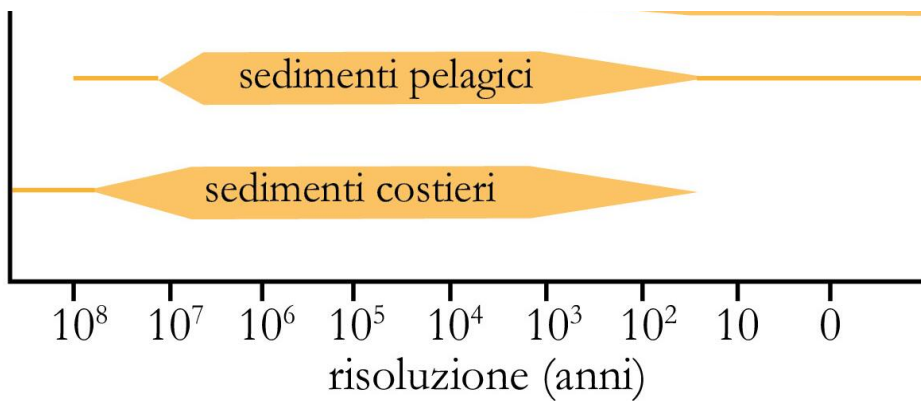
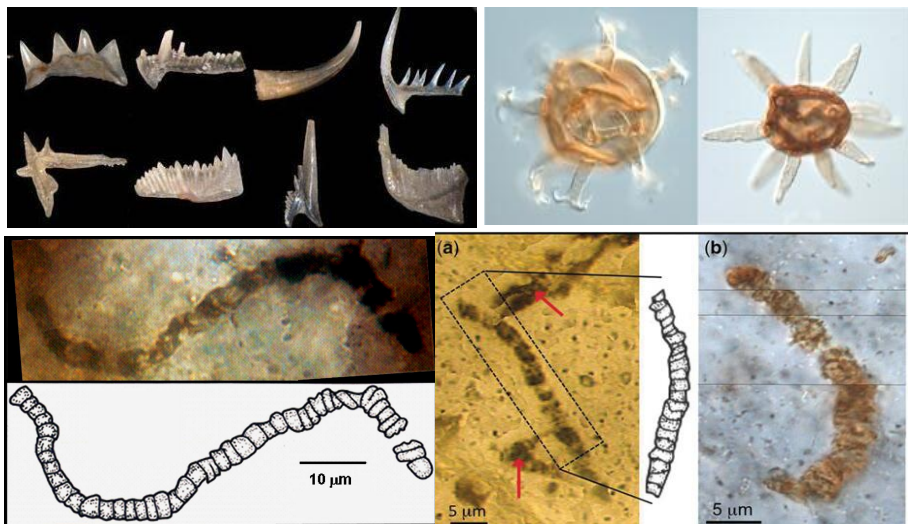


**SEDIMENTI CAROTATI IN TUTTI GLI OCEANI**



Deep Sea Drilling Project (1968 - 1985), Ocean Drilling Program (1986 – 2003)  
International Ocean Drilling Program (2003 – 2013), Integrated Ocean Discovery Program (2013 – 2023)

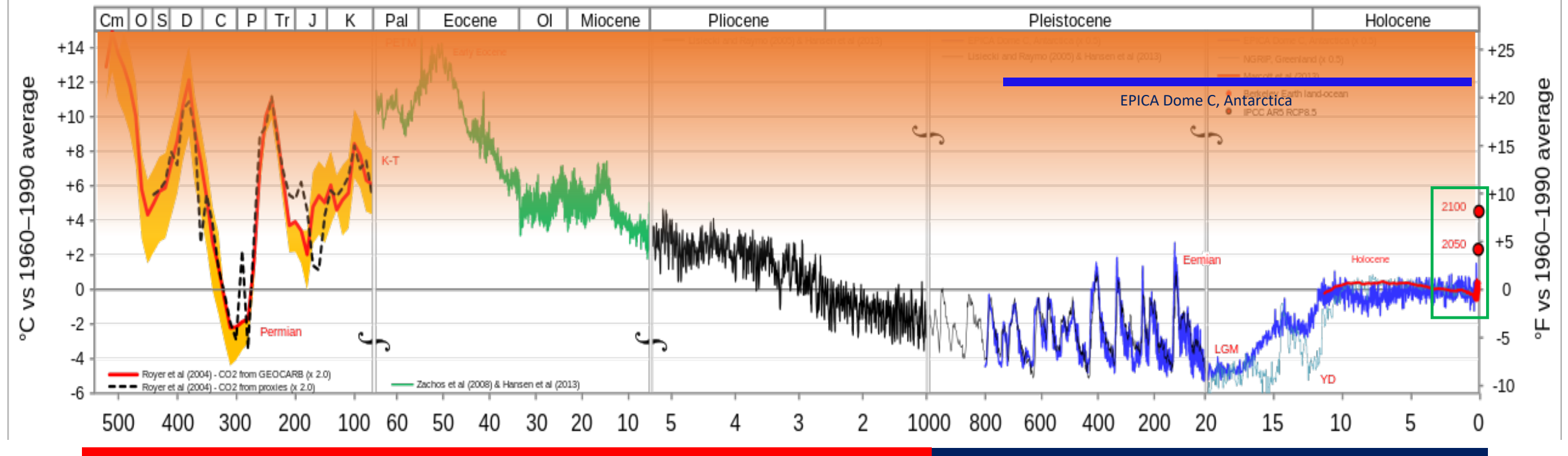
# FOSSILI e MICROFOSSILI



# I cambiamenti climatici nel passato geologico

## La temperatura negli ultimi 500 milioni di anni

TEMPERATURA del PIANETA TERRA

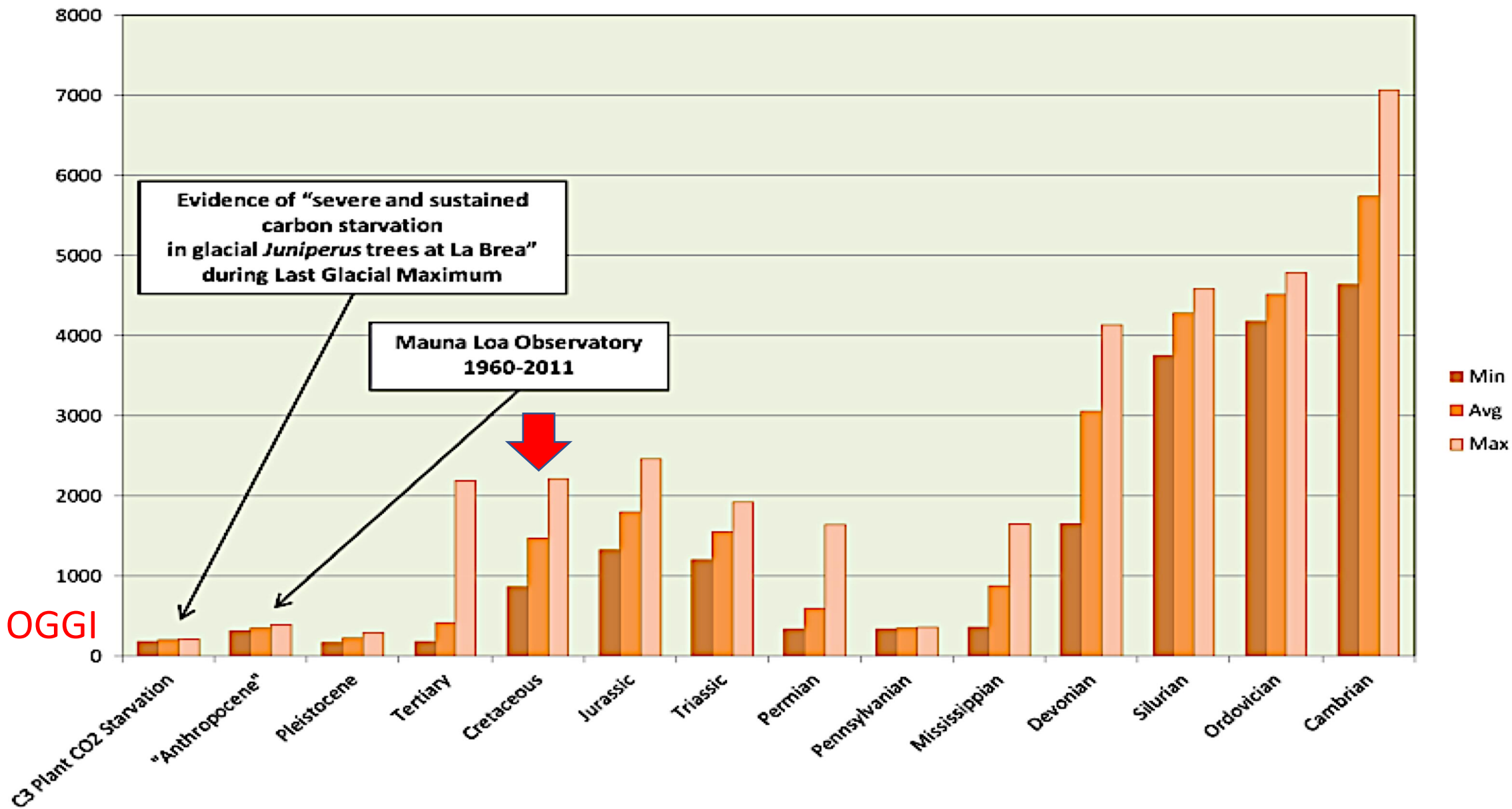


Milioni di anni

Migliaia di anni

OGGI  
e  
previsioni future

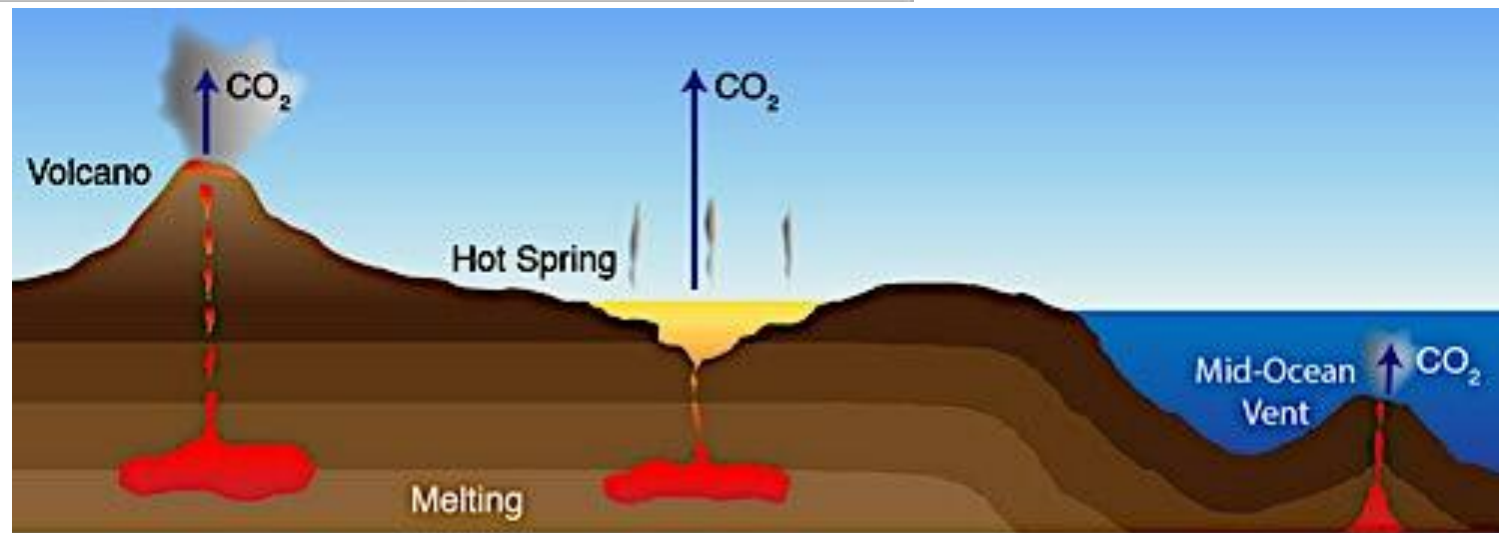
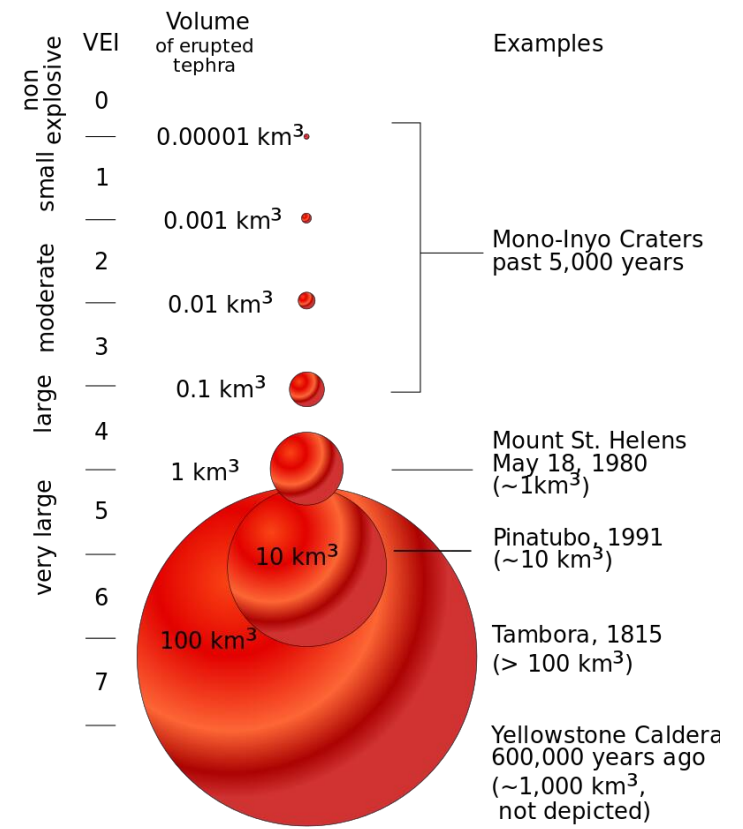
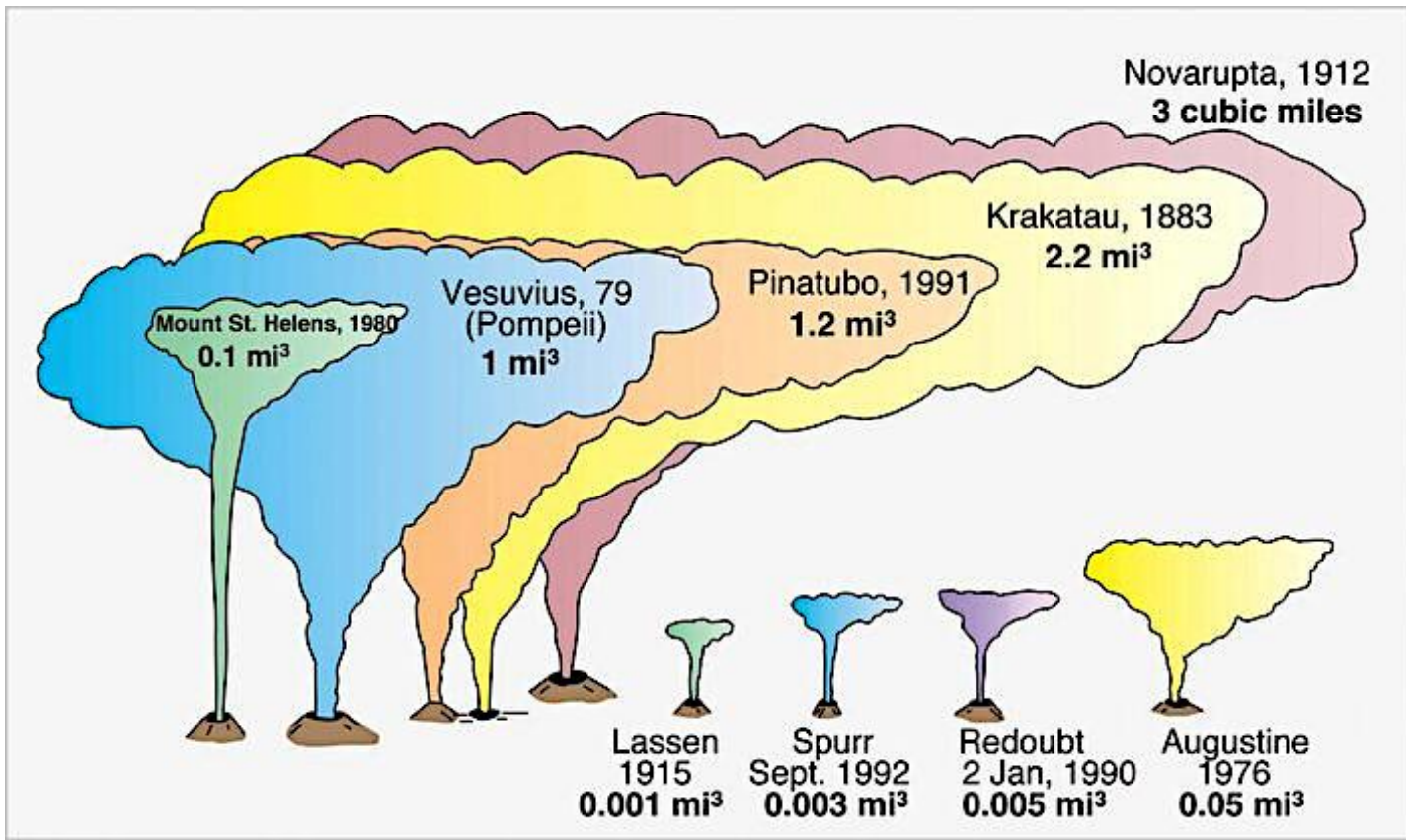
# CO<sub>2</sub> atmosferica nel passato geologico



**Le variazioni naturali della CO<sub>2</sub> atmosferica sono controllate dall'attività vulcanica** che quindi ha anche causato **cambiamenti climatici**



**VULCANESIMO in ambiente subaereo e sottomarino**







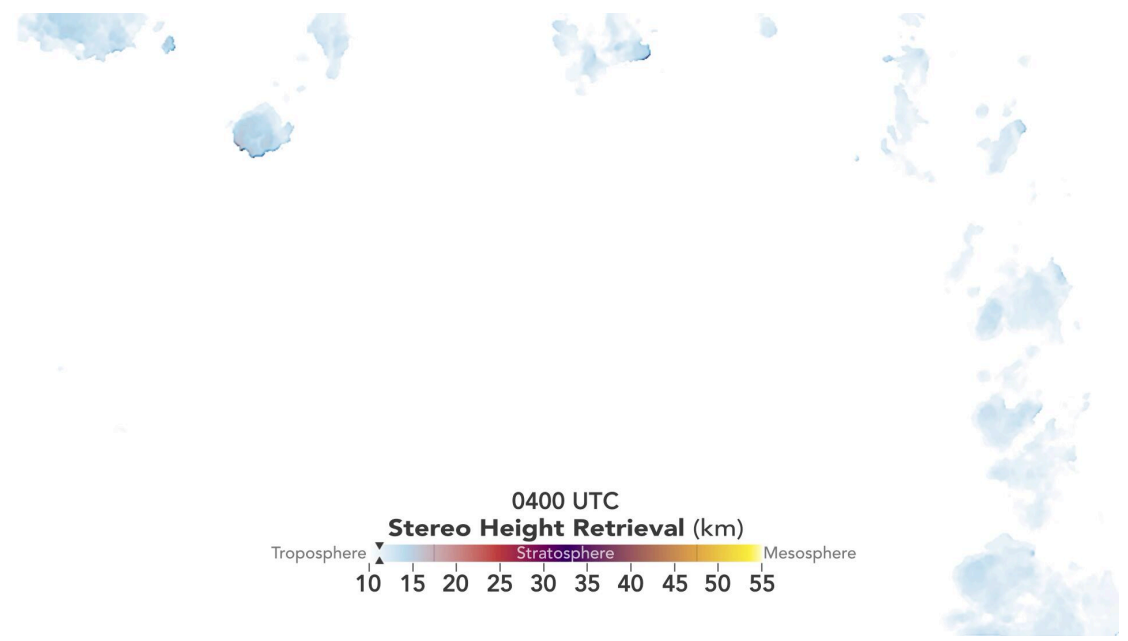
**14 Gennaio 2022:**  
**Un vulcano sottomarino identificabile da due piccole isole disabitate nel Regno di Tonga ha iniziato a eruttare.**

**500 volte più potente della bomba atomica** sganciata su Hiroshima alla fine della Seconda guerra mondiale

Altissime **colonne di cenere** in atmosfera. In 30 minuti hanno raggiunto la MESOSFERA (a 58 KM di altezza). Il Pinatubo raggiunse la stratosfera a 35 KM.

**CO<sub>2</sub>**: 2ppm pari a circa il totale di CO<sub>2</sub> emessa sulla Terra in 1 anno.

**SO<sub>2</sub>**: ~400.000 tonnellate, pari a circa il 2 per cento della quantità emessa dal Pinatubo (~20 milioni di tonnellate)



0400 UTC  
**Stereo Height Retrieval (km)**  
Troposphere      Stratosphere      Mesosphere  
10 15 20 25 30 35 40 45 50 55

# Le variazioni naturali della CO<sub>2</sub> atmosferica sono controllate dall'attività vulcanica



**I grandi eventi vulcanici possono influenzare il clima in due modi diversi:**

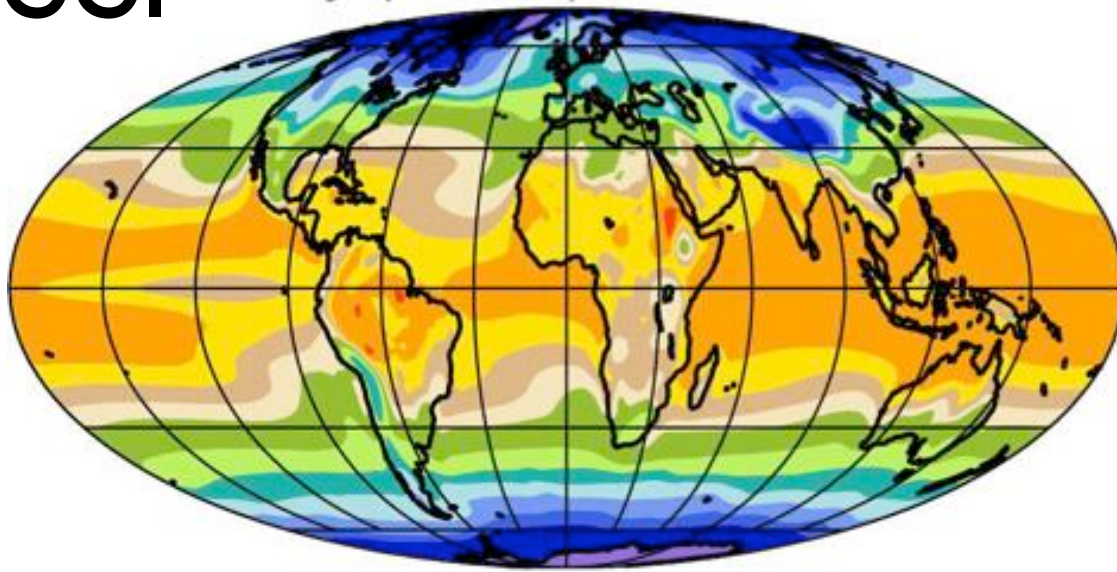
## **RAFFREDDAMENTO**

causato da aerosol con acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) generato da SO<sub>2</sub>. Questo aerosol riflette ed assorbe la radiazione solare facendo aumentare l'opacità dell'atmosfera.

## **RISCALDAMENTO**

causato dall'aumento del gas serra CO<sub>2</sub> (+ altri gas + vapore acqueo.....)

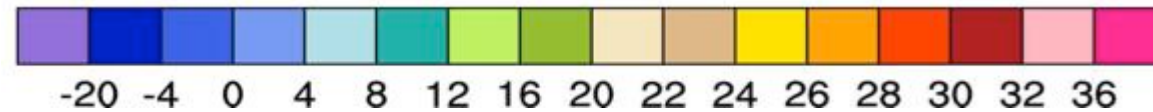
**OGGI**



**Effetto-serra**

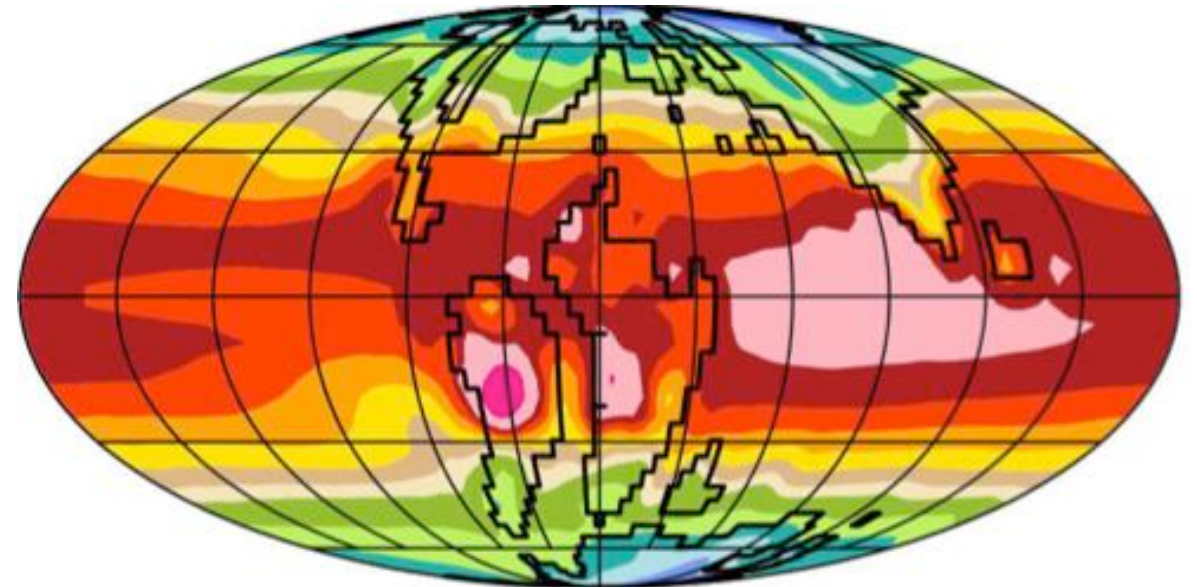


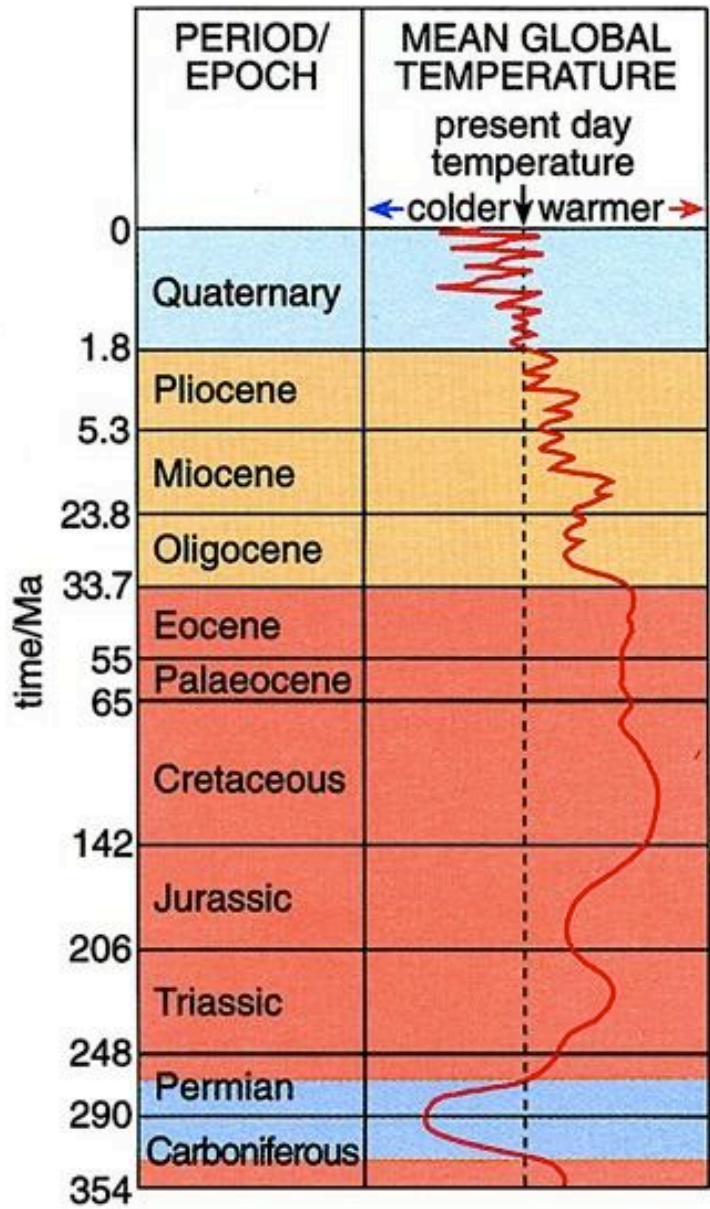
Temperature ° C



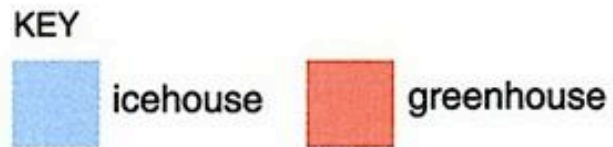
**CRETACICO**

**100 milioni  
di anni fa**

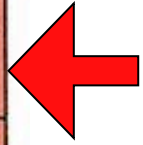




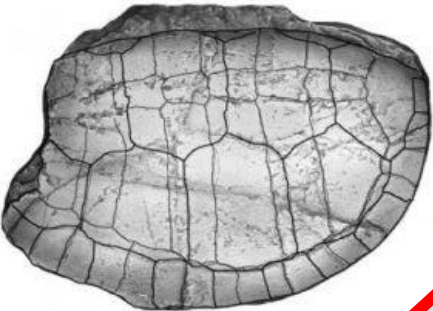
time/Ma



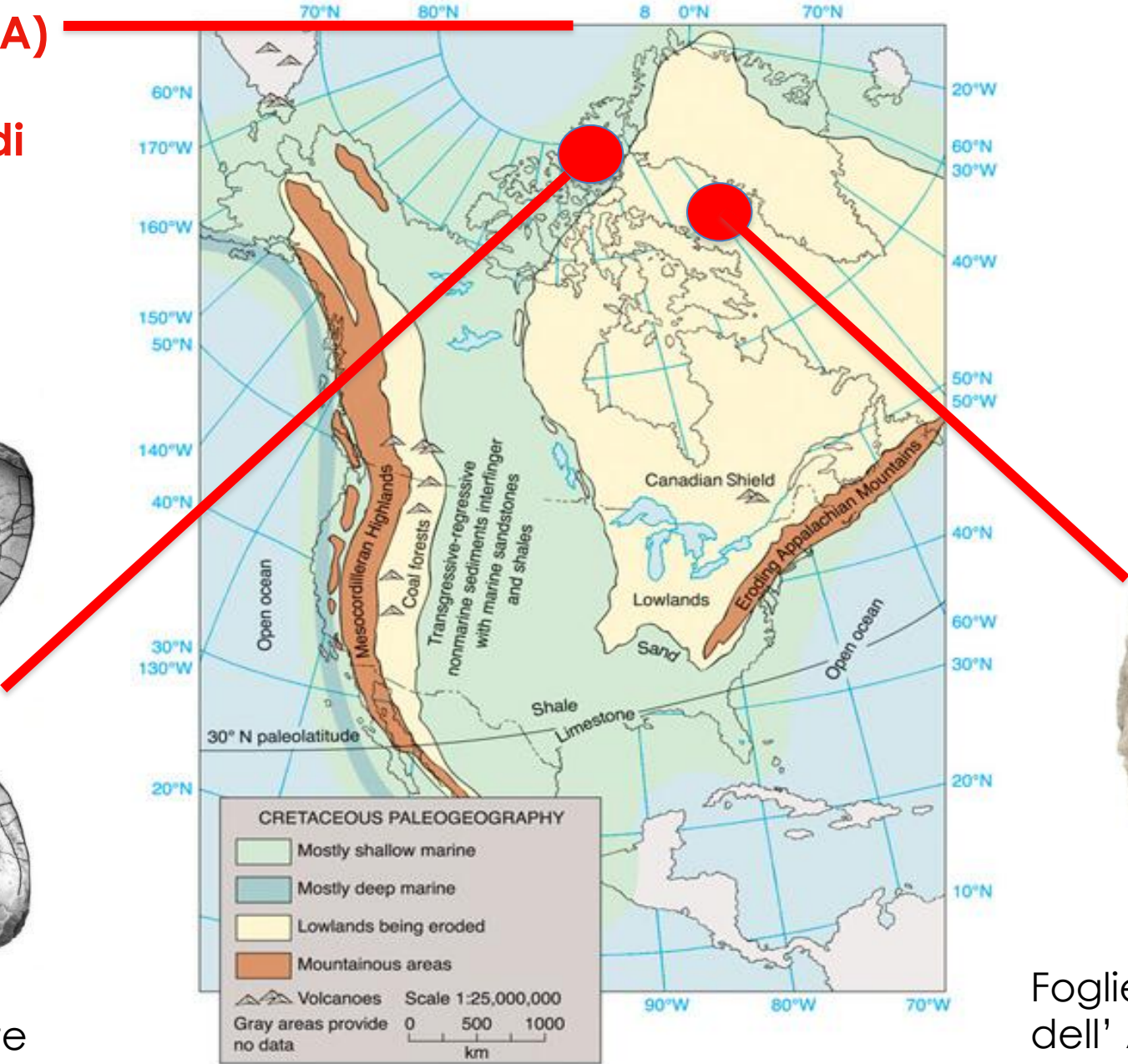
**IL CLIMA PIU' CALDO DEGLI ULTIMI 300 Ma**



**NEL CRETACICO (100 MA)  
AI POLO NORD  
c'erano temperature di  
ca. 15° C**

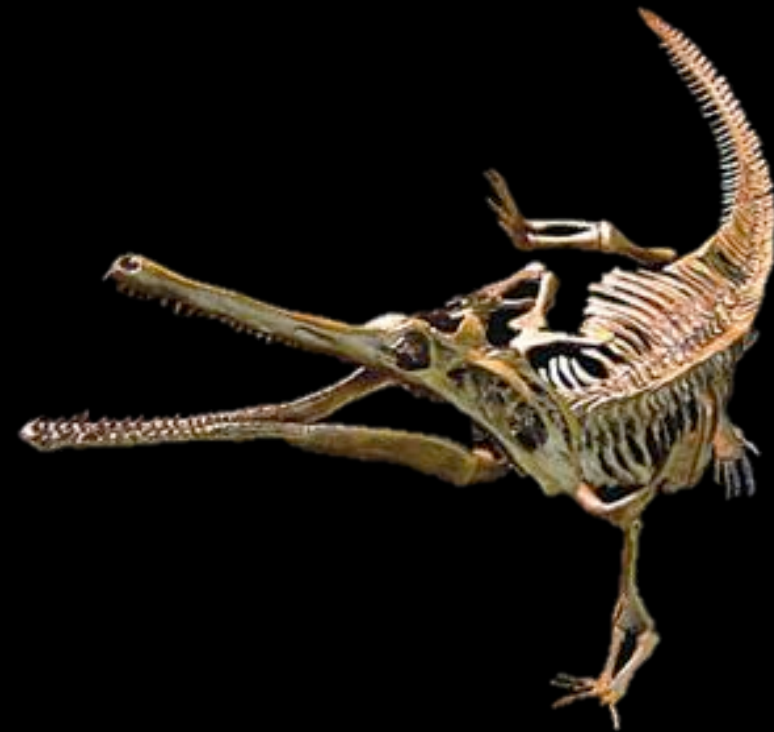


Tartarughe fossilizzate

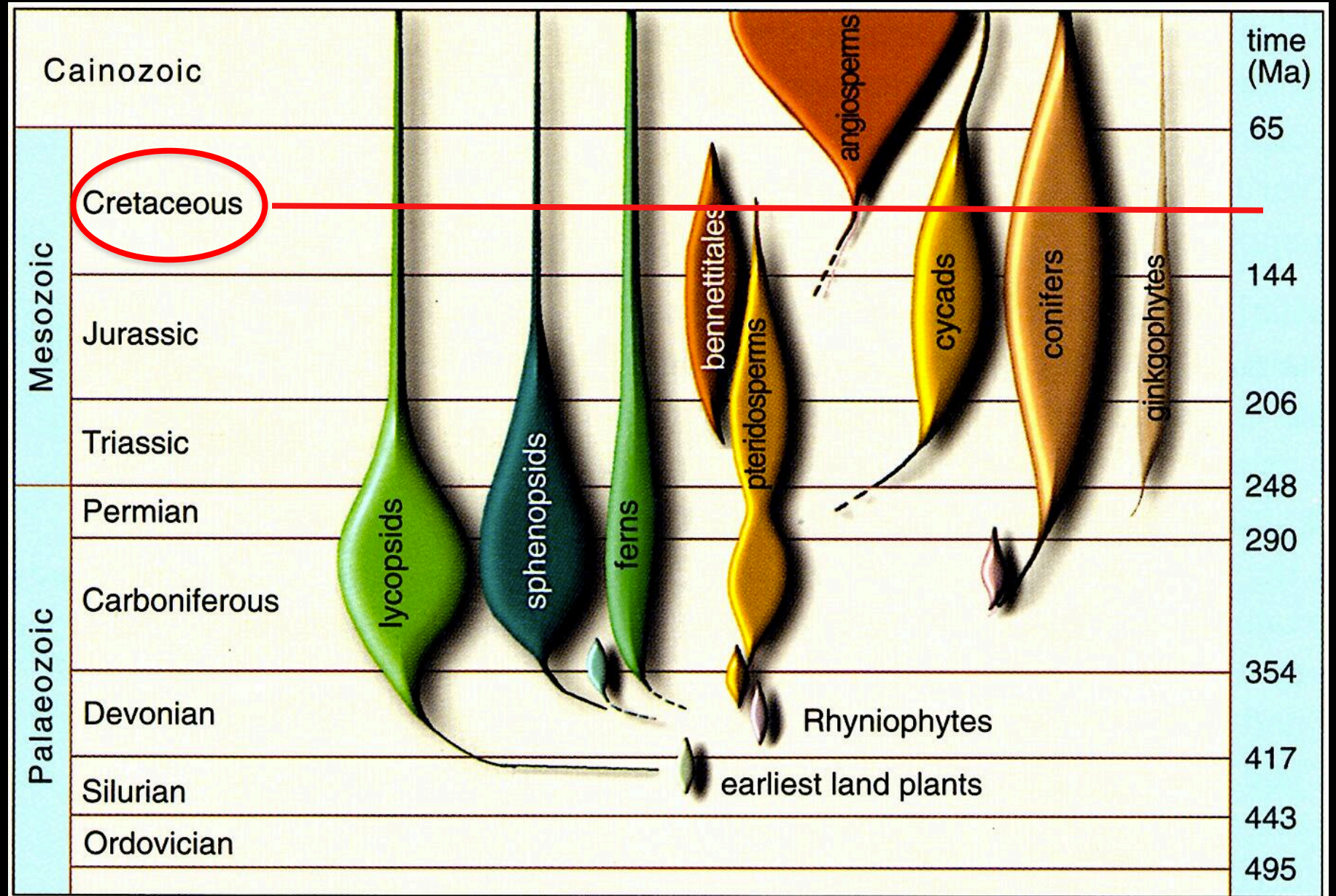


Foglie fossili dell' Albero del Pane

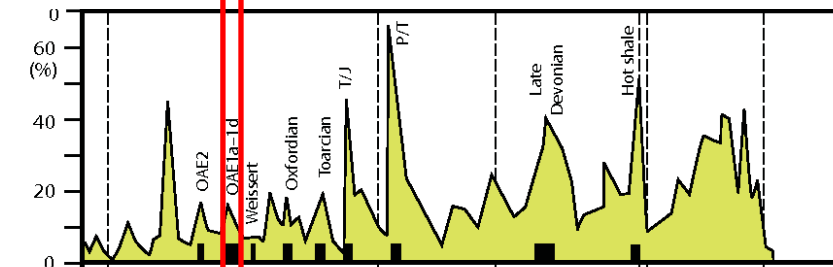
AI POLO NORD c'erano temperature di ca. 15° C



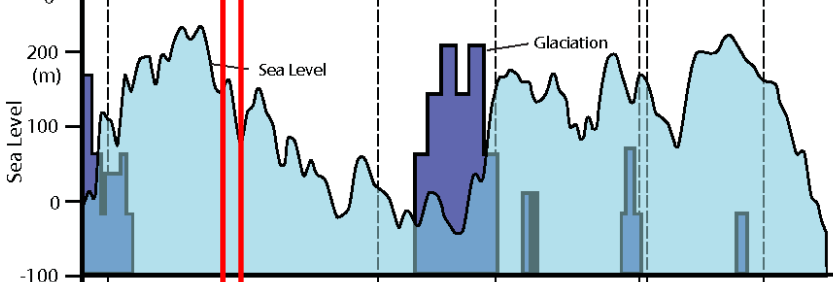
# Esplosione delle Angiosperme...



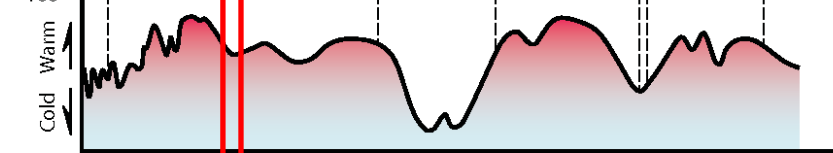
(F) Percentage extinction of marine genera (Raup & Sepkoski, 1986) & major Oceanic Anoxic Events



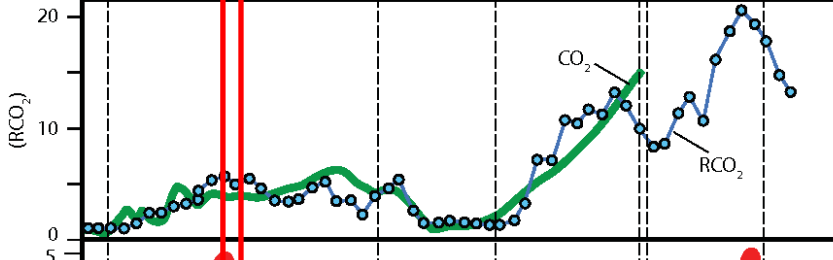
(E) Sea level changes & continental glaciation (Ridgwell, 2005)



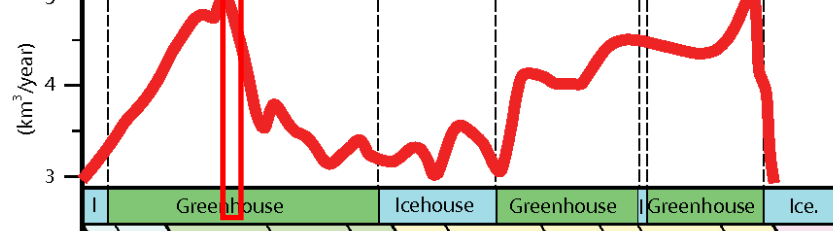
(D) Temperature (Frakes et al., 1992)



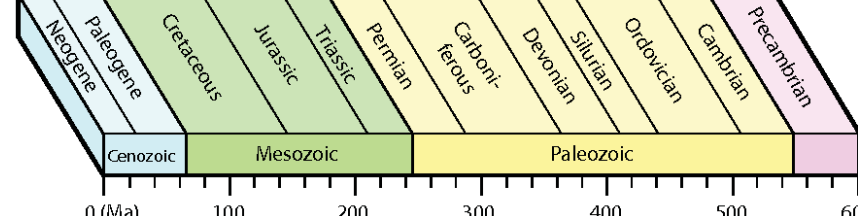
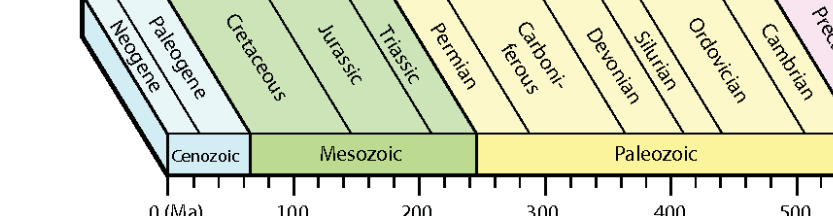
(C) Carbon dioxide  
Ratio of the mass of atmospheric CO<sub>2</sub> at a past time to that at present (Berner, in press)



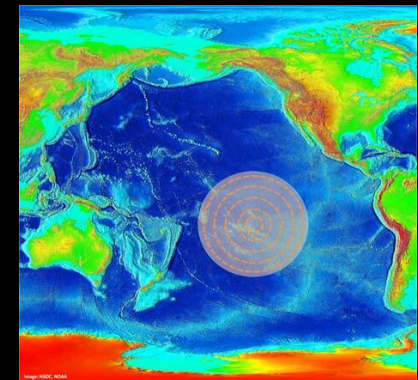
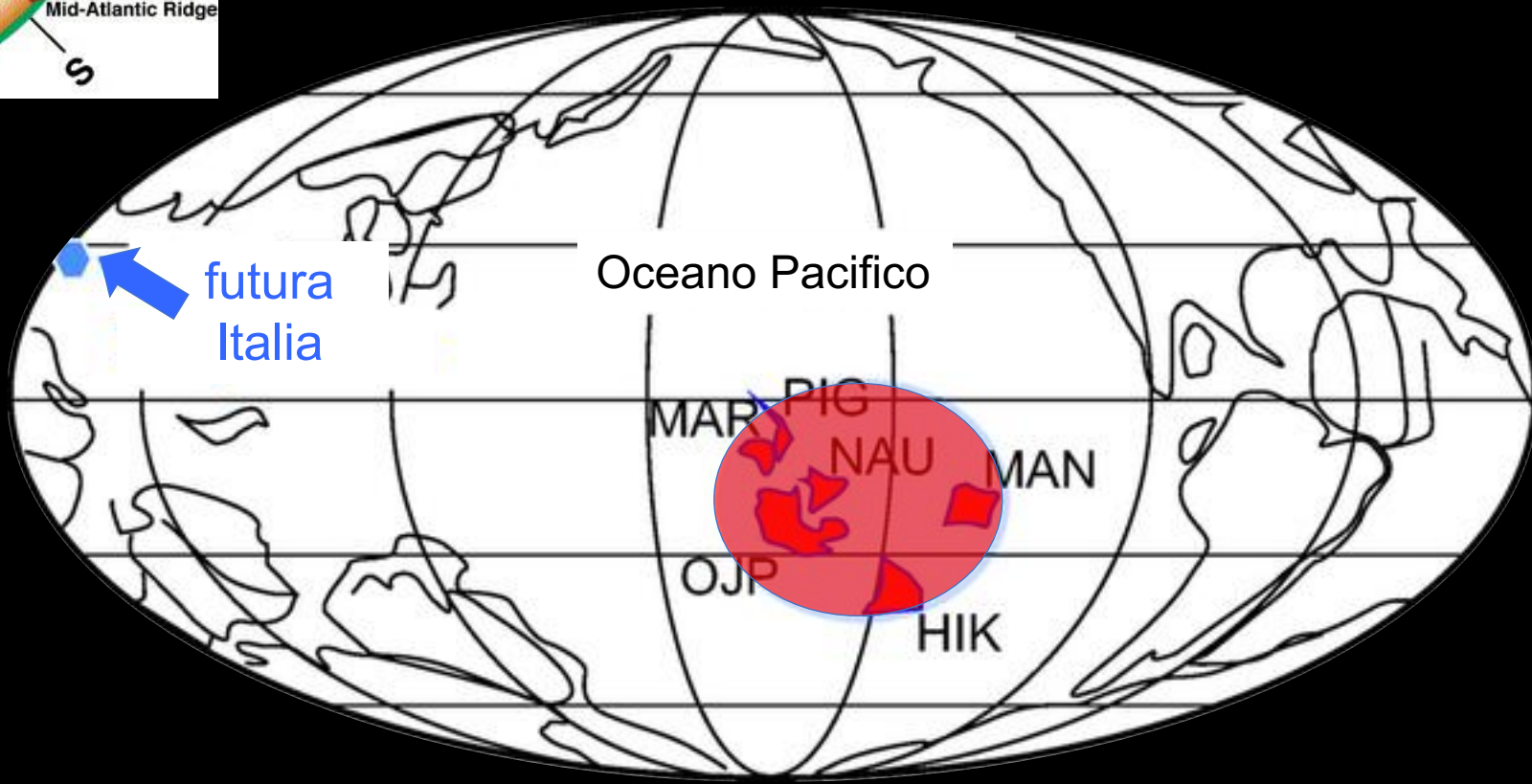
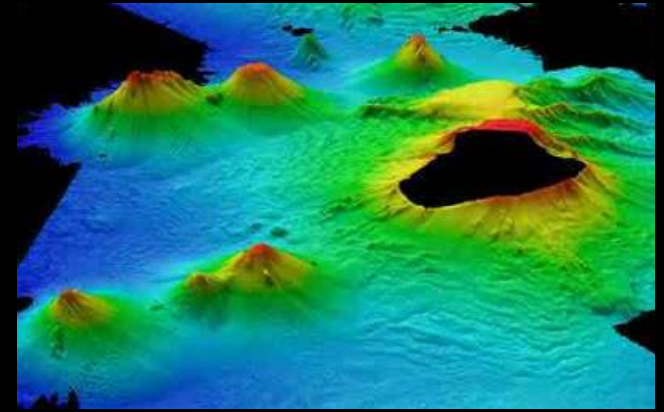
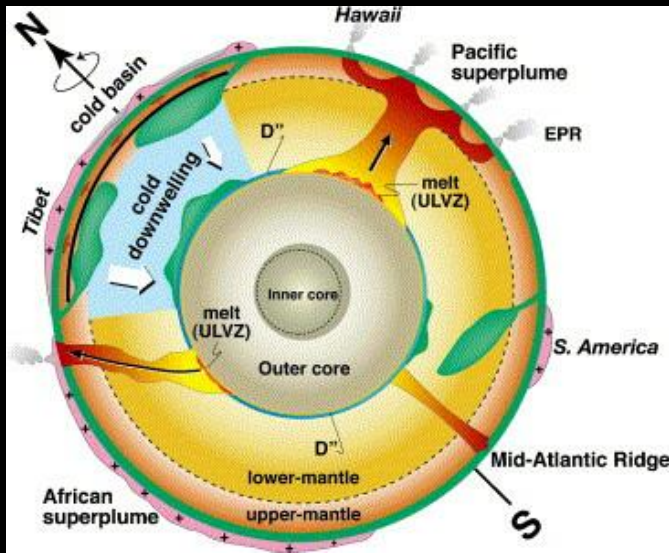
(B) Production rate of oceanic crust (Stanley, 1999)



(A) Climate mode (Frakes et al., 1992)







Super-vulcani sottomarini nell'Oceano Pacifico : CO<sub>2</sub> fino a 2000 ppm

**PRIMA DELL'ECCESSO DI CO<sub>2</sub> , DEL RISCALDAMENTO e  
DELL'ACIDIFICAZIONE DEGLI OCEANI: CALCARI BIANCHI**

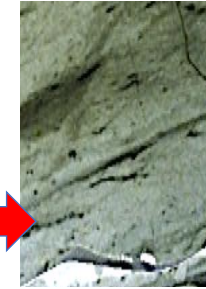
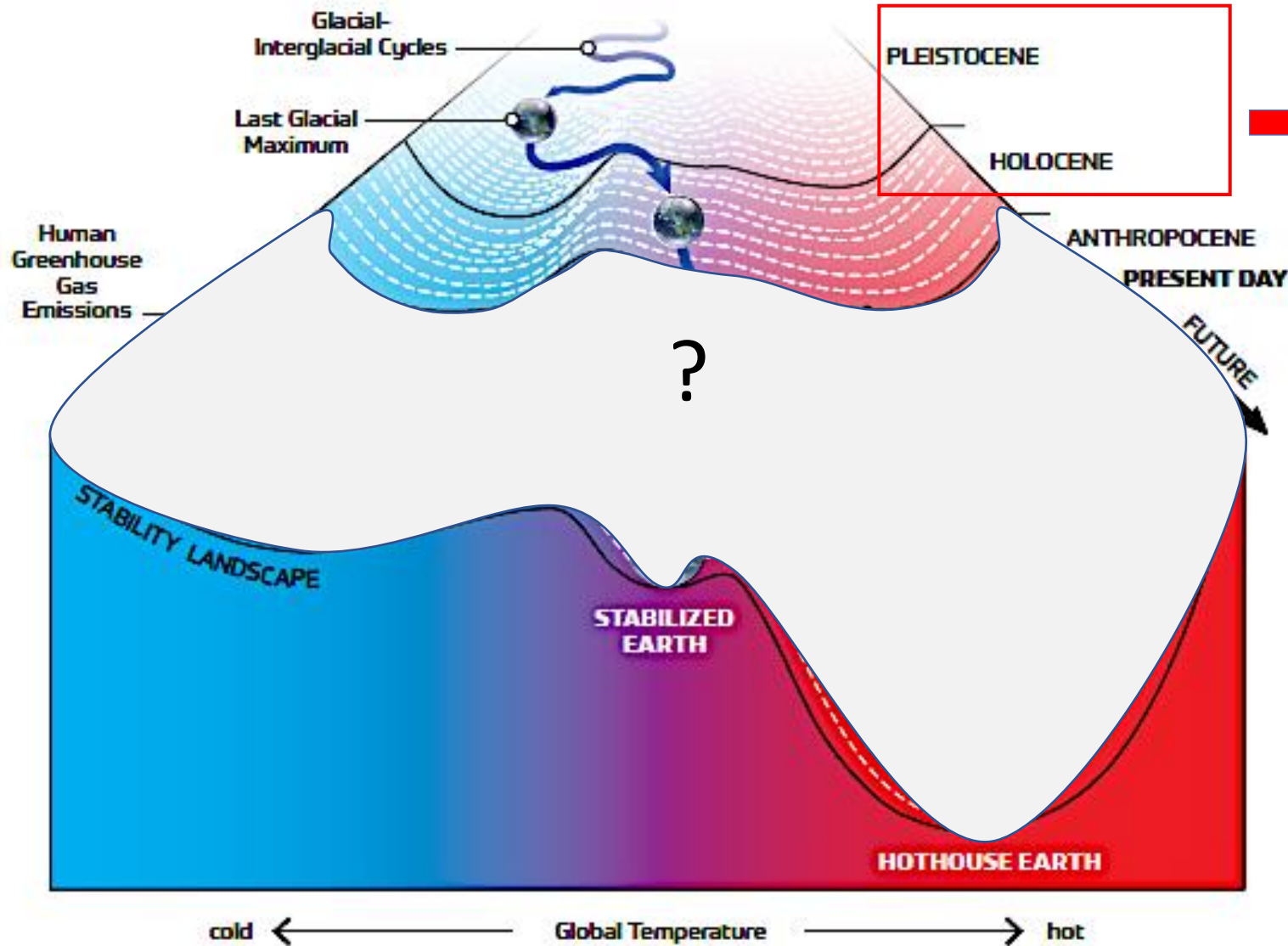


# DOPO L'ECCESSO DI CO<sub>2</sub> , IL RISCALDAMENTO E L'ACIDIFICAZIONE: ROCCE NERE



# I cambiamenti dell'Antropocene e il record geologico: IL NOSTRO FUTURO E' ..... ?

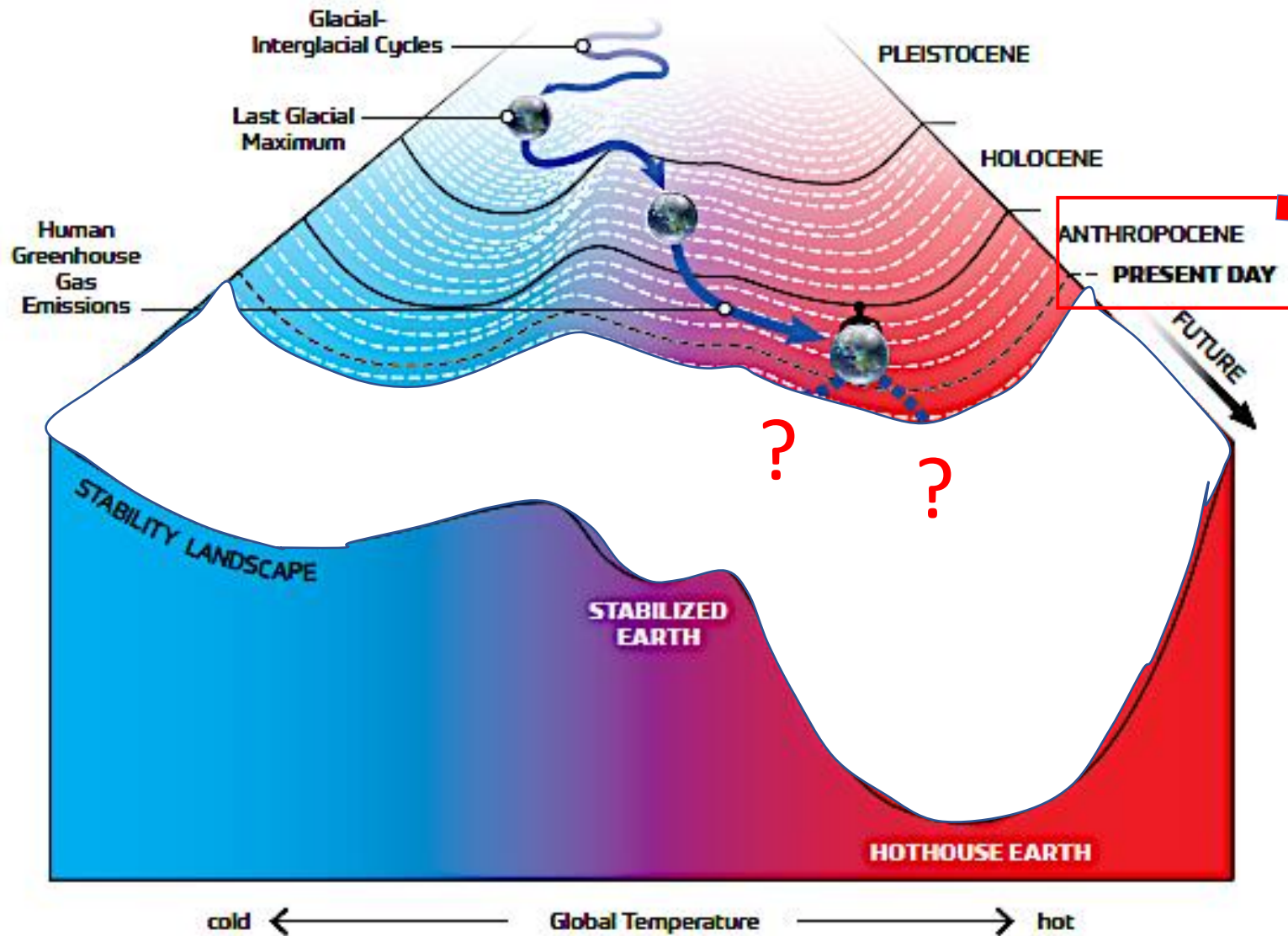
CRETACICO ~ 120 milioni anni fa  
Cison Core (Belluno)



**TEMPI PRE-RIVOLUZIONE INDUSTRIALE**  
280 ppm CO<sub>2</sub>  
*Ecosistema stabile*

# I cambiamenti dell'Antropocene e il record geologico: IL NOSTRO FUTURO E' ..... ?

CRETACICO ~ 120 milioni anni fa  
Cison Core (Belluno)

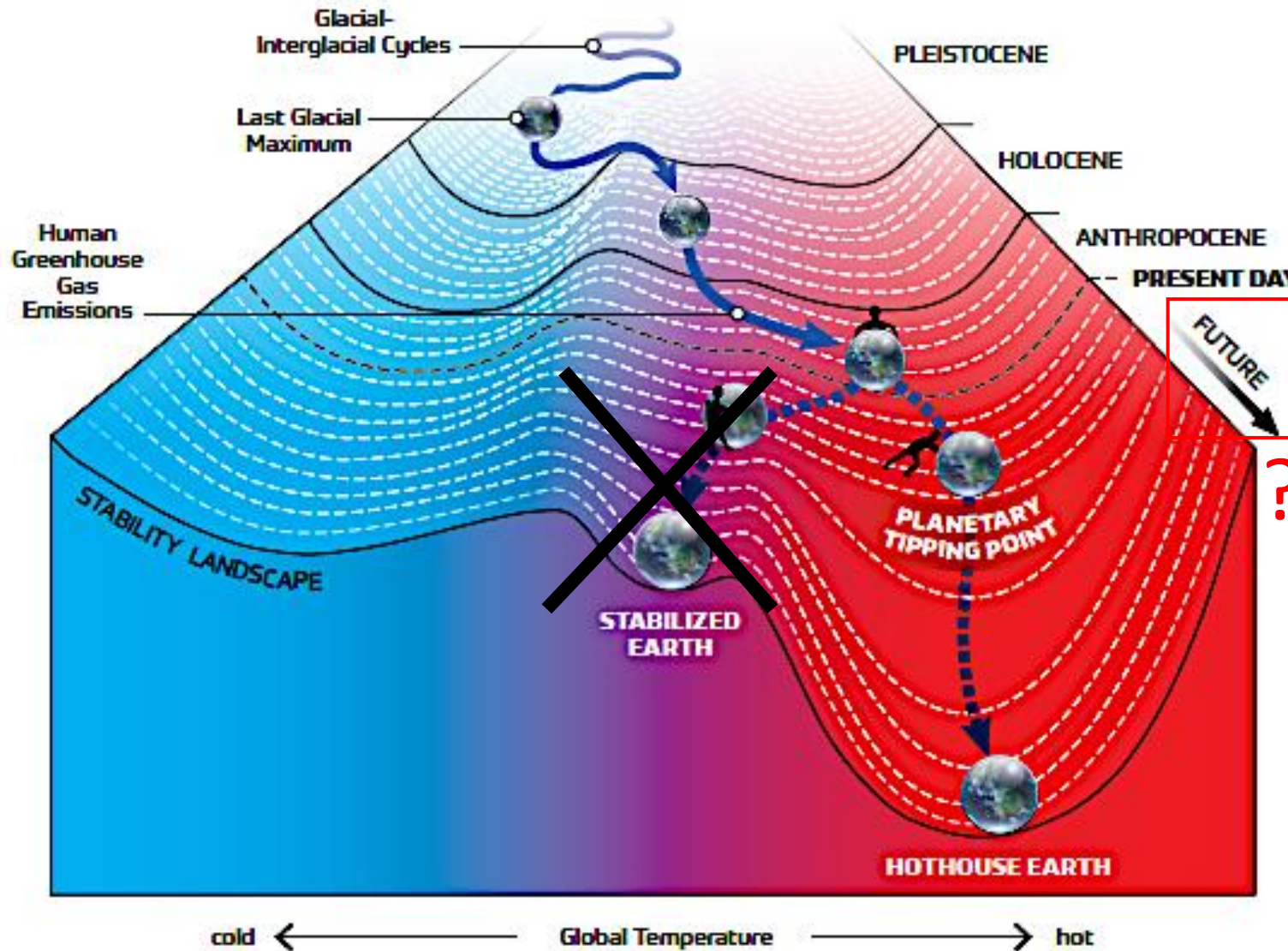


TEMPI PRE-RIVOLUZIONE  
INDUSTRIALE  
280 ppm CO<sub>2</sub>  
*Ecosistema stabile*

**OGGI**  
415 ppm CO<sub>2</sub>  
Riscaldamento,  
Fertilizzazione,  
Acidificazione degli  
oceani  
**Ecosistema  
perturbato,  
si avvicina a un  
tipping point**

# I cambiamenti dell'Antropocene e il record geologico: IL NOSTRO FUTURO E' NERO ?

CRETACICO ~ 120 milioni anni fa  
Cison Core (Belluno)



**TEMPI PRE-RIVOLUZIONE INDUSTRIALE**

280 ppm CO<sub>2</sub>  
*Ecosistema stabile*

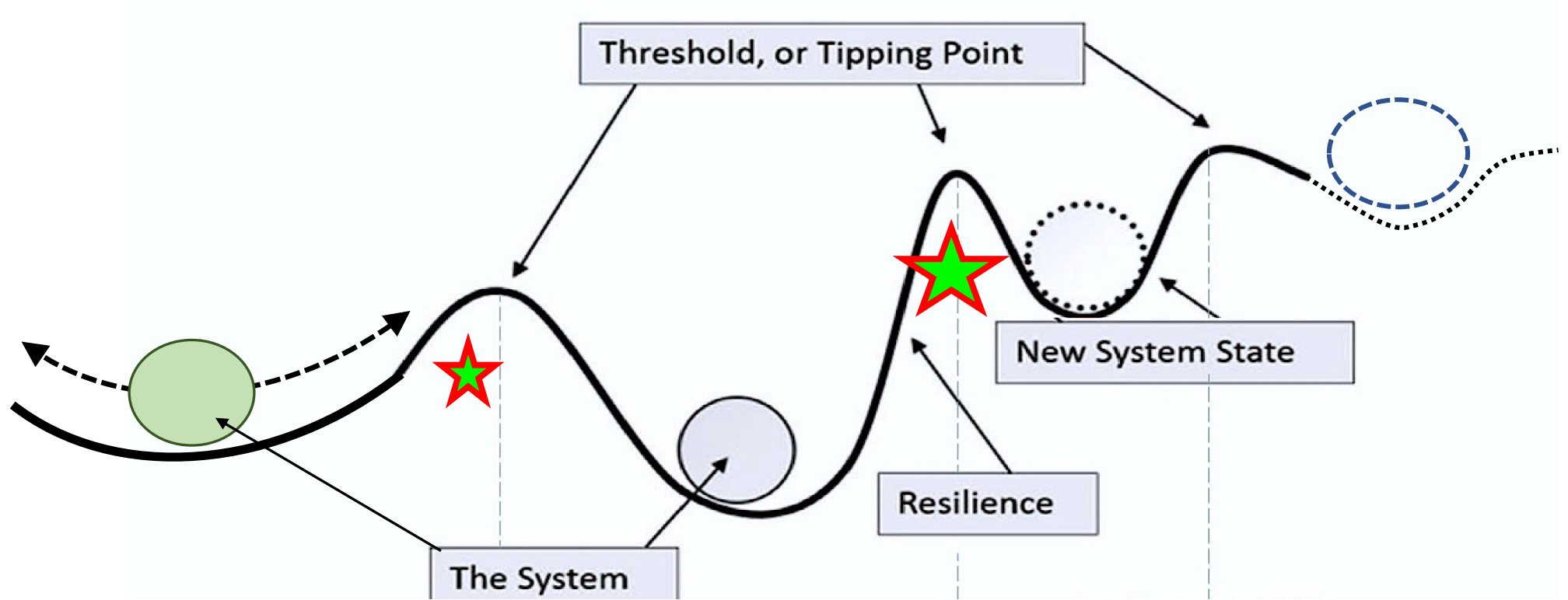
**OGGI**

415 ppm CO<sub>2</sub>  
*Riscaldamento, Fertilizzazione, Acidificazione degli oceani*  
**Ecosistema perturbato, si avvicina a un tipping point**

**FUTURO**

600-800 ppm CO<sub>2</sub>  
*Anossia, Cambiamenti nel fitoplancton, Crisi degli organismi calcificatori*

Cretacico (~120 Ma)



Perturbazione iniziale



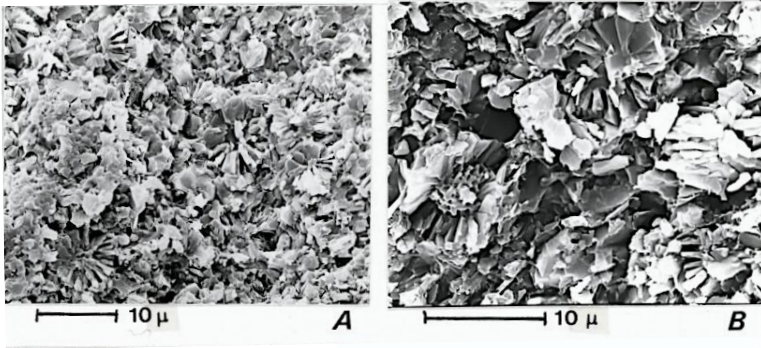
Perturbazione principale



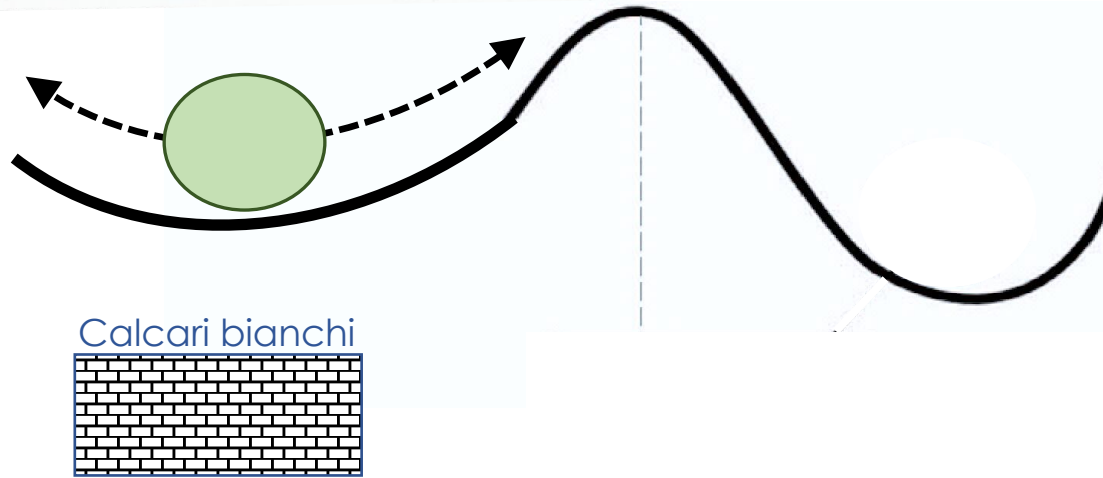
Post-perturbazione

**La resilienza del fitoplancton calcareo ?**

nannoconidi (e coccoliti)



Cretacico (~120 Ma)

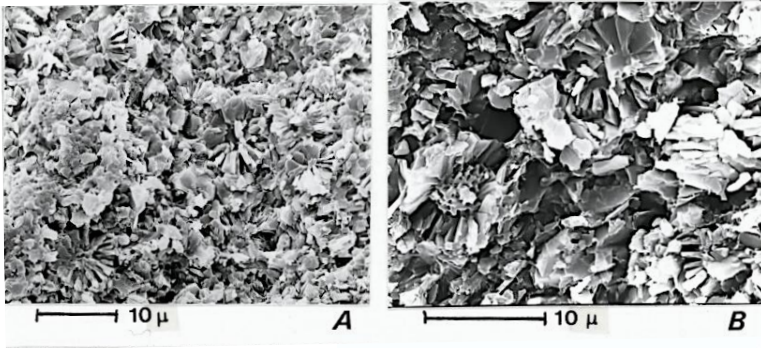


**La resilienza del fitoplancton calcareo ?**

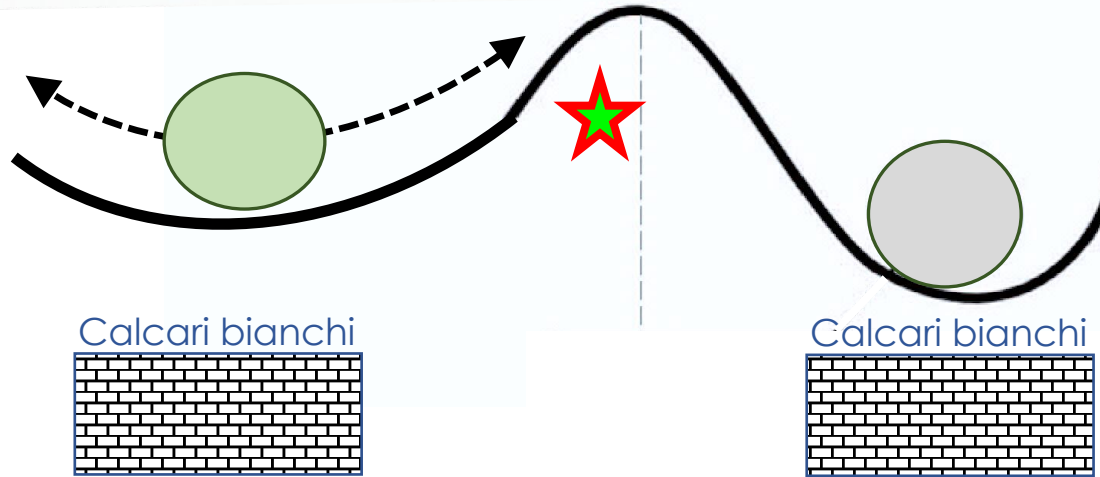
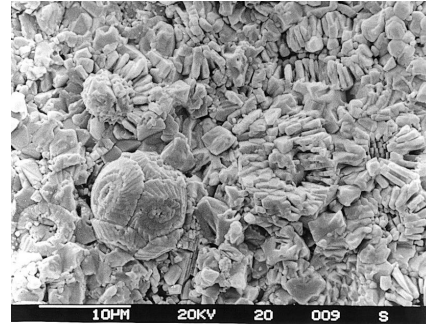


Cretacico (~120 Ma)

nannoconidi (e coccoliti)



nannoconidi e coccoliti



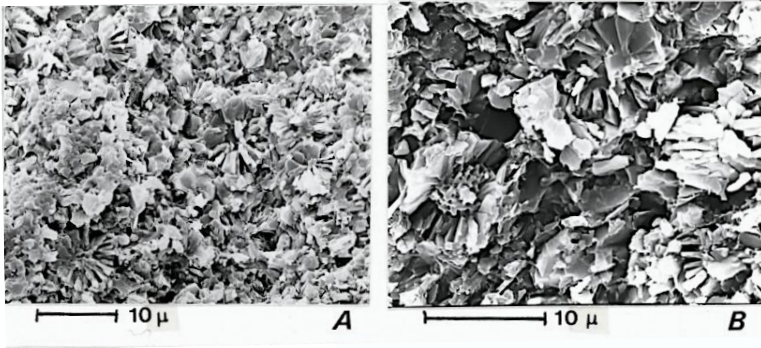
Perturbazione iniziale



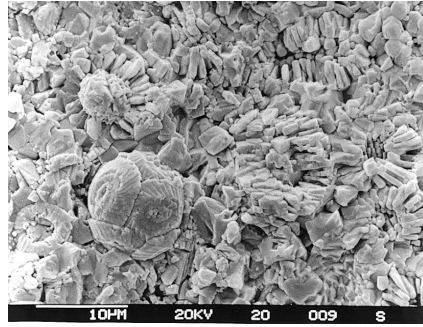
**La resilienza del fitoplancton calcareo ?**

Cretacico (~120 Ma)

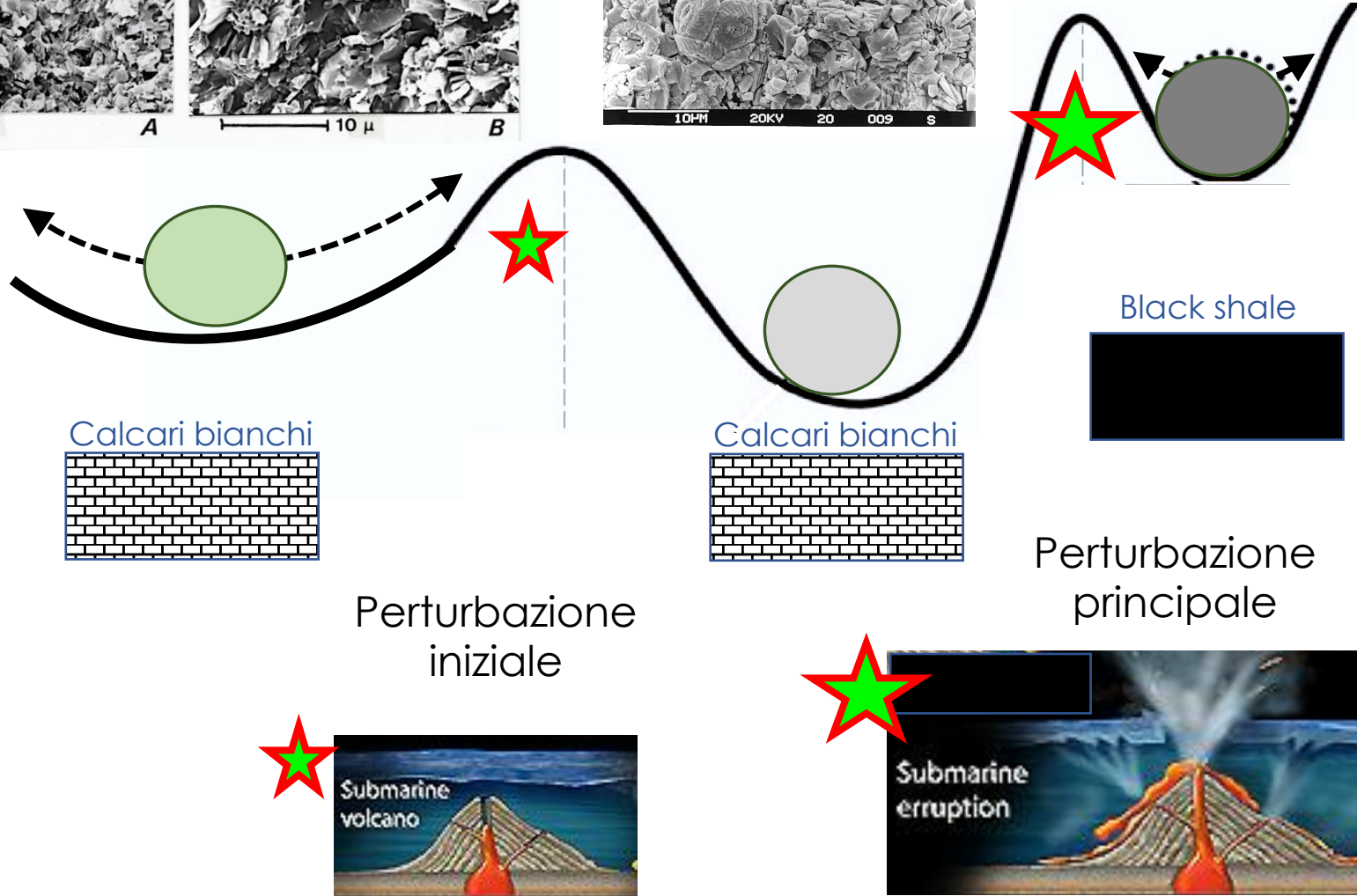
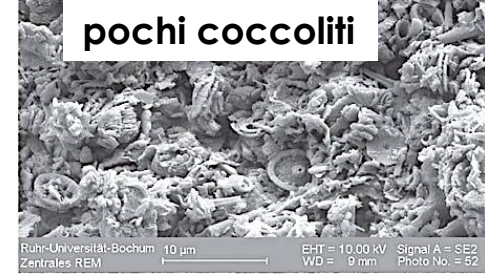
nannoconidi (e coccoliti)



nannoconidi e coccoliti



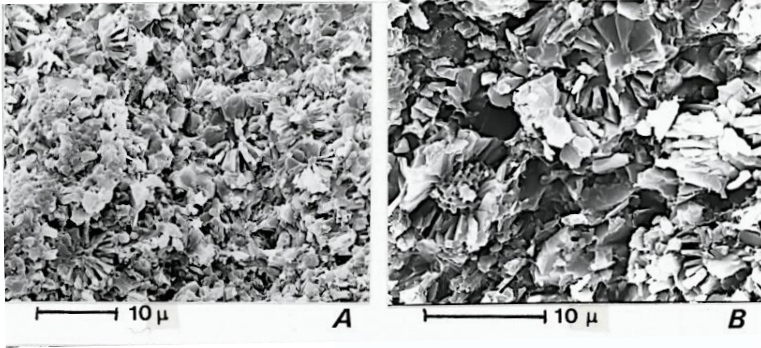
pochi coccoliti



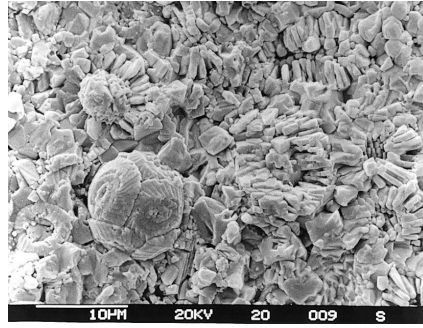
**La resilienza del fitoplancton calcareo ?**

Cretacico (~120 Ma)

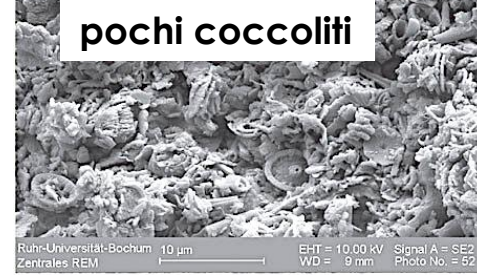
nannoconidi (e coccoliti)



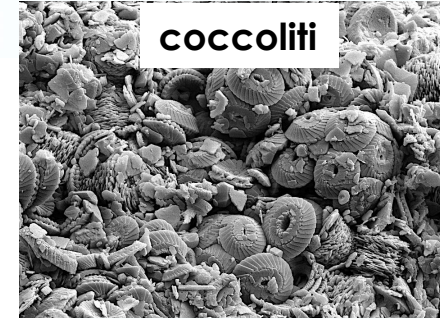
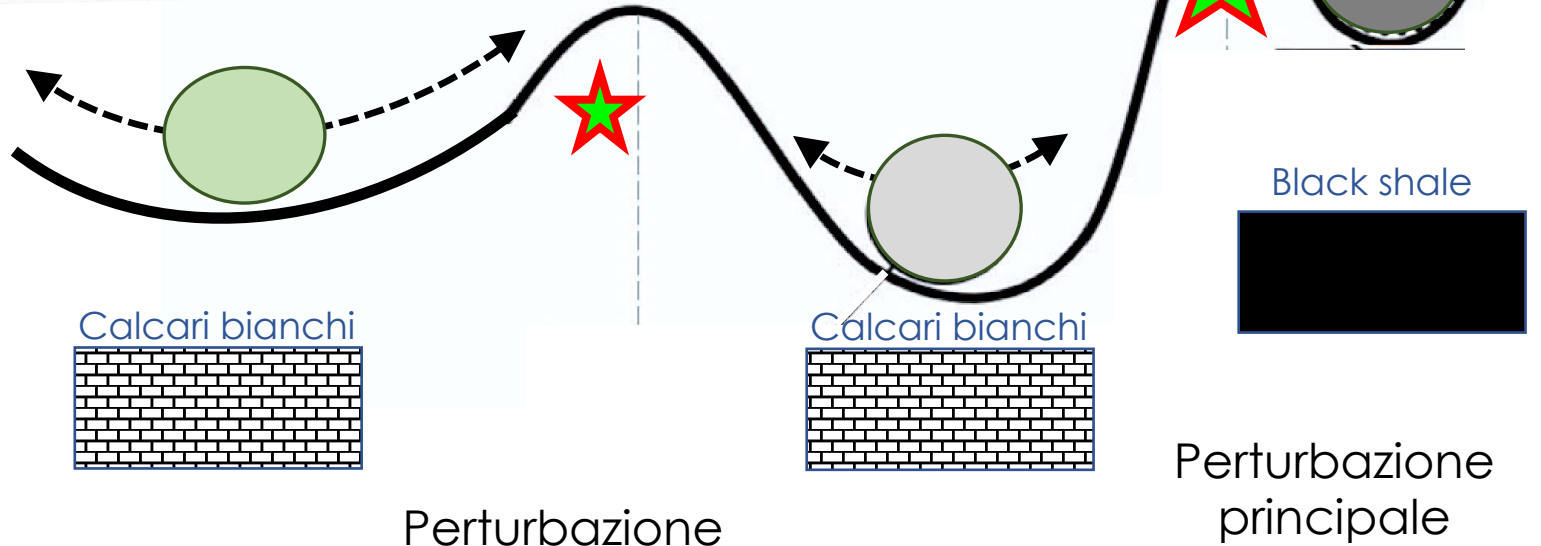
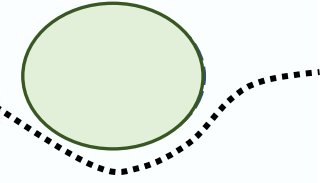
nannoconidi e coccoliti



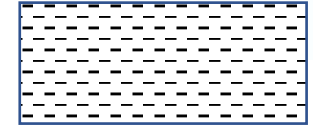
pochi coccoliti



Post-perturbazione



Calcarei e marne



Perturbazione iniziale



Perturbazione principale



**La resilienza del fitoplancton calcareo ?**

# **COSA è SUCCESSO NEL PASSATO GEOLOGICO con livelli di CO<sub>2</sub> di 1500 – 2000 ppm**

**SURRISCALDAMENTO GLOBALE** (fino a + 5° C)

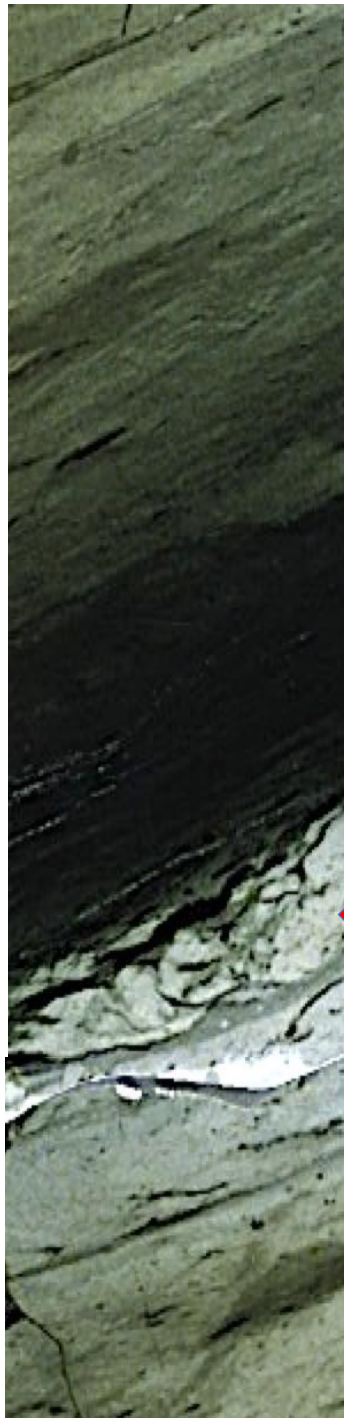
**ALTISSIMO LIVELLO DEL MARE** (fino a + 200 metri)

**ANOSSIA NEGLI OCEANI:** crisi degli organismi

**ACIDIFICAZIONE DEGLI OCEANI:**  
crisi del plancton calcareo e delle scogliere coralline

**CRETACICO ~ 120 milioni anni fa**

Cismon Core, Belluno



# I cambiamenti dell'Antropocene e il record geologico: **IL NOSTRO FUTURO E' NERO** (oceani caldi, acidi, anossici...)

## **OGGI**

415 ppm CO<sub>2</sub>

*Riscaldamento, Fertilizzazione, Acidificazione degli oceani*

***Ecosistema perturbato, si avvicina a un tipping point***

## **TEMPI PRE-RIVOLUZIONE INDUSTRIALE**

280 ppm CO<sub>2</sub>

***Ecosistema stabile***

**Cosa abbiamo imparato dallo studio  
degli  
archivi geologici ?**

**La biosfera oceanica è stata resiliente ?**

**La BIOSFERA OCEANICA è (stata) MOLTO RESILIENTE:**

ha avuto tempo per adattarsi e in alcuni casi persino  
trarne dei vantaggi.

Nessuna estinzione nel (fito)plancton calcareo.

Origine di nuove specie.

**La BIOSFERA OCEANICA è (stata) MOLTO RESILIENTE:**

ha avuto tempo per adattarsi e in alcuni casi persino  
trarne dei vantaggi.

Nessuna estinzione nel (fito)plancton calcareo.

Origine di nuove specie.

**MA**

le perturbazioni climatiche ed ambientali attuali sono  
comprese su scale temporali molto brevi,  
mentre i cambiamenti del passato geologico si sono  
verificati con tempi di decine di migliaia – milioni di anni.



An aerial photograph of a coastline, likely in the Mediterranean or Adriatic region, showing intricate, swirling patterns of green and blue water. The land is visible on the left side, covered in dense green vegetation. The water's color transitions from a deep blue to a vibrant green, indicating the presence of phytoplankton or algae. The overall scene is dynamic and visually striking.

PER CAPIRE IL NOSTRO IL FUTURO E' IMPORTANTE STUDIARE  
**SIA I CAMBIAMENTI ATTUALI CHE IL PASSATO GEOLOGICO**

Per adattarsi a un mondo che cambia è fondamentale  
**STUDIARE E COMPRENDERE LA COMPLESSITA'**  
**DEL SISTEMA TERRA,**  
**e soprattutto il grande ecosistema oceano**