

Ciclo del carbonio e clima

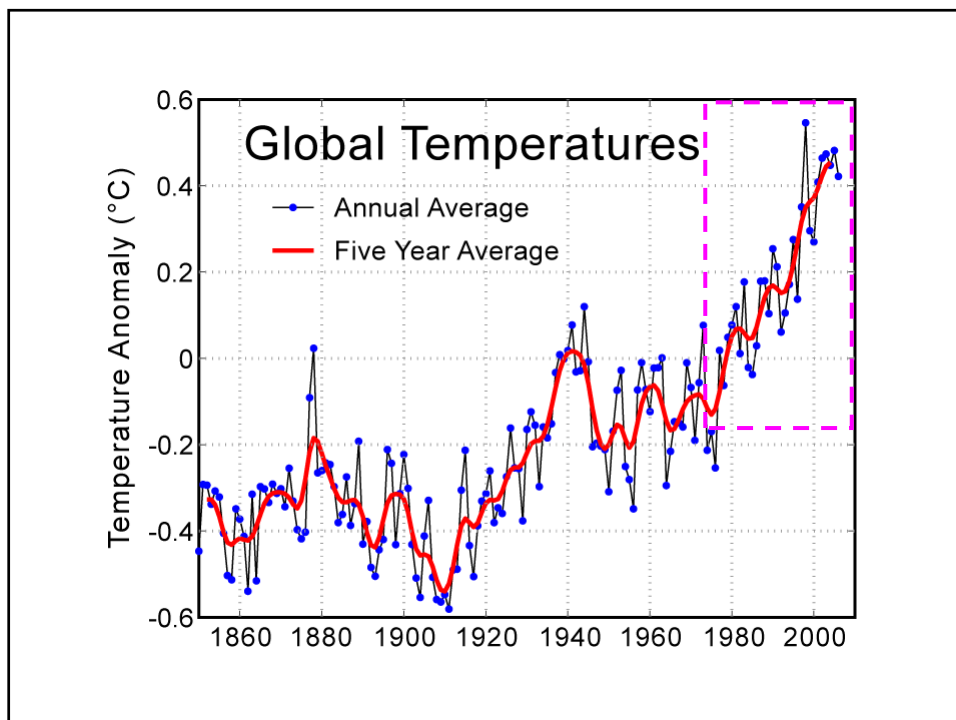
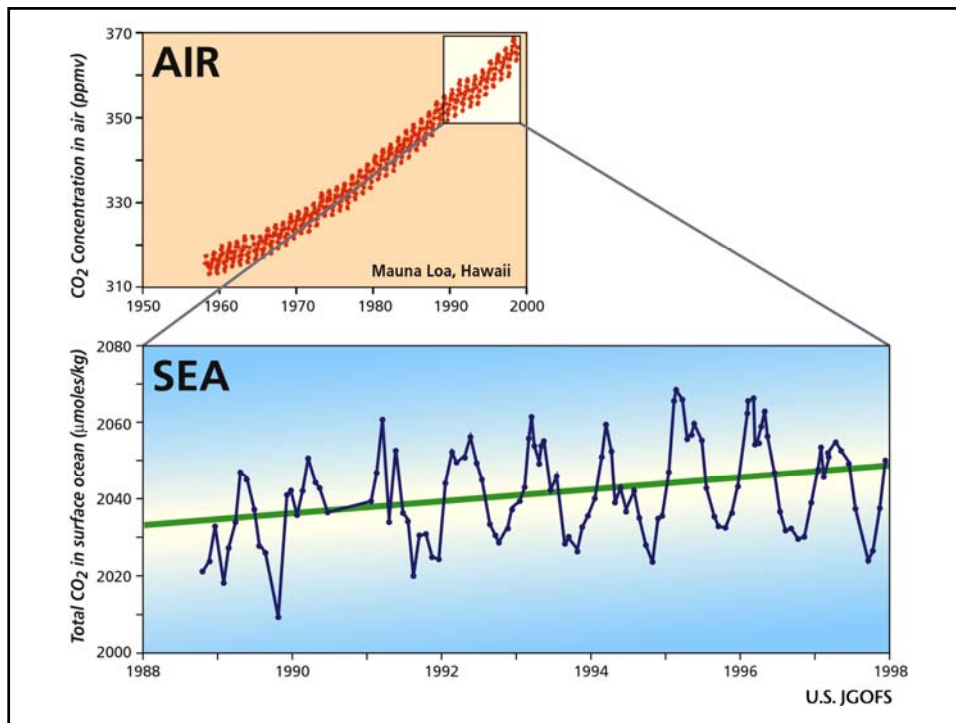
LA TERRA VA
VERSO
IL DISASTRO!

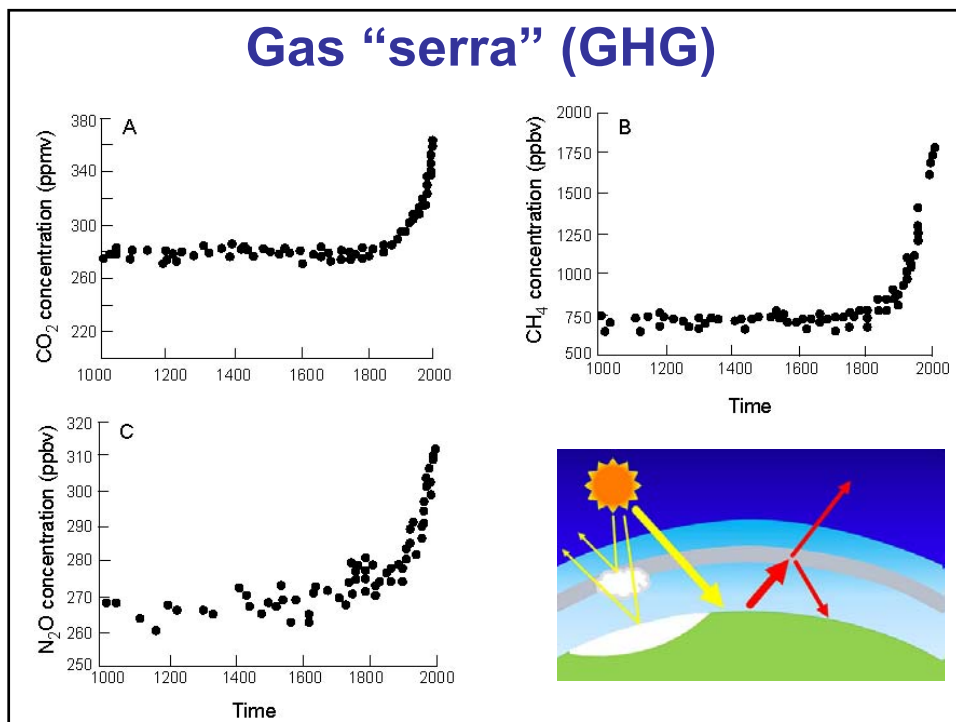
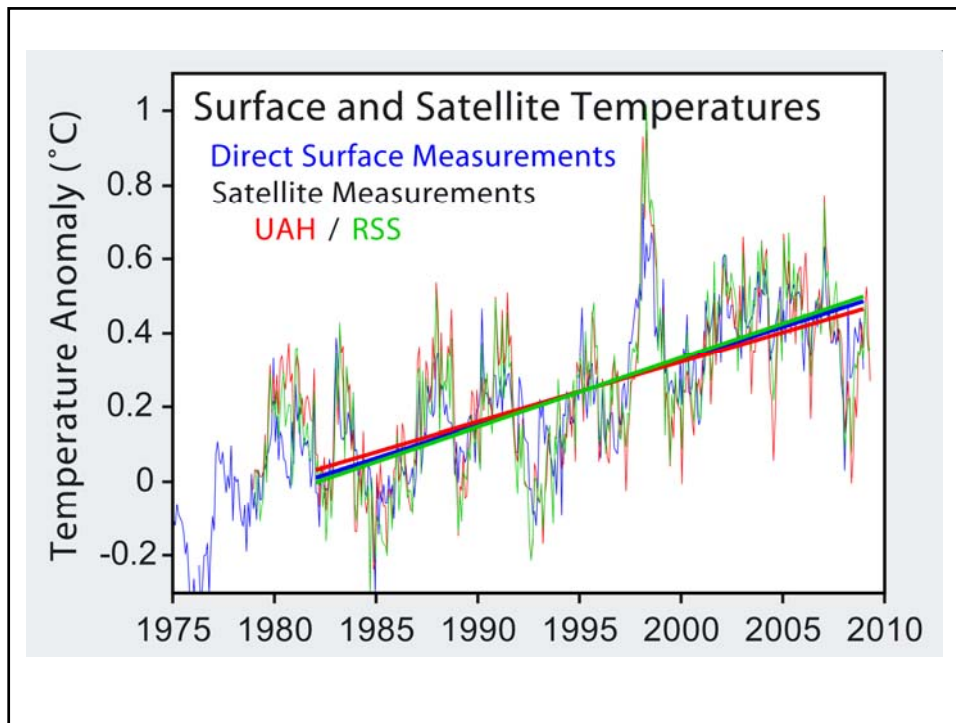
PECCATO: ERA
UN PIANETA
COSI' COMPETITIVO!

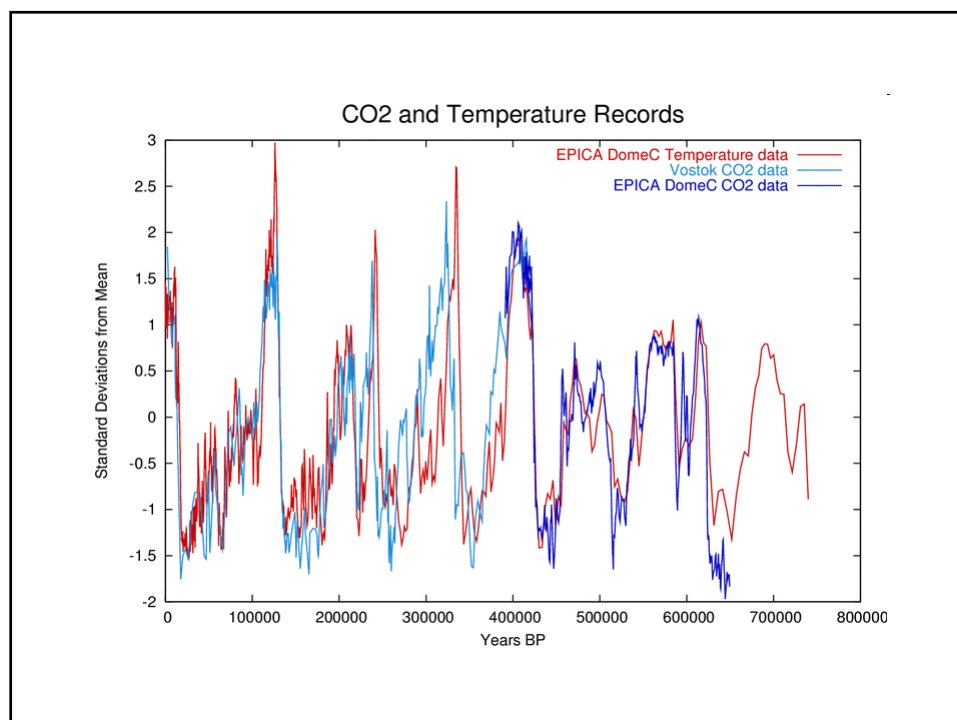
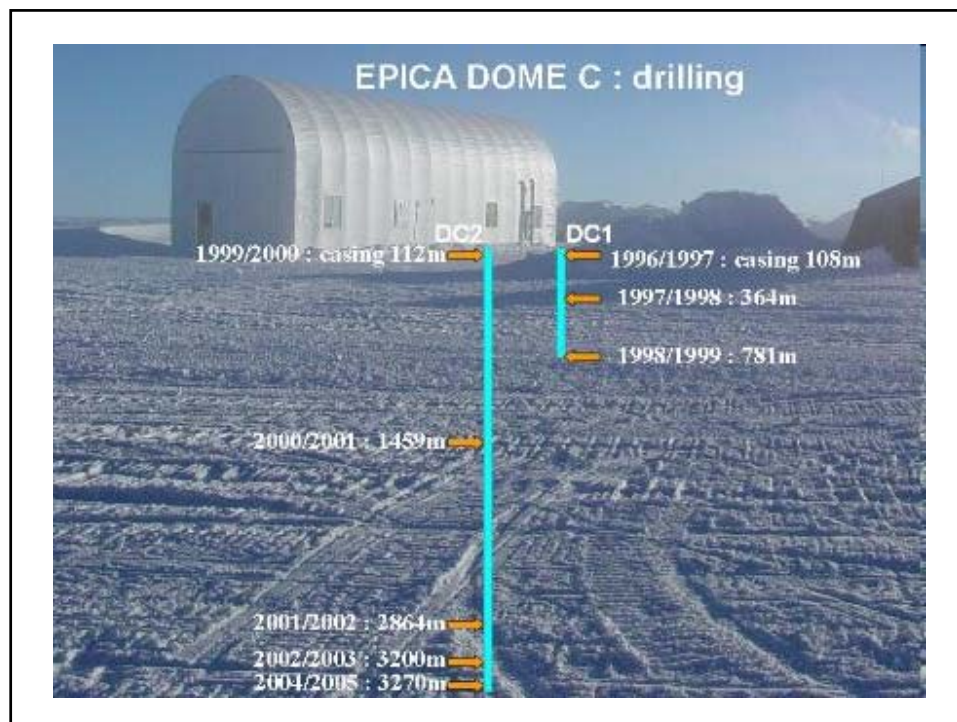


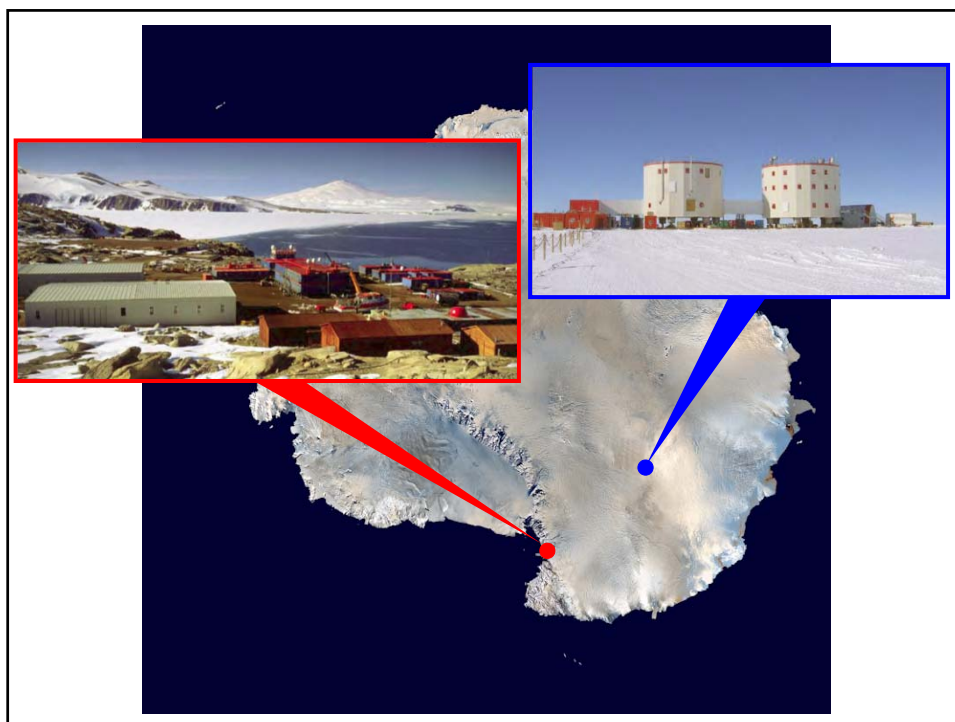
Il ciclo del carbonio...

- è alla base della vita sul nostro pianeta
- è governato da svariati da processi chimici, fisici e - soprattutto - biotici
- è influenzato dalle attività antropiche
- su scala globale è strettamente legato al clima
- oggi è diventato di grande interesse generale per gli ultimi due motivi!



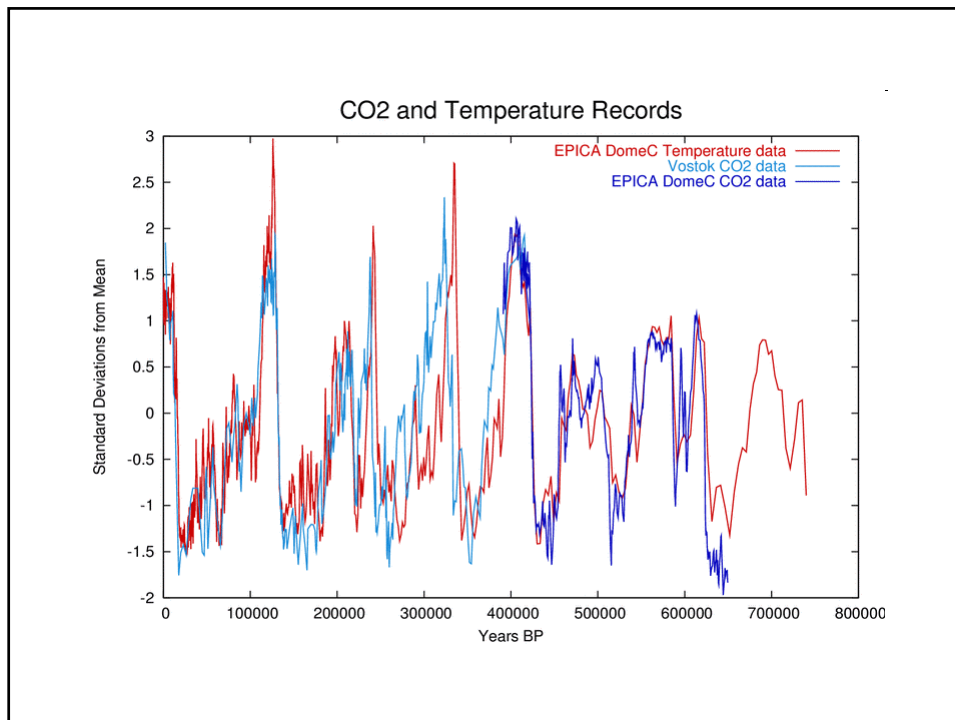






http://www.csna.it/Documenti/PNRA_20_anni_web.pdf

<http://www.pnra.it>



Cambiamenti climatici

1950



2007



Imja Glacier, Nepal

Cambiamenti climatici

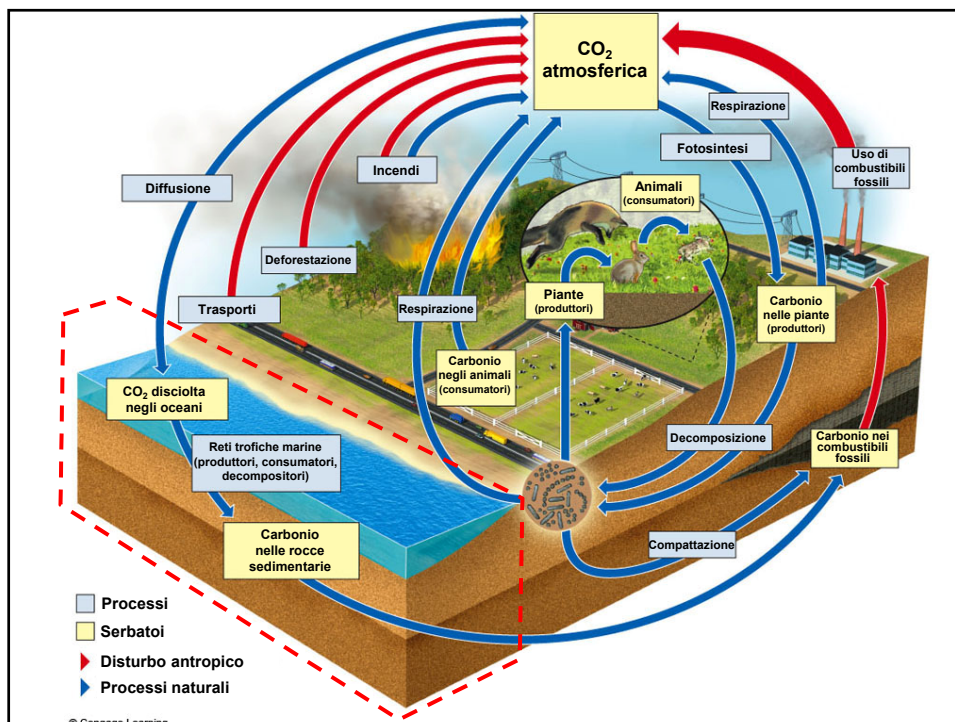
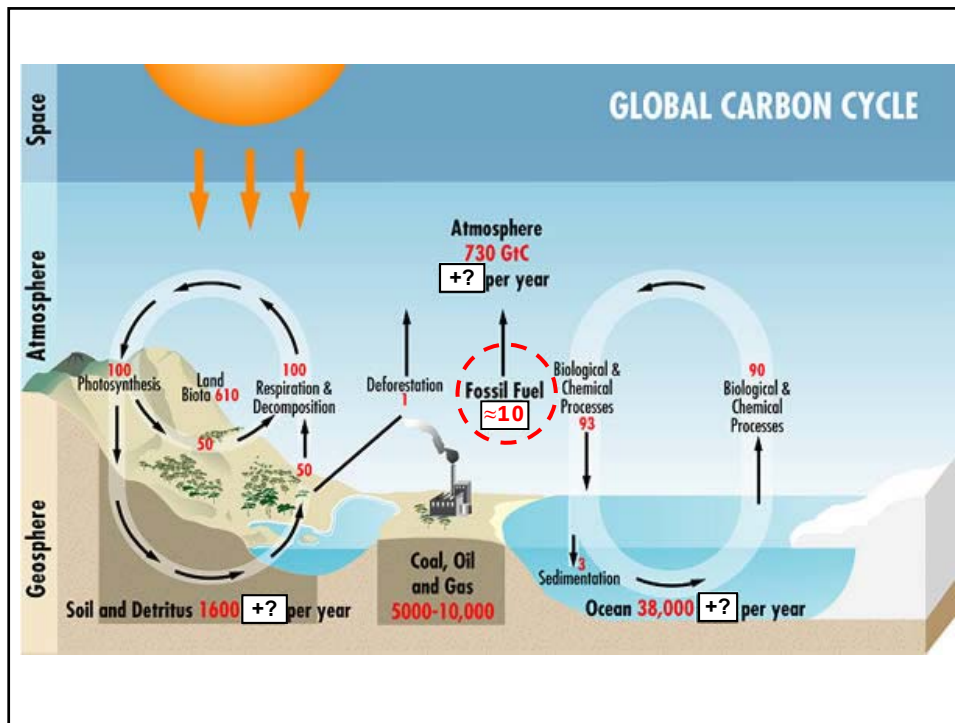


2010

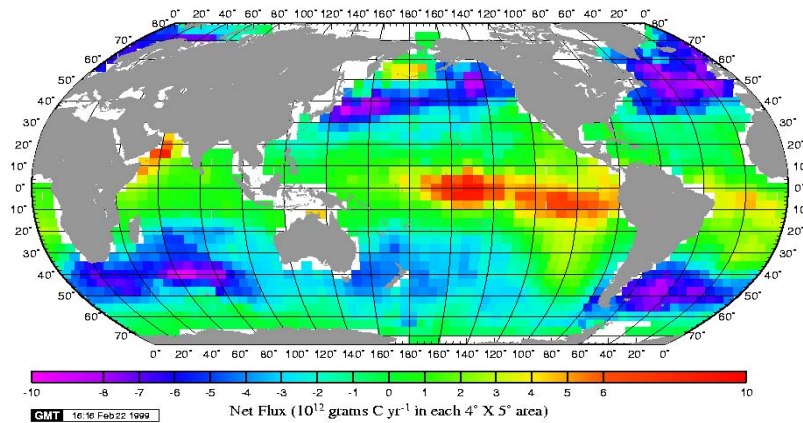
2110?

Cambiamenti climatici



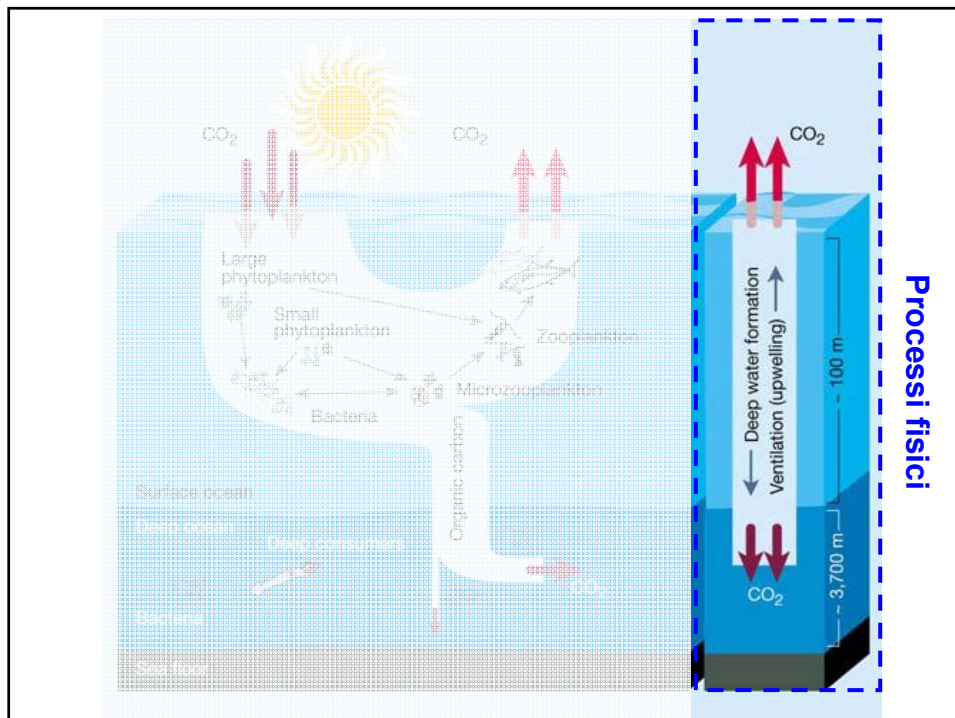


Gli oceani “respirano”?



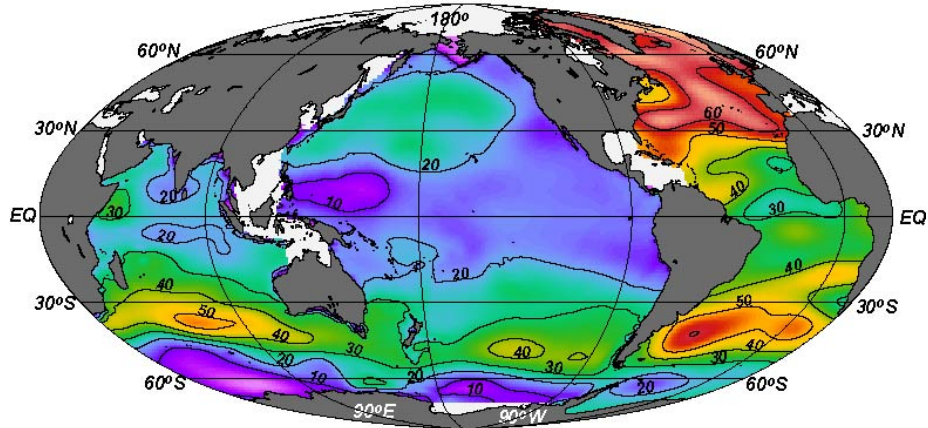
Gli oceani sono sia sorgenti che depositi di CO_2

- Pompa biologica: uptake di CO_2
- Pompa di solubilità: più CO_2 nelle acque fredde



Circa il 40% della CO₂ di origine antropica viene assorbita dall'Oceano Meridionale

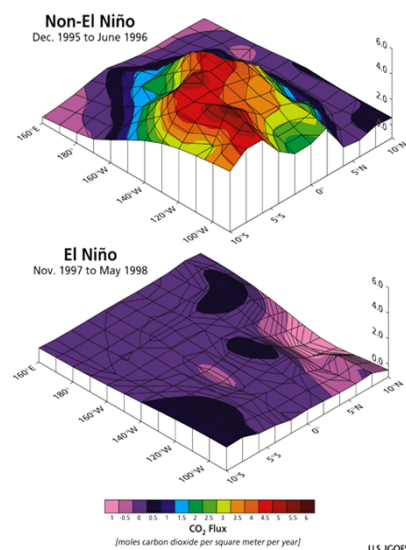
Anthropogenic CO₂ Column Inventory (mol m⁻²)



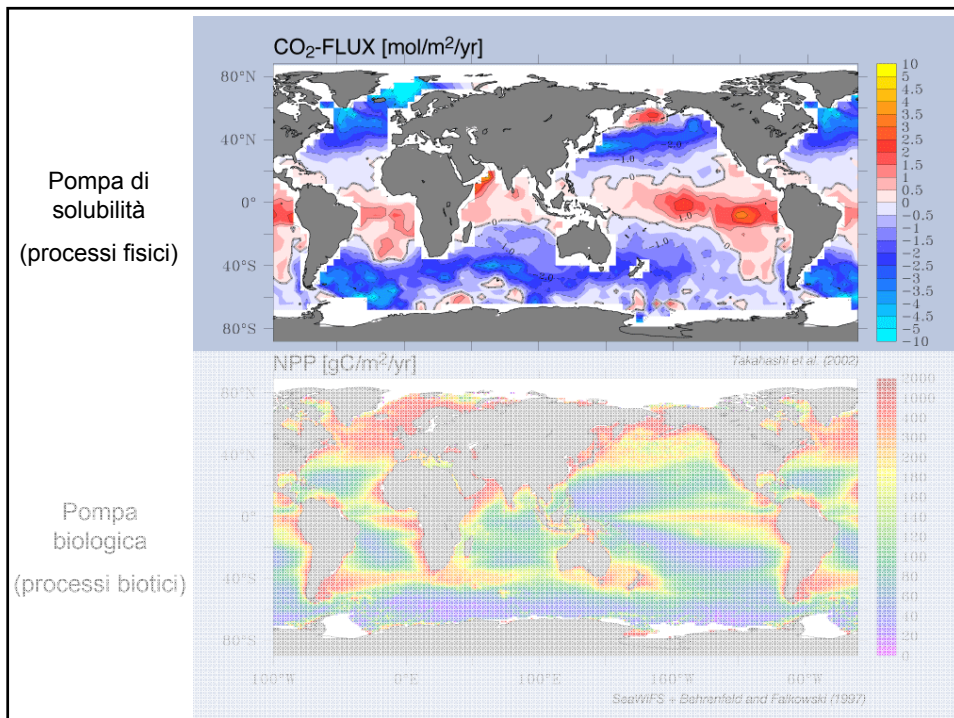
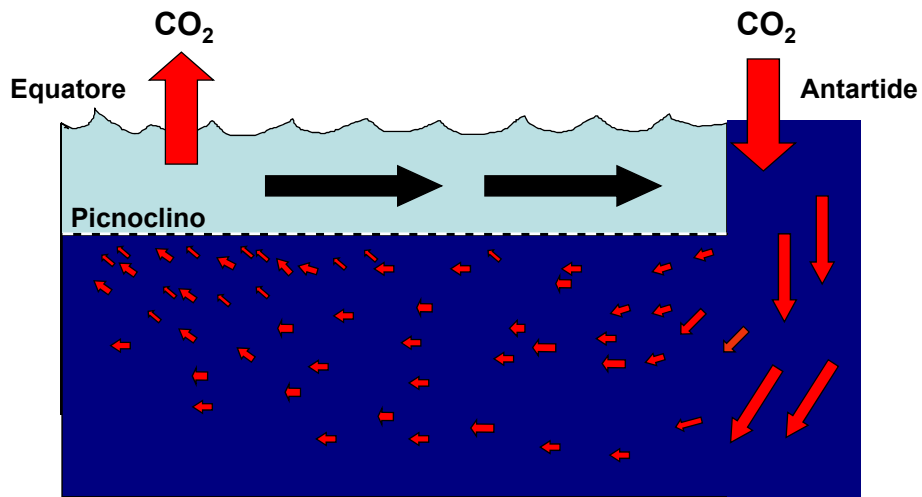
Sabine et al., 2004

La pompa di solubilità

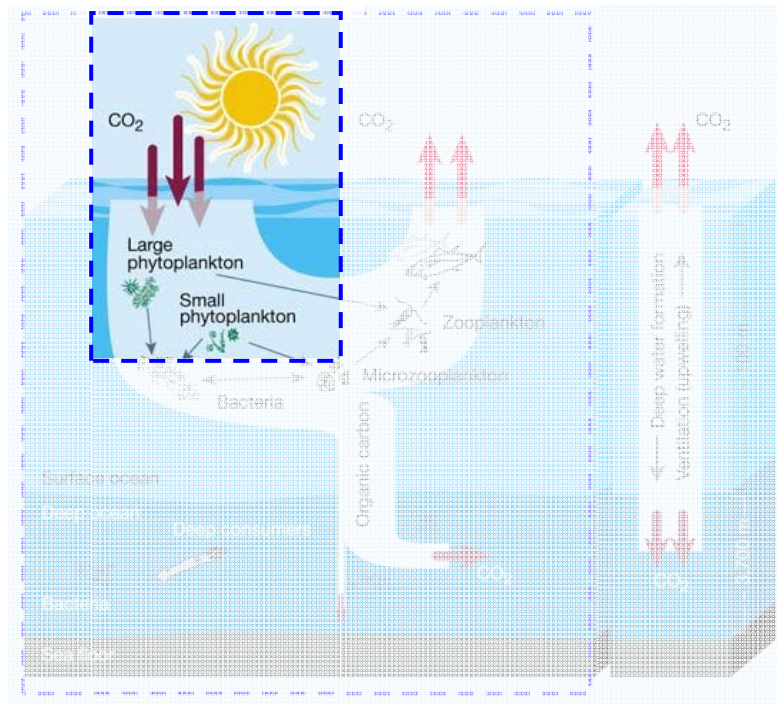
- segno e valore del flusso netto di CO₂ dipendono dalle differenze aria-acqua
- la solubilità è maggiore nelle acque fredde (le regioni polari assorbono, quelle equatoriali emettono)



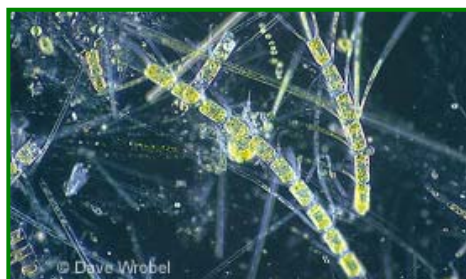
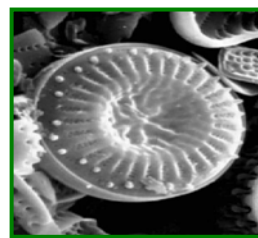
La pompa di solubilità



Processi biologici

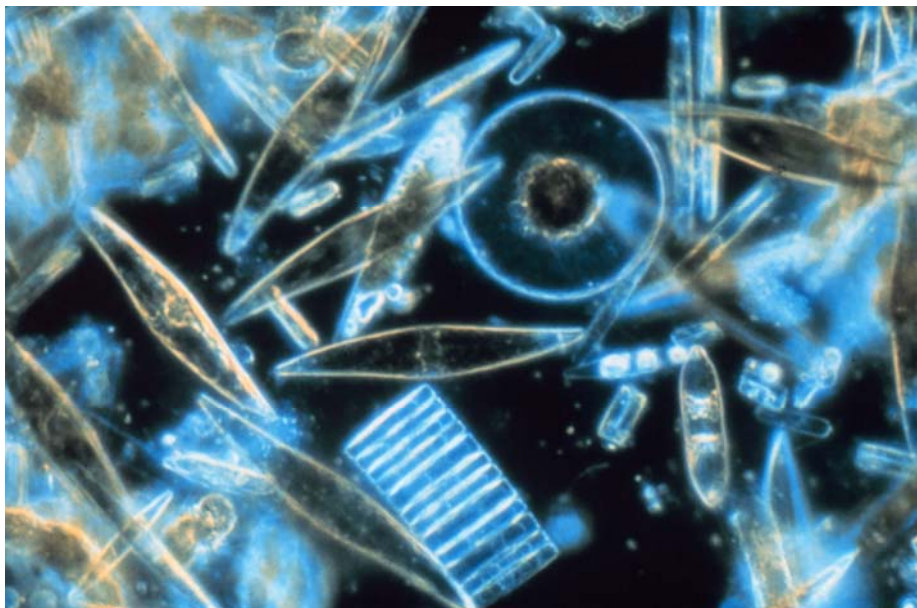


Fitoplancton





Ceratium pentagonum



Diatomee



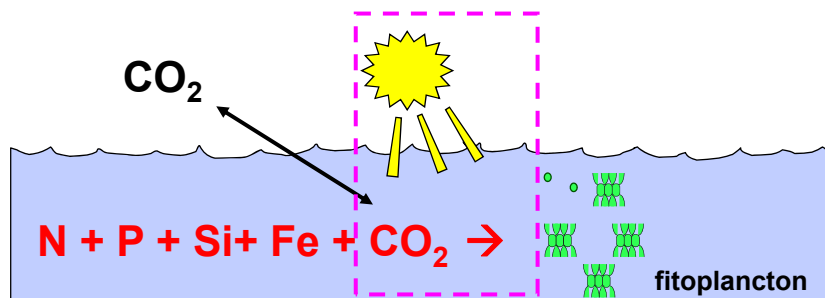
Fitoflagellati (*Dunaliella salina*, che non è una specie antartica, e *Phaeocystis antarctica*, nel riquadro)

Fotosintesi

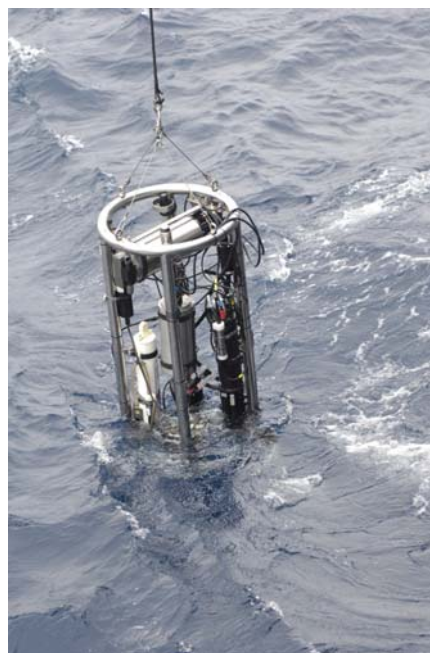


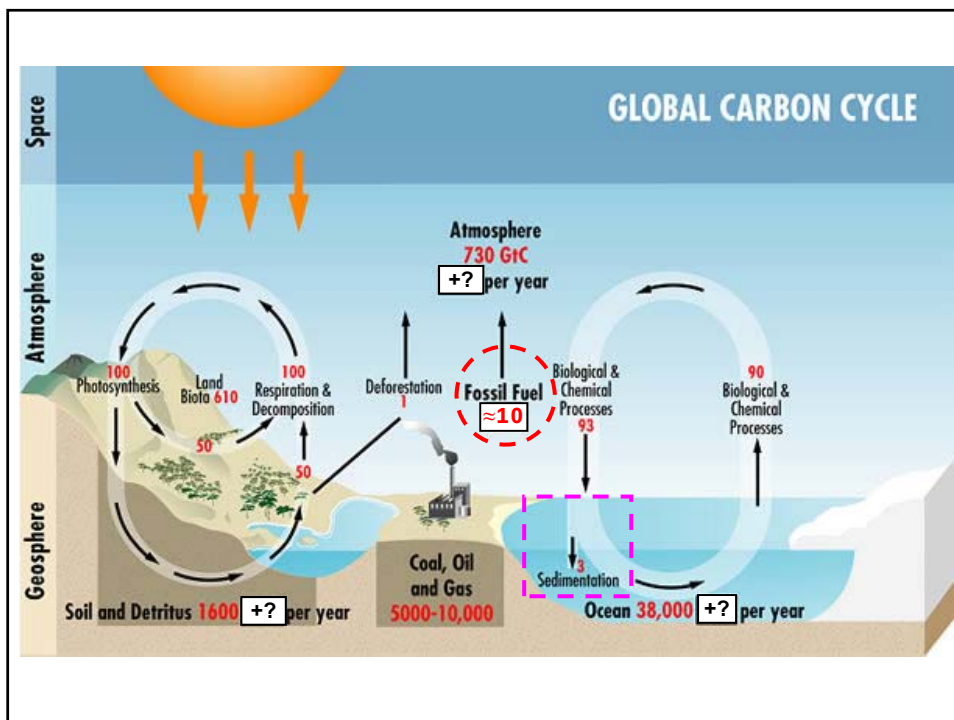
$\text{CO}_2 + \text{acqua} + \text{luce} \rightarrow \text{carboidrati} + \text{ossigeno}$

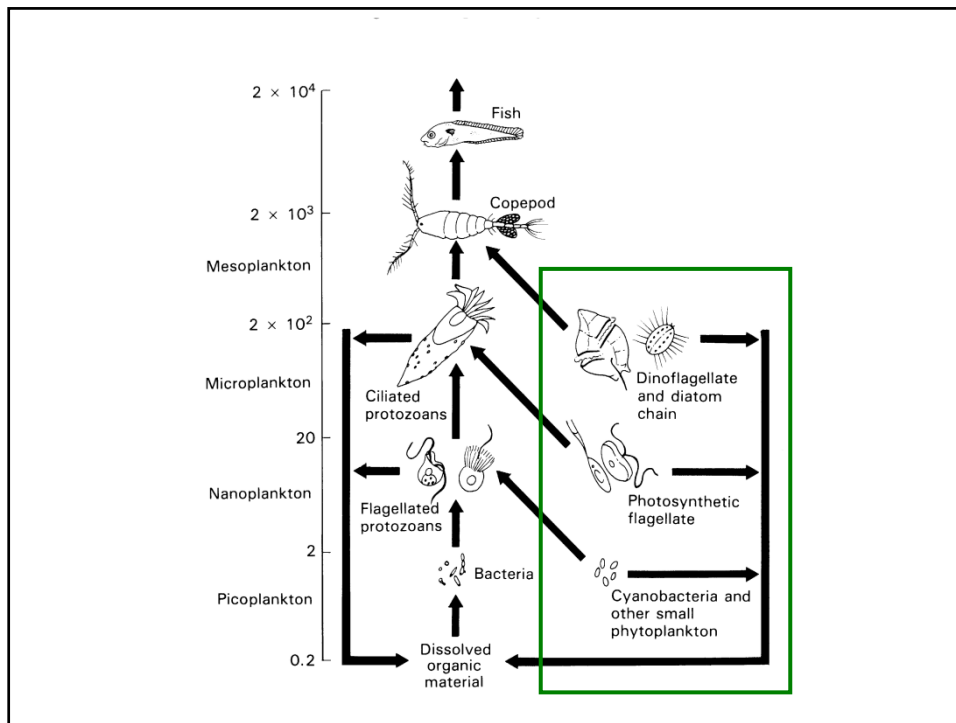
Produzione primaria



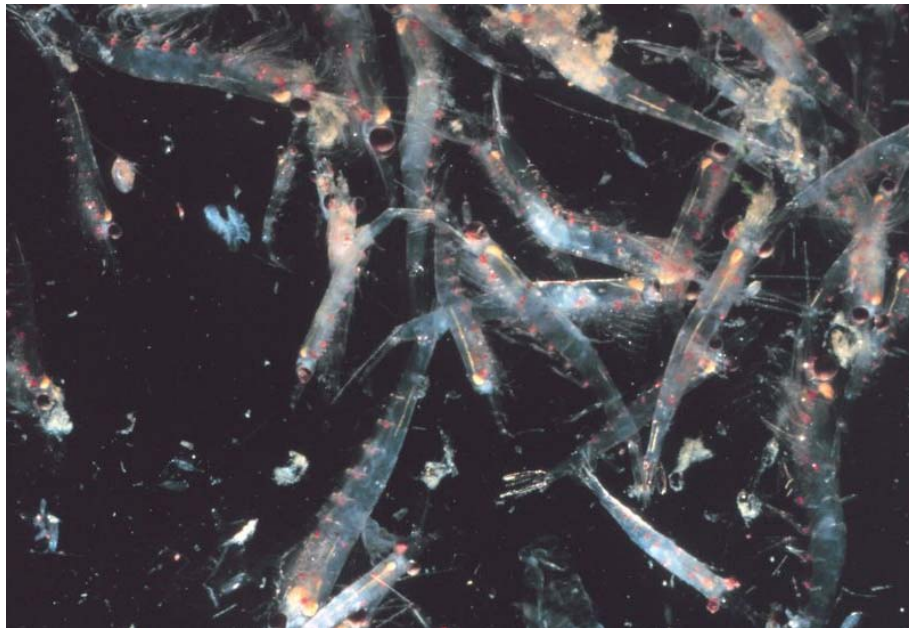
Tecnica	Componente della PP misurata	Scala temporale
<i>In vitro</i>		
Assimilazione di C^{14**}	$P_T (\equiv P_n)$	Ore, 1 giorno*
Evoluzione di O_2	P_T	Ore, 1 giorno*
Assimilazione di $^{15}NO_3$	P_{new}	Ore, 1 giorno*
Assimilazione di $^{15}NH_4$	P_r	Ore, 1 giorno*
Evoluzione di $^{18}O_2$	$P_{new} (\equiv P_c)$	Ore, 1 giorno*
<i>Proprietà di massa</i>		
Flusso di NO_3 nella zona fotica	P_{new}	Ore, giorni
Accumulo netto di O_2 nella zona fotica	P_{new}	Stagionale, annuale
<i>Proprietà ottiche</i>		
Fluorescenza modulata o indotta (doppio flash)	P_T	< 1sec.
Fluorescenza passiva o naturale	P_T	< 1 sec.
Telerilevamento	P_T, P_{new}	Giorni, anni
<i>Limiti superiore ed inferiore</i>		
Tasso di sedimentazione al di sotto della zona fotica	$P_{new} (\equiv P_c)$: limite inferiore	Giorni, mesi
Conversione ottimale dell'energia dei fotoni assorbili	P_T : limite superiore	Istantanea, annuale
Deplezione dell'accumulo invernale di NO_3	P_{new} : limite inferiore	Stagionale



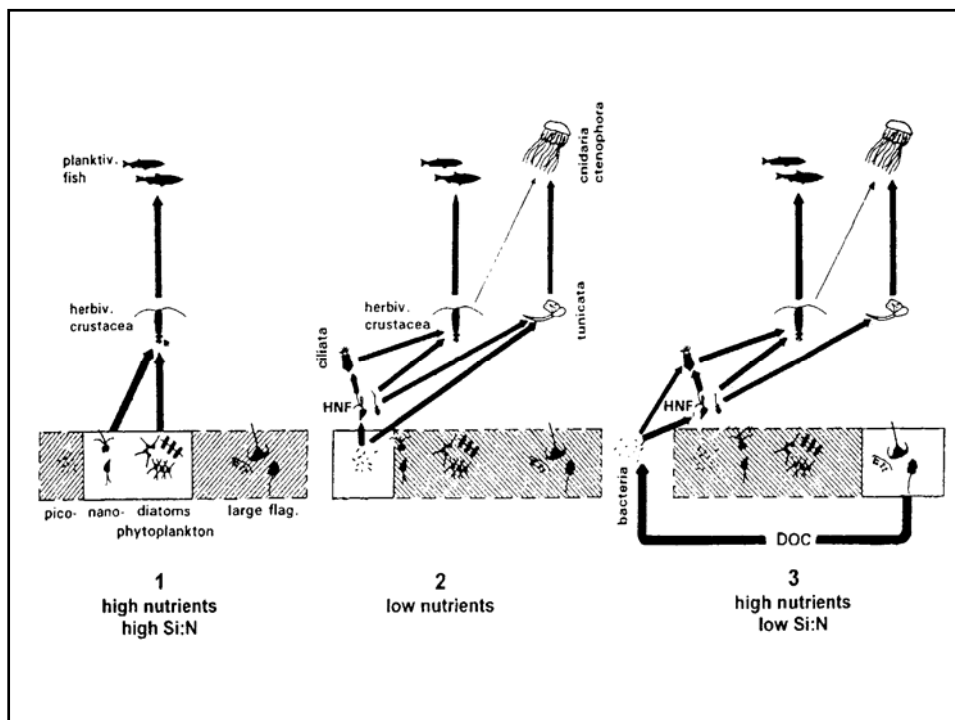




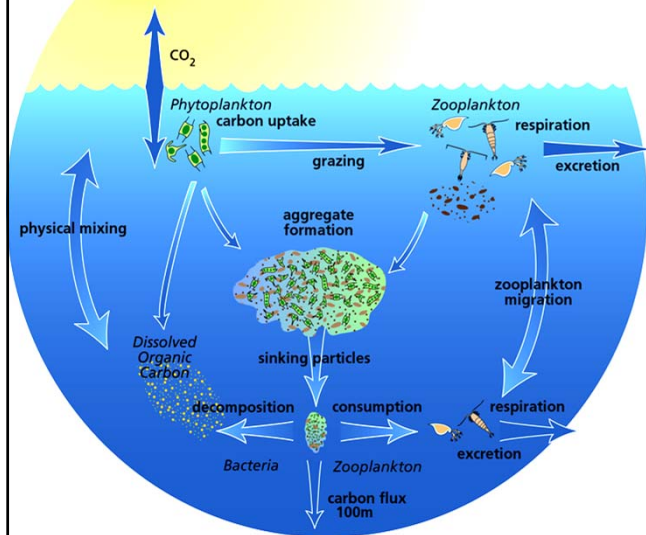
Calanus simillimus



Krill (*Euphausia superba*)



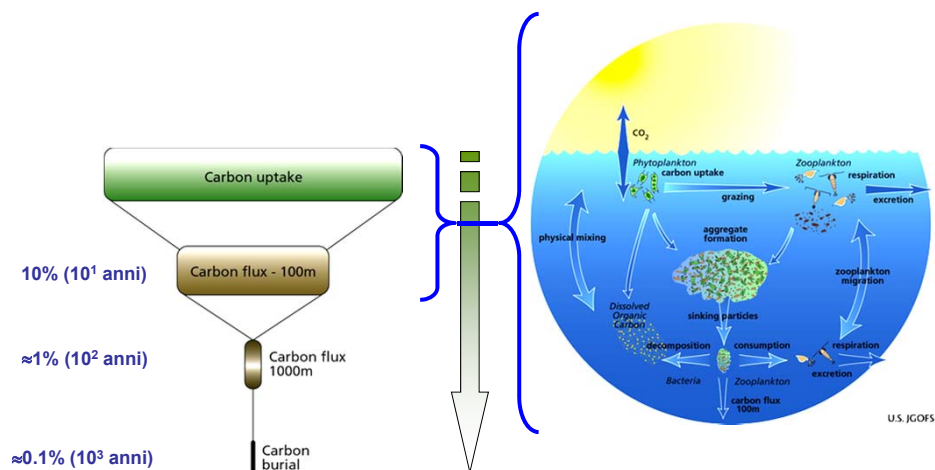
La pompa biologica

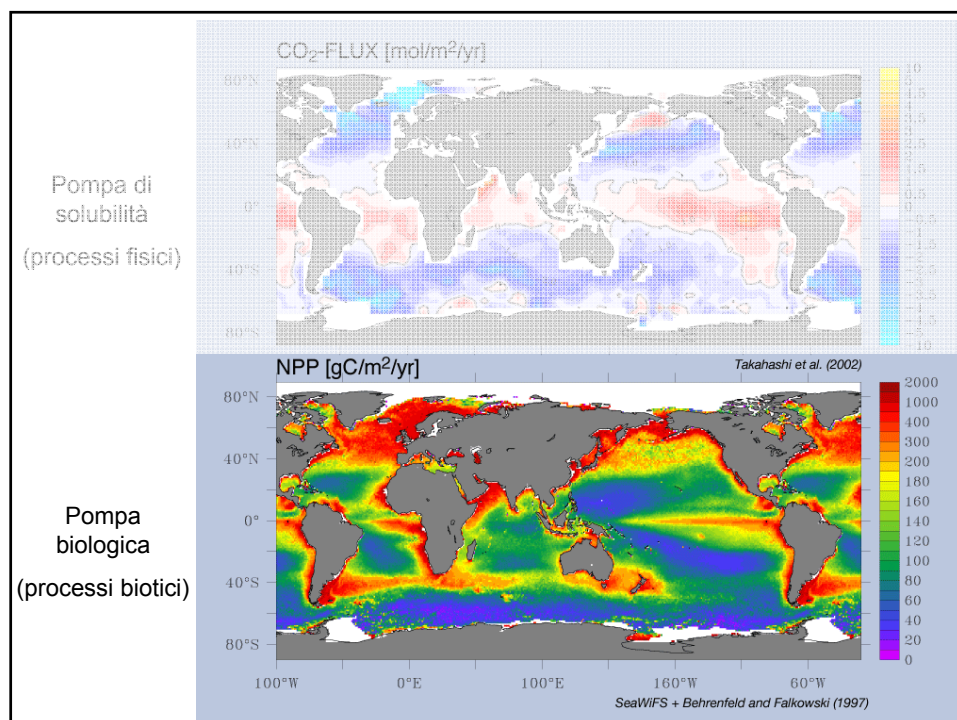
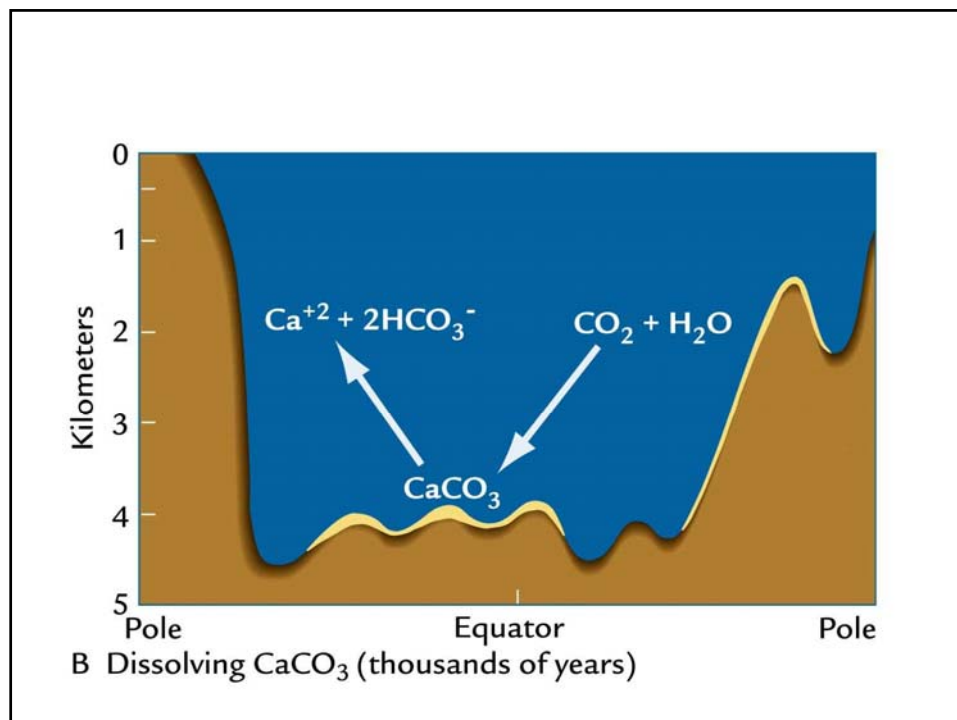


I processi biologici trasferiscono sostanza organica ed inorganica verso gli strati profondi ed il sedimento

Se si fermasse la pompa biologica degli oceani avremmo un incremento di 200 ppm di CO_2 nell'atmosfera

Efficienza della pompa biologica





Perché è importante studiare l'Oceano Meridionale?

(NB: per un ecologo interessato al ciclo del carbonio!)

Produzione primaria fitoplanctonica per bacino

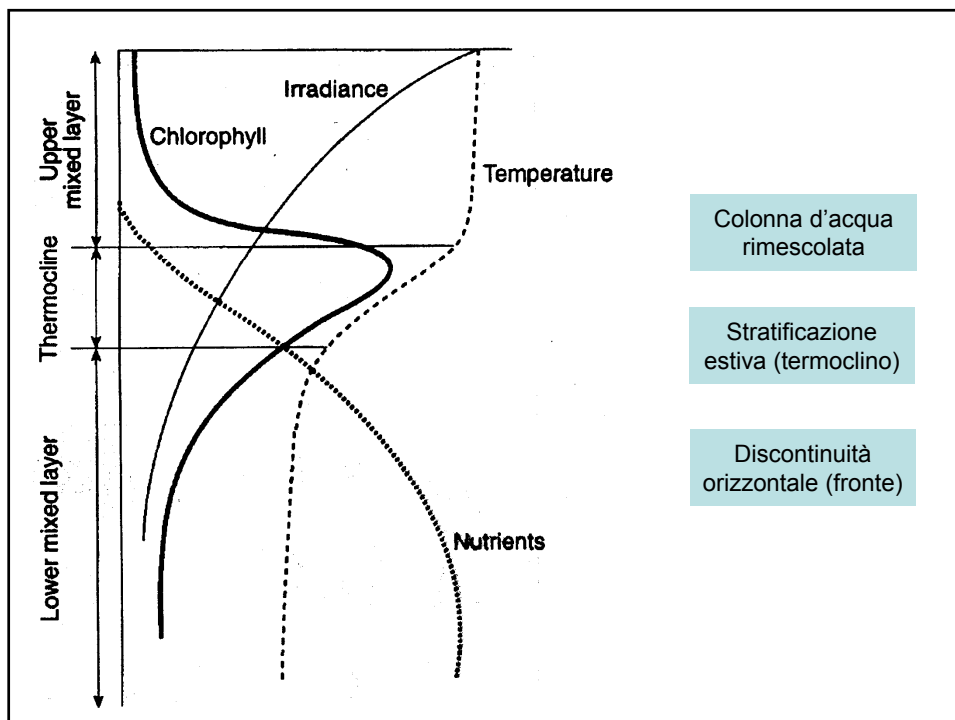
BASIN	AREA	MEAN (%)	MIN	MAX
	%	Gt C y ⁻¹		
Pacific	42	20 (41)	14	30
Atlantic	21	12 (26)	8	18
Indian	14	9 (18)	5	14
Southern	22	6.5 (13)	3	11
Arctic	1.1	0.26 (0.5)	0.04	0.6
Med.	0.8	0.51 (1)	0.28	0.74

L'intervallo delle stime per l'Oceano Meridionale è:

- il più ampio in termini percentuali (>100% della media delle stime)
- all'incirca uguale al totale delle immissioni di CO₂ di origine antropica

Cosa controlla la produzione primaria nell'Oceano Meridionale?

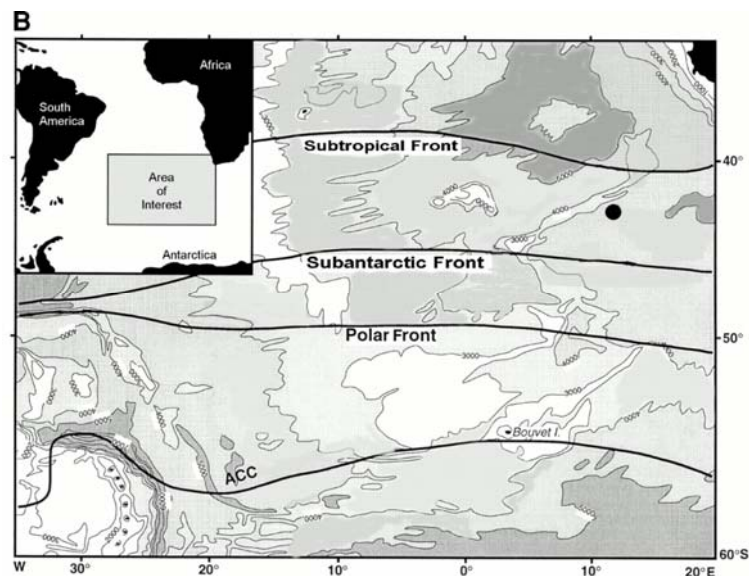
- Irradianza (e trasparenza)
- Temperatura (e dinamica dei ghiacci)
- Macro-nutrienti (N, P, Si)
 - Uso dei macro-nutrienti in condizioni HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll)
 - Variazioni nel *Redfield Ratio* (il rapporto C:N:P nel fitoplancton e nelle acque profonde tende ad essere 116:16:1)
- Micro-nutrienti (a dopo)



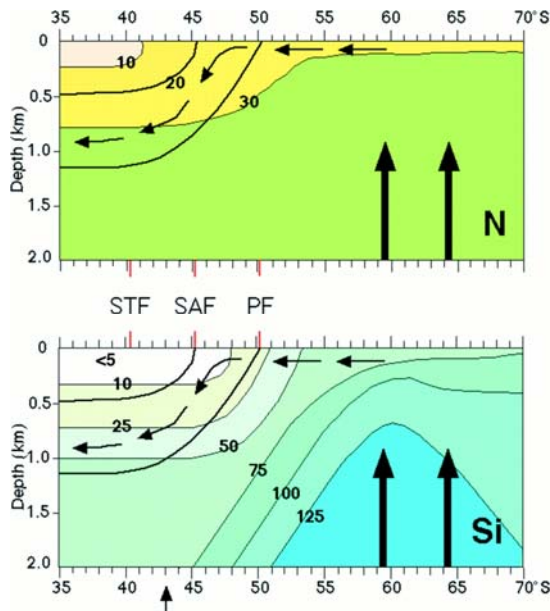
Cosa controlla la produzione primaria nell'Oceano Meridionale?

- Irradianza (e trasparenza)
- Temperatura (e dinamica dei ghiacci)
- Idrodinamismo e struttura della colonna d'acqua
- Macro-nutrienti (N, P, Si)
 - Uso dei macro-nutrienti in condizioni HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll)
 - Variazioni nel *Redfield Ratio* (il rapporto C:N:P nel fitoplancton e nelle acque profonde tende ad essere 116:16:1)
- Micro-nutrienti (a dopo)

Condizioni HNLC nell'Oceano Meridionale



Condizioni HNLC

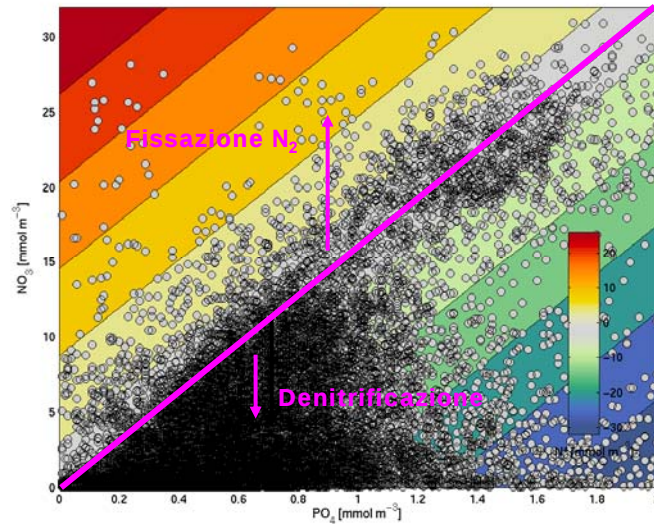


Concentrazioni di nutrienti sempre elevate, ma bassa biomassa fitoplanctonica (es. 0.2-0.4 $\mu\text{g/L}$)

Cosa controlla la produzione primaria nell'Oceano Meridionale?

- Irradianza (e trasparenza)
- Temperatura (e dinamica dei ghiacci)
- Idrodinamismo e struttura della colonna d'acqua
- Macro-nutrienti (N, P, Si)
 - Uso dei macro-nutrienti in condizioni HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll)
 - Variazioni nel *Redfield Ratio* (il rapporto C:N:P nel fitoplancton e nelle acque profonde tende ad essere 116:16:1)
- Micro-nutrienti (a dopo)

Redfield ratio

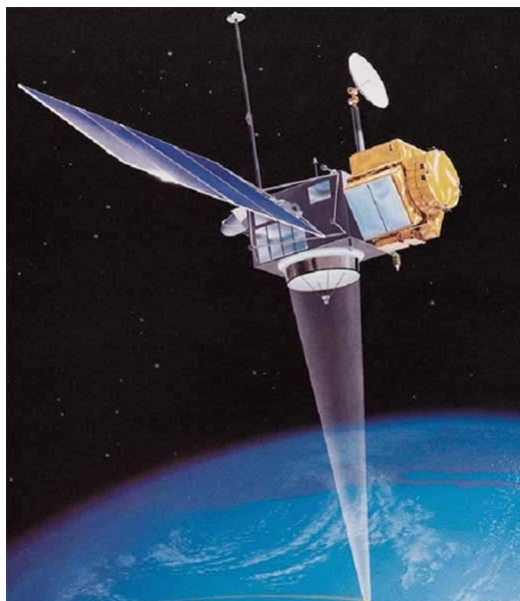


N = 25790

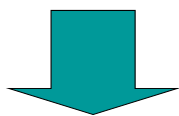
Come si studia
la produzione primaria?

(nell'Oceano Meridionale,
ma non solo)

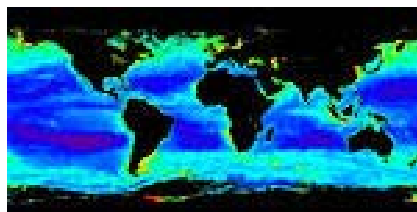
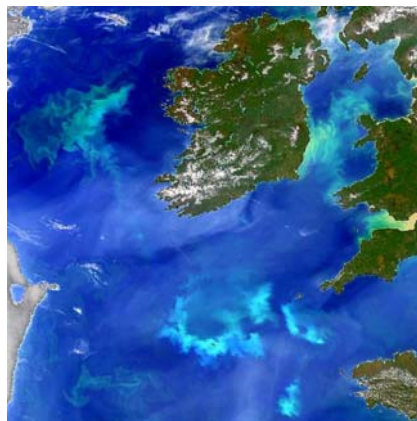
Telerilevamento

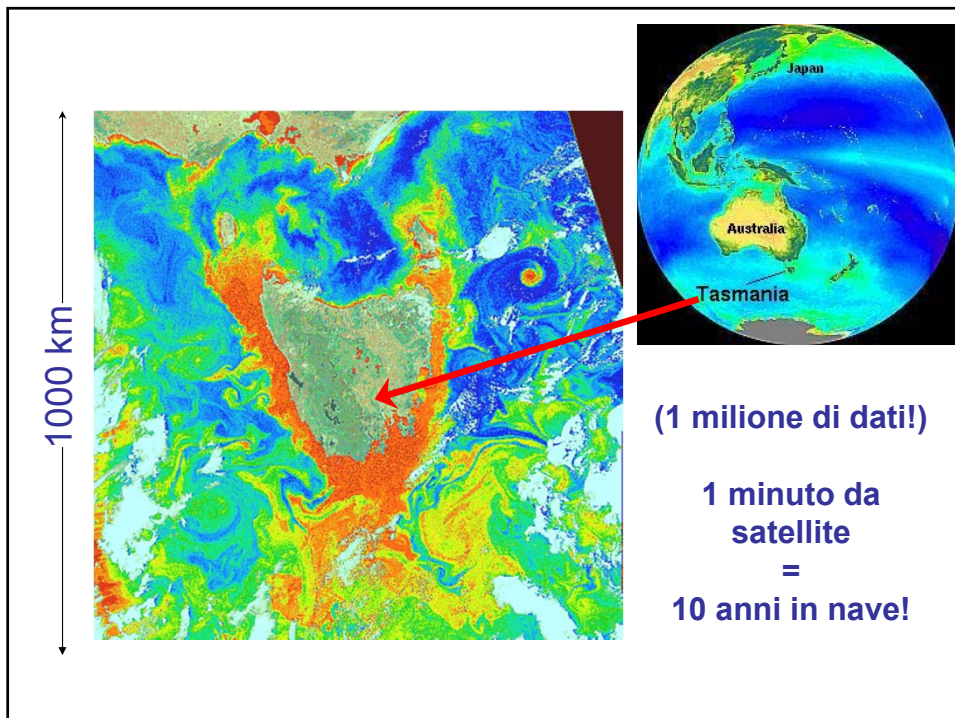
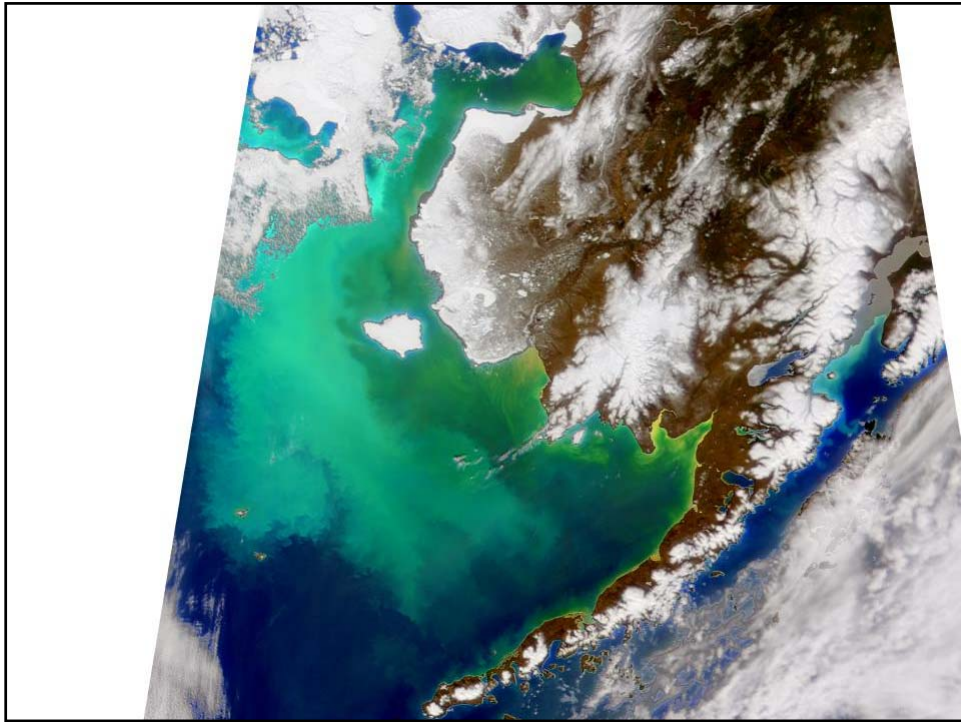


**SeaWiFS
8 bande
(visibile e NIR)**



**Stima della
concentrazione
della clorofilla**





A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color

Mary-Elena Carr^{a,*}, Marjorie A.M. Friedrichs^{b,bb}, Marjorie Schmeltz^a, Maki Noguchi Aita^c, David Antoine^d, Kevin R. Arrigo^e, Ichio Asanuma^f, Olivier Aumont^g, Richard Barber^h, Michael Behrenfeldⁱ, Robert Bidigare^j, Erik T. Buitenhuis^k, Janet Campbell^l, Aurea Ciotti^m, Heidi Dierssenⁿ, Mark Dowell^o, John Dunne^p, Wayne Esaias^q, Bernard Gentili^d, Watson Gregg^q, Steve Groom^r, Nicolas Hoepffner^o, Joji Ishizaka^s, Takahiko Kameda^t, Corinne Le Quéré^{k,u}, Steven Lohrenz^v, John Marra^w, Frédéric Mélin^o, Keith Moore^x, André Morel^d, Tasha E. Reddy^c, John Ryan^y, Michele Scardi^z, Tim Smyth^r, Kevin Turpie^q, Gavin Tilstone^r, Kirk Waters^{aa}, Yasuhiro Yamanaka^c

PPARR3 e PPARR4

Vertically Generalized Production Model (VGPM) (Behrenfeld & Falkowski, 1997)

$$\Sigma PP := 0.66125 \cdot P_{b_opt} \cdot \frac{I_0}{I_0 + 4.1} \cdot Chl \cdot Z_{eu} \cdot Dl$$

Where:

$$Chl_{tot}(Chl) := \text{if}(Chl < 1.0, 38.1, 0.507 \cdot Chl)$$

$$Z_{eu}(Chl) := \text{if}\left[56 \cdot \left(\frac{Chl_{tot}(Chl)}{100}\right)^{0.507}, 56\right]$$

$$P_{b_opt}(SST) := \text{if}\left[5 \cdot 10^{-2} \cdot SST^3 \dots, 0.1\right]$$

VGPM can be

$$\Sigma PP(Chl, I_0, SST, Dl) := 0.66125 \cdot P_{b_opt}(SST) \cdot \frac{I_0}{I_0 + 4.1} \cdot Chl \cdot Z_{eu}(Chl) \cdot Dl$$

E.g.: $\Sigma PP(.601, 0.1, 13.83, 13.21) = 29.095$

$$PP = f(I_0, B_0, Z_p, \text{fotoperiodo}, P_B^{opt})$$

$$Z_p = f(B_0)$$

$$P_B^{opt} = f(SST)$$

Modello HYR

(Howard, Yoder, Ryan)

$$PP=f(E_0,T,chl,MLD)$$

1. Maximum rate of primary production as a function of temperature (Eppley 1972) :

$$P_{max} = P_0 e^{rT} \quad [mg\ C\ (mg\ chl)^{-1}\ d^{-1}]$$

Where T is SST in °C, P_0 is P_{max} at 0°C (= 24), and $r = .09\ ^\circ C^{-1}$.

2. PAR attenuation coefficient (Nelson and Smith 1991) :

$$K_{PAR} = 0.04 + (0.0088 * chl) + (0.054 * chl)^{(2/3)} \quad [m^{-1}]$$

3. Mean irradiance of the mixed layer (Riley 1957) :

$$E_{MLD} = \frac{E_0 (1 - e^{-K_{PAR} * MLD})}{K_{PAR} * MLD} \quad [watts\ m^{-2}]$$

4. Mean primary production for the mixed layer (Platt and Jassby 1976; mean α taken from Platt et al. 1991)

$$Ps_z = chl * \left[\frac{P_{MAX} * E_{MLD}}{P_{MAX} / \alpha + E_{MLD}} \right] \quad [mg\ C\ m^{-3}\ d^{-1}]$$

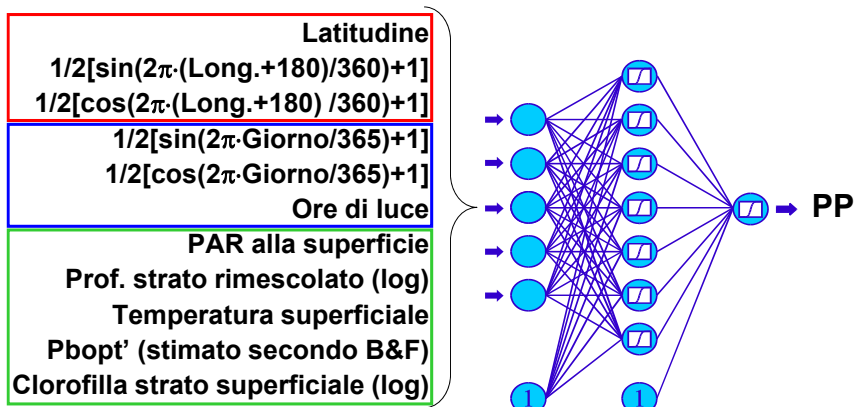
$$\alpha = 2.64\ mg\ C\ (mg\ chl)^{-1}\ d^{-1}\ (wm^2)^{-1}$$

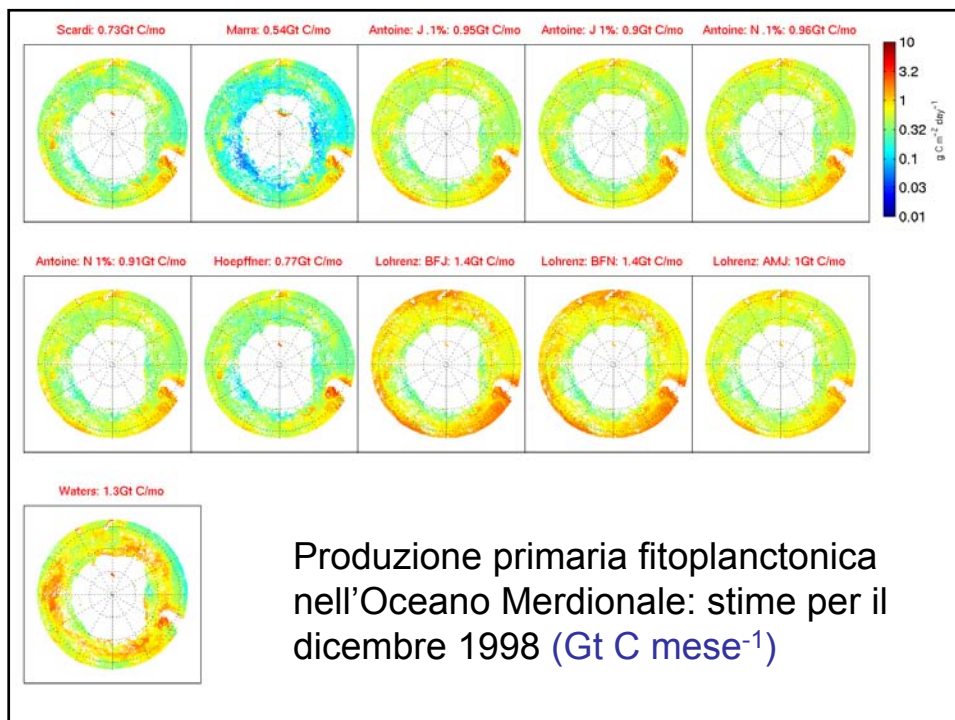
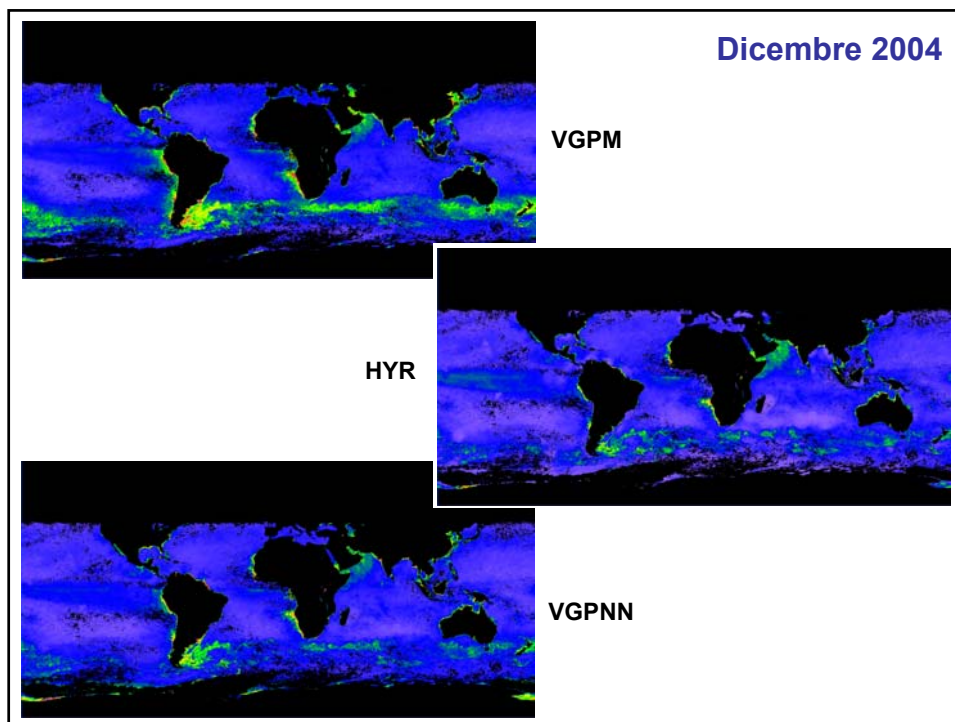
5. Primary production per unit area :

$$PP = Ps_z * MLD \quad [mg\ C\ m^{-2}\ d^{-1}]$$

Un (meta)modello innovativo: VGPNN

Vertically Generalized Production Neural Network
(Scardi, 2001)



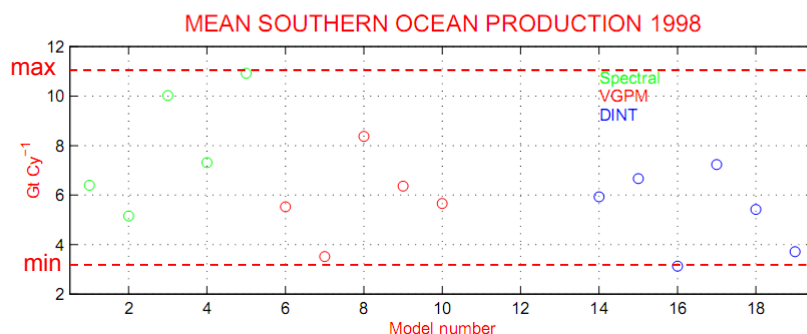


REGIONAL PRODUCTION

Mean production ($<40^{\circ}\text{S}$) for 1998 is 6.1 Gt C y^{-1} .

Standard deviation of the mean is 2.4 Gt C y^{-1} (40%)

Range of model estimates is 8 Gt C y^{-1} , comparable to the seasonal range for most models.

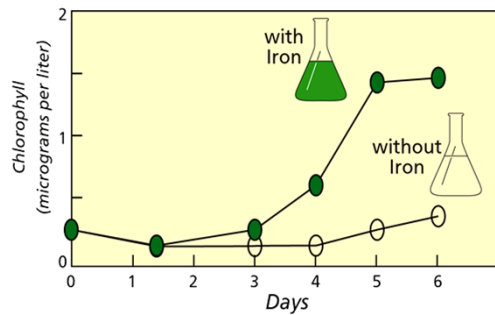


Cosa controlla la produzione primaria nell'Oceano Meridionale?

- Irradianza (e trasparenza)
- Temperatura (e dinamica dei ghiacci)
- Idrodinamismo e struttura della colonna d'acqua
- Macro-nutrienti (N, P, Si)
 - Uso dei macro-nutrienti in condizioni HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll)
 - Variazioni nel *Redfield Ratio* (il rapporto C:N:P nel fitoplancton e nelle acque profonde tende ad essere 116:16:1)
- Micro-nutrienti (es. Fe)

Cosa controlla la produzione primaria fitoplanctonica e quindi l'uptake di carbonio?

- Luce
- Temperatura
- Struttura della colonna d'acqua
- Macro-nutrienti (N, P, Si)
- Erbivori
- Micro-nutrienti (es. **Fe**, Zn)

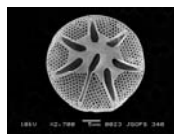


Joseph Hart (GB), ~1930

Il ruolo giocato dal ferro dipende dalla composizione del popolamento fitoplanctonico

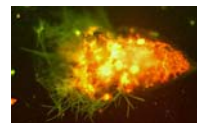
Alle alte latitudini:

- giocano un ruolo importante i blooms primaverili
- l'efficienza fotosintetica è alta
- dominano le grandi diatomee
- Il ruolo degli erbivori nell'export di C è minore
- alta richiesta di Fe



Regioni equatoriali ed oligotrofiche:

- bassa efficienza fotosintetica
- struttura delle reti trofiche più complessa (es. microbial loop)
- piccoli fitoflagellati ed erbivori molto efficienti
- bassa richiesta di Fe



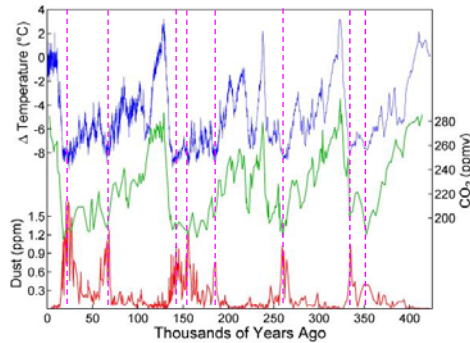
Il ferro come fattore di controllo

- Il 40% degli oceani è di tipo “HNLC”
- I dati paleoclimatici supportano l'ipotesi di una limitazione da ferro:

alte concentrazioni di
polveri (e ferro)



basse concentrazioni
di CO₂ e basse
temperature



“Give me half a tanker of iron and I'll give you the next ice age”
(John Martin, 1935-1993, in una presentazione alla WHOI, 1991)

Ottobre 2000



“ Just Add Iron “
ABC News

“Iron May Increase Gas - Eating Algae”
Associated Press

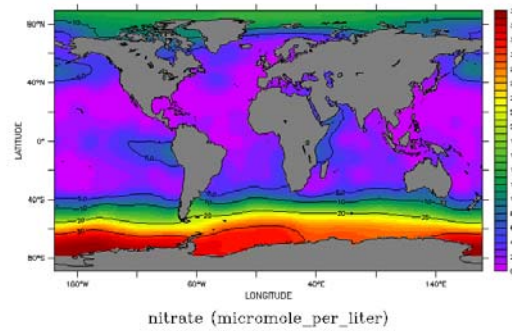
“Iron-Fed Plankton Absorbs Greenhouse Gases”
NY Times

“How algae may slow warming “
Boston Globe

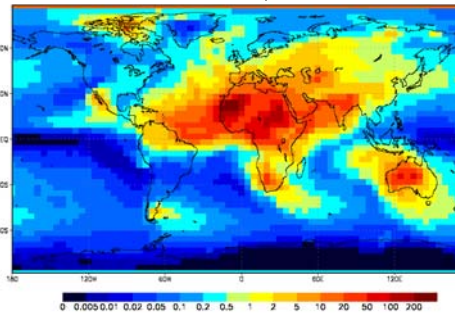
“Helping ocean algae could beat greenhouse effect“
Reuters

Perché l'Oceano Meridionale?

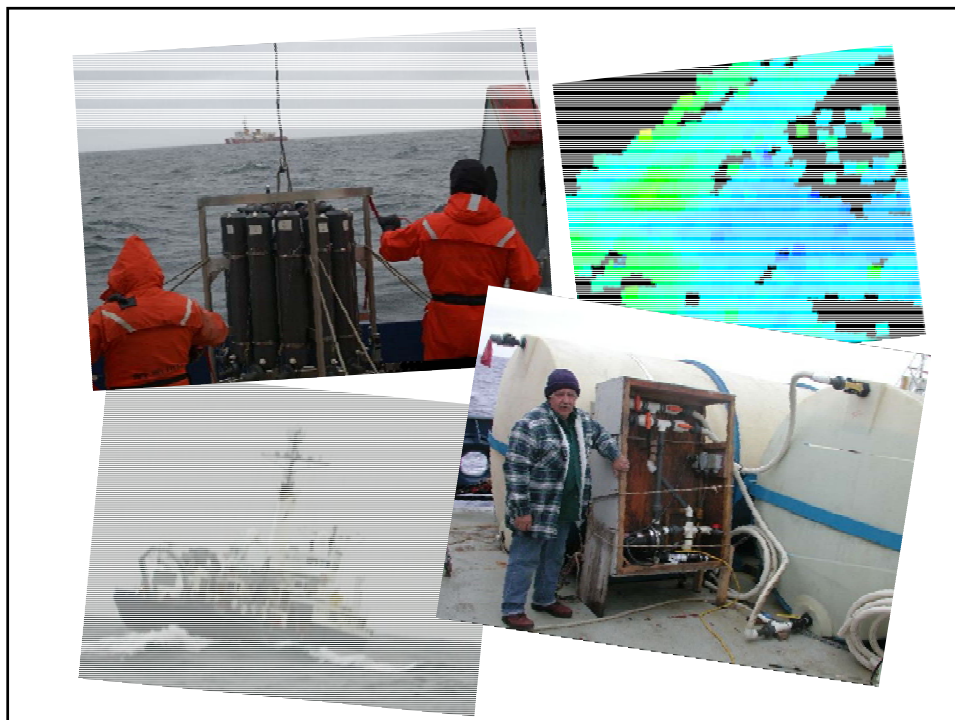
Molti nutrienti



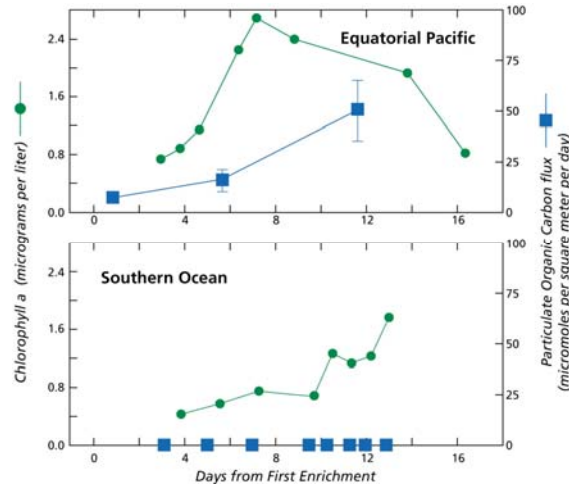
Mahowald et al. Modelled dust deposition ($\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)
Present Day



Poco ferro



Esperimenti di fertilizzazione con ferro



Più biomassa fitoplanctonica, ma non necessariamente maggior flusso discendente di carbonio nell'O.M.!

Esperimenti di fertilizzazione con ferro su grande scala (ad oggi)

- **Ironex I**, 1993
- **Ironex II**, 1995
- **SOIREE** (Southern Ocean Iron Enrichment Experiment), 1999
- **EisenEx** (Iron Experiment), 2000
- **SEEDS** (Subarctic Ecosystem Dynamics Study), 2001
- **SOFEX** (Southern Ocean Iron Experiments - North & South), 2002
- **SERIES** (Subarctic Enrichment Study), 2003
- **SEEDS-II**, 2004
- **EIFEX** (European Iron Experiment), 2005
- **CROZEX** (CROZet natural iron bloom and Export experiment), 2005
- **LOHAFEX**, 2009

Bloom evidente e duraturo

Incremento di biomassa 3x, condimento sfavorevoli

Bloom di modeste proporzioni

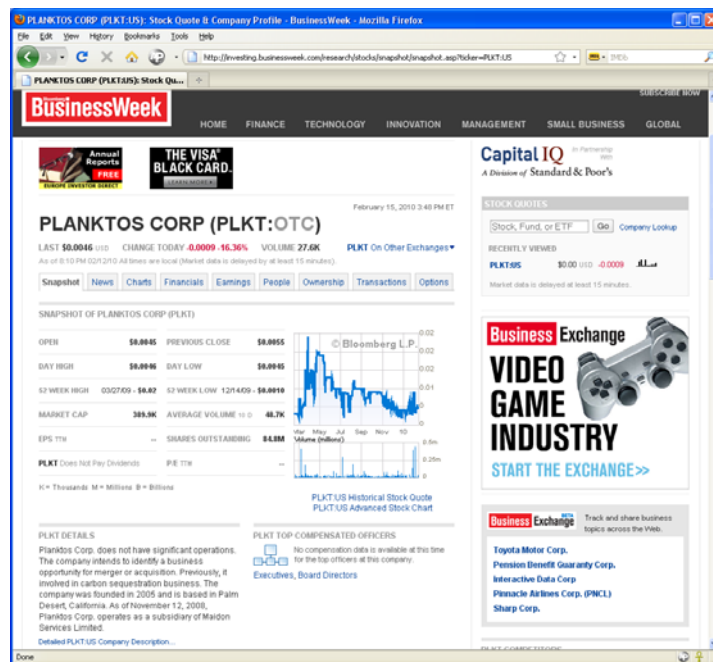
Incremento di biomassa 3x, popolamento ≠ EisenEx

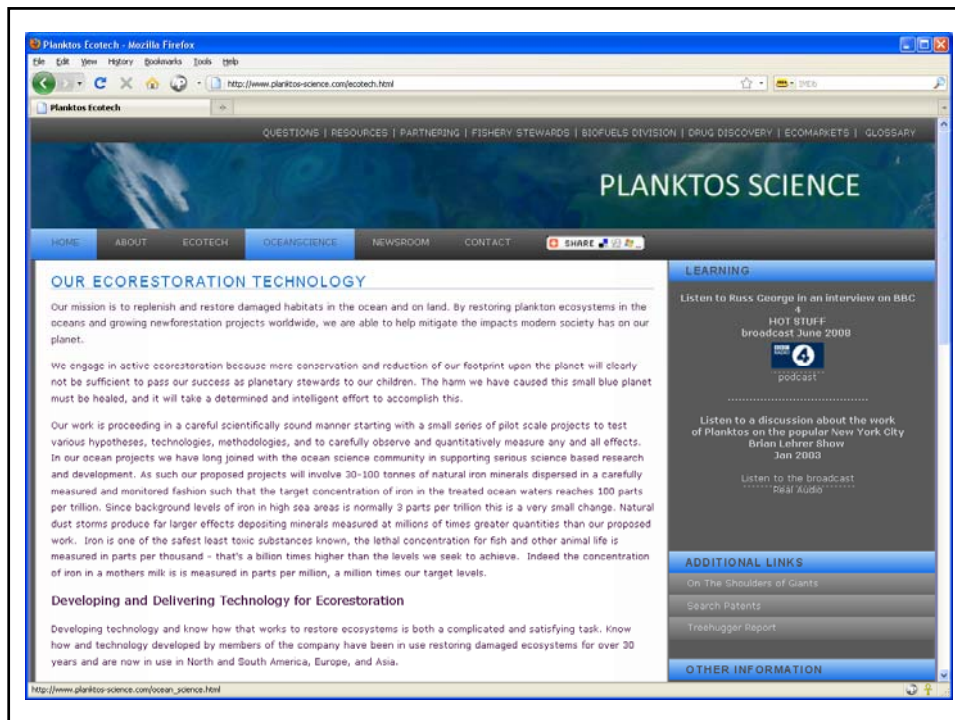
Fertilizzazione naturale, flusso di C molto + efficiente

Risultati modesti, molti ripensamenti: cosa limita?

La fertilizzazione con Fe (e altro) è fattibile su grande scala?

- Per bilanciare il 50% delle emissioni industriali (3Gt C) servono da 200.000 a 4.000.000 t Fe anno⁻¹
- Nel caso peggiore il costo è di 20 miliardi di euro
- La non conformità al protocollo di Kyoto costa in Europa 100 euro per t CO₂
- Proiettato su scala globale questo mercato varrà 1000 miliardi di euro nel 2012
- Quindi...





Pro

- Dal punto di vista strettamente economico, la fertilizzazione è molto conveniente
- Non intervenire porta comunque a cambiamenti climatici ed ecologici globali
- Rese di pesca potenzialmente migliori
- ...

Contro

- Non è affatto certo che la fertilizzazione sia scalabile
- Le conseguenze ecologiche sono imprevedibili
- E' una soluzione che potrebbe reggere solo fino all'esaurimento dei nutrienti nelle zone HNLC
- ...

La mia opinione?

