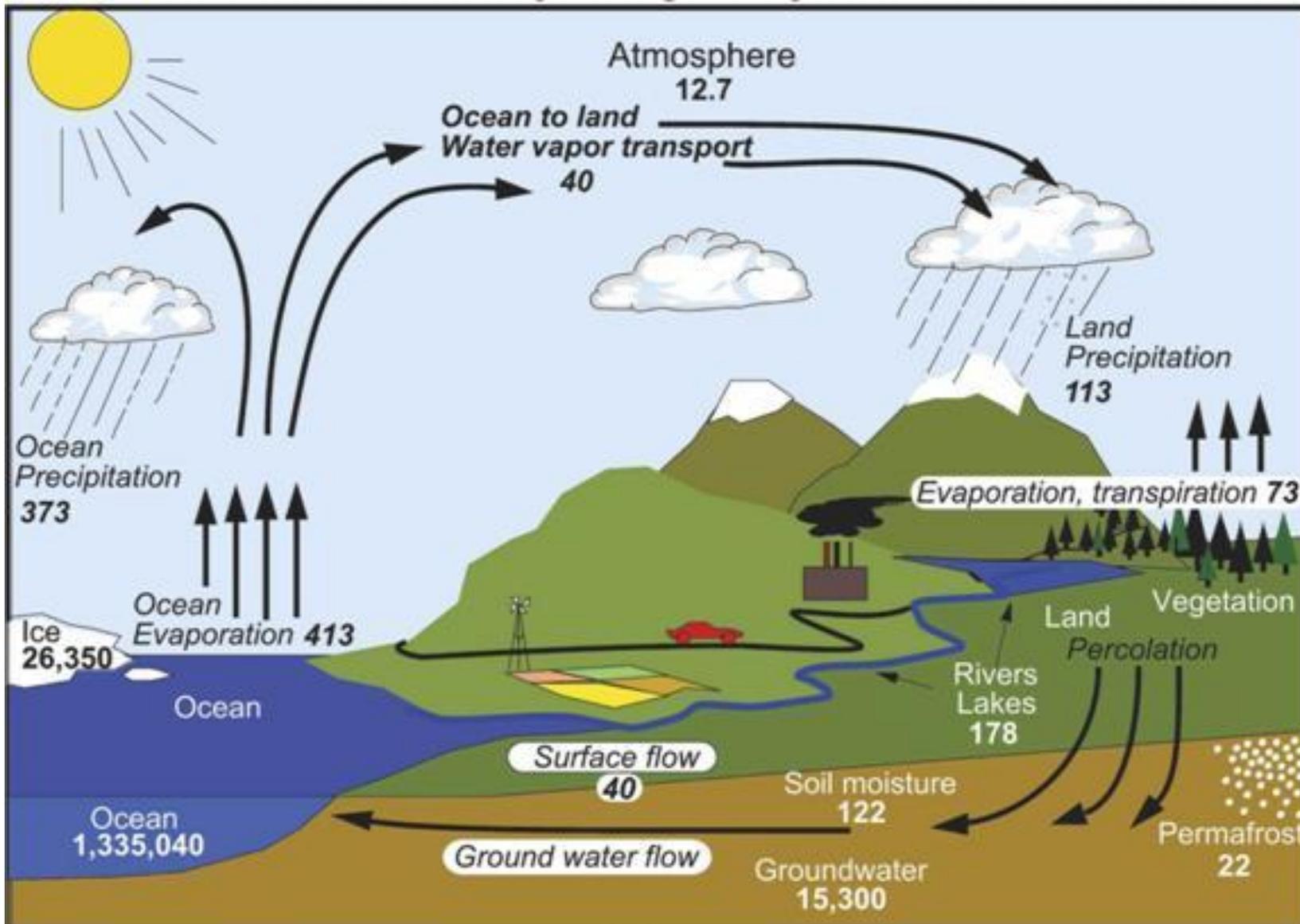


Oceano

Ringraziamenti:

- Stefano Tibaldi (dispense Cà Foscari A.A. 2019-20)
- AA.VV. (UniTo) - Lessico e Nuvole: le parole del cambiamento climatico – 2020
- C. Cassardo et al. - Temporalis e tornado – cap. 1, 2021 – Ed. AlphaTest

Il ciclo idrologico



Fonte: http://www.climate.be/textbook/chapter2_node9.html - figura originale da Trenberth et al. (2007)

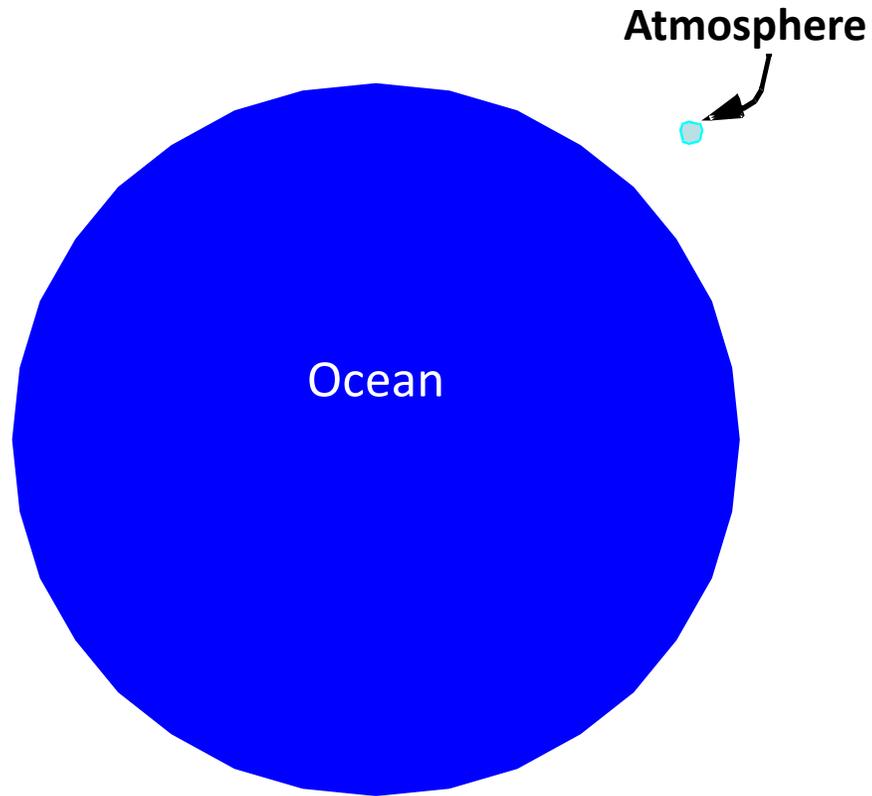
- Quantitativi di acqua espressi in migliaia di chilometri cubi (10^3 km^3)
- Flussi (*in corsivo*) espressi in migliaia di chilometri cubi all'anno ($10^3 \text{ km}^3/\text{anno}$)

L'acqua sulla Terra

Water reservoir	Depth if spread over the entire surface of Earth (m)	Percent of total
Oceans	2650	97
Icecaps and glaciers	60	2.2
Groundwater ^a	20	0.7
Lakes and streams ^a	0.35	0.013
Soil moisture ^a	0.12	0.013
Atmosphere	0.025	0.0009
Total	2730	100

A bracket groups the values for Groundwater (20 m), Lakes and streams (0.35 m), and Soil moisture (0.12 m), with a label "20.47 m" indicating their combined depth. Another bracket groups the percentages for Groundwater (0.7%), Lakes and streams (0.013%), and Soil moisture (0.013%), with a label "0.726 %" indicating their combined percentage of total water.

Riserve di energia

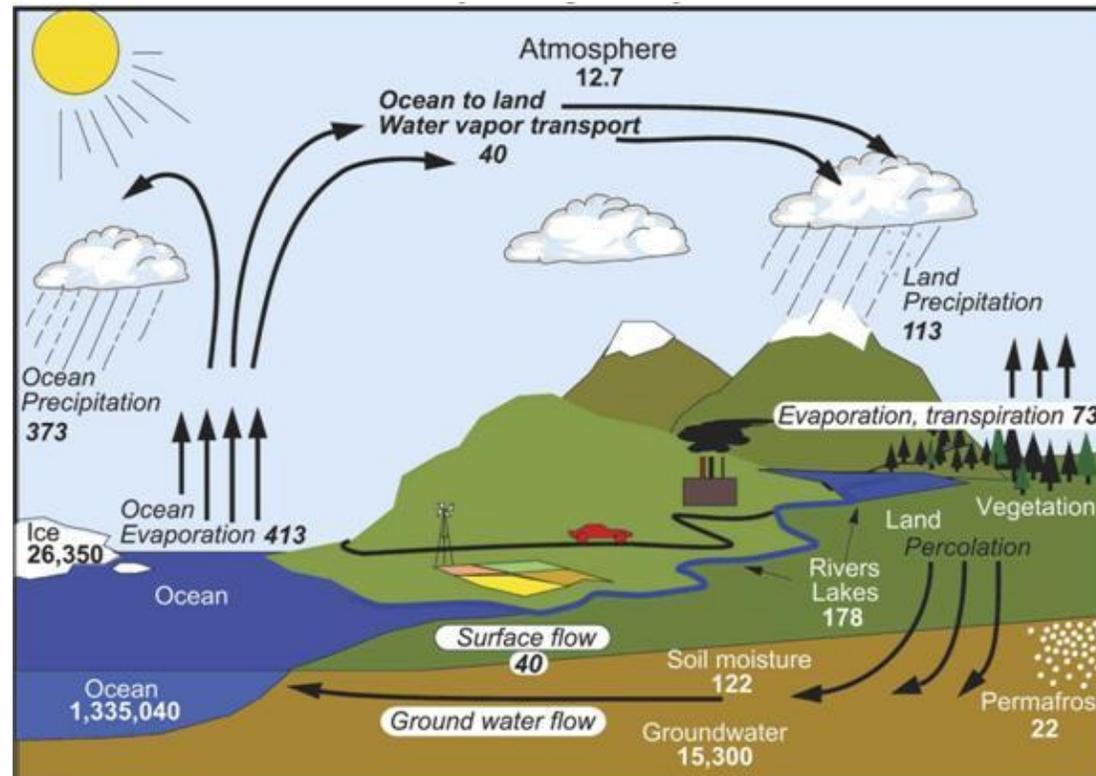


Lo stato degli oceani determina il clima su scale di tempo da migliaia a milioni di anni!

- Gli oceani sono profondi 3.688 m (considerando l'effettiva superficie oceanica)
 - ✓ Se considerassimo tutta la superficie della Terra, la profondità media sarebbe 2.618 m)
- I primi 10 m di oceano equivalgono alla massa di tutta l'atmosfera
 - ✓ Come si calcola la massa dell'atmosfera?
 - Dalla pressione media alla superficie terrestre:
 - $p_s = m g / A$
 - $m \approx p_s A / g \approx 10^5 \text{ Pa } 5.1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 / 10 \text{ m s}^{-2} \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ kg}$

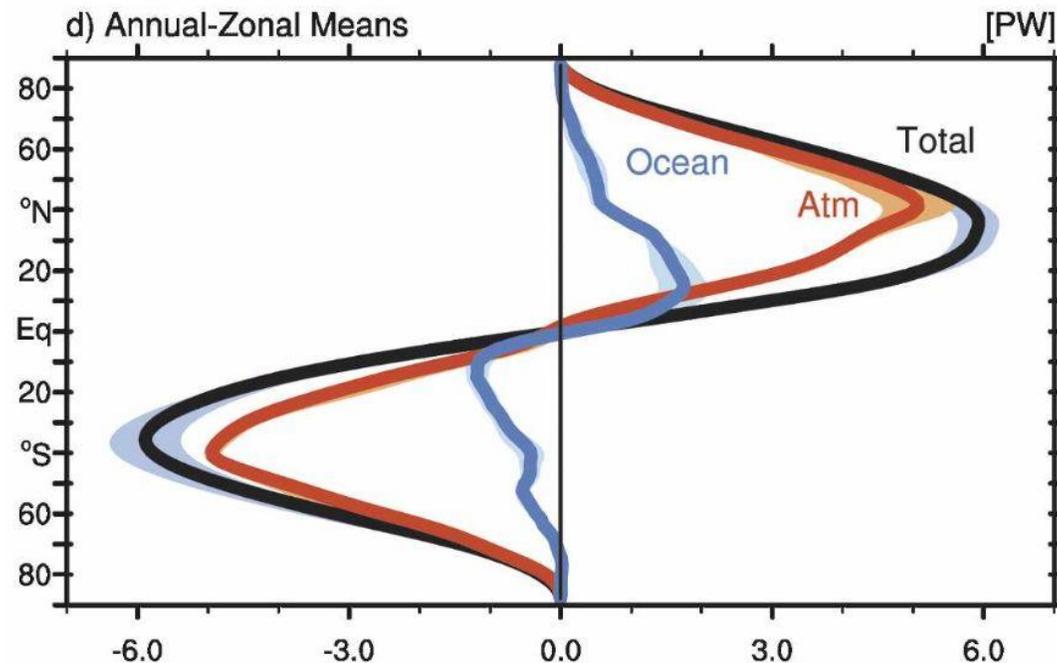
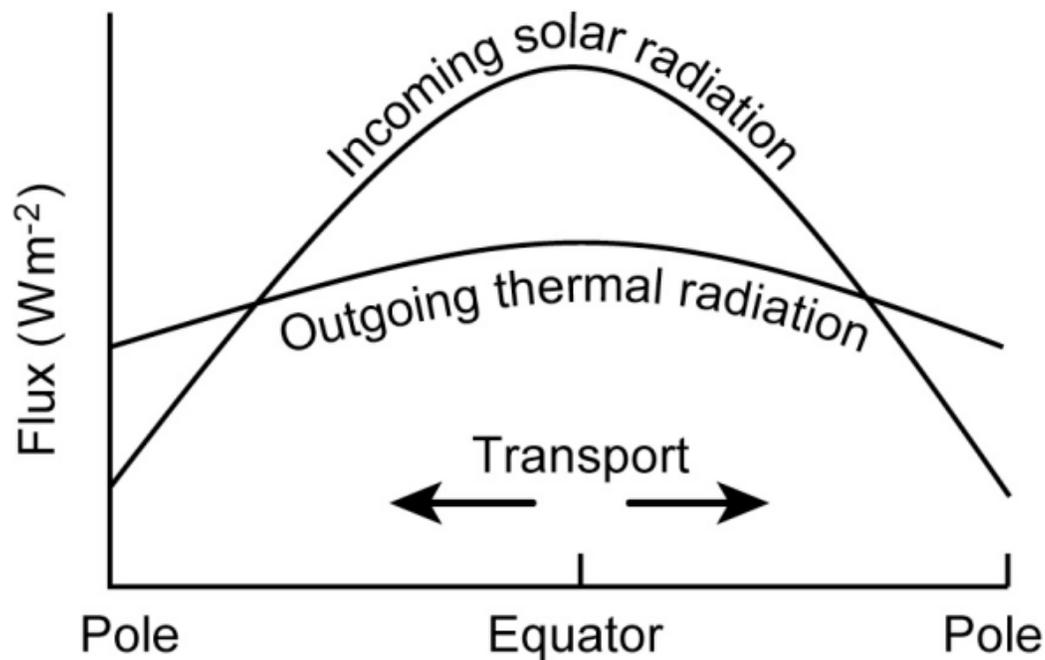
Ruolo degli oceani nel clima - 1. Il ciclo idrologico

- Il 71% della Terra è coperto dagli oceani, incluso il 6% di ghiaccio
- L'oceano è la principale fonte di vapore acqueo atmosferico, che influisce sul bilancio radiativo terrestre attraverso ghiaccio, nubi e variazioni di umidità
- Le precipitazioni forniscono flussi di acqua dolce superficiale che influenzano la salinità e quindi le correnti oceaniche



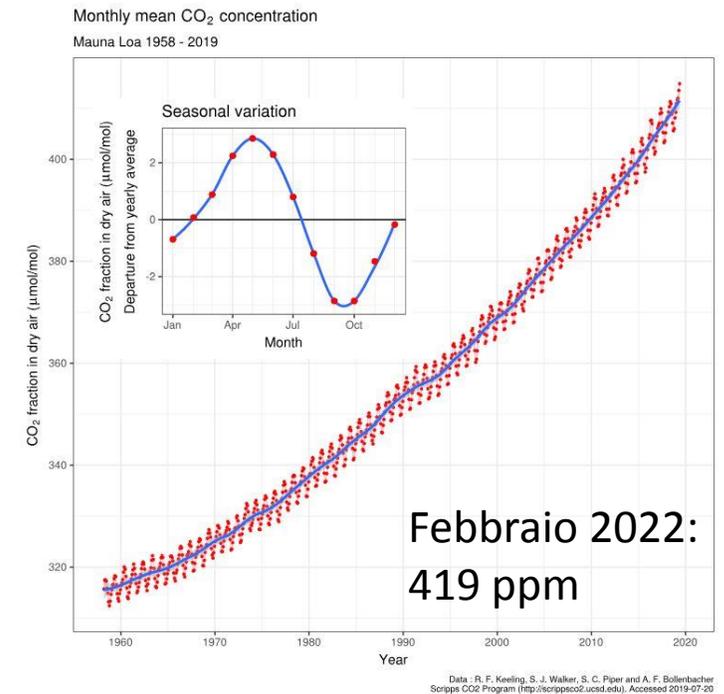
Ruolo degli oceani nel clima - 2. Bilancio energetico globale

- Le regioni equatoriali ricevono molta più energia dal Sole rispetto alle regioni polari
- L'emissione infrarossa ha differenze latitudinali minori ($\sim \sigma T^4$)
- Il bilancio energetico globale è nullo, ma localmente la differenza è $\sim 5 \text{ PW}$ ($5 \times 10^{15} \text{ W}$)
- I primi 3,2 m dell'oceano hanno la stessa capacità termica dell'intera atmosfera
- Il contenuto totale di calore oceanico è ~ 1000 volte quello dell'atmosfera
- Il trasporto meridionale di energia è ripartito tra circolazione atmosferica e oceanica



Ruolo degli oceani nel clima - 3. Riscaldamento globale

- Gli oceani attenuano il riscaldamento globale in due modi cruciali:
 - ✓ La loro grande capacità termica e il lento rimescolamento profondo ritardano gli effetti di ogni trend di riscaldamento: a oggi, solo il 60% circa delle emissioni dovute alle attività industriali a partire dal 1700 ha provocato un incremento termico
 - ✓ Circa il 35% del carbonio emesso dai combustibili fossili (diversi miliardi di ton/anno) è assorbito dagli oceani
 - ✓ Gli oceani contengono almeno ~ 50 volte carbonio (per lo più sotto forma di CO₂) rispetto all'atmosfera
 - ✓ La solubilità di CO₂ nell'acqua diminuisce all'aumentare della temperatura
 - ✓ La concentrazione atmosferica di CO₂ è in aumento (esponenziale)

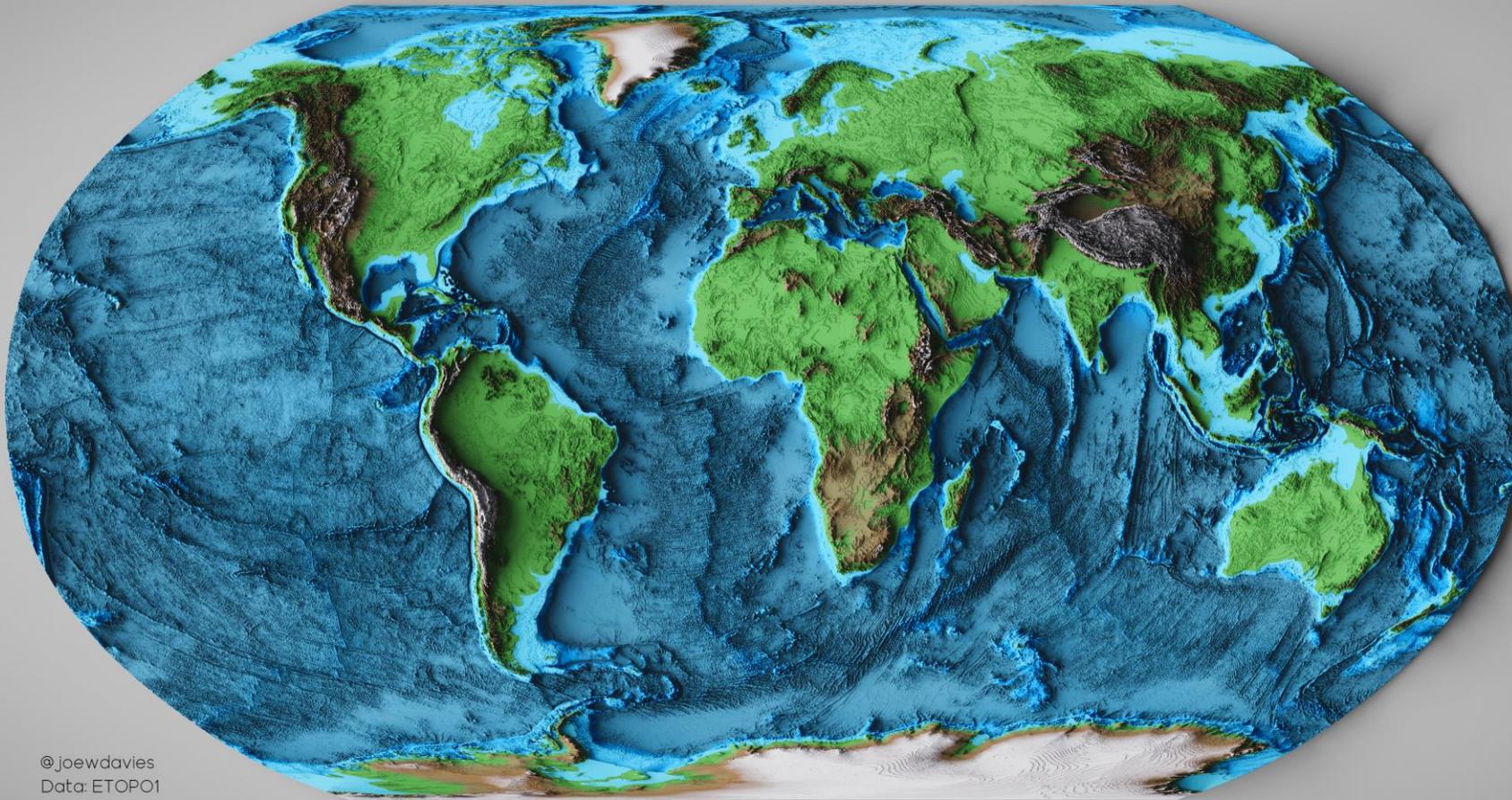


Differenze tra atmosfera e oceano

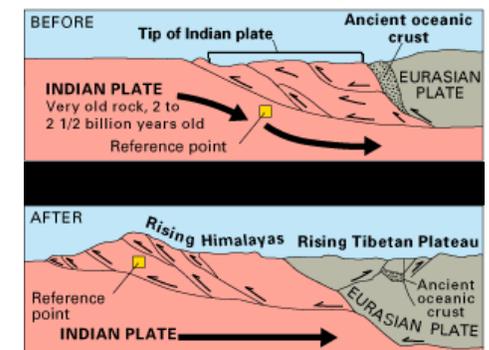
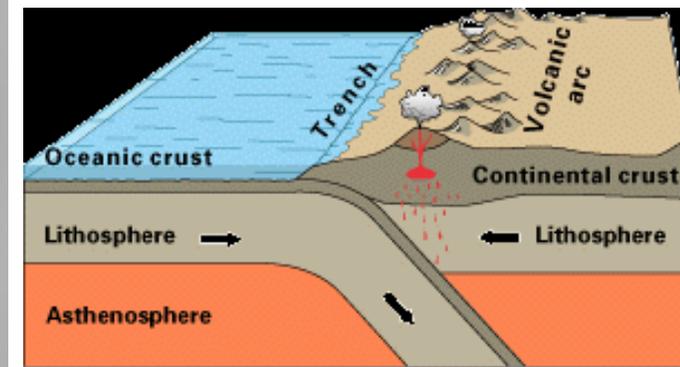
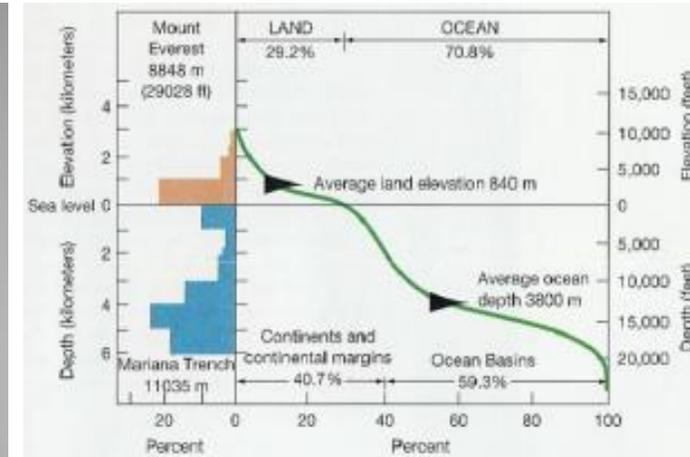


- Gran parte dell'atmosfera ha effetti rilevanti sul clima
- Le correnti atmosferiche in troposfera sono per lo più "libere"
- L'atmosfera è "quasi" trasparente alla radiazione solare
- Lo strato superficiale dell'oceano ha un ruolo prevalente sul clima
- Le correnti oceaniche sono limitate dai continenti
- L'oceano assorbe la radiazione solare

Caratteristiche fisiche degli oceani



@joewdavies
Data: ETOPO1



Superficie complessiva degli oceani: $3,61 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$
 Spessore medio: 3,7 km
 Volume complessivo degli oceani: $3,2 \cdot 10^{17} \text{ m}^3$

Densità media: 1035 kg m^{-3}
 Massa complessiva degli oceani: $1,3 \cdot 10^{21} \text{ kg}$

Movimenti dei continenti (tettonica a placche)



250 Mio years ago



200 Mio years ago

= Milioni di anni fa



150 Mio years ago



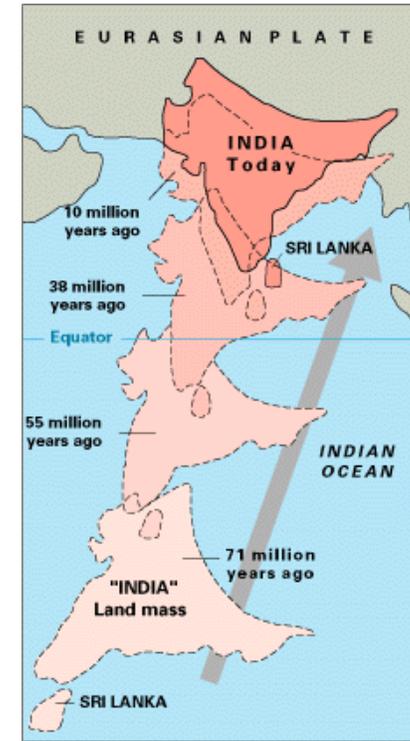
100 Mio years ago



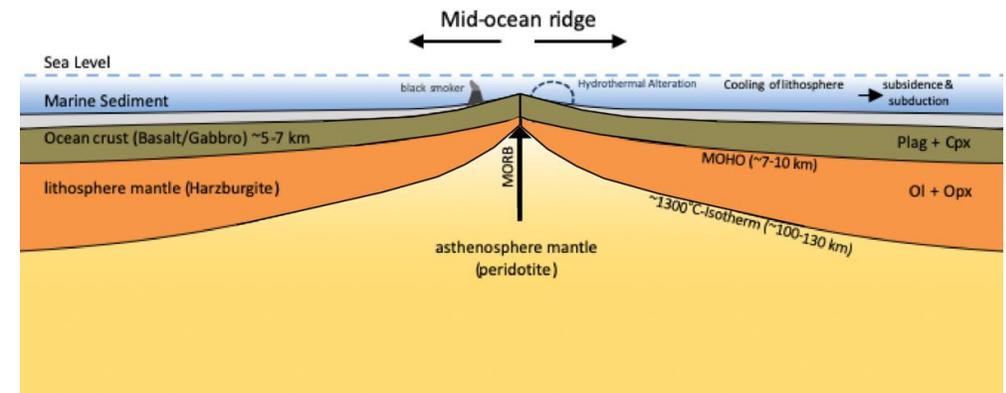
50 Mio years ago



Now

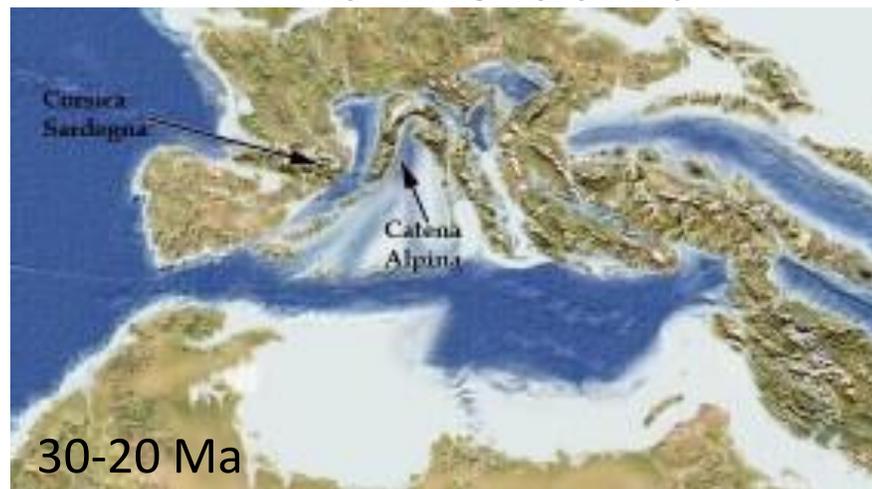
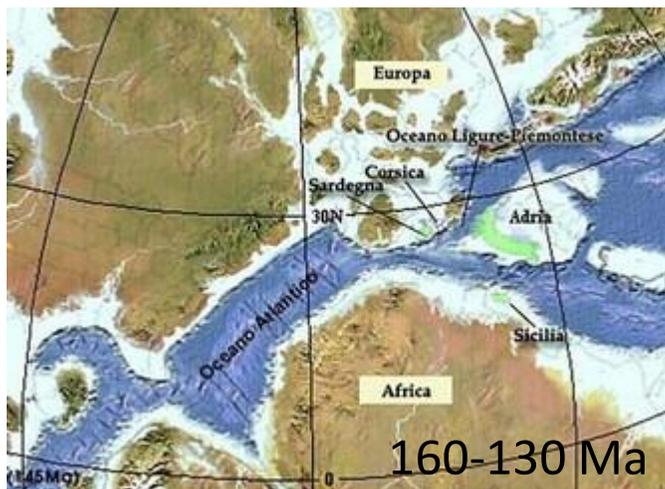


Alfred Lothar Wegener (1880 –1930)
geologo, meteorologo ed esploratore
tedesco



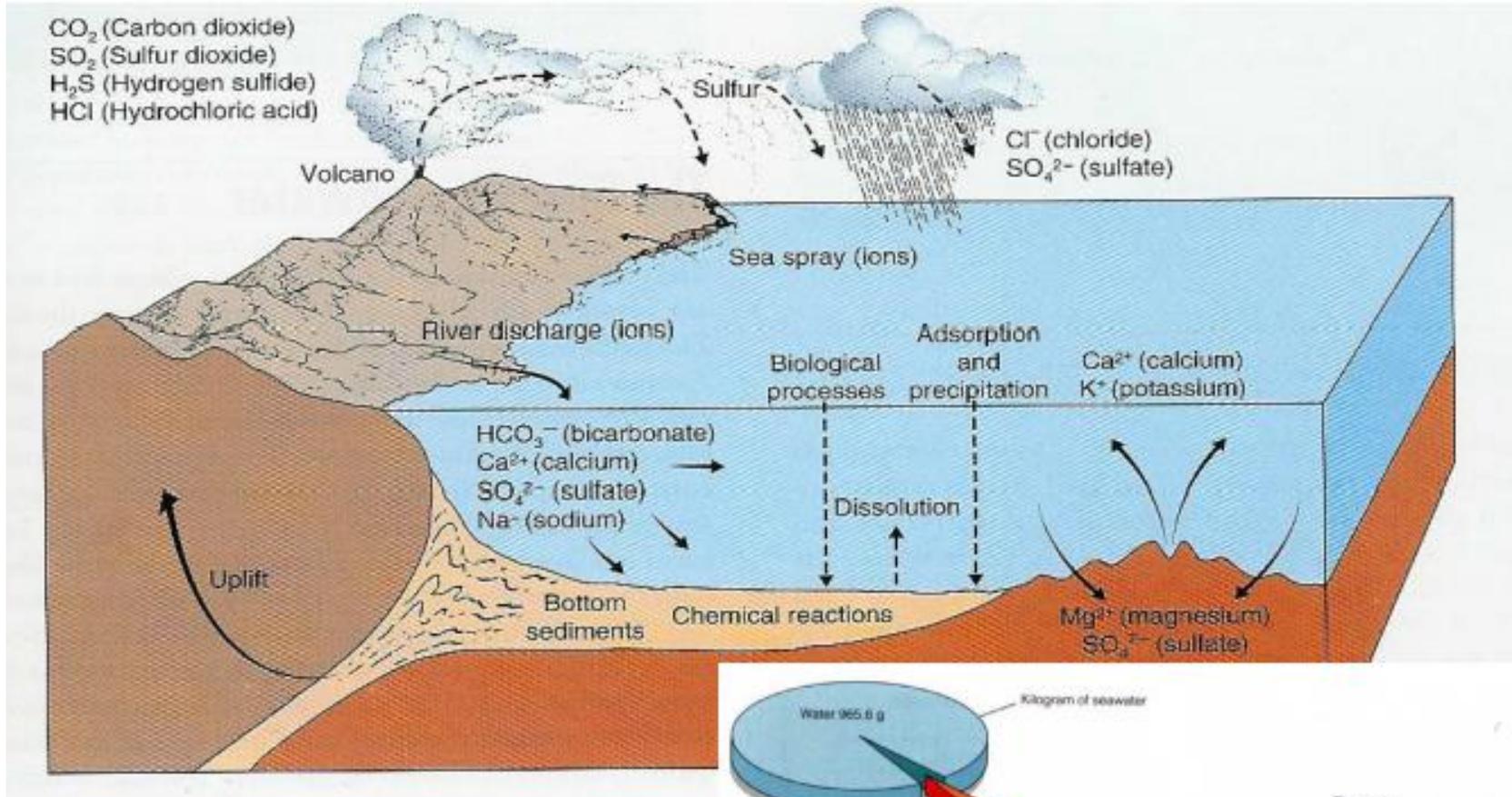
La formazione delle Alpi e degli Appennini

Ma = Milioni di anni fa



- Nel Medio Giurassico (180-160 Ma), il continente sudamericano inizia a separarsi dall'Africa e nasce l'oceano Atlantico Centrale
 - ✓ Come conseguenza Africa ed Europa cominciano a separarsi e in mezzo nasce l'oceano Ligure-Piemontese e la penisola Adria
- Nel medio Cretaceo (130 Ma) nasce l'Atlantico meridionale
 - ✓ L'Africa compie una rotazione antioraria che spinge l'Adria contro l'Europa: nascono le Alpi
- Circa 24 Ma si apre l'oceano algerino-provenzale
 - ✓ Corsica e Sardegna si muovono nella posizione attuale
 - ✓ Iniziano a formarsi gli Appennini e si apre il mar Tirreno
- Circa 7 Ma si chiude lo stretto di Gibilterra
 - ✓ Il Mediterraneo diventa un mare chiuso, si prosciuga (resti di gessi)
- Circa 3,5 milioni di anni fa si riapre lo stretto di Gibilterra

Acqua di mare: è salata!



Sea water composition

Chloride: 18.98‰ (g/kg)
Sodium: 10.568‰ (g/kg)
Sulphate: 2.65‰ (g/kg)
Magnesium: 1.27‰ (g/kg)
Calcium: 1.27‰ (g/kg)

Potassium: 0.38‰ (g/kg)
Bicarbonate: 0.14‰ (g/kg)
Others: 0.11‰ (g/kg)
Salinity: 34.48‰

➤ Nel fluido atmosferico l'equazione di stato lega tra loro tre grandezze fisiche (variabili di stato):

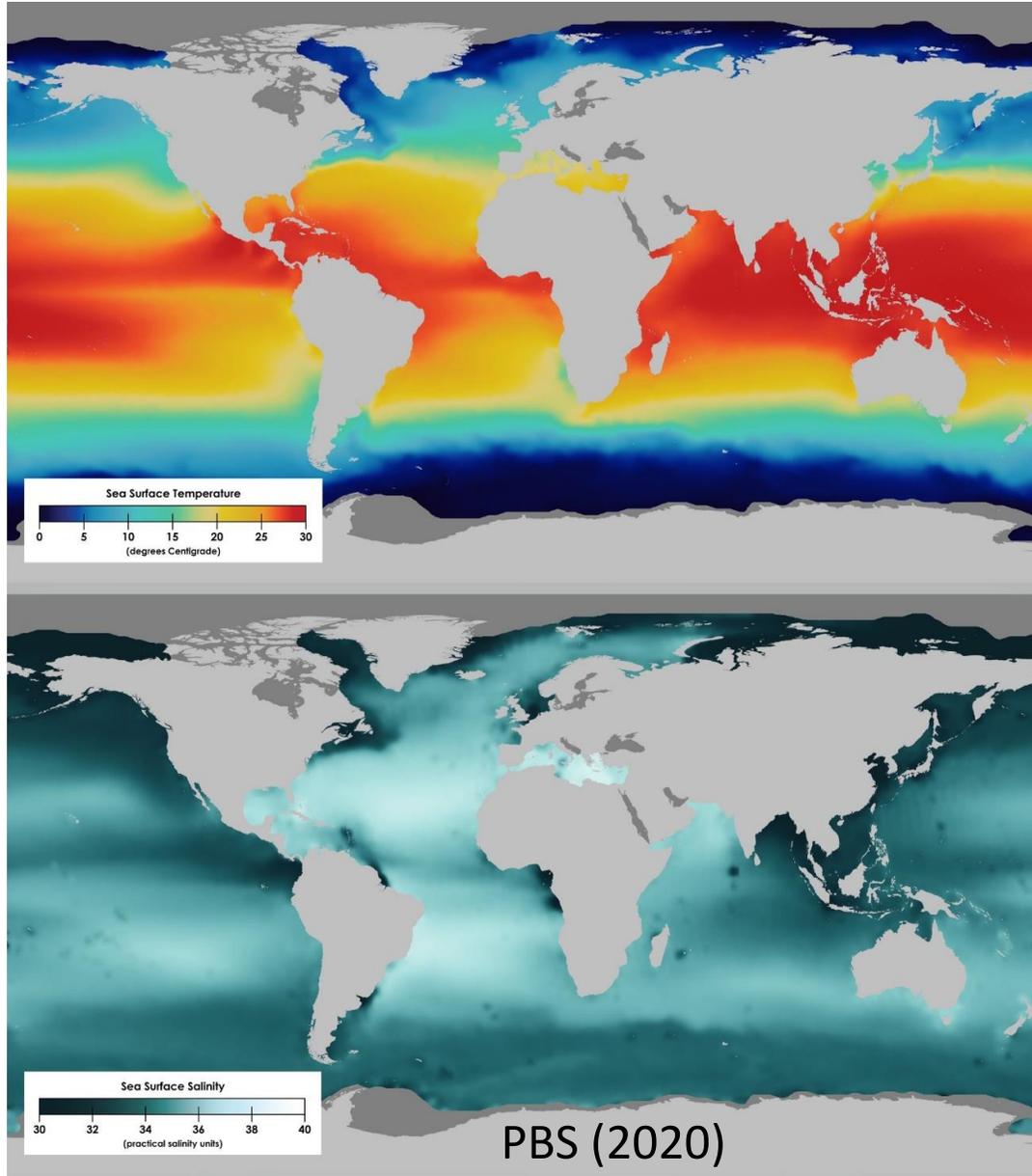
- ✓ Pressione p
- ✓ Volume V (o densità ρ)
- ✓ Temperatura T
- ✓ $p = \rho R_d T$

➤ Negli oceani, è presente una quarta variabile di stato: **la salinità S**

- ✓ Quindi: $p = p(\rho, S, T)$

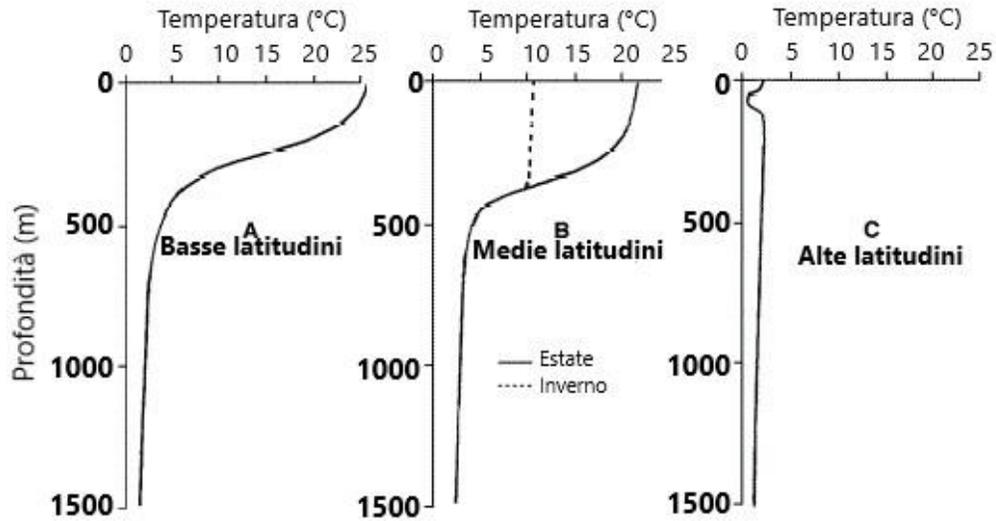
➤ Non esiste un'equazione di stato

Andamenti di temperatura superficiale e salinità

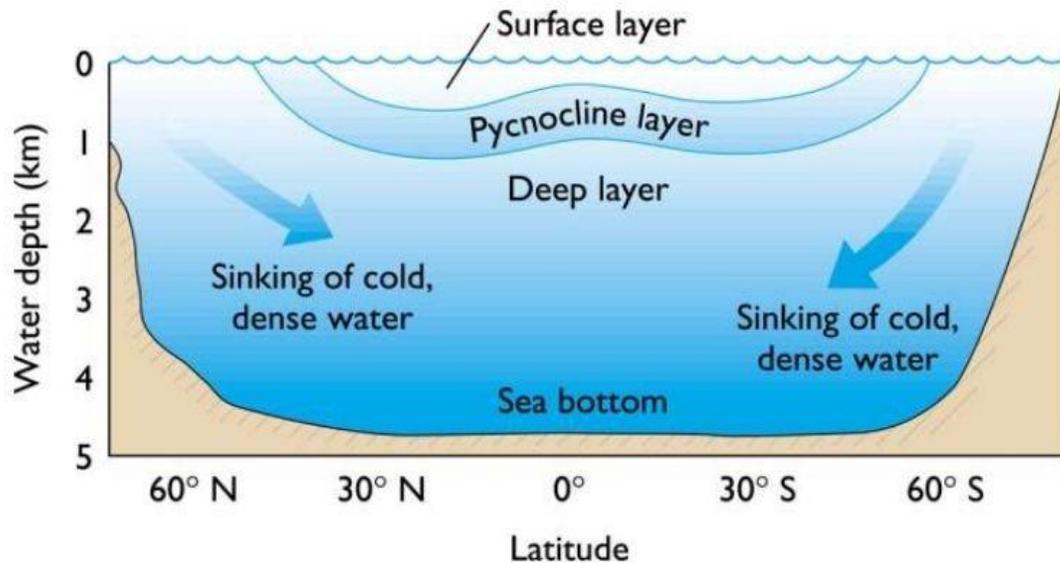


- La temperatura decresce regolarmente muovendosi dall'equatore verso le regioni polari
- Sono evidenti le correnti forti sui lati occidentali dei bacini oceanici settentrionali
- Si evidenziano regioni con alta salinità ai tropici
- Le regioni polari hanno generalmente salinità basse (ma non bassissime) e acque fredde

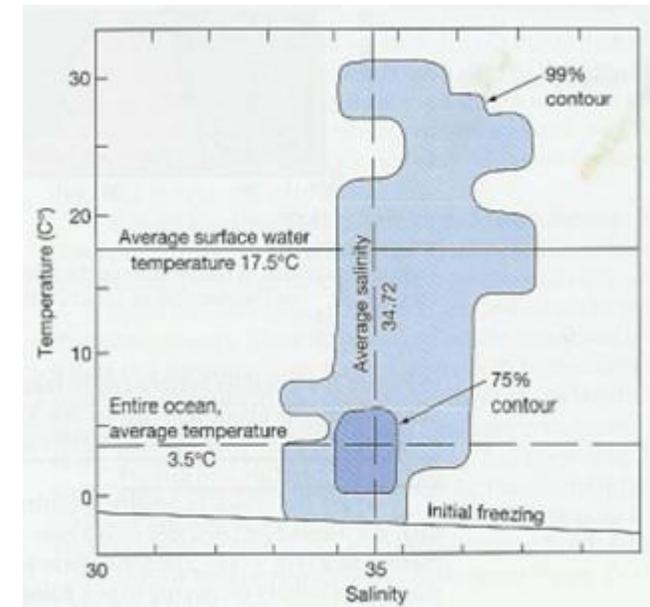
Struttura verticale dell'oceano



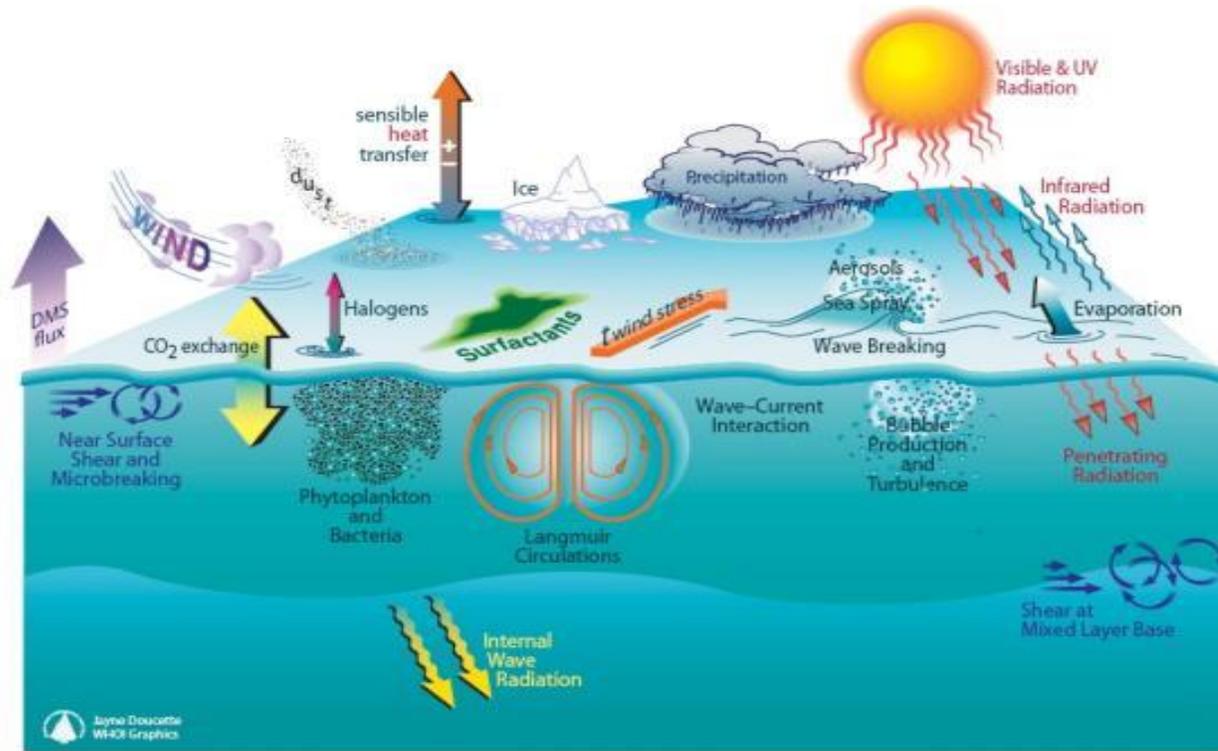
- Sottile strato rimescolato in superficie
 - ✓ Effetto dell'attrito con la velocità del vento
 - ✓ Presente solo alle medie latitudini e all'equatore
- Regione termoclina con pendenze ripide (poco rimescolamento)
 - ✓ Presente solo alle medie latitudini e all'equatore
- Strato profondo con poche variazioni (rimescolamento verticale quasi nullo)



Offshoreengineering, 2020, and DuniaKuMu (2020)



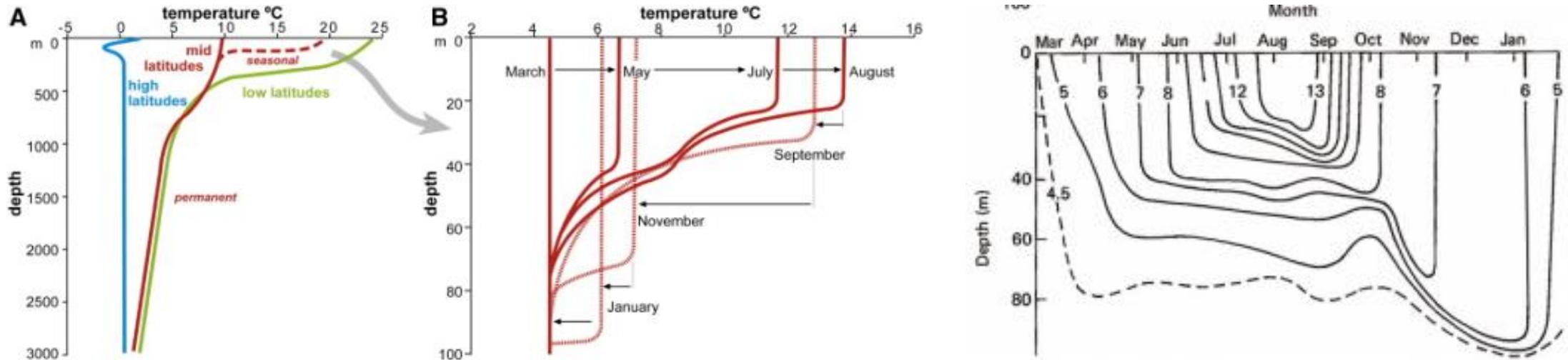
Lo strato superficiale (rimescolato)



- La fonte di calore primaria per l'oceano è la radiazione solare
- Quasi tutta la radiazione solare negli oceani viene assorbita nei primi 100 m
 - ✓ La radiazione nell'infrarosso è assorbita tutta nel primo cm di acqua
 - ✓ La radiazione UV è assorbita nel primo mm di acqua
 - ✓ La radiazione visibile nelle bande verde e blu può penetrare anche oltre i 100 m

- Il flusso di radiazione solare (e la velocità di riscaldamento) è massimo in superficie, poi diminuisce esponenzialmente con la profondità (legge di Lambert-Beer)
- La superficie si raffredda per evaporazione e trasferimento di calore all'atmosfera
- Flusso di energia verso l'alto, in atmosfera:
 - ✓ 1) diffusione molecolare, solo nel cm di aria a contatto con la superficie oceanica;
 - ✓ 2) turbolenza convettiva e movimenti verticali di rimescolamento (upwelling & downwelling)

Profilo termico verticale dell'oceano: variazioni stagionali

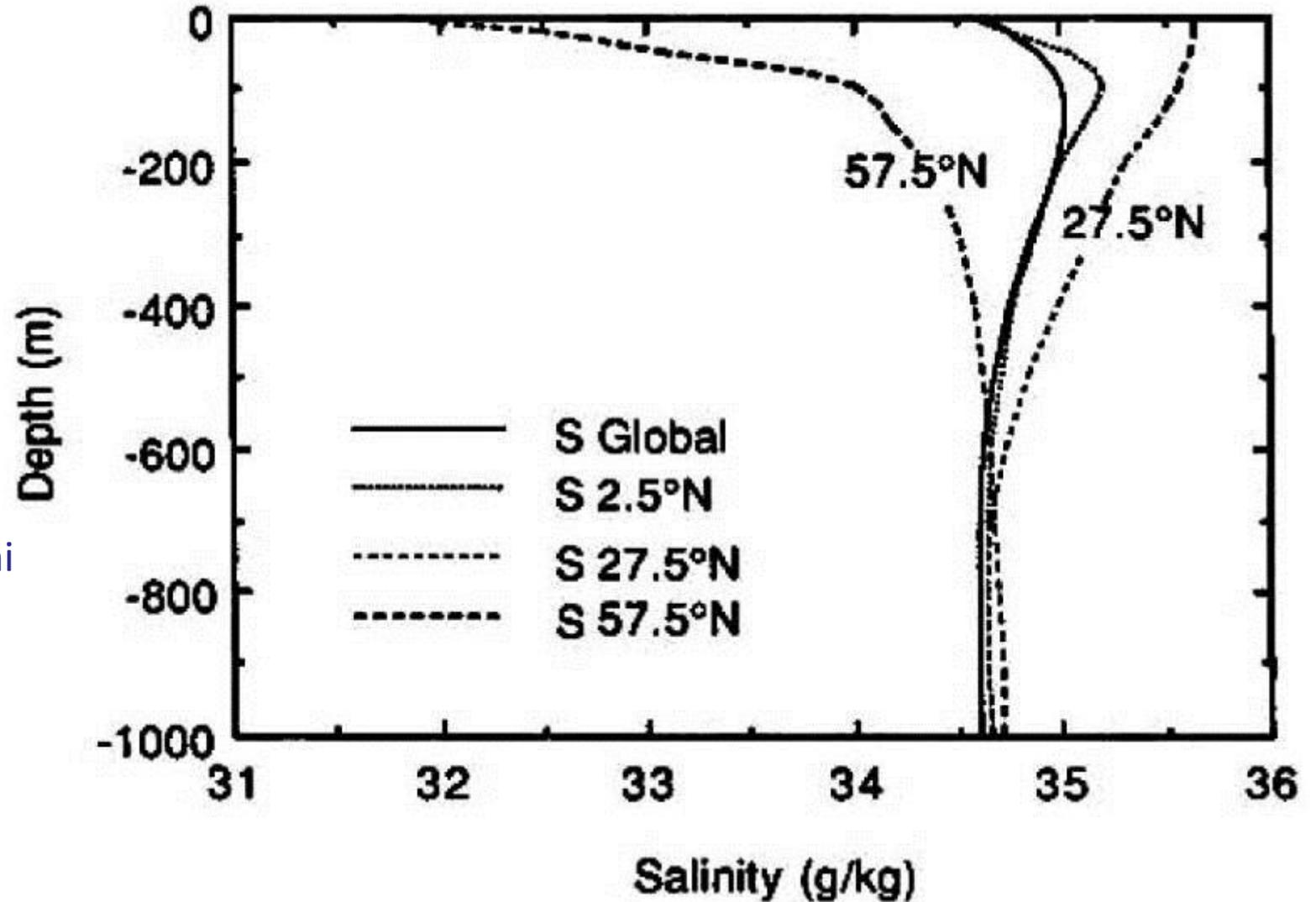
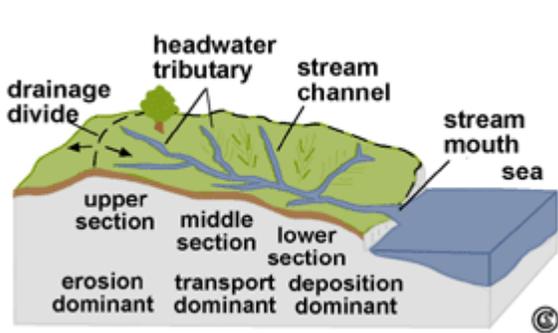


- Strato rimescolato (superficiale): acqua calda e poco densa
 - ✓ Risponde al ciclo annuale di insolazione: più sottile in estate e più spesso in inverno
 - ✓ Temperatura costante dovuta ai moti convettivi causati dal vento e dai gradienti di densità, bilanciati dal riscaldamento e raffreddamento radiativo e dal raffreddamento causato dall'evaporazione
- Termoclino: strato in cui la temperatura diminuisce notevolmente con la profondità
 - ✓ La temperatura diminuisce in maniera esponenziale fino ai valori tipici dello strato profondo
- Strato di acqua profonda: acqua fredda e densa

Profili di salinità media negli oceani

Component	Grams per kilogram
Chloride	19.353
Sodium	10.76
Sulfate	2.712
Magnesium	1.294
Calcium	0.413
Potassium	0.387
Bicarbonate	0.142
Bromide	0.067
Strontium	0.008
Boron	0.004
Fluoride	0.001

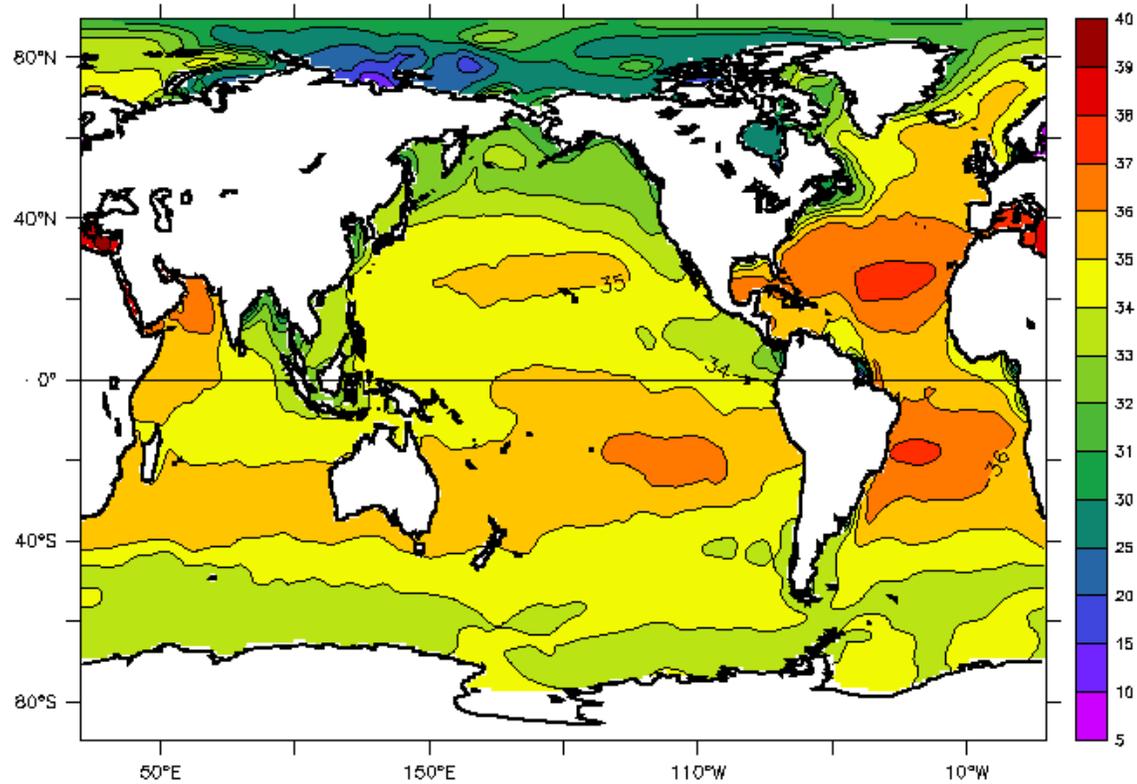
- Composizione simile in tutti gli oceani
- Da dove viene questa «roba»?



Salinità della superficie del mare

Surface salinity

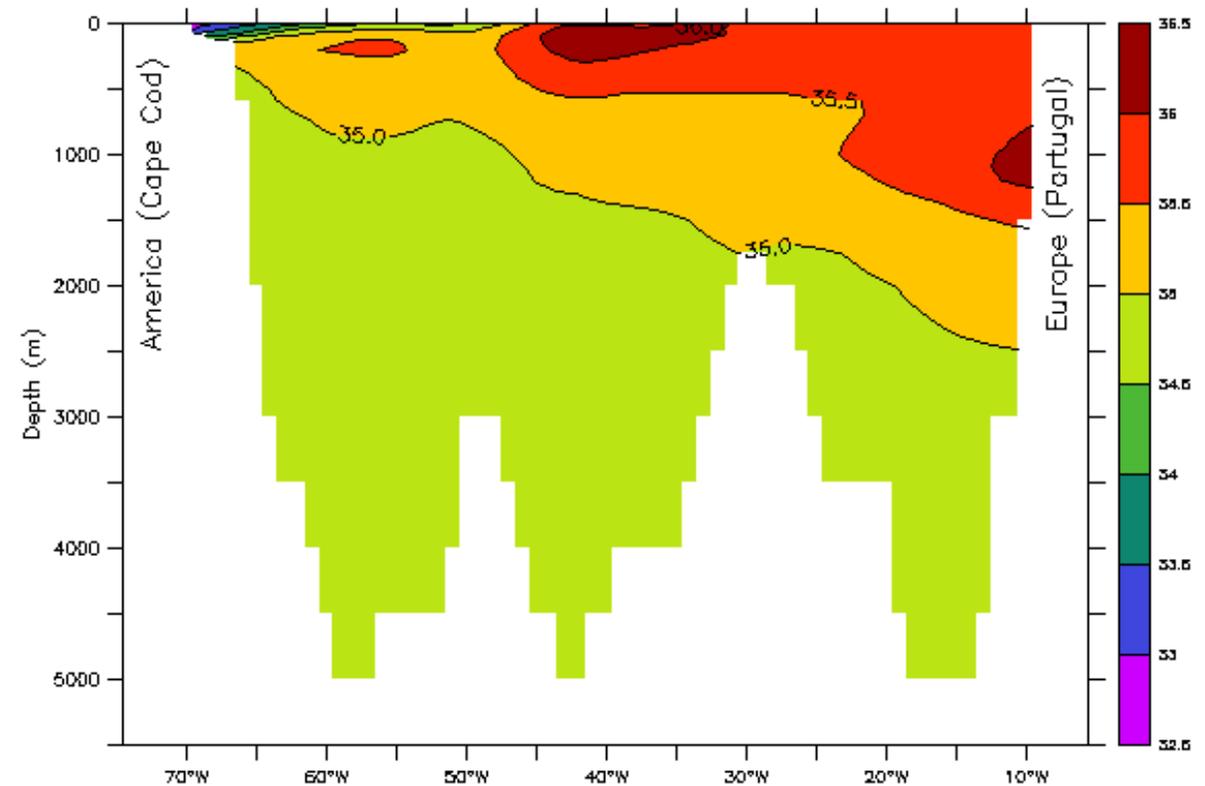
Levitus (1994) World Ocean Atlas



Note nonlinear contour levels

Salinity at 41.5°N in the Atlantic

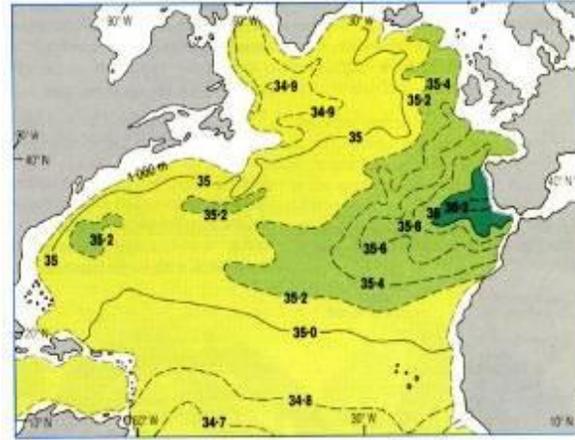
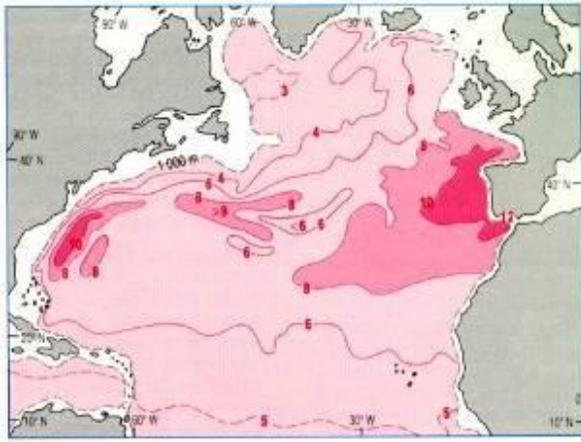
Levitus (1994) World Ocean Atlas



White areas show the ocean bottom

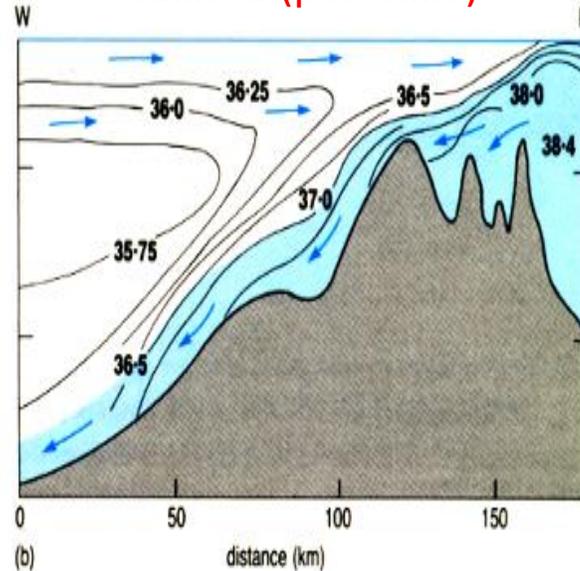
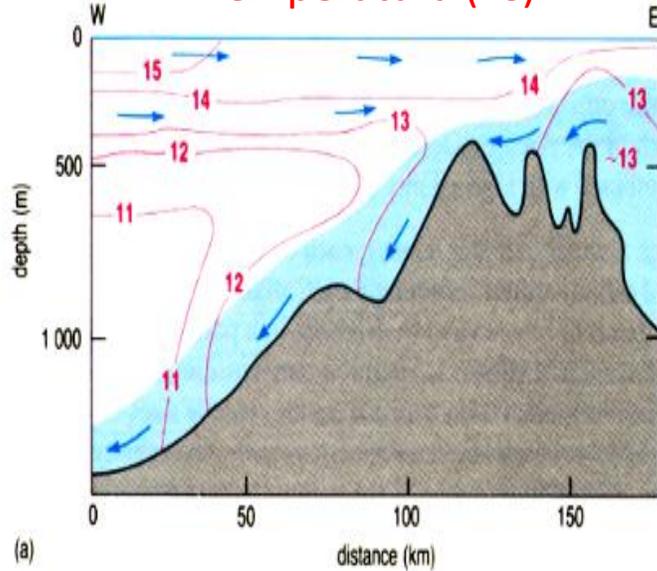
- Acqua più fresca alle latitudini alte
- Acqua più salata vicino ai tropici (specialmente nell'Atlantico)
- Come mai?

Gli scambi attraverso lo stretto di Gibilterra



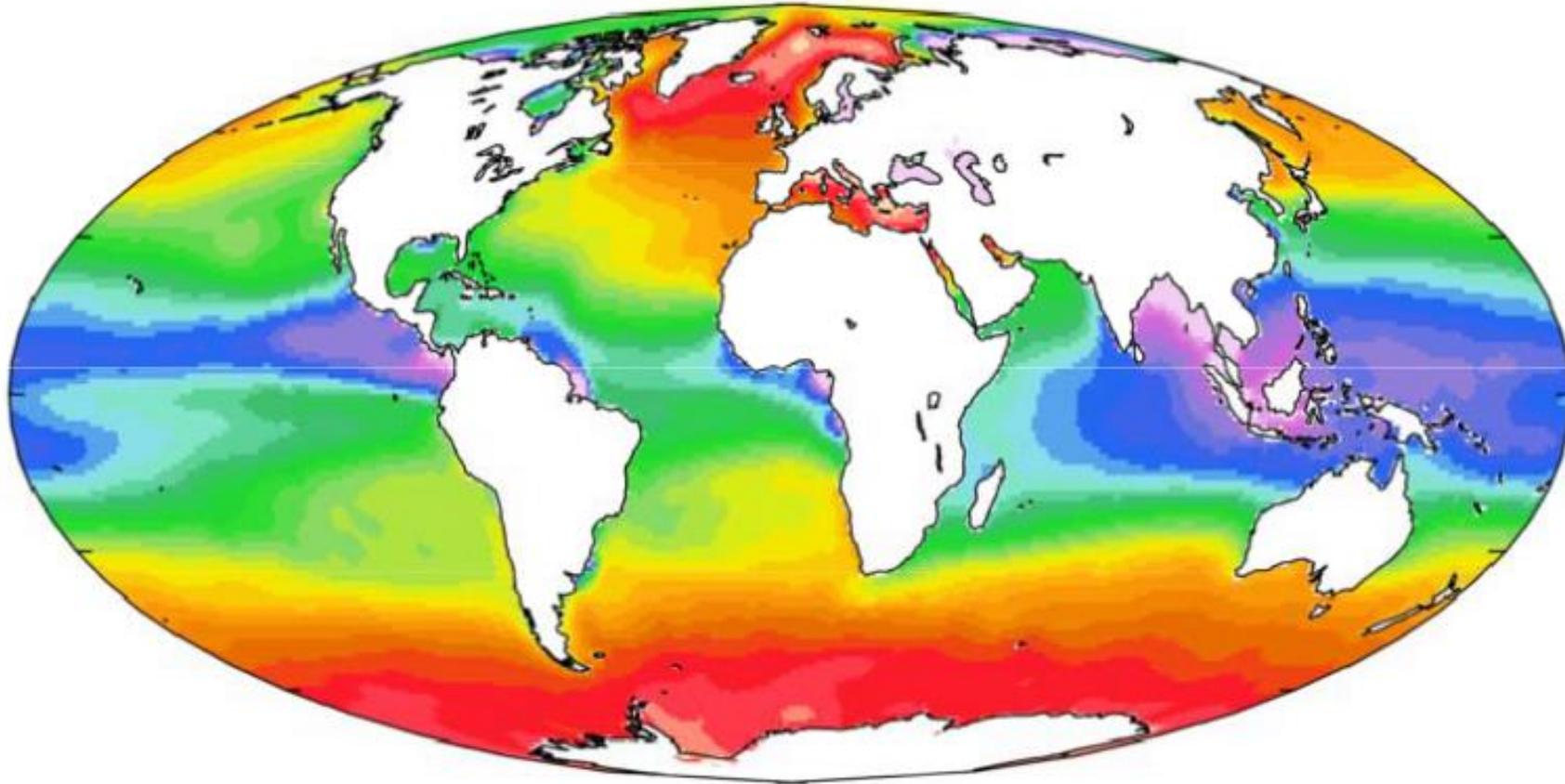
Temperatura (°C)

Salinità (per mille)



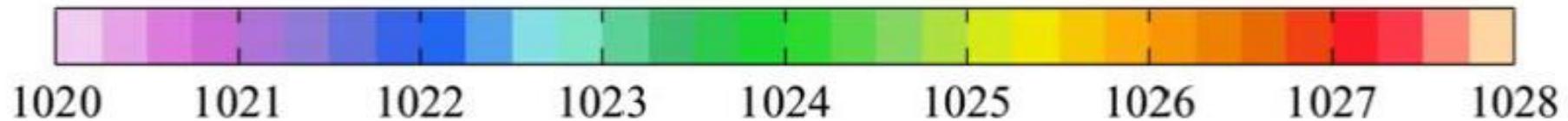
- Il Mediterraneo è un bacino chiuso in una regione per lo più arida o semi-arida
 - ✓ L'evaporazione è maggiore della precipitazione
- Il bilancio idrico si mantiene grazie al flusso di acqua attraverso lo stretto di Gibilterra
- Si noti la stratificazione dell'acqua:
 - ✓ Lo strato più superficiale di acqua che entra dall'Atlantico contiene acqua più calda e meno salata
 - ✓ esiste uno strato di acqua che dal Mediterraneo entra nell'oceano Atlantico, lievemente più fresca e molto salata
- Lungo le coste atlantiche, fino a 1000 m di profondità, è presente l'influenza degli scambi col Mediterraneo
- La salinità dell'oceano Atlantico è maggiore che in tutti gli altri bacini oceanici

Densità dell'acqua oceanica



Dipende sia dalla temperatura che dalla salinità

Sea-surface density [kg m^{-3}]



Movimenti verticali

- L'aumento della densità associato a acque superficiali sempre più saline può bilanciare o superare la stratificazione termica e attivare il rimescolamento
- Le precipitazioni apportano acqua dolce in superficie, e provocano la diminuzione della densità delle acque superficiali
- L'attrito del vento può indurre rimescolamento anche in presenza di stratificazione stabile della densità
- La profondità dello strato rimescolato varia da pochi metri a tutta la profondità dell'oceano (*downwelling*); queste ultime zone non sono così frequenti; in media, a livello globale, la profondità è di 70 m

La circolazione oceanica in sintesi

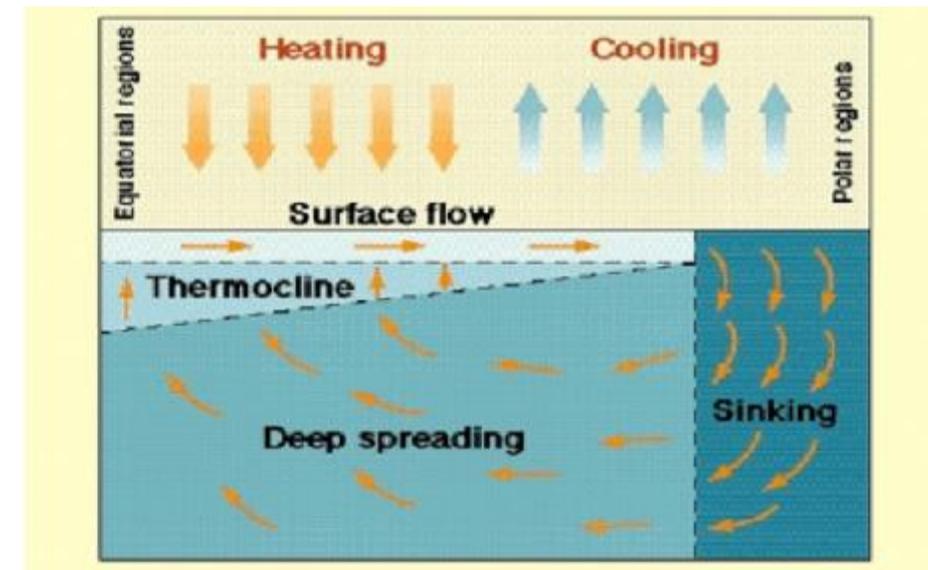
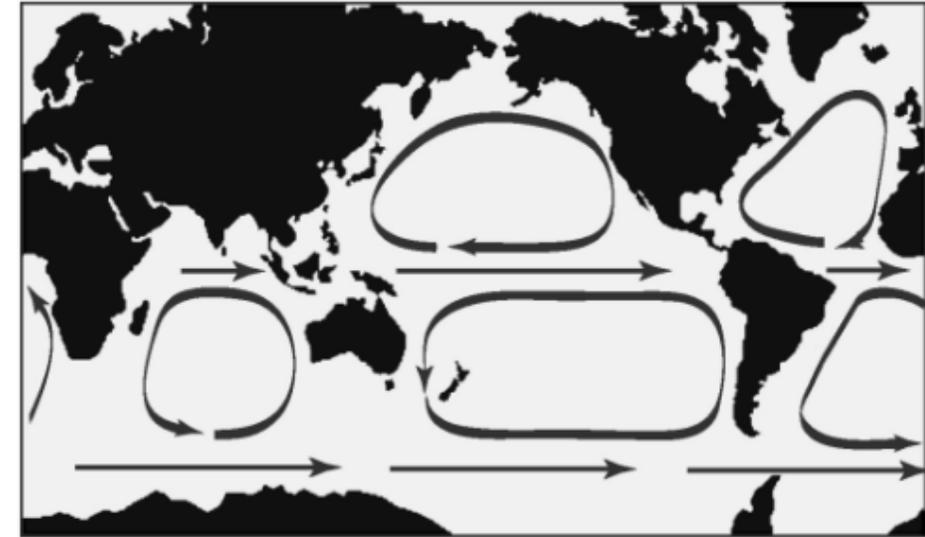
➤ Due tipi di circolazione:

1. Circolazione superficiale (causata dal vento)

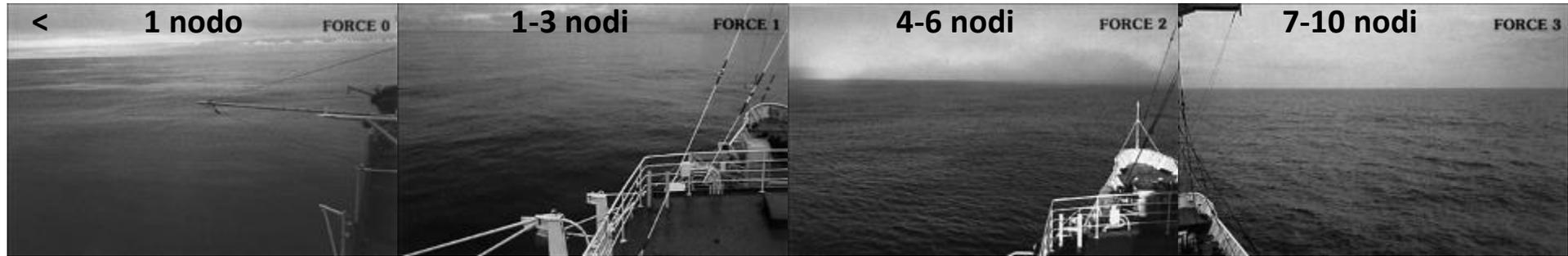
- ✓ La superficie dell'oceano è «trascinata» dal vento
- ✓ Provoca il rimescolamento del primo strato e di parte del termoclino
- ✓ Coinvolge i primi 10-200 m (~ 5% della massa dell'oceano)
- ✓ I venti superficiali medi formano dei grandi vortici (gyre)

2. Circolazione oceanica profonda (termoalina)

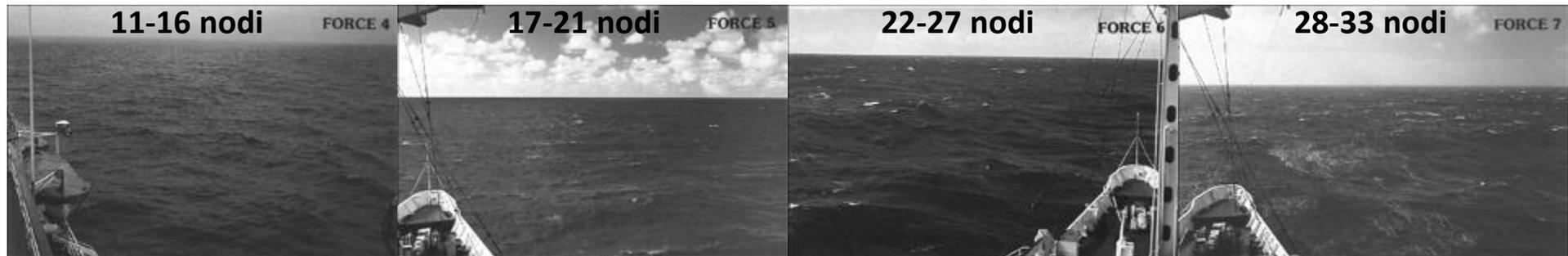
- ✓ Generata dai gradienti di densità dovuti a differenze di temperatura e salinità
- ✓ Ha la sua massima intensità nelle regioni polari
- ✓ Coinvolge la maggior parte dell'acqua degli oceani (~ 95%)
- ✓ Dà origine a un "nastro trasportatore globale" molto lento



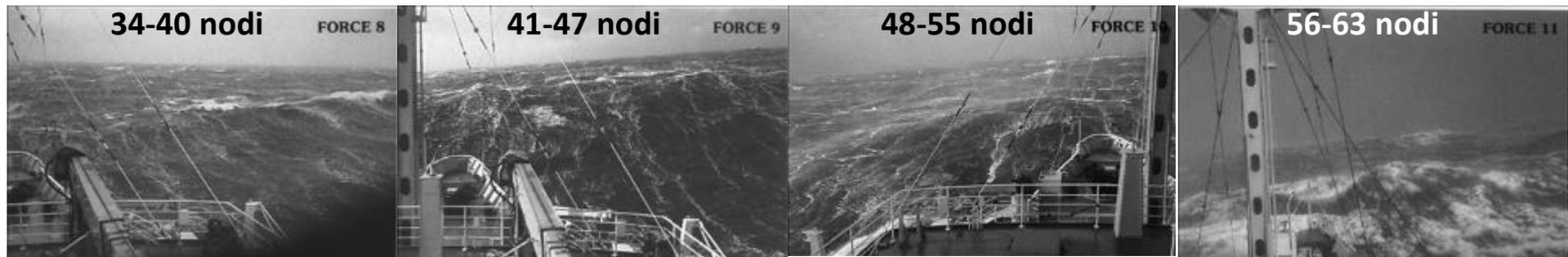
Lo stress del vento: la scala Beaufort



Altezza dell'onda: <0.1 m 0.1 m 0.2-0.3 m



0.6-1.0 m 1.0-1.5m 2.0-2.5 m 3.0-4.0 m

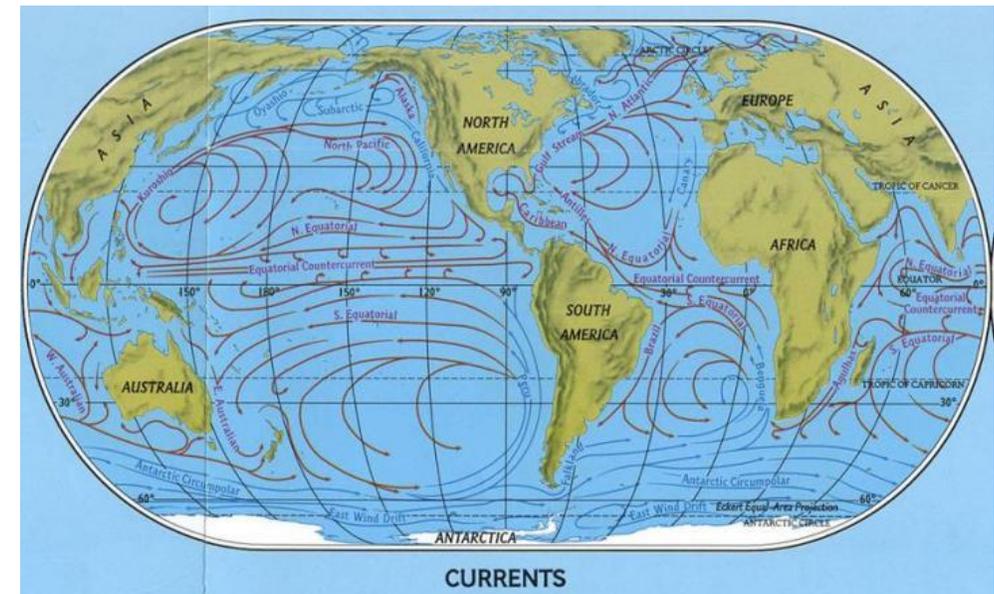
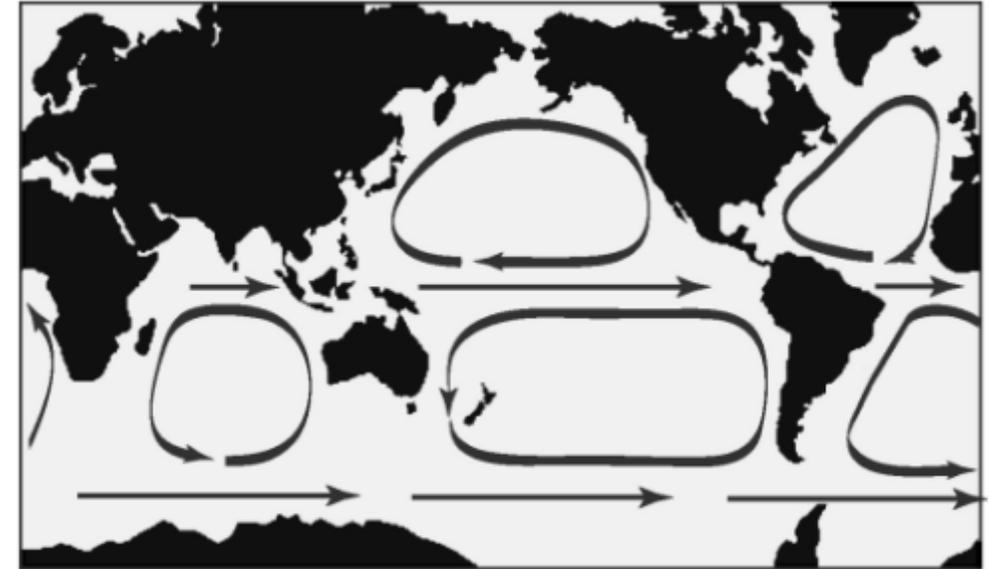


4.0-5.5 m 5.5-7.5m 7.0-10.0 m 9.0-12.5 m

Misure empiriche che descrivono la velocità del vento in base alle condizioni del mare osservate!

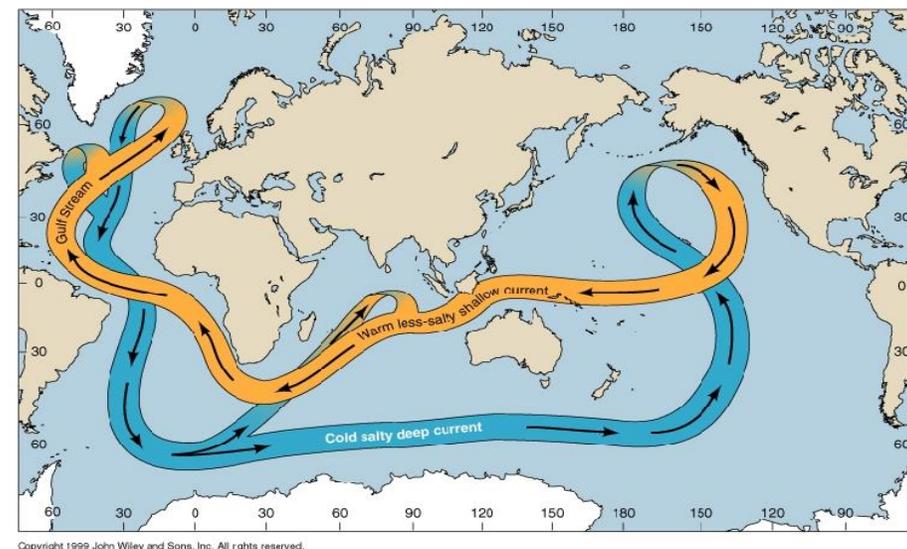
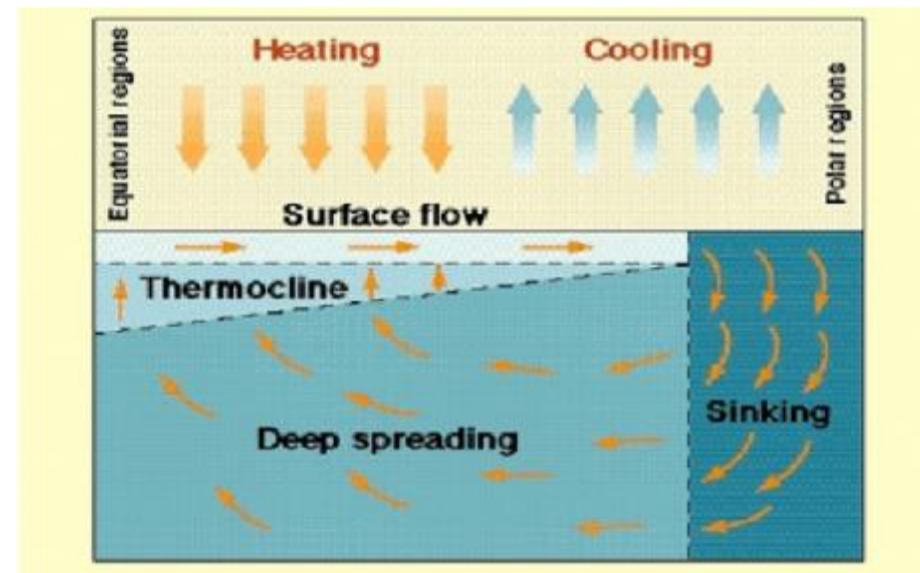
1. Circolazione superficiale (causata dal vento)

- Il moto delle acque superficiali sospinte dallo stress del vento
- La regione in cui dominano i movimenti indotti dal vento è chiamata strato di Ekman (\approx strato rimescolato e termocline)
- il moto complessivo risente della forza di Coriolis e dell'attrito
- I moti risultanti a scala globale formano dei grandi vortici asimmetrici (gyre) che riempiono i bacini oceanici

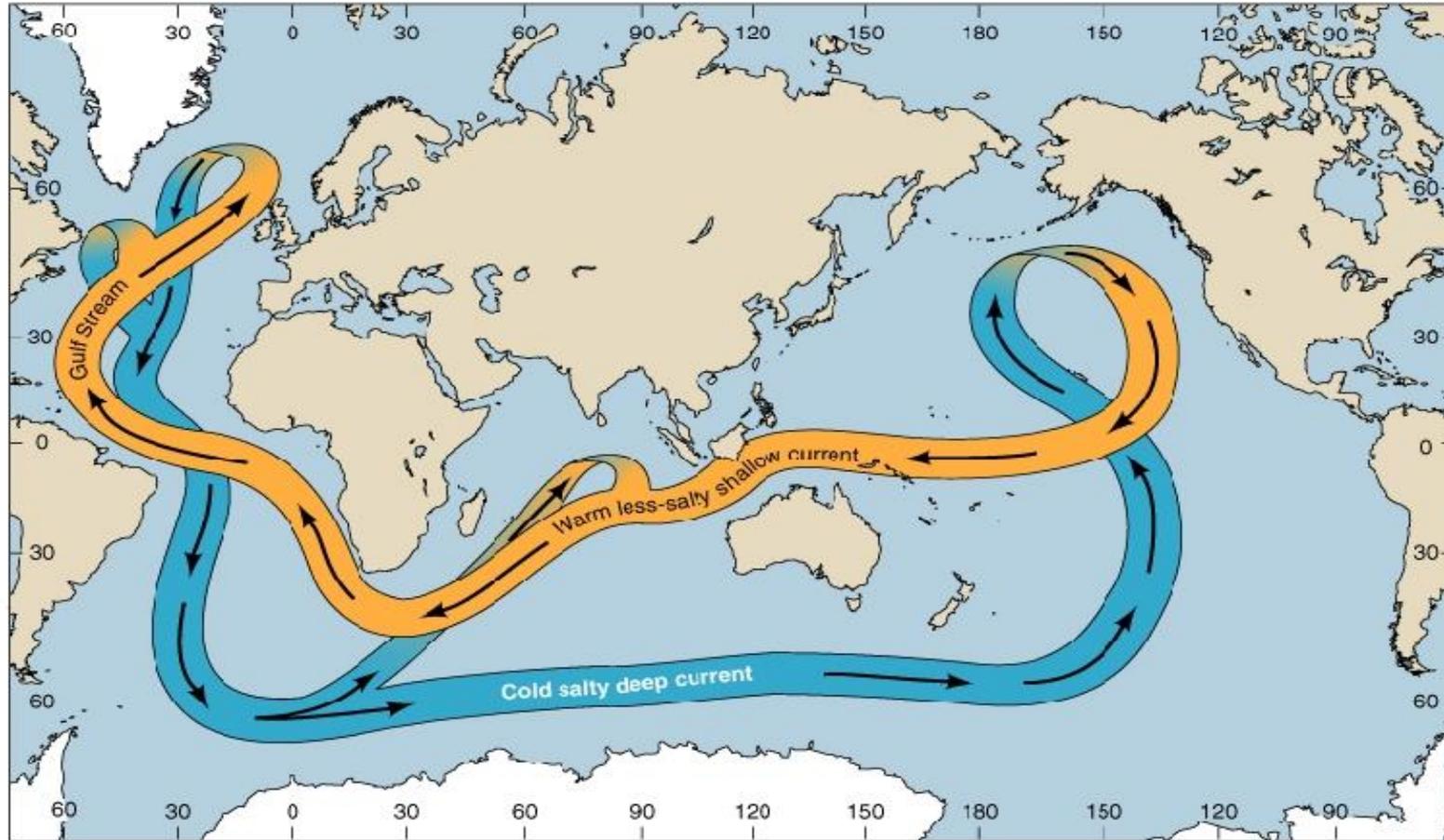


2. Circolazione oceanica profonda (termoalina)

- Nelle regioni polari, il raffreddamento dovuto all'evaporazione e alla poca radiazione solare induce temperature molto basse nello strato rimescolato
- La salinità nelle zone fredde è elevata a causa del basso afflusso di acqua dolce e del congelamento dell'acqua di mare
- Insieme questi fattori provocano un'alta densità e inducono lo sprofondamento dell'acqua nell'Atlantico settentrionale e intorno all'Antartide
- La combinazione della circolazione superficiale e di quella profonda genera una corrente globale (global conveyor belt) di cui i tratti superficiali nei bacini oceanici settentrionali sono una componente, così come lo sono i moti di sprofondamento



La circolazione termohalina: il nastro trasportatore globale

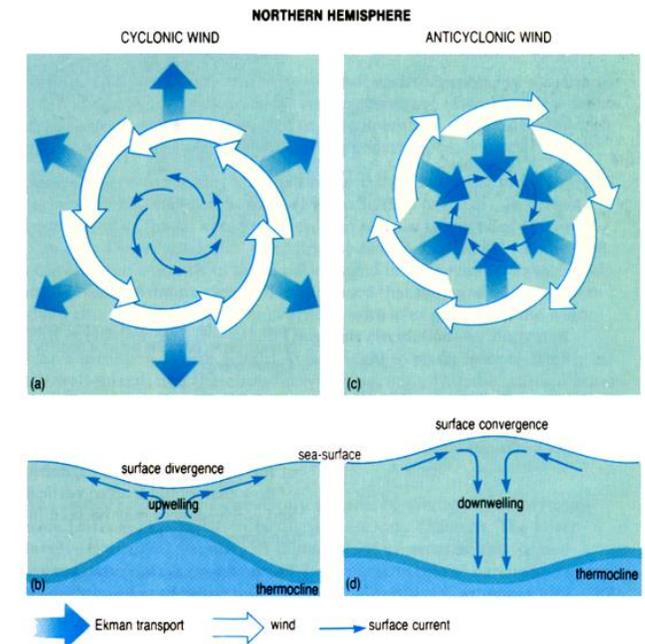
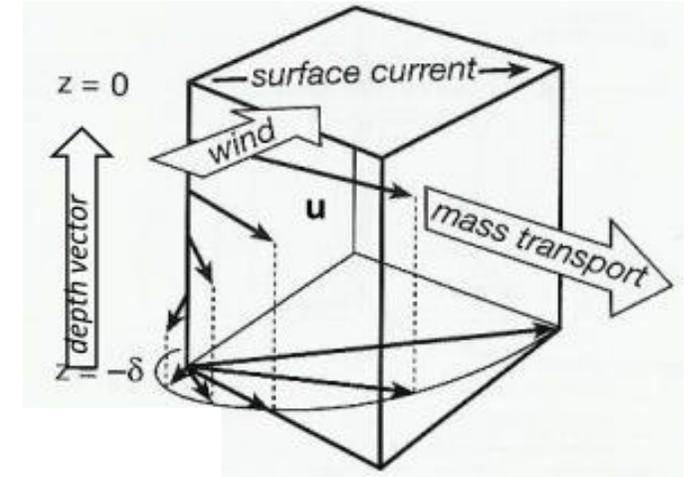


Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

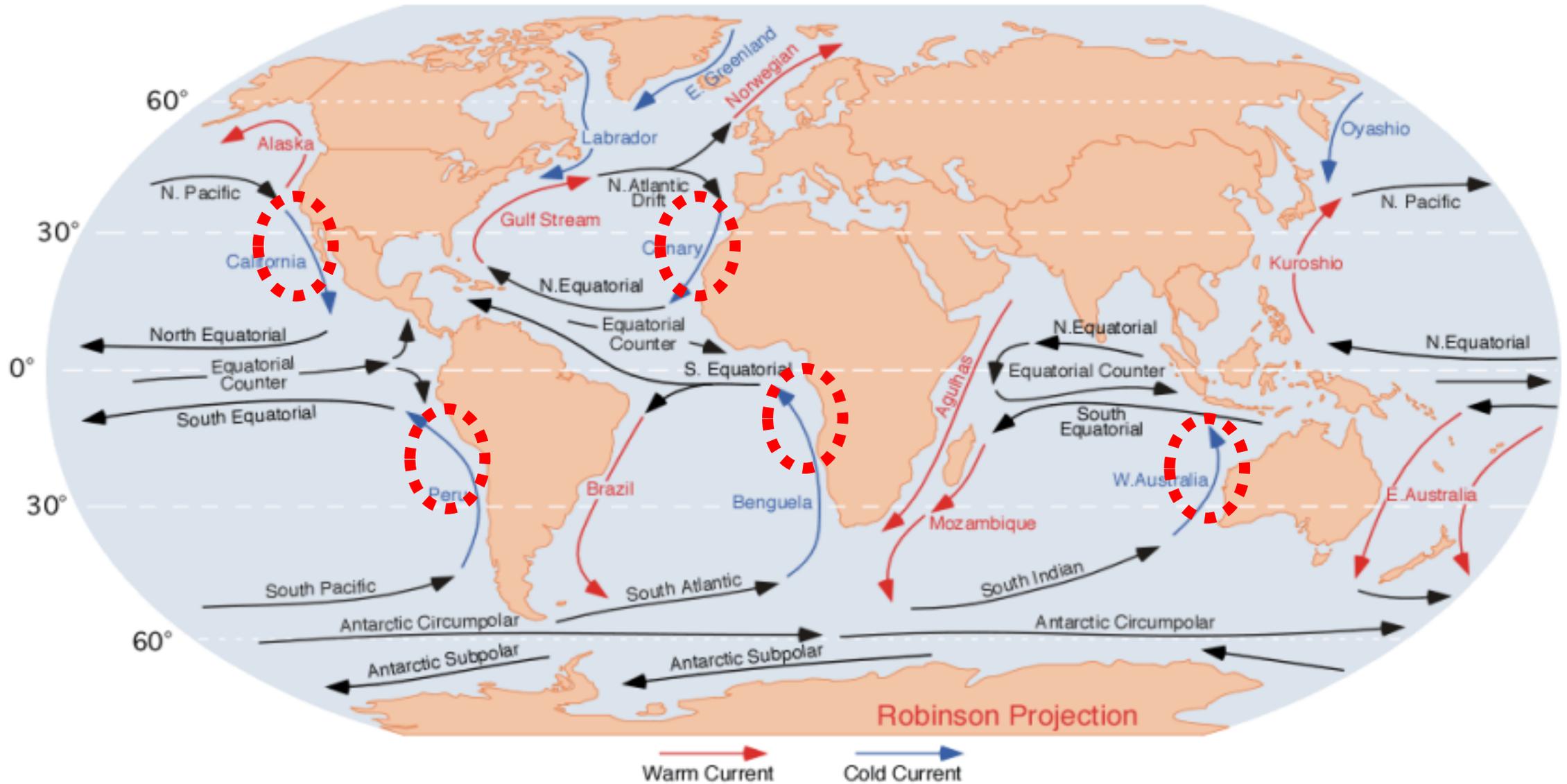
- La forza motrice è lo stress prodotto dal vento
- Il «motore» è presente in due punti: il downwelling nell'Oceano Atlantico settentrionale e quello attorno all'Antartide
- Ci sono moti di risalita (compensativi) nell'Oceano Pacifico settentrionale e Indiano
- **Il flusso effettivo ha una struttura significativamente più complessa**

Due impatti dei gyre

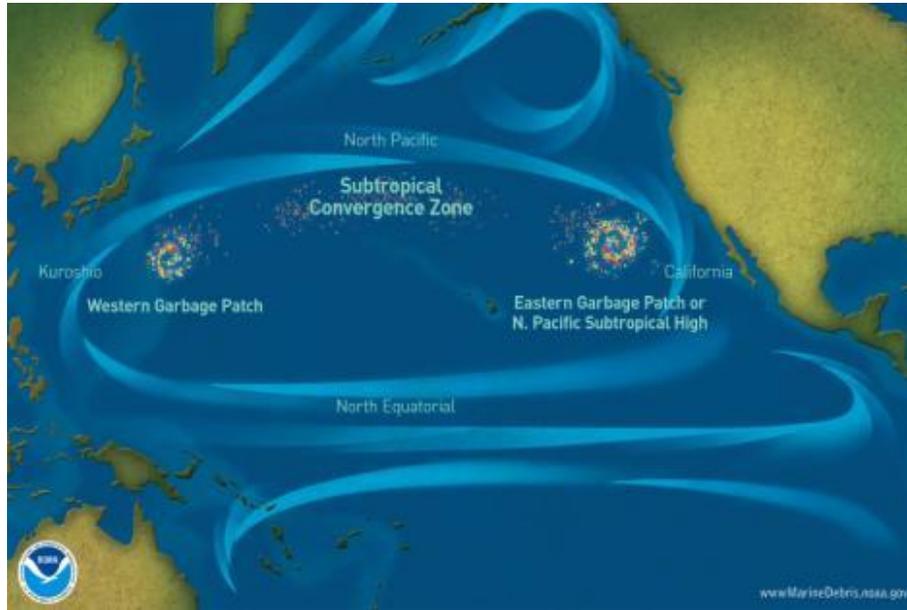
1. Il trasporto dovuto allo stress del vento induce un movimento dello strato di acqua in movimento verso destra (sinistra) nell'emisfero sud (nord)
 - ✓ Se il vento scorre parallelamente alla costa, si genera un trasporto verso il largo che induce upwelling
 - ✓ Le correnti di upwelling sono associate ad acque superficiali più fredde
2. Nei vortici (gyre) si ha moto anticiclonico e questo provoca il sollevamento della superficie del mare, creando downwelling
 - ✓ I moti verticali di downwelling fanno abbassare la linea del termoclino
 - ✓ I moti di downwelling sono associati a acque superficiali più calde



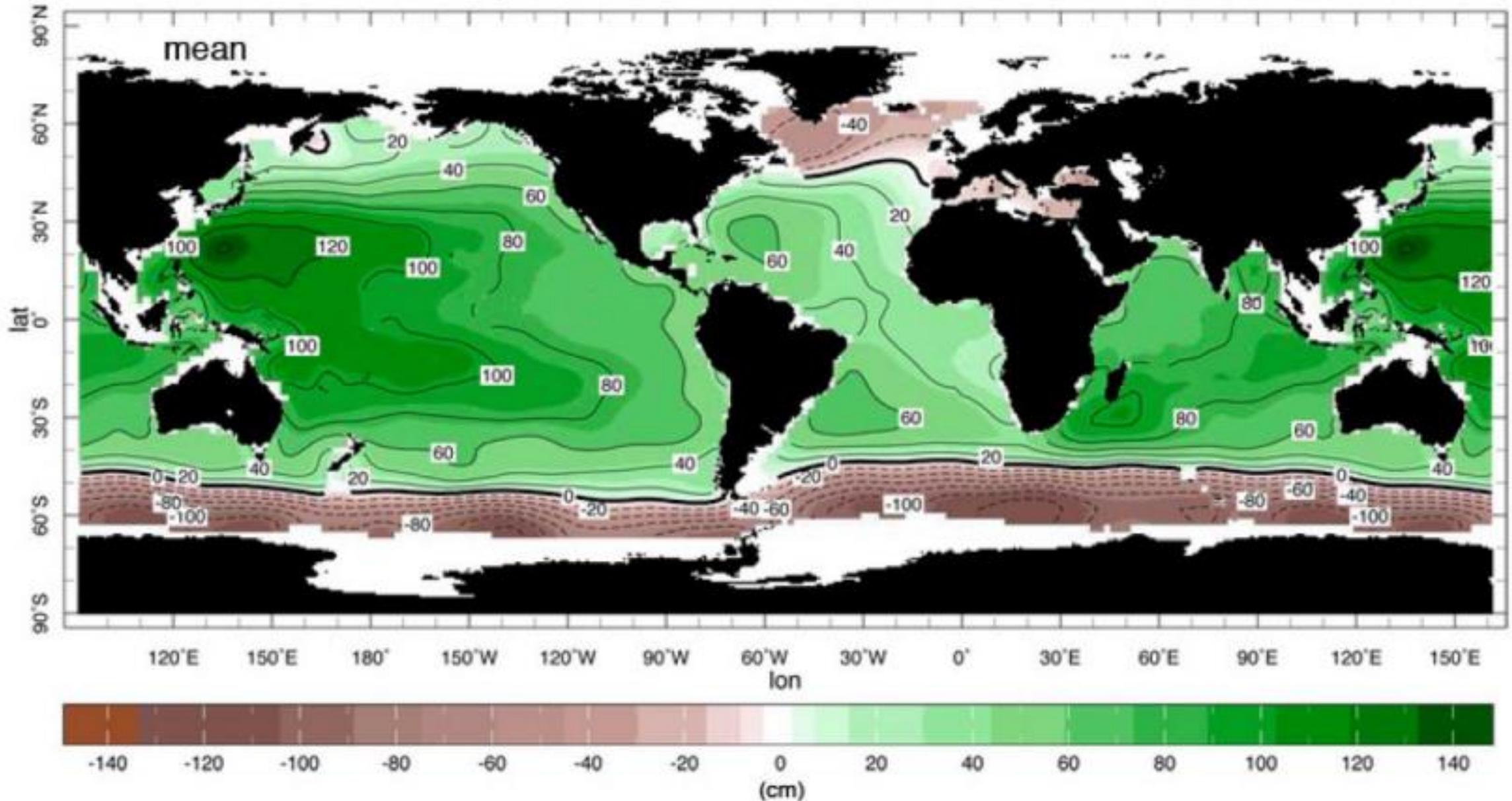
Impatto sulle correnti oceaniche: zone di upwelling



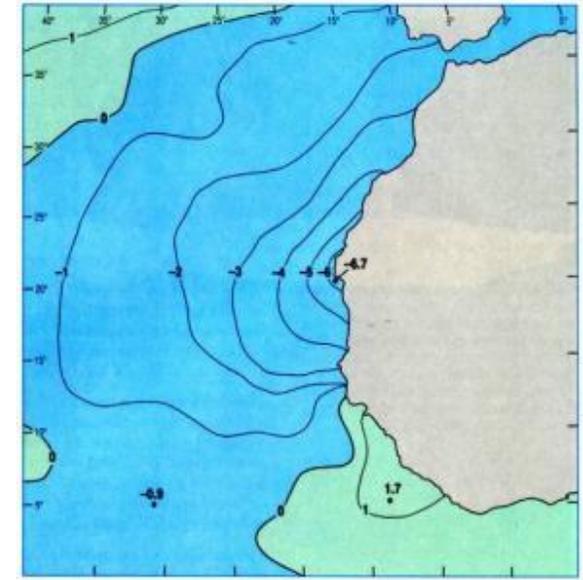
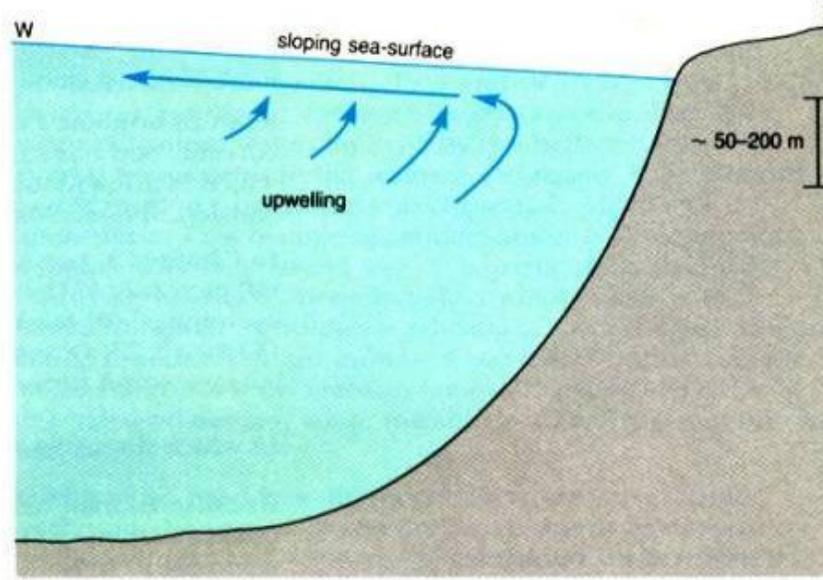
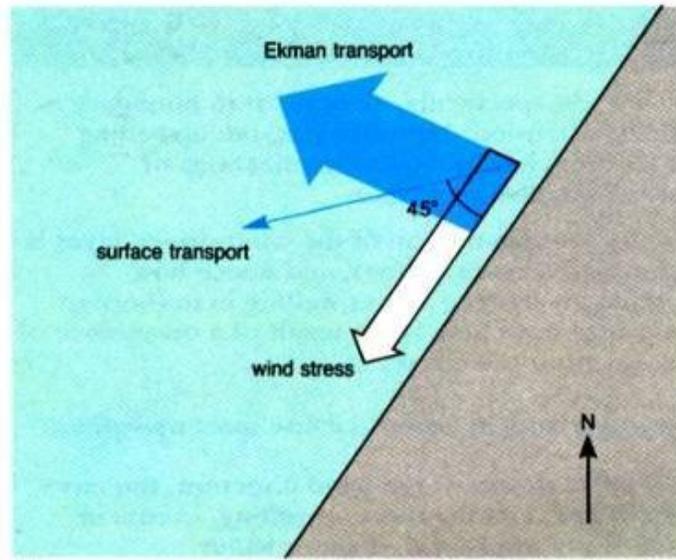
Una prova dell'esistenza dei vortici: le isole di immondizia



Un'altra prova: l'altezza del livello medio del mare

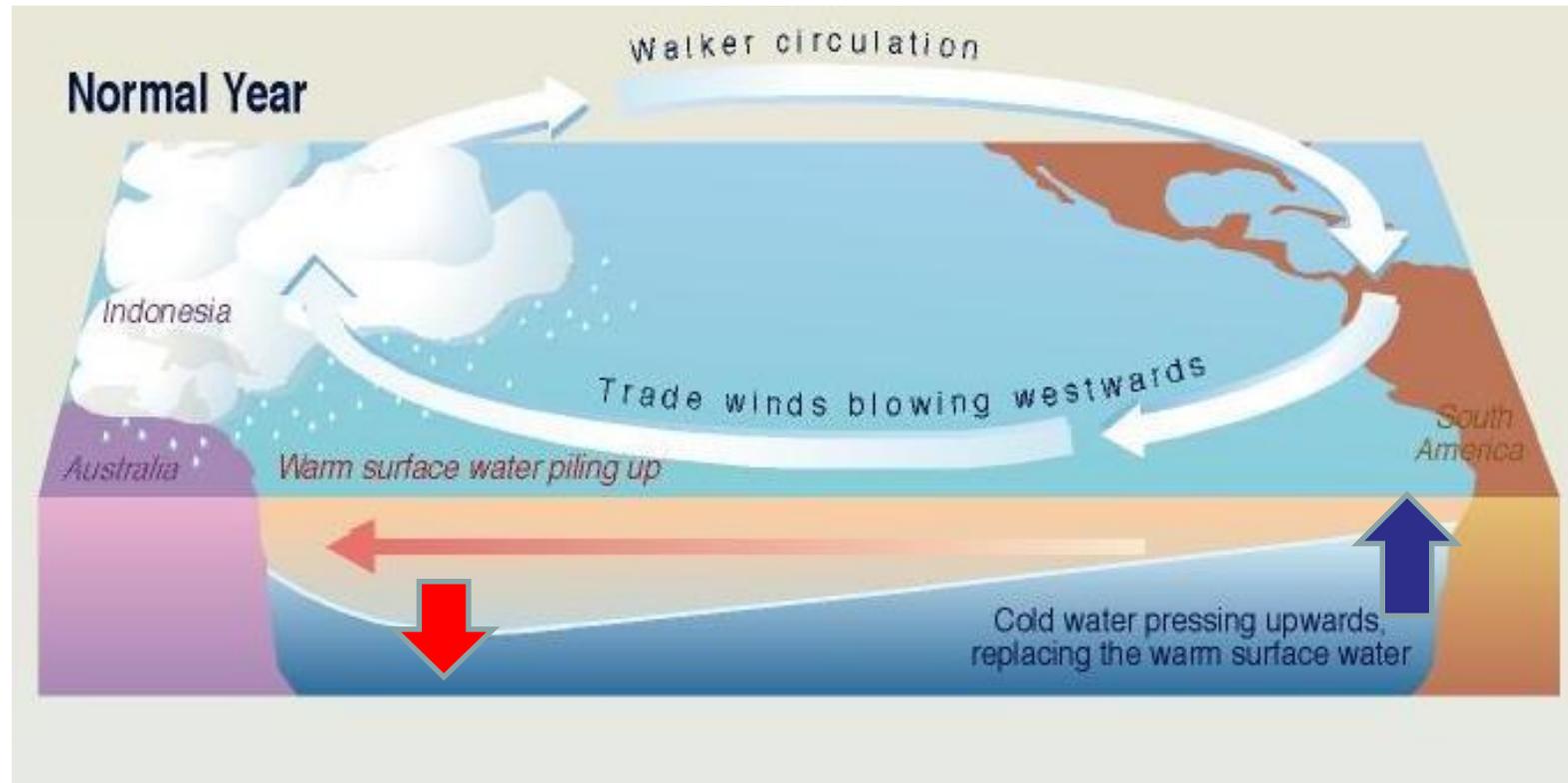


Conseguenze dell'upwelling costiero



- L'esempio delle coste sudamericane: sono sottoposte a correnti «setentrionali»
- Il trasporto della colonna d'acqua avviene verso il largo. Effetti:
 - ✓ Superficie del mare inclinata
 - ✓ Risalita di acqua fredda
- Si produce una deviazione della SST dalla media

Situazione normale



➤ In atmosfera

- ✓ Bassa pressione sull'Indonesia, alta pressione sul Sud America
- ✓ I venti soffiano da est verso ovest

➤ Nell'oceano

- ✓ Termoclino poco profondo lungo il Sud America, forte upwelling, acqua fredda in superficie
- ✓ Termoclino più profondo vicino all'Indonesia, accumulo di acqua superficiale calda

Situazione normale

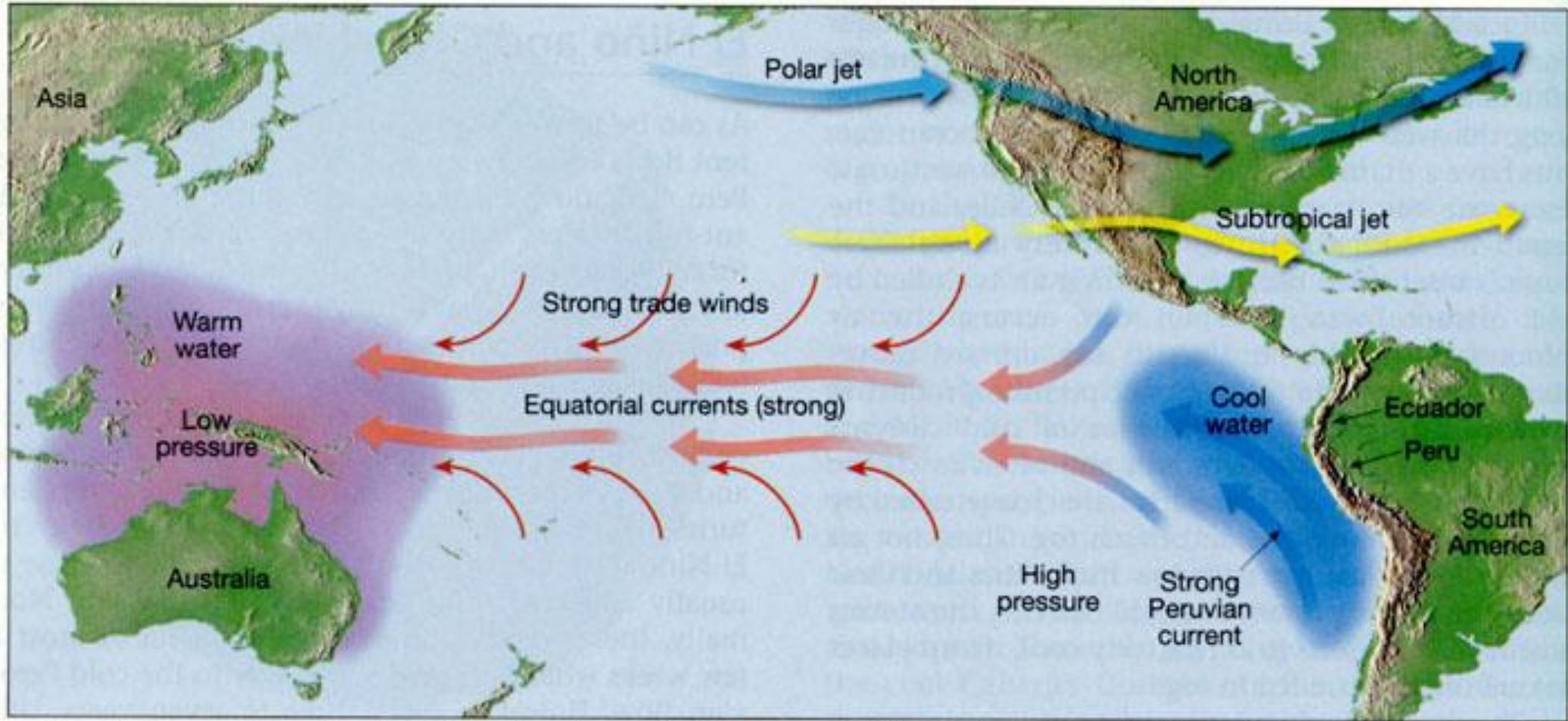
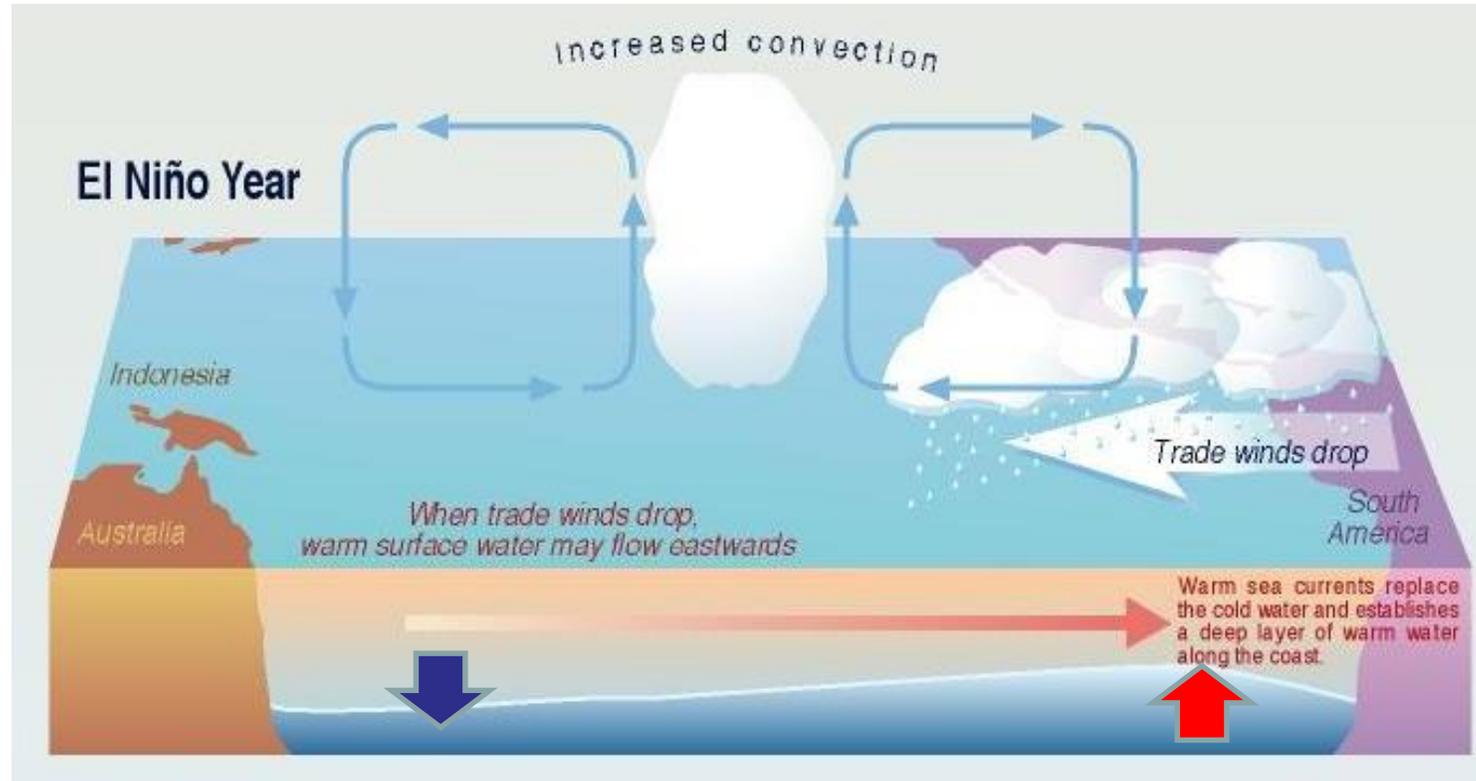


Fig.6 Normally, the trade winds and strong equatorial currents flow toward the west. At the same time, an intense Peruvian current causes upwelling of cold water along the west coast of South America.

Condizioni di El Niño



- Si hanno periodiche variazioni di pressione, che danno luogo all'oscillazione meridionale
- Questo produce delle variazioni rispetto alla situazione normale:
 - ✓ Aumento della pressione sull'Indonesia
 - ✓ diminuzione della pressione sul Sud America
 - ✓ Questo produce un indebolimento dei venti che tendono a soffiare in parte da Ovest verso Est
 - ✓ Il termoclino si approfondisce lungo il Sud America, diventando più piatto: l'acqua superficiale si scalda e scivola verso est lungo il Pacifico equatoriale

Condizioni di El Niño

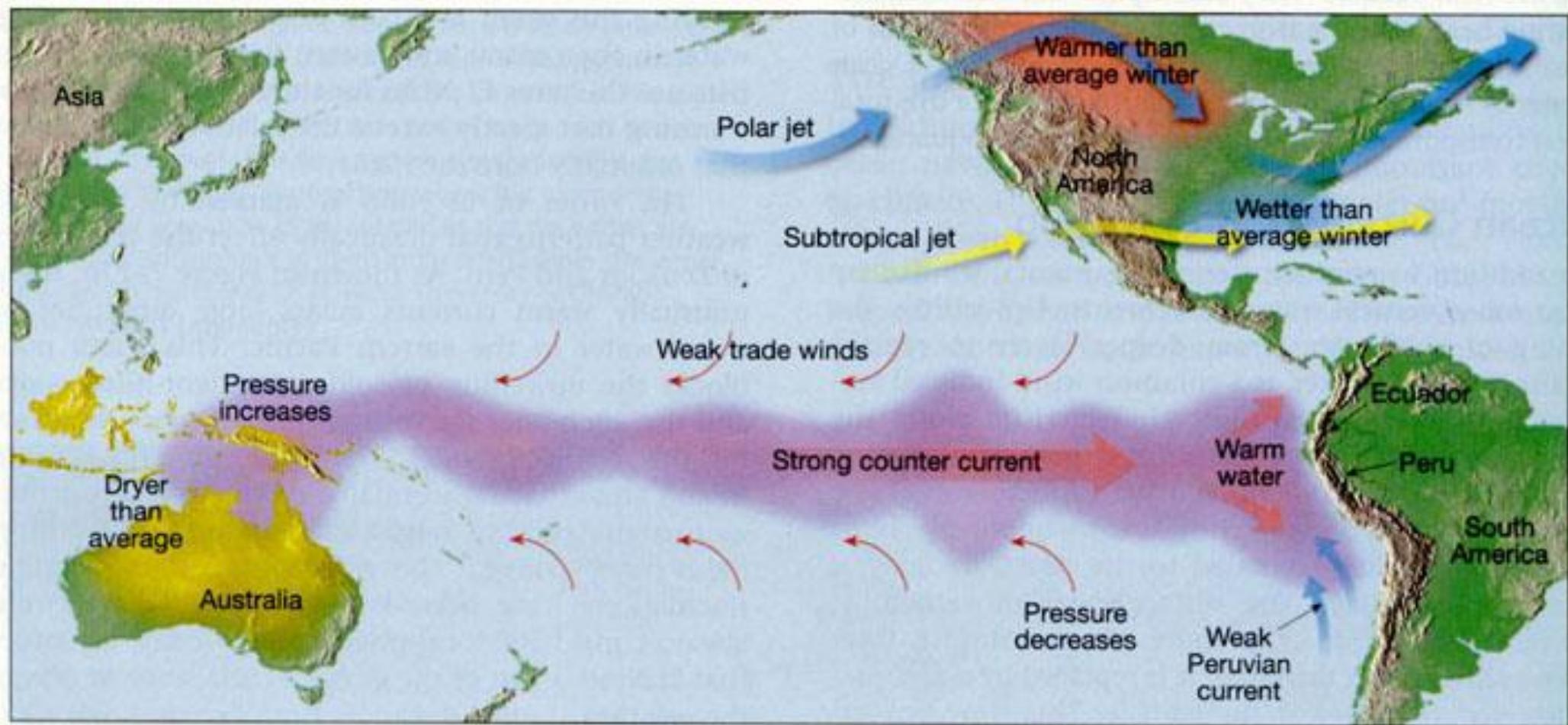
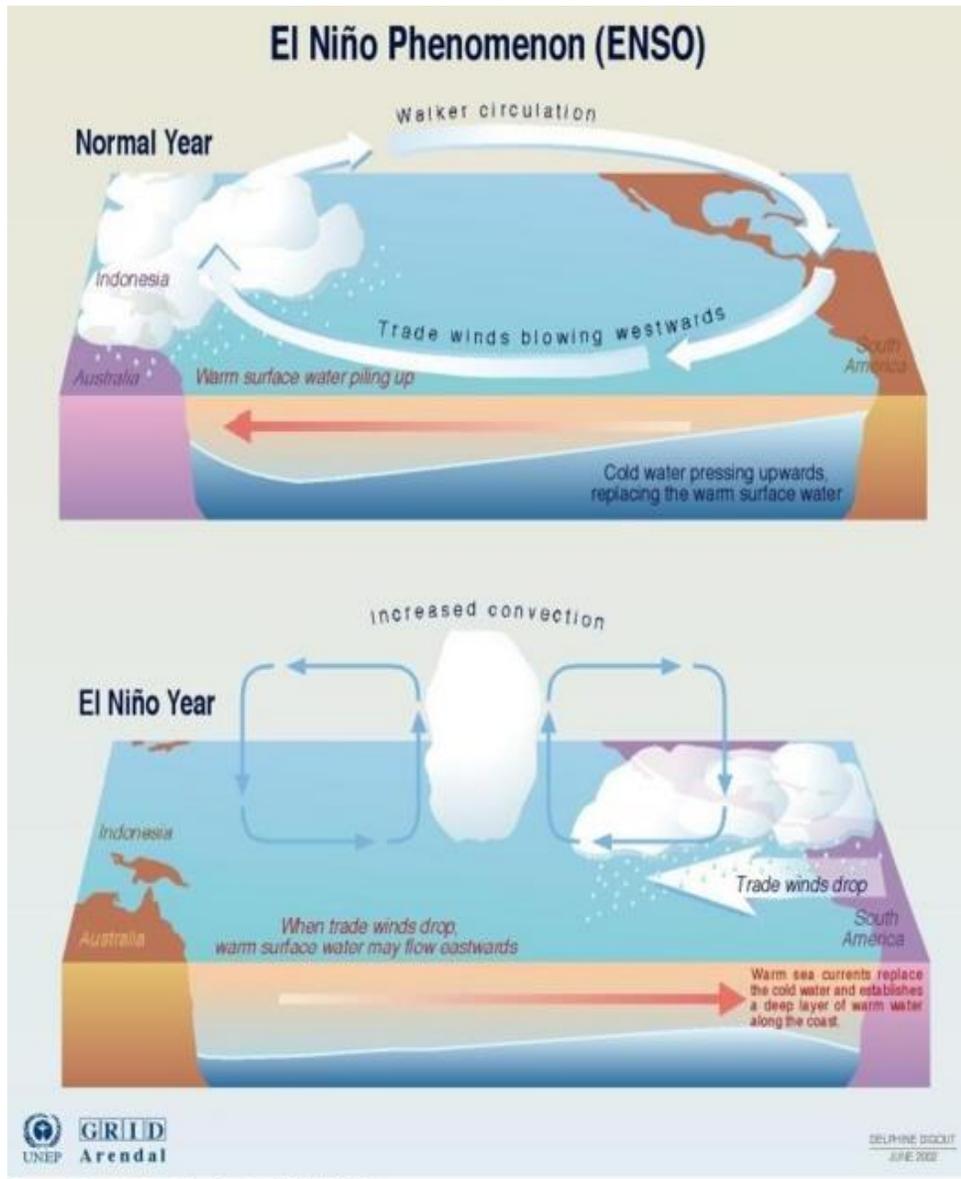
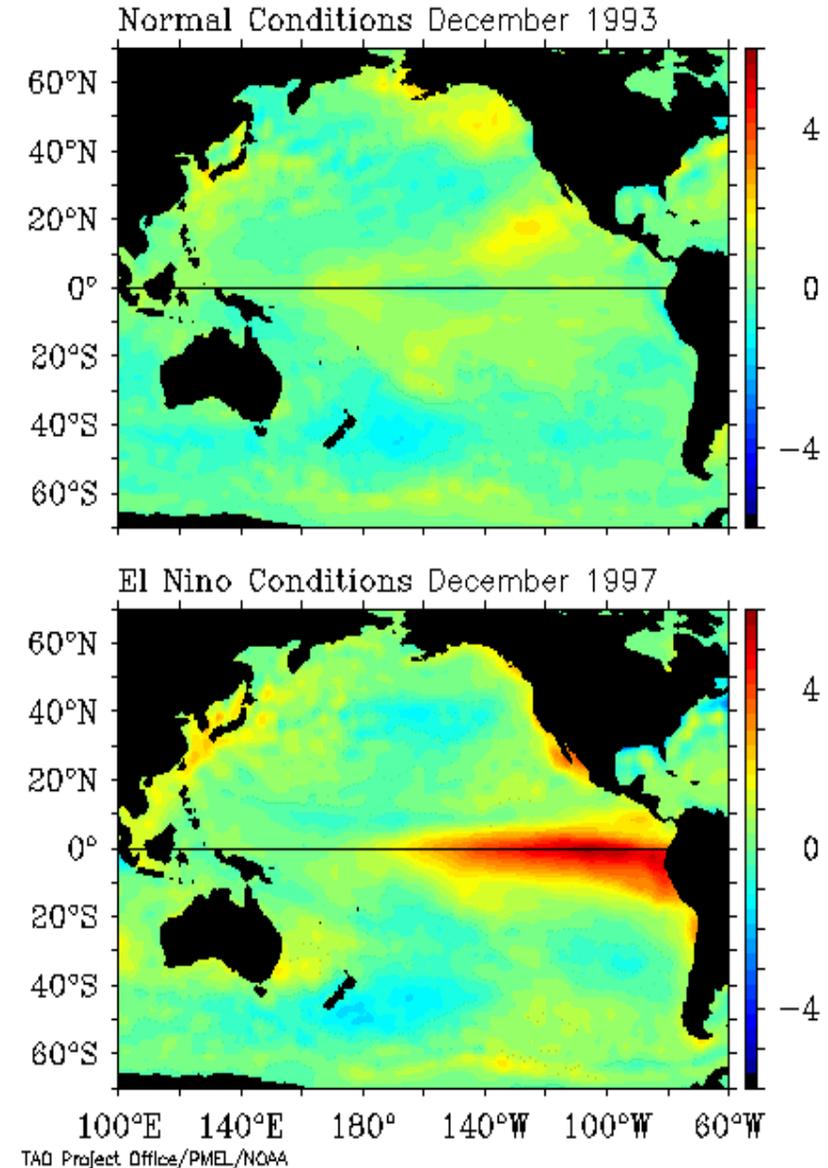


Fig.14 Upon the advent of an ENSO event, the pressure over the eastern and western Pacific flip-flops. This causes the trade winds to diminish, leading to an eastward movement of warm water along the equator. As a result, the surface waters of the central and eastern Pacific warm, with far-reaching consequences to weather patterns.

Condizioni di El Niño



Sources: Climate Prediction Center-NCEP, NOAA.



Condizioni di El Niño



Caratteristiche

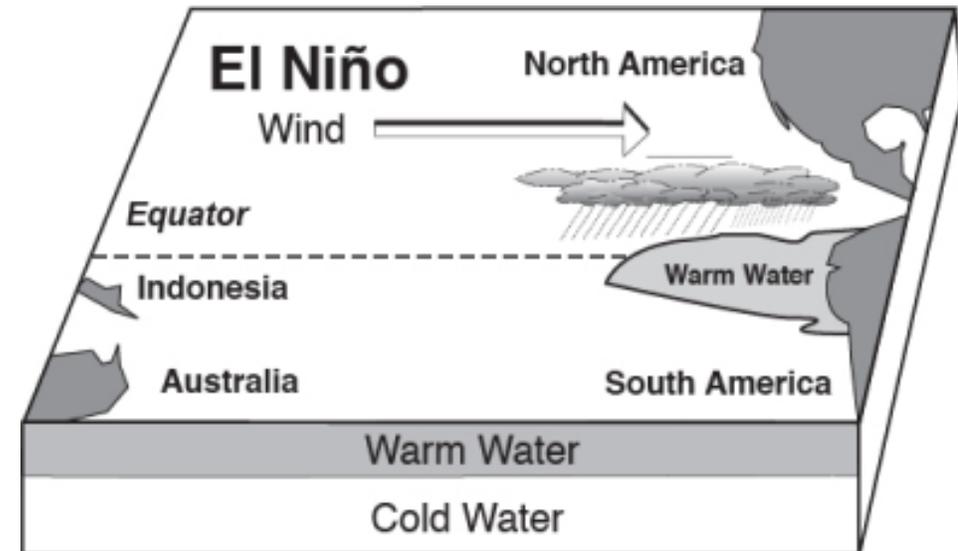
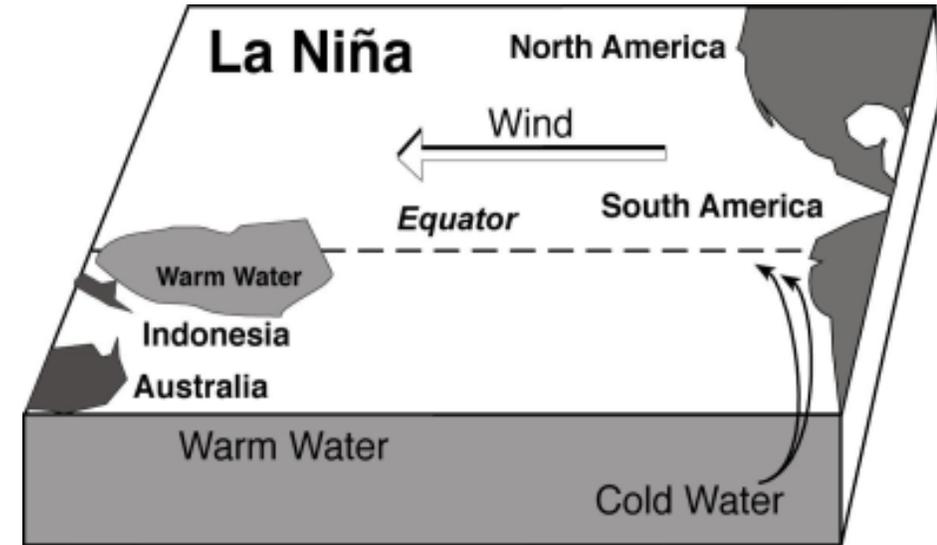
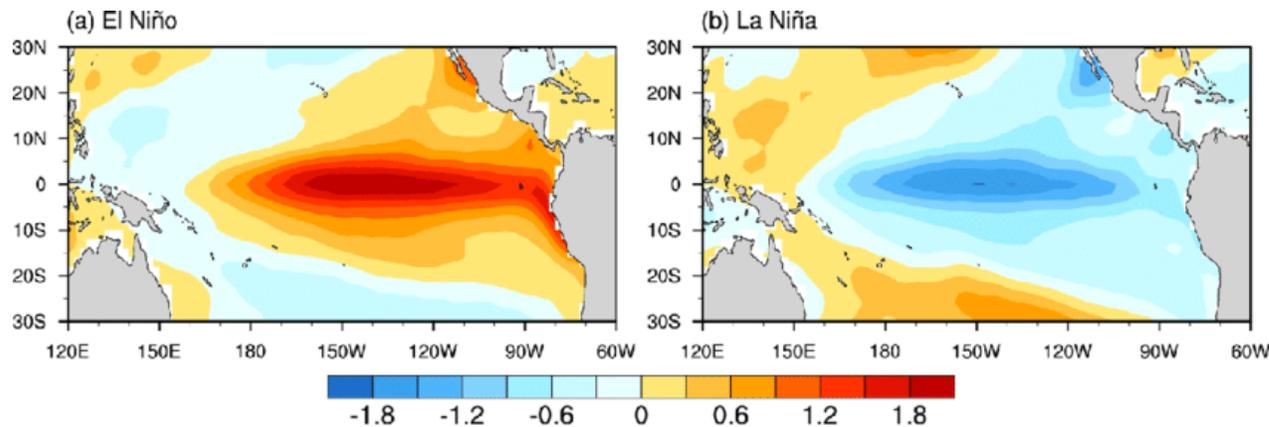
- El Niño si verifica ogni 3-8 anni
- Di solito dura circa 1 anno
- Non si sa ancora bene quale sia il meccanismo iniziale
- Spesso (ma non sempre) l'acqua calda arriva verso le coste del Sud America intorno a Natale, da cui il nome El Niño

Effetti

- Le correnti di upwelling lungo le coste sudamericane si riducono o cessano, o addirittura si invertono
- Senza acqua fredda diminuiscono i nutrienti e i pesci – la pesca è meno produttiva
- Aumentano le precipitazioni su alcune parti del Sud America, degli Stati Uniti occidentali e meridionali, e ci possono essere alluvioni
- Aumentano i casi di siccità in Australia, Indonesia, Filippine
- Si riducono i monsoni estivi nel sudest asiatico

Condizioni di La Niña

- È il caso opposto a quello di El Niño
- L'oscillazione avviene nel senso opposto:
 - ✓ Aumento della pressione sul Sud America e diminuzione sull'Indonesia
 - ✓ Rinforzo dei venti da Est verso Ovest
 - ✓ Il termoclino si approfondisce lungo l'Indonesia e la pendenza si accentua
 - ✓ Le correnti di upwelling lungo le coste sudamericane si rafforzano: anomalia termica più fredda in superficie



La portata delle correnti oceaniche

I flussi qui sono espressi in Sverdrup (Sv): $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

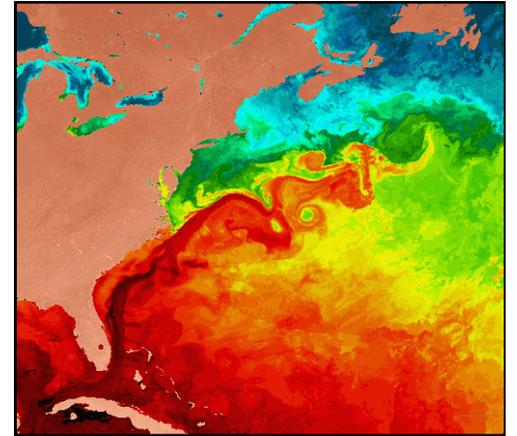
after Pickard and Emery (1982), courtesy Neil Suits

- Rio delle Amazzoni $\sim 0.18 \text{ Sv}$



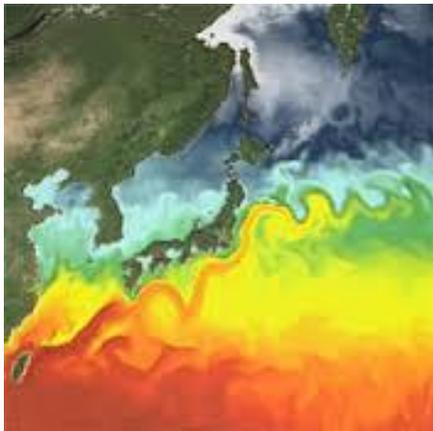
- Corrente del Golfo

- ✓ fino a circa 150 Sv totali
- ✓ $\sim 30 \text{ Sv}$ vicino alla Florida
- ✓ $\sim 75 \text{ Sv}$ al largo di Hateras
- ✓ $\sim 150 \text{ Sv}$ a 65° W



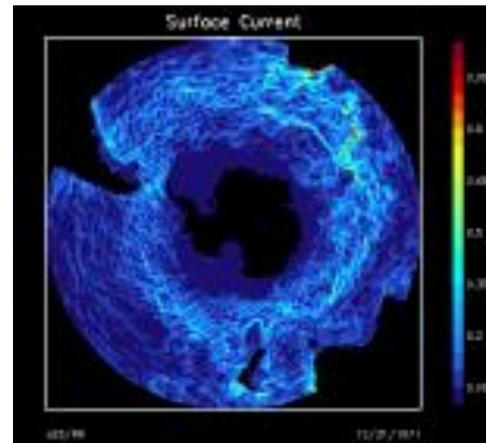
- Corrente di Kuroshio

- ✓ $\sim 30 \text{ Sv}$
- ✓ Valore Massimo di $\sim 75 \text{ Sv}$



- Corrente circumpolare antartica

- ✓ In media $\sim 110 \text{ Sv}$
- ✓ varia da 30 a 290 Sv



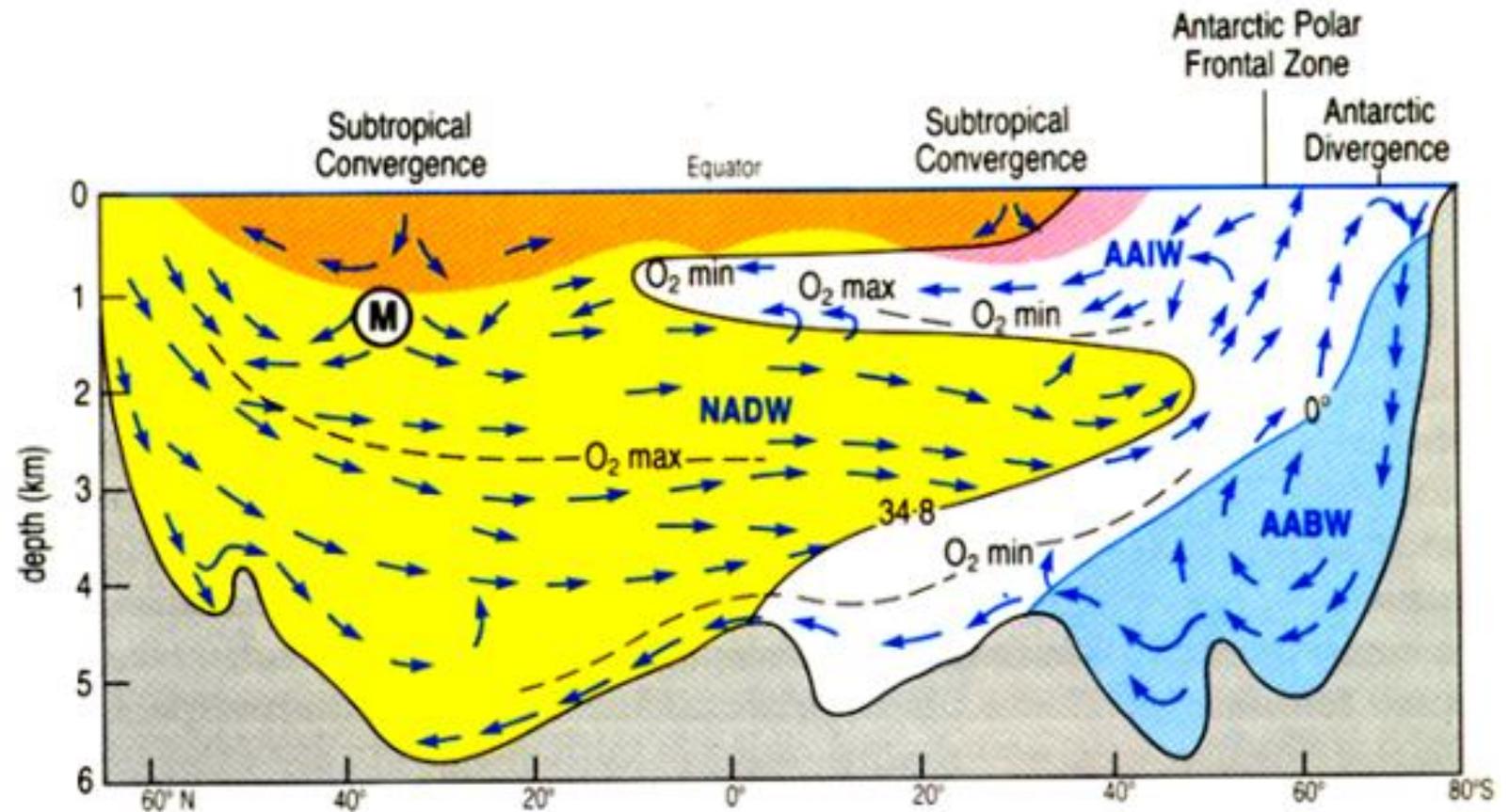
- Per confronto, la portata media del Po è di $1540 \text{ m}^3/\text{s}$, ovvero 0.00154 Sv



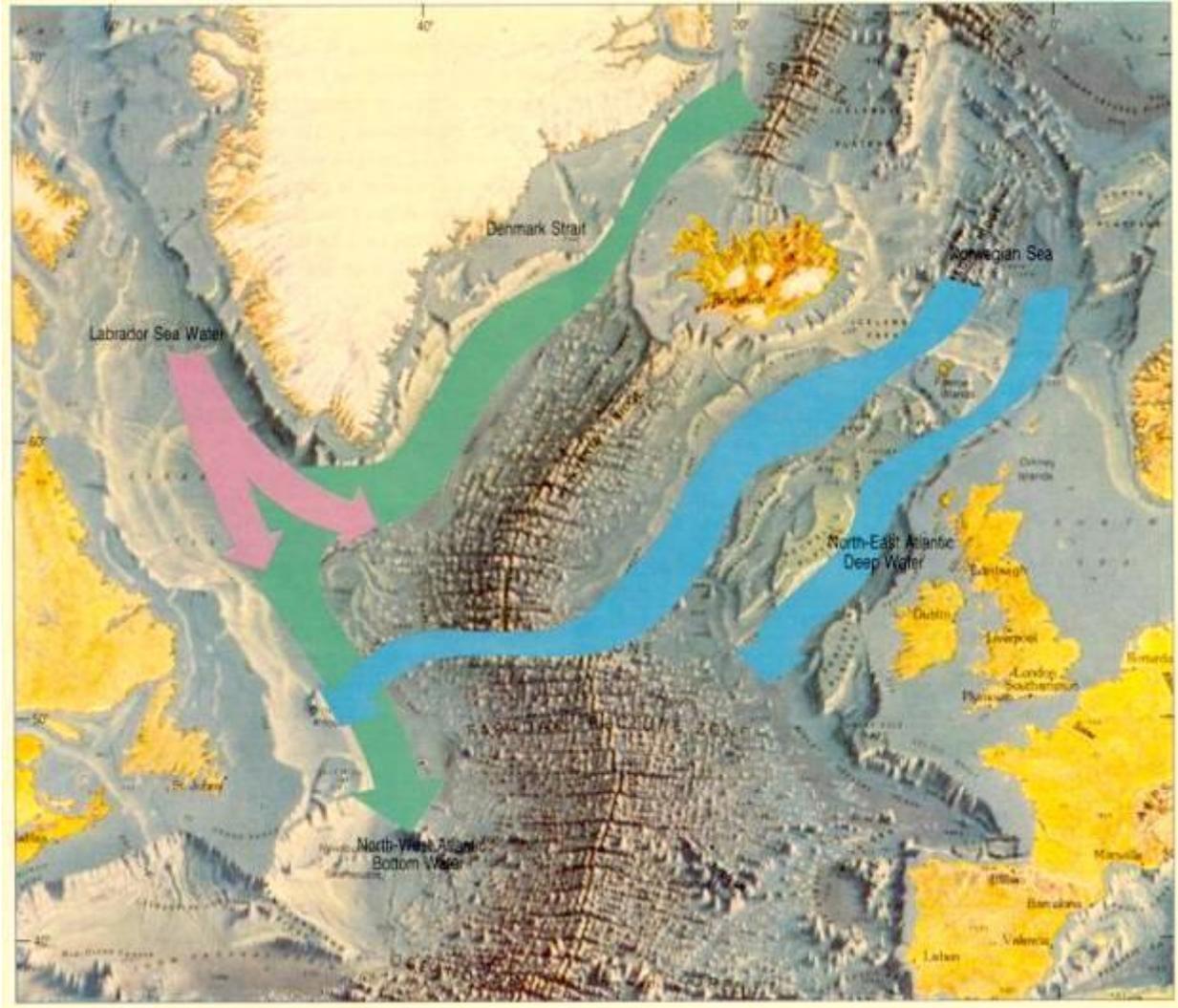
Le masse d'acqua atlantiche

- Sprofondamento dell'acqua nell'Atlantico settentrionale
- Sprofondamento dell'acqua attorno all'Antartide

Figure 6.15 Meridional cross-section of the Atlantic Ocean, showing movement of the major water masses; NADW = North Atlantic Deep Water; AAIW = Antarctic Intermediate Water; AABW = Antarctic Bottom Water. Water with salinity greater than 34.8 is shown yellow; note how the low salinity tongue of AAIW extends northwards from the Antarctic Polar Frontal Zone, to overlie the more saline NADW. The M at about 35°N indicates the inflow of water from the Mediterranean. Water warmer than 10 °C is shown pink/orange, and the cooler than 0 °C (corresponding approximately to the distribution of AABW) is shown blue. The oxygen maxima and minima will be explained in Section 6.5.



North Atlantic Deep Water (NADW)



- Lo sprofondamento dell'acqua nell'Atlantico settentrionale e conseguente formazione di acque profonde avviene a sud della Groenlandia e tra Islanda, Gran Bretagna e Norvegia
- Le correnti sotterranee fluiscono verso sud verso il centro del bacino atlantico

La formazione di acqua profonda al largo dell'Antartide

Figure 6.19 The different roles played by coastal and 'open ocean' polynyas in the production of Antarctic Bottom Water.

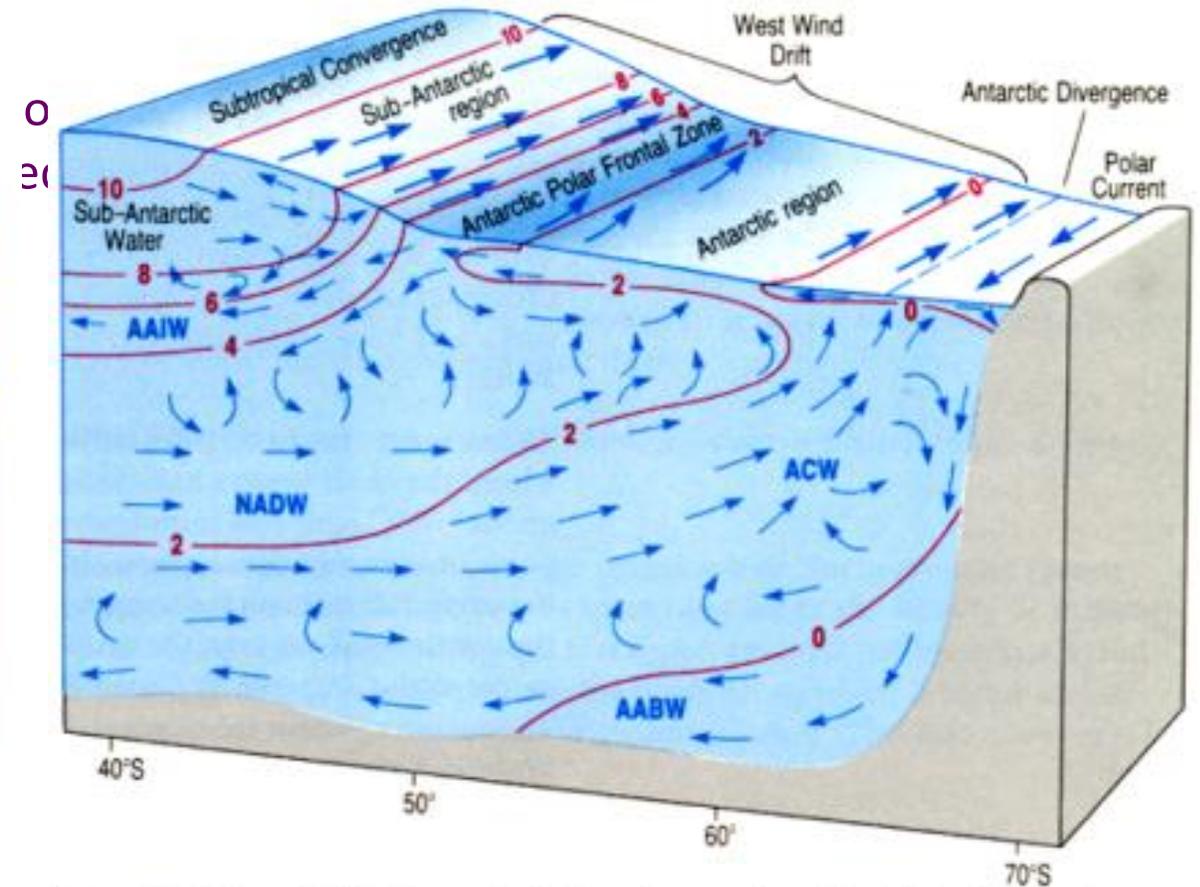
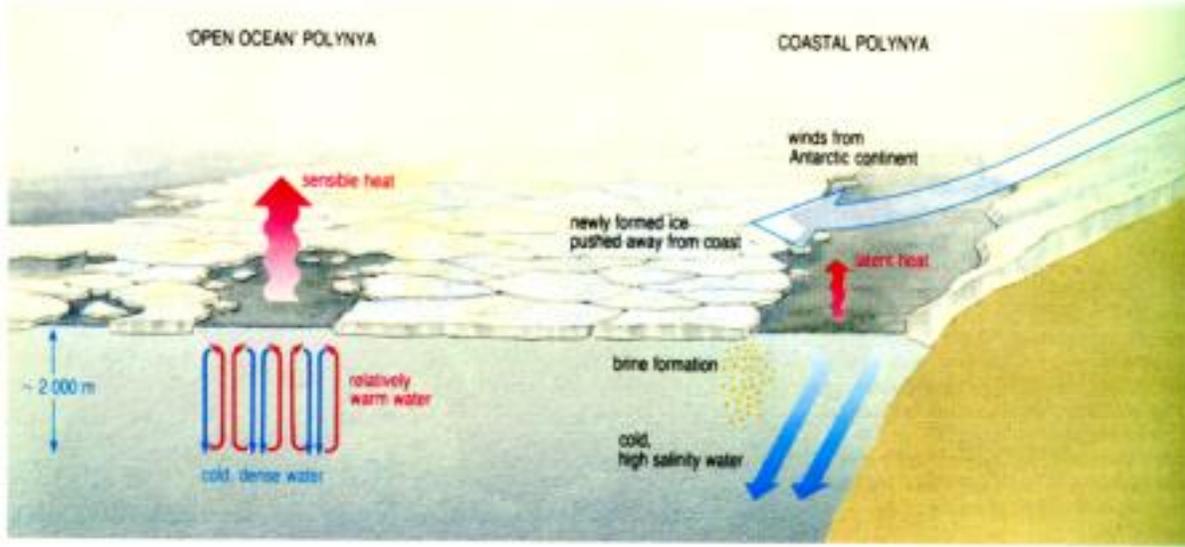


Figure 6.20 Schematic block diagram showing the surface currents and the vertical motion of water masses in the Atlantic Ocean poleward of about 40° S. North Atlantic Deep Water (NADW) becomes Antarctic Circumpolar Water (ACW) and rises to the surface at the Antarctic Divergence. Surface water flowing northwards from the Antarctic Divergence sinks at the Antarctic Polar Frontal Zone (as AAIW), while that flowing southwards may become AABW. The contours show isotherms in °C; this schematic diagram should be compared with Figure 5.23 which shows the actual temperature and salinity distribution measured in the Drake Passage between 56° and 62° S.

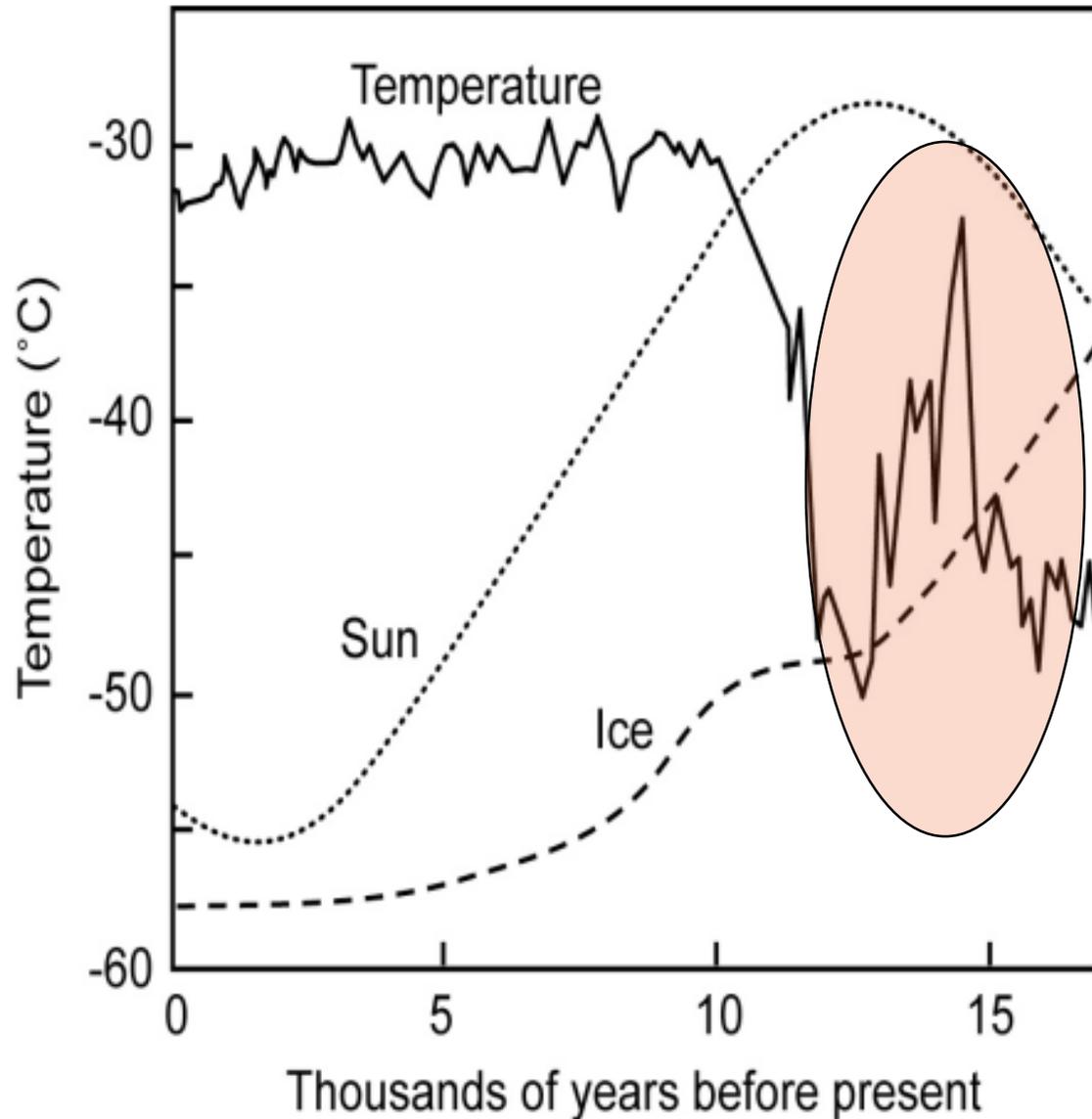
Vulnerabilità della circolazione termoalina

- A nord dei 40°N, le precipitazioni e il runoff (compreso quello dai ghiacci) superano l'evaporazione di $\sim 0,3$ Sv
- Finché il flusso è abbastanza veloce, il tempo di residenza dell'acqua in questa zona non è sufficiente per diluire troppo la salinità
 - ✓ Quindi la densità rimane alta e l'acqua sprofonda
- L'aumento delle precipitazioni o del flusso dal ghiaccio renderebbe l'acqua meno densa e potrebbe rallentare lo sprofondamento
- in caso di forti variazioni si potrebbe verificare il "collasso" della circolazione termoalina
- Questo accadde davvero ~ 11.500 anni fa (Younger Dryas)
- Anche durante le glaciazioni ci furono variazioni

Dryas Octopetella



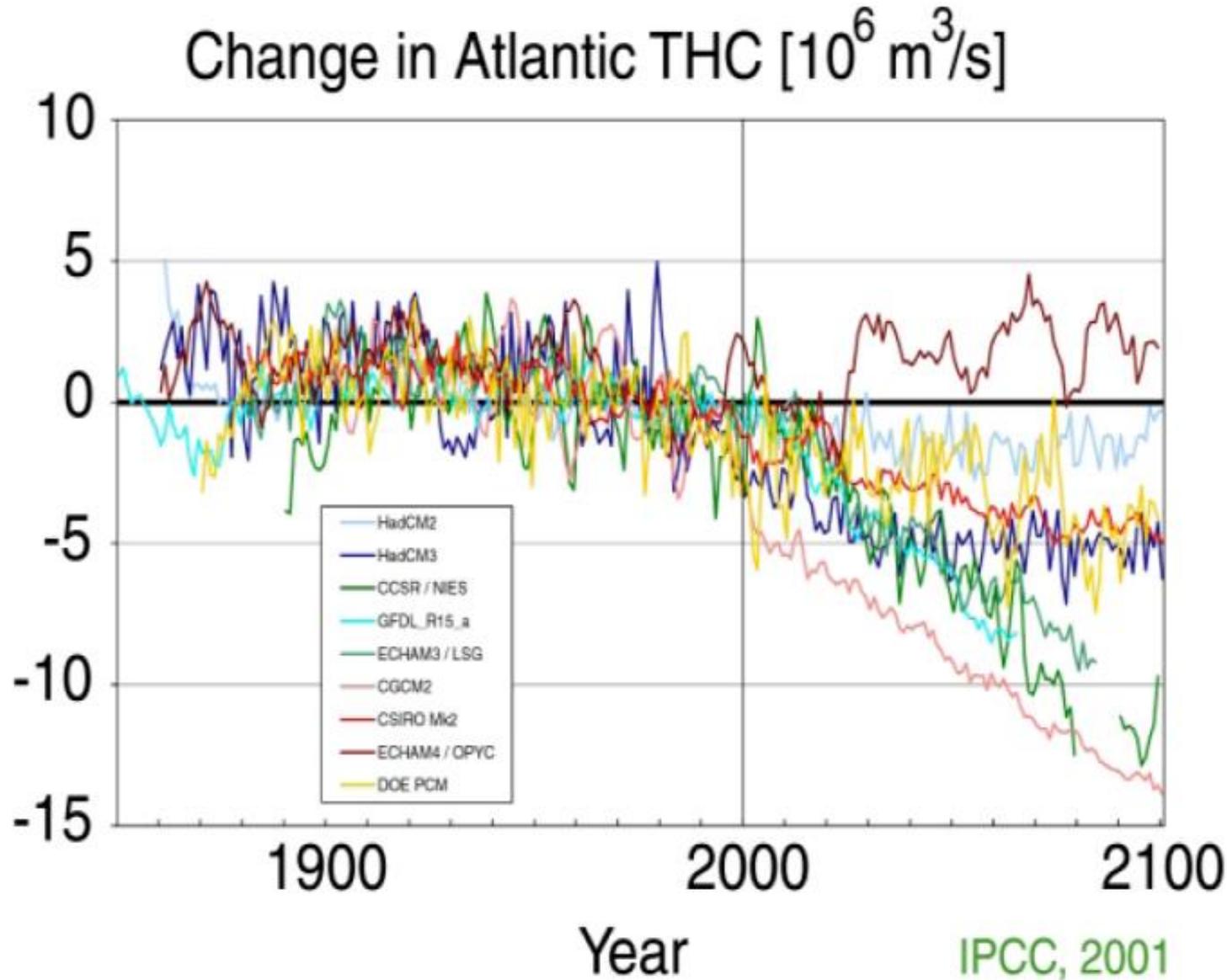
Cambiamenti climatici rapidi: l'evento Younger Dryas



- È l'unico meccanismo che potrebbe aver innescato cambiamenti così forti nella circolazione oceanica
 - ✓ Un altro meccanismo potrebbe essere quello delle eruzioni vulcaniche
- Le prove provenienti dai sedimenti oceanici favoriscono questa interpretazione
- Queste rapide transizioni suggeriscono che l'accoppiamento tra atmosfera e oceano può avere più di uno stato di equilibrio, e che il sistema climatico può cambiare rapidamente tra questi due stati

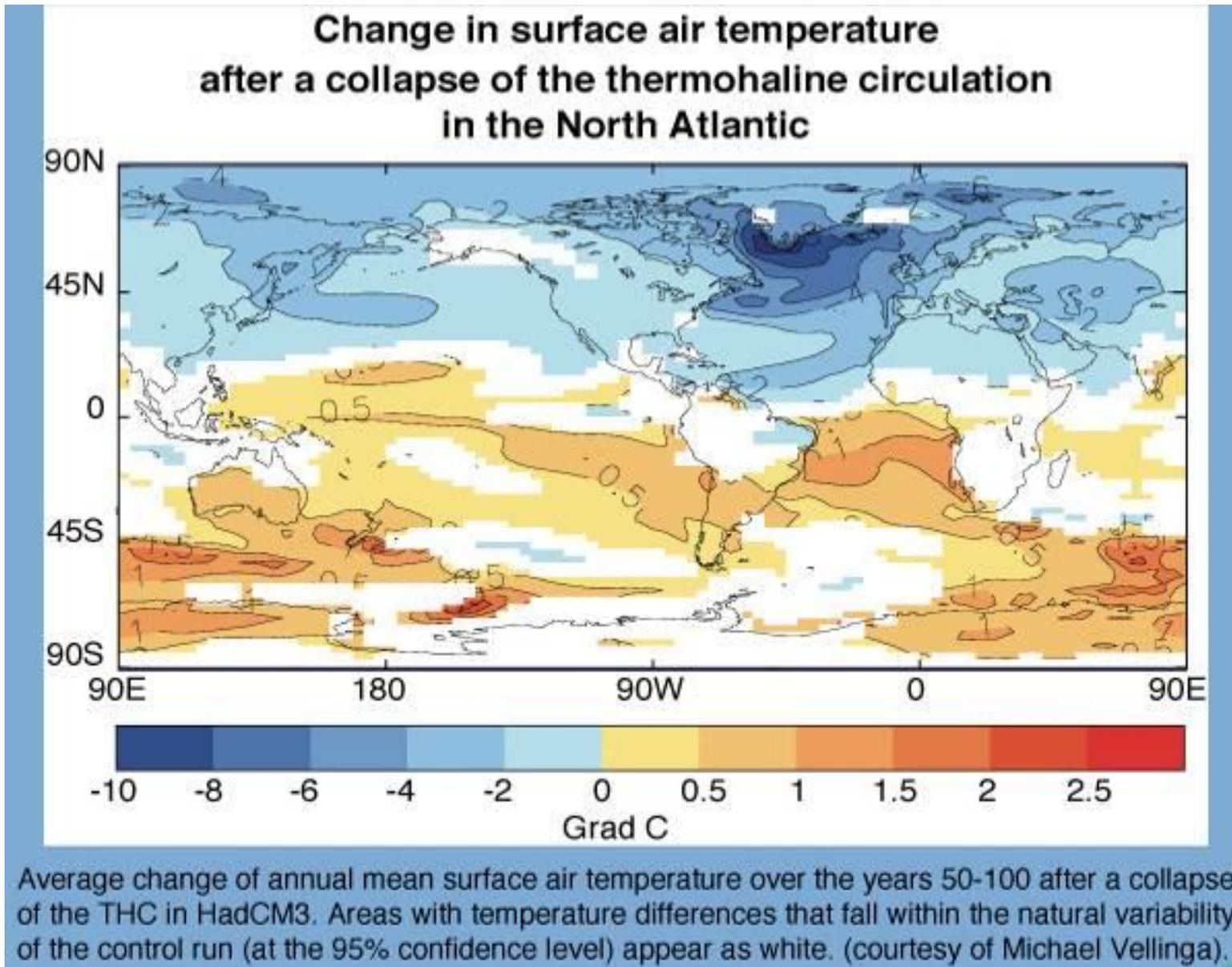


Cosa prevedono i modelli climatici?



- La maggior parte dei modelli, con una sola eccezione, prevede un rallentamento del flusso della circolazione termoalina
- Il flusso effettivo attuale è di circa 15 Sv ($15 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)

Una simulazione del collasso della circolazione termoalina



- Raffreddamento forte nell'Atlantico settentrionale e in Europa occidentale
- Raffreddamento moderato nel Pacifico nord-occidentale, nell'Atlantico centrale, in Siberia, tra il Caucaso e l'Himalaya
- Piccolo raffreddamento in Nord America, Asia, Nord Africa, Pacifico centrale e nord-orientale
- Piccolo riscaldamento nell'emisfero australe