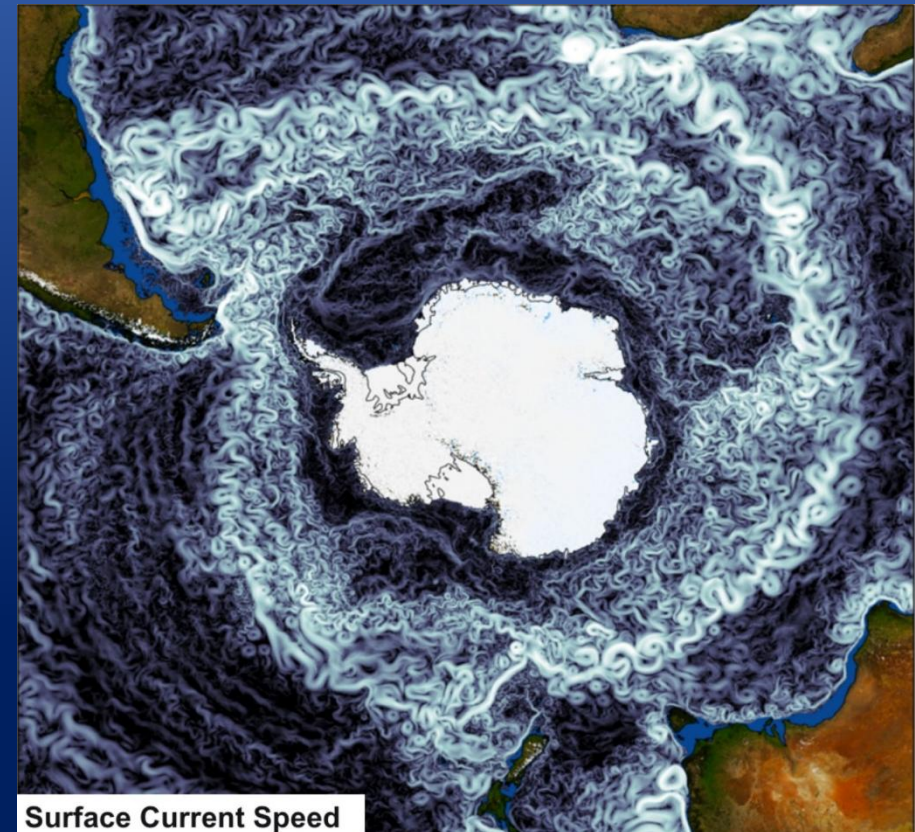


Circolazione Oceanica a grande scala



Lezione 4: Corso di
oceanografia
Anno Accademico 2025-2026

Milena Menna



Le Equazioni del Moto (o di conservazione del momento)

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + 2\Omega x V + g + F$$

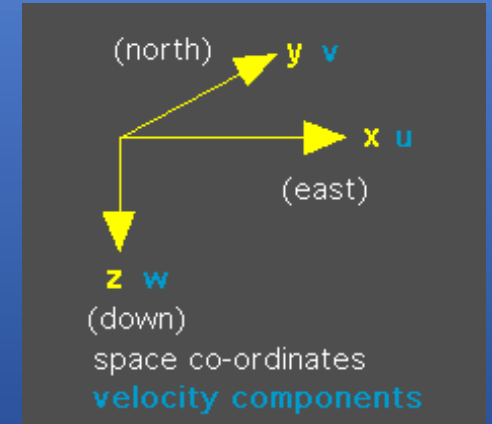
accelerazioni

Forza del
gradiente di
pressione

Forza di
Coriolis

Forza di
Gravità
(agisce solo in
direzione z)

Altre forze (attriti,
forze viscosi,
maree)
Tra cui il wind-stress
 F_{wind}



$$\frac{dV}{dt} \left(\frac{du}{dt}, \frac{dv}{dt}, \frac{dw}{dt} \right)$$

Equazioni
geostrofiche

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = \rho f v g; \\ \frac{dp}{dy} = -\rho f u g; \\ \frac{dp}{dz} = -\rho g; \end{cases}$$

Pressione
idrostatica

Velocità
geostrofiche

$$v_g = \frac{1}{f\rho} \frac{dp}{dx}$$

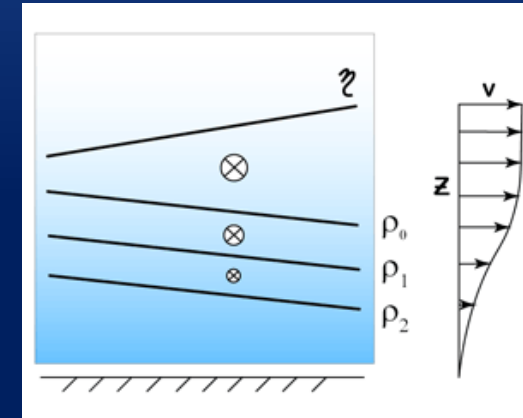
$$u_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{dp}{dy}$$

$$p = \rho g \eta$$

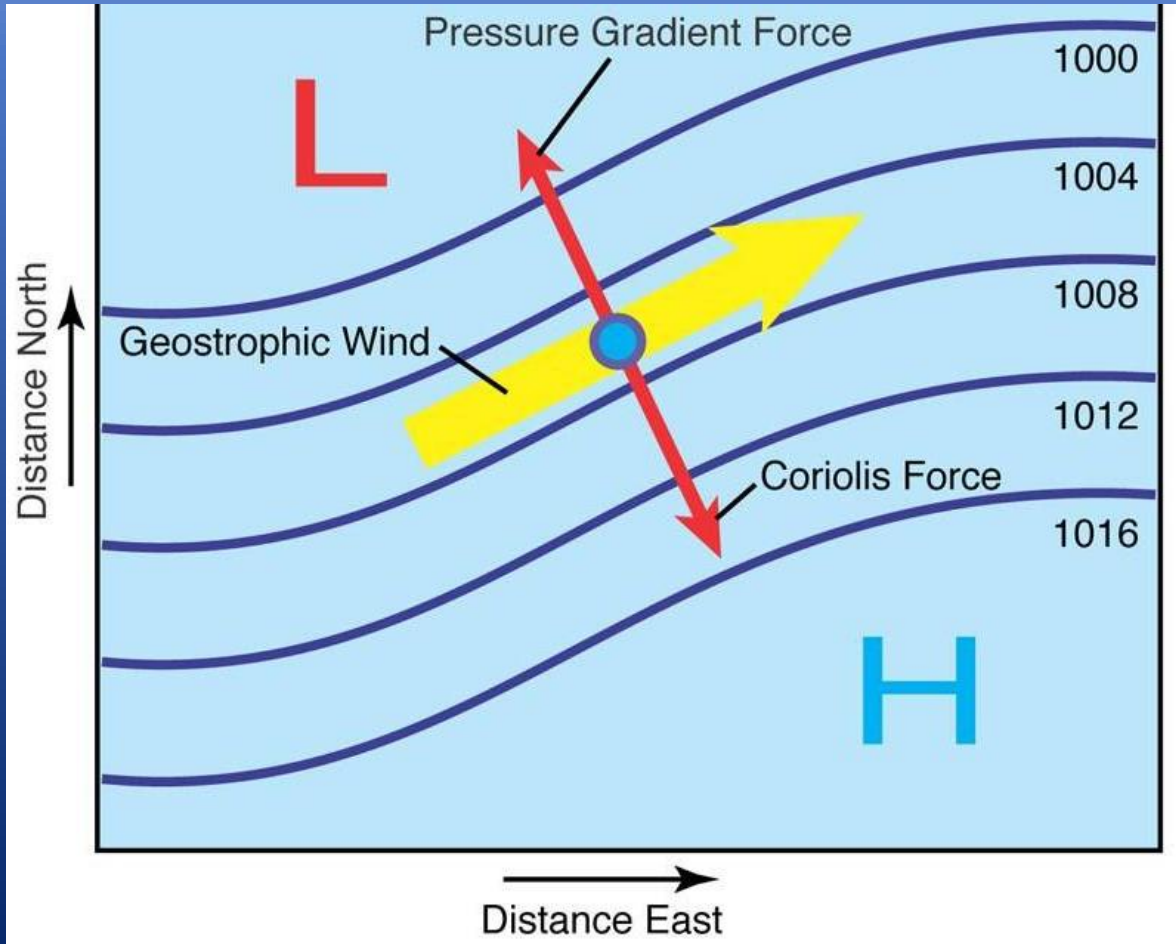
$$v_g = \frac{g}{f} \frac{d\eta}{dx}$$

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{d\eta}{dy}$$

η altezza della
superficie libera

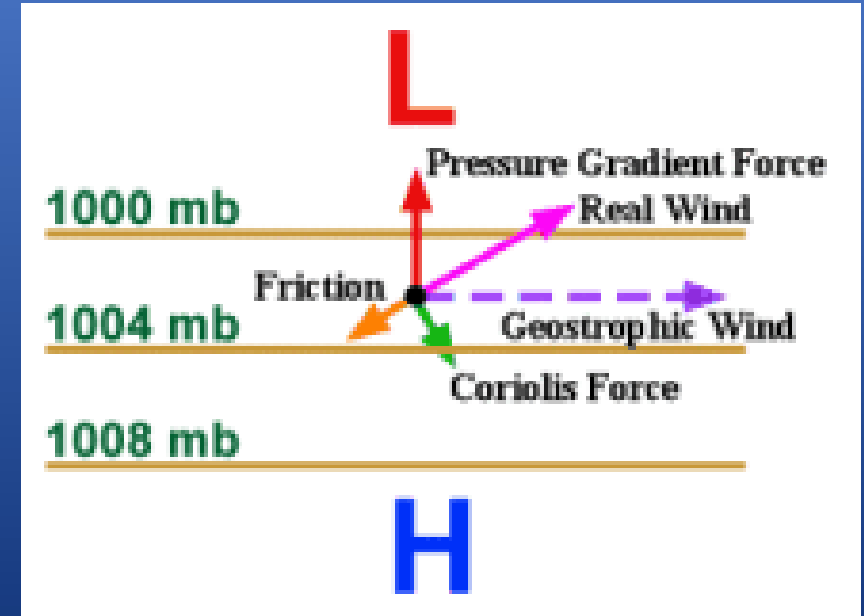


Bilancio geostrofico



Le correnti geostrofiche si muovono parallele alle isobare e tenendo a destra l'alta pressione

Bilancio geostrofico più attrito (wind-stress)



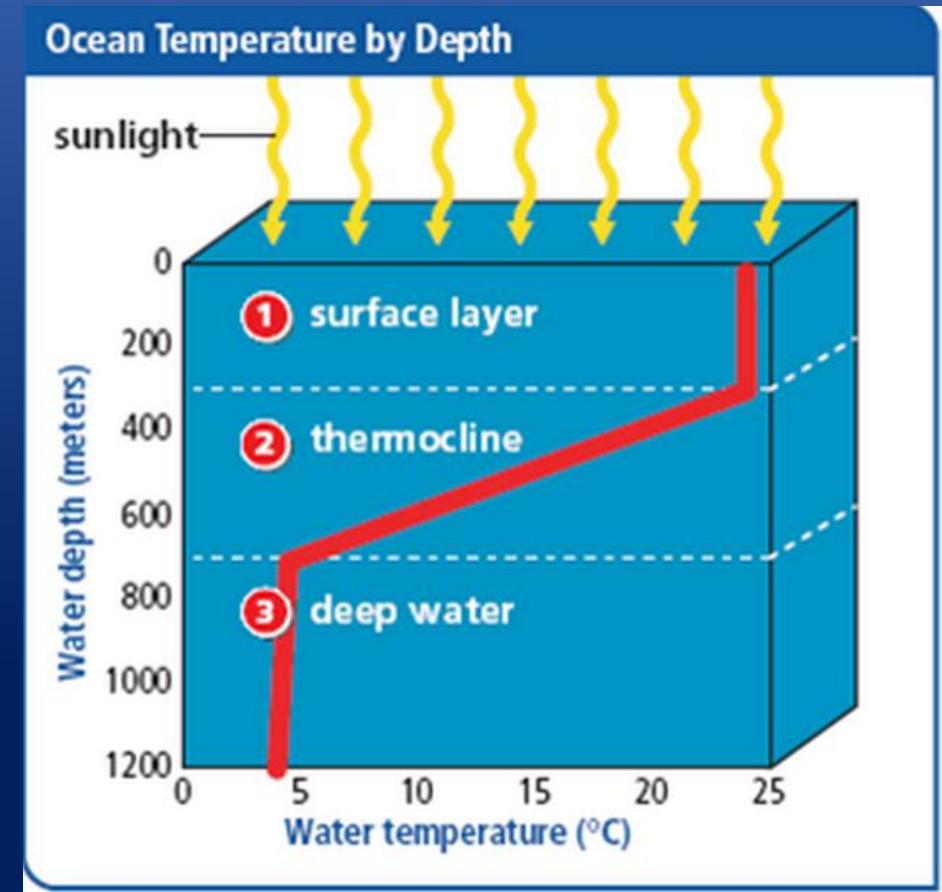
La presenza del vento e dell'attrito che esso determina sulla superficie del mare, fa sì che la forza del gradiente di pressione non bilanci più Coriolis e la corrente diventa trasversale alle isobare

What are ocean currents?

Ocean currents are masses of water that flow horizontally in a definite direction from one place to another around the world. Currents are caused by differences in temperature, differences in salinity, and by wind.

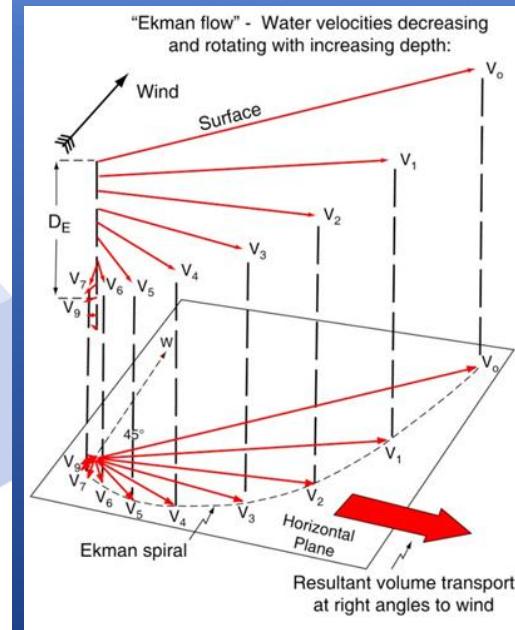
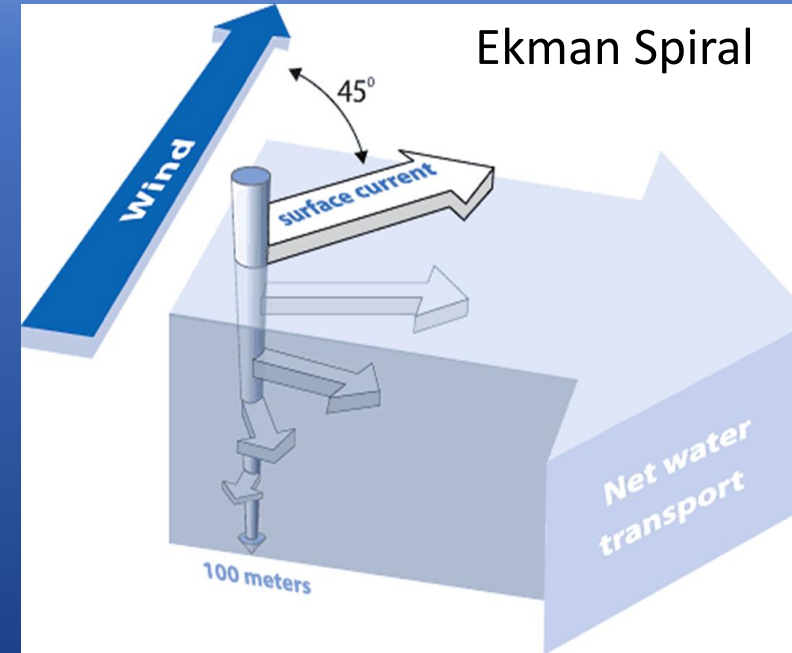
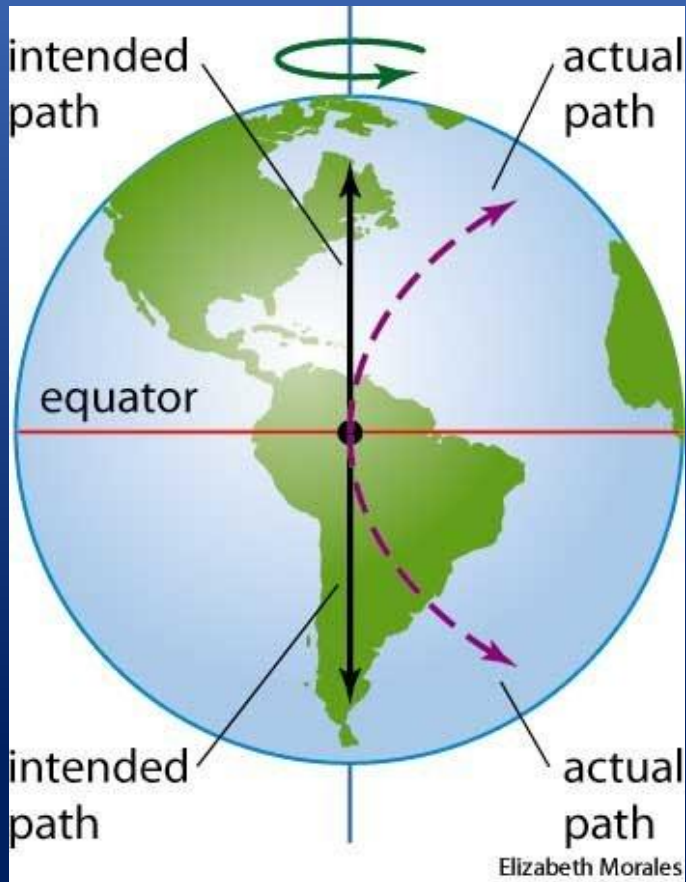
The world ocean consists of two types of currents:

- Surface Currents (Warm currents);
- Deep Currents (Cold currents).



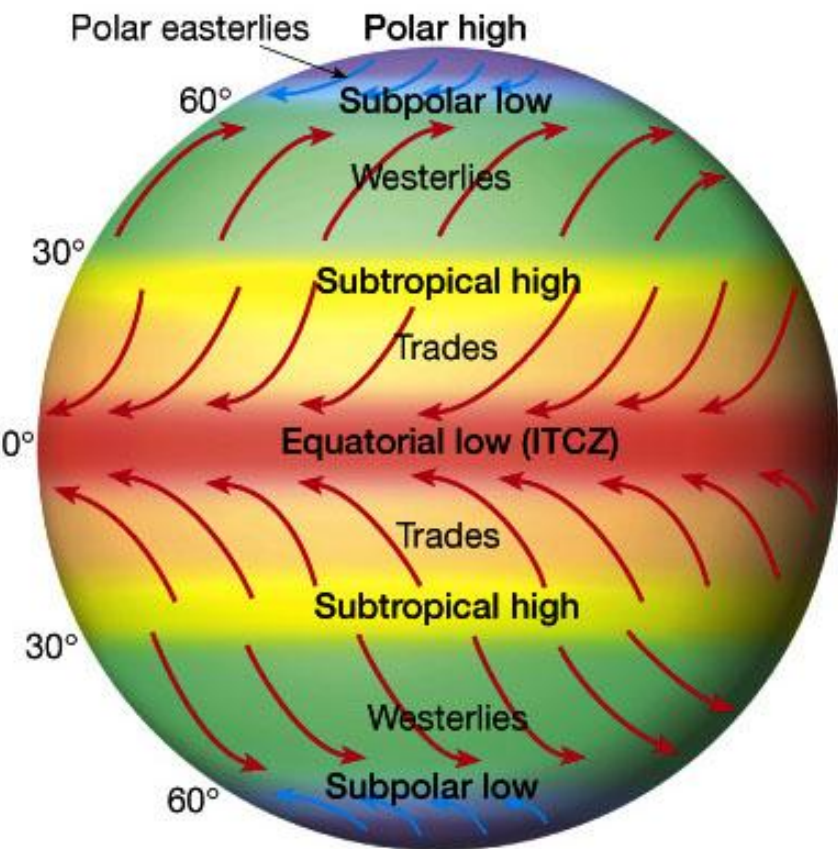
Surface Currents: driving mechanism

- ✓ Caused by prevailing winds around the globe;
- ✓ The moving water is subject to the Coriolis Effect;

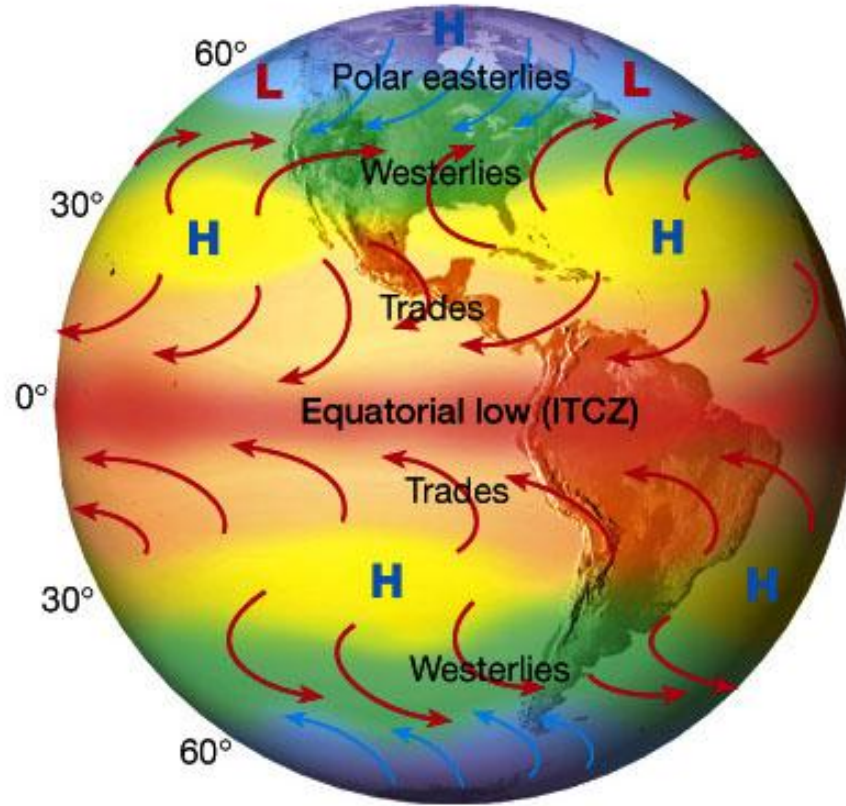


- ✓ In the **Northern Hemisphere**, water is forced to the right of the direction of the wind and in the **Southern Hemisphere**, the water is forced to the left;
- ✓ Net transport at 90° angle to the right of the wind.

Pattern dei venti sulla terra



(a)

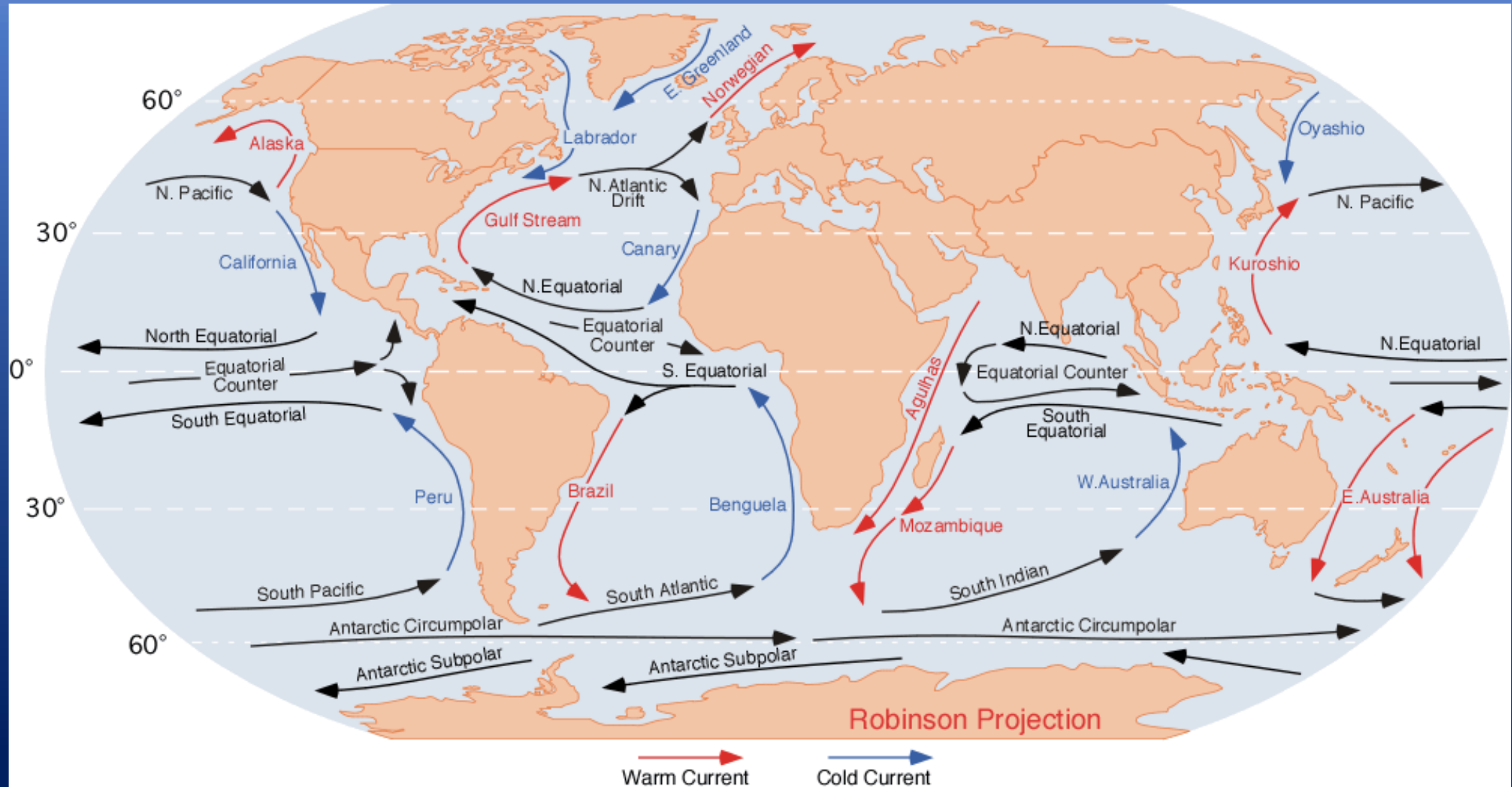


(b)

- ✓ Il vento mette in moto lo strato superficiale degli oceani ed influenza la direzione delle correnti superficiali;
- ✓ I venti principali di ciascun emisfero sono divisi in 3 fasce:
 1. Polar easterlies: 60°-90°N;
 2. Westerlies: 30°-60°N;
 3. Esterlies: 0°-30°N (Alisei);
- ✓ Questi venti creano delle enormi celle atmosferiche anticicloniche nelle regioni subtropicali e cicloniche in quelle subpolari;
- ✓ Gli Alisei di entrambi gli emisferi **convergono** in un'area vicina all'equatore chiamata "zona di convergenza intertropicale" (ITCZ), producendo una stretta fascia di nubi e temporali in quest'area.

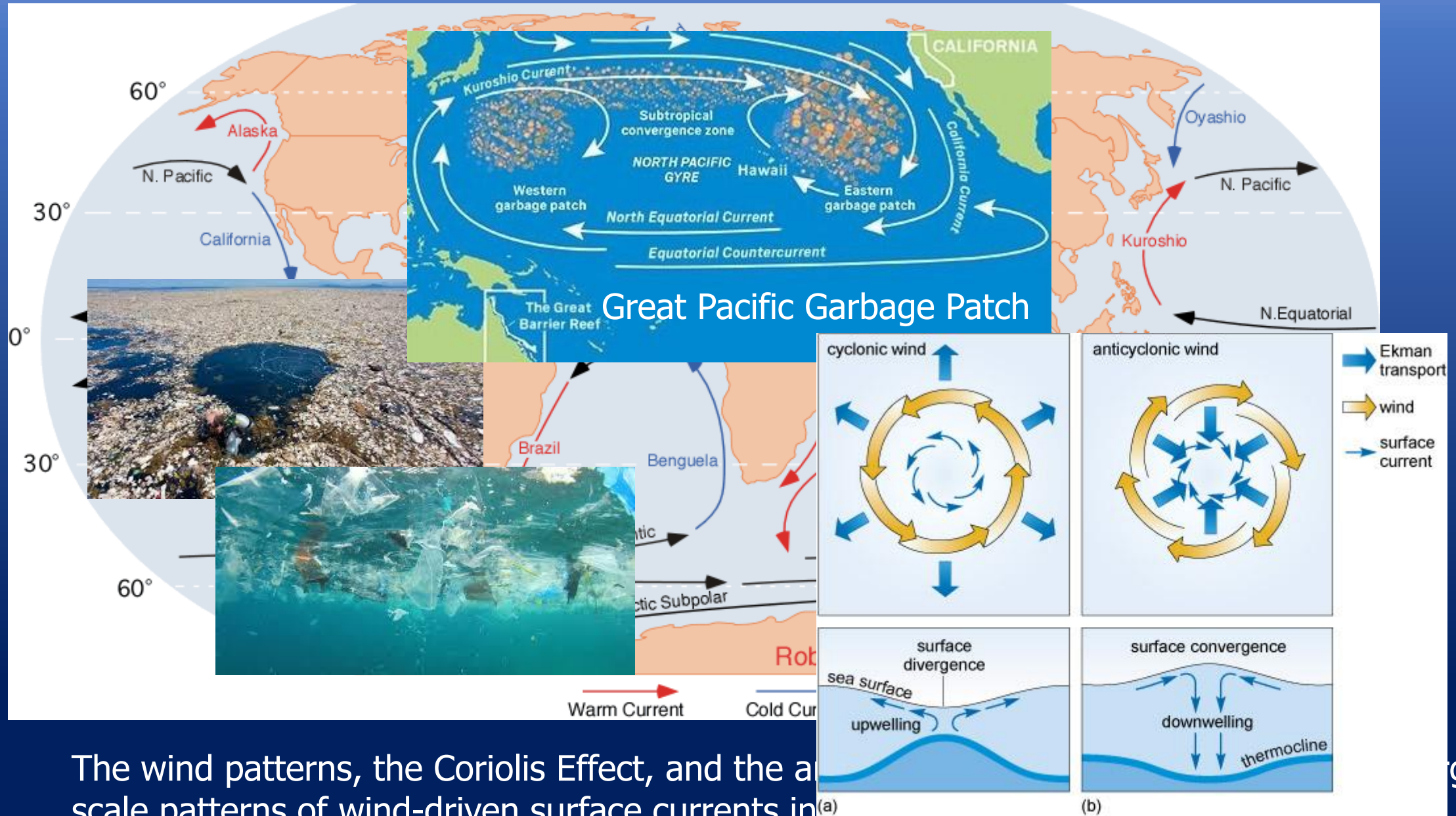
I **venti** si definiscono in base alla direzione da cui provengono (es. Venti orientali, vengono da est);
Le **correnti** si definiscono in base alla direzione verso cui si muovono (es. Corrente orientale, diretta verso est).

Currents patterns on Earth



The wind patterns, the Coriolis Effect, and the arrangement of landmasses lead to the large-scale patterns of wind-driven surface currents in the world ocean.

Currents patterns on Earth



The wind patterns, the Coriolis Effect, and the large-scale patterns of wind-driven surface currents in the world ocean

Aree di ritenzione dei rifiuti marini

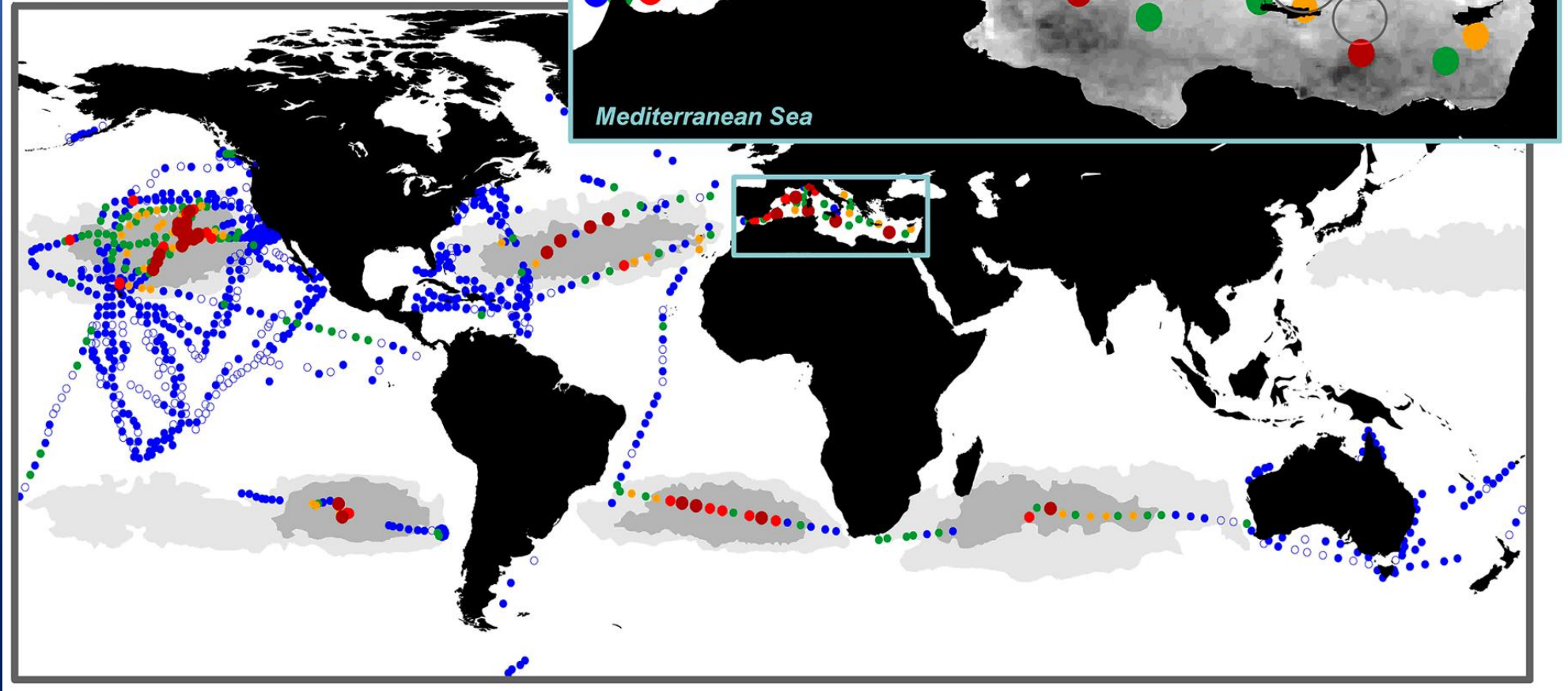
1% of the World's waters

the Med Sea is a "plastic trap"

7% of all global microplastics

Plastic concentration (g km^{-2})

- 0
- 0 to 50
- 50 to 200
- 200 to 500
- 500 to 900
- 900 to 2500



Surface Circulation Structures: Gyres



Each Gyre includes 4 currents components:

- ✓ **Two boundary currents (correnti meridionali):** western and eastern;
- ✓ **Two transverse currents (correnti zonali):** eastward and westward;

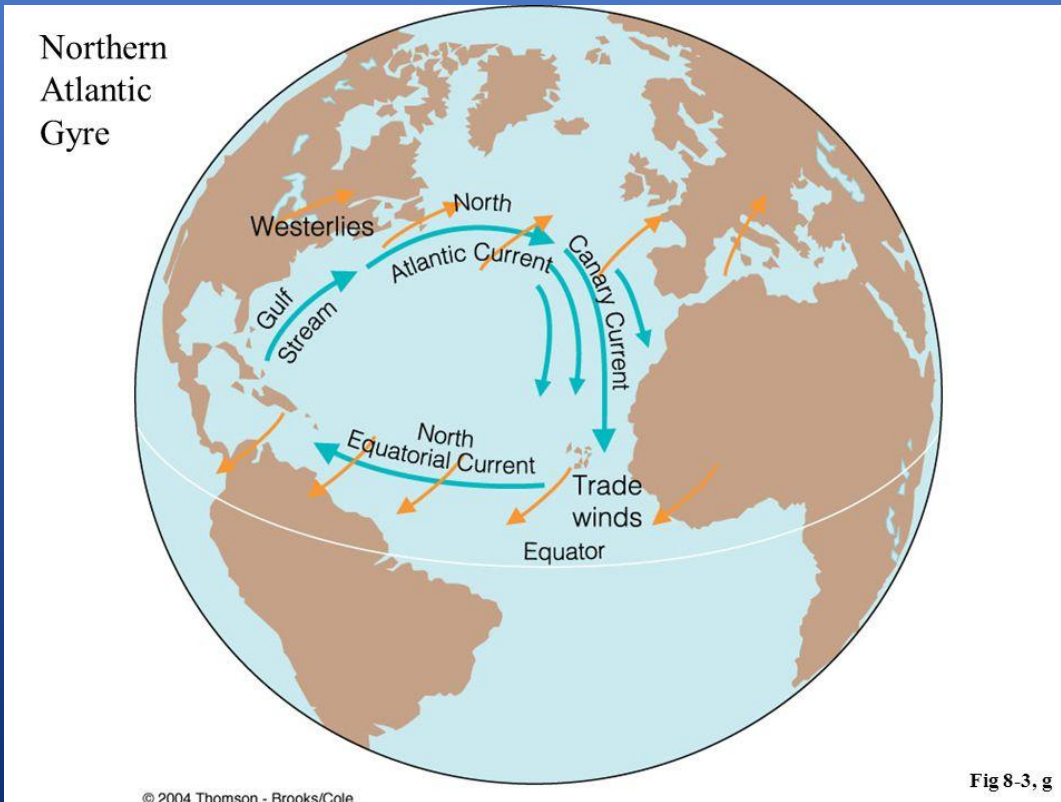
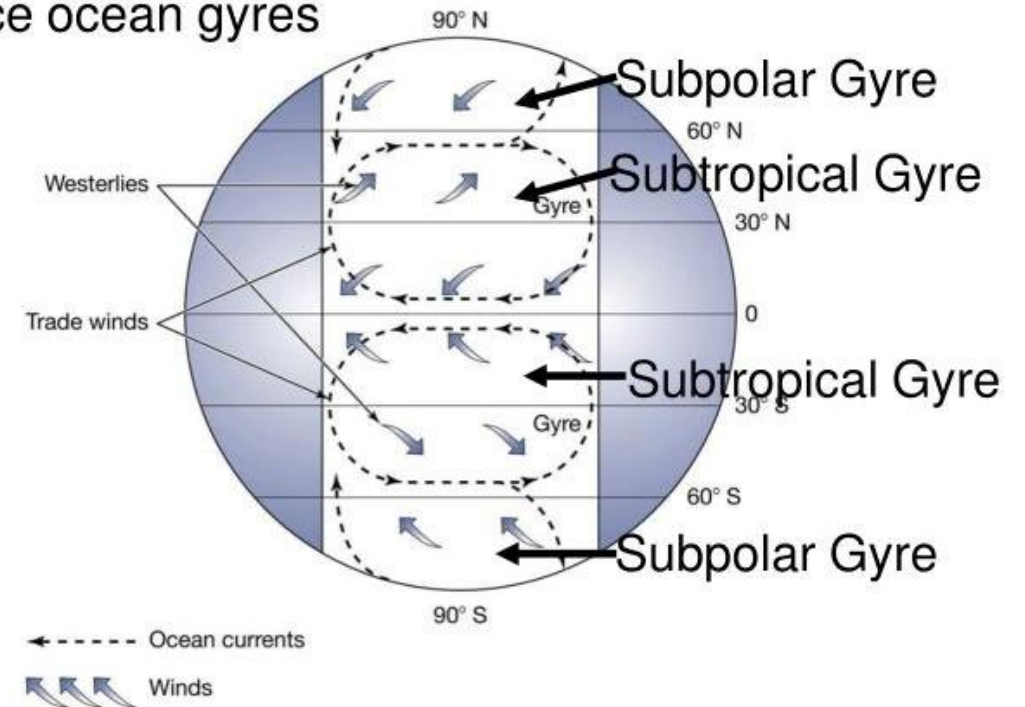


Figure from *Oceanography* by Tom Garrison

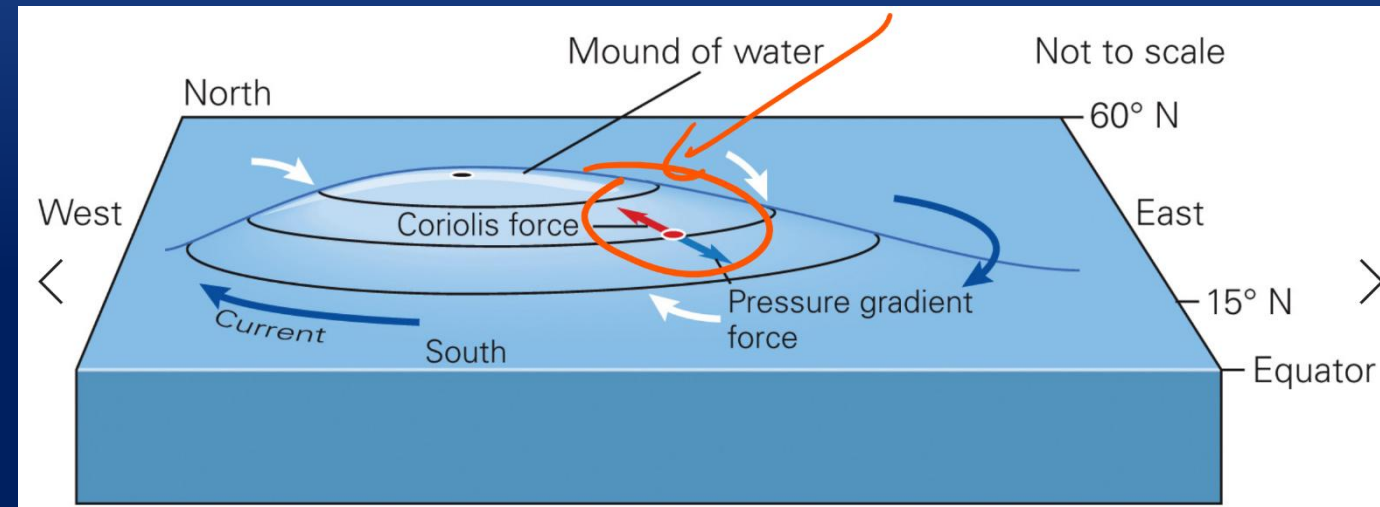
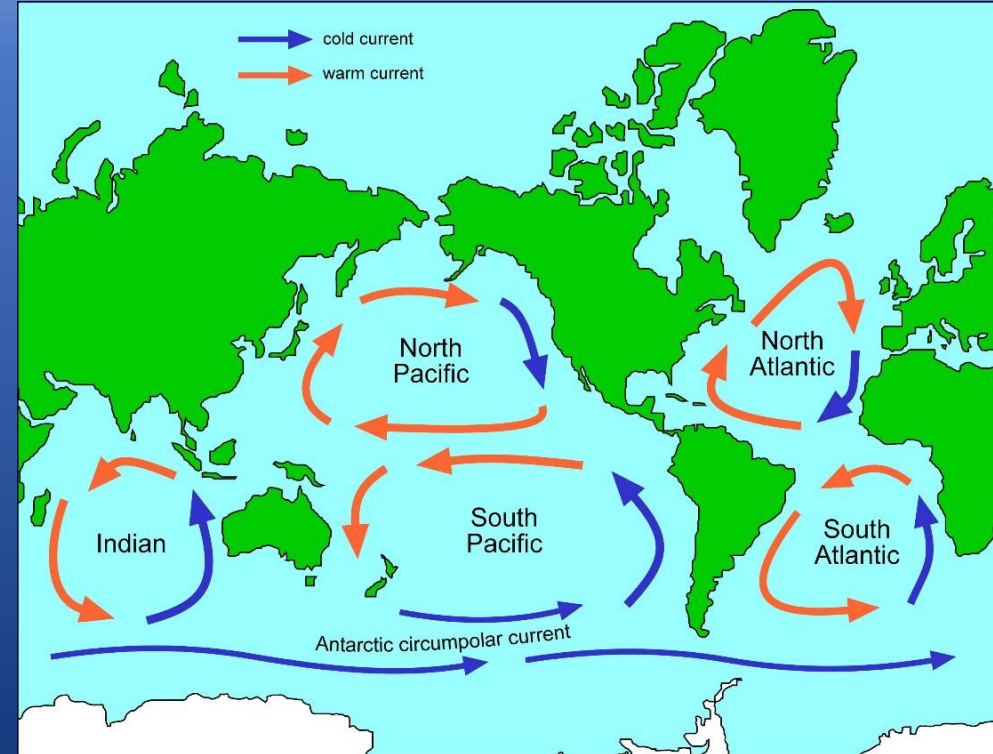
- ✓ Subtropical gyres: Anticyclonic structures (LAT 10°-40°);
- ✓ Subpolar gyres: Cyclonic structures (LAT 50°-60°);

Simplified view of surface ocean gyres

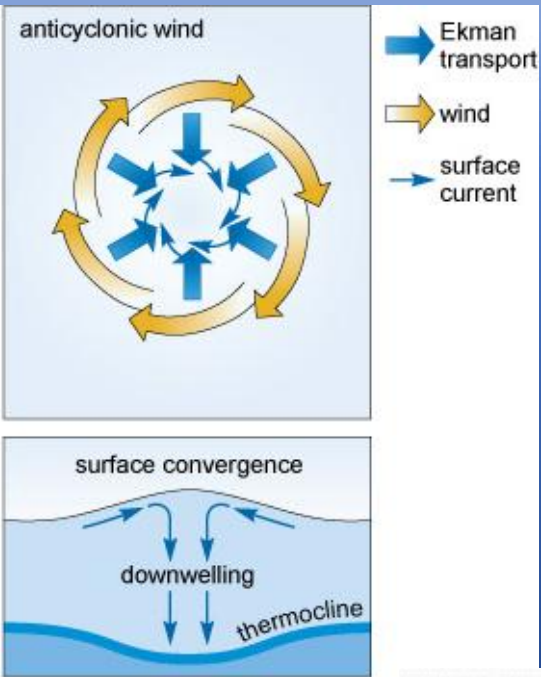


Gyre subtropicali

- ✓ I Gyre in oceanografia sono grandi sistemi di correnti circolari (vortici), che si formano grazie all'azione del vento (wind-stress) e della Forza di Coriolis;
- ✓ I grandi Gyre sub-tropicali dell'Atlantico e del Pacifico si muovono tra i 10° ed i 40° di latitudine;
- ✓ Il bilanciamento tra il gradiente di pressione e la Forza di Coriolis determina una corrente geostrofica anticiclonica che si muove in senso orario nell'Emisfero Nord ed antiorario nell'Emisfero Sud;
- ✓ Anche la componente ageostrofica (vento) induce una rotazione in senso orario nell'Emisfero Nord, antiorario nell'Emisfero sud.

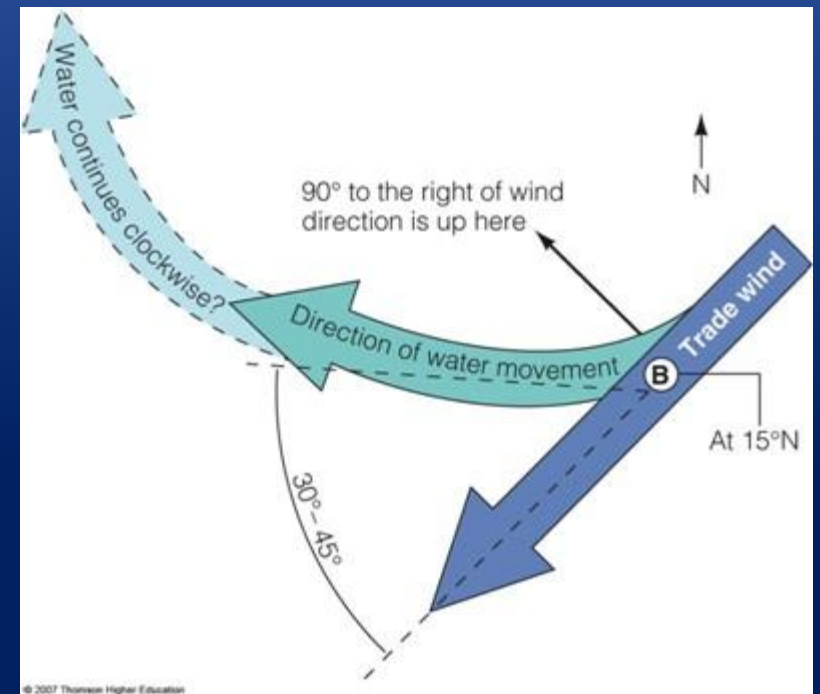
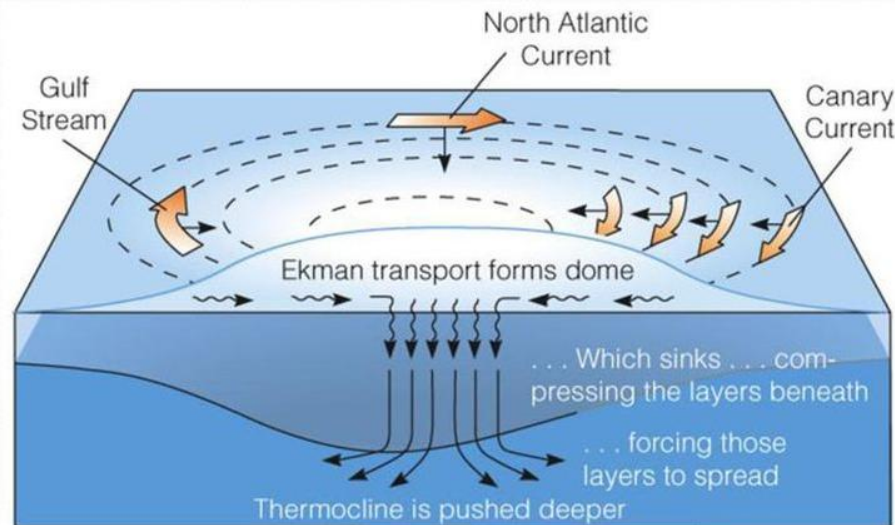


Gyre subtropicali

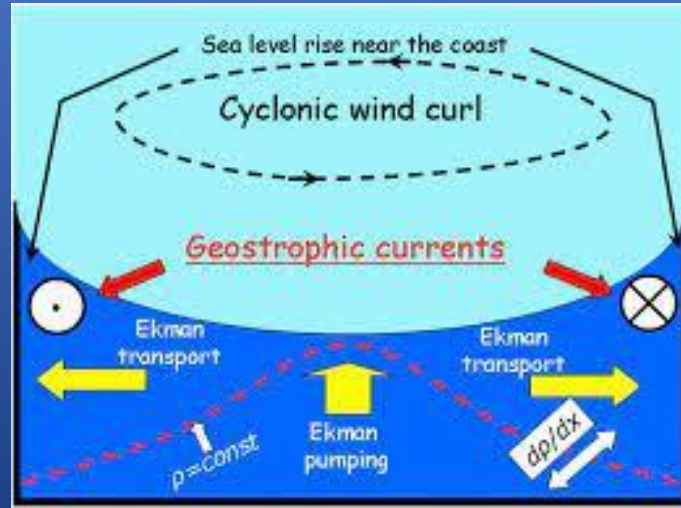
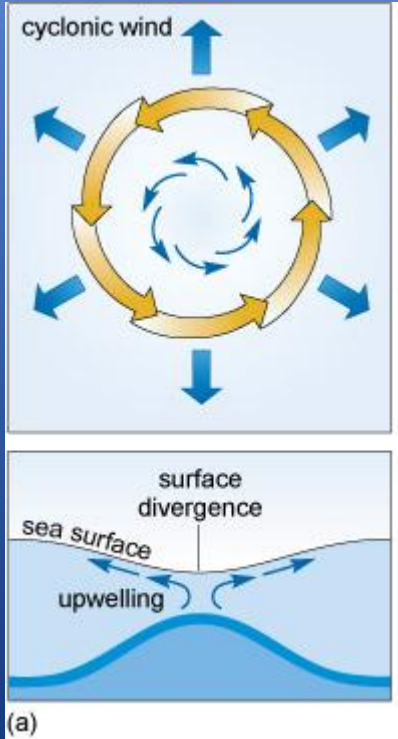


- ✓ Nei Gyre subtropicali il trasporto di Ekman è diretto verso il centro della struttura;
- ✓ Questa situazione crea un accumulo (dome) di acqua al centro del Gyre con conseguente convergenza e downwelling;
- ✓ Le correnti si muovono in senso anticiclonico intorno al dome ed affondano nel suo interno (downwelling) rendendo più profondo il Mixed Layer;

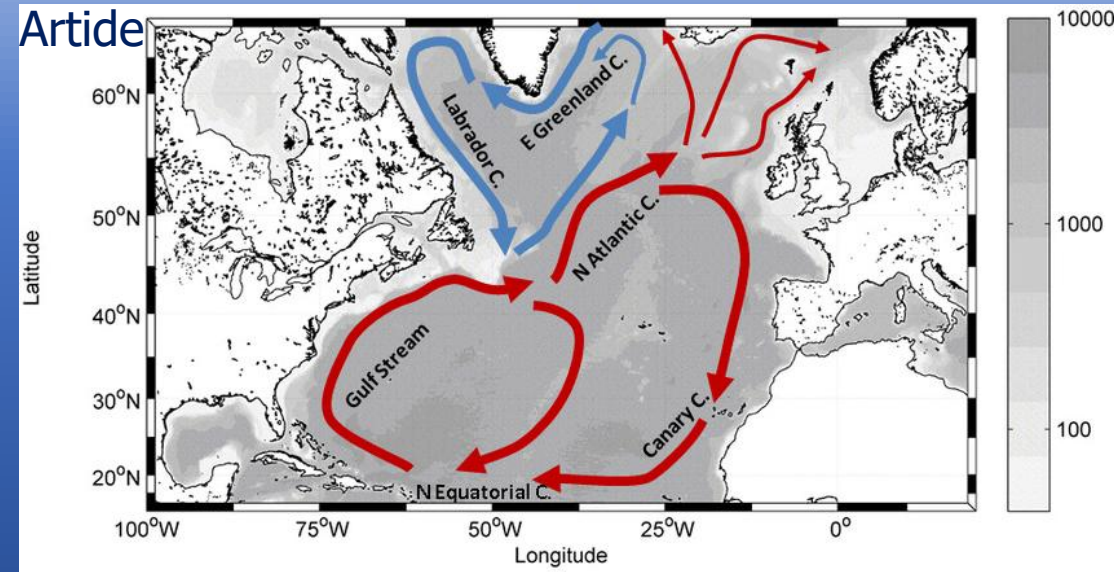
CONVERGENCE & DOWNWELLING



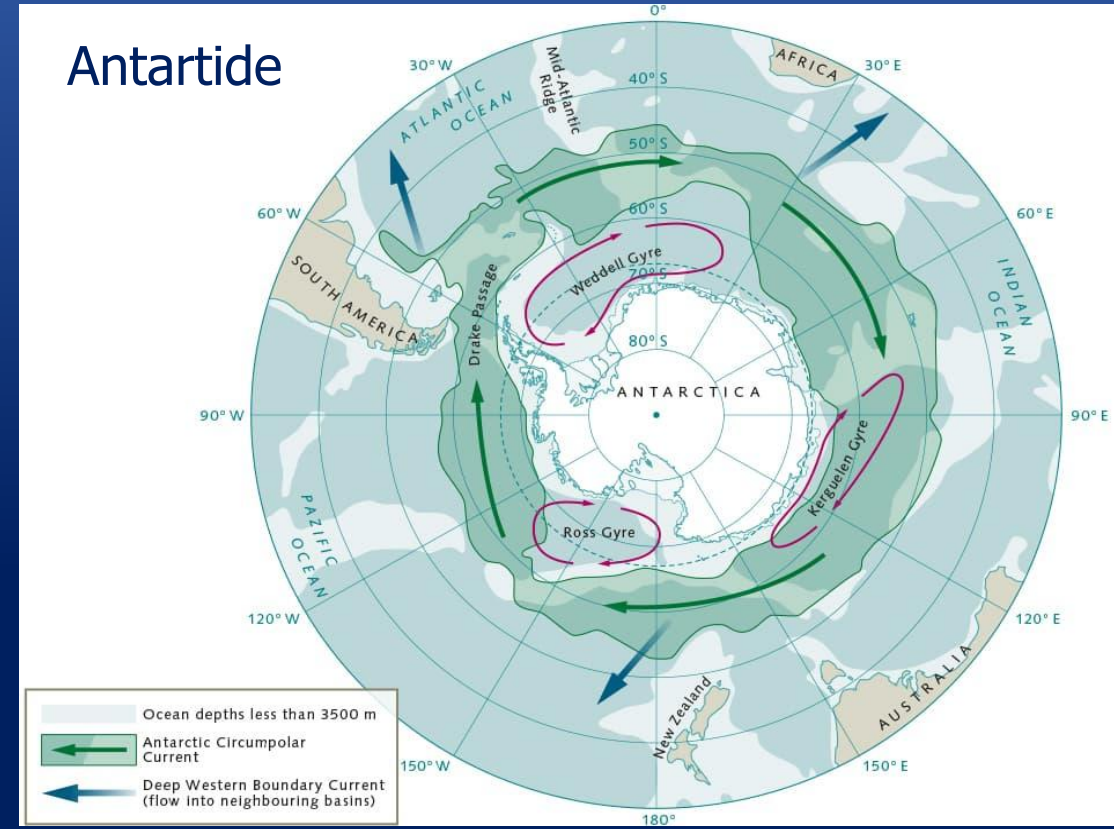
Gyre subpolari



Artide



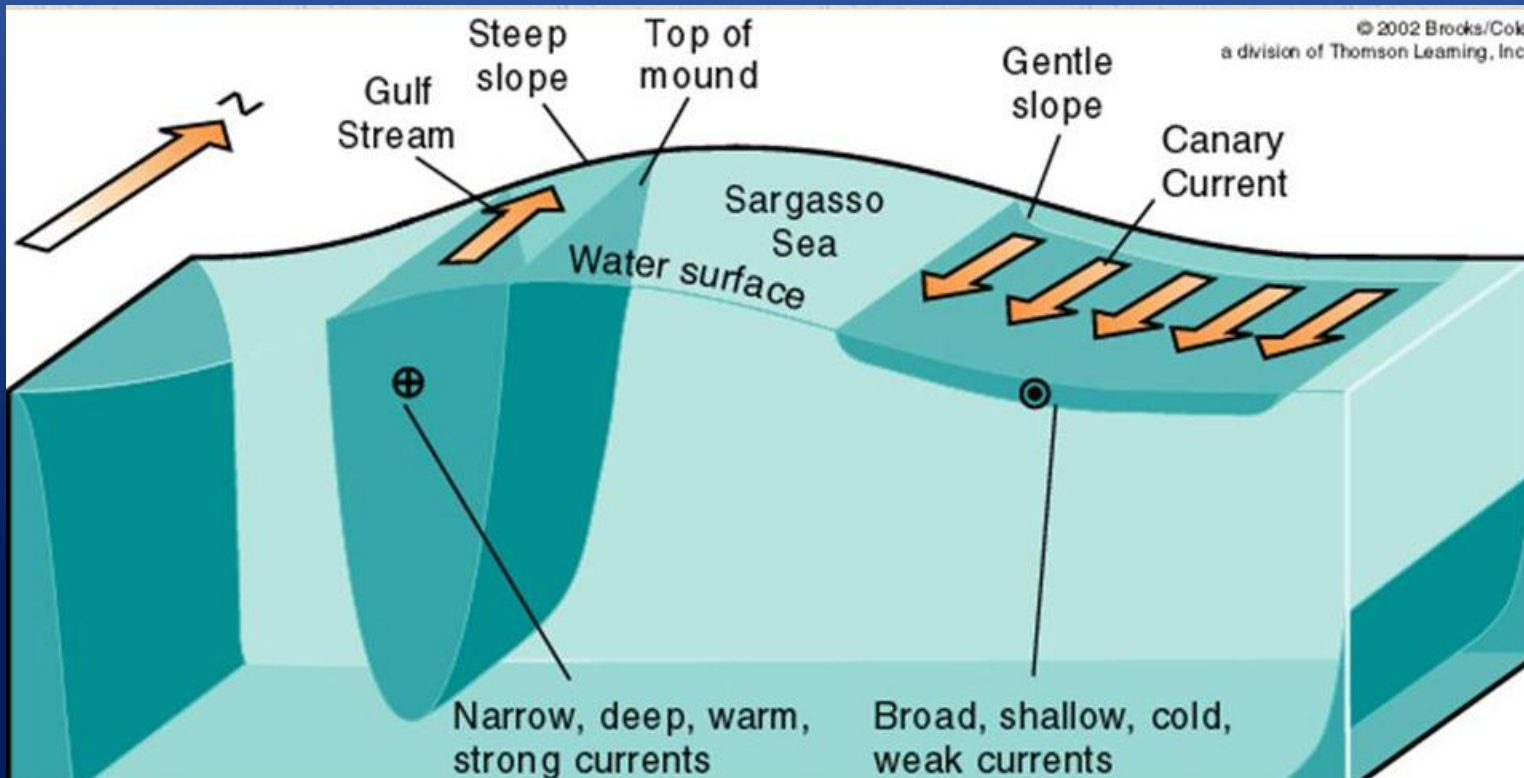
Antartide



- ✓ Il bilanciamento tra il gradiente di pressione e la Forza di Coriolis determina una corrente geostrofica in senso antiorario (ciclonico) nell'Emisfero Nord ed orario (ciclonico) nell'Emisfero Sud;
- ✓ Anche la componente ageostrofica (vento) induce una rotazione in senso antiorario nell'Emisfero Nord, orario nell'Emisfero sud.

Surface Circulation Structures: Gyres

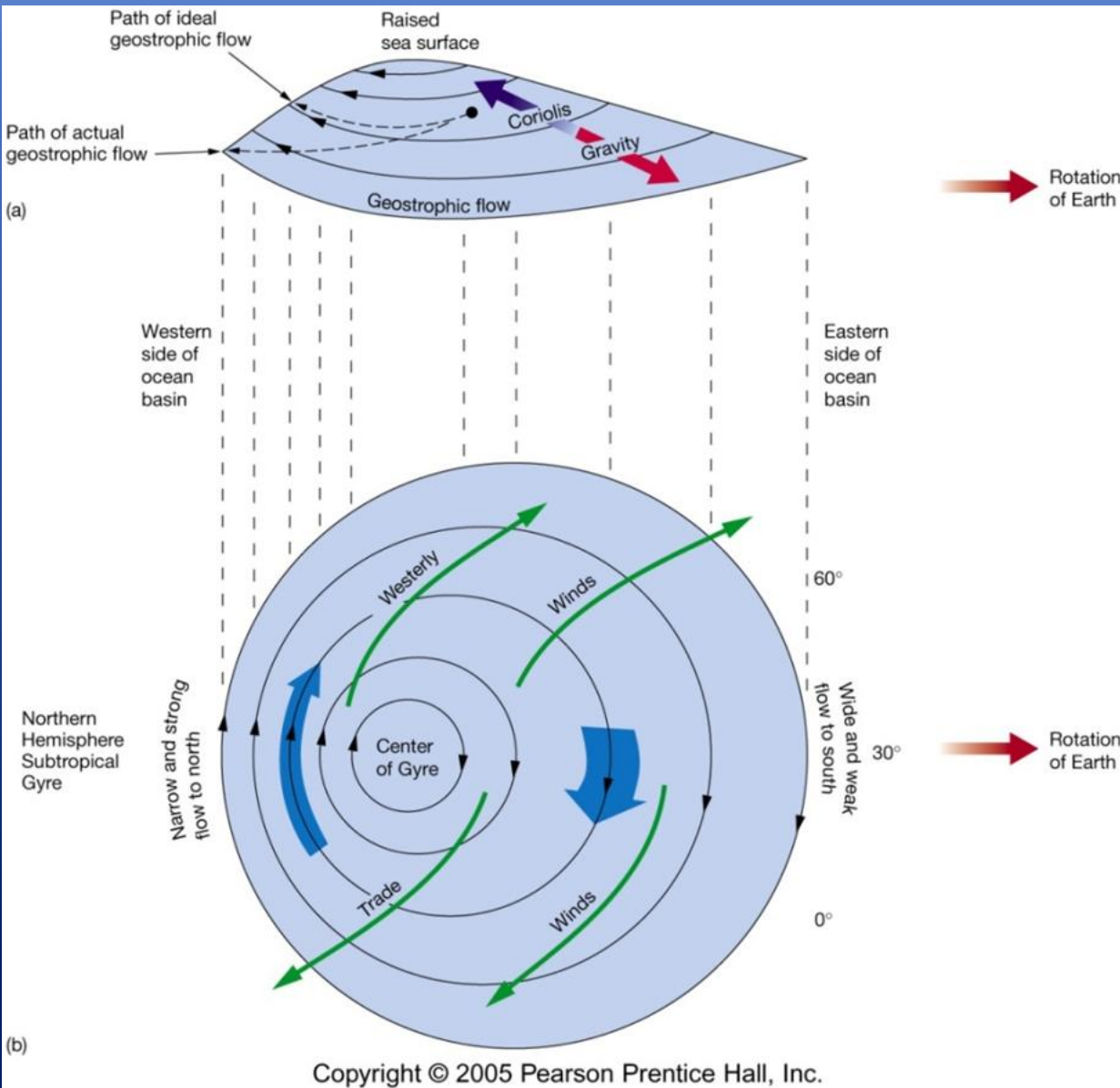
- ✓ Le correnti che fluiscono lungo i margini occidentali dei Gyre subtropicali (**Western Boundary Currents**) sono più intense e «strette» di quelle che fluiscono lungo i margini orientali (**Estern Boundary Currents**);
- ✓ Le **Western Boundary Currents** (es. Corrente del Golfo e Corrente di Kuroshio) sono larghe solo alcune centinaia di km ed hanno una velocità superficiale dell'ordine di 2 m/s;
- ✓ Le **Estern Boundary Currents** (es. Canary Current, California Current) sono larghe più di 1000 km ed hanno velocità superficiali dell'ordine di 0.25 m/s;



- ✓ La slope (superficie libera) degli oceani è più inclinata e ripida sul lato occidentale dei bacini oceanici, poiché c'è il trasporto delle correnti equatoriali;
- ✓ La superficie oceanica più ripida si traduce in correnti geostrofiche più intense sul lato occidentale rispetto a quello orientale.

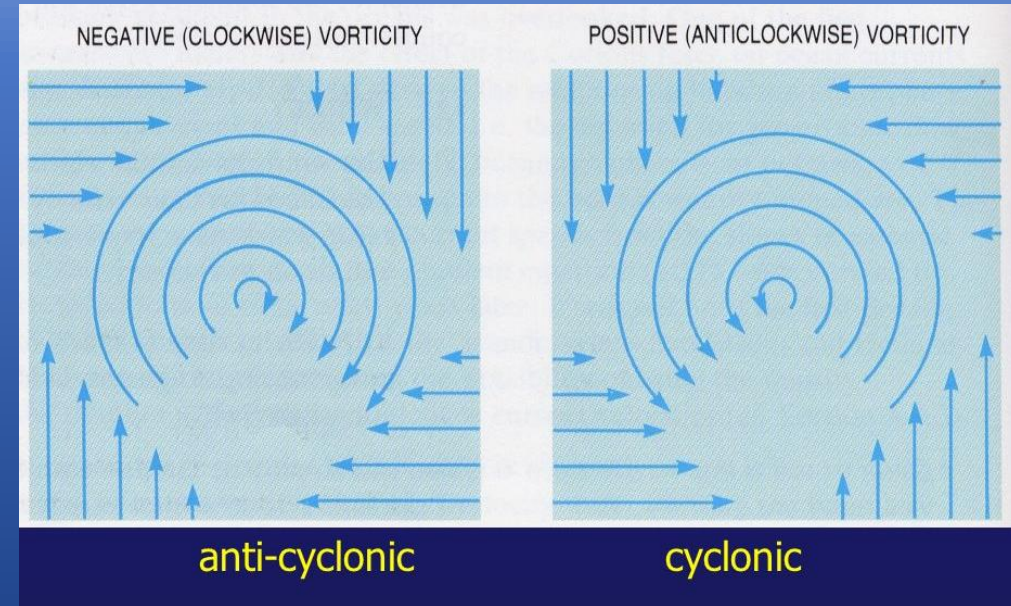
Western Boundary Systems

- Le correnti superficiali situate sul lato occidentale dei Gyre subtropicali (**Western Boundary Currents**) sono più veloci delle loro controparti orientali (sono tra le correnti superficiali più veloci dell'oceano);
- Una delle ragioni dell'intensificazione verso ovest delle correnti al boundary è legata all'aumento dell'effetto Coriolis con la latitudine;
- L'effetto Coriolis è più forte alle latitudini dei venti occidentali che a quelle degli Alisei.
- Il trasporto delle acque superficiali lungo il bordo occidentale dei bacini oceanici fa sì che la pendenza della superficie oceanica sia più ripida sul lato occidentale (rispetto a quello orientale) di un Gyre.
- Una maggiore pendenza della superficie oceanica si traduce in un flusso geostrofico più veloce su quel lato del Gyre.



Vorticità

- ✓ La **vorticità** è definita come la tendenza a ruotare di un fluido;
- ✓ Gli oceani mostrano movimenti rotatori a tutte le scale spaziali, dai grandi Gyre subtropicali e subpolari fino ai vortici a piccola scala (Eddy);
- ✓ Per convenzione, la tendenza a ruotare in **senso antiorario** si definisce come **vorticità positiva**; la tendenza a ruotare in **senso orario** è definita come **vorticità negativa**;



- ✓ Ci sono due tipi di vorticità: la **vorticità planetaria** (f , parametro di Coriolis) dovuta alla rotazione terrestre; la **vorticità relativa** (ζ), dovuta alle correnti oceaniche;
- ✓ ζ è di solito molto più piccolo di f , ed è maggiore ai margini delle correnti veloci come la Corrente del Golfo;
- ✓ La somma della vorticità planetaria più quella relativa dà la **vorticità assoluta** ($\zeta + f$);
- ✓ Il rapporto tra la vorticità assoluta e la profondità (D) prende il nome di **vorticità potenziale**;
- ✓ La vorticità potenziale degli oceani si conserva (raggiunge un equilibrio e non aumenta all'infinito):

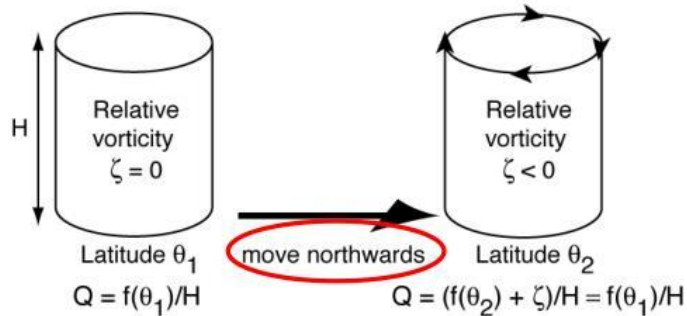
$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\zeta + f}{D} \right) = 0$$

Conservazione della
vorticità potenziale

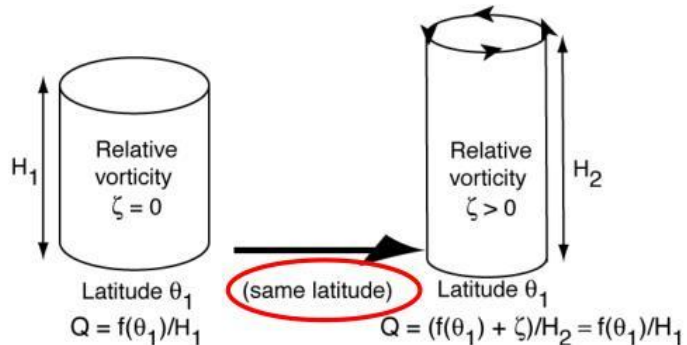
$$\frac{\zeta + f}{D} = \text{cost};$$

Conservazione della vorticità potenziale

Potential vorticity



Conservation of potential vorticity Q in the absence of stretching (northern hemisphere):
balance of planetary vorticity and relative vorticity

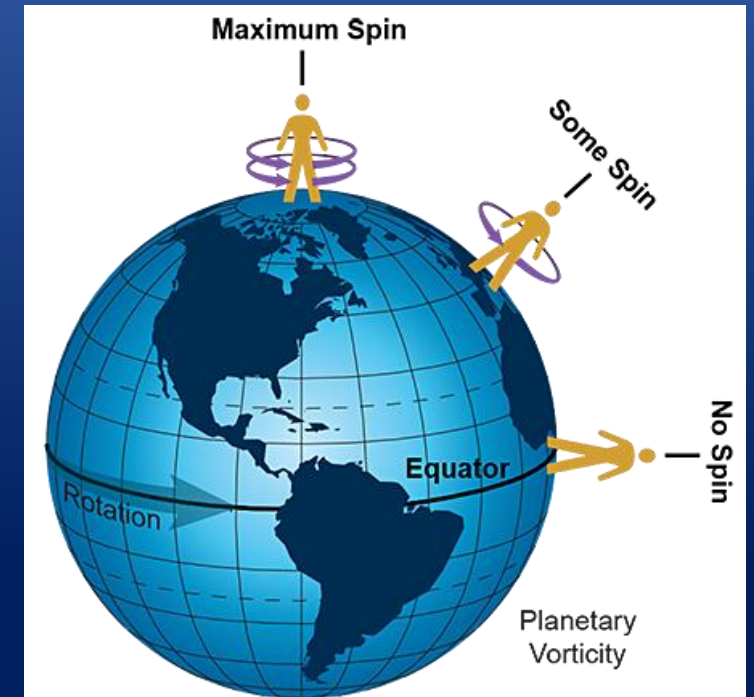


Conservation of potential vorticity (relative and stretching)

Adapted from Talley (2008)

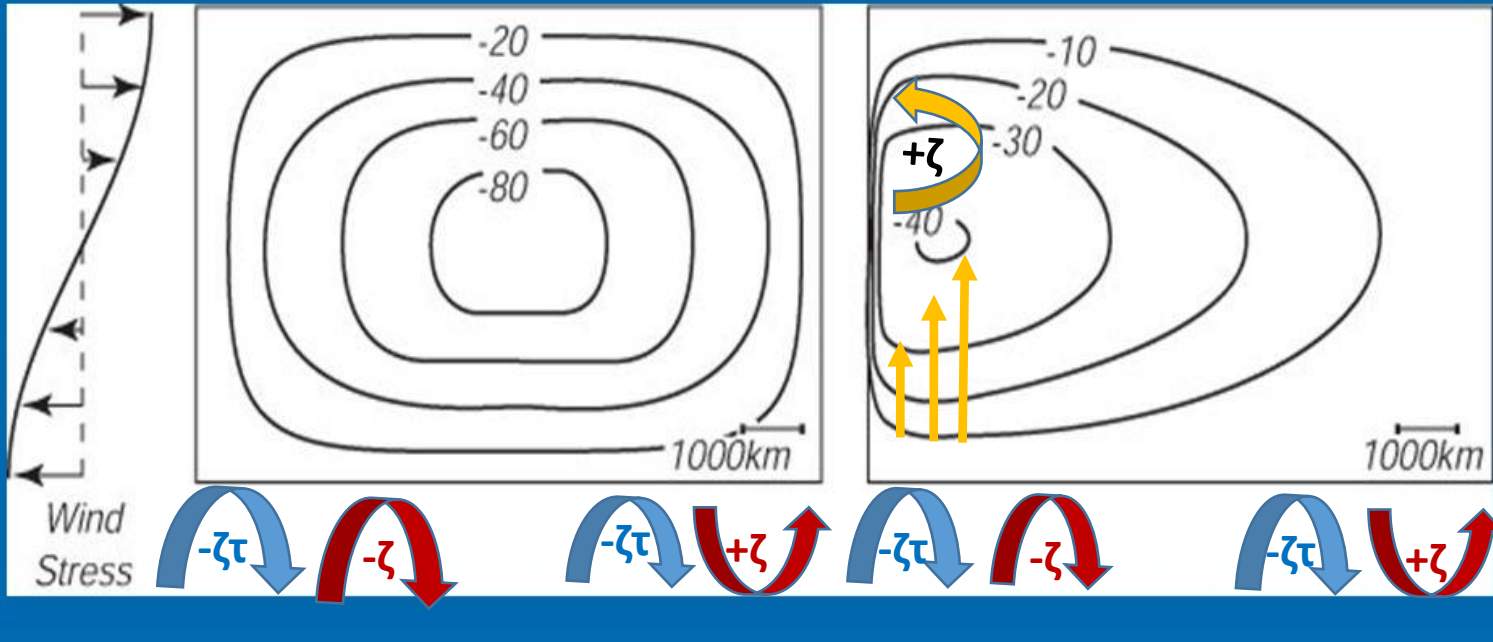
$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\zeta + f}{D} \right) = 0 \rightarrow \frac{\zeta + f}{D} = \text{const};$$

- ✓ Se un volume di fluido si muove verso nord ad una profondità costante ($D = \text{cost}$), aumenta f e ζ deve diminuire per conservare la vorticità potenziale;



- Se un volume di fluido si muove restando alla stessa latitudine ma con la profondità che aumenta, f resta costante e ζ deve aumentare per conservare la vorticità potenziale.

Intensificazione delle correnti occidentali



- Il centro dei grandi Gyre non è simmetrico, ma è spostato più verso ovest poiché le correnti più intense sul bordo ovest;
- Stommel nel 1948 diede una spiegazione dell'intensificazione delle correnti occidentali;
- Dimostrò che la forma dei Gyre e l'intensità delle loro correnti era legata al wind-stress ed alla variazione del parametro di Coriolis con la latitudine;
- L'intensificazione delle correnti sul bordo occidentale dei Gyre permette di conservare la vorticità potenziale di questi enormi vortici.

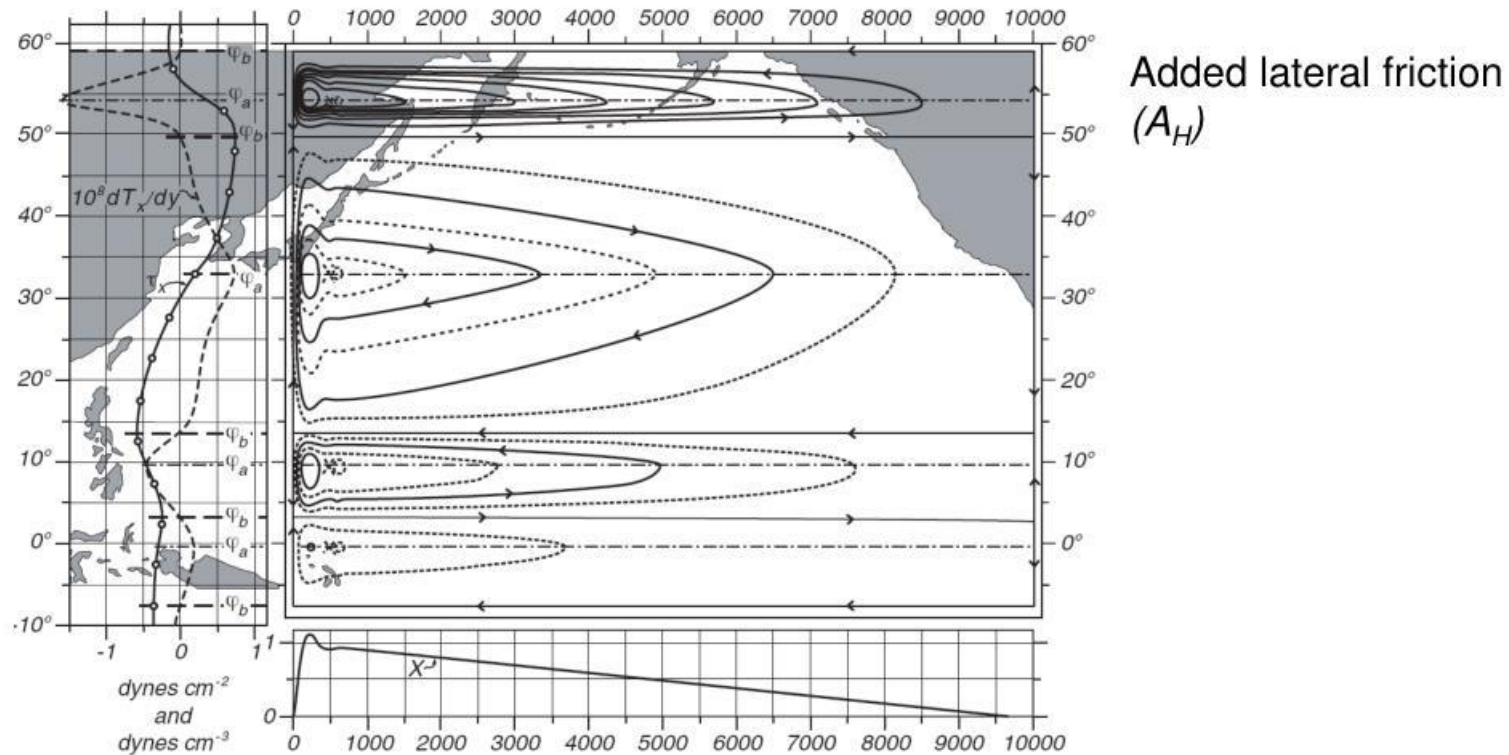
• In un oceano piatto ($D=\text{cost}$), caratterizzato da un flusso simmetrico, non c'è compensazione tra l'input di vorticità negativa indotta dal vento e quella indotta dalle correnti (per conservazione della vorticità potenziale) ad ovest;

• In un oceano piatto ($D=\text{cost}$), la presenza di uno shear di correnti che contribuisce con un input di vorticità positivo, fa sì che ci sia un bilancio di vorticità da entrambi i lati del bacino;

$$\frac{\zeta + f}{D} = \text{cost};$$

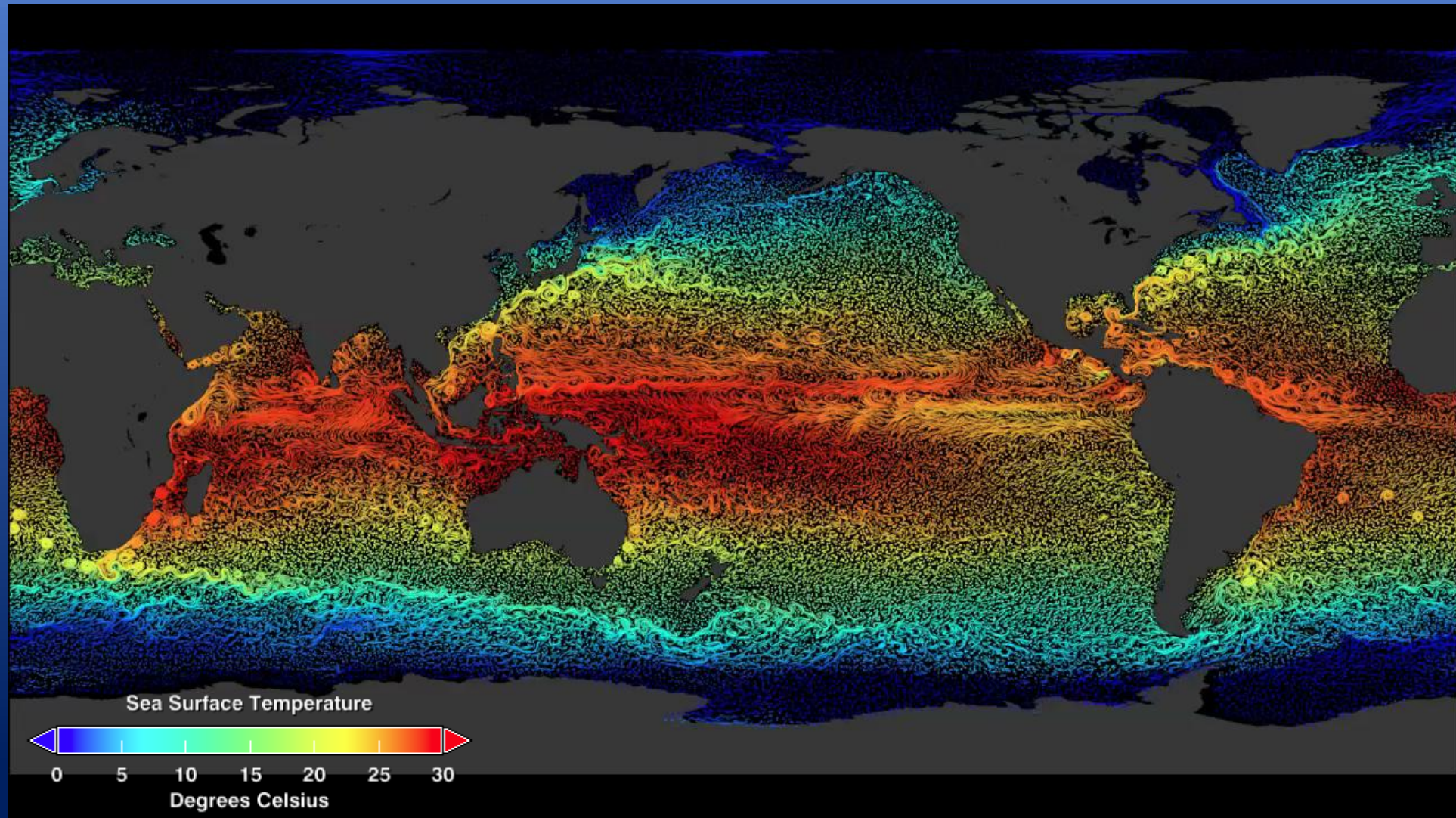
Intensificazione delle correnti occidentali

Western Boundary currents: Munk's solution



- Munk nel 1950 inserì nel modello di Stommel l'attrito del fondo ed anche una stima più realistica del wind-stress al variare della latitudine ;
- Ottenne una immagine molto rappresentativa dell'oceano reale.

Surface Circulation Structures



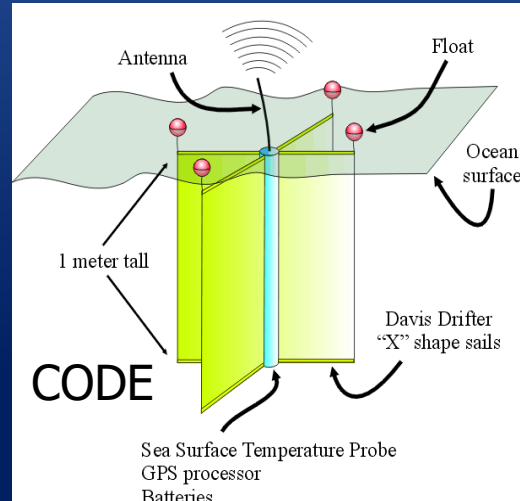
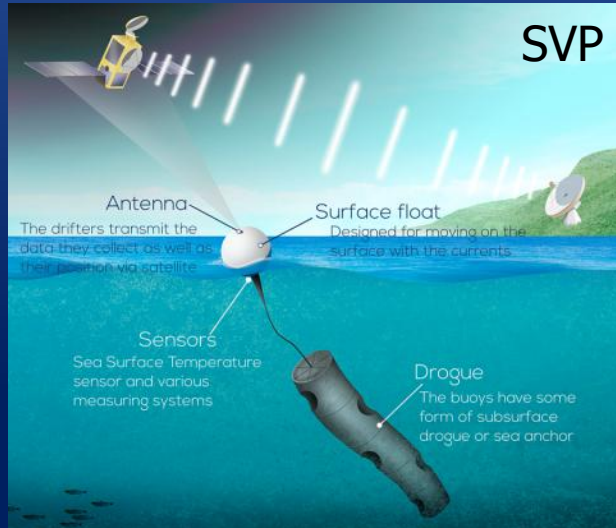
<https://svs.gsfc.nasa.gov/3821>

from Sea Surface Temperature (SST)



Surface Circulation Measurements

Drifter: drifting buoy



Satellite Altimetry

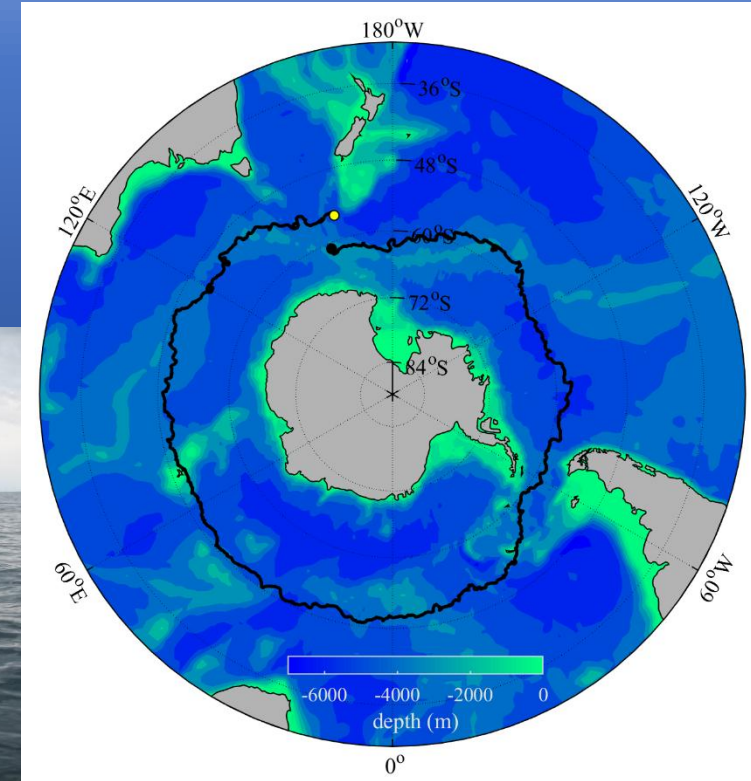


In-situ data

Remote sensing data



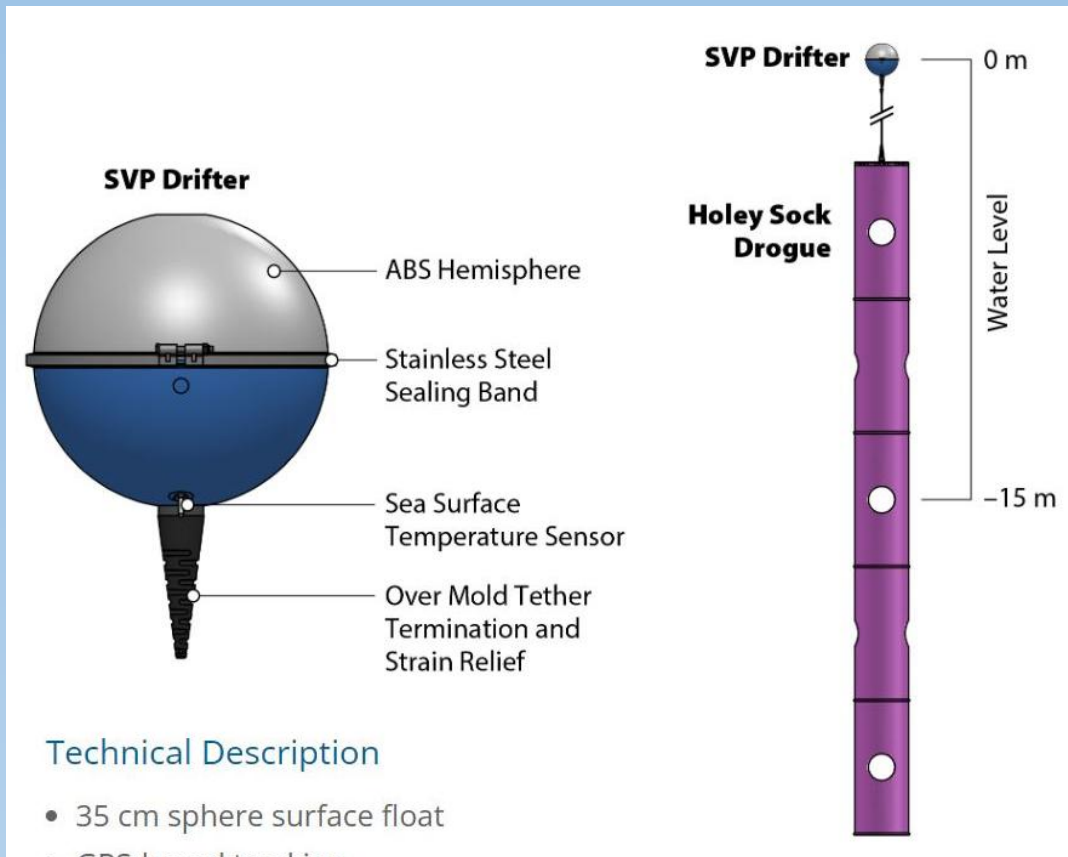
Drifter: Boe oceanografiche



Queste boe si lasciano trasportare dalle correnti e ne misurano l'intensità insieme ad altri parametri (temperatura superficiale, pressione, vento).

Drifter SVP: Surface Velocity Program

- ~ Un drifter SVP è composto da una **boa** di superficie, un **cavo** ed una **vela (drogue)**;
- ~ La **boa di superficie** ha un diametro di 35 cm e **contiene tutta l'elettronica**;



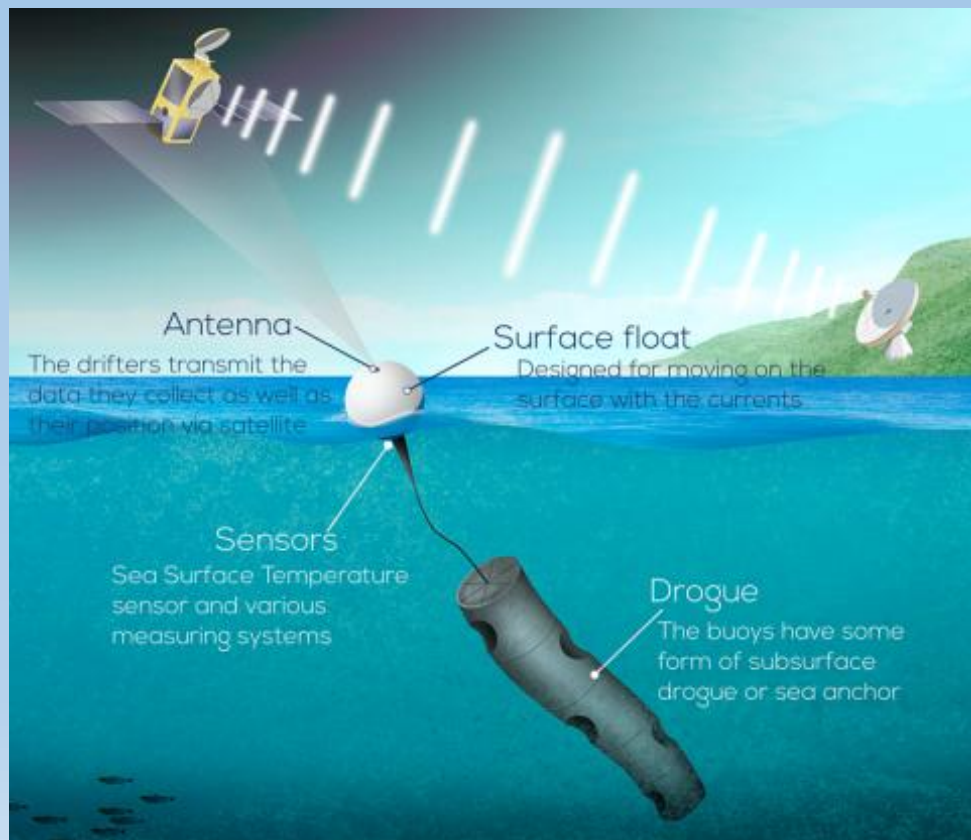
Technical Description

- 35 cm sphere surface float
- GPS-based tracking
- Iridium Short Burst Data (SBD) telemetry
- Sea surface temperature (± 0.05 K accuracy)
- Holey sock drogue centered at 15 m depth
- Variable sampling rate down to 5 minutes
- Two-year lifespan

- ~ La **drogue** è un tubo cilindrico in tessuto di nylon collegato alla boa di superficie con un cavo d'acciaio;
- ~ Nella parte inferiore della boa, 18 cm al di sotto della linea di galleggiamento, è montato un **termistore** incapsulato con resina termoconduttiva in un involucro di acciaio inossidabile;
- ~ La base dell'involucro del termistore che comunica con l'interno del drifter è isolata termicamente dall'interno della boa con una resina speciale per evitare letture distorte della temperatura della superficie del mare (SST) che possono verificarsi quando lo scafo del drifter si surriscalda sotto il sole;
- ~ L'**accuratezza** delle misure di SST è di $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$; l'intervallo di rilevamento del termistore è da -5°C a 40°C .

Drifter SVP: Surface Velocity Program

- ~ Un **controller digitale** gestisce il ciclo di lavoro della raccolta dati (tipicamente una volta all'ora, ma può essere modificato in corso d'opera utilizzando la comunicazione **bidirezionale** Iridium) e formatta i dati (SST e posizione) per la trasmissione satellitare.
- ~ Alcuni dati **diagnostici**, fondamentali per monitorare lo stato di salute del drifter (tensione della batteria, pressione interna dello scafo, temperatura e l'umidità) sono anch'essi allegati al messaggio di dati.



Telemetry

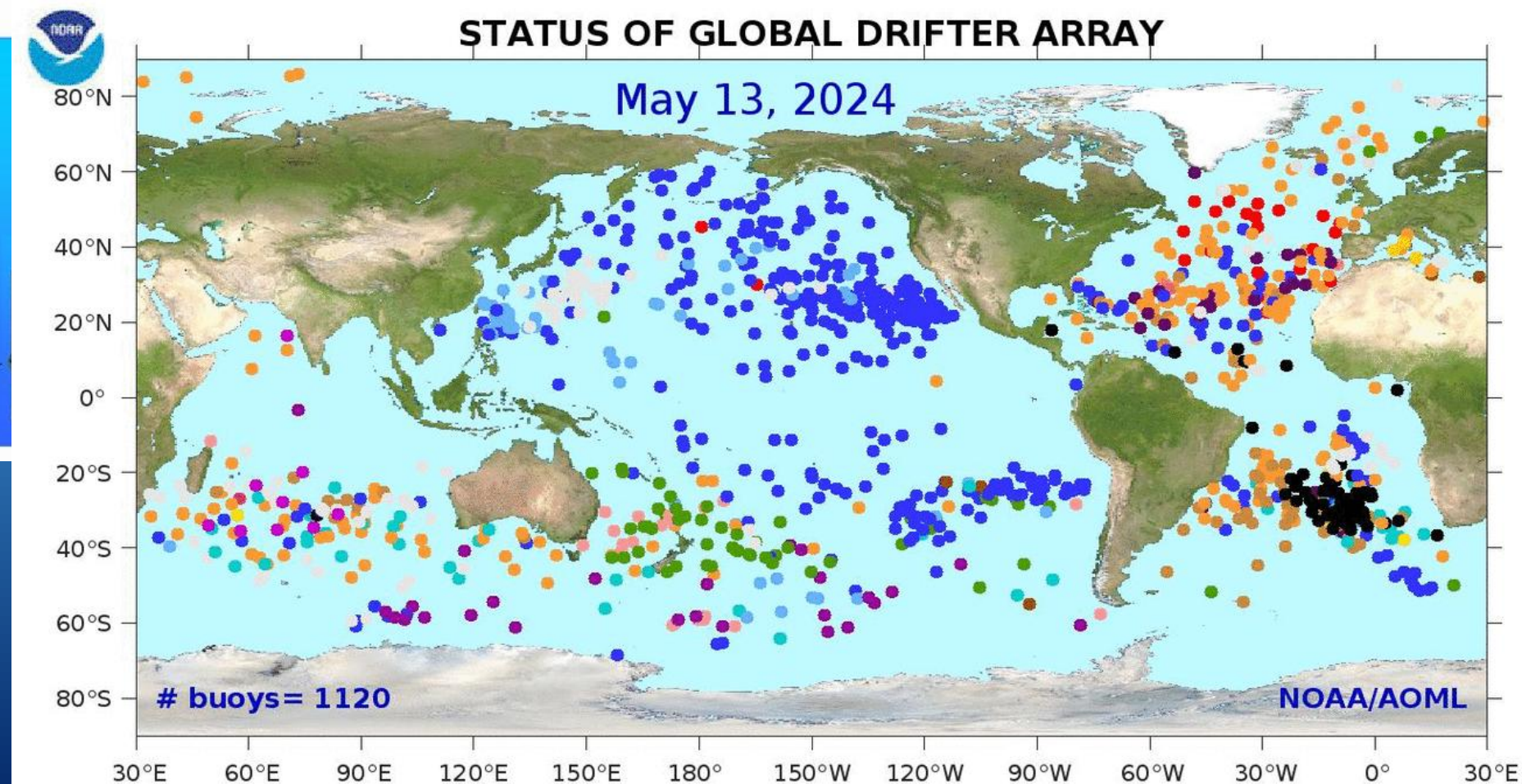
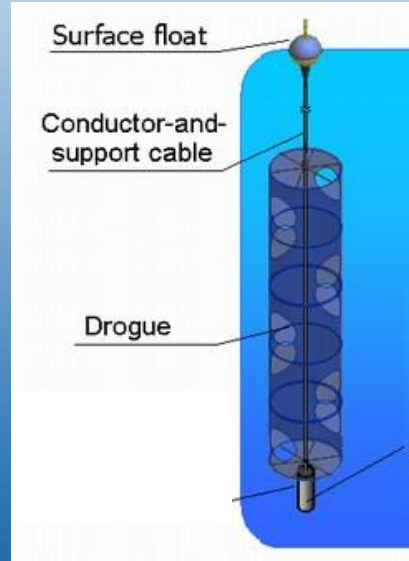
- ~ I drifter sono dotati di un **modem satellitare** per la trasmissione dei dati; il sistema satellitare è di tipo **Iridium** (accuratezza geolocalizzazione di 2-50 m);

Drogue

- ~ La presenza/assenza della drogue viene rilevata grazie ad uno **strain gauge** montato all'interno dello scafo e vicino all'attacco del cavo.

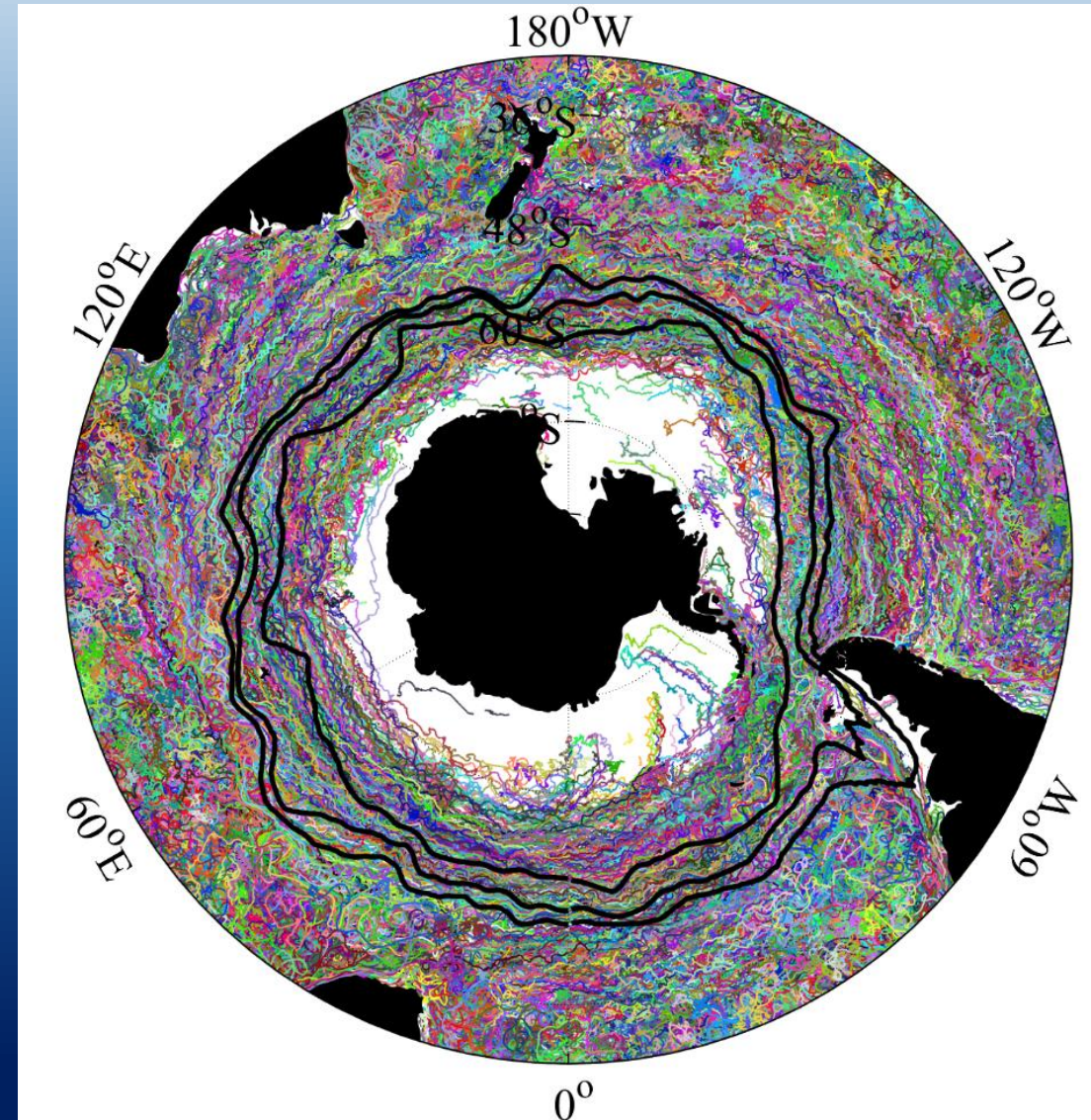
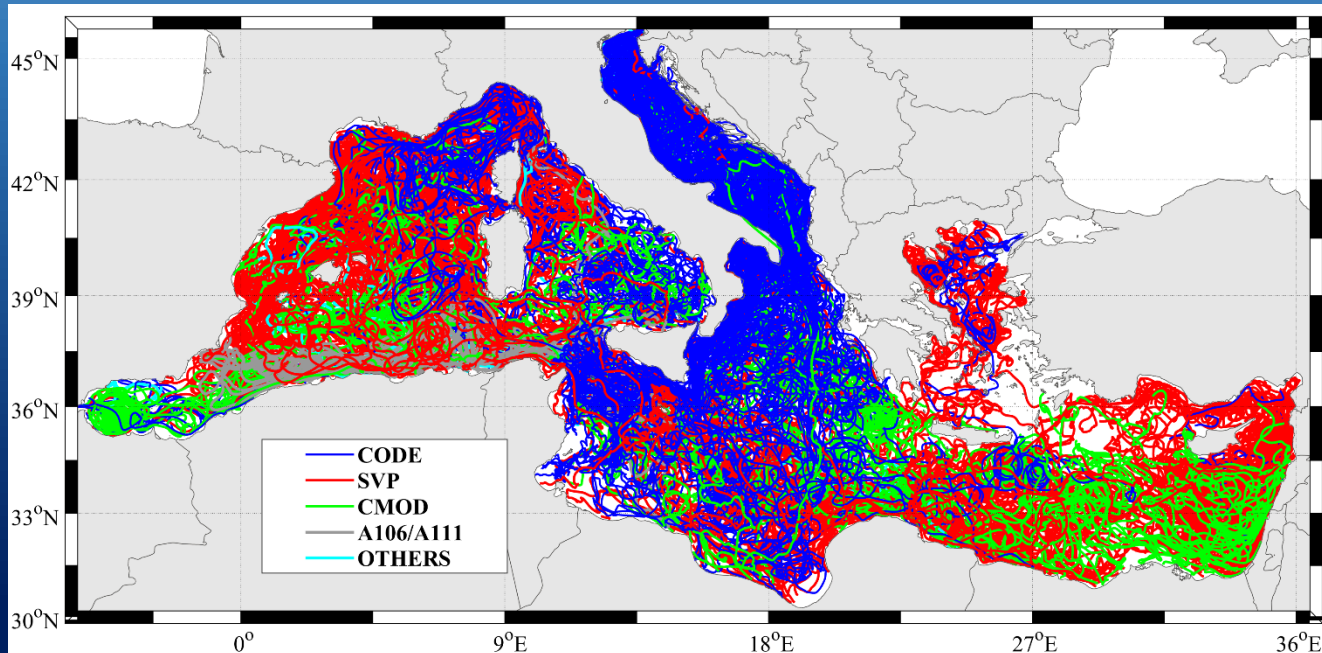
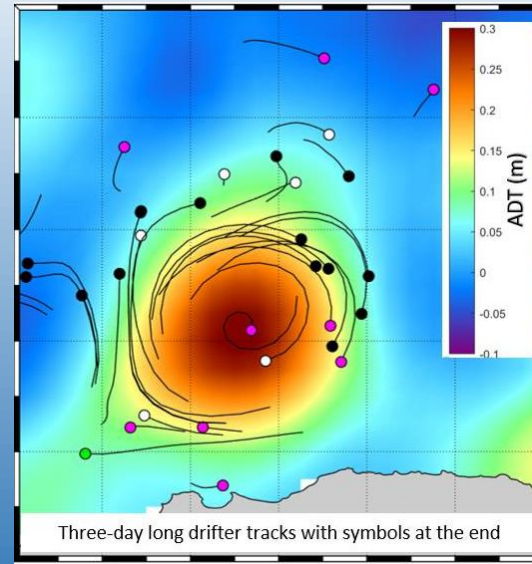
Strumenti autonomi: programmi internazionali di ricerca

Global Drifter Program - GDP

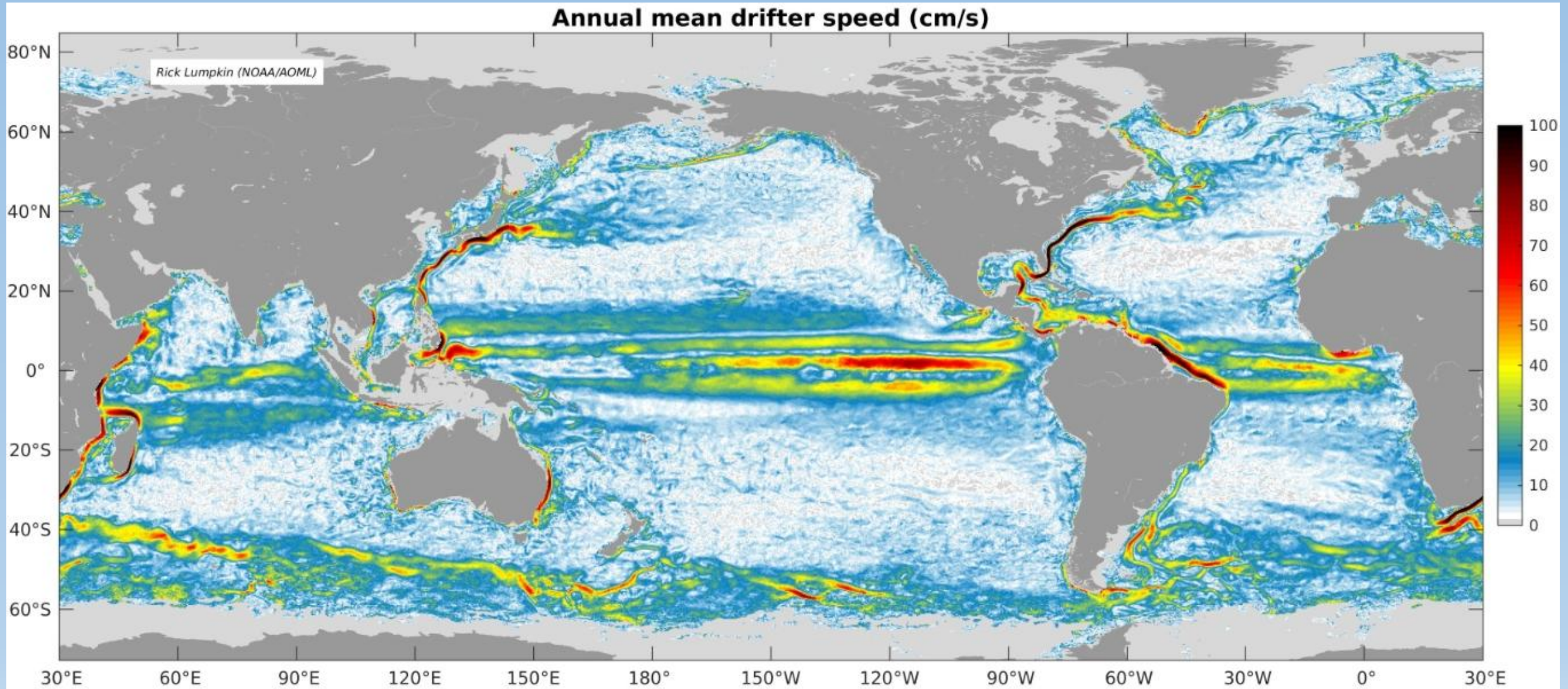


Drifter SVP: Spaghetti diagram

- ~ I drifter popolano tutti gli oceani del mondo.
- ~ I loro movimenti sono utilizzati per produrre mappe delle correnti superficiali dell'oceano.

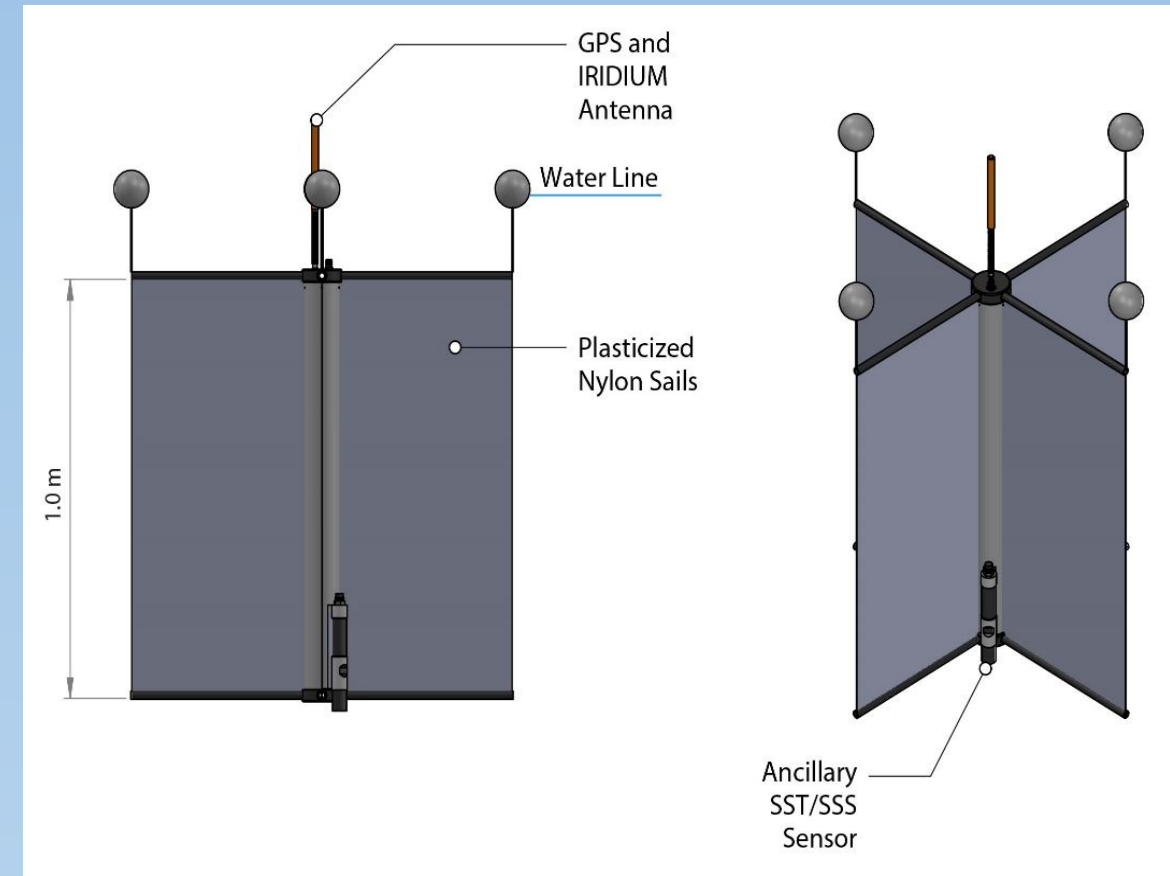


Global Drifter Program - GDP



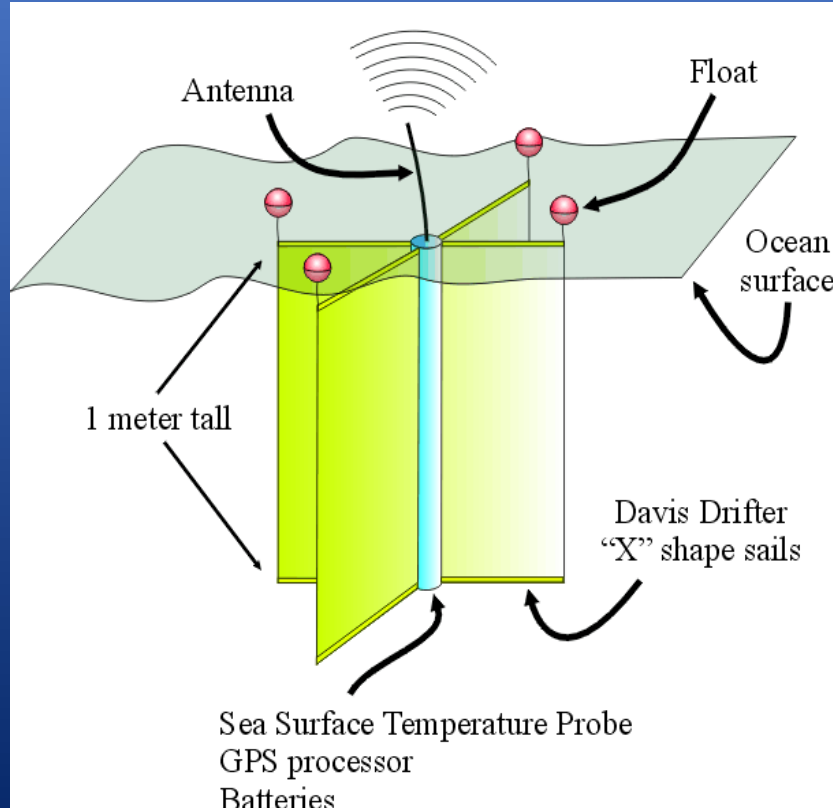
Drifter CODE: Coastal Ocean Dynamic Experiment

- ~ Il drifter **CODE** è progettato per seguire le correnti nel **primo metro** di profondità;
- ~ E' costituito da uno **scafo cilindrico**, di 10-15 cm di diametro, che contiene le batterie e l'elettronica;
- ~ La drogue è formata da quattro vele in nylon plastificato disposte a croce;
- ~ Il CODE drifter ha una leggera galleggiabilità negativa e **quattro piccoli galleggianti** collegati all'estremità dei bracci a cui sono attaccate le vele forniscono la galleggiabilità supplementare per garantire il galleggiamento;
- ~ Un **controller digitale** gestisce la raccolta dati e consente di utilizzare una serie di sensori (GPS, SST, SSS).



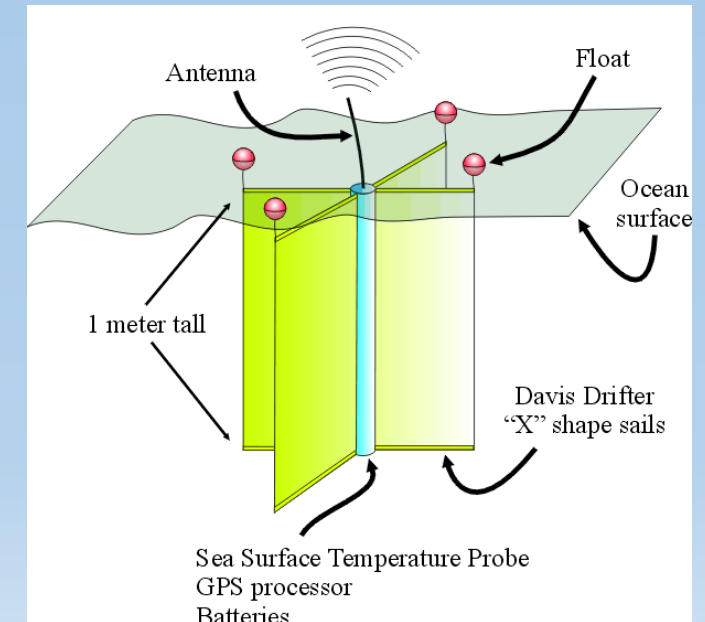


CODE drifter deployment



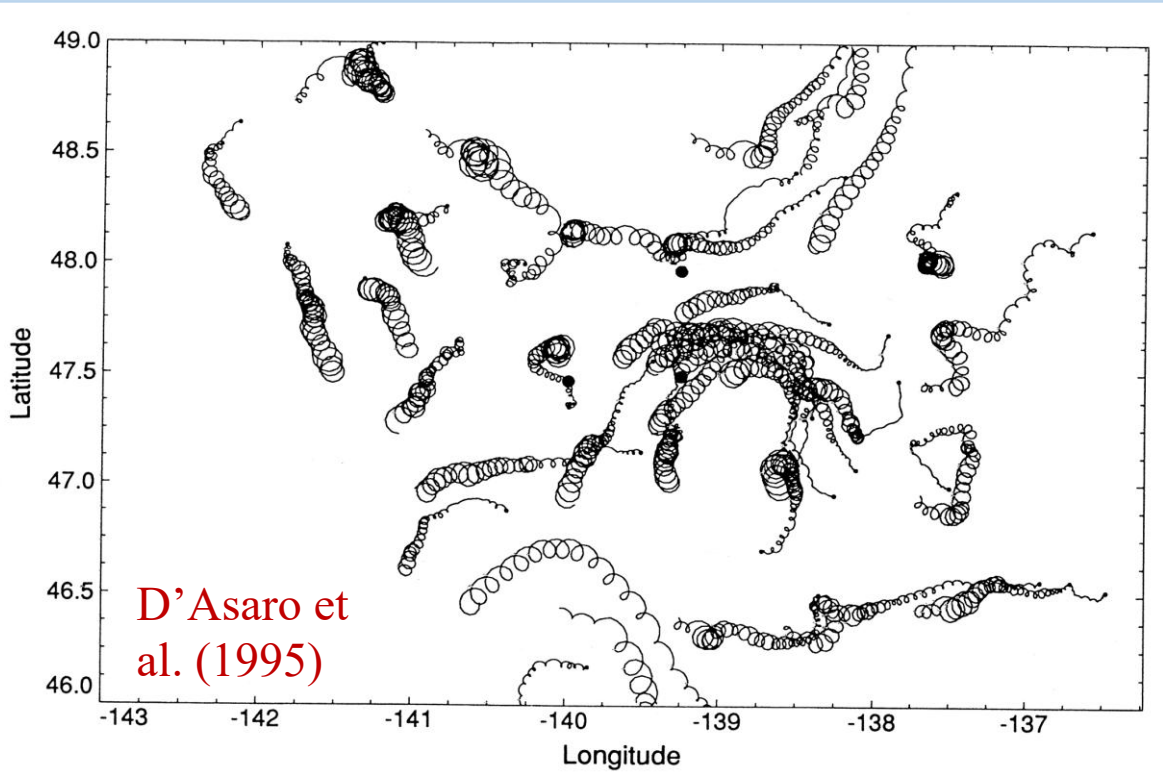
Coastal Ocean Dynamic
Experiment (CODE)

BioTREC Apr-May 2024

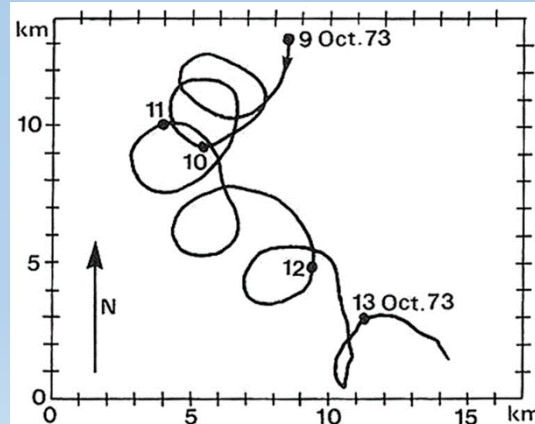


https://argo.ogs.it/medsvp/index_project.php

Gli effetti di Coriolis negli oceani: correnti inerziali



Attrito: movimento che risulta dal trasferimento di quantità di moto tra parti differenti del fluido



- Il vento quando soffia sulla superficie degli oceani trasferisce quantità di moto ($q=mv$; massa x velocità);
- Quando il vento smette di soffiare, l'oceano non si ferma subito, ma continua a muoversi per attrito e per la forza di Coriolis che continuano ad agire su di esso;
- Il risultato è un movimento curvilineo che prende il nome di **corrente inerziale**;
- Se la forza di Coriolis è l'unica che agisce orizzontalmente ed il moto non comporta grandi variazioni in latitudine, la corrente inerziale è circolare;

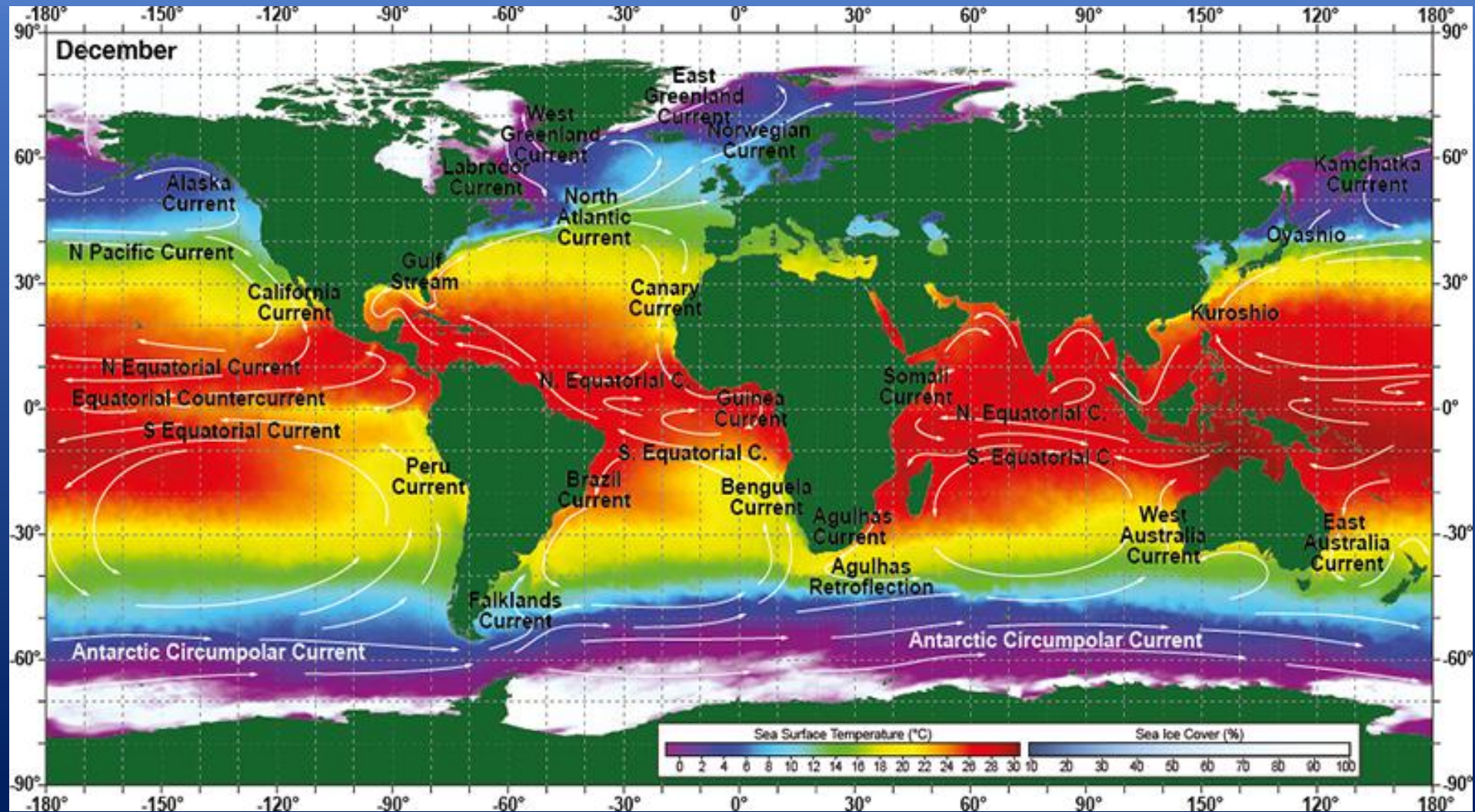
Il periodo delle correnti inerziali T è il tempo che una particella d'acqua impiega a compiere un giro:

$$T = \frac{2\pi}{f}$$

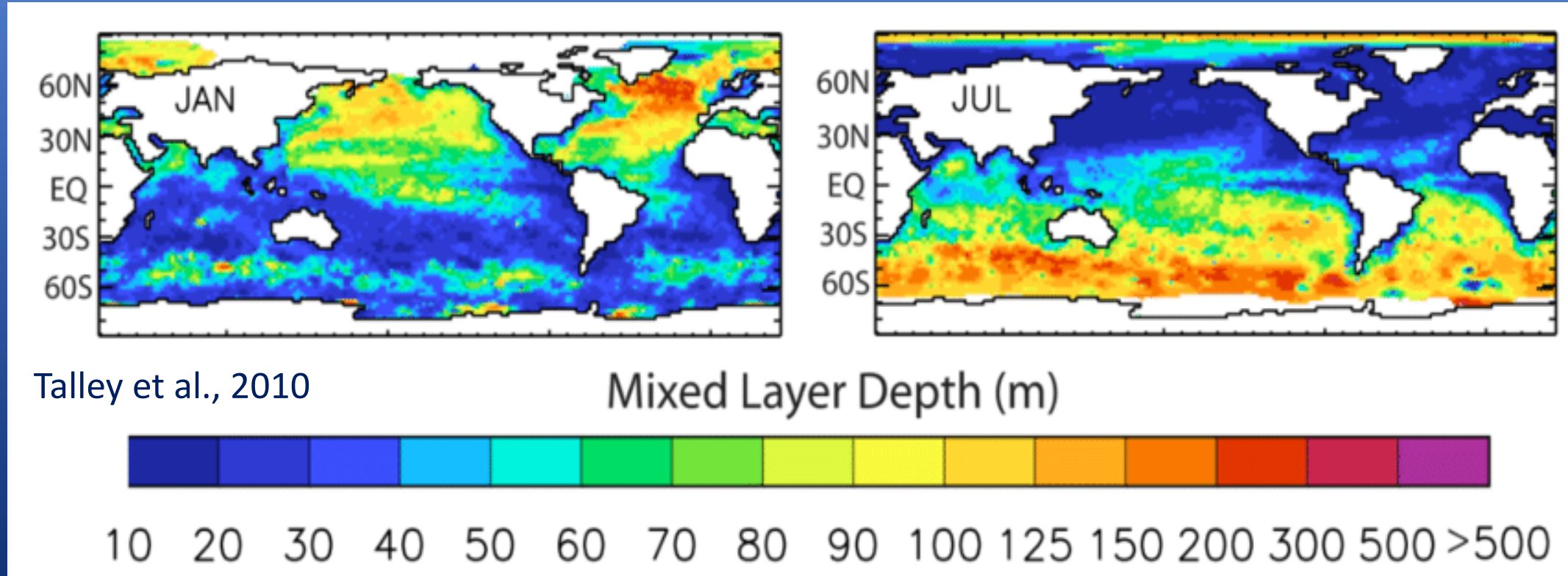
$$f = 2\Omega \sin\varphi$$

Alla latitudine di 45°N , T è di circa 17 ore.

Gyres: Sea Surface Temperature (SST)



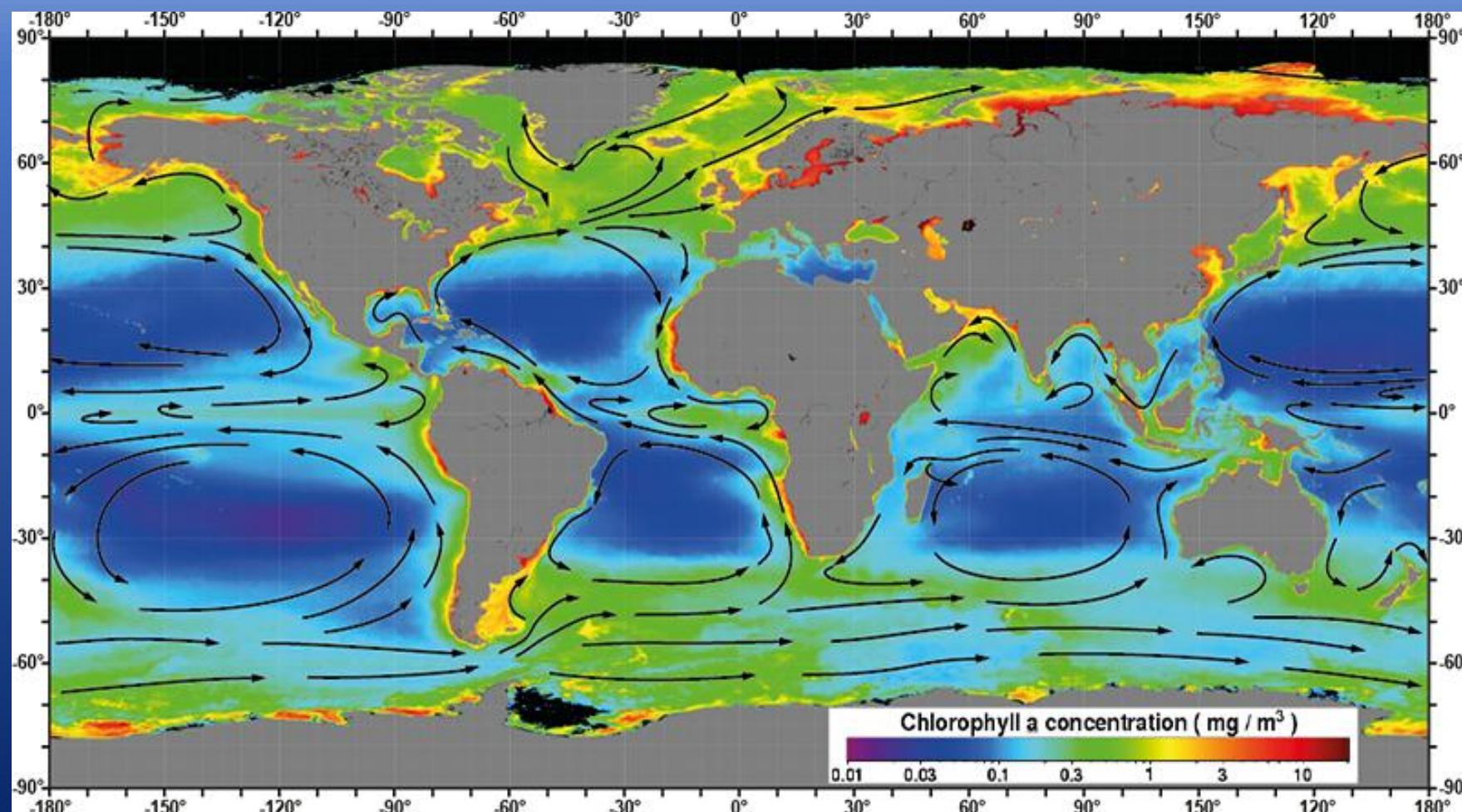
Gyres: Mixed Layer Depth (MLD)



Le figure mostrano la stagionalità del MLD:

- Durante l'inverno boreale, la profondità del MLD è maggiore nei Gyre sub-tropicali dell'Emisfero Nord;
- Durante l'estate boreale, la profondità del MLD è maggiore nel Gyre sub-tropicali dell'Emisfero sud;

Gyres Chlorophyll-a concentration (Chl-a)

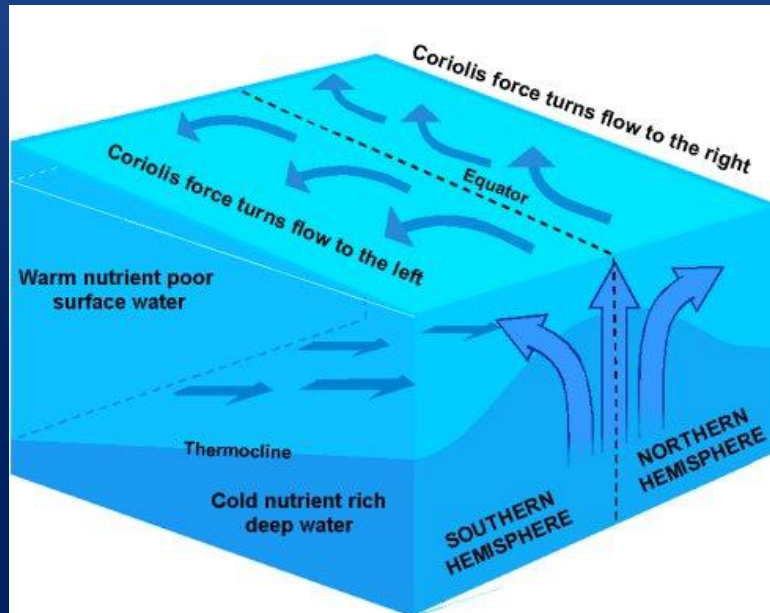
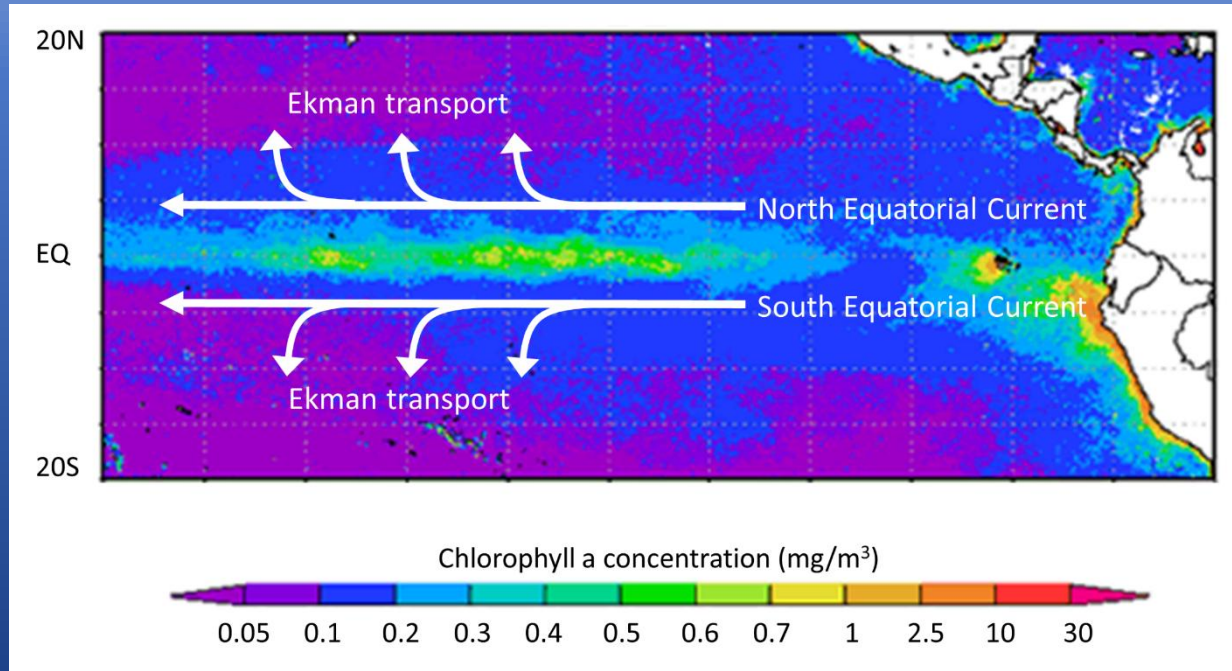


La distribuzione del fitoplancton è strettamente legata al flusso delle correnti oceaniche.

Alle **medie e alte latitudini** il rimescolamento invernale delle acque superficiali e profonde riporta i nutrienti nello strato superficiale illuminato dal sole, rendendo queste aree più produttive rispetto ai gyre subtropicali, dove il termoclino permanente impedisce il rimescolamento tra acque superficiali e profonde.

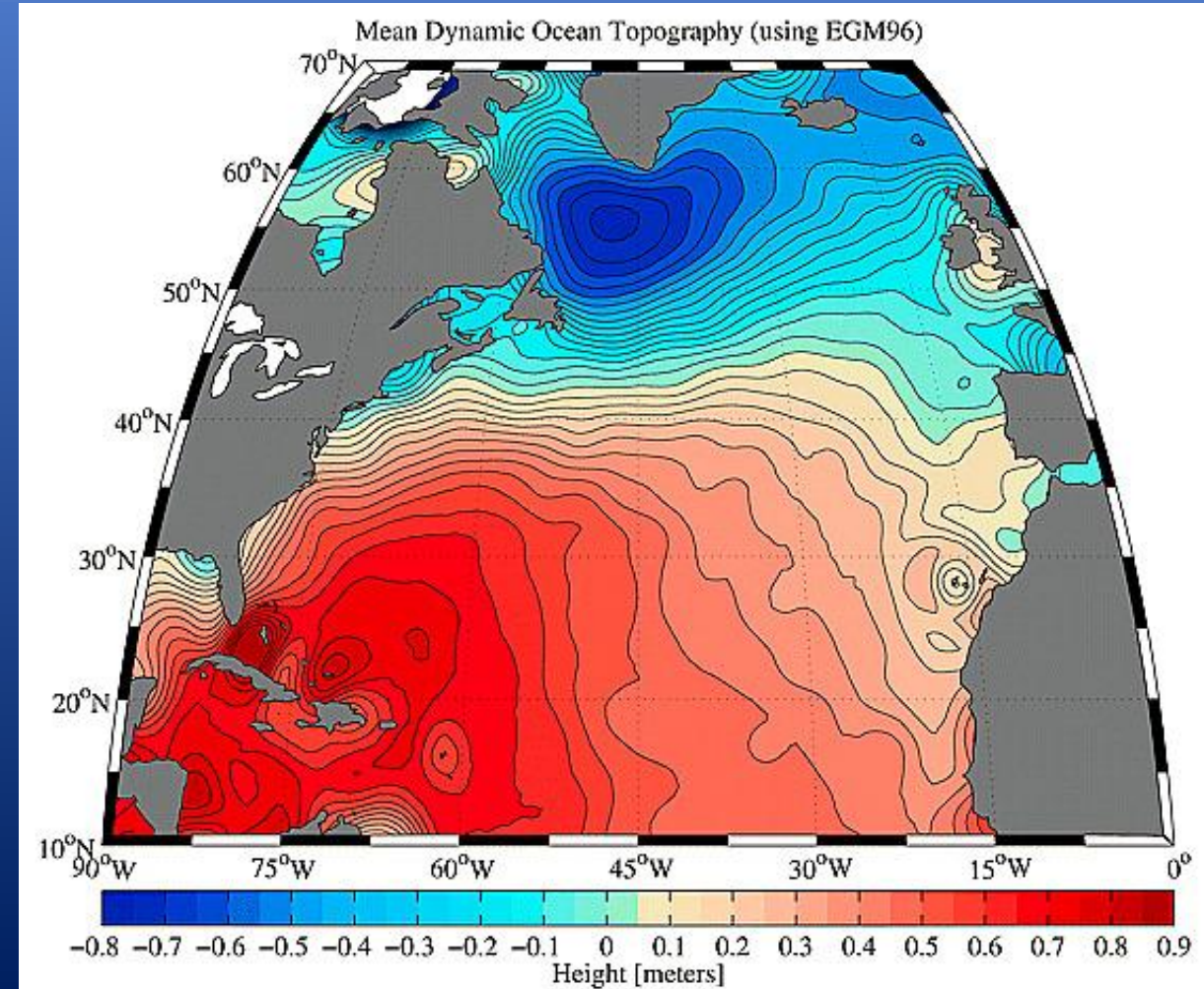
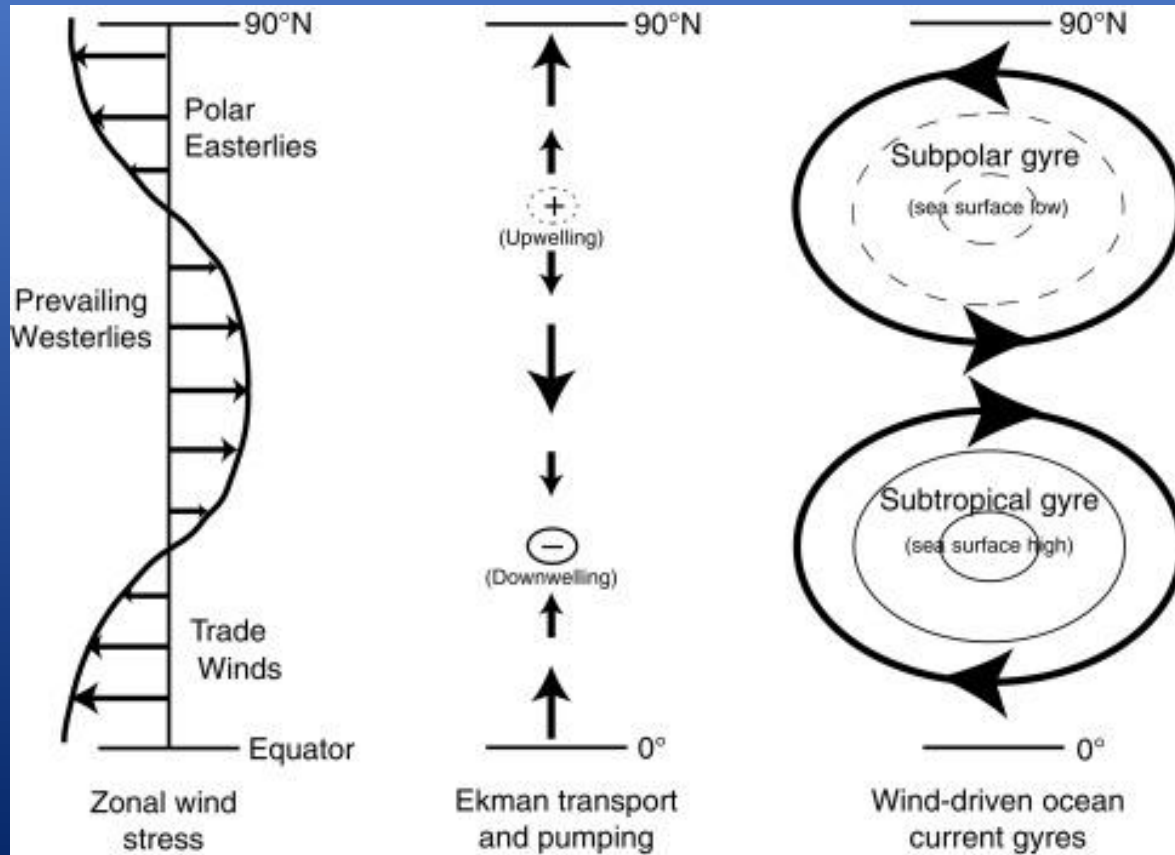
Lungo il margine orientale dei Gyre Subtropicali, i venti prevalenti allontanano le acque superficiali dalla terraferma, dando origine a un upwelling costiero di acque profonde ricche di nutrienti. Gli ecosistemi di queste regioni di upwelling costiero sono i più produttivi al mondo.

Upwelling

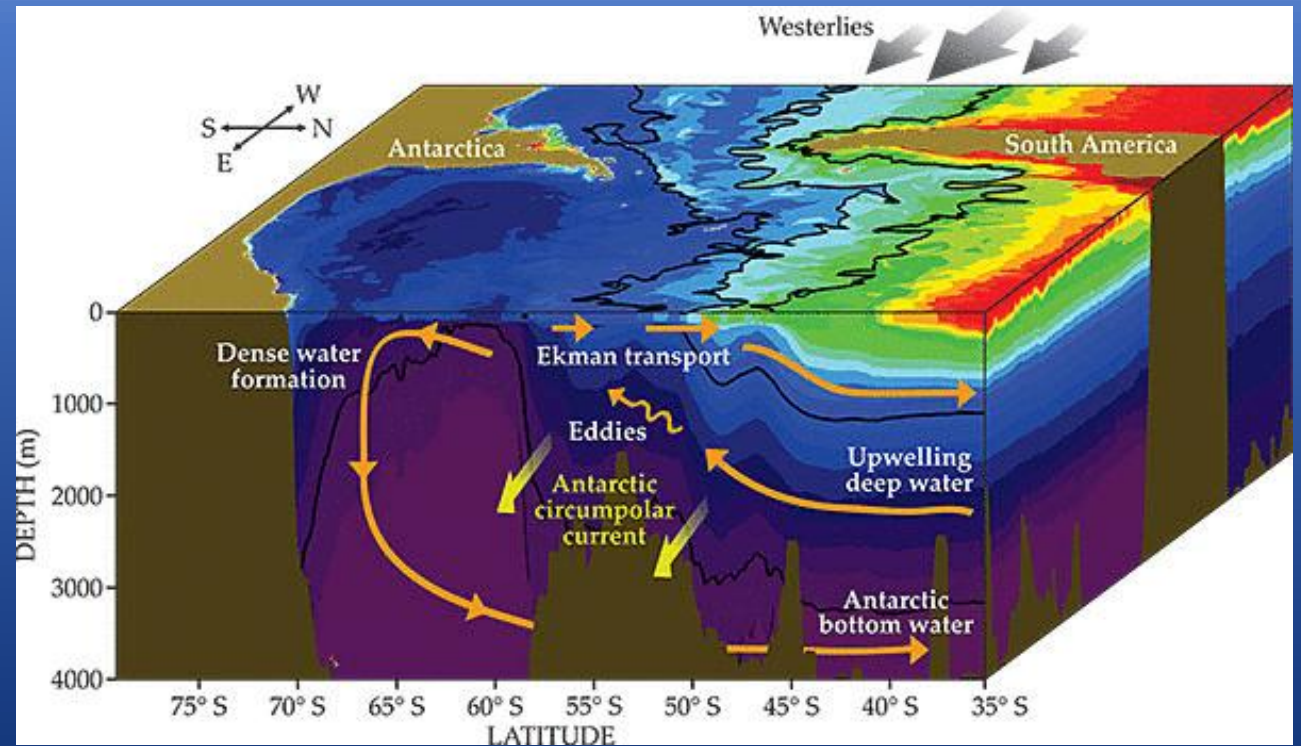
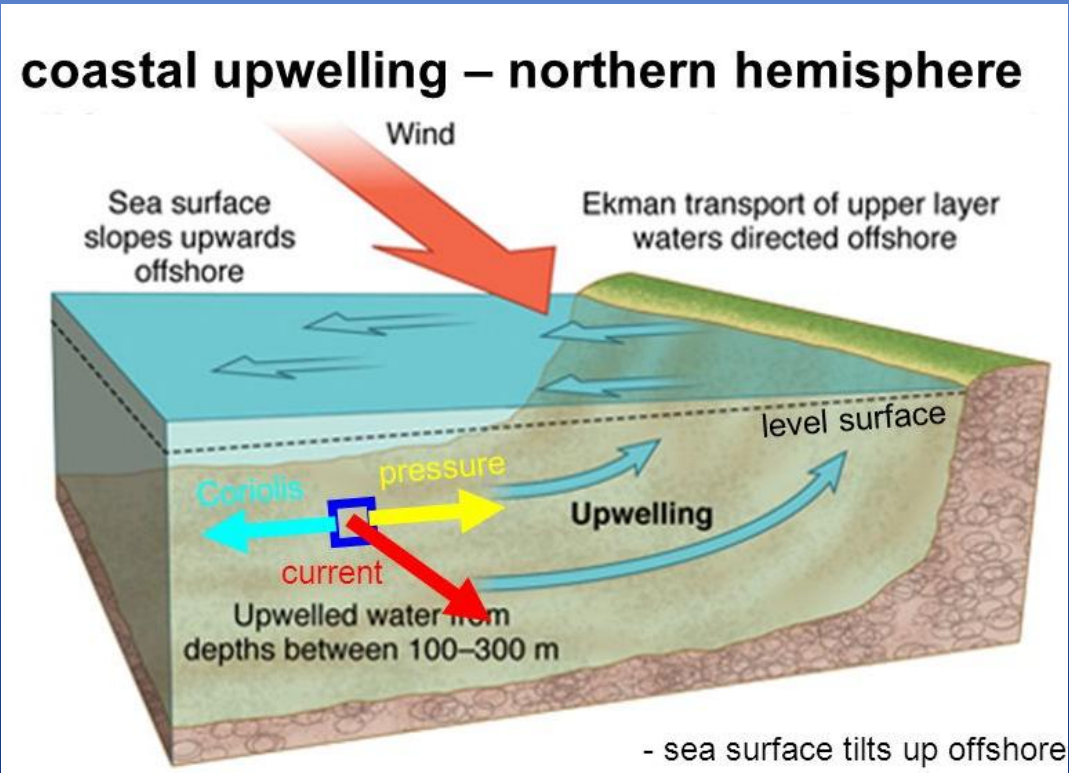


- L'**upwelling** si verifica quando le correnti superficiali **divergono**, ovvero si allontanano l'una dall'altra;
- Quando le acque superficiali divergono, l'acqua più profonda deve essere portata in superficie per sostituirla, creando una corrente verticale dal basso verso l'alto (**upwelling**);
- L'acqua che risale è fredda e ricca di sostanze nutritive, il che porta a un'**elevata produttività**.
- Molte delle regioni più produttive della Terra si trovano in zone di upwelling;
- Nel Pacifico equatoriale, gli Alisei trasportano le Correnti Equatoriali Nord e Sud verso ovest, mentre il trasporto di Ekman fa sì che gli strati superiori si spostino verso nord e verso sud nei rispettivi emisferi;
- Questo crea una zona di divergenza e una regione di upwelling e alta produttività.

Upwelling-Downwelling nei Gyre

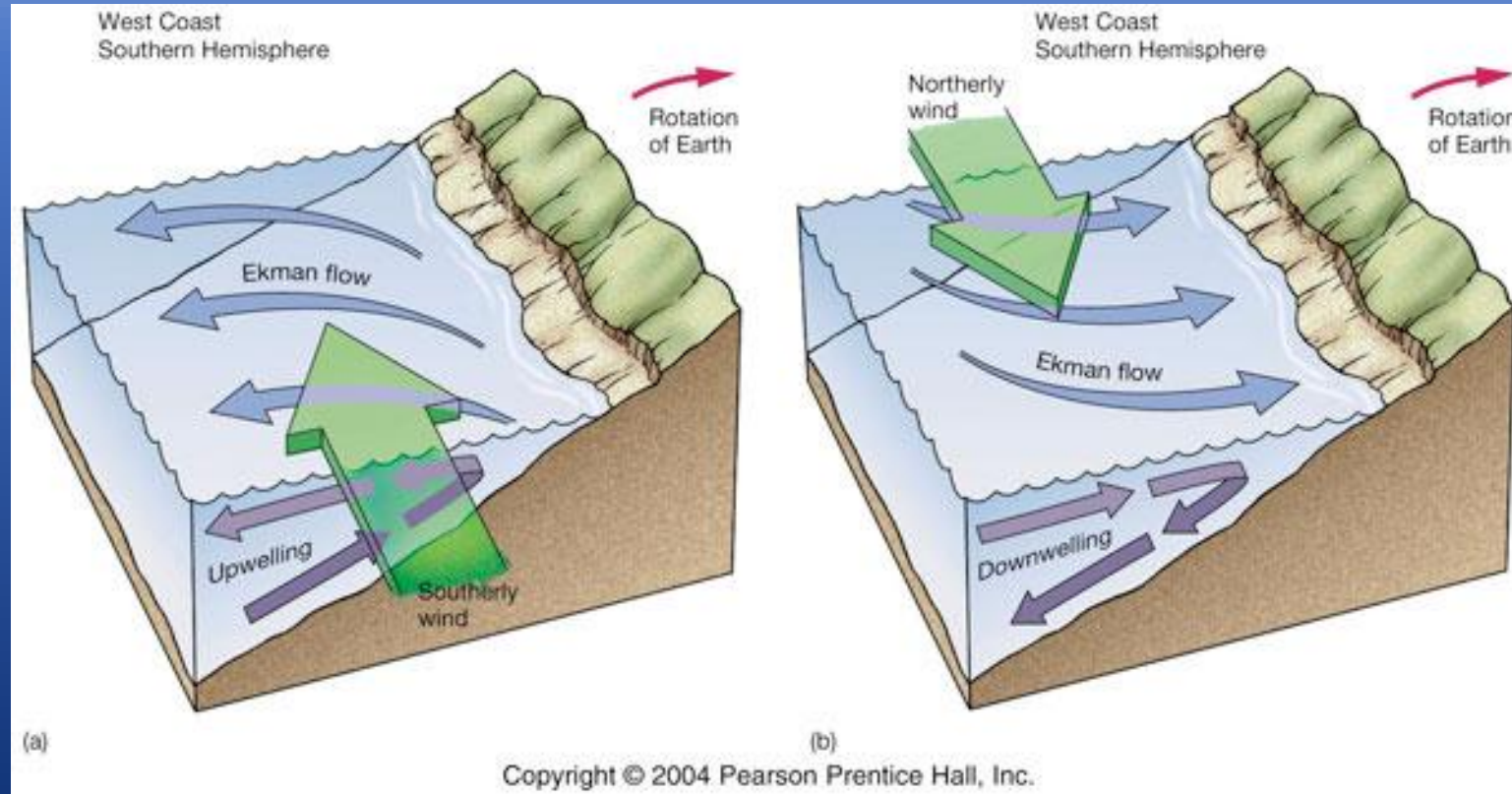


Upwelling costiero



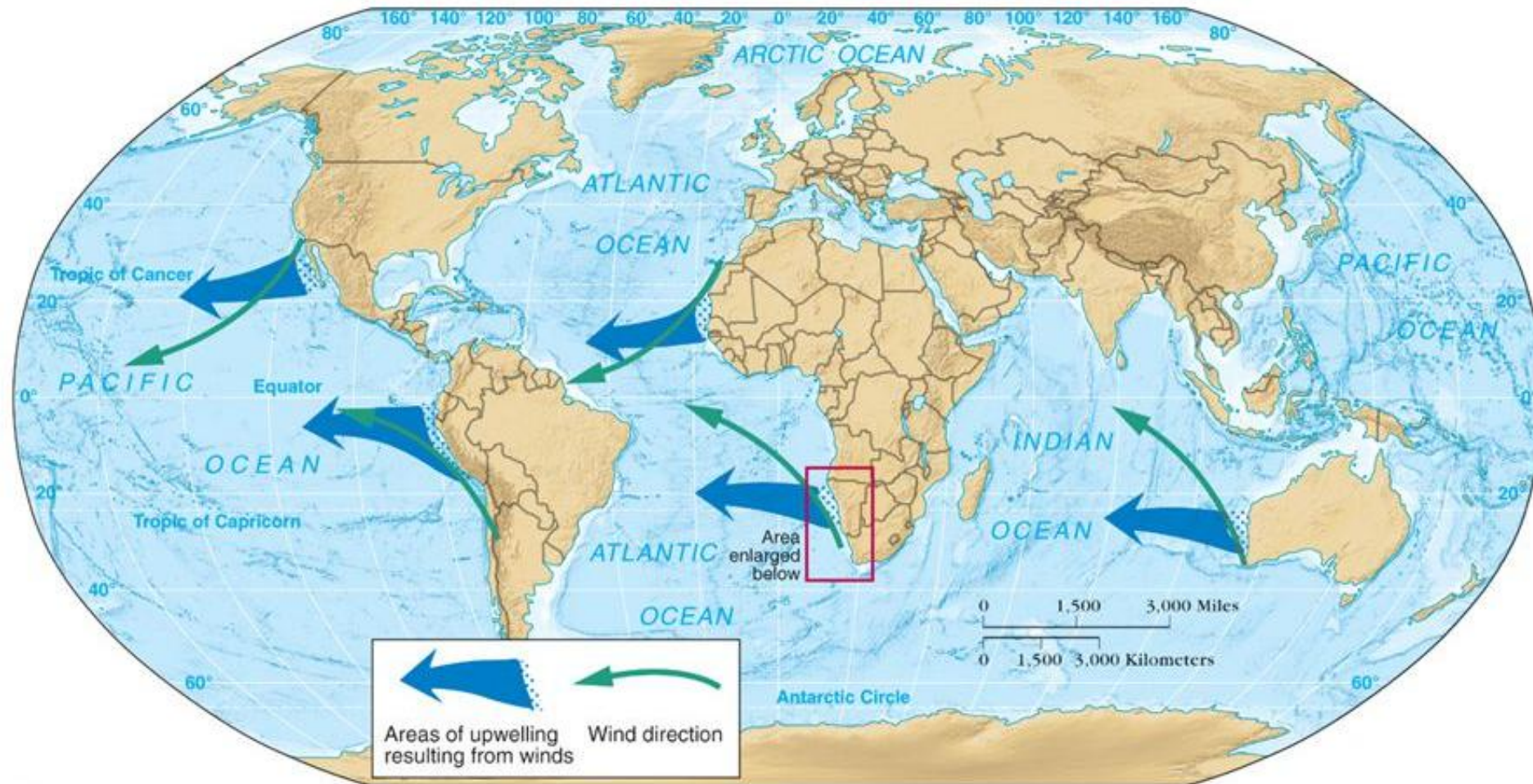
- In alcune zone costiere dell'oceano, la combinazione di venti persistenti, l'effetto Coriolis e le limitazioni ai movimenti laterali dell'acqua causate dalle coste e dai fondali bassi, inducono trasporto dell'acqua verso l'alto (upwelling) o verso il basso (downwelling);
- L'**upwelling costiero** si verifica quando il vento che soffia in prossimità della costa allontana le acque superficiali dall'area costiera;
- L'acqua più profonda risale in prossimità della costa per rimpiazzare l'acqua superficiale che si è allontanata;

Upwelling e downwelling



- Il **downwelling** è il movimento verticale delle acque superficiali verso zone più profonde dell'oceano.
- Il downwelling si verifica nelle aree in cui le acque convergono e si "ammassano", come nel Nord Atlantico, dove si incontrano diverse correnti superficiali;

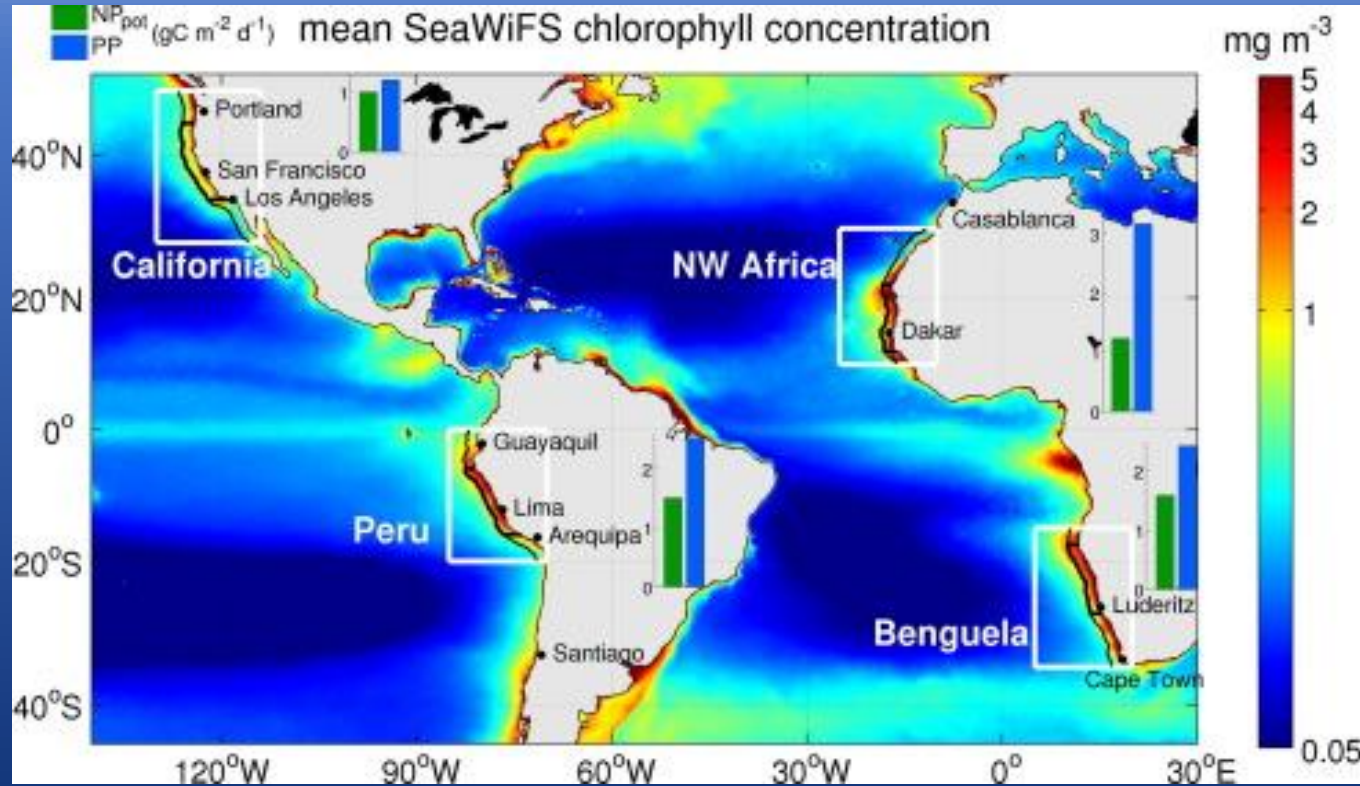
Eastern Boundary Upwelling Systems



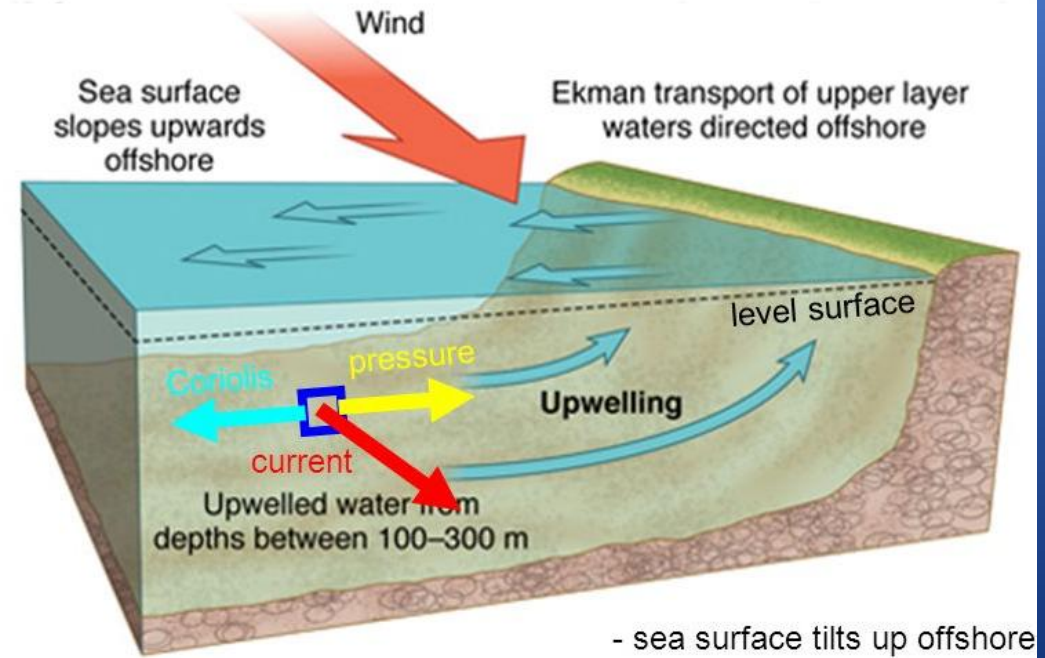
(a)

© 2011 Pearson Education, Inc.

Eastern Boundary Upwelling Systems: trasporto

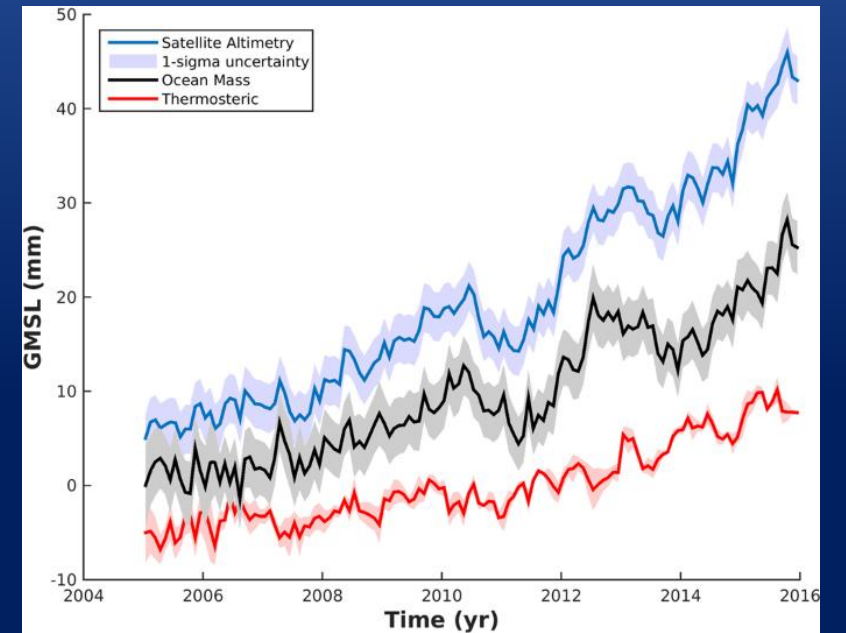
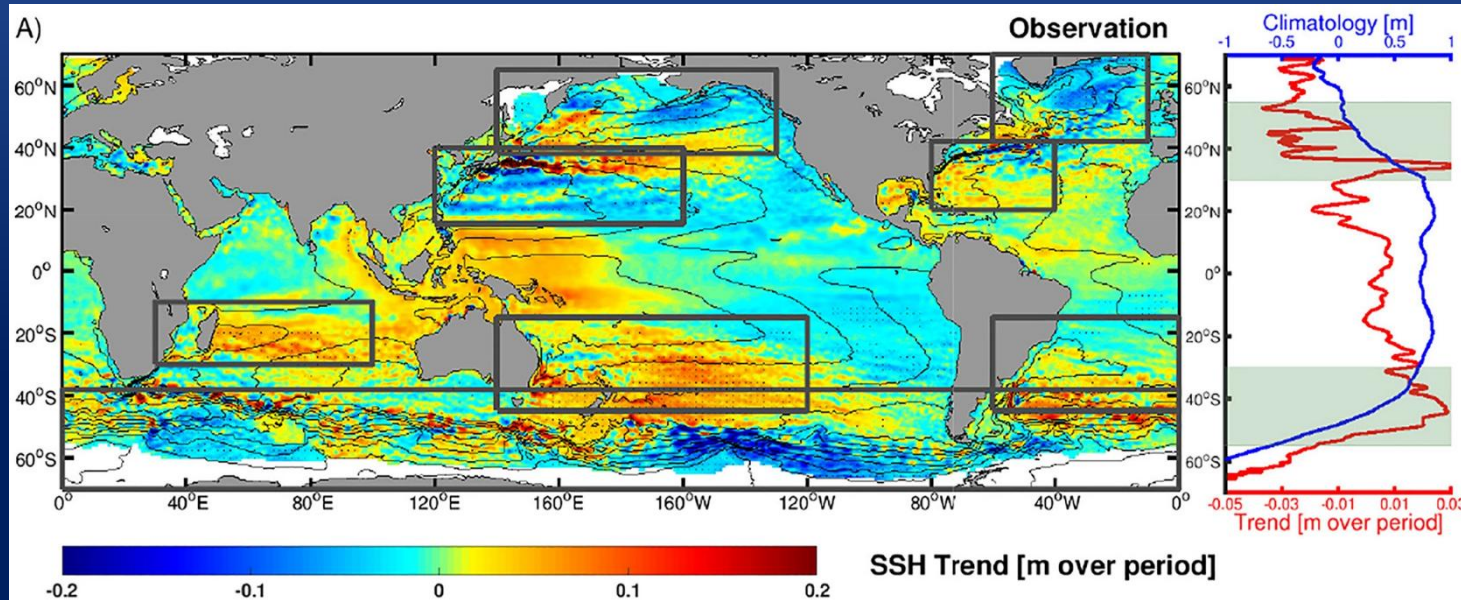
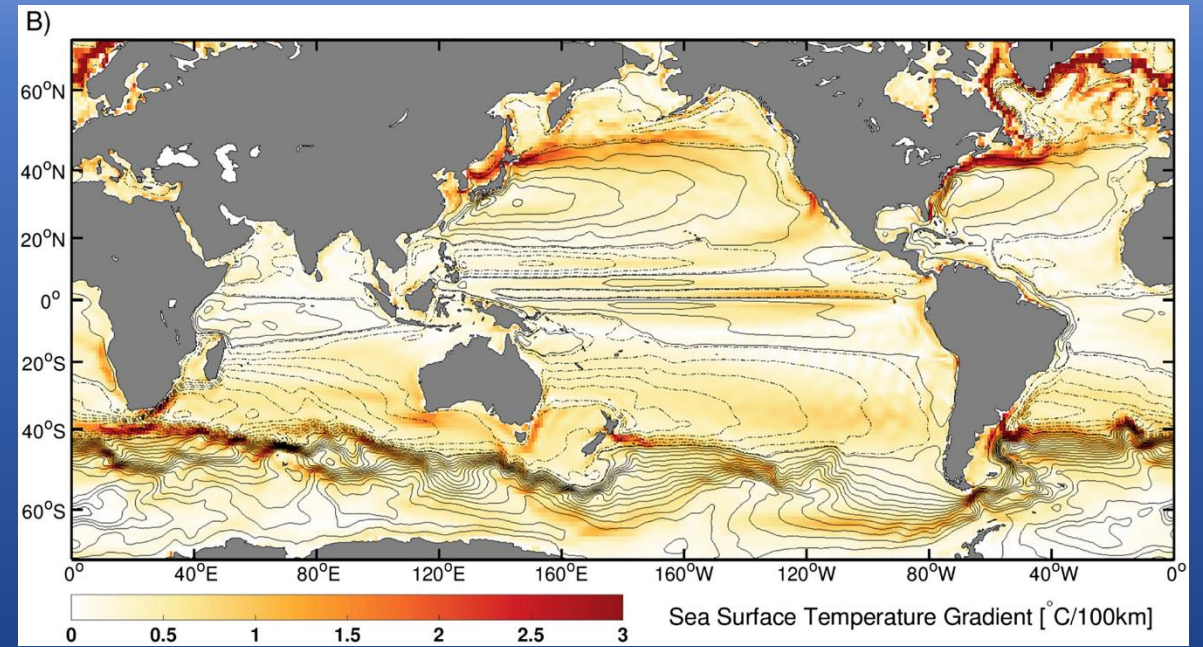
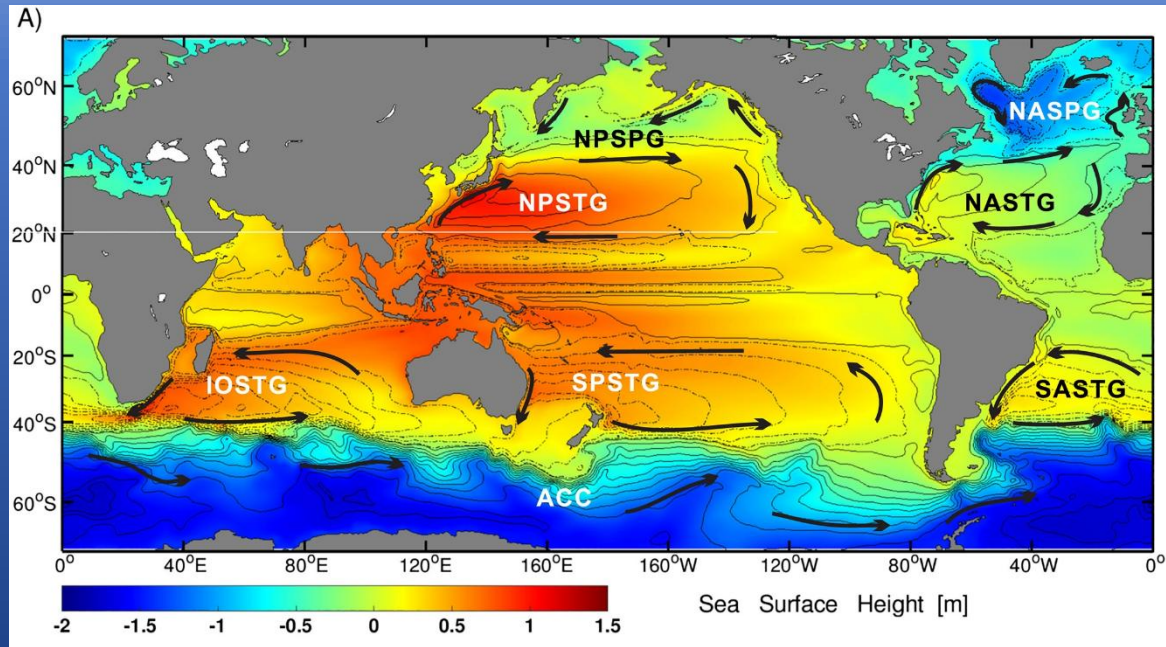


coastal upwelling – northern hemisphere

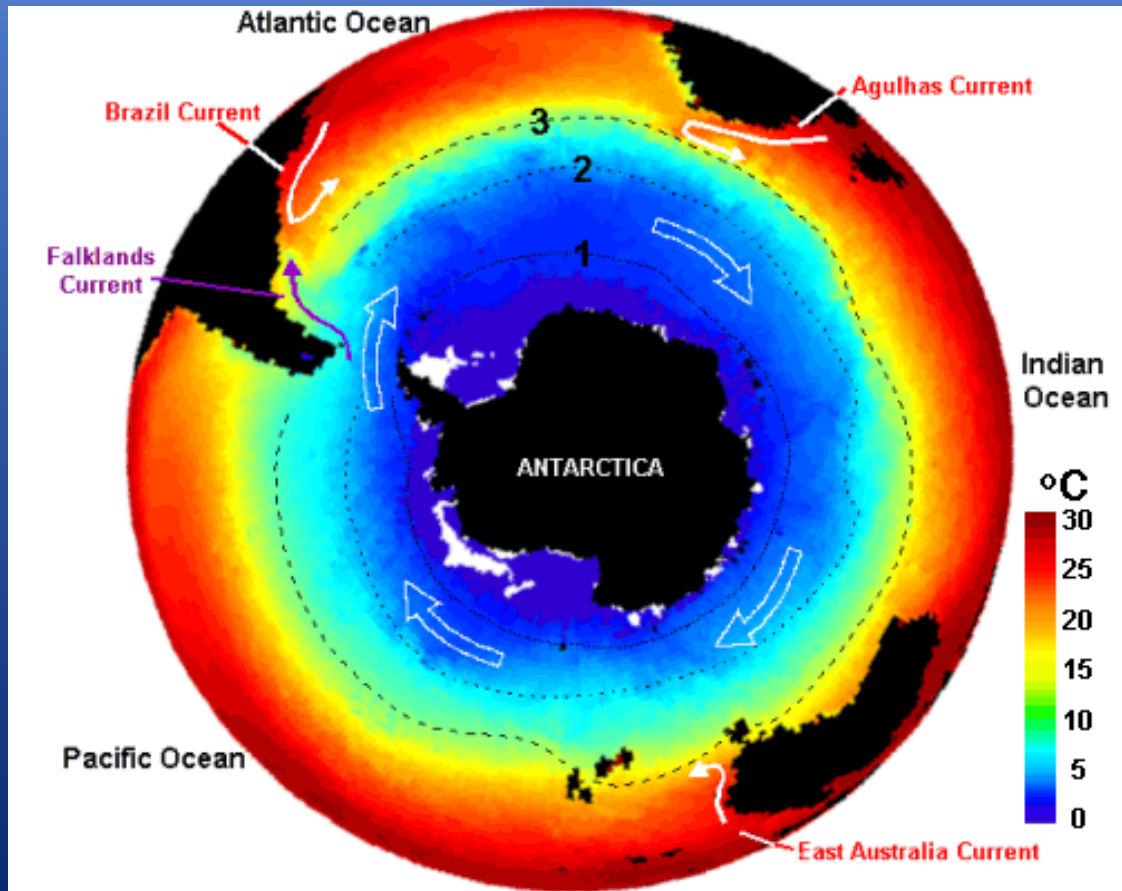


- Il trasporto offshore delle acque superficiali genera un abbassamento del livello del mare nell'area costiera;
- Esso risulta in un gradiente di pressione orizzontale, che a sua volta genera un trasporto geostrofico verso l'Equatore;
- Le correnti superficiali risultanti sono quindi sia dirette offshore che verso l'Equatore.

Trend del livello del mare e della SST

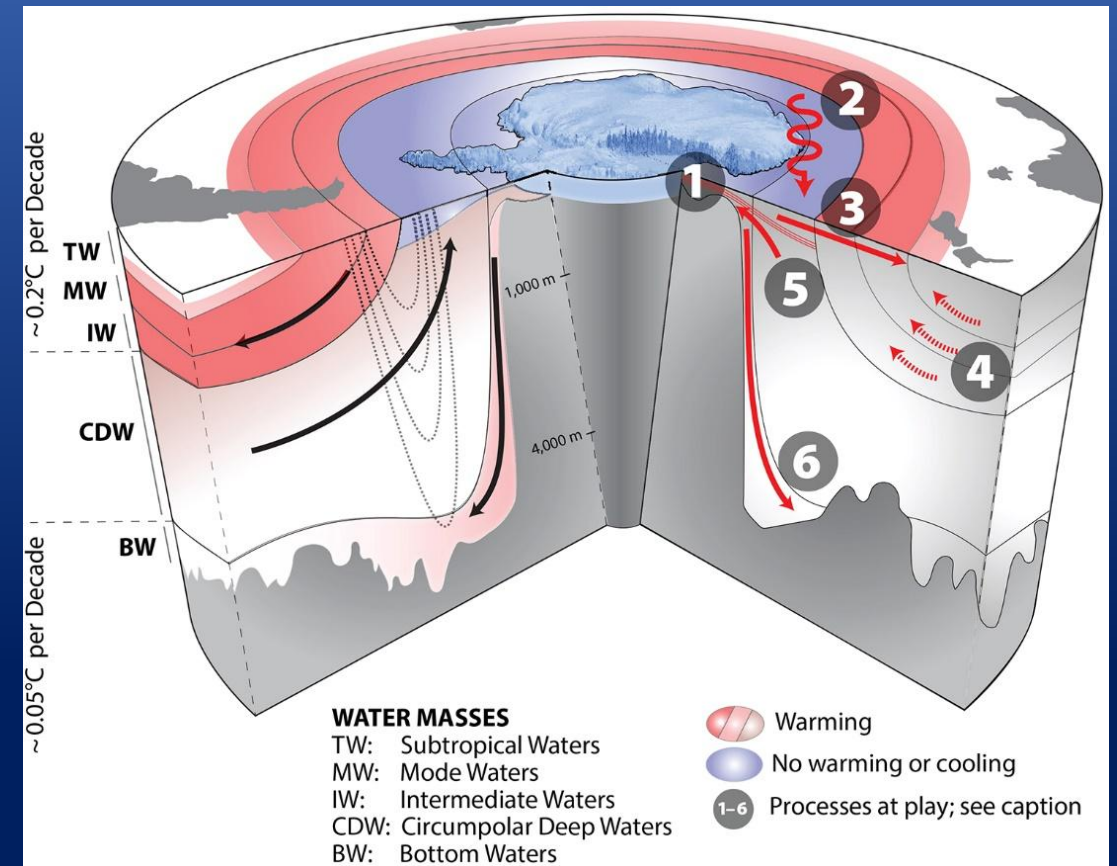


Trend nell'Antarctic Circumpolar Current

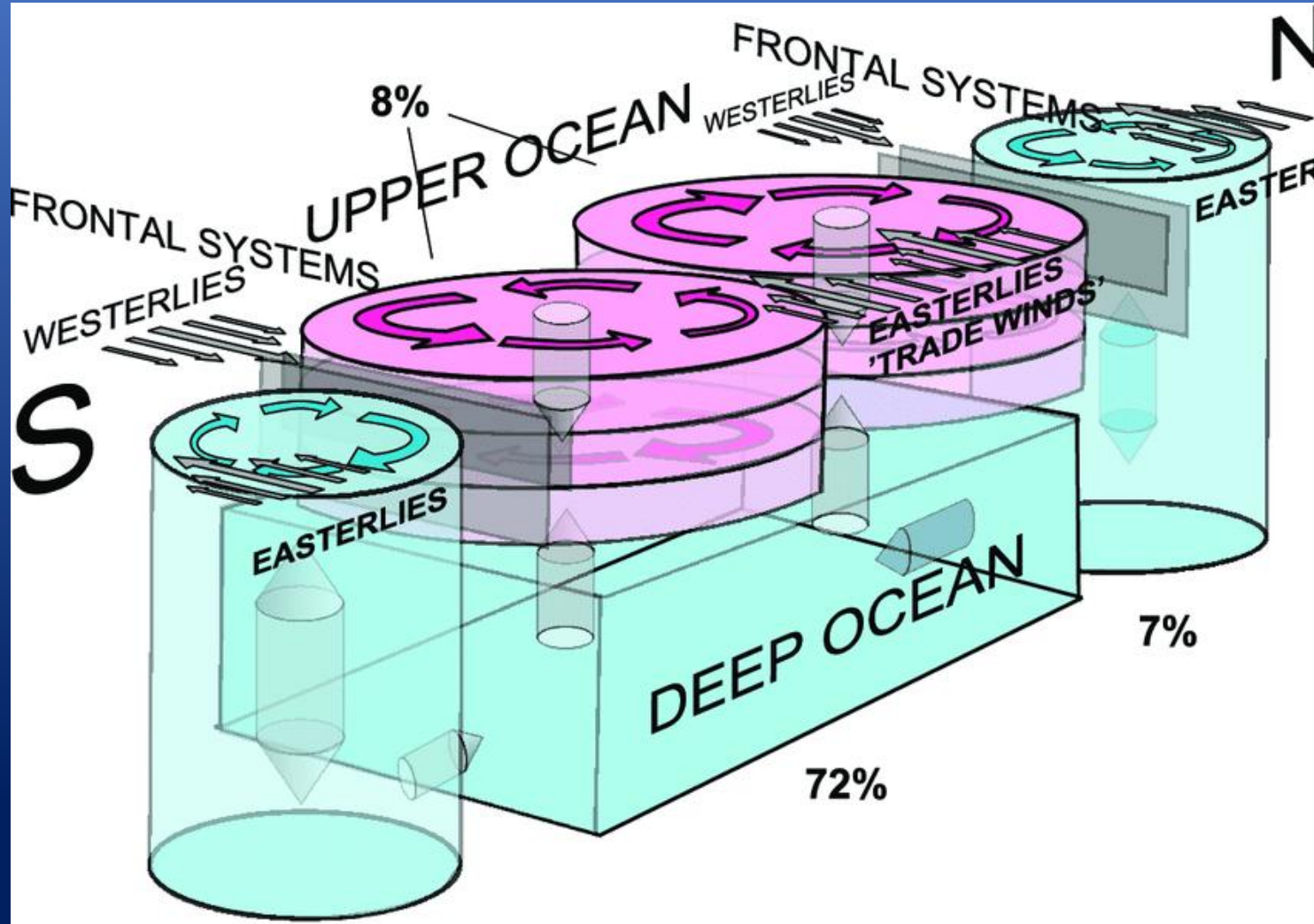


- 1) The polar front 2) The subantarctic front, 3) The subtropical front - the northern boundary of the Southern Ocean. White outline arrows indicate the flow of the Antarctic Circumpolar Current.

Source: NOC from SST climatology data



Distribuzione schematica delle strutture oceaniche e venti dominanti

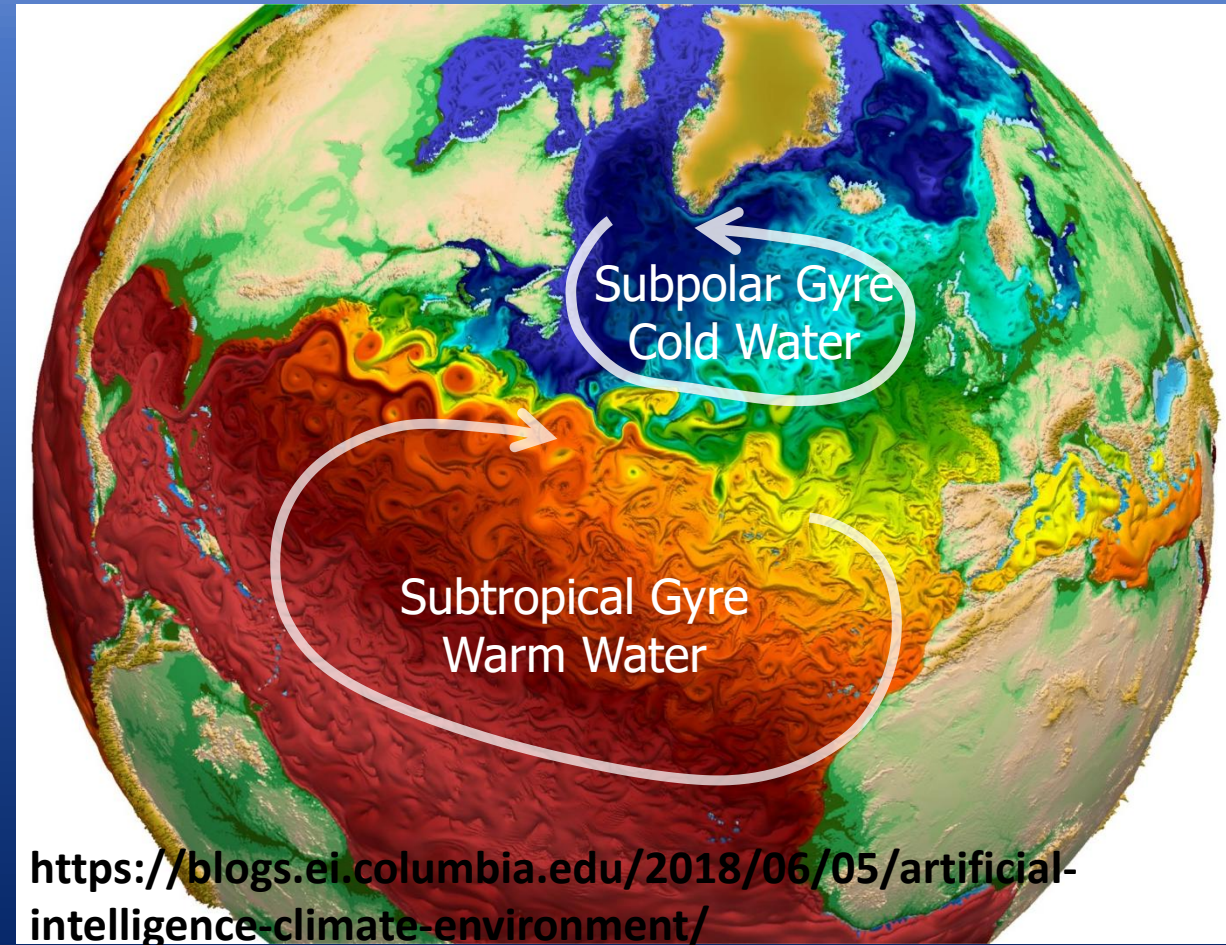


Schema idealizzato dei gyre oceanici e dei sistemi frontali forzati da venti costanti da est e da ovest.

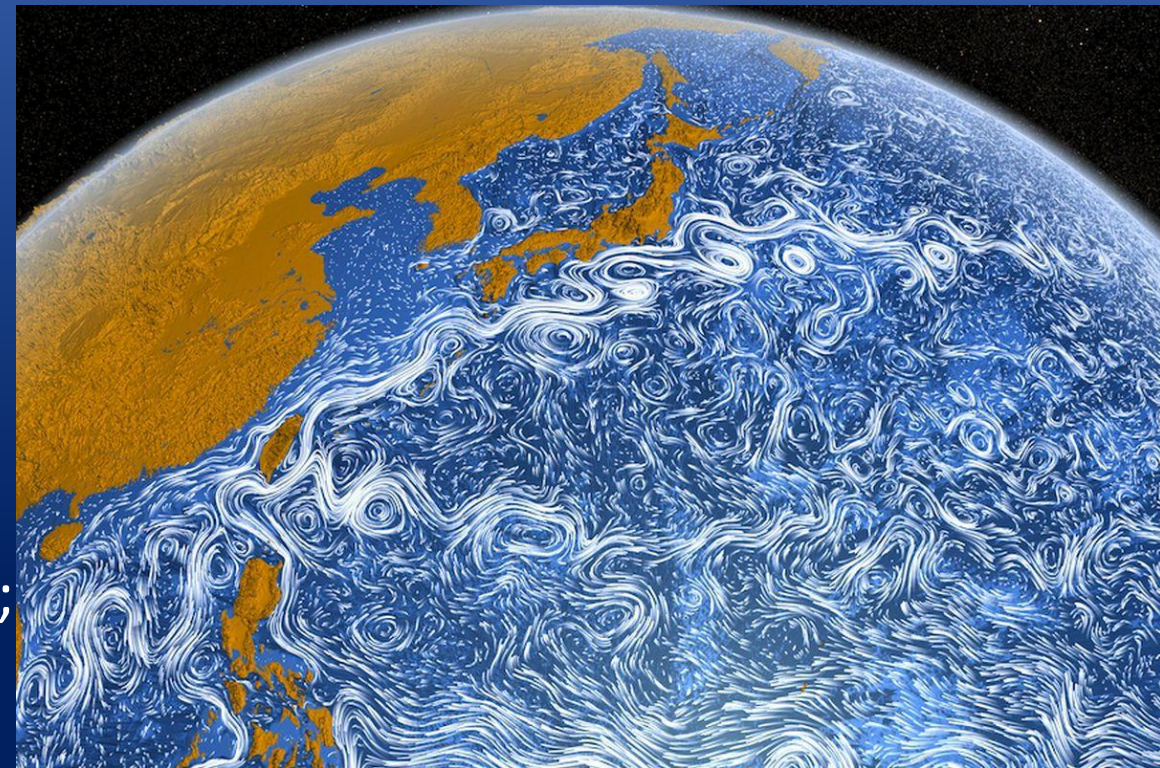
Il riquadro rettangolare rappresenta l'oceano profondo delle basse latitudini.

Le percentuali rappresentano le proporzioni approssimative del volume totale dell'oceano nelle sue diverse parti.

Surface Circulation Structures: Eddies



- ✓ An eddy is a circular current of water;
- ✓ Ocean eddies are the “weather” of the ocean;
- ✓ They move along the path of the main currents;

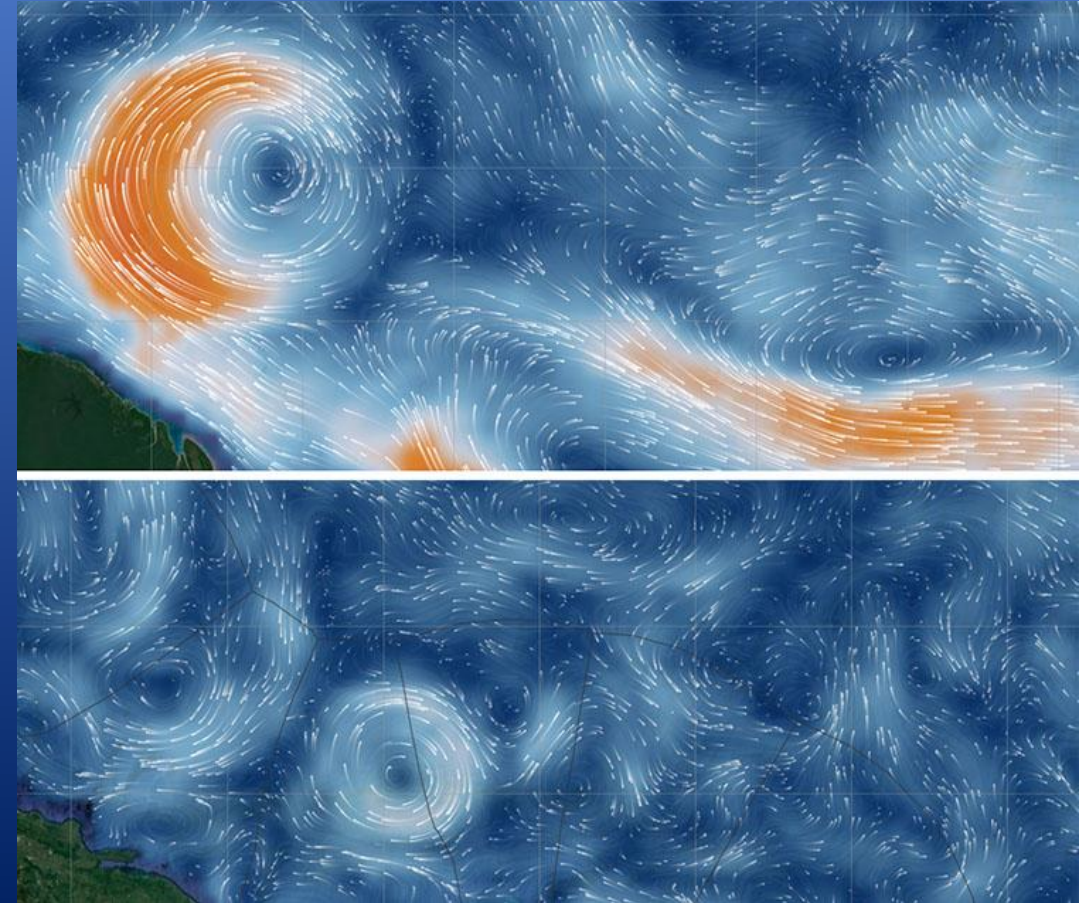


- ✓ typical horizontal scales from few to hundreds km;
- ✓ timescales on the order of days or month.

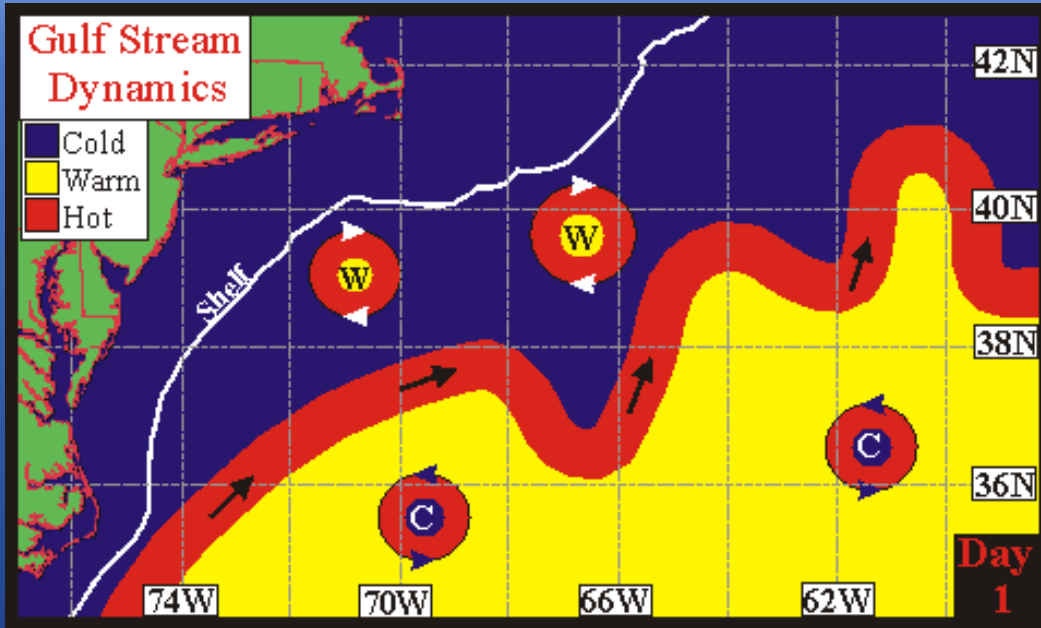
<https://researchfeatures.com/2017/10/20/mesoscale-ocean-currents-improved-climate-modelling/>

Surface Circulation Structures: Eddies

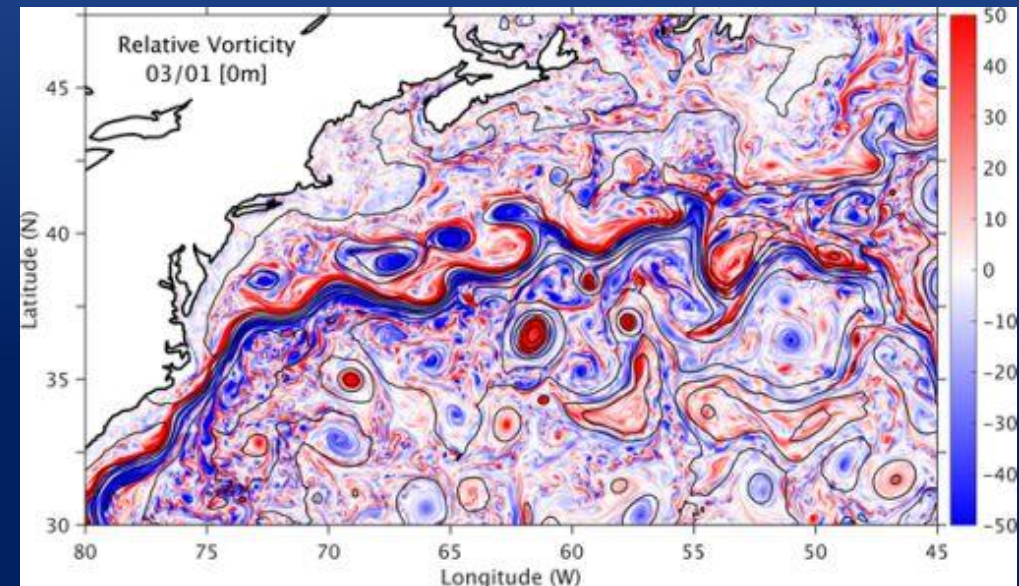
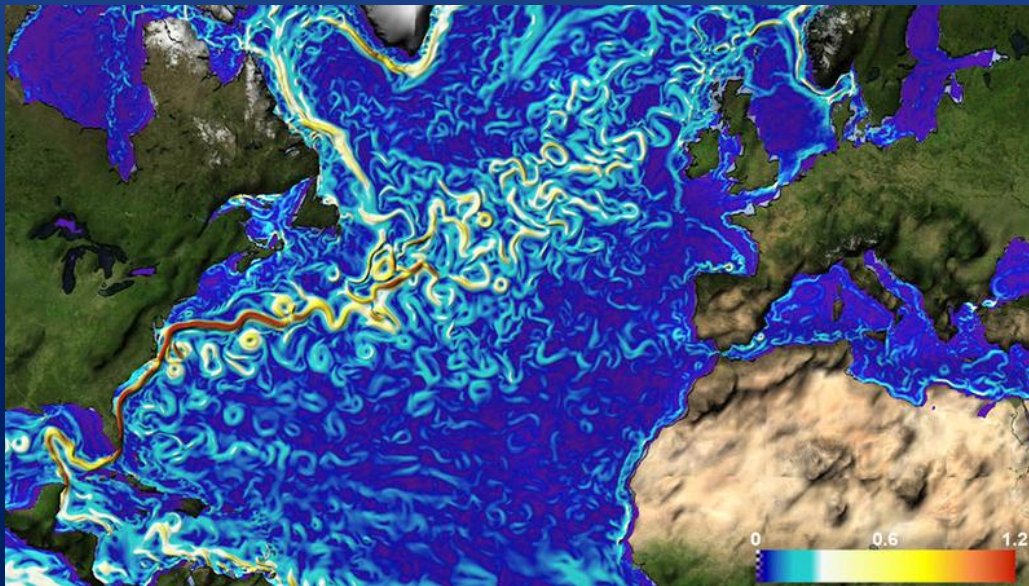
- ✓ L'intensità delle correnti marine mantiene un equilibrio tra l'energia in ingresso e quella che viene dissipata. L'energia cinetica viene in ultima analisi trasformata in calore attraverso gli attriti con il fondo e le onde interne (viscosità molecolare);
- ✓ Ci sono una serie di stadi intermedi tra l'energia delle correnti medie e la sua dissipazione sotto forma di calore, che passano attraverso Eddy di dimensioni via via più piccole;
- ✓ Gli Eddy si formano perché i flussi tendono ad essere naturalmente caotici e turbolenti;
- ✓ Solitamente gli Eddy rimuovono energia al flusso medio, ma possono anche interagire con esso e fornire energia al flusso medio;



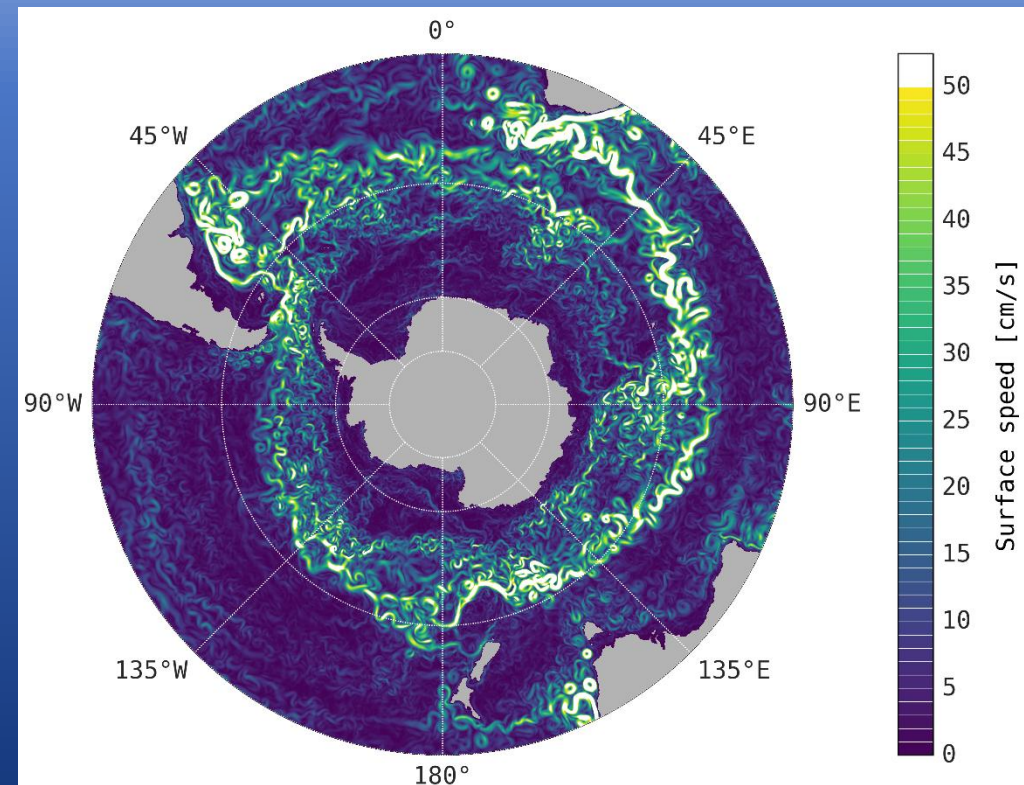
Surface Circulation Structures: Eddies



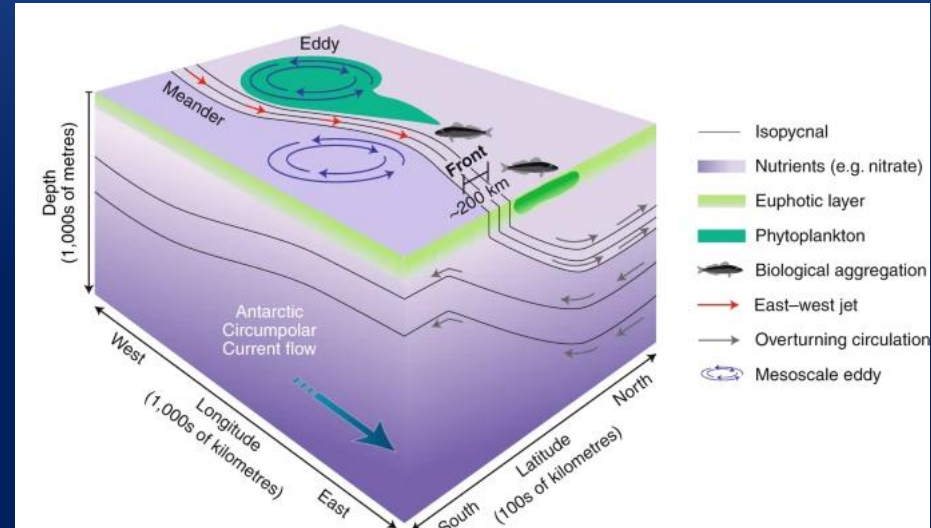
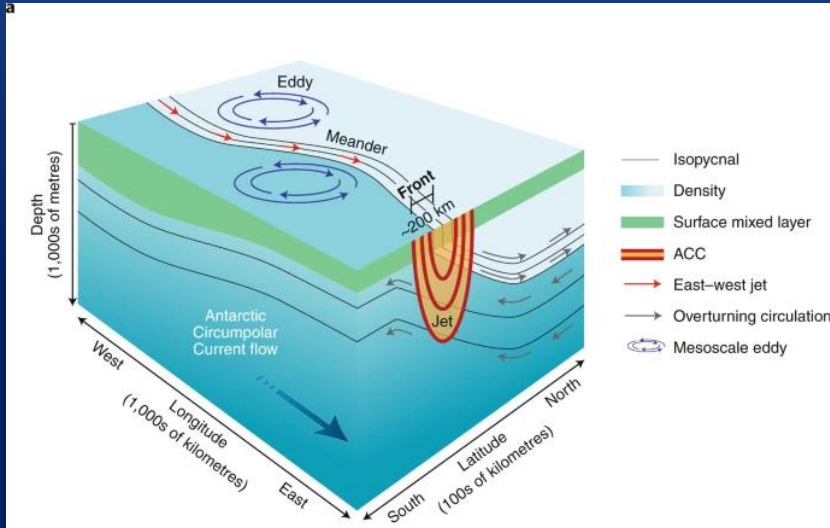
- ✓ Gli Eddy più “famosi” sono quelli che si staccano dai meandri delle correnti molto intense (Corrente del Golfo, Corrente di Kuroshio e l’Antarctic Circumpolar Current);
- ✓ Si formano per strozzamento dai meandri che caratterizzano le correnti molto intense ed instabili;
- ✓ Queste correnti si muovono generalmente lungo dei fronti termoalini (variazioni laterali di densità) che si formano all’interfaccia tra due masse d’acqua diverse e sono intrinsecamente instabili e con la tendenza a sviluppare meandri;



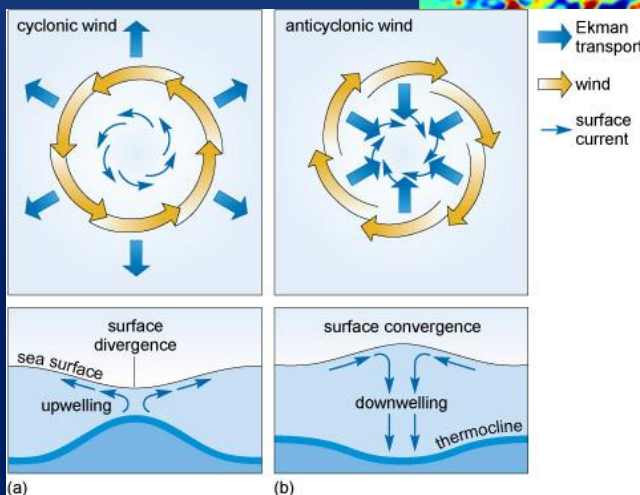
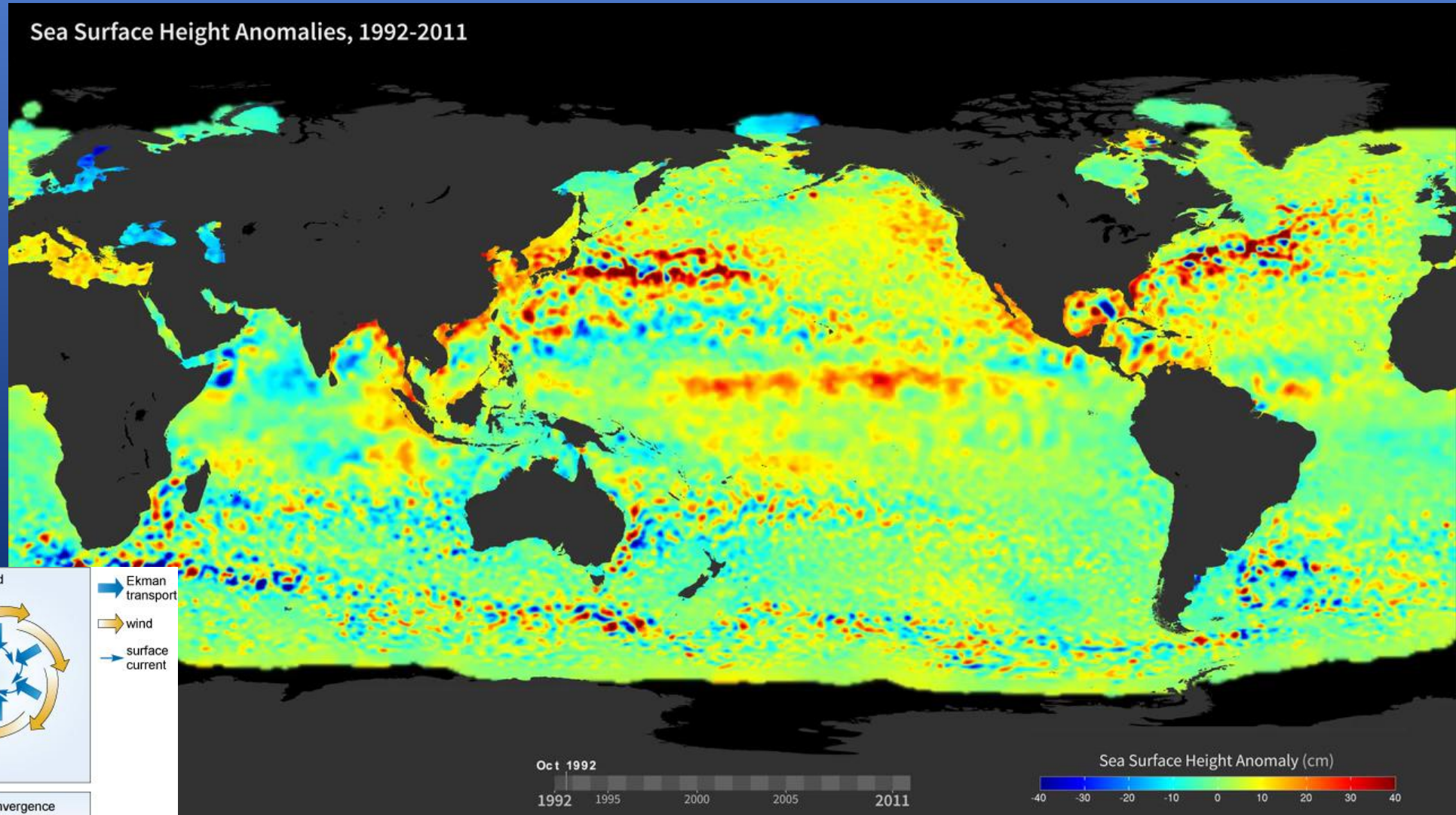
Surface Circulation Structures: ACC Eddies



- L'Antarctic Circumpolar Current (**ACC**) circola intorno all'Antartide;
- Dato che non ci sono terre emerse a bloccarne il percorso, la deriva del vento occidentale spinge l'acqua senza ostacoli verso est intorno all'Antartide in senso orario. Di conseguenza, si forma una gigantesca **corrente ad anello (ring current)** che collega gli oceani Pacifico, Atlantico e Indiano a sud;
- Gli Eddy che si formano lungo i fronti di T della ACC svolgono un ruolo fondamentale nel determinare il trasporto di calore, sale e nutrienti nell'oceano da e verso l'Antartide;
- L'ACC è il punto di distribuzione centrale della circolazione oceanica globale, nota anche come "nastro trasportatore oceanico". I grandi cambiamenti nell'ACC hanno quindi conseguenze globali.



Surface Circulation Structures: Eddies

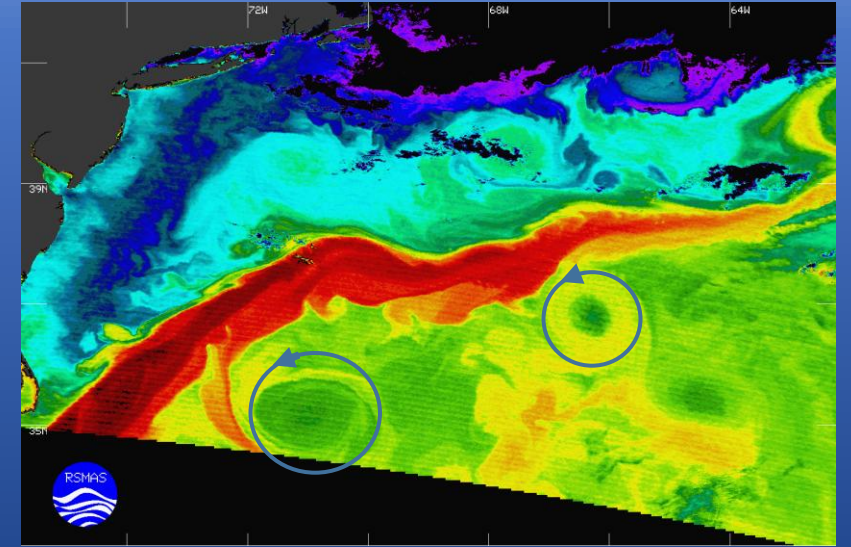


from Sea Surface Height (SSH)

Surface Circulation Structures: Eddies

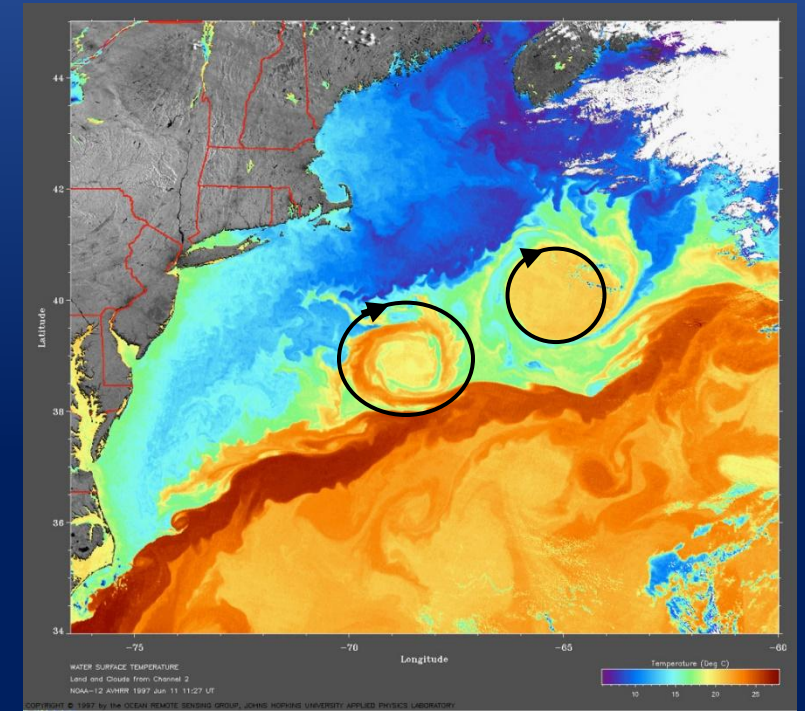
Cyclonic eddies:

- ✓ counter-clockwise (clockwise) in the Northern Hemisphere (Southern Hemisphere);
- ✓ Temperature smaller than the surrounding waters (Cold core eddies)
- ✓ Sea Level lower than the surrounding waters;
- ✓ Very nutrient, rich and productive.

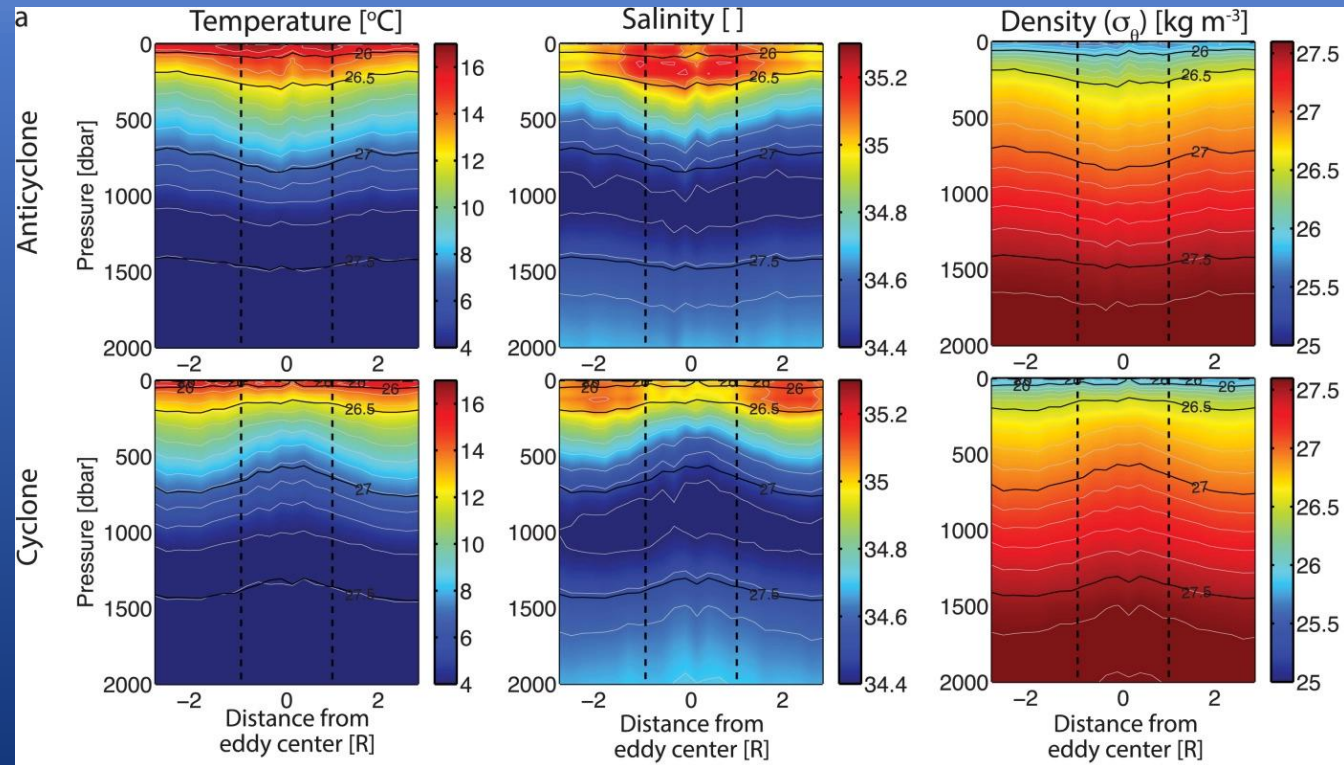


Anticyclonic eddies:

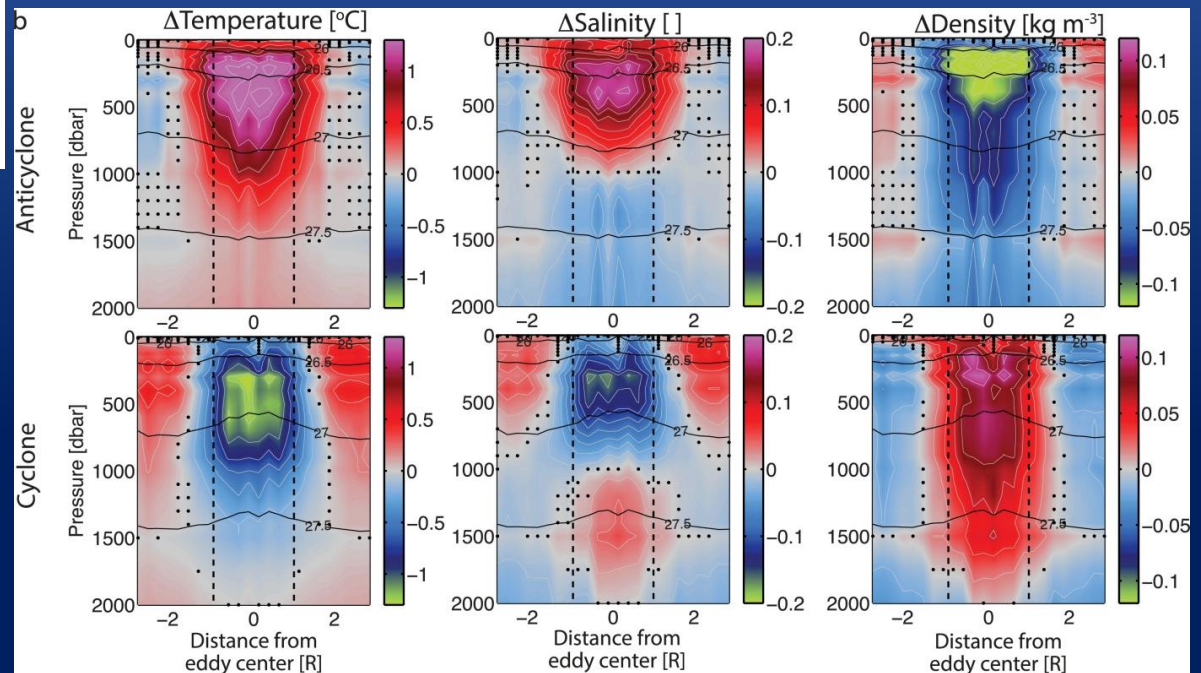
- ✓ clockwise (counter-clockwise) in the Northern Hemisphere (Southern Hemisphere);
- ✓ Temperature larger than the surrounding waters (Warm core eddies)
- ✓ Sea Level higher than the surrounding waters;
- ✓ Less productive.



Struttura vertical degli Eddy

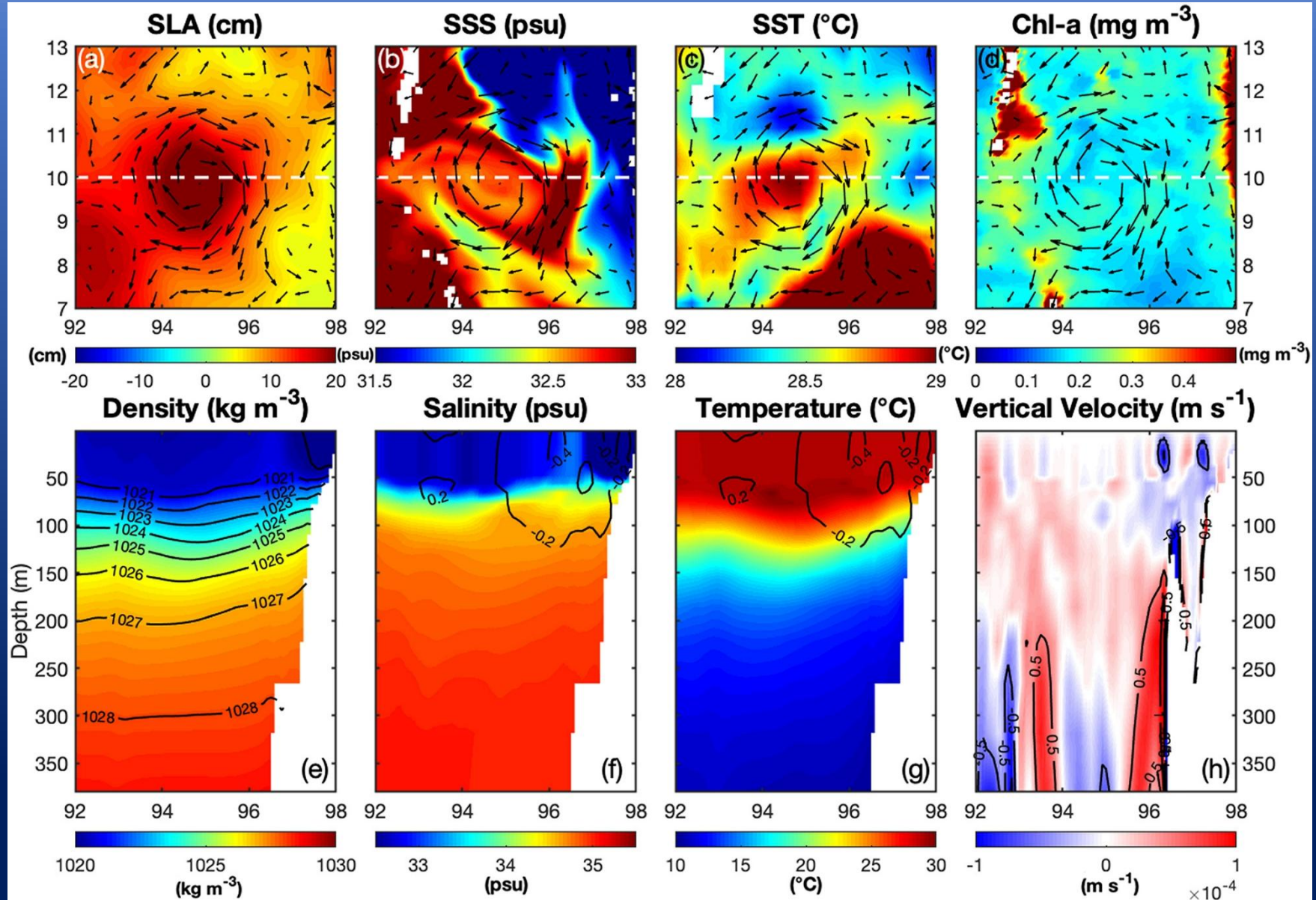


- ✓ Le isoterme, le isoaline e le isopiche mostrano una flessione verso il basso all'interno di un anticiclone (downwelling) e verso l'alto all'interno di un ciclone (upwelling);

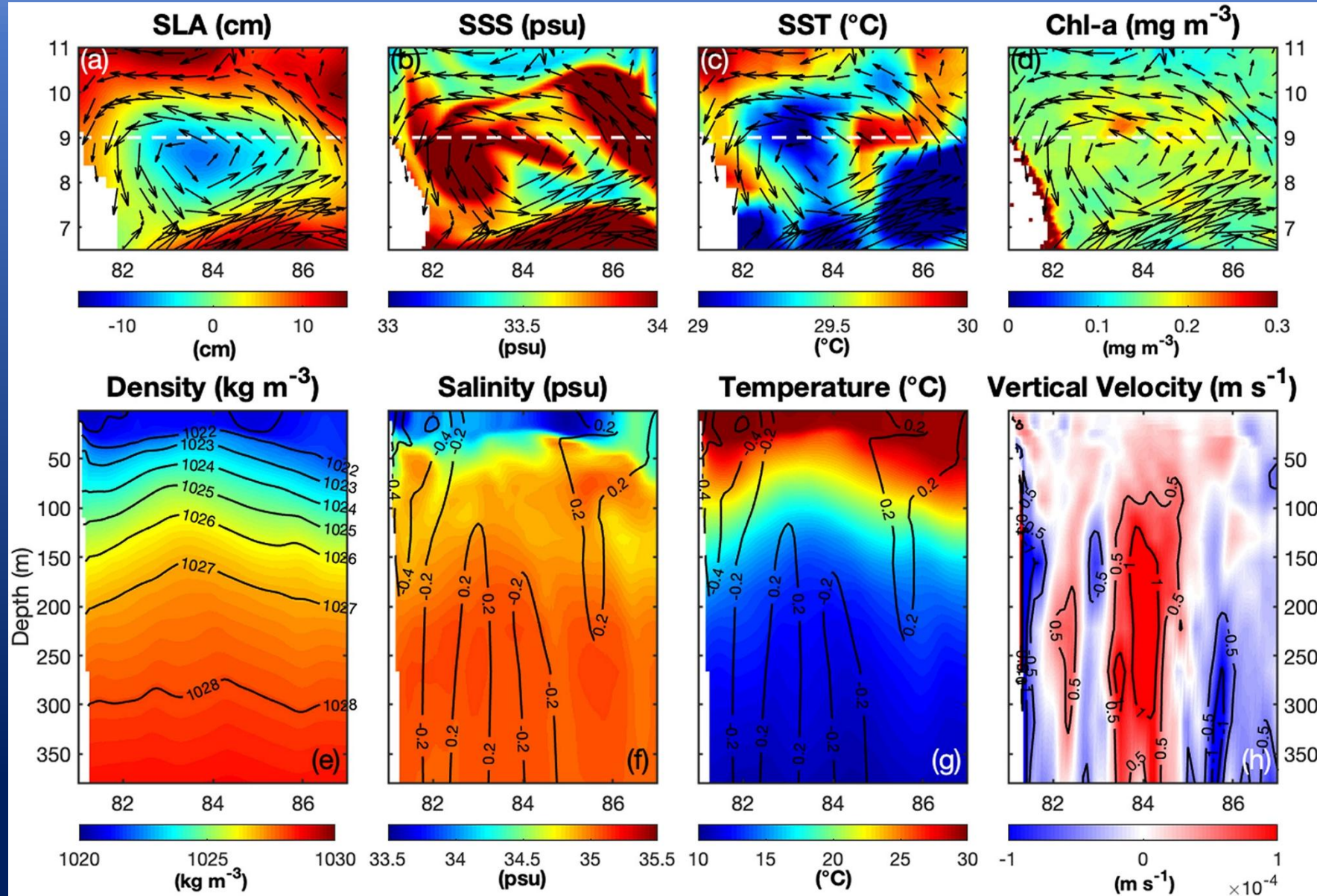


- ✓ All'interno di un anticiclone la T è maggiore e la ρ è minore delle acque circostanti;
- ✓ All'interno di un ciclone la T è minore e la ρ è maggiore delle acque circostanti;

Caratteristiche di un Eddy anticilonico



Caratteristiche di un Eddy ciclone



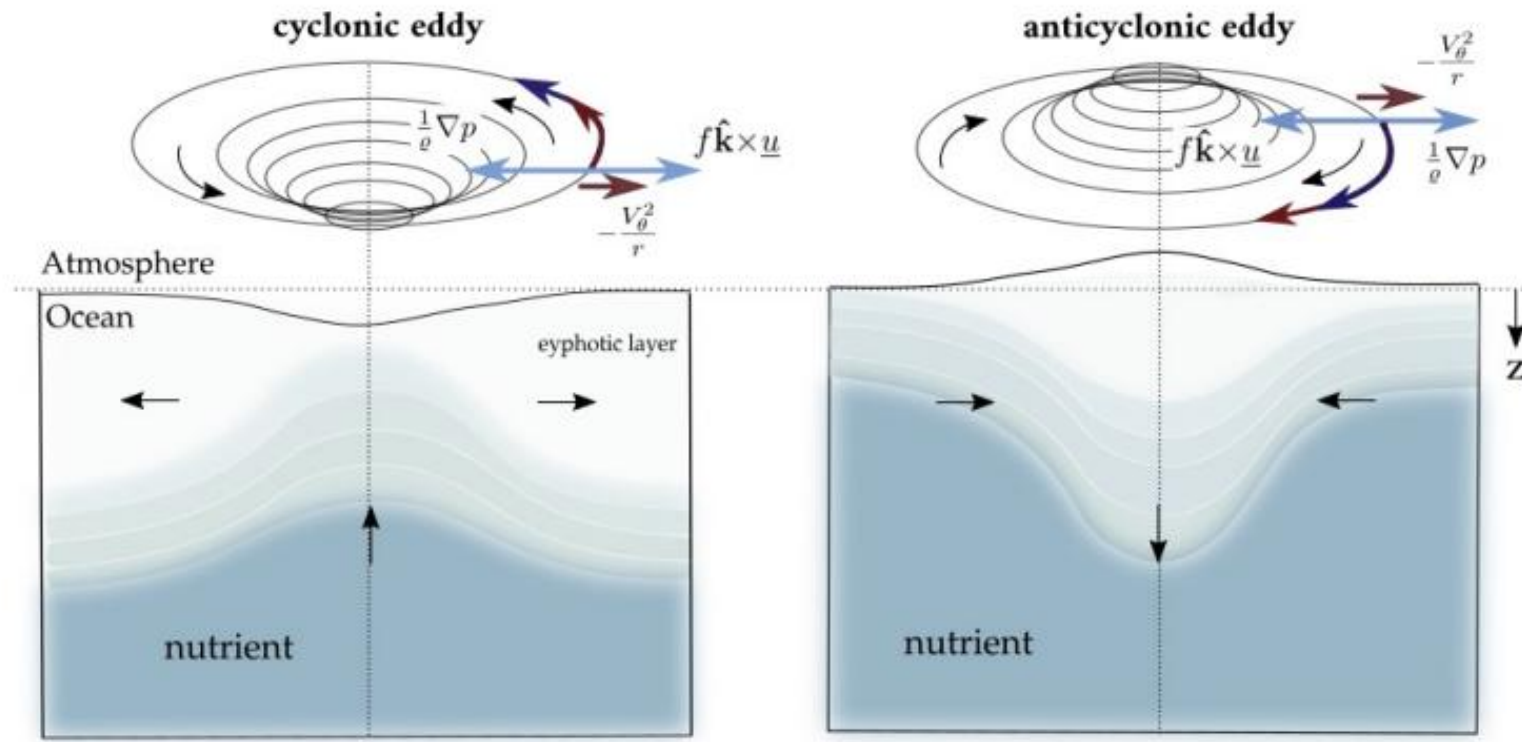


Figure 2.2: **Schematic representation of the 3D structure of Cyclonic and Anticyclonic eddies.** The surface trough and ridge owing to the (cyclo)geostrophic balance are schematically exaggerated. The corresponding shallowing and deepening of the mixed layer as well as the up/downwelling effects transferring nutrients from the deep to the euphotic layers are represented. Figure source: Ioannou, 2019

Energia cinetica

Una metrica comunemente utilizzata per misurare l'intensità dei vortici a mesoscala (eddy; 100 m - 100 km) è l'energia cinetica dei vortici (EKE).

- l'energia cinetica è l'energia posseduta da un corpo come conseguenza del suo stesso moto.

$$KE = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$(\text{Joule}; \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2})$$

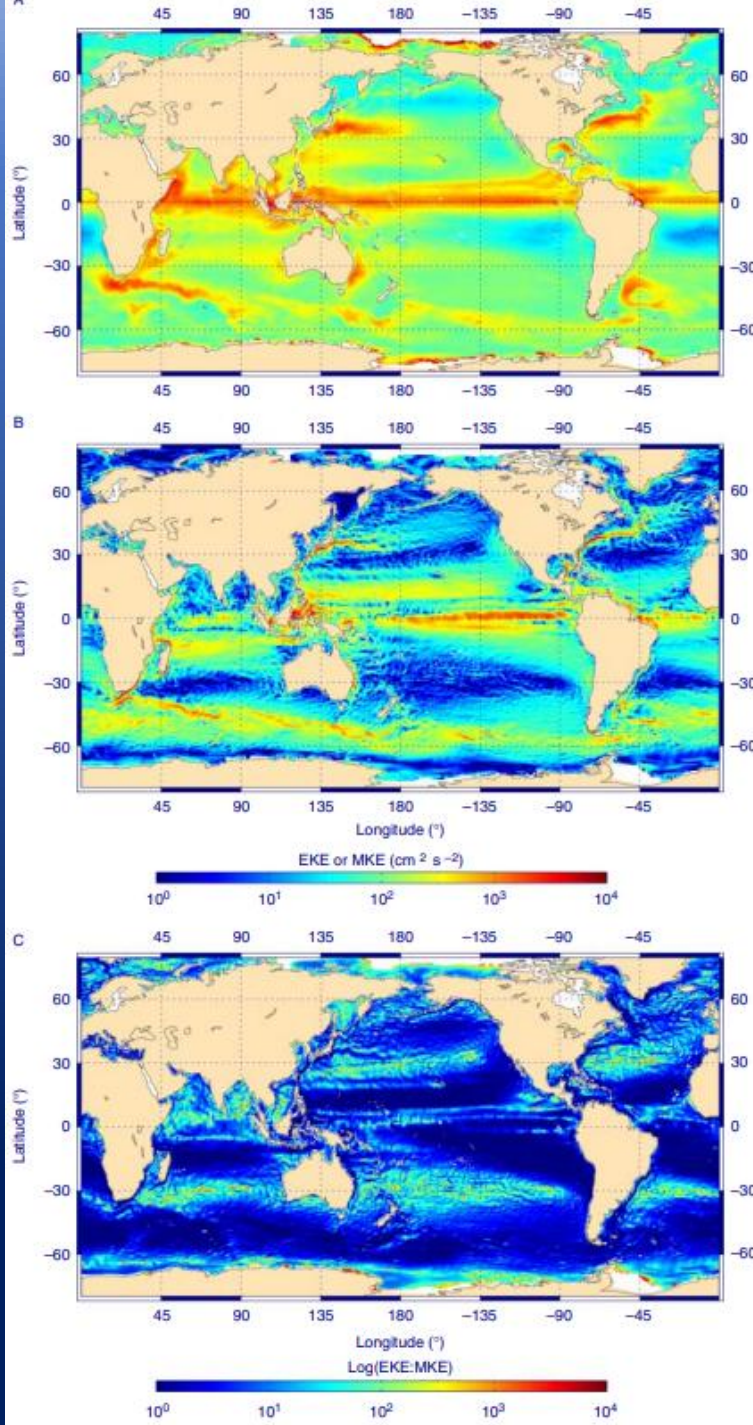
L'energia cinetica totale (TKE) di un campo di correnti è data dalla somma della:

- Mean Kinetic Energy – MKE, componente media dovuta alle correnti permanenti;
- Eddy Kinetic Energy – EKE, componente turbolenta dovuta alla presenza degli eddy;

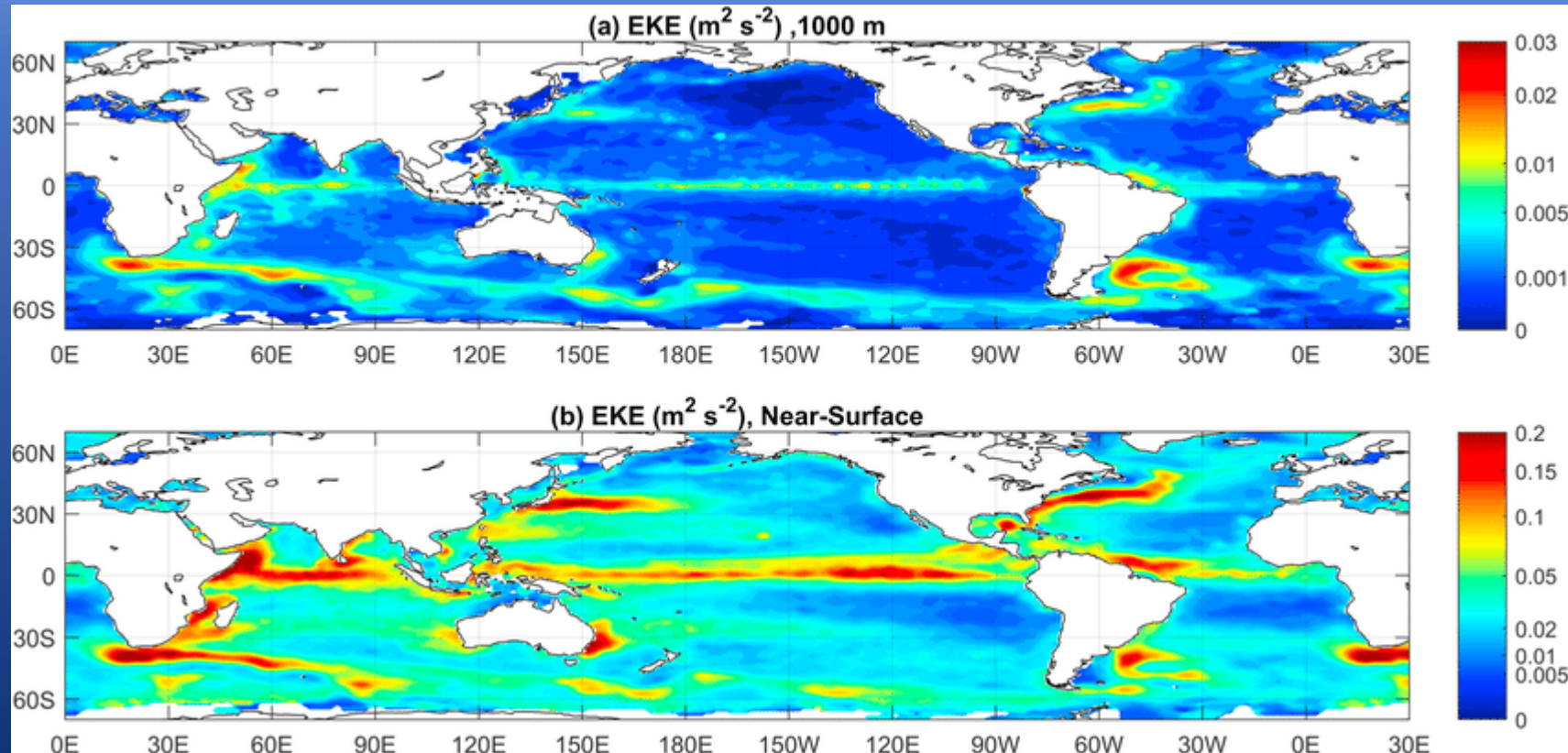
A) Time-mean average of the EKE, in $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$; B) MKE, in $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$; C) EKE:MKE ratio. All the fields are plotted with the same logarithmic scale.

$$TKE = MKE + EKE$$

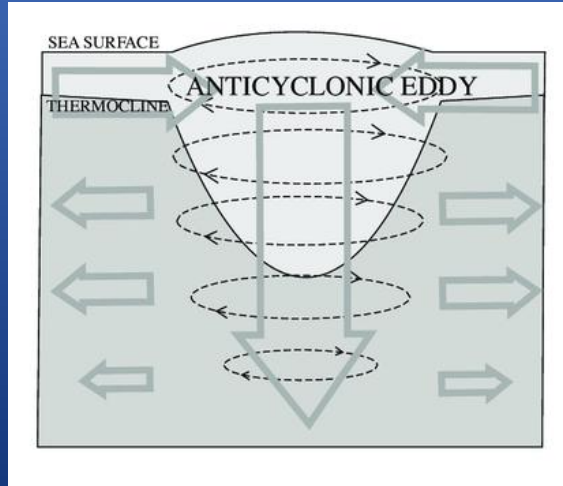
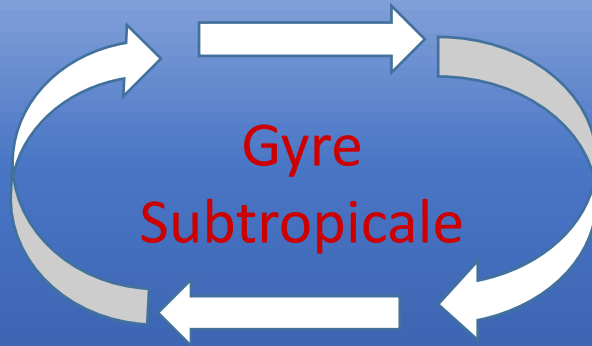
$$MKE = \frac{1}{2} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2) \quad EKE = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2)$$



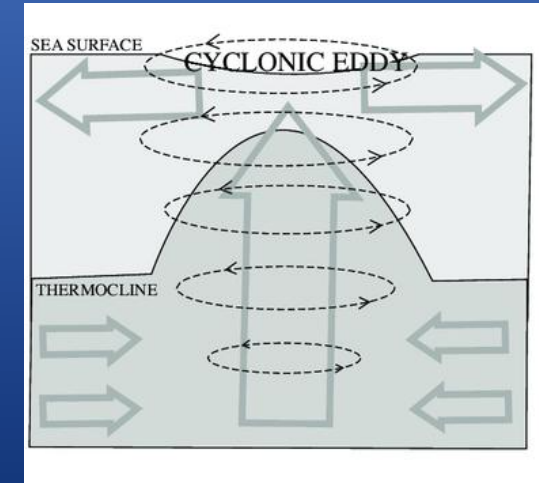
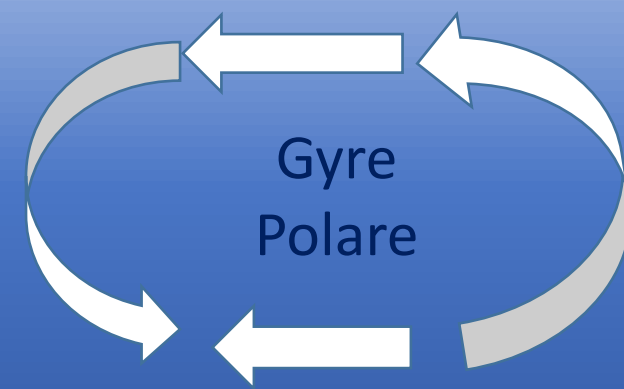
Energia cinetica turbolenta -EKE



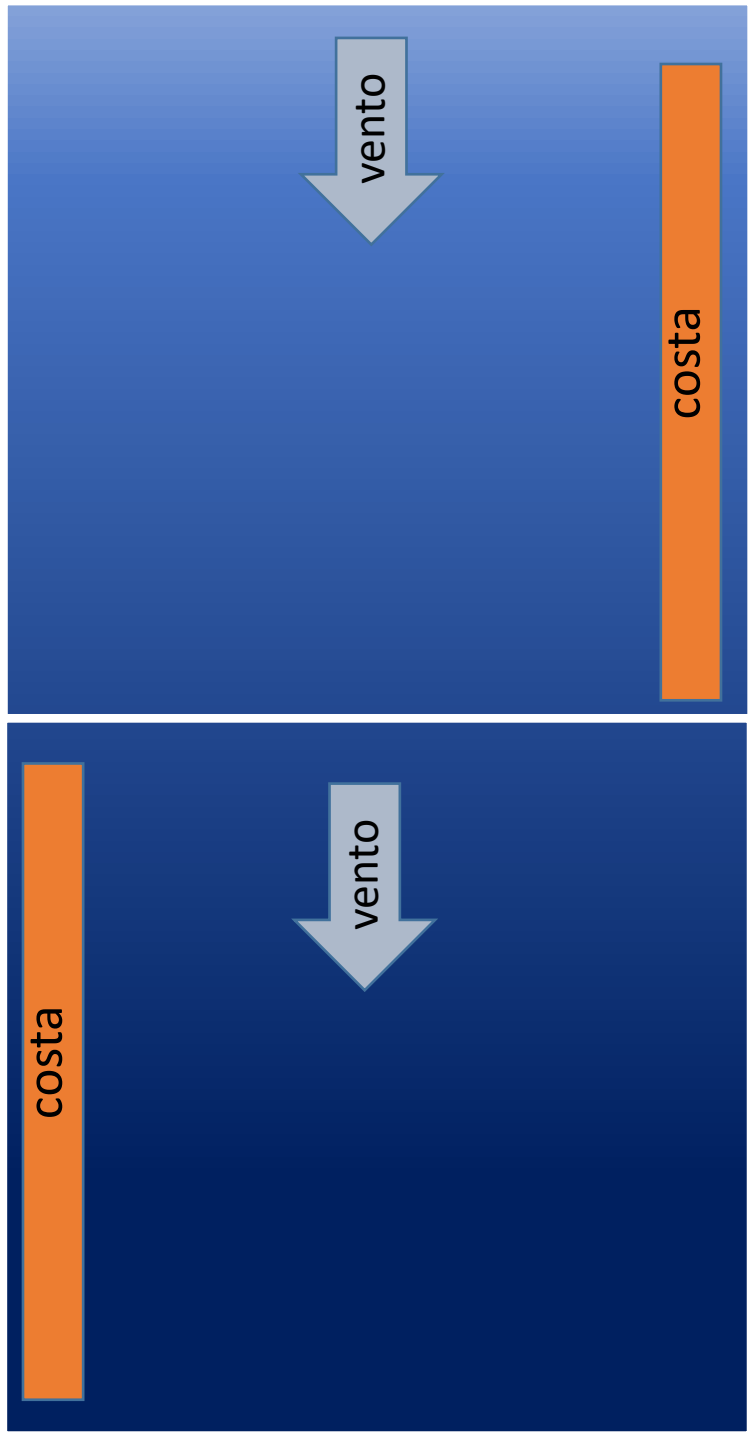
- I valori di EKE sono molto più alti in superficie
- I valori più alti riscontrati tipicamente lungo la fascia equatoriale e l'estensione delle maggiori western boundary currents
- Un'altra zona ad alta variabilità è associata ai pattern dell'ACC e dell' Agulhas Current System
- I valori più bassi di EKE si osservano nella regione subtropicale in ogni bacino.



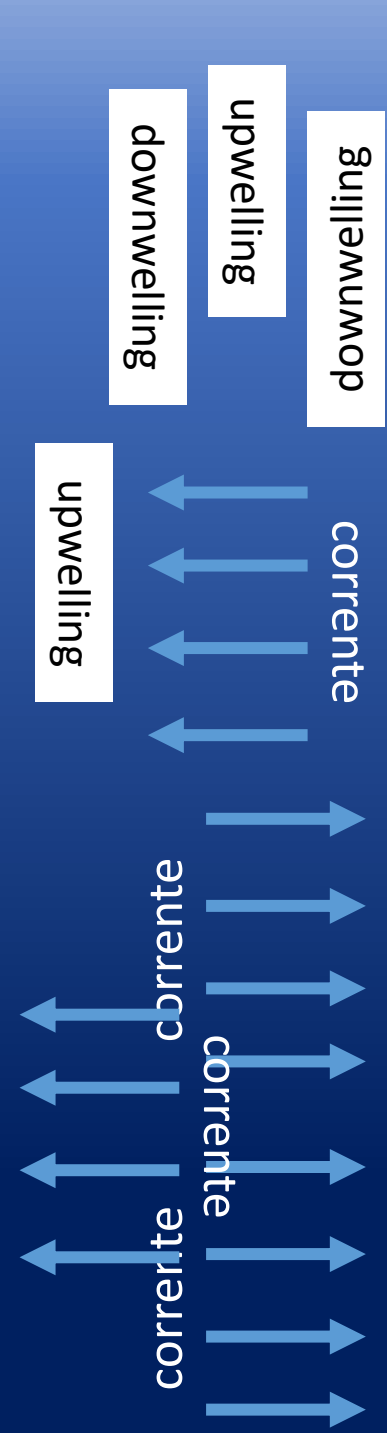
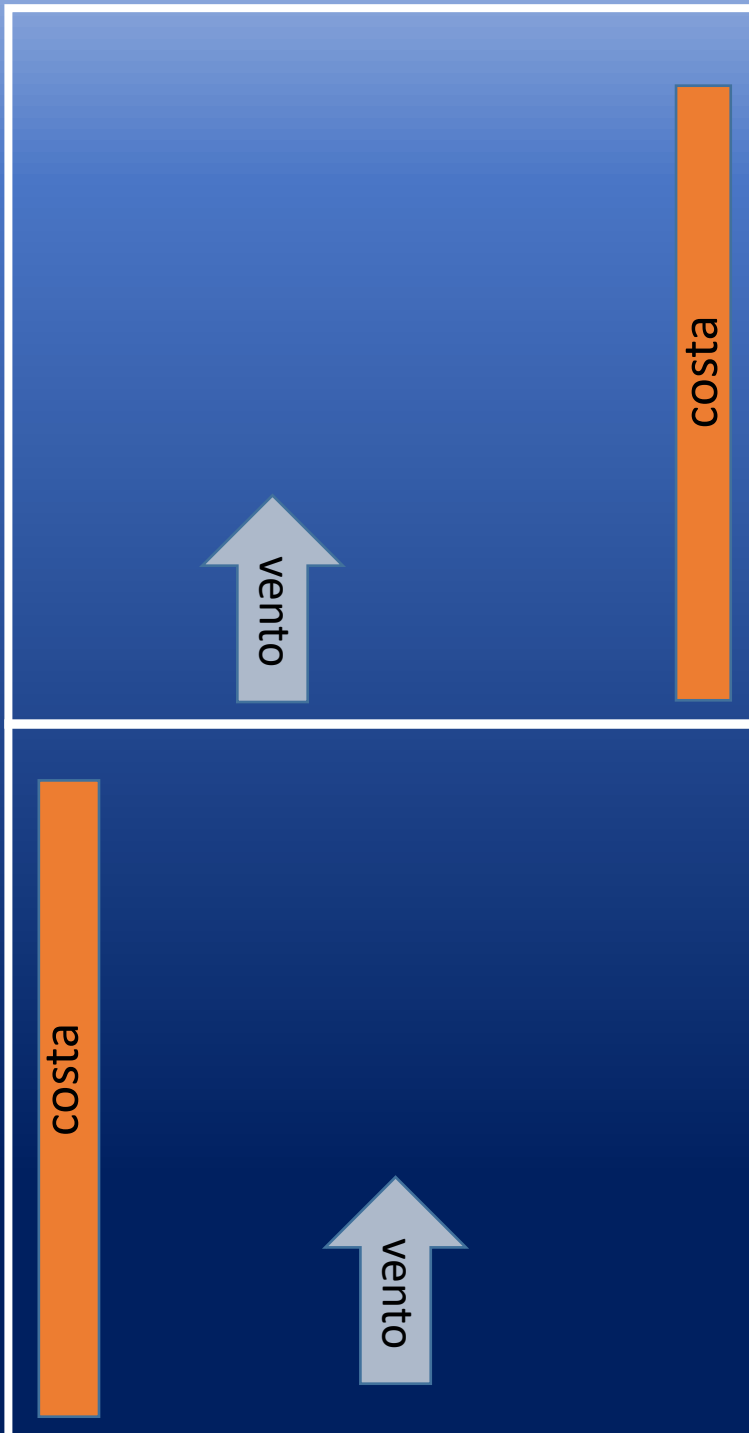
T **aumenta**
 Termoclino e MLD **si approfondiscono**
 Sea Level **aumenta**
 Vorticità **negativa**
 Ekman Transport **verso il centro**
 Produttività (Chl-a) **bassa**



T **diminuisce**
 Termoclino e MLD **più superficiali**
 Sea Level **diminuisce**
 Vorticità **positiva**
 Ekman Transport **verso l'esterno**
 Produttività (Chl-a) **alta**



Emisfero Nord



Emisfero Sud



costa



costa



costa



costa

corrente

corrente

corrente

corrente

downwelling

downwelling

upwelling

upwelling



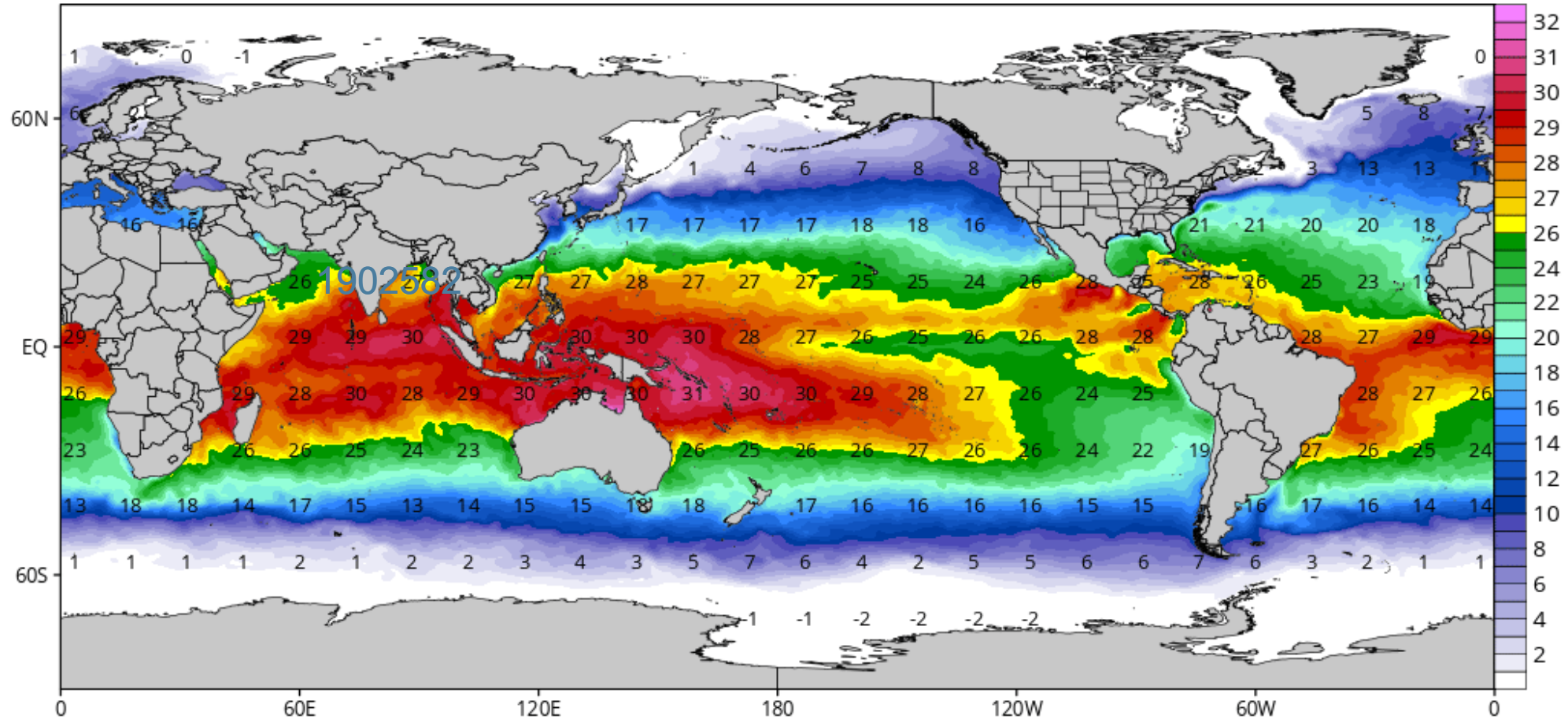
Perché l'oceano è importante?

Svolge un'azione regolatrice sul clima

CDAS Sea Surface Temperature (°C)

Analysis Time: 00z Mar 07 2022

TROPICALTIDBITS.COM

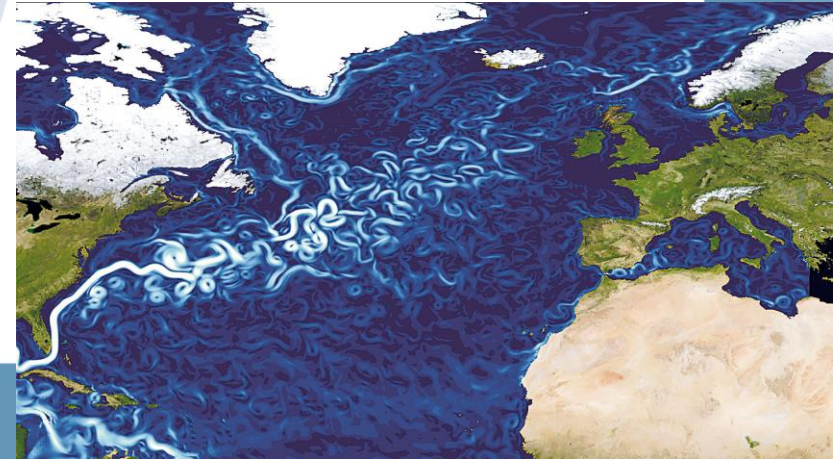
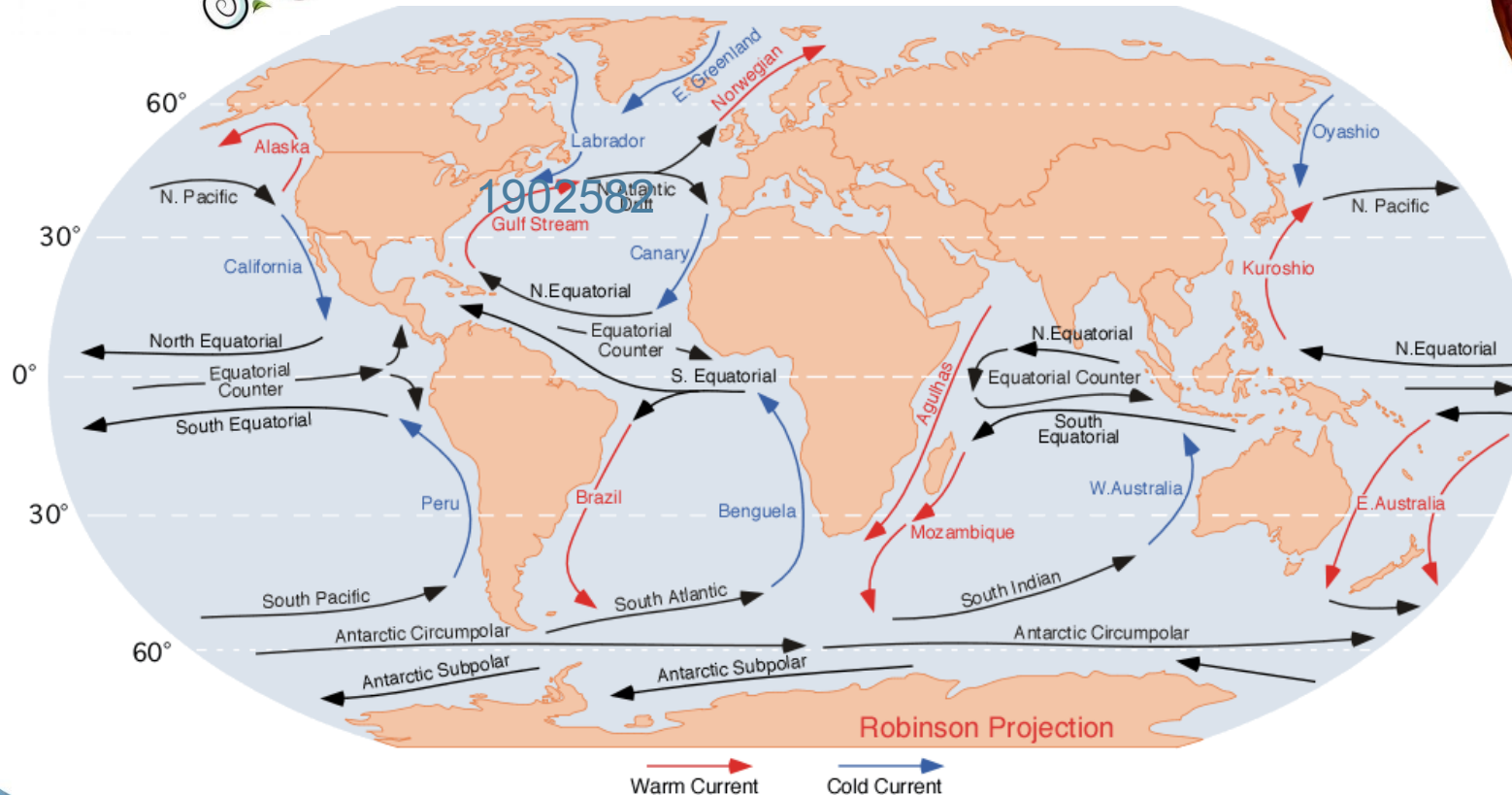
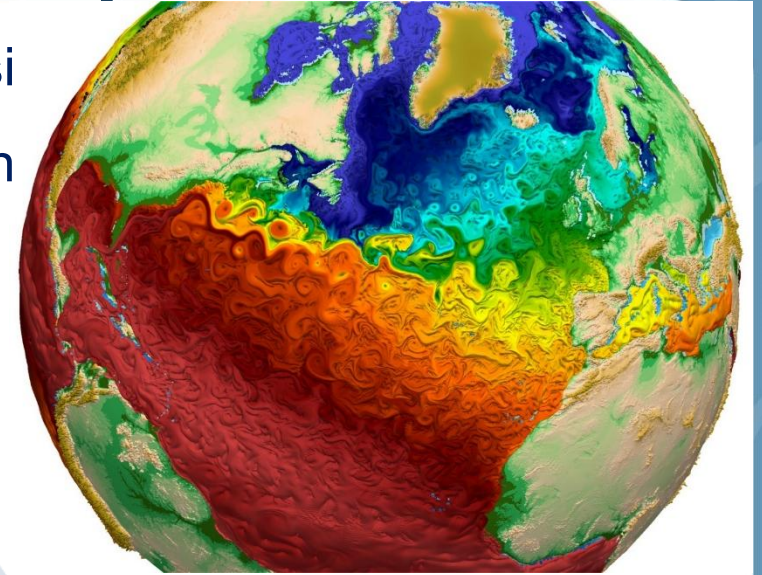


La Figura mostra una mappa giornaliera della temperatura superficiale del mare (SST – Sea Surface Temperature)



Sistema di correnti superficiali

Le correnti oceaniche sono masse d'acqua che si muovono orizzontalmente, in una direzione ben definita, da una parte all'altra del globo.





Circolazione Termoalina

Nastro Trasportatore Oceanico

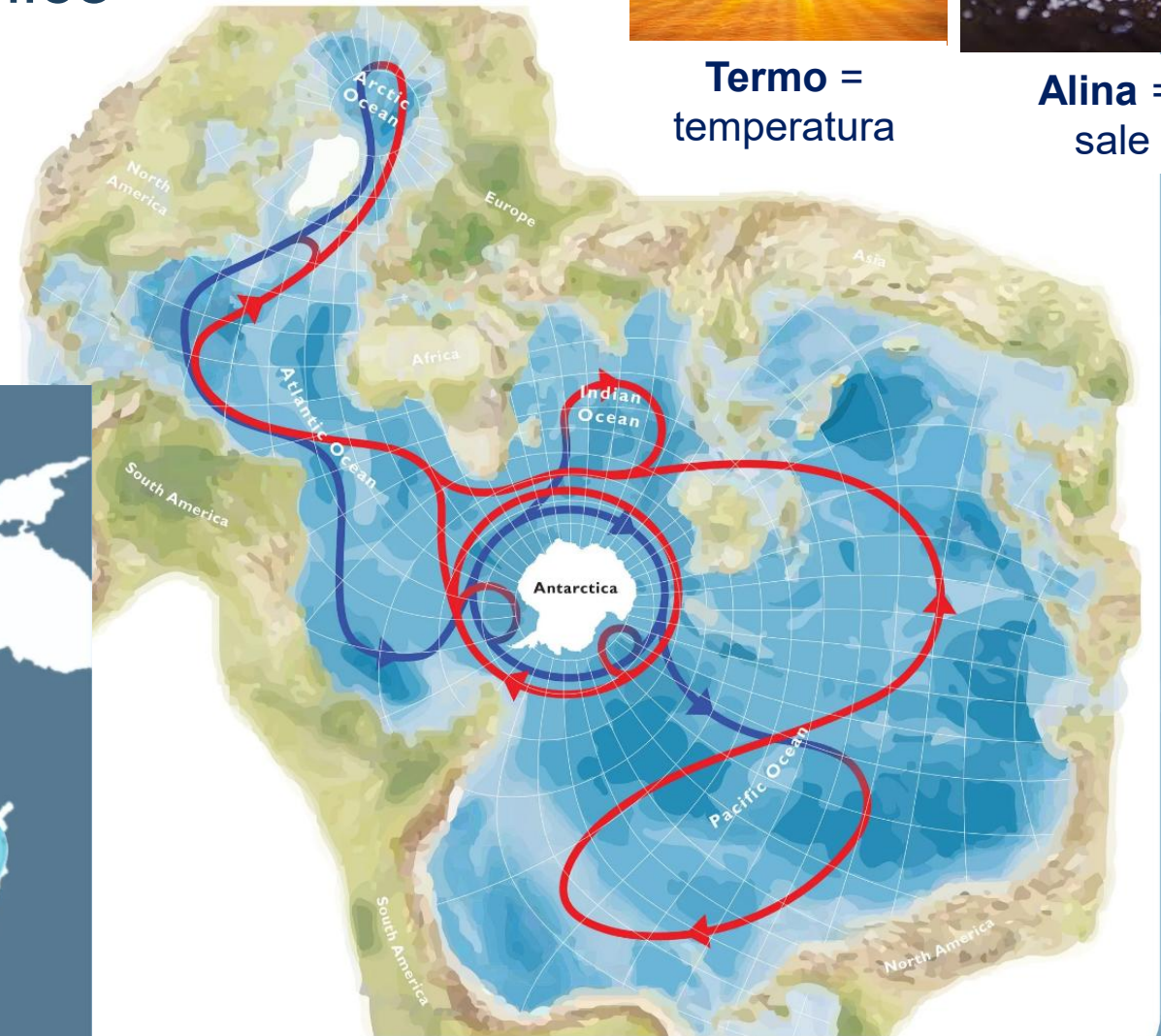
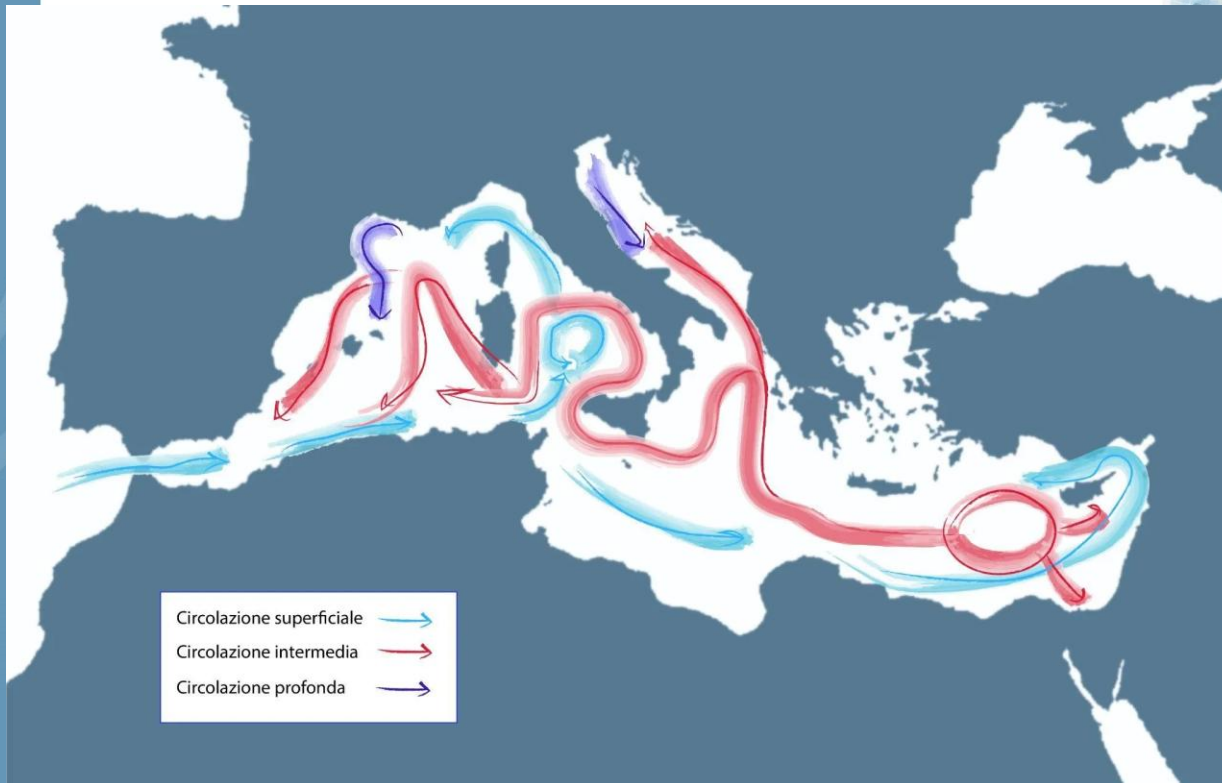
-  Corrente calda superficiale
-  Corrente fredda profonda



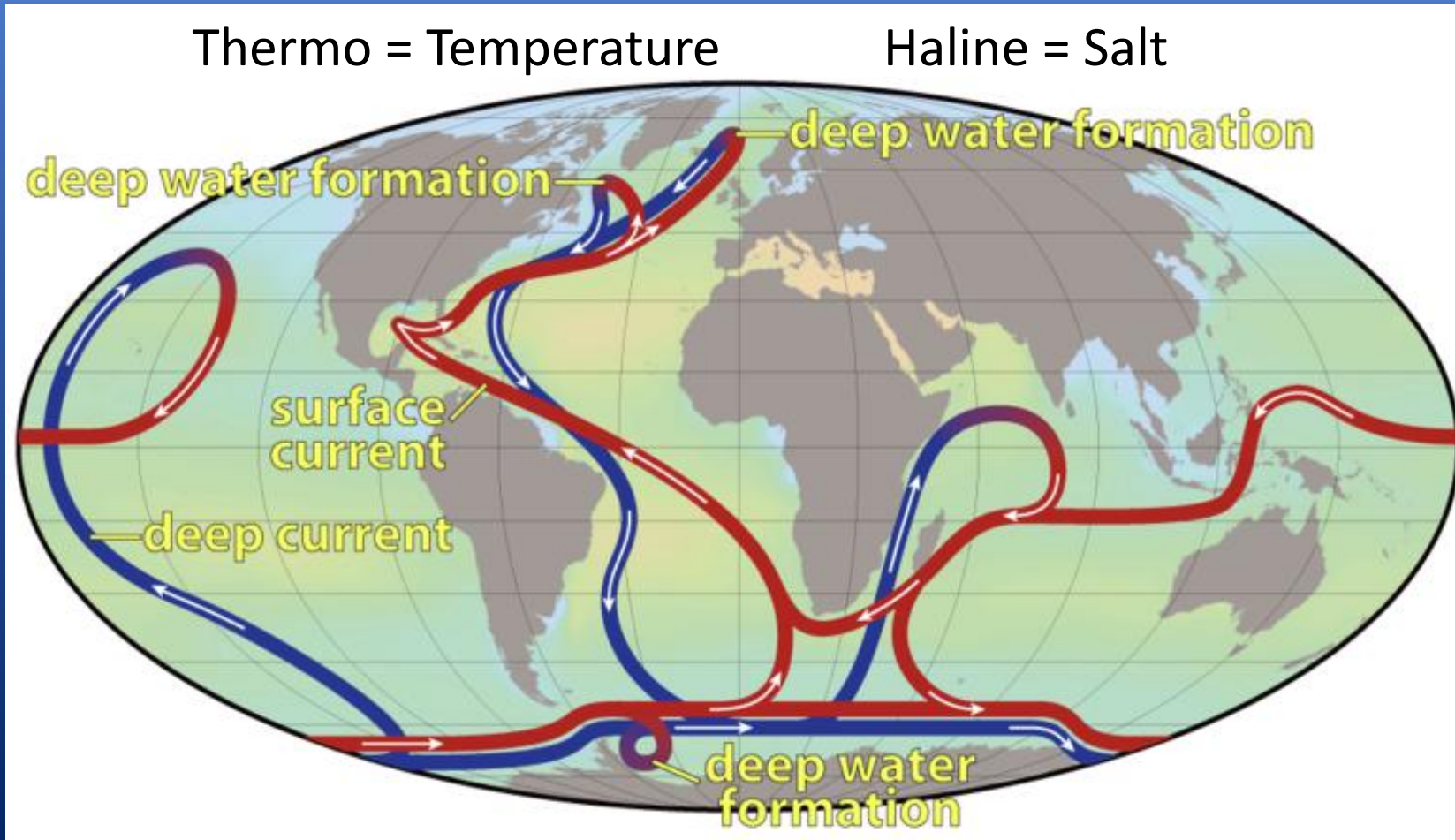
Termo =
temperatura



Alina =
sale



Circolazione termoalina (THC)



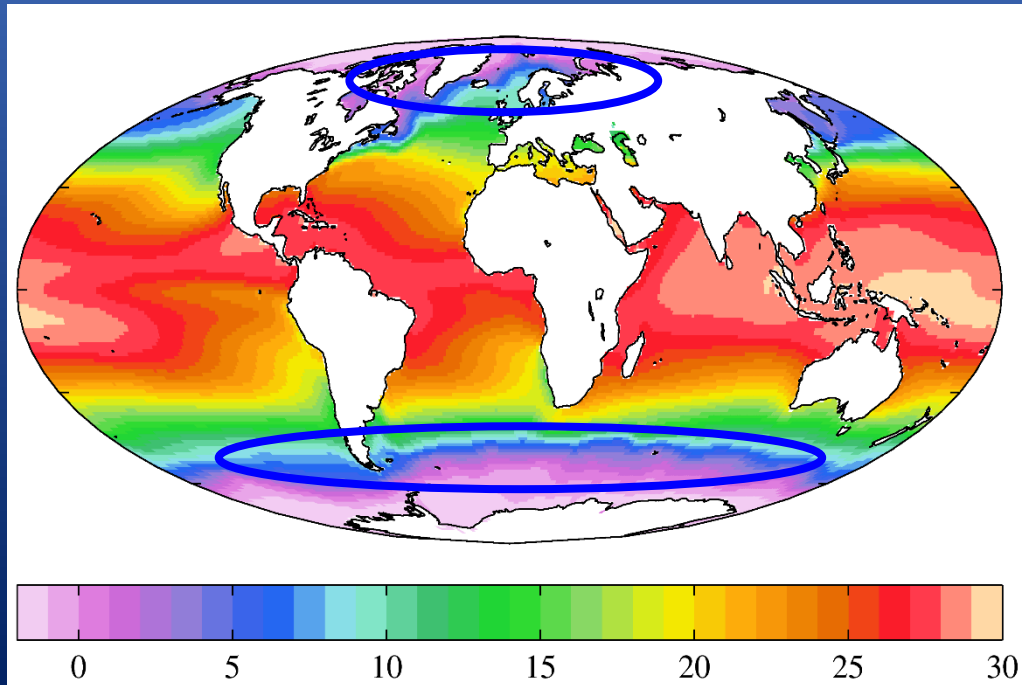
- ✓ Si definisce **circolazione termoalina** la circolazione guidata da gradienti di densità;
- ✓ In alcune aree dell'oceano globale le acque superficiali incrementano la loro densità e sprofondano;
- ✓ L'acqua densa appena formata si allontana dal suo sito di formazione e guida la circolazione termoalina;
- ✓ La circolazione termoalina trasporta calore ed influenza il clima;
- ✓ Quando queste acque si riscaldano e/o i loro livelli di salinità diminuiscono, diventano meno dense e risalgono.

Ocean Conveyor Belt – Global Overturning Circulation
MOC – Meridional Overturning Circulation

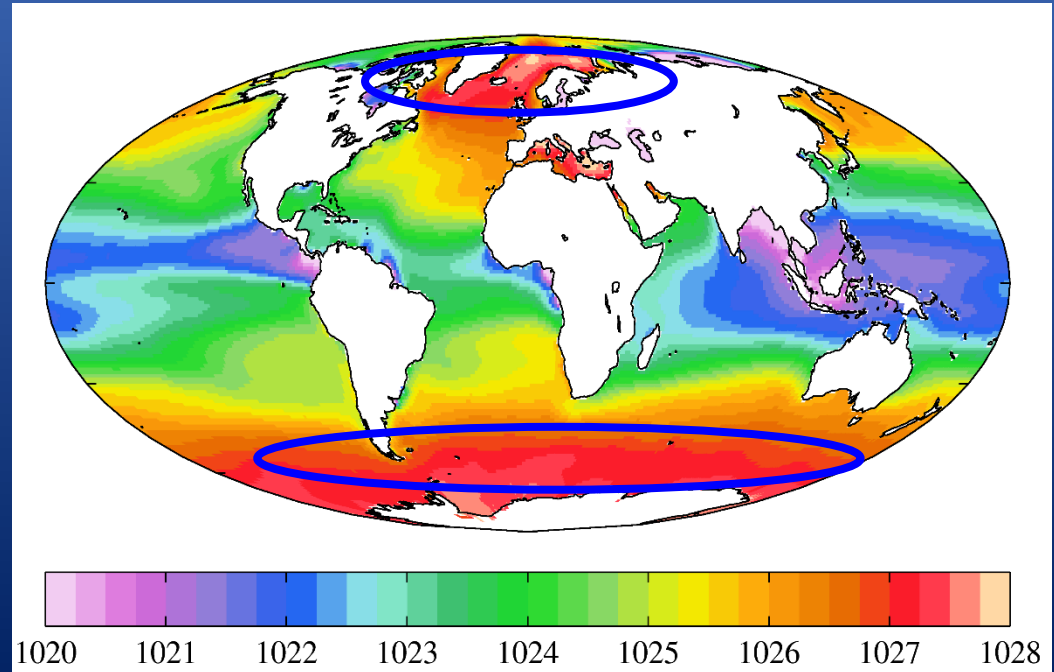
Circolazione termohalina (THC)

Driven by density gradients

Temperature (°C)



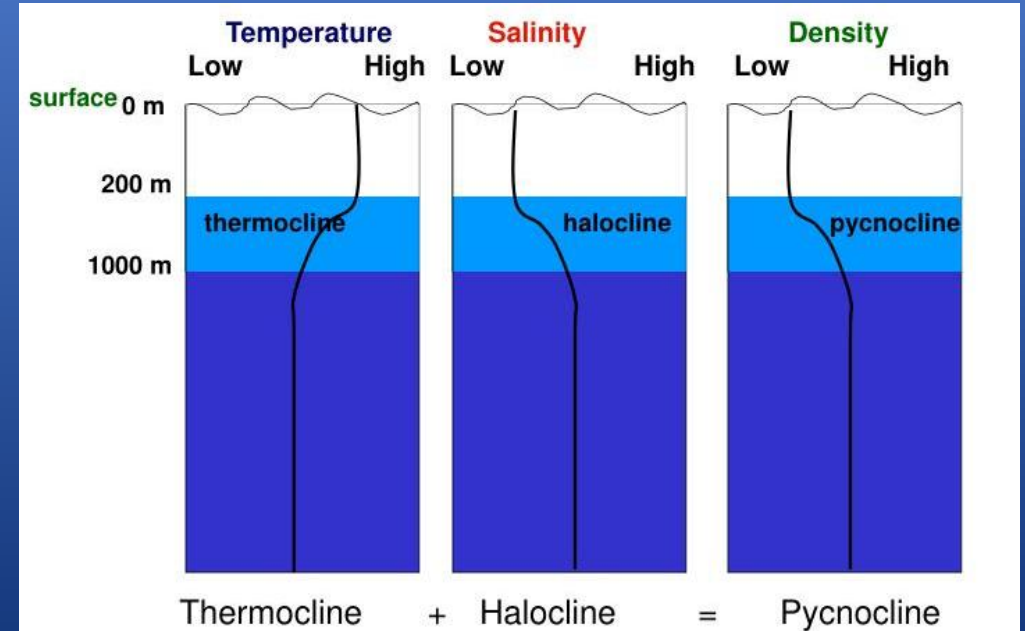
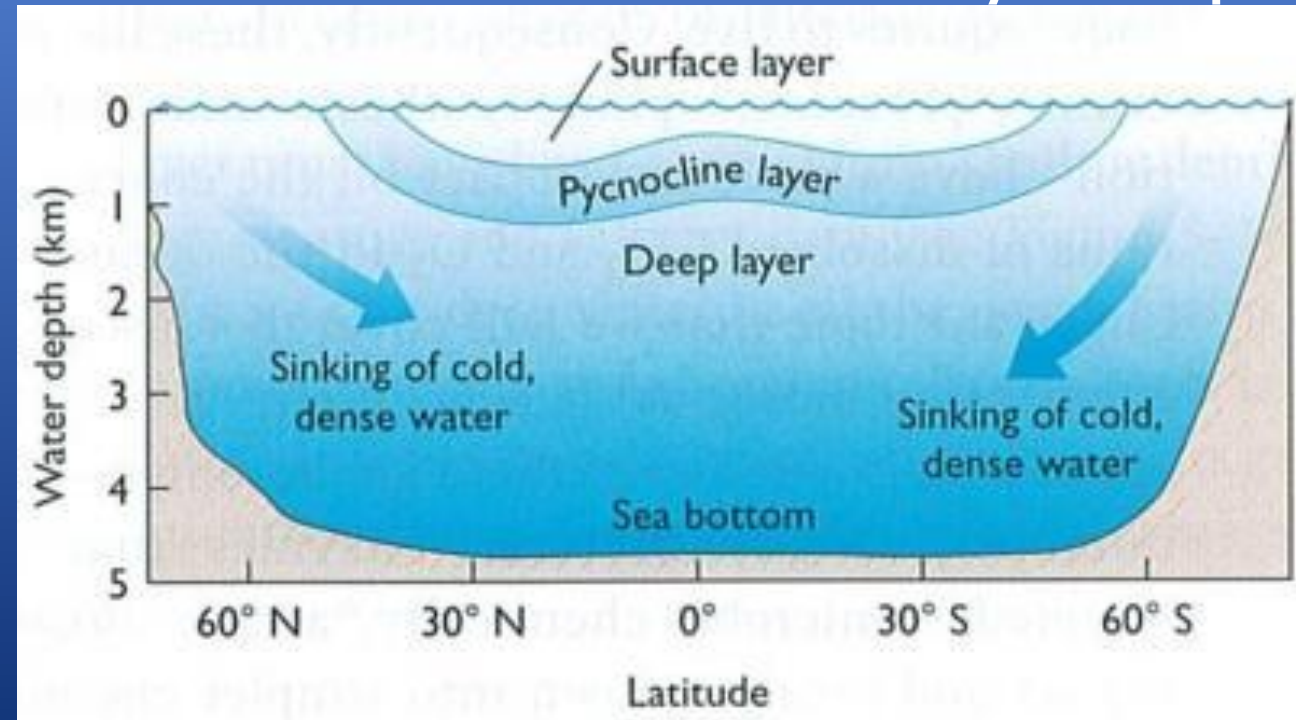
Sea-Surface Density (kg/m^3)



Cold Temperature = High Density

Density structure of the ocean

Controlled by Temperature and Salinity



- ✓ Density increases with increasing salinity;
- ✓ Density increases with decreasing temperature;
- ✓ Density of oceans ranges from 1020 kg/m^3 to 1030 kg/m^3 .

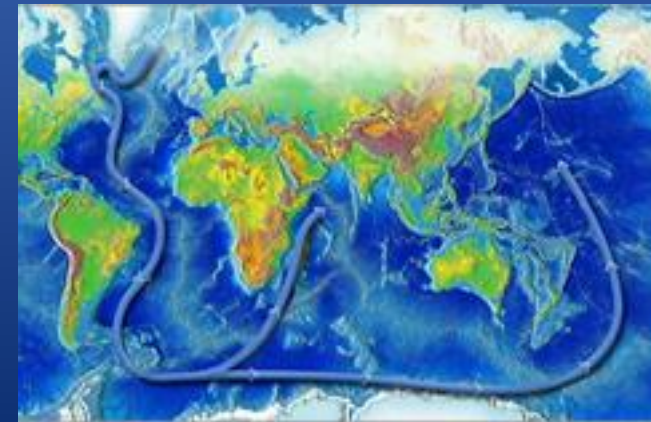
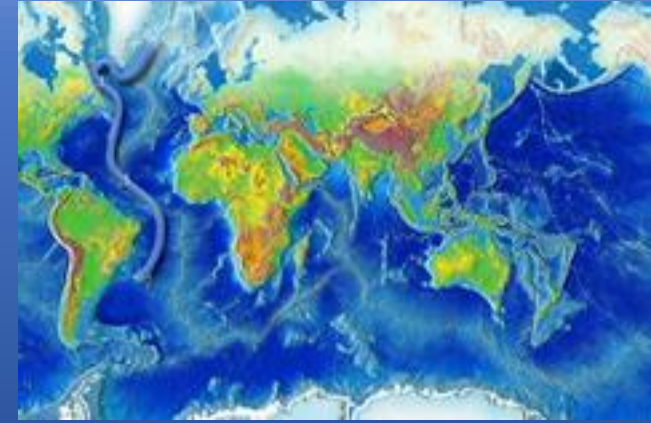


Circolazione termoalina THC - MOC

Il nastro trasportatore inizia in superficie vicino al polo nord. Qui l'acqua viene raffreddata e diventa più salata quando si forma il ghiaccio marino. L'acqua densa così formatasi affonda.

L'acqua profonda si sposta verso sud, tra i continenti, superando l'equatore e scendendo fino alle estremità dell'Africa e del Sud America. La corrente viaggia intorno al continente Antartico, dove si raffredda e subisce altri fenomeni di formazione di acqua densa. In questo modo, il nastro trasportatore si "ricarica". Mentre si muove intorno all'Antartide, due sezioni si separano dal nastro trasportatore e si dirigono verso nord. Una sezione si sposta nell'Oceano Indiano, l'altra nell'Oceano Pacifico.

Queste due sezioni che si separano si riscaldano e diventano meno dense mentre viaggiano a nord verso l'equatore, e le acque possano risalire in superficie (**upwelling diffuso**). Quindi continuano il loro viaggio in superficie, per poi tornare nell'Atlantico settentrionale, dove il ciclo ricomincia.



Circolazione termoalina THC - MOC

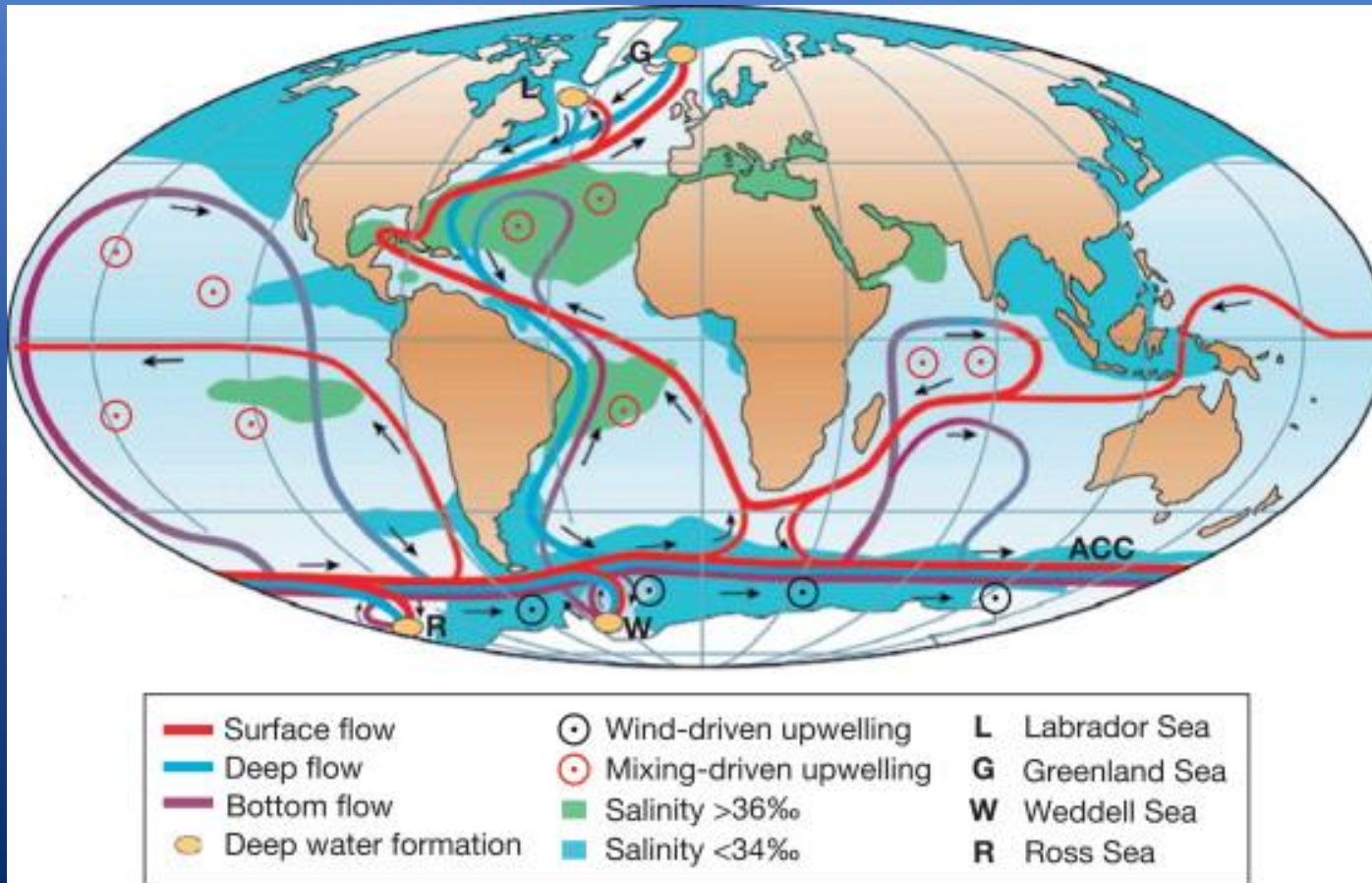


Deep water formation



Circolazione termohalina (THC)

Stefan Rahmstorf, 2002



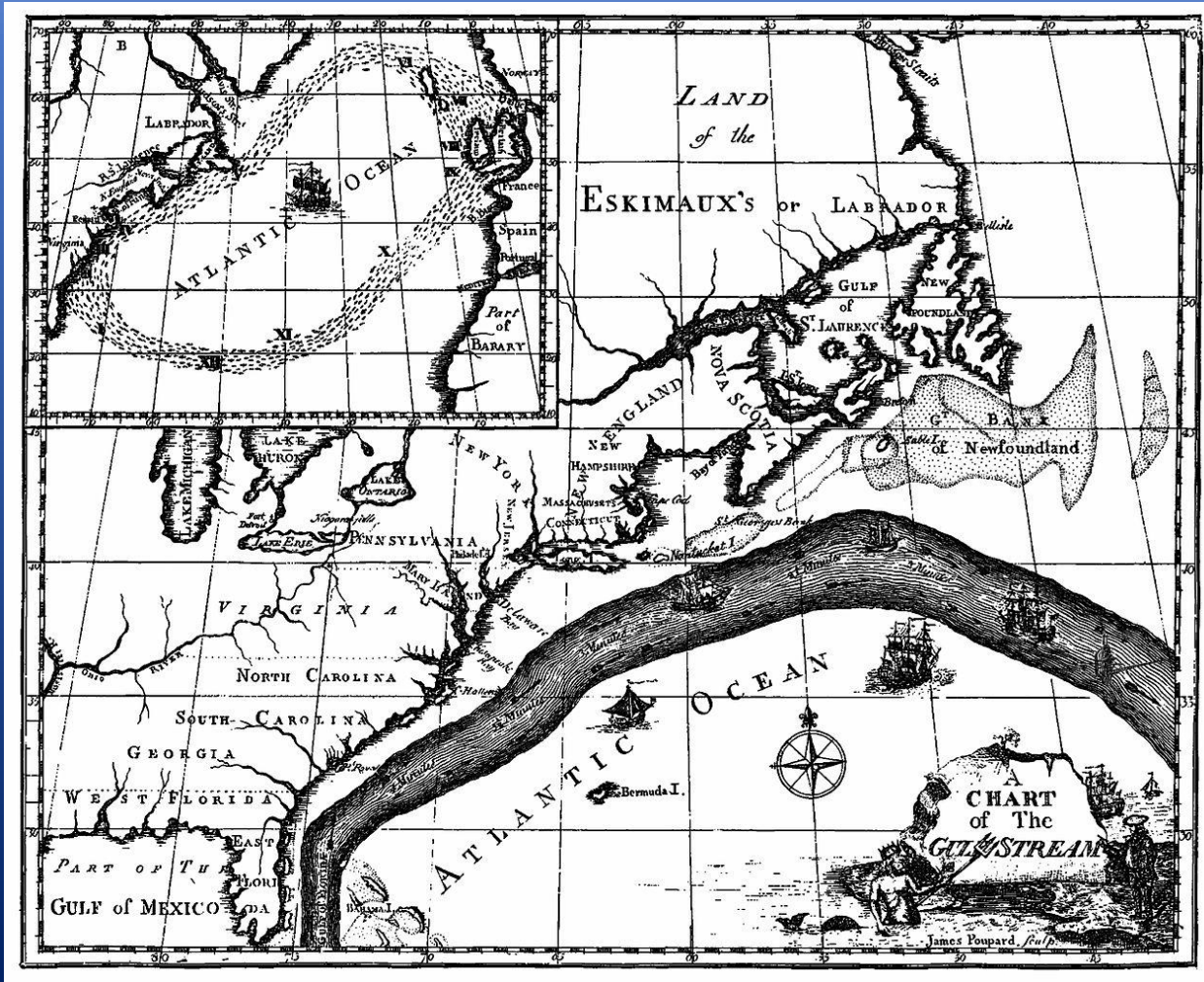
Le acque vicine alla **superficie** (linee rosse) si muovono verso le tre principali regioni di **formazione delle acque profonde** (ovali gialli) - nell'Atlantico settentrionale, nel Mare di Ross e nel Mare di Weddell - e ricircolano in profondità;

Le correnti **profonde** sono indicate in **blu**, quelle di **fondo** in **viola**;

L'ombreggiatura verde indica la salinità superiore al 36‰, quella blu la salinità inferiore al 34‰.

Il tasso di formazione delle acque profonde è di 15 ± 2 Sv nell'Atlantico settentrionale e di 21 ± 6 Sv nell'Oceano Meridionale. Il trasporto di calore verso l'Atlantico settentrionale raggiunge un picco di $1.3 \pm 0,1$ PW; questo trasporto di calore riscalda le temperature dell'aria fino a 10 °C.

La Corrente del Golfo

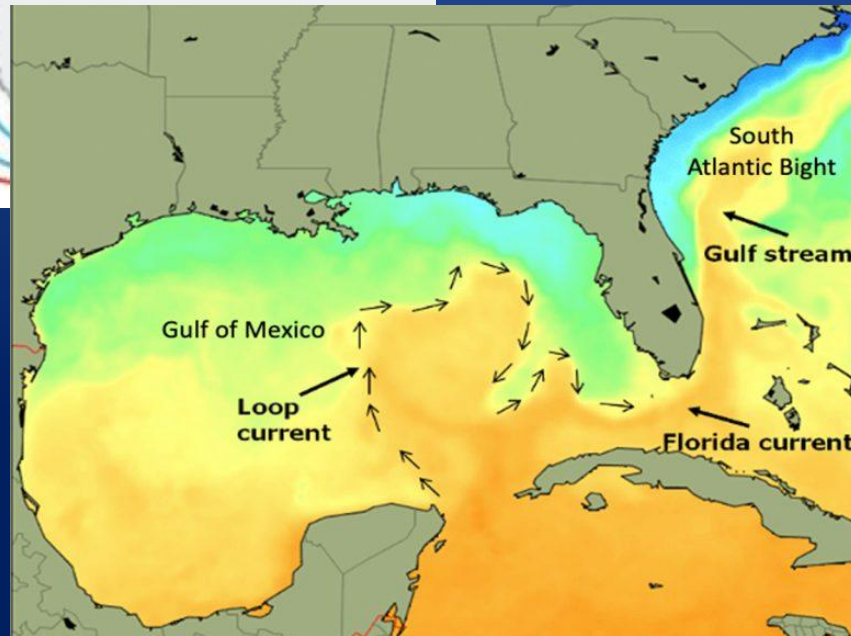


- Mappata per la prima volta da Benjamin Franklin nel XVIII secolo;
- Essendo una corrente forte e veloce, riduceva il tempo di navigazione delle navi che dagli Stati Uniti andavano in Europa, per cui i marinai usavano i termometri per individuare le sue acque calde e rimanere all'interno della corrente.

Benjamin Franklin's original map of the Gulf Stream (Public domain, via Wikimedia Commons).

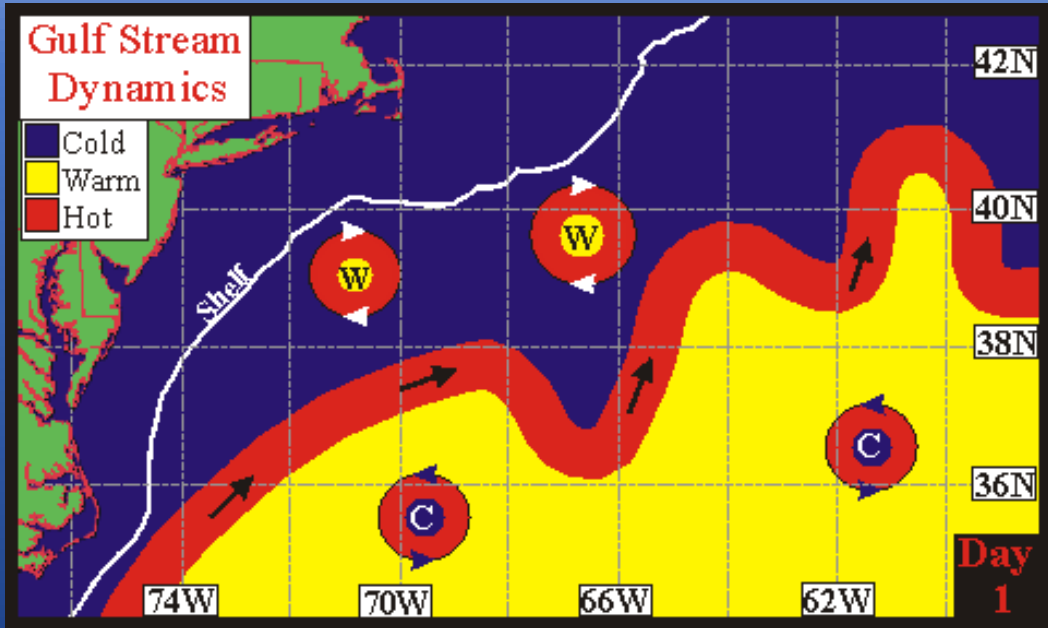
La Corrente del Golfo

- La **Corrente del Golfo** si forma dalla convergenza della **Corrente Equatoriale Nord Atlantica**, che porta acqua tropicale da est, e della **Corrente della Florida**, che porta acqua calda dal Golfo del Messico.
- La Corrente del Golfo trasporta quest'acqua calda verso nord lungo la costa orientale degli Stati Uniti;
- E' una **Western Boundary Current**, quindi è una corrente stretta (50-100 km di larghezza), profonda (fino a 1,5 km di profondità) e veloce.

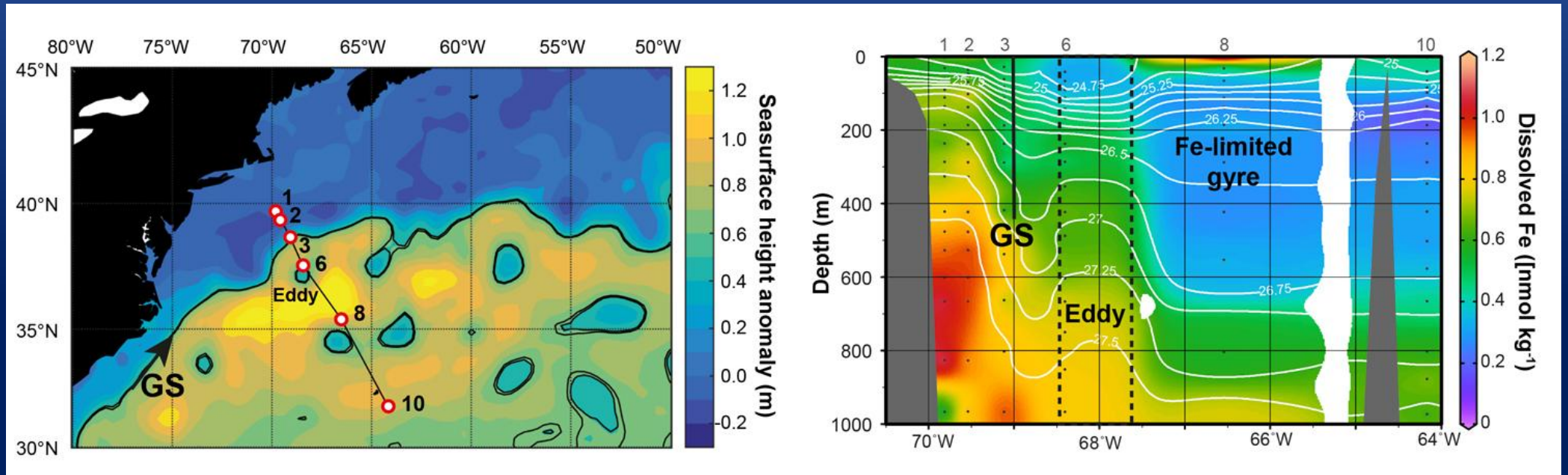


- Con una velocità media di 1.8 m/s e una velocità massima di circa 2.5 m/s, è la corrente più veloce dell'oceano mondiale.
- Trasporta inoltre enormi quantità d'acqua, più di 100 volte superiori al flusso combinato di tutti i fiumi della Terra.

La Corrente del Golfo: Eddies



- ✓ La Corrente del Golfo si muove lungo un fronte termoclinico (variazioni laterali di densità) all'interfaccia tra due masse d'acqua diverse ed è intrinsecamente instabile e con la tendenza a sviluppare meandri; lo strozzamento di questi meandri produce gli eddy.
- ✓ Gli eddy rappresentano un «mezzo di trasporto» attraverso il quale l'oceano scambia proprietà da una parte all'altra del fronte;
- ✓ Gli eddy della corrente del Golfo fertilizzano l'Oceano Atlantico Occidentale (distribuiscono nutrienti).



AMOC - La Corrente del Golfo

- La Corrente del Golfo è una parte importante dell'AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation), la componente Atlantica della Meridional Overturning Circulation (MOC) globale.
- La MOC svolge un ruolo fondamentale nella redistribuzione di calore, sale, ossigeno disciolto, nutrienti e carbonio nel sistema climatico globale.

- Le variazioni della MOC possono avere importanti impatti sociali: livello del mare, ondate di calore marine, eventi meteorologici estremi, variazioni della temperatura superficiale regionale e livelli di precipitazione.

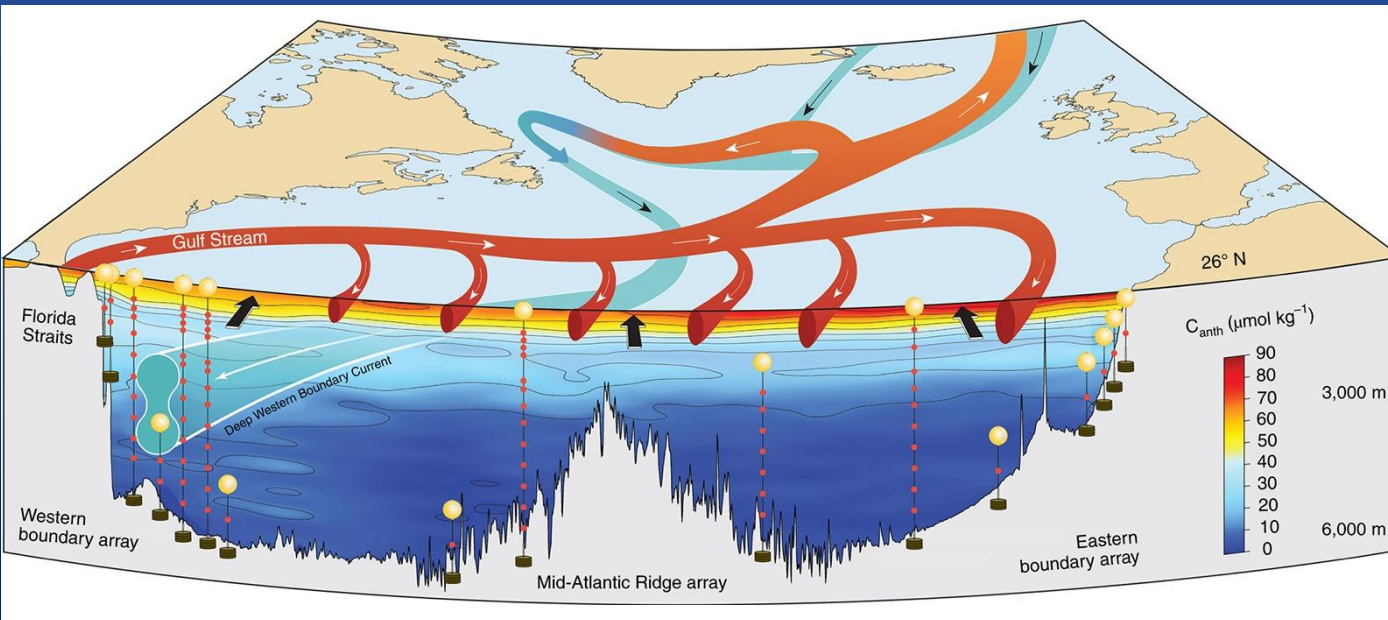
- L'AMOC ha una grande influenza sul meteo e sul clima dei Paesi adiacenti all'Atlantico settentrionale.

- L'acqua calda vicino alla superficie si sposta verso i poli seguendo la Corrente del Golfo, dove si raffredda e forma il ghiaccio marino.

- Quando si forma il ghiaccio aumenta la salinità dell'acqua circostante.

- A causa della grande quantità di sale presente nell'acqua e del raffreddamento invernale, questa diventa più densa, sprofonda e viene trasportata verso sud nelle profondità.

- Se la forza della AMOC diminuisce, meno carbonio verrà immagazzinato nell'oceano profondo.



Srokosz & Bryden, 2015

La Corrente del Golfo: Rapid Project

Il trasporto della MOC nell'Atlantico subtropicale a 26°N comprende tre componenti:

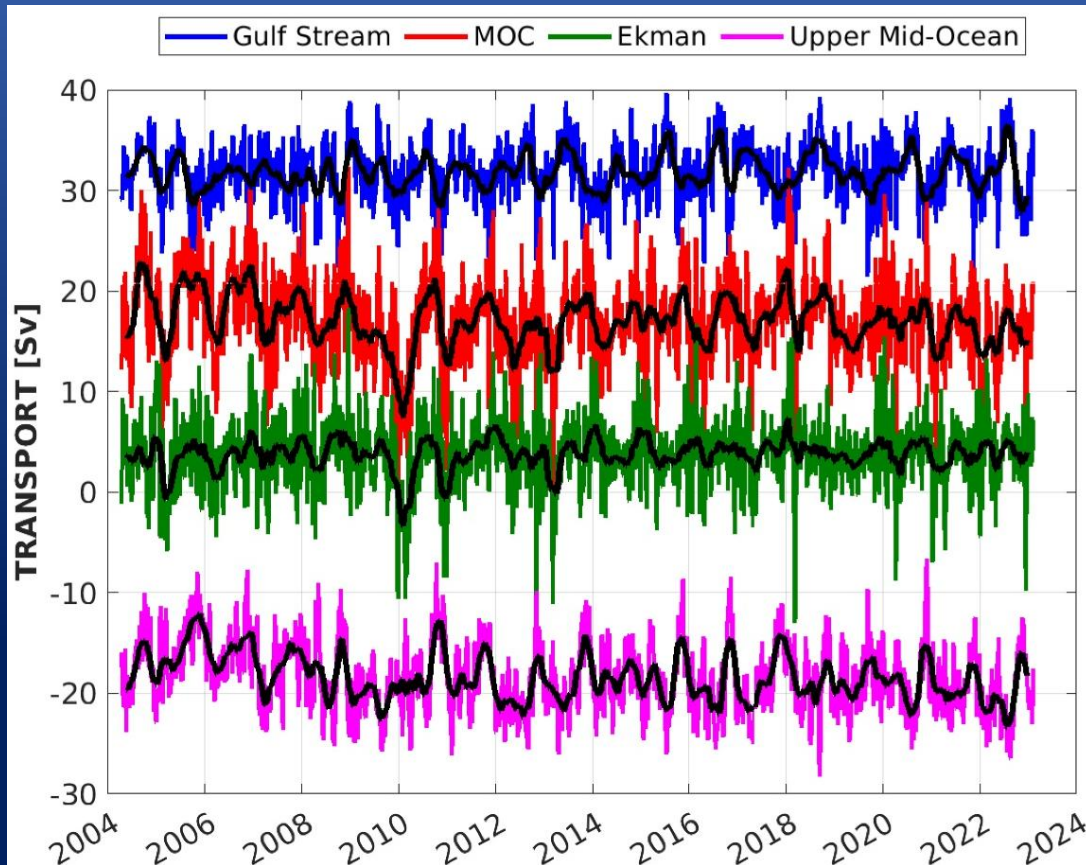
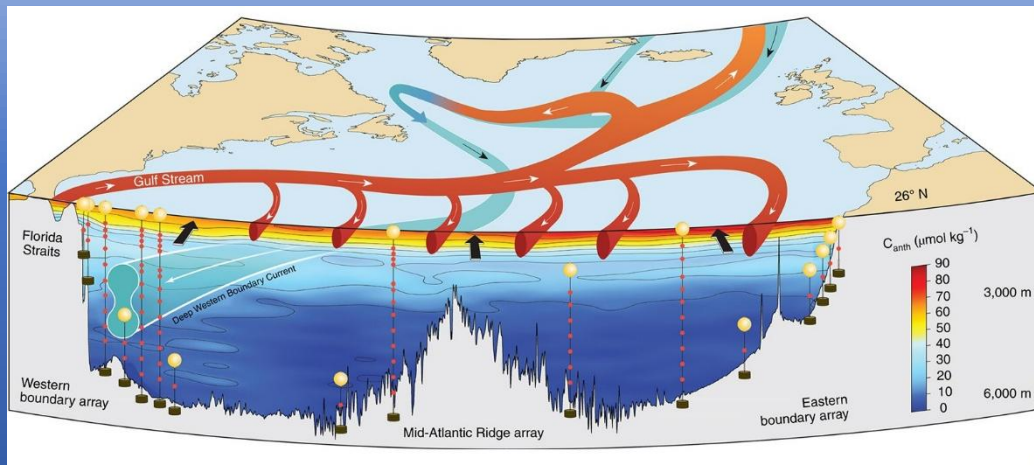
- Florida Current Transport (Gulf Stream): ~ 35 Sv
- **Ekman Transport**: Lo stress del vento zonale (est-ovest) che agisce sulla superficie dell'oceano genera un trasporto di Ekman meridionale (nord-sud). Questo trasporto di massa è tipicamente limitato ai 50 m superiori dell'oceano. A 26°N, il contributo di Ekman alla MOC è relativamente piccolo (2-4 Sv in media). Tuttavia, è responsabile della maggiore variabilità a breve termine (interannuale) che si verifica nella MOC.
- **Upper Mid-Ocean (density driven transport)**: geostrophic transport related to the east-west difference in sea water density between the American and African continents

$$\text{MOC} = \text{GS} + \text{EK} + \text{UMO}$$



McCarthy et al. 2015

<https://youtu.be/KTnhtQ2YtGo>

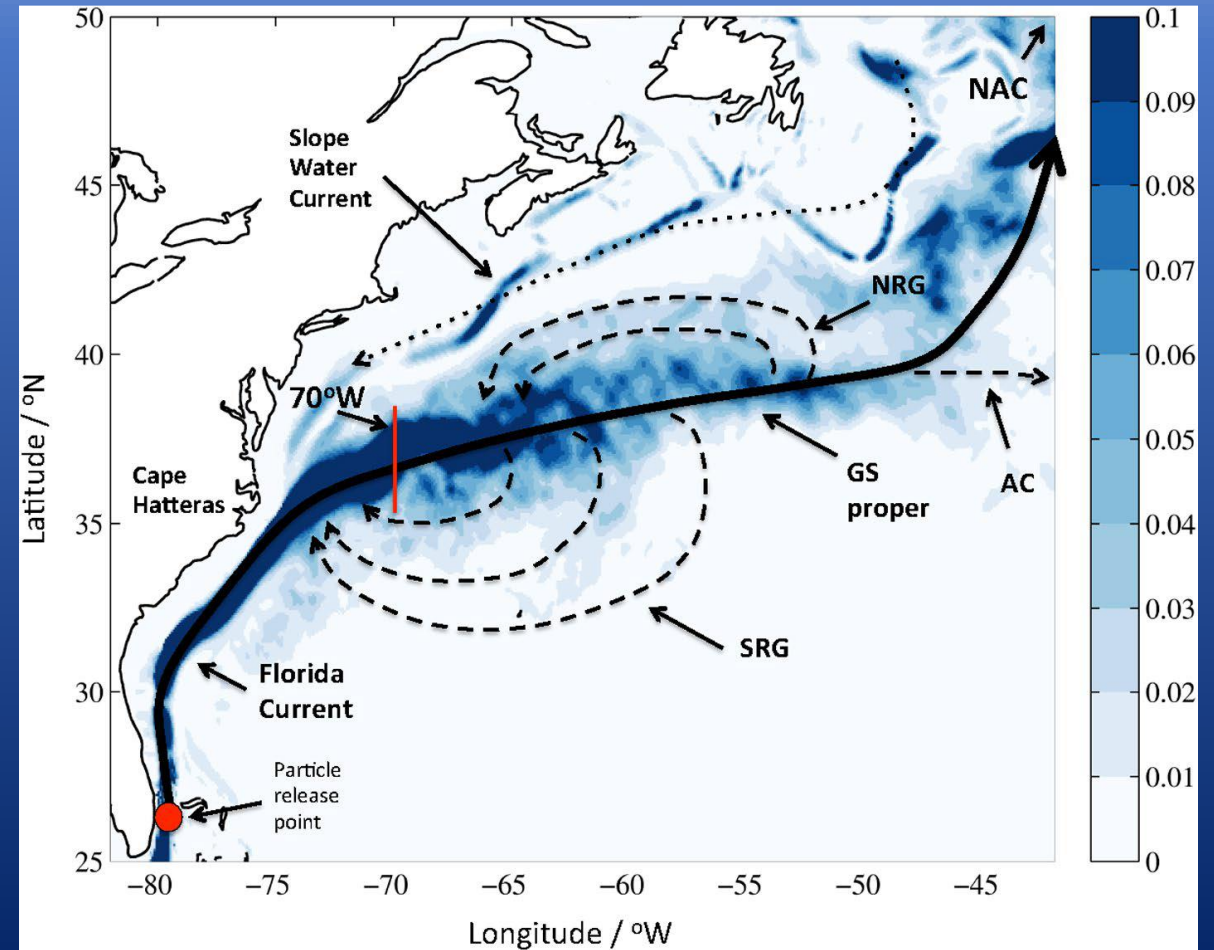


La Corrente del Golfo



$$1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

1 milione di metri cubi al
secondo

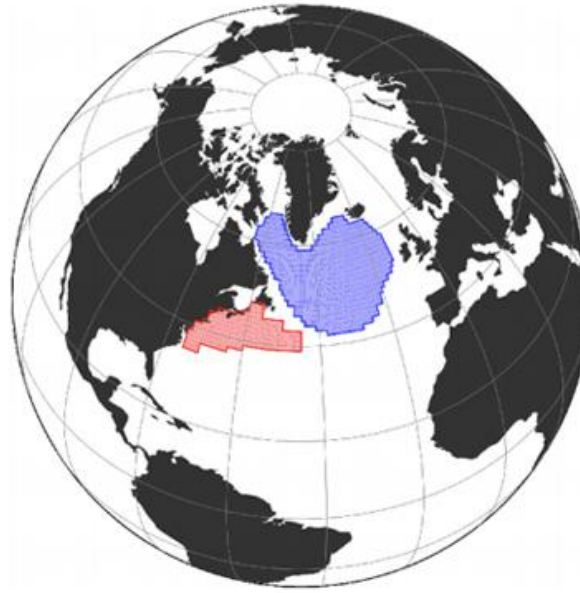
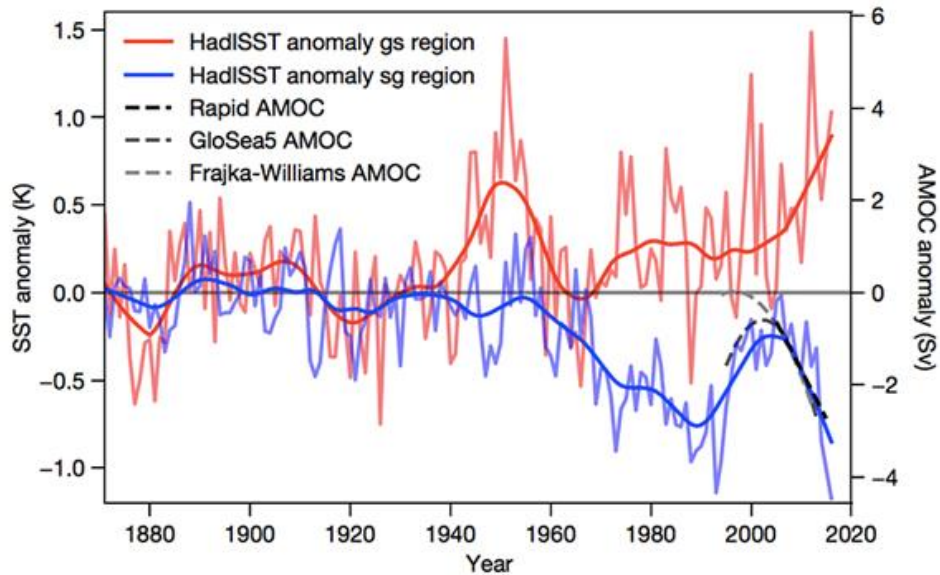


Mean surface velocities (ms^{-1}) in the Gulf Stream (GS) region over the period 1978–2010. The bold black line denotes the estimated GS path before becoming the North Atlantic Current (NAC) further northeast, the dashed black lines represent part of the southern recirculation gyre (SRG), the northern recirculation gyre (NRG) and the Azores Current (AC), and the dotted line estimates the position of the Slope Water Current.

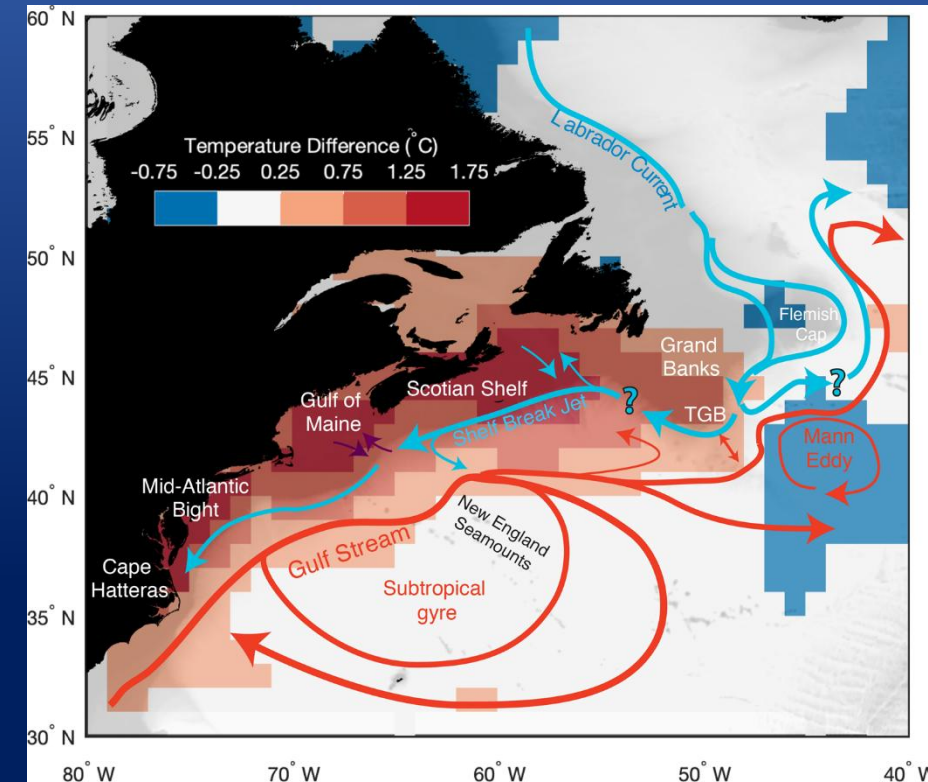
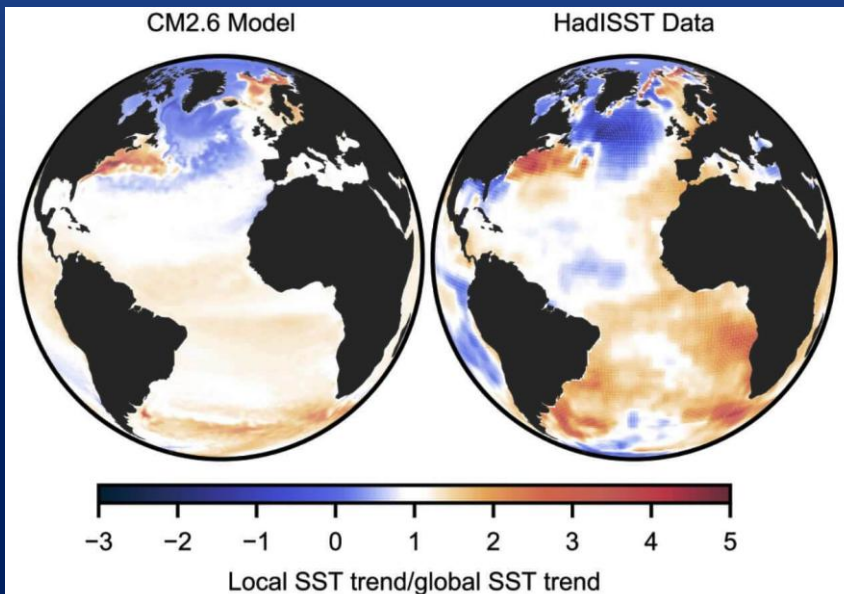
Rallentamento della Corrente del Golfo?

(15% dalla metà del ventesimo secolo)

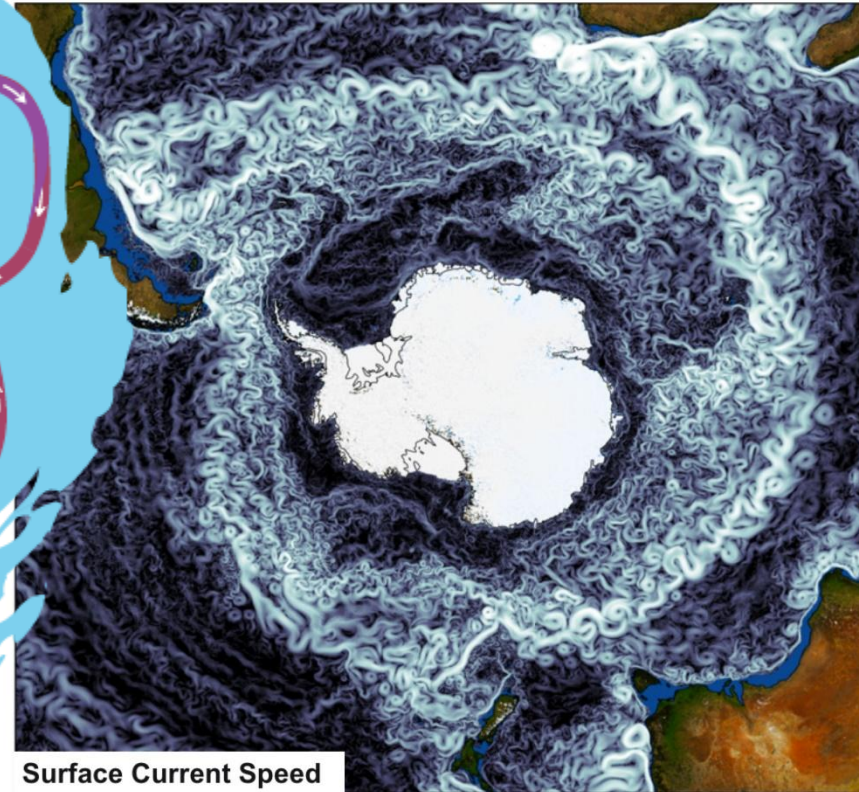
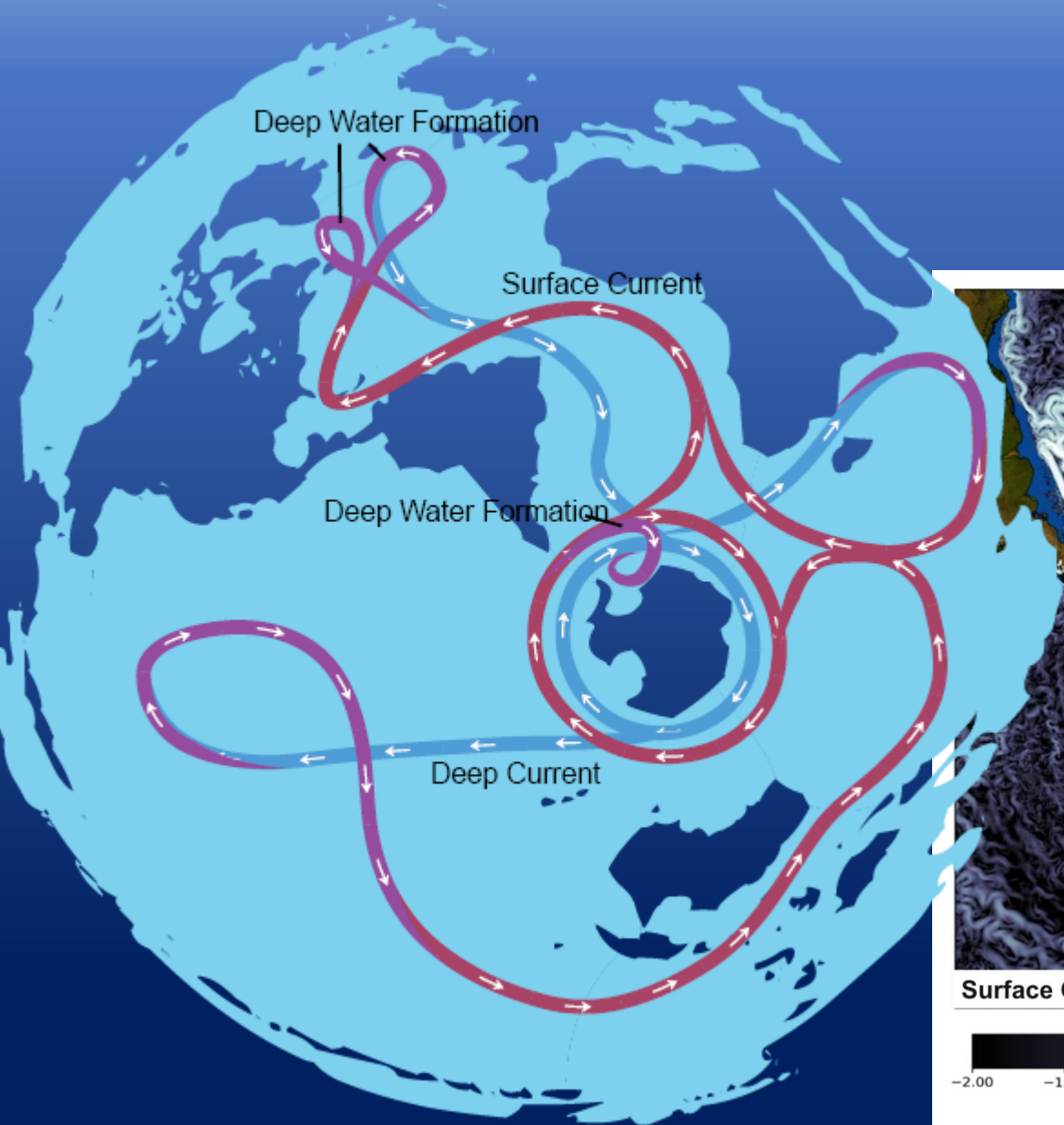
Cesar et al., 2018



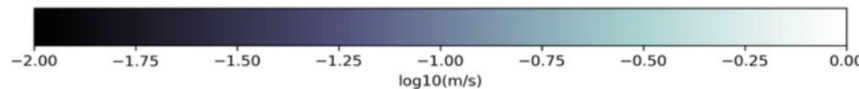
- ✓ Raffreddamento della regione sub-polare;
- ✓ Riscaldamento e spostamento verso nord della Corrente del Golfo;



Antarctic Circumpolar Current - ACC

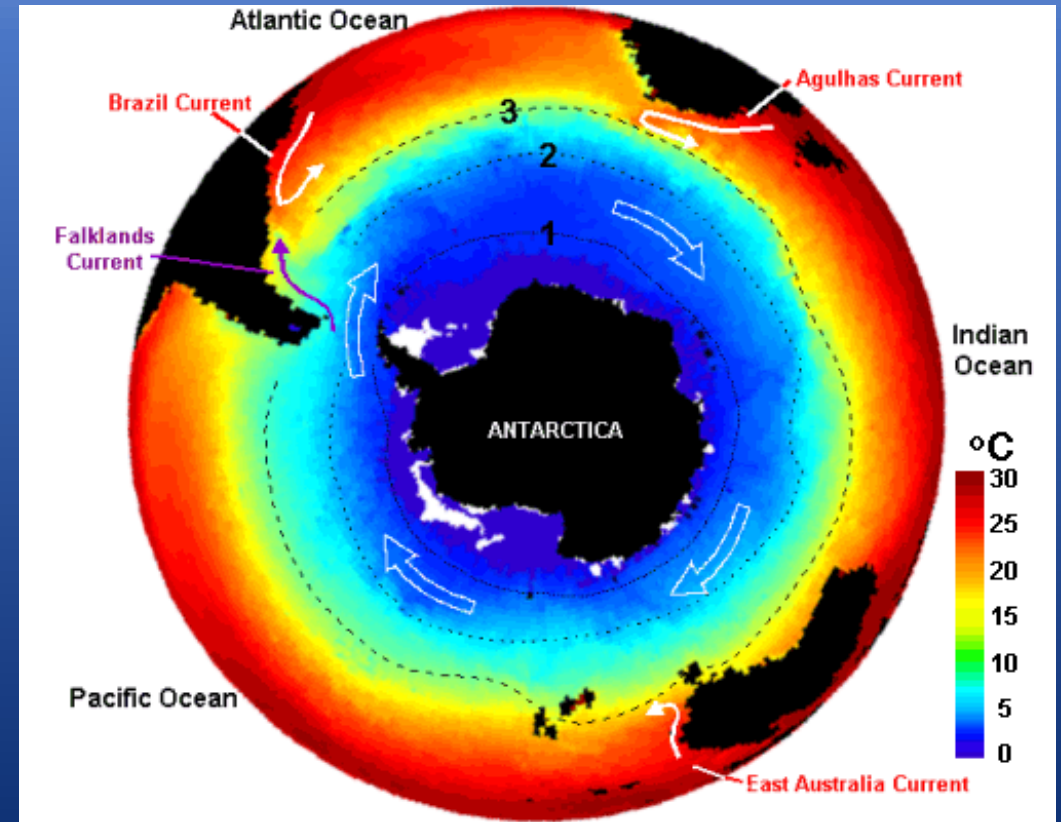
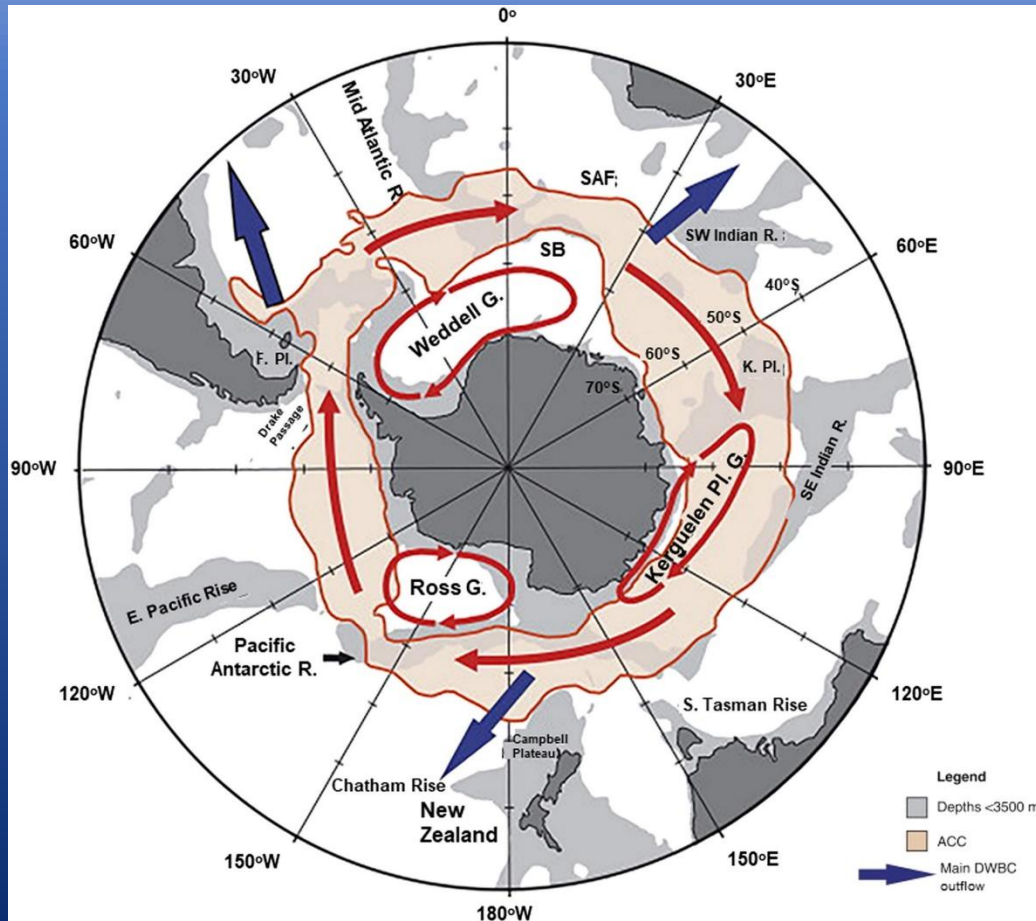


Surface Current Speed



- La **corrente circumpolare antartica** è l'unica corrente che circonda completamente la Terra.
- Questa corrente sposta più acqua di qualsiasi altra corrente.
- La corrente si trova in una regione del mondo caratterizzata da venti intensi e dall'azione delle onde.
- La regione della ACC è molto "ricca" (nutrienti per il plancton; cibo per gli animali di livello superiore).

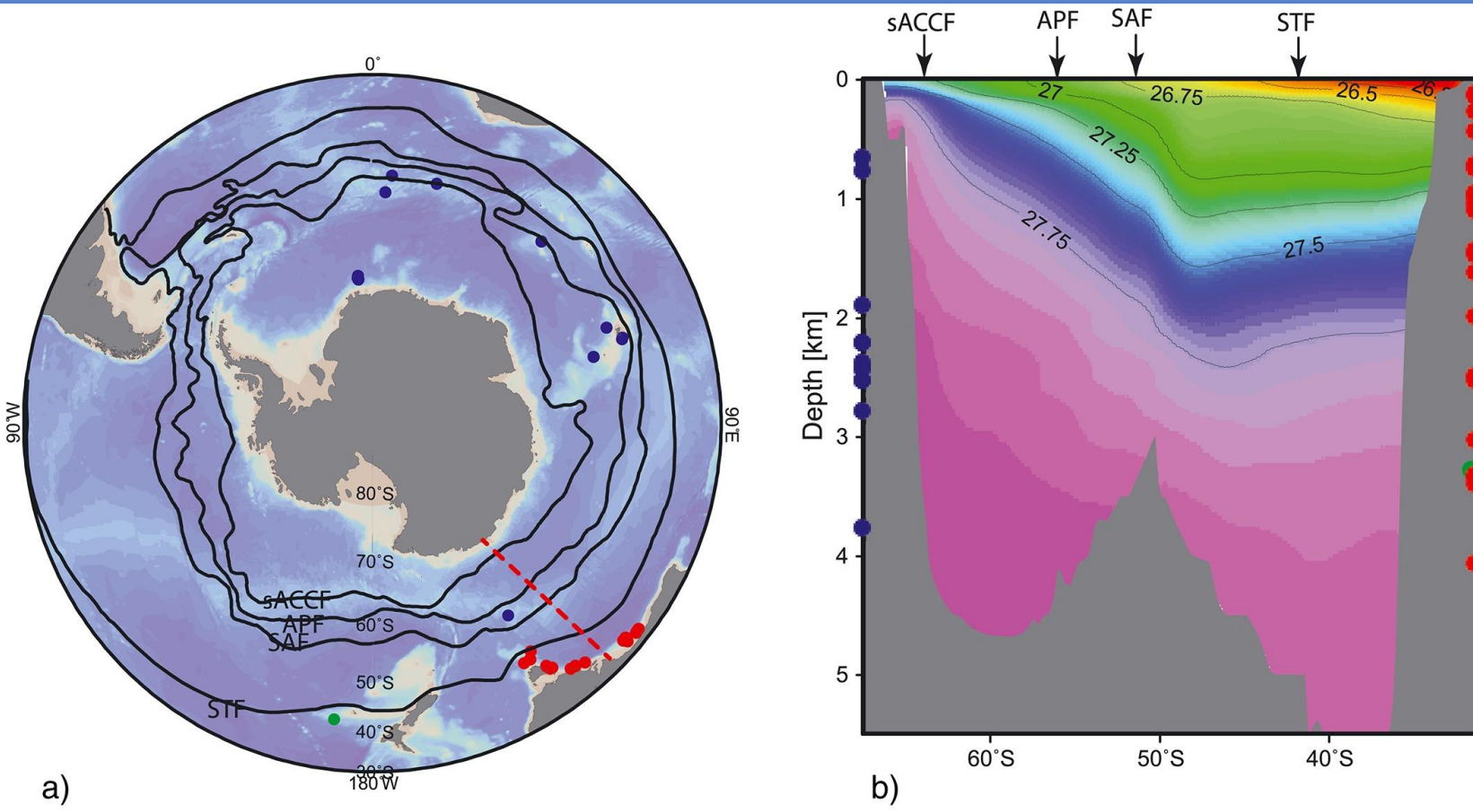
Antarctic Circumpolar Current – Fronti e Gyre



Le principali caratteristiche oceanografiche dell'Oceano Meridionale: (i) la Corrente Circumpolare Antartica (ACC) a sud del Fronte Subantartico (SAF) e il limite meridionale delle Upper Circumpolar Deep Water o southern boundary (SB); (ii) i gyres di Ross, Weddell e il Kerguelen Plateau; (iii) i principali punti di uscita delle deep western boundary currents (DWBC) dall'Oceano Meridionale (frece blu).

1) The polar front 2) The subantarctic front, 3) The subtropical front - the northern boundary of the Southern Ocean. White outline arrows indicate the flow of the Antarctic Circumpolar Current. Source: NOC from SST climatology data

Antarctic Circumpolar Current – Fronti e Densità

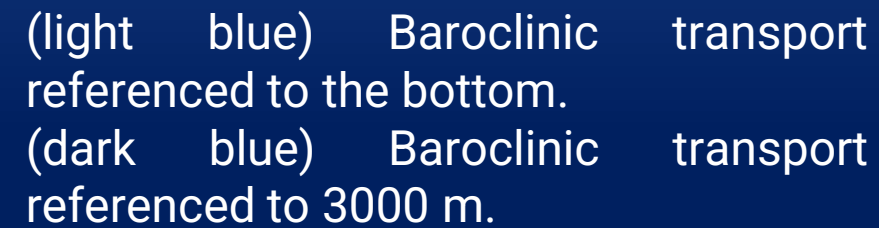


sACCF – Southern ACC Front; APF Antarctic Polar Front; SAF – Sub Antarctic Front; STF – Sub Tropical Front

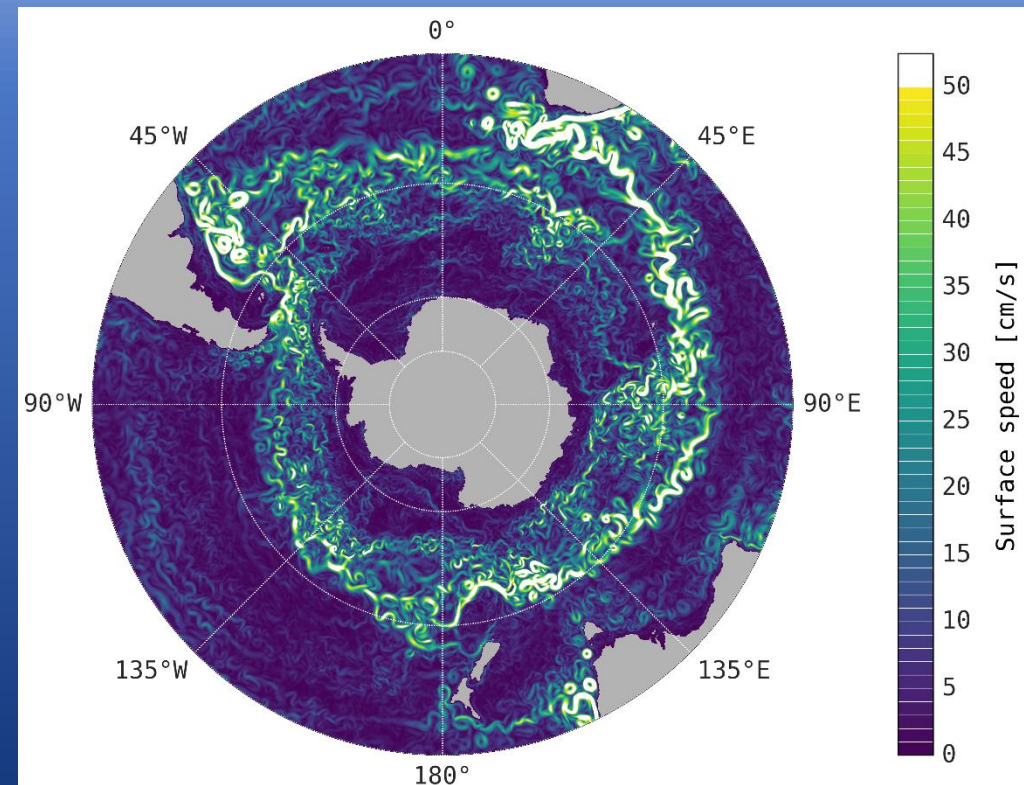
- La ACC trasporta circa 150 Sv di acqua verso est intorno all'Antartide, estendendosi verticalmente dalla superficie al fondo dell'Oceano Meridionale.
- L'ACC è in equilibrio termico: la forza di galleggiamento che agisce sulle superfici di densità inclinate attraverso l'ACC è bilanciata dalla forza di Coriolis che agisce sulla corrente orizzontale.
- Questo trasporto baroclinico domina il trasporto totale dell'ACC.
- La porzione baroclinica dell'ACC misurata a sud dell'Australia è di 147 ± 10 Sv [Rintoul e Sokolov, [2001](#)], e il trasporto totale stimato è di 157 ± 10 Sv [Ganachaud e Wunsch, [2000](#)].

[illegible]

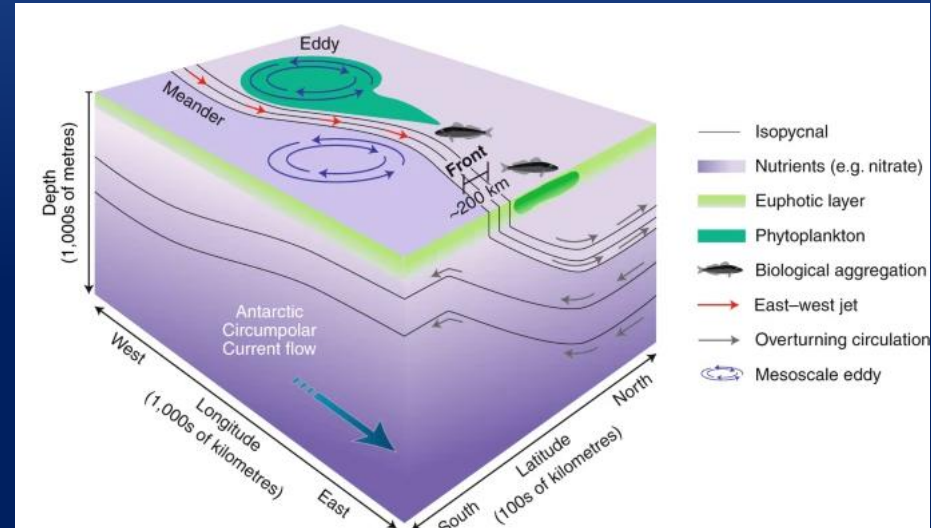
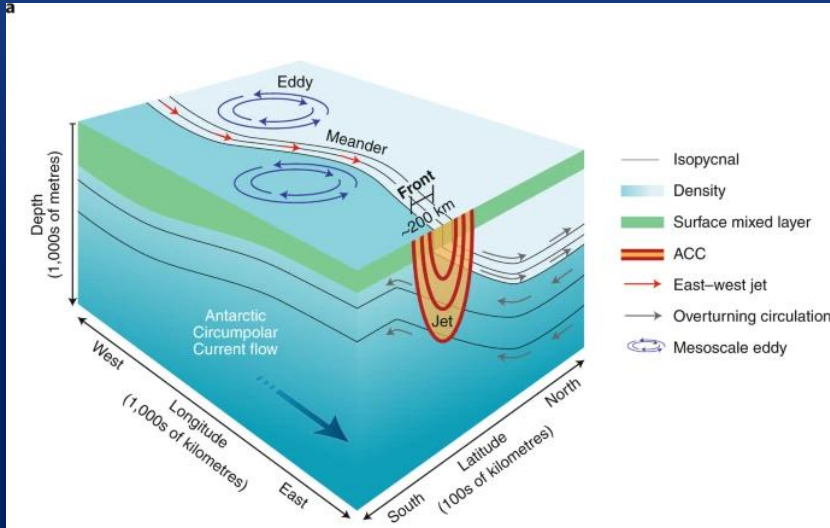
A map of the Drake Passage and surrounding regions. The map shows the Atlantic Ocean to the north, the Pacific Ocean to the west, and the Southern Ocean to the south. The Drake Passage is labeled diagonally across the center. To the north, the map shows the southern tip of South America, including Chile, Argentina, and the Falkland Islands (U.K.). Key locations marked include Punta Arenas, Isla Grande de Tierra del Fuego, Rio Grande, Ushuaia, Isla de los Estados, Cape Horn, and Diego Ramirez Islands. To the south, the map shows the Antarctic Peninsula, labeled 'Antarctic Peninsula', and the Weddell Sea. The South Shetland Islands are shown to the north of the Antarctic Peninsula, with various islands labeled including Elephant Is., Clarence Is., King George Is., Nelson Is., Livingston Is., O'Hare Is., Joinville Is., Dundee Is., James Ross Is., Snow Hill Is., Brabant Is., Anvers Is., Robertson Is., Jason Peninsula, and Larsen Ice Shelf. The Bellingshausen Sea is labeled to the west of the Antarctic Peninsula. Other islands shown include Brabant Is., Anvers Is., Renauld Is., Lavoisier Is., Adelaide Island, Charcot Is., Rotherchild Is., Hearst Is., and Ewing Is. A scale bar at the bottom right indicates 0 to 100 km and 0 to 100 miles. The Alamy logo is in the bottom left corner.



Surface Circulation Structures: ACC Eddies

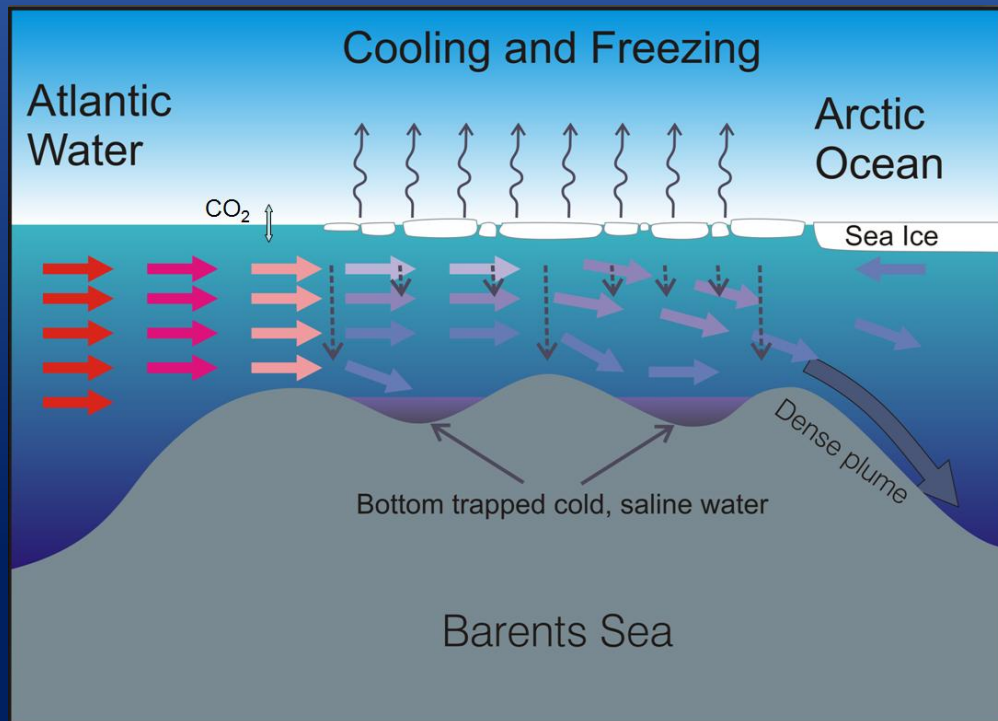


- L'Antarctic Circumpolar Current (**ACC**) circola intorno all'Antartide;
- Dato che non ci sono terre emerse a bloccare il percorso, la deriva del vento occidentale spinge l'acqua senza ostacoli verso est intorno all'Antartide in senso orario. Di conseguenza, si forma una gigantesca **corrente ad anello (ring current)** che collega gli oceani Pacifico, Atlantico e Indiano a sud;
- Gli Eddy che si formano lungo i fronti di T della ACC svolgono un ruolo fondamentale nel determinare il trasporto di calore, sale e nutrienti nell'oceano da e verso l'Antartide;
- L'ACC è il punto di distribuzione centrale della circolazione oceanica globale, nota anche come "nastro trasportatore oceanico". I grandi cambiamenti nell'ACC hanno quindi conseguenze globali.



THC and Deep-water formation

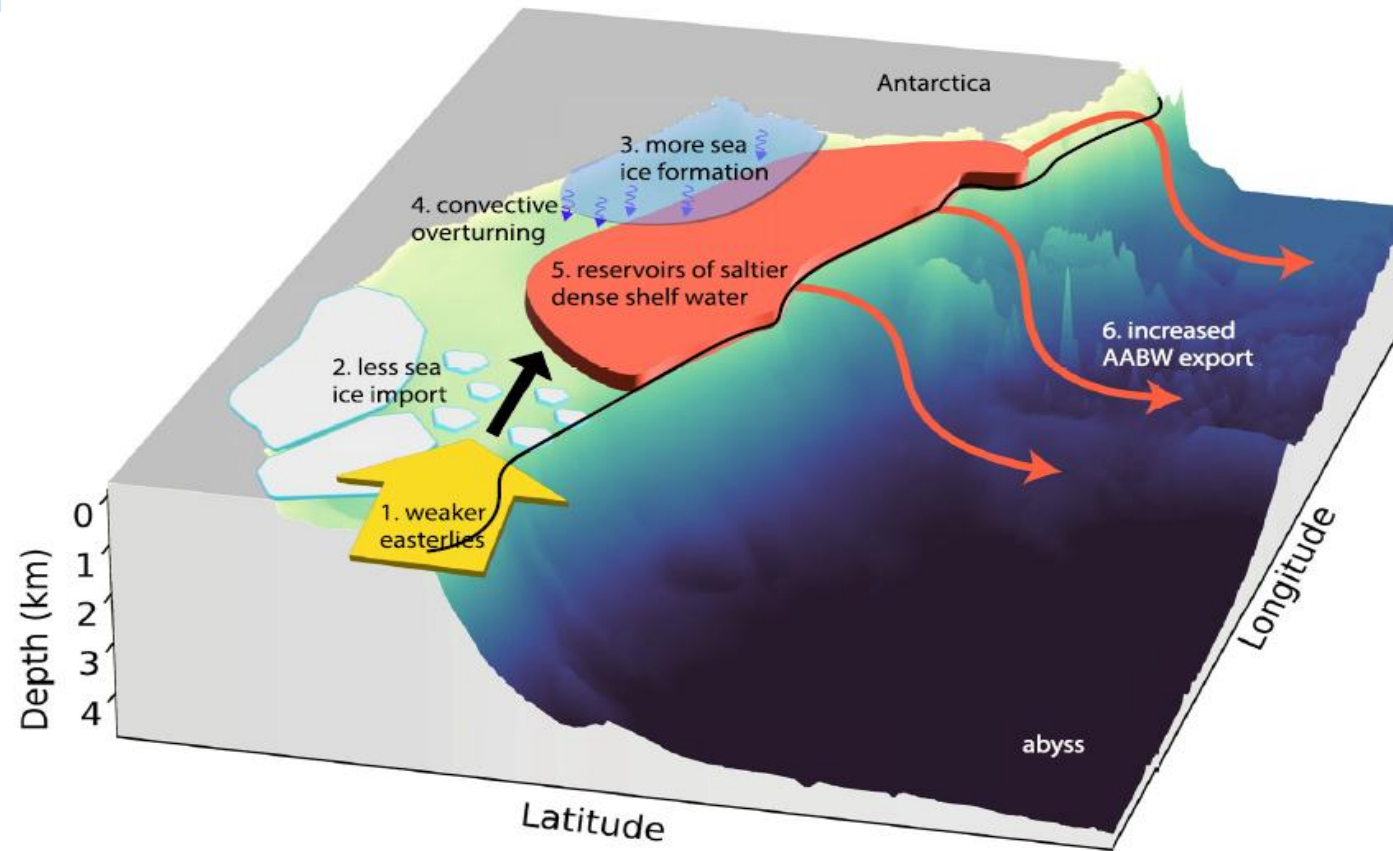
- ✓ Il meccanismo di formazione di acqua densa passa attraverso il raffreddamento della superficie del mare (**cooling**) ed i **freshwater fluxes** (E-P, freezing e melting);
- ✓ L'evaporazione e la formazione di ghiaccio marino (freezing) fanno aumentare la salinità;
- ✓ Le precipitazioni e la fusione dei ghiacci (melting) la fanno diminuire;
- ✓ A differenza delle correnti guidate dal vento, la THC non si limita alle acque superficiali, ma può essere considerata come un grande «capovolgimento» delle acque dell'oceano mondiale, dall'alto verso il basso e viceversa (**overturning circulation**).



La circolazione termoalina consiste in:

1. **Formazione di acque profonde:** affondamento di masse d'acqua, strettamente associato alla Convezione (processo di miscelazione verticale). La formazione di acque profonde avviene in poche aree localizzate: il Mare di Groenlandia-Norvegia, il Mare del Labrador, il Mar Mediterraneo, il Mare di Wedell, il Mare di Ross.
2. **Diffusione di acque profonde (spreading):** ad esempio, North Atlantic Deep Water, NADW, e Antarctic Bottom Water, AABW).
3. **Upwelling delle acque profonde (upwelling diffuso)**
4. **Correnti di superficie:** sono necessarie per chiudere il flusso.

Antarctic Bottom Water formation



Meccanismi che determinano la formazione e l'esportazione di AABW:

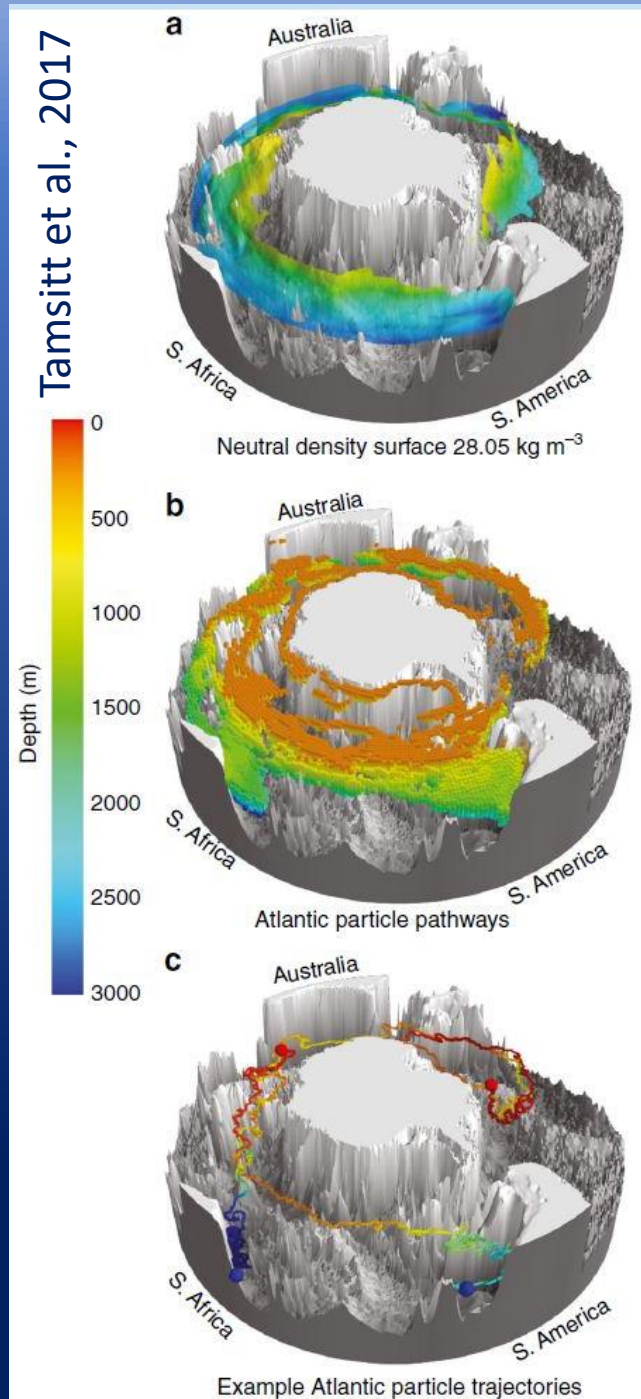
- Le correnti orientali (1) trasportano il ghiaccio marino sulla piattaforma continentale (2) nelle regioni di formazione della **Dense Shelf Water (DSW)**.
- Nella regione di formazione della **DSW** la maggiore presenza di ghiaccio marino (3) produce acqua più salata e fenomeni convettivi (4).
- Sulla piattaforma si formano serbatoi di **DSW** più salati (5) che possono persistere per alcuni anni nei mari di Weddell e di Ross.
- Da questi serbatoi si forma e si esporta l'acqua di fondo antartica (**AABW**) (6).

THC and overturning of the Deep-water

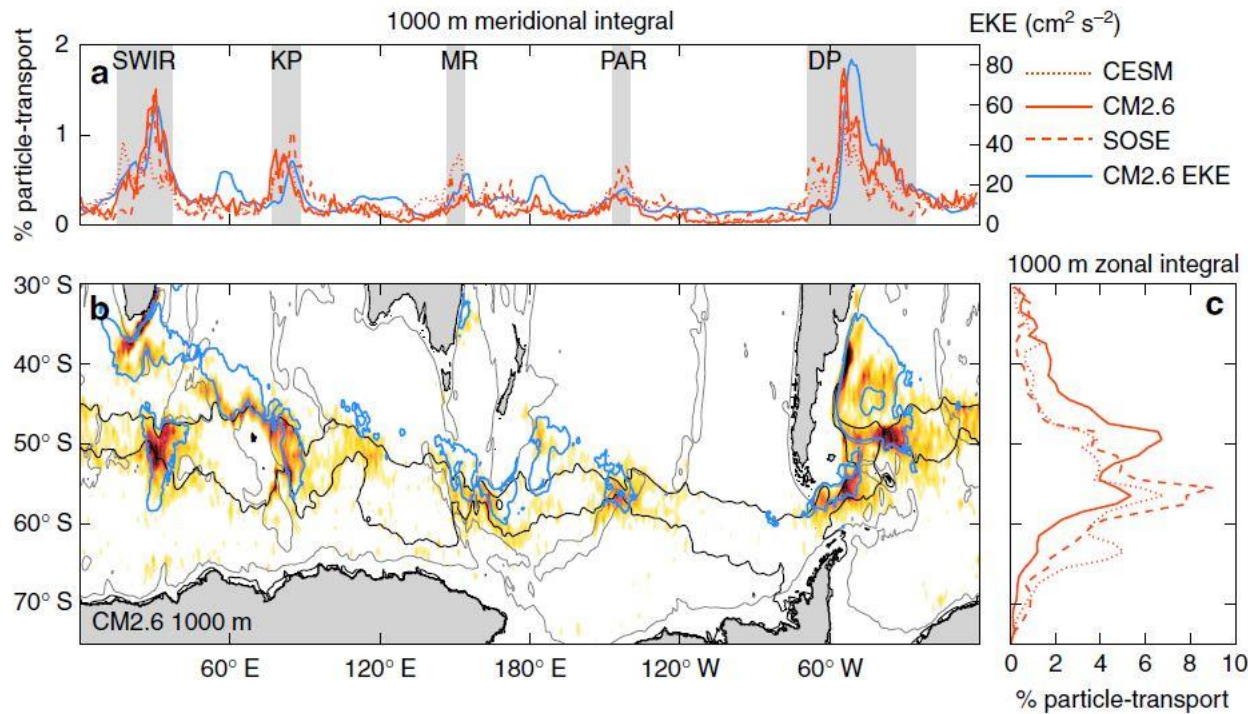
- ✓ Grazie alle osservazioni e ai modelli matematici, gli scienziati sanno da tempo che le grandi correnti profonde dell'Oceano Pacifico, Atlantico e Indiano scorrono verso sud e convergono verso l'Antartide;
- ✓ Qui entrano nell'Oceano Meridionale e subiscono un «overturning», trasportando l'acqua dall'oceano più profondo, prima di tornare in superficie e dirigersi verso nord.

- ✓ In questo modo si completa il ciclo di circolazione globale, importante per l'assorbimento oceanico di carbonio e calore e per il rifornimento di sostanze nutritive da utilizzare nella produzione primaria.

<https://youtu.be/j1pvl6ZJ1Mk>

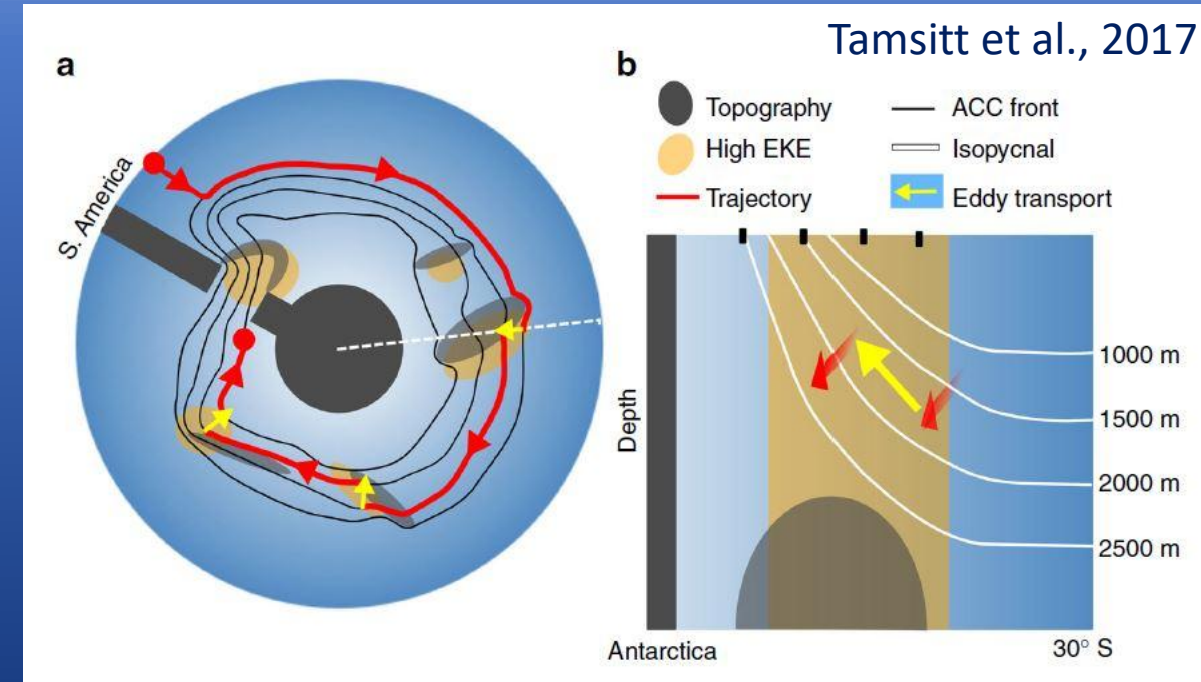


THC and overturning of the Deep-water



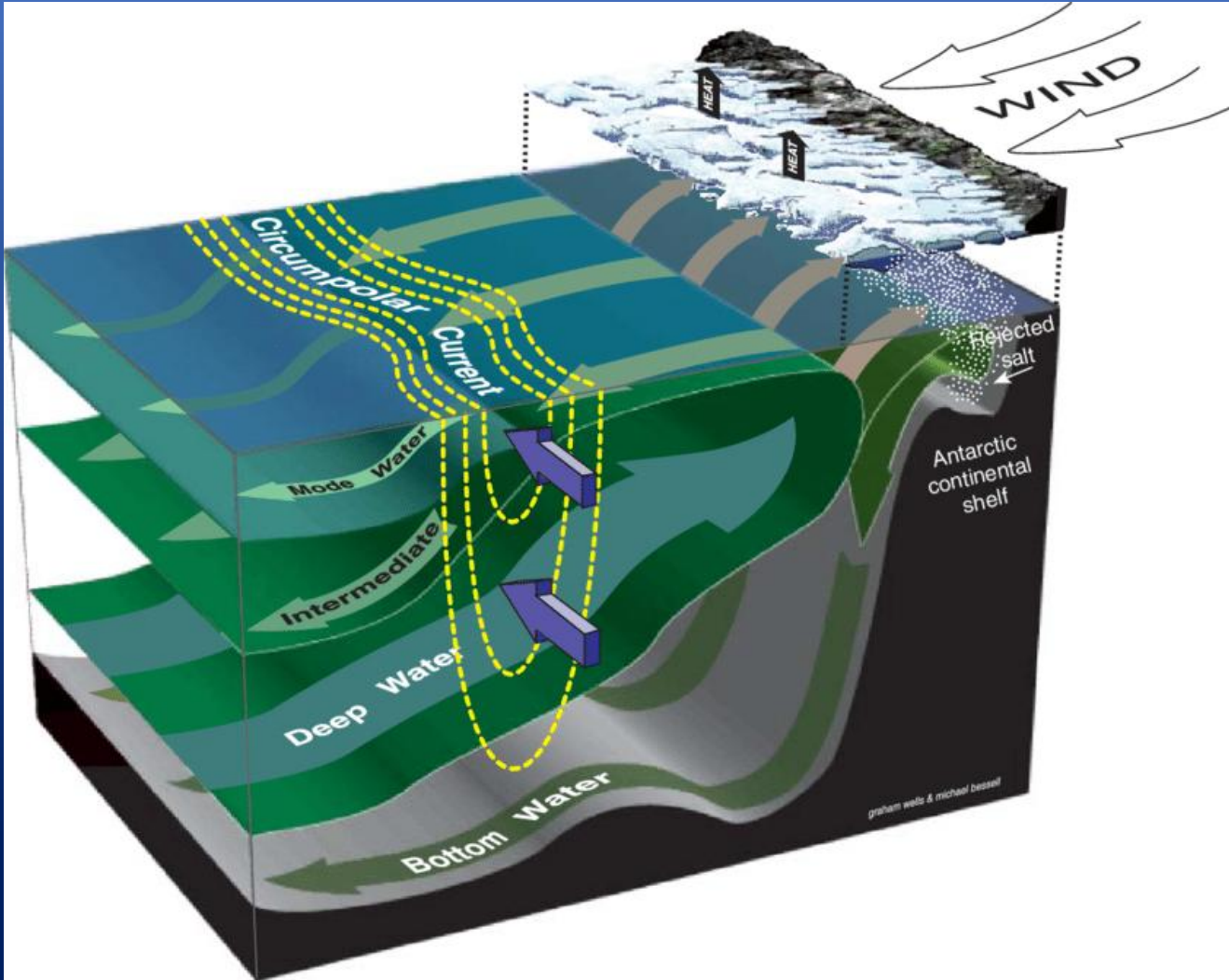
Le barre grigie ombreggiate mostrano la posizione dei cinque principali hot-spot topografici in cui si verifica l'upwelling: Southwest Indian Ridge (SWIR), Kerguelen Plateau (KP), Macquarie Ridge (MR), Pacific–Antarctic Ridge (PAR), and Drake Passage (DP)

I forti vortici, causati da interazioni topografiche in cinque punti della corrente che circonda l'Antartide, svolgono un ruolo importante nel processo di upwelling.



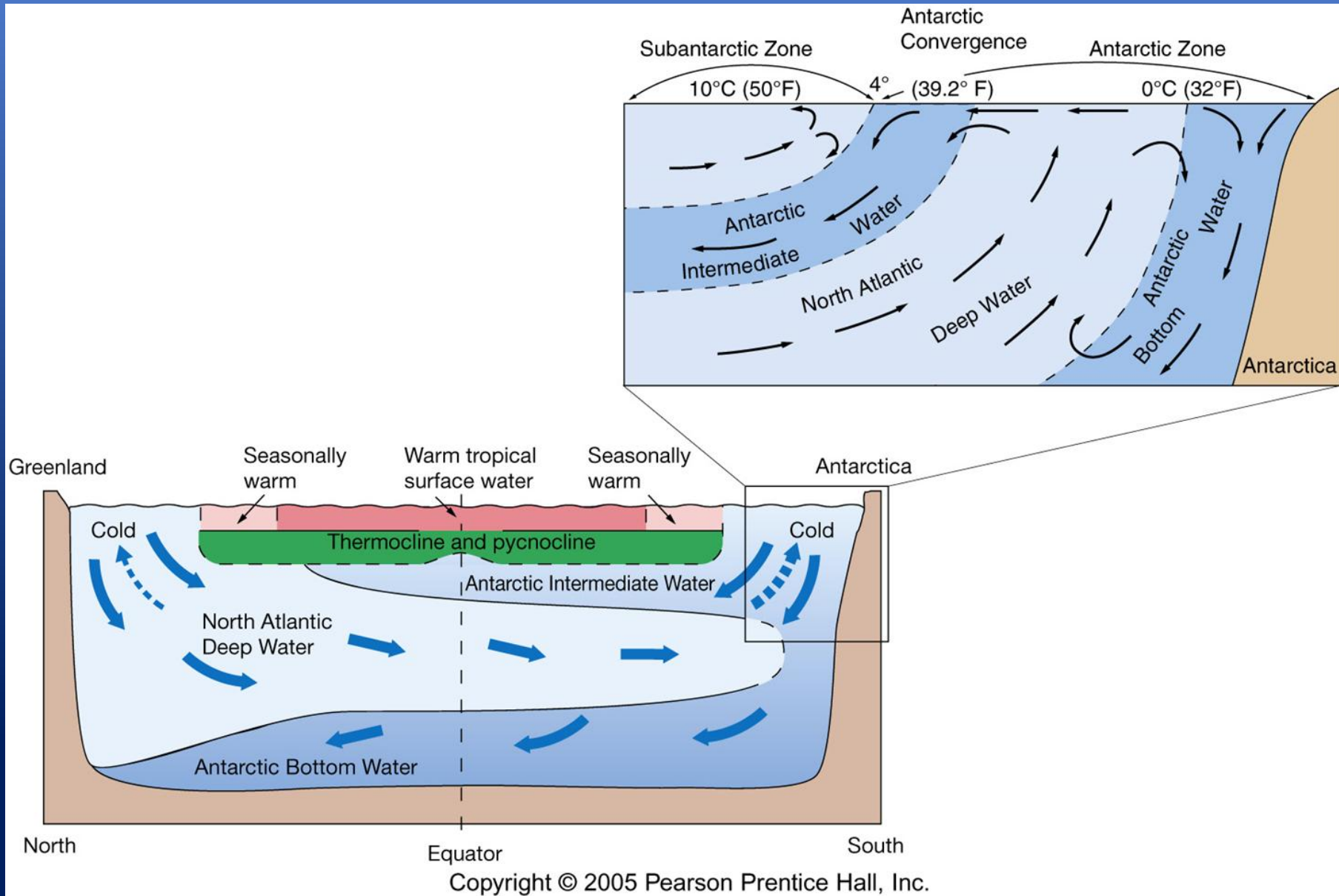
Effetto dell'avvezione negli hot-spot topografici dell'ACC. Una traiettoria idealizzata di particelle (rosso) segue le linee di flusso della ACC (nero). Le particelle si spostano verso sud e verso l'alto (eddy transport frecce gialle) ogni volta che incontrano una regione ad alta EKE.

Upwelling delle acque profonde



Schema della circolazione ascendente nell'Oceano Meridionale. L'acqua profonda circumpolare risale in superficie e viene ritrasformata in acque più leggere (superficiali ed intermedie) e in acque più dense (di fondo). Fonte: Da Rintoul, 2000

Deep water distribution



Currents patterns on Earth

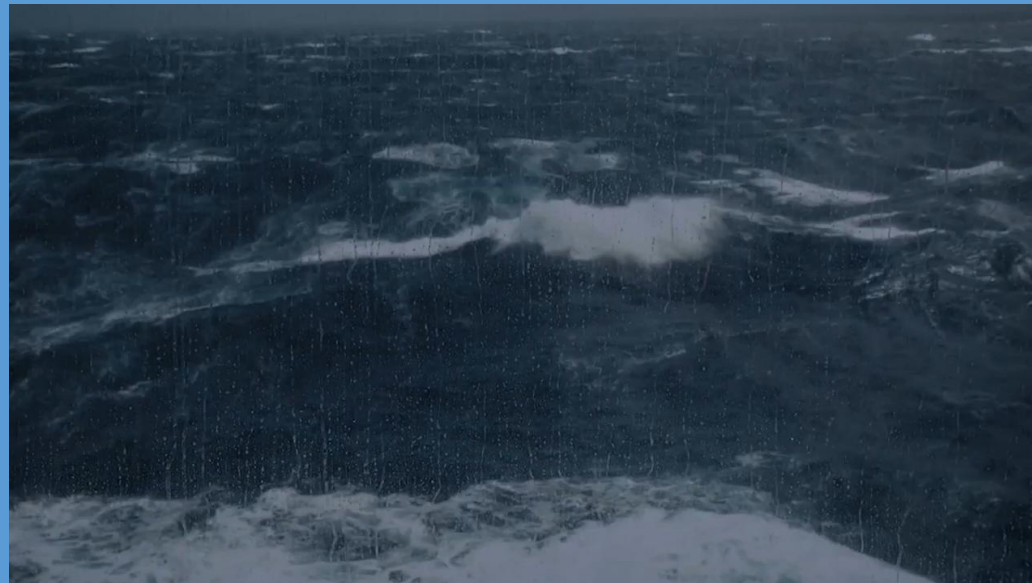
Ocean currents

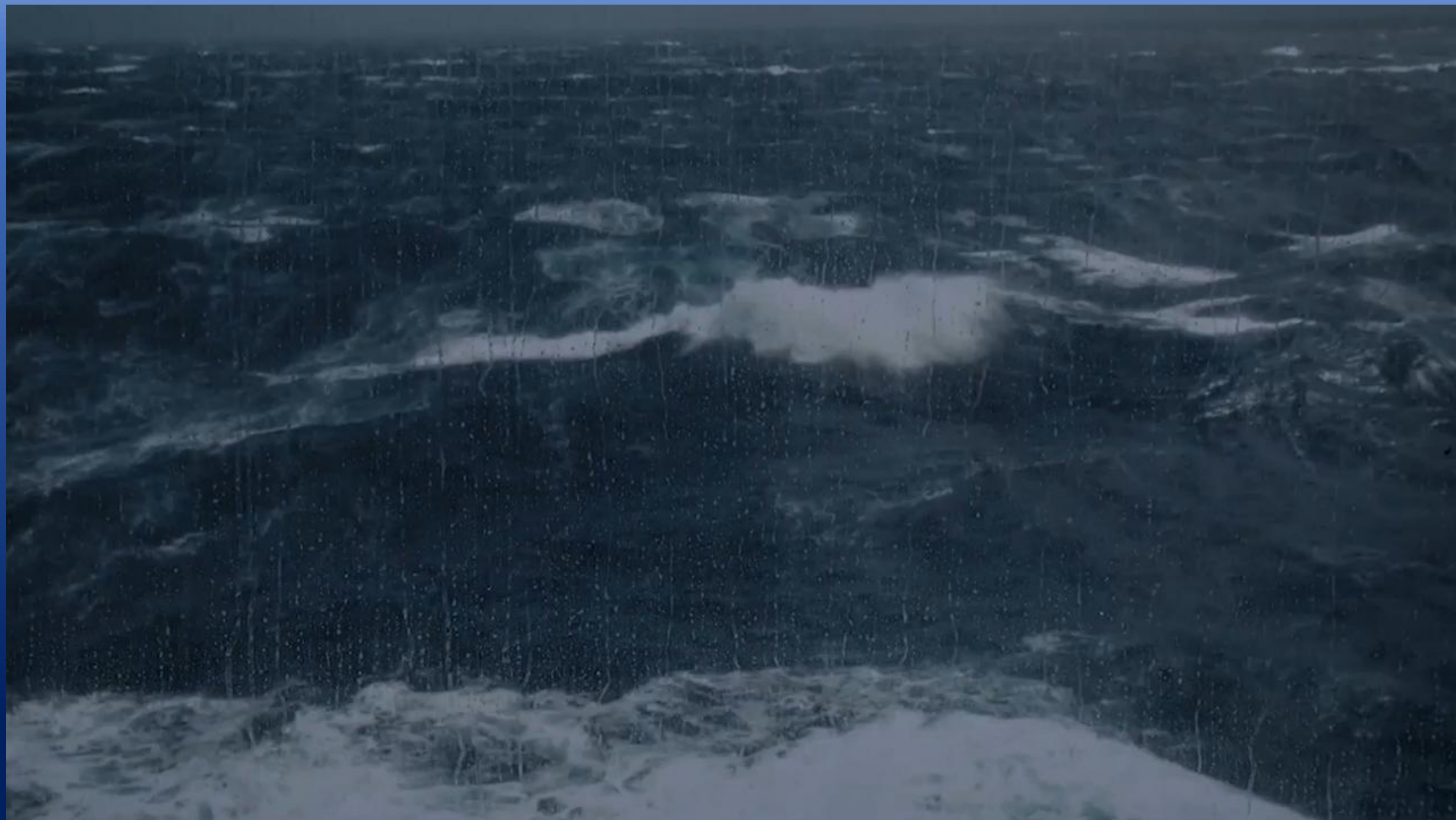
[\(1\) How do ocean currents work? - Jennifer Verduin - YouTube](#)

Ocean currents and climate changes

[https://www.google.com/search?q=How+Ocean+Currents+Work+\(and+How+We+Are+Breaking+Them\)+-+YouTube&rlz=1C1GCEU_itIT1027IT1027&oq=How+Ocean+Currents+Work+\(and+How+We+Are+Breaking+Them\)+-+YouTube&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBBzg3MmowajmoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#fpstate=ive&vld=cid:cd430d22,vid:f2evaLaDvCI,st:0](https://www.google.com/search?q=How+Ocean+Currents+Work+(and+How+We+Are+Breaking+Them)+-+YouTube&rlz=1C1GCEU_itIT1027IT1027&oq=How+Ocean+Currents+Work+(and+How+We+Are+Breaking+Them)+-+YouTube&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBBzg3MmowajmoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#fpstate=ive&vld=cid:cd430d22,vid:f2evaLaDvCI,st:0)

Monitoring the
impact of
extreme weather
systems on the
ocean surface





Meccanismi di trasferimento del calore



Conduzione – trasmissione/propagazione del calore attraverso molecole congiunte. Quando l'aria a contatto con l'oceano ha una temperatura diversa da quella della superficie del mare, avviene la conduzione.

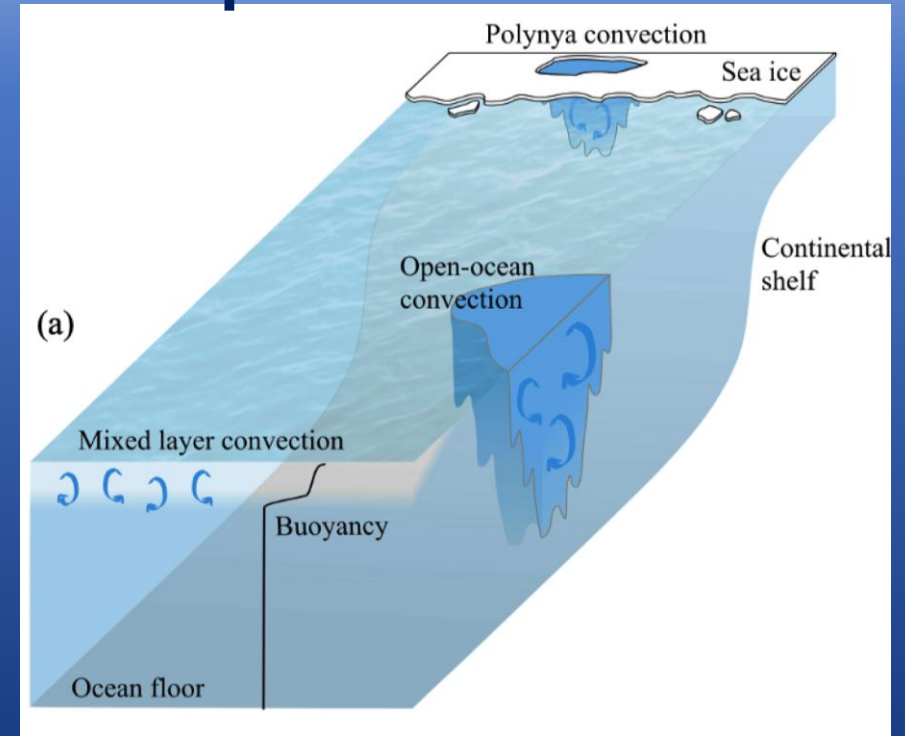
Convezione - Il trasferimento di calore convettivo avviene sia per diffusione termica (il movimento casuale delle molecole del fluido) sia per avvezione, in cui la materia o il calore vengono trasportati dal movimento su larga scala delle correnti nel fluido. La convezione nell'oceano è il risultato delle differenze di densità delle acque oceaniche.

Irraggiamento - trasferimento di energia attraverso i fotoni delle onde elettromagnetiche.

Processi di formazione di acqua densa

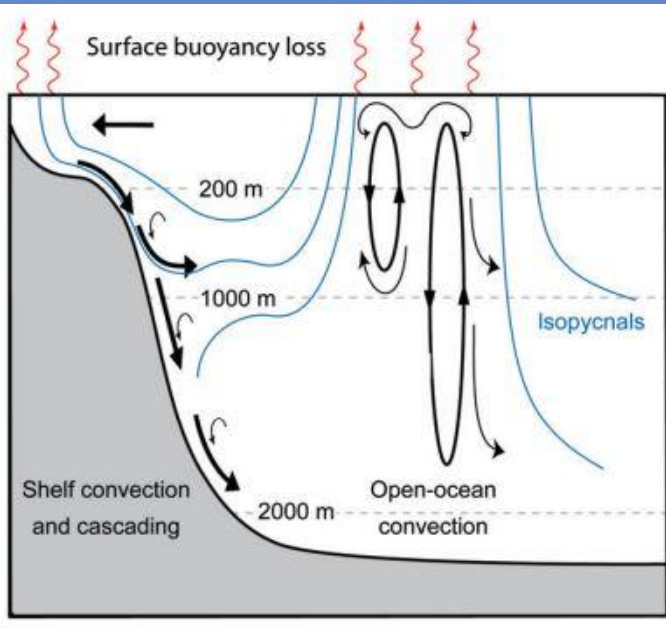
La **Convezione oceanica** può essere suddivisa in 3 tipologie:

- 1) **Mixed layer Convection.** Avviene come parte del ciclo diurno a seguito del raffreddamento notturno della superficie oceanica. Questa rapida perdita di galleggiamento innesca la convezione, che mescola la parte superiore della colonna d'acqua e contribuisce ad approfondire il Mixed Layer;
- 2) **Open-ocean Convection.** In alcune regioni dell'oceano, la perdita di galleggiamento invernale in superficie produce una convezione tra gli strati superficiali e gli abissi. La convezione in mare aperto si verifica principalmente nelle aree polari, dove può verificarsi un raffreddamento intenso e altamente localizzato delle acque superficiali da parte dell'atmosfera nei mesi invernali. Le aree in cui avviene questo tipo di convezione hanno in genere una **densità superficiale** più elevata rispetto al resto dell'oceano globale. La convezione in oceano aperto può raggiungere **migliaia di metri di profondità** ed è un elemento chiave per la formazione di massa d'acqua, compresa la produzione di acque profonde dell'Atlantico settentrionale (NADW) che alimentano la cella superiore della Atlantic-Meridional Overturning Circulation (AMOC).



3) **Polynya convection.** Durante l'inverno, gran parte dell'oceano intorno all'Antartide è ricoperto di ghiaccio marino, che inibisce le interazioni tra atmosfera e oceano. Tuttavia, in alcune regioni ci sono dei vuoti nel ghiaccio marino, noti come **Polynie**, dove le acque superficiali sperimentano enormi perdite di galleggiamento e si verifica la convezione. Le **polynie costiere** sono comuni intorno al continente antartico, dove i venti catabatici spingono al largo il ghiaccio marino appena formatosi.

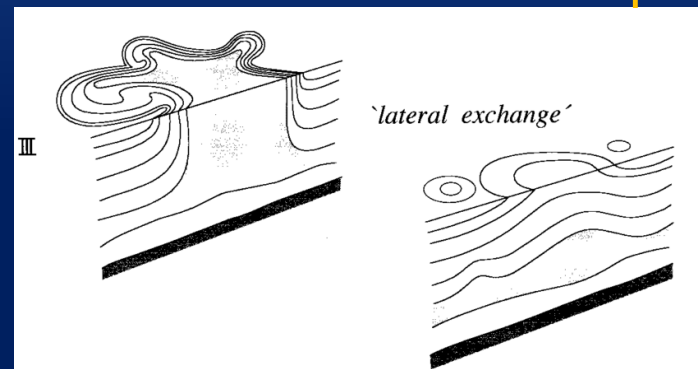
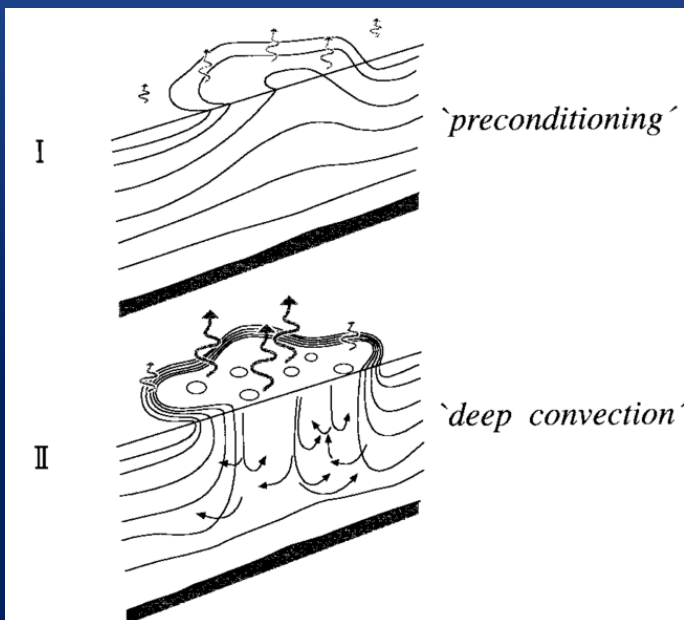
Processi di formazione di acqua densa



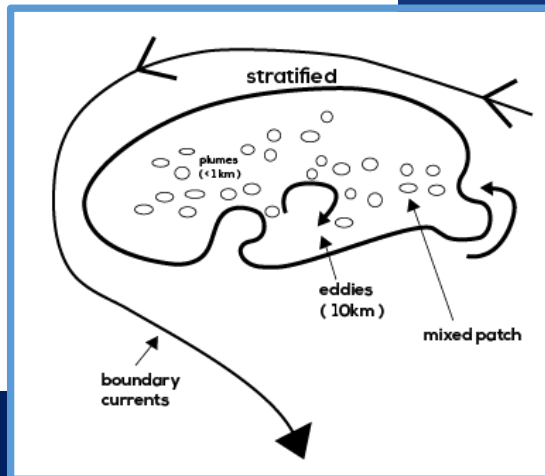
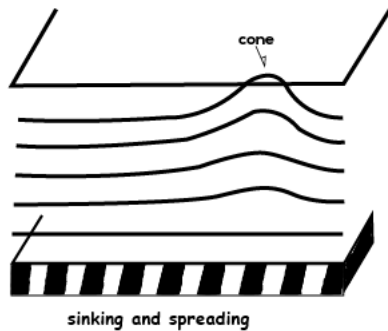
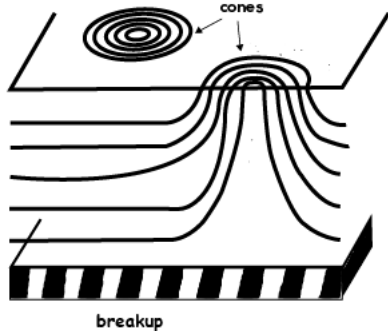
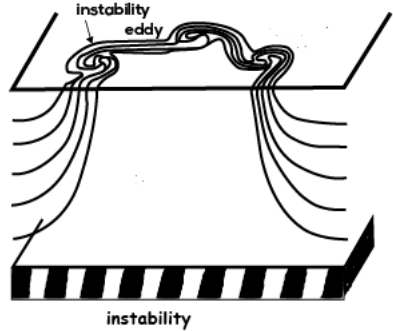
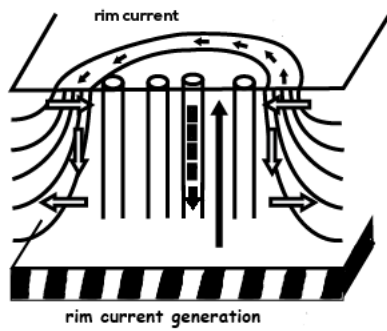
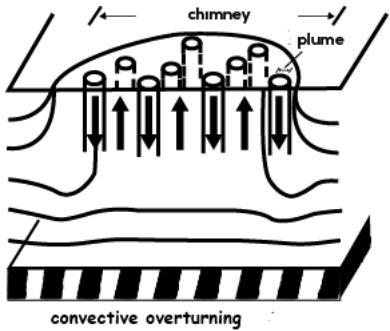
- Mixing guidato dal vento e raffreddamento dello strato superficiale durante l'inverno;
- **Convezione costiera o cascading**: affondamento delle acque dense appena formatesi nell'area costiera poco profonda;
- **Convezione in oceano aperto**: approfondimento del Mixed Layer in oceano aperto;

Fasi della convezione:

1. **Preconditioning**: la circolazione ciclonica insieme al raffreddamento superficiale indeboliscono la stratificazione e fanno perdere galleggiabilità;
2. **Convezione profonda**: avviene in plume di 1 km con intense velocità verticali (10 cm/s); l'area di formazione dei plume può essere molto estesa (superiore a 100 km di superficie);
3. **Scambio laterale o spreading**: trasferimento orizzontale o avvezione.

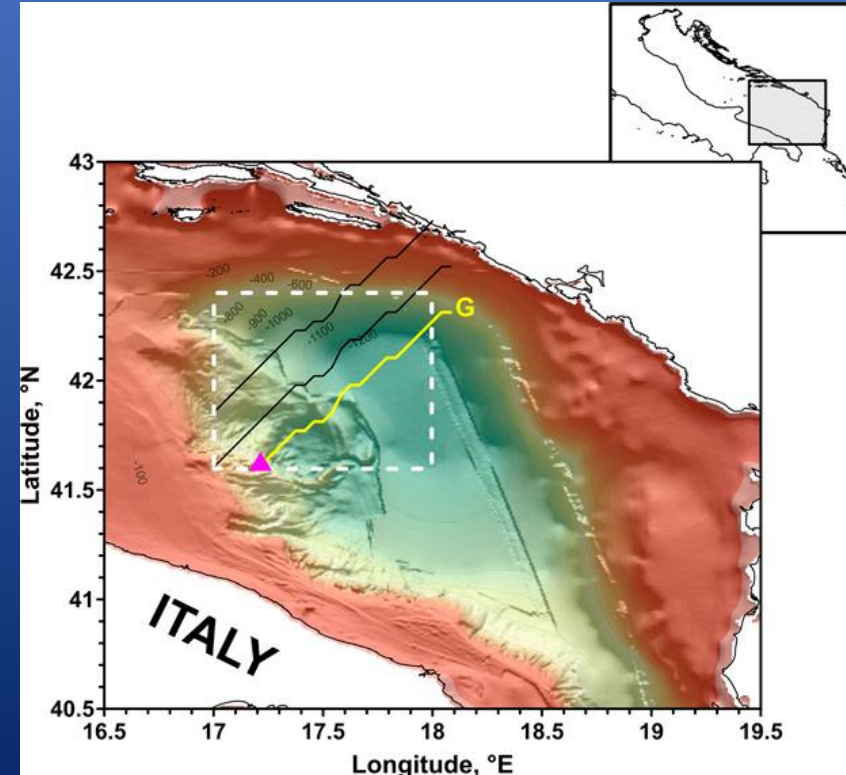
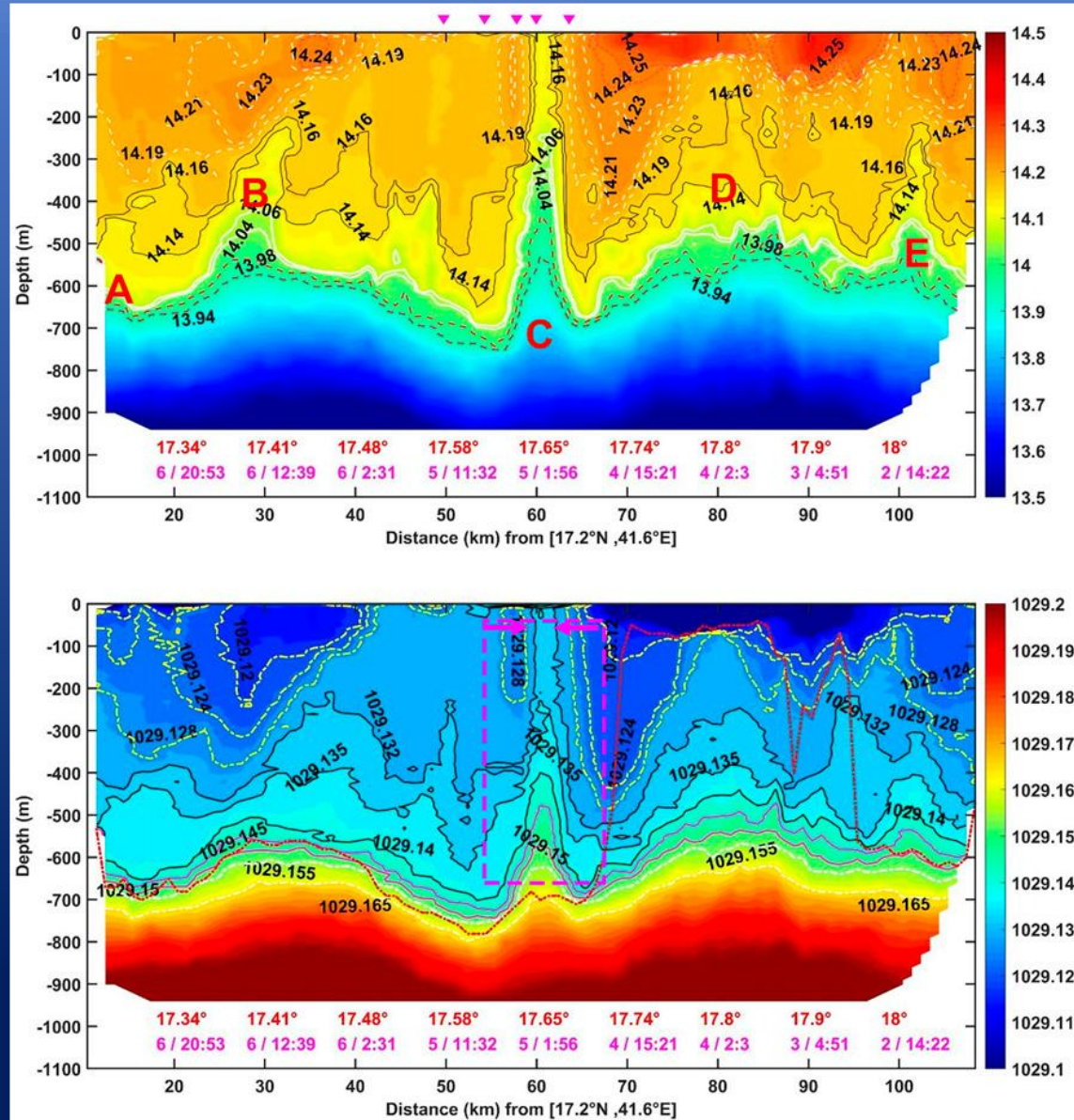


Processi di Convezione

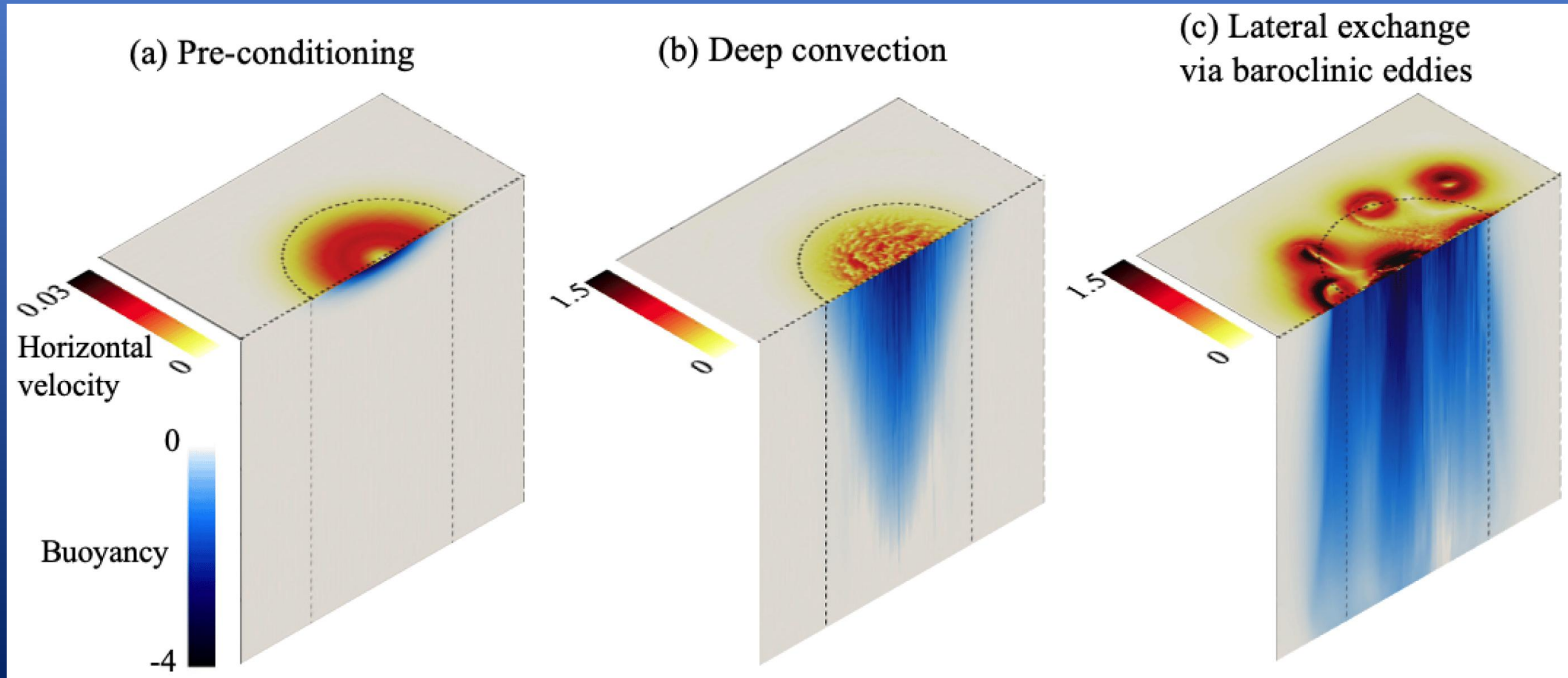


- La formazione dei camini di convezione (**chimney**) è dovuta a due processi di **preconditioning**: forti flussi di calore dalla superficie del mare e circolazione ciclonica.
- Un camino si forma quando esiste una «perdita» di galleggiamento relativamente forte dalla superficie dell'oceano per almeno 1-3 giorni.
- La durata nel tempo, la profondità e il diametro del camino dipendono dal flusso di galleggiamento e dalla stratificazione dell'oceano circostante.
- L'area caratterizzata da camini convettivi è estesa;
- Quando la perdita di calore rallenta, l'oceano tende nuovamente a stratificarsi;
- In questa fase la **corrente al boundary** diventa instabile e meandriforme e forma dei vortici geostrofici (eddy) che contribuiscono allo scambio di fluidi e proprietà tra la zona di convezione e l'ambiente circostante.
- Quando l'attività convettiva cessa il camino di convezione si erode in diverse piccole strutture coniche, chiamate **coni**, che si propagano verso l'esterno trasportando l'acqua fredda lontano dall'area di raffreddamento.

Formazione di coni di convezione ciclonici in Sud-Adriatico

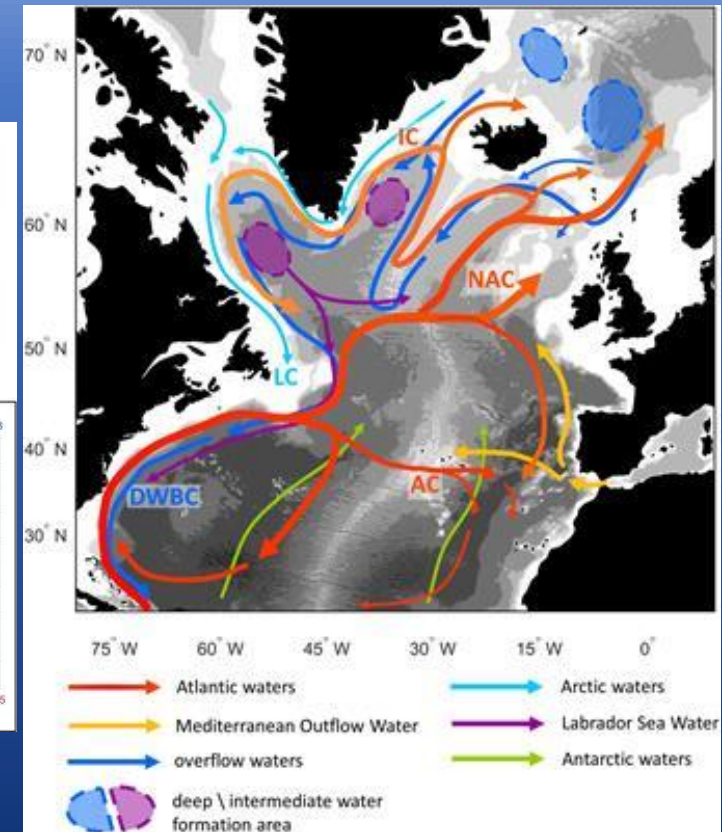
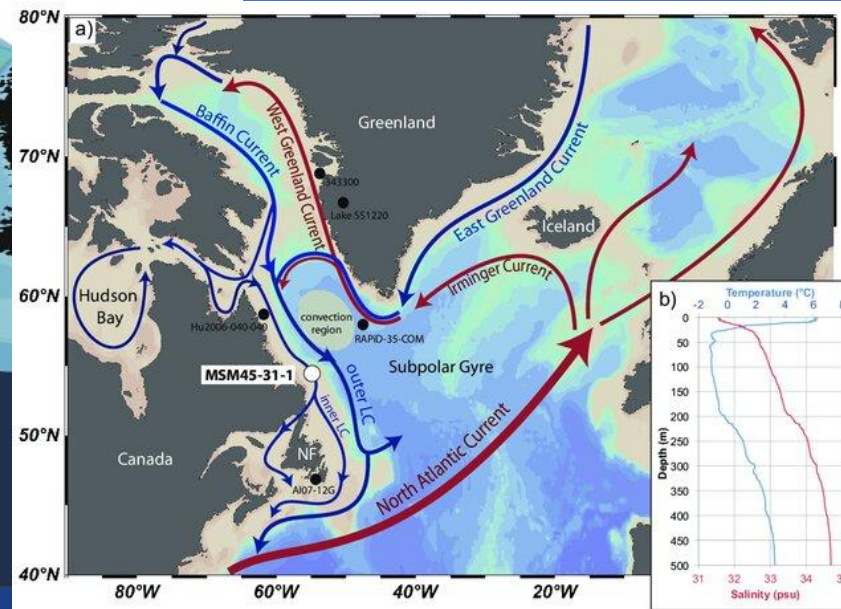
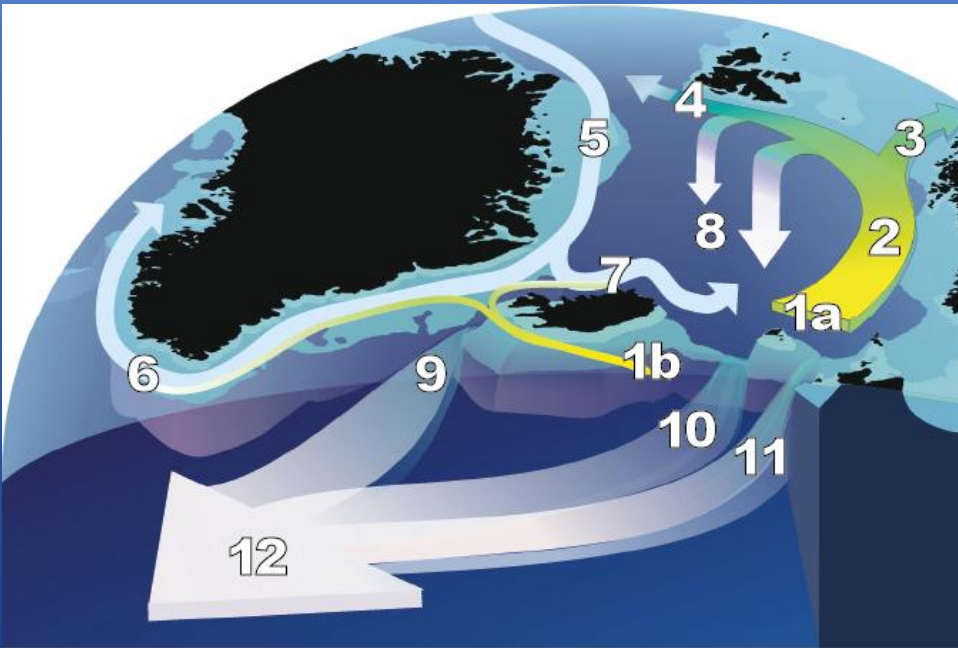


Processi di formazione di acqua densa



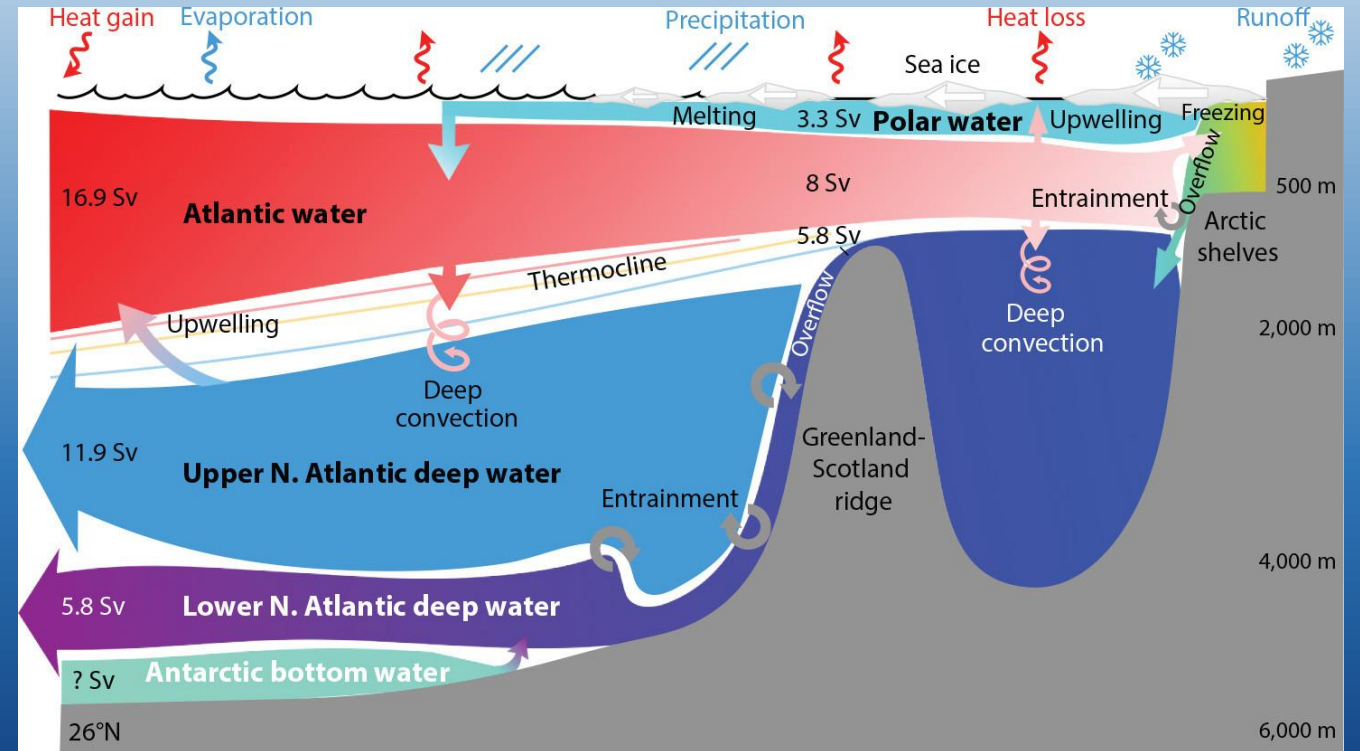
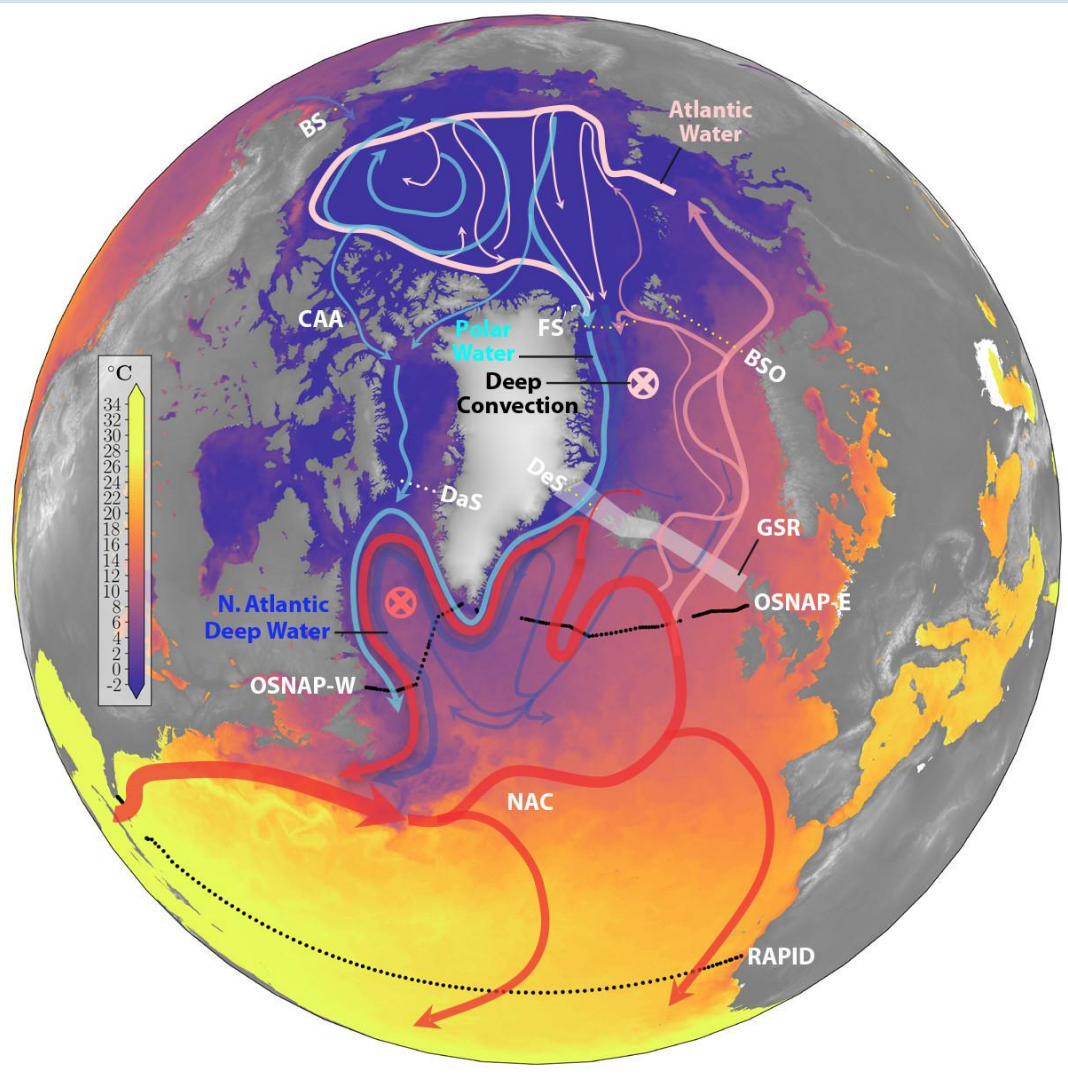
Galleggiabilità (Buoyancy): la perdita/guadagno di galleggiabilità (valori negativi/positivi di buoyancy) corrisponde ad un aumento/diminuzione di densità del fluido

Aree di convezione: Artico

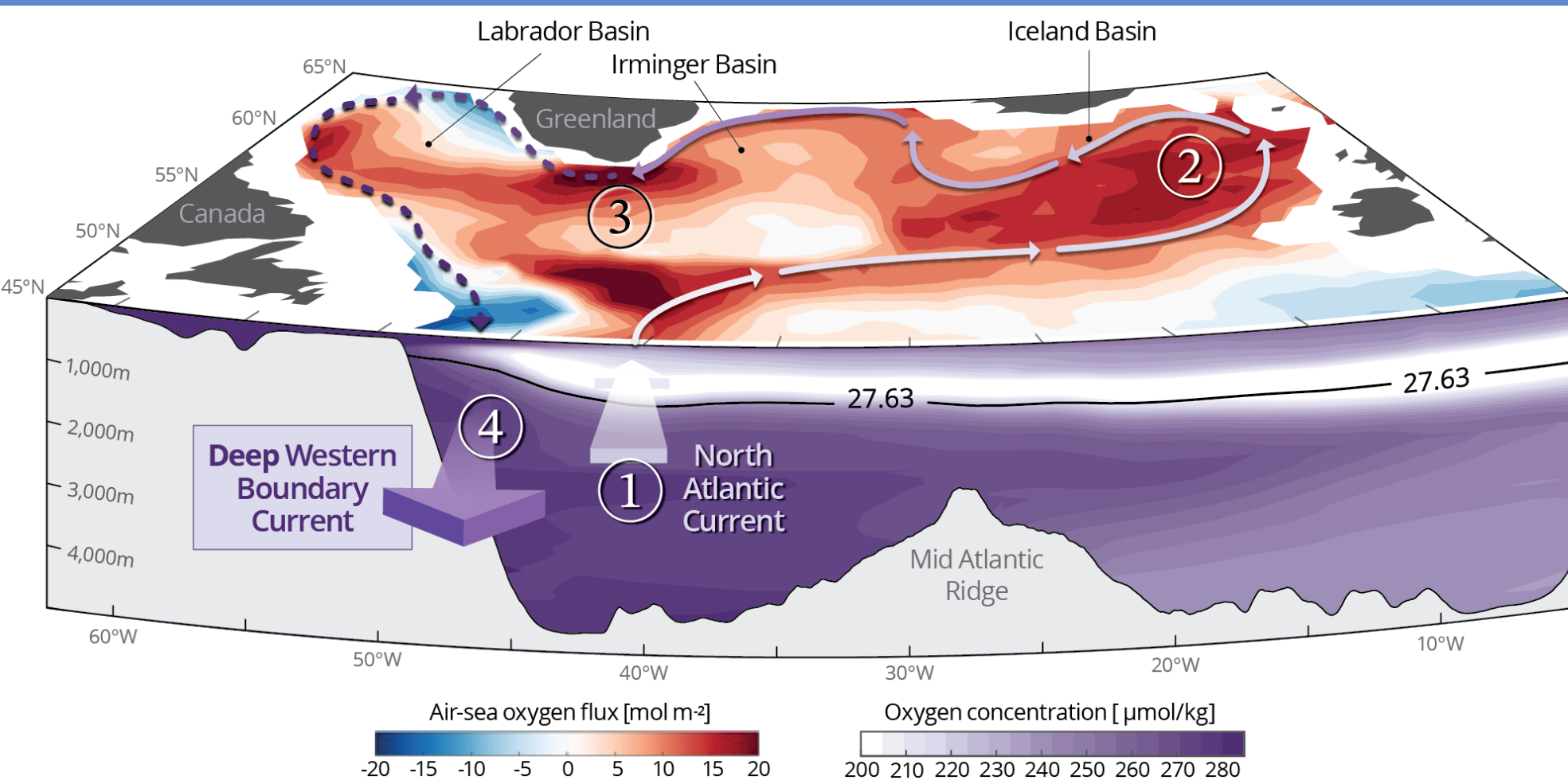


- ✓ Le acque profonde dell'Atlantico settentrionale si formano nei mari del nord tra la Groenlandia, l'Islanda e la Norvegia quando l'acqua calda e salata proveniente dal sistema della Corrente del Golfo (1a e 1b) si raffredda e si inabissa.
- ✓ L'acqua calda prosegue verso nord come Norwegian Current (2), che si divide in due quando raggiunge l'Artico (3,4).
- ✓ L'acqua polare fredda di superficie scorre verso sud nella East Greenland Current (5). Questa si mescola con le acque più calde dell'Atlantico, aggira la punta meridionale della Groenlandia (6) e sfocia nel Mare del Labrador.
- ✓ L'acqua densa si forma nel Norwegian and Labrador seas (8, 9) e si propaga (spreading) nell'Oceano Atlantico (10, 11, 12).

Aree di convezione: Artico



Aree di convezione e ventilazione: Artico



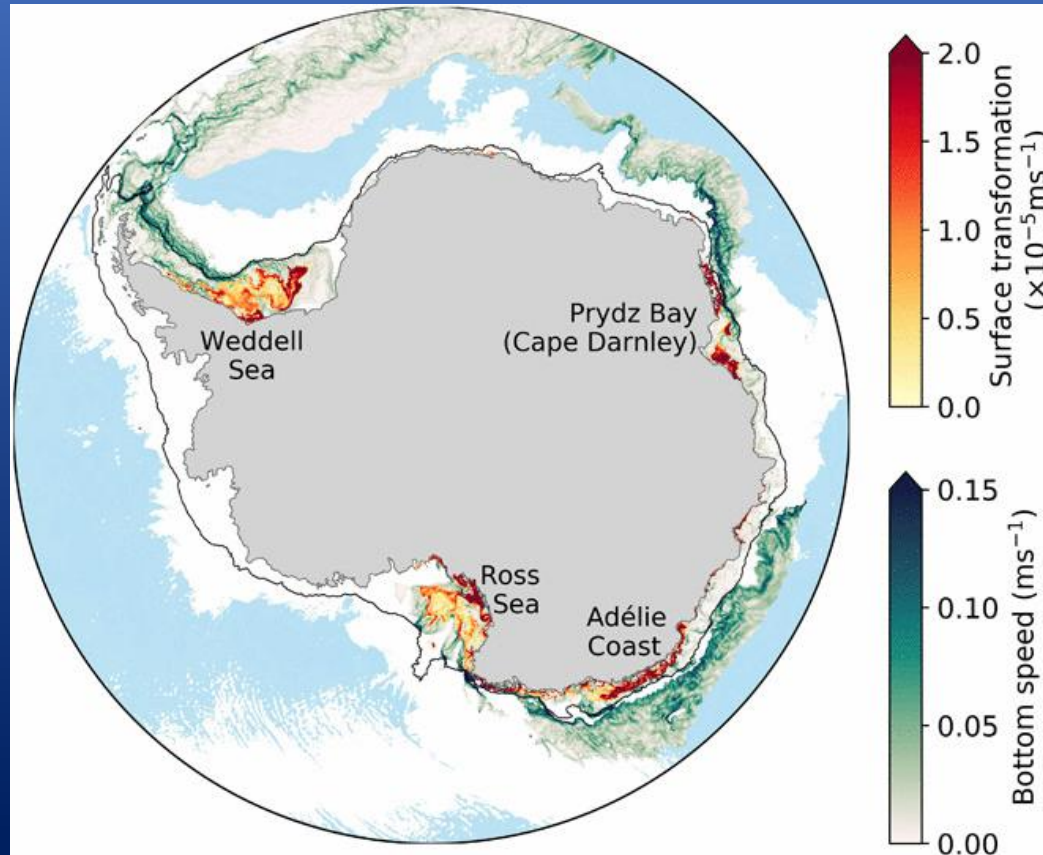
- Quando la **NAC** entra nel gyre subpolare dalle regioni subtropicali, trasporta acqua calda e a basso contenuto di ossigeno verso il polo, in prossimità della superficie (1).
- Le acque trasportate dal gyre vengono modificate dalla perdita di calore in superficie e dall'assorbimento di ossigeno, con il risultato che diventano progressivamente più dense e più ossigenate man mano che vengono trasportate verso nord (2)

- Il ramo superiore dell'AMOC ha già subito un significativo aumento di ossigeno quando arriva nel Mare di Irminger e del Labrador. In queste regioni, le acque vengono ulteriormente trasformate incorporando altro ossigeno (3).

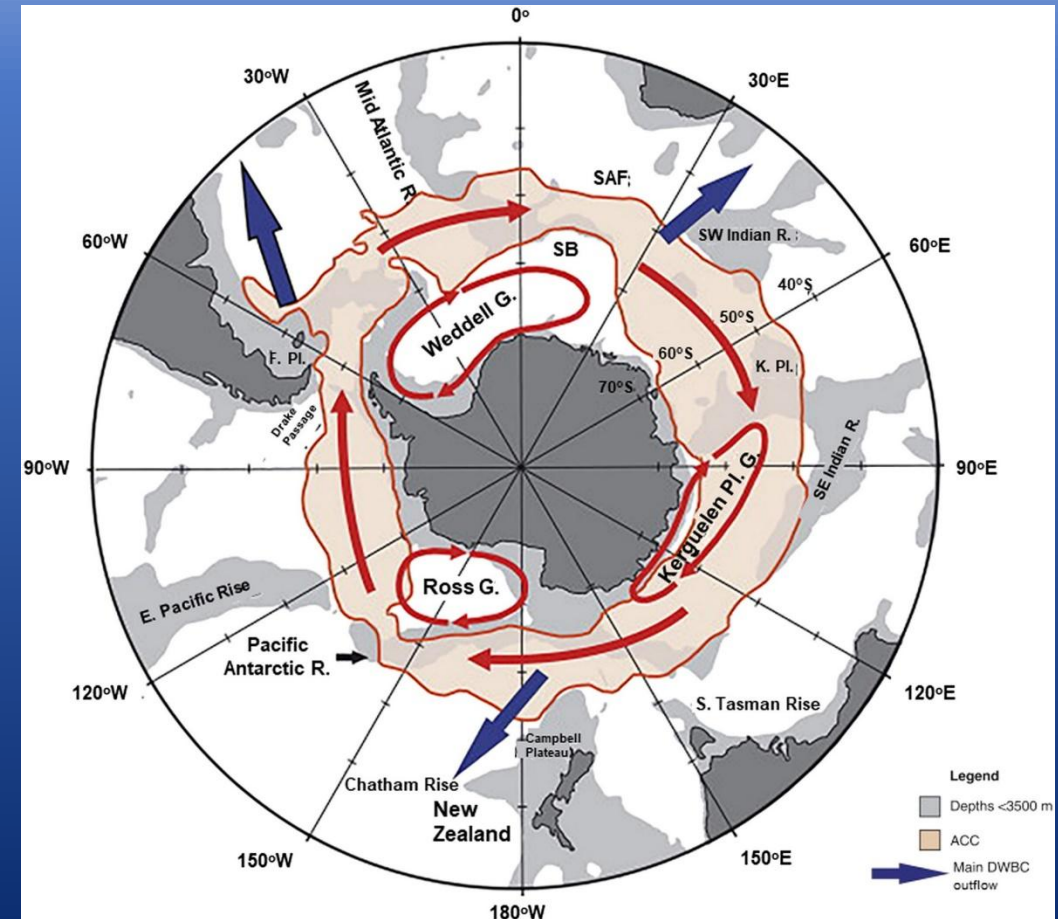
- Il ramo inferiore dell'AMOC (uscente) è molto più ricco di ossigeno (4), con conseguente trasporto netto di ossigeno verso l'equatore.

Aree di convezione: Southern Ocean

L'acqua densa si forma in 4 aree della piattaforma continentale, in particolare nel Gyre subtropicale del Ross Sea e del Weddell Sea



Model simulation of the source locations and descending pathways of dense water.



Le principali caratteristiche oceanografiche dell'Oceano Meridionale: (i) la Corrente Circumpolare Antartica (ACC) a sud del Fronte Subantartico (SAF) e il limite meridionale delle Upper Circumpolar Deep Water o southern boundary (SB); (ii) i gyres di Ross, Weddell e il Kerguelen Plateau; (iii) i principali punti di uscita delle deep western boundary currents (DWBC) dall'Oceano Meridionale (freccie blu).