

# Corso di Oceanografia Polare

6 CFU

48 Ore

SSD GEO/12

Docenti

Prof. Yuri Cotroneo

Prof. Pasquale Castagno

[Circolazione generali degli oceani](#)

[Trasporto di Ekman](#)



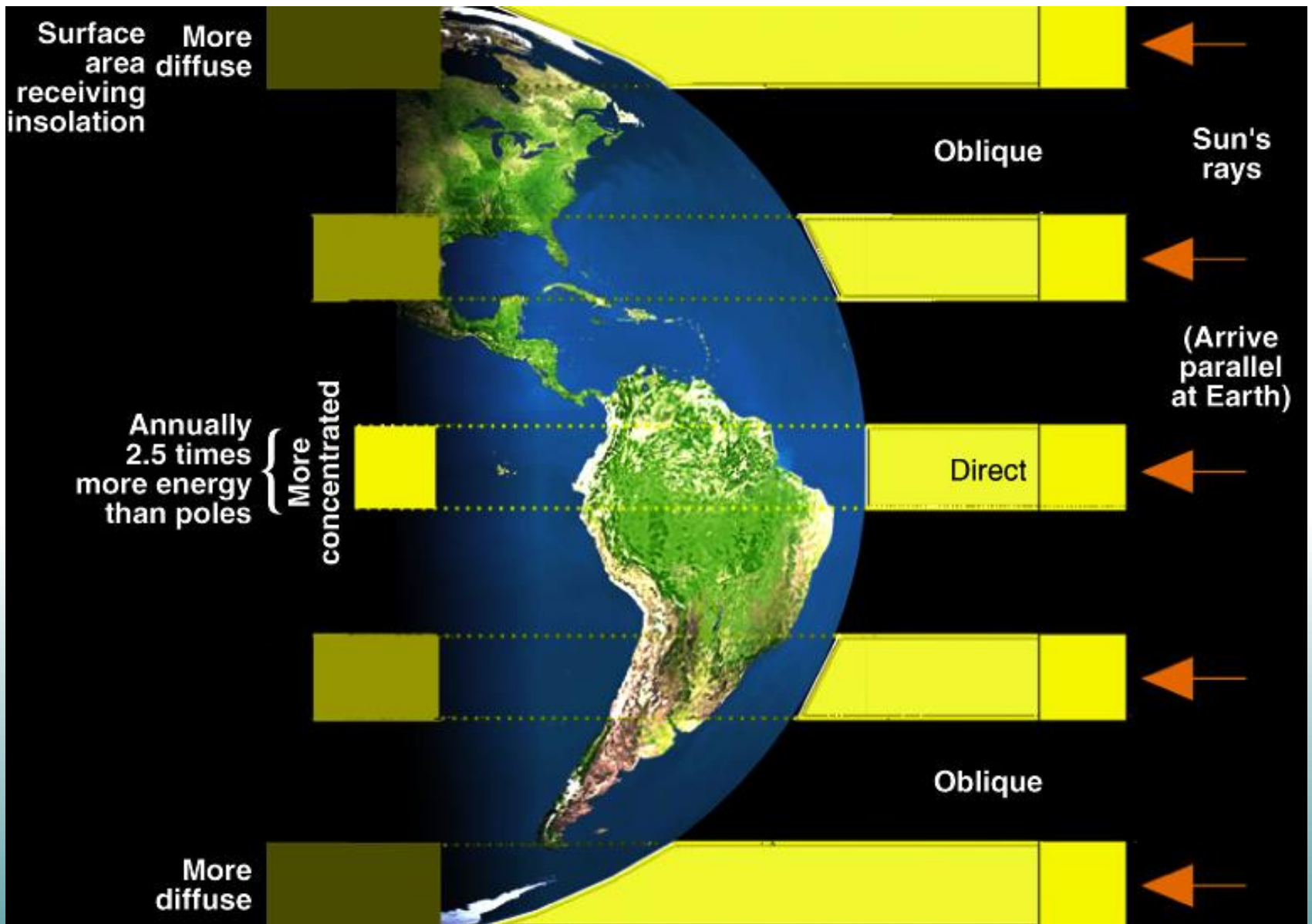
# **RUOLO DELL'OCEANO NEL SISTEMA CLIMATICO**

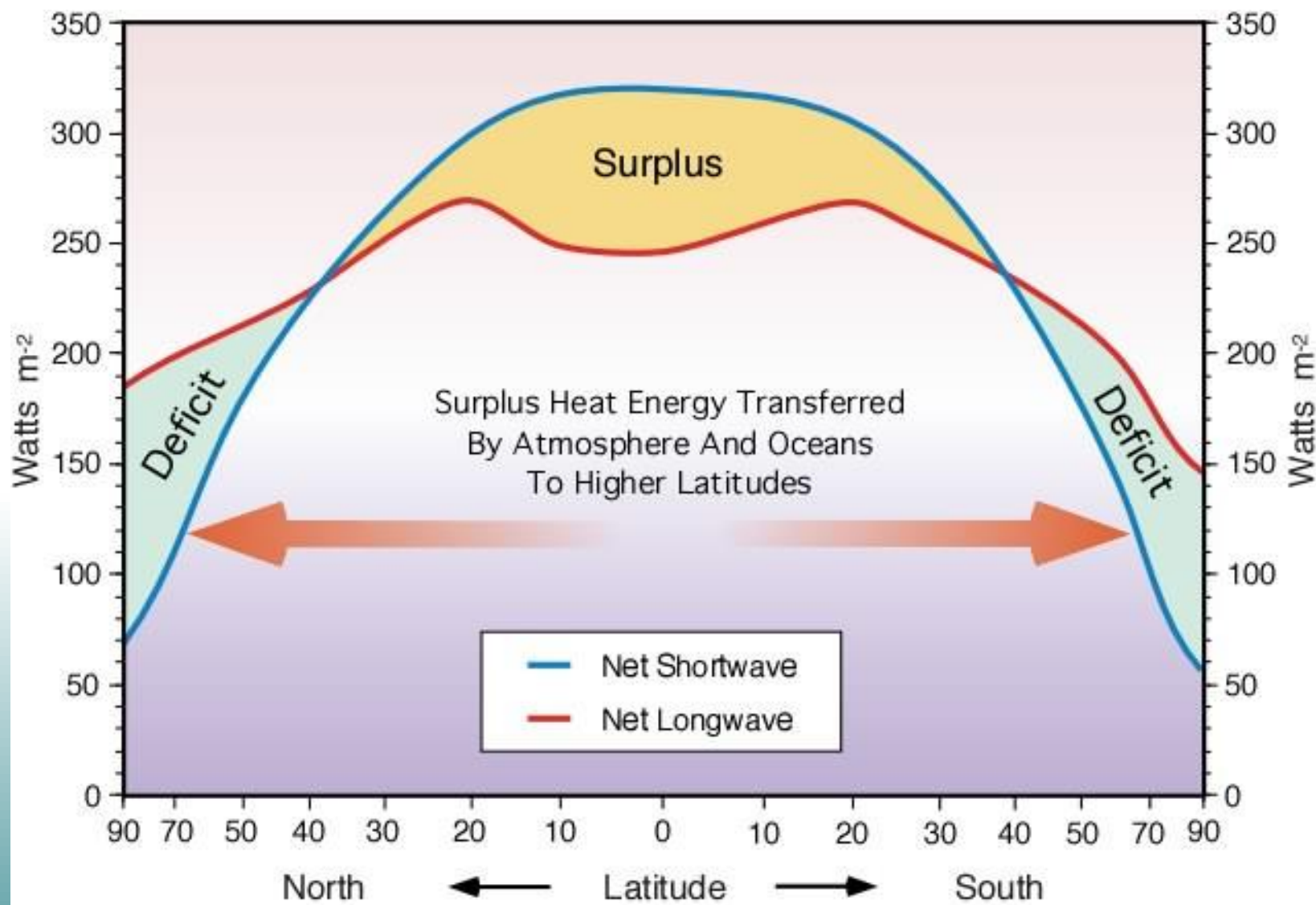
## **CORRENTI SUPERFICIALI**

**Indotte dal vento**

## **CORRENTI PROFONDE**

**Indotte dai gradienti di densità tra masse d'acqua diverse**





# Correnti di deriva innescate dal vento – Circolazione guidata dal vento

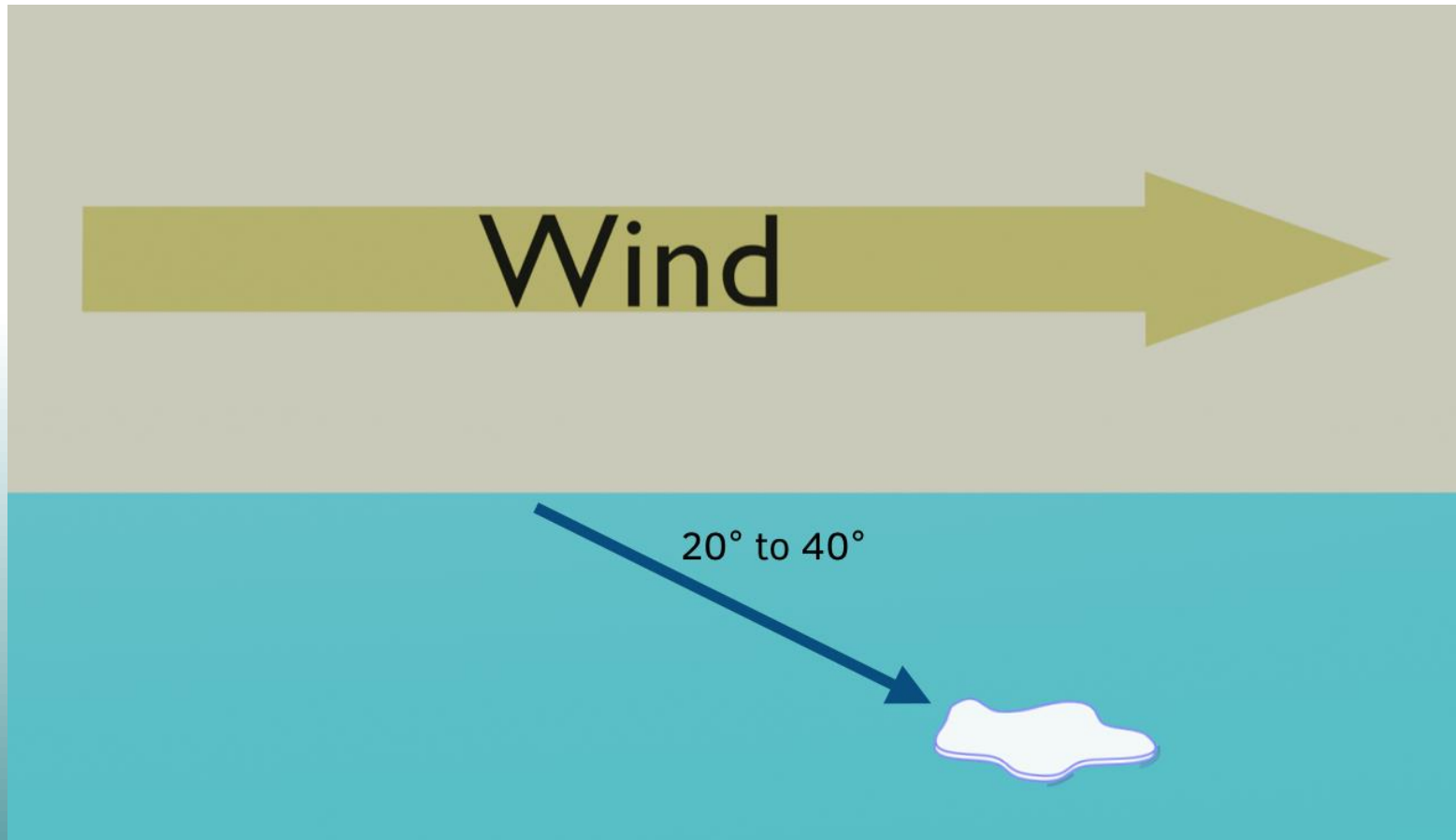
Table 9.2 Contributions to the Theory of the Wind-Driven Circulation

---

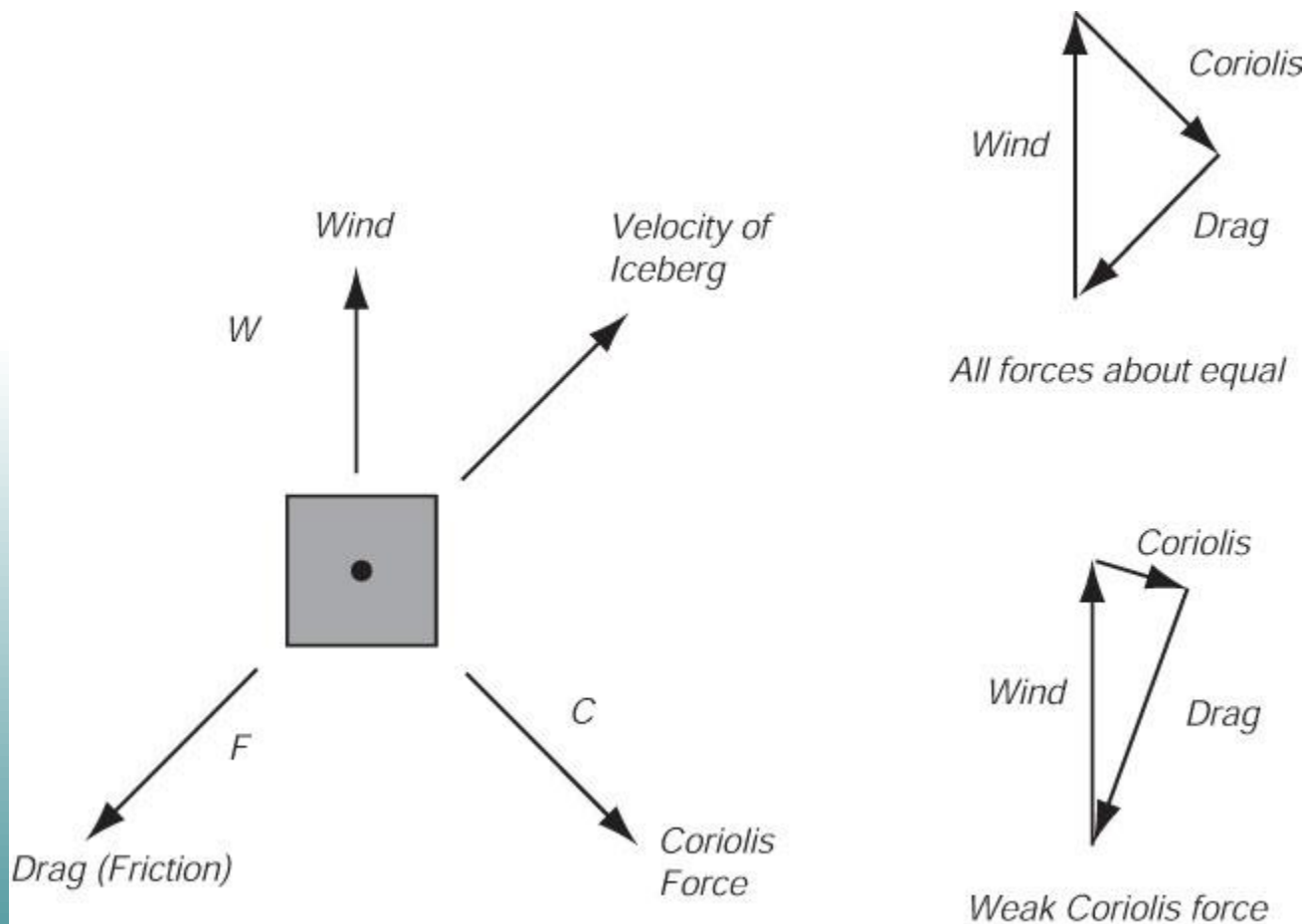
Fridtjof Nansen	(1898)	Qualitative theory, currents transport water at an angle to the wind.
Vagn Walfrid Ekman	(1902)	Quantitative theory for wind-driven transport at the sea surface.

## Argomenti Qualitativi di Nansen

Fridtjof Nansen notò che, nel mare Artico guardando da sottovento, il vento tendeva a muovere il ghiaccio con un angolo di  $20^\circ$ -  $40^\circ$  alla destra del vento.



Più tardi lavorò sul bilancio delle forze, che devono esistere quando il vento prova a spingere gli iceberg in una Terra rotante.



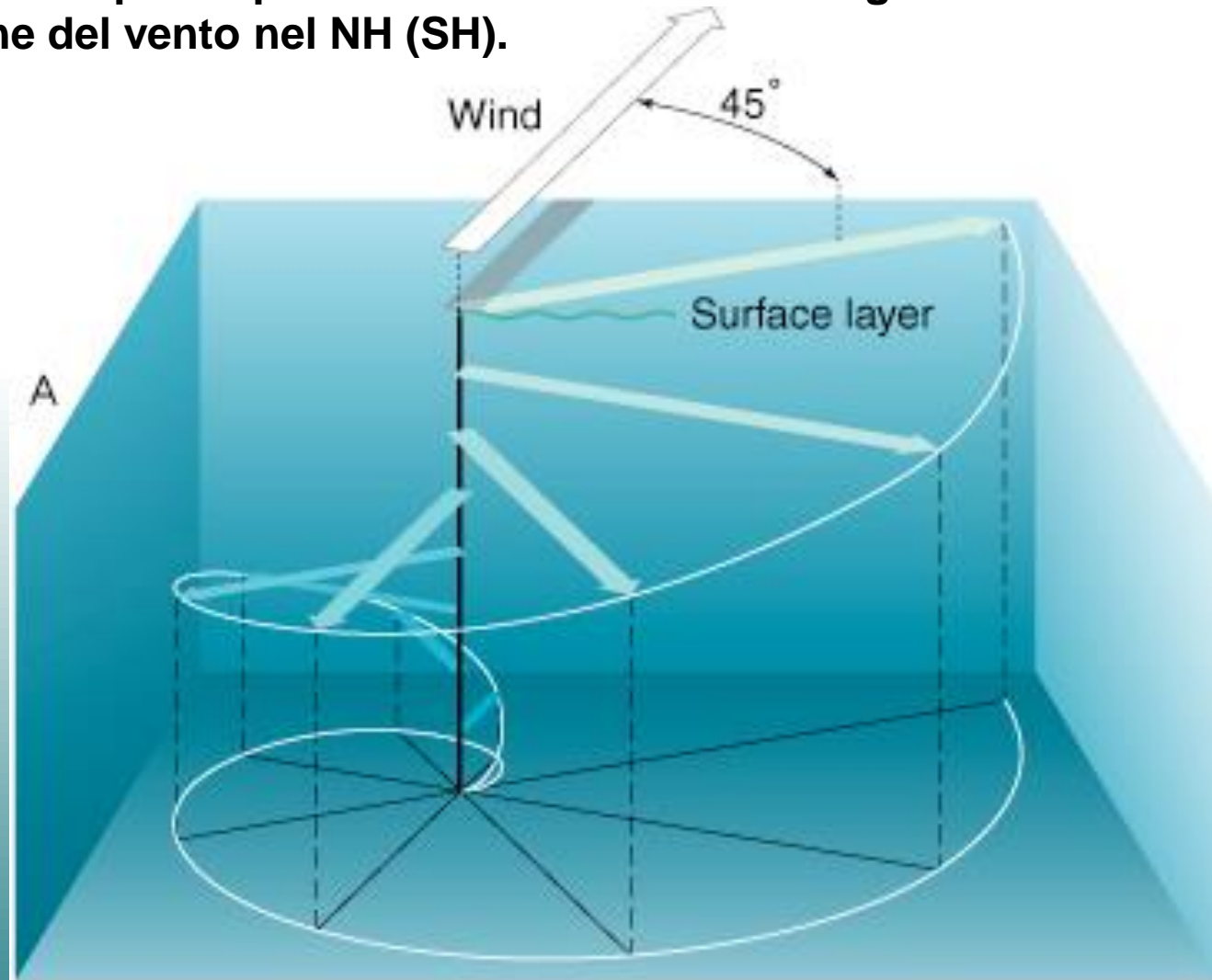
## **Teoria di Ekman**

**Se la Terra non ruotasse l'interazione sotto forma di attrito tra l'aria e la superficie oceanica, spingerebbe uno strato sottile di acqua nella stessa direzione del vento. Questo strato superficiale in movimento trascinerrebbe lo strato sottostante, mettendolo in movimento. Quest'interazione si propagherebbe verso il basso attraverso strati successivi, ciascuno con una velocità minore rispetto a quello sovrastante.**

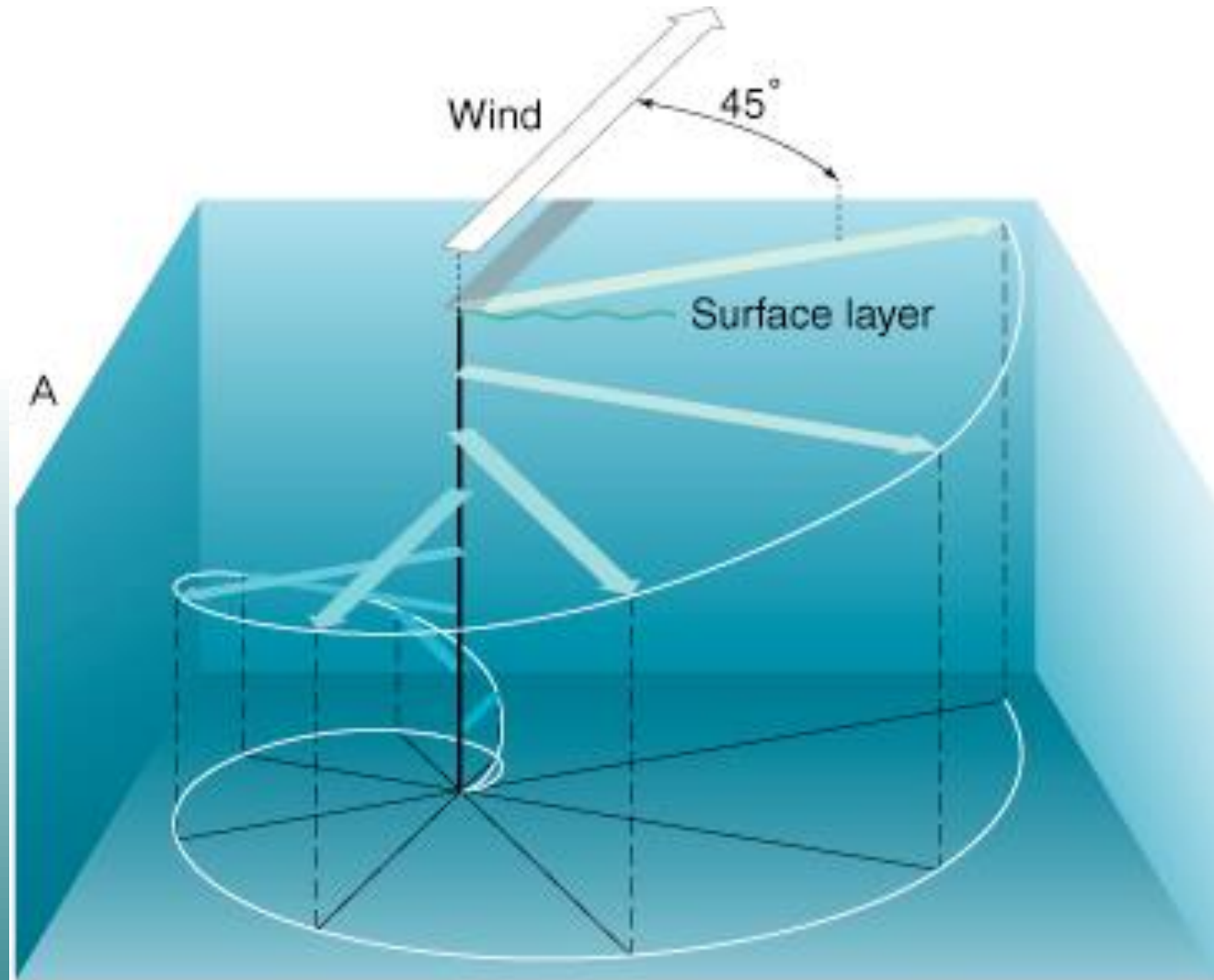
**Tuttavia, a causa della rotazione terrestre, il piccolo strato superficiale messo in moto dal vento viene deviato alla destra della direzione del vento nell'Emisfero Nord (NH) e verso sinistra nell'Emisfero Sud (SH). Questa deviazione è nota come l'effetto di Coriolis. Tranne che all'equatore, dove questo effetto è nullo, ogni strato oceanico messo in movimento dallo strato superiore, si incurva a causa della rotazione della Terra.**



La spirale di Ekman indica che ciascuno strato in movimento è deviato alla destra del movimento dello strato sovrastante; quindi la direzione del movimento dell'acqua cambia con l'aumentare della profondità. In un caso ideale, un vento costante che soffia su un oceano di profondità e estensione illimitata indurrebbe le acque superficiali a muoversi di 45 gradi a destra (sinistra) della direzione del vento nel NH (SH).



Ogni strato successivo si muove verso destra e a una velocità inferiore. A una profondità di circa 100-150m l'acqua si muove così lentamente (circa 4% della corrente di superficie) ed in direzione contraria a quella del vento che questa profondità è considerata essere il limite inferiore dell'influenza del vento sull'oceano.



**L'approccio quantitativo della teoria di Ekman che descrive la risposta dello strato superficiale dell'oceano al vento, in presenza di attrito, ci permette quindi di dare un valore a due parametri molto importanti:**

**La corrente superficiale  $V_0$  il cui valore può essere ricavato dall'intensità del vento**

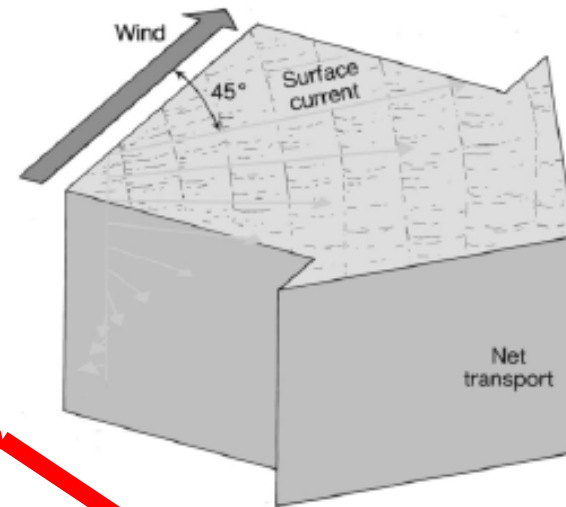
**La profondità dello strato interessato dai movimenti guidati dal vento – detto strato di Ekman – la cui profondità – detta profondità di Ekman – è funzione della forza del vento.....ma non solo**

# Ekman Depth

Ekman depth is functionally defined as the depth at which the current moves in the opposite direction of the wind stress

$$u = V_0 e^{az} \cos\left(\frac{\pi}{4} + az\right) \hat{i}$$

$$v = V_0 e^{az} \sin\left(\frac{\pi}{4} + az\right) \hat{j}$$



**Note:** find  $z$  ( $D_E$ ) such that cosine terms = -1 and sine term is 0.

$$D_E = \sqrt{\frac{2\pi A_z}{f}}$$

$$a = \sqrt{\frac{f}{2A_z}}$$

$$V_0 = \frac{\tau}{\sqrt{\rho_w^2 f A_z}}$$

$$D_E = \sqrt{\frac{7.6}{\sin(\phi)}} U_{10}$$

$$\tau = \rho_{air} C_D U_{10}^2$$

**Note:** Ekman Depth is a function of wind speed and latitude.

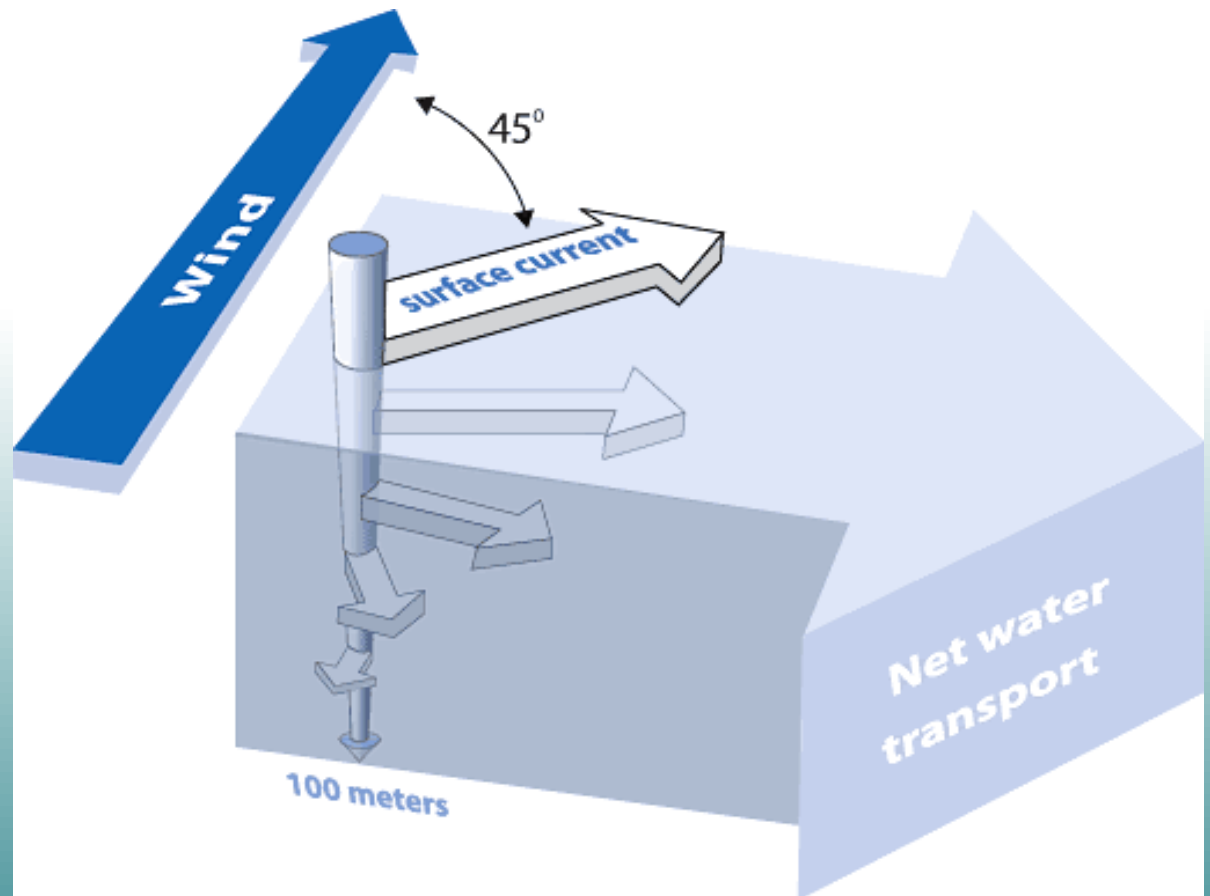
La profondità di Ekman è quindi funzione dell'intensità del vento e della latitudine.

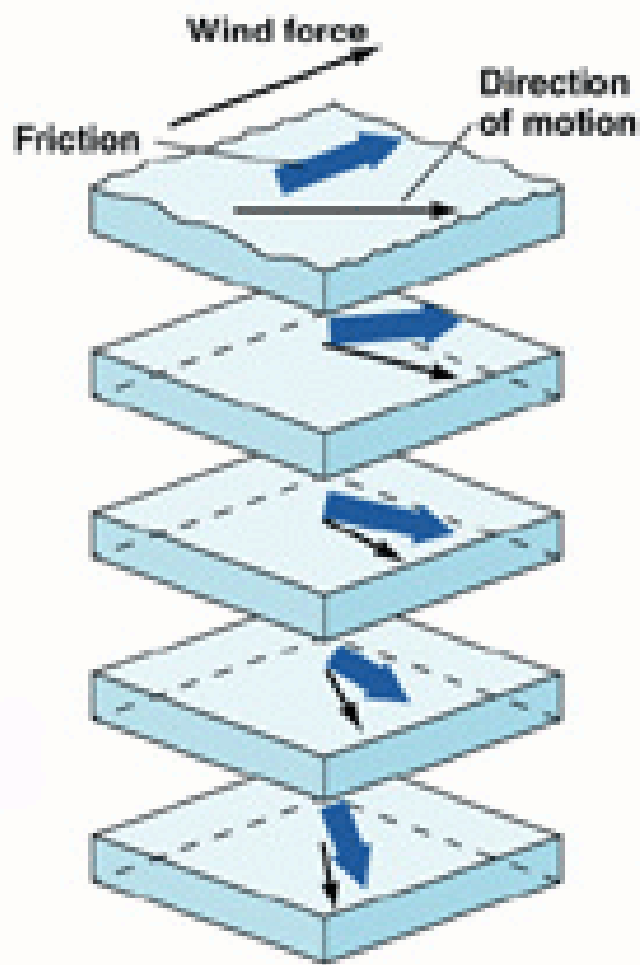
$U_{10}$ (m/s)	Latitude	
	15°	45°
5	75 m	45 m
10	150 m	90 m
20	300 m	180 m

Con venti tipici, la profondità dello strato di Ekman varia da circa 45m a 300m e la velocità della corrente superficiale varia da 2.5% al 1.1% della velocità del vento dipendendo dalla latitudine.

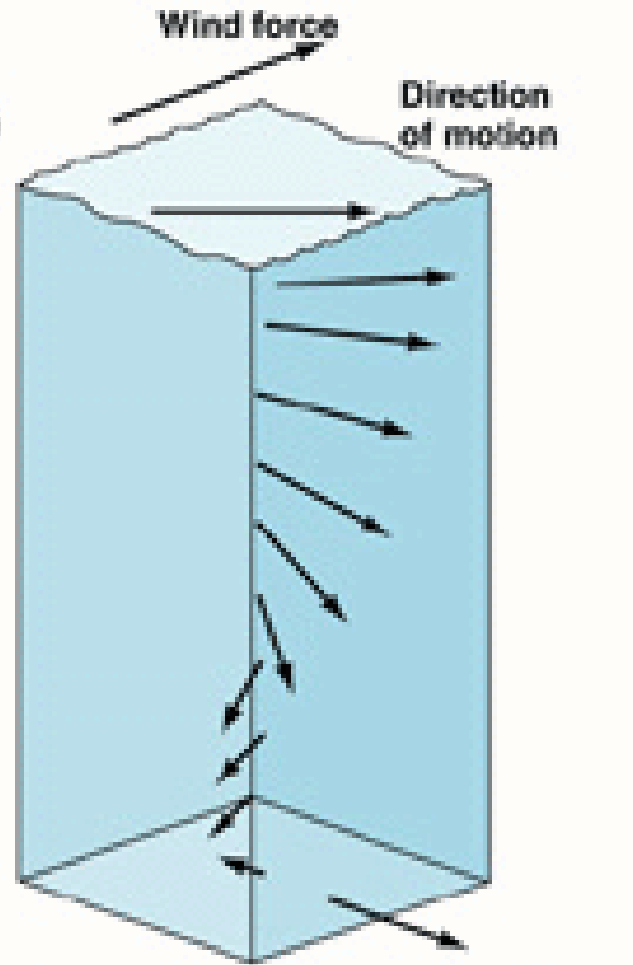
## TRASPORTO DI EKMAN

Nel NH (SH) l'integrale di tutti i vettori fino a una profondità di 100-150m fornisce un flusso risultante di 90 gradi a destra (sinistra) della direzione del vento. Questo trasporto netto di acqua dovuto all'interazione tra vento e superficie oceanica è detto trasporto di Ekman.





b



c

Average flow

Northern Hemisphere

Wind



Ship

Iceberg



Iceberg

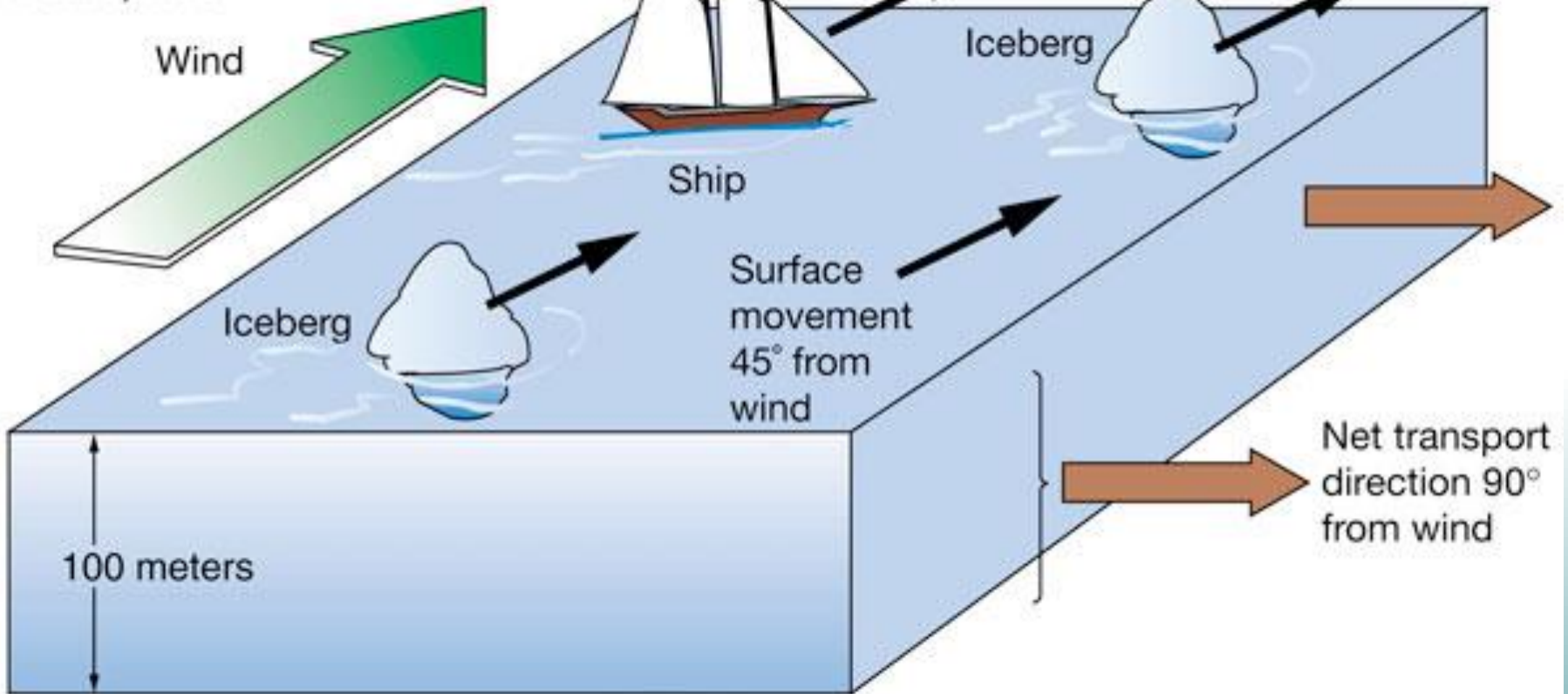


Surface movement  
45° from wind

100 meters

Net transport direction  
90° from wind

Copyright © 2004 Pearson Prentice Hall, Inc.



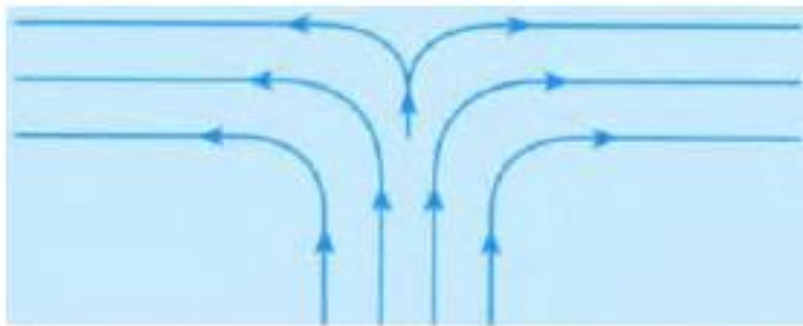


L'effetto del vento sulla superficie del mare, tuttavia, non causa solo movimenti orizzontali, ma è in grado di innescare movimenti verticali.

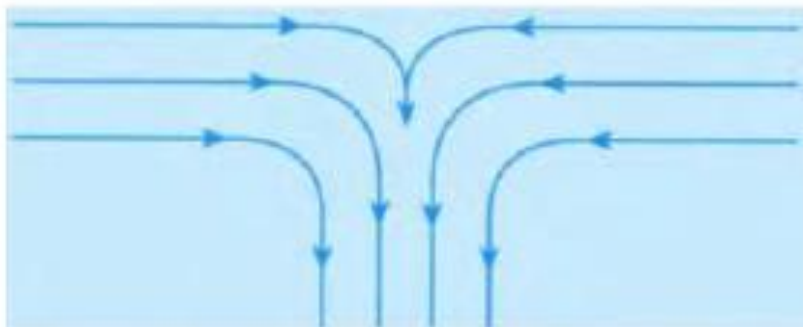
I movimenti verticali di questo tipo sono la risultante dello sviluppo di zone di convergenza e divergenza.

Le prime sono caratterizzate da un «accumulo» di acqua che innesci l'affondamento di masse d'acqua superficiali detto **DOWNWELLING**

Le seconde – le zone di divergenza – sono caratterizzate dall'allontanamento di acqua dalla superficie e a conseguente richiamo di acqua dalle profondità più elevate detto **UPWELLING**



(a)



(b)

Figure 3.23 Schematic diagrams to illustrate how (a) divergence of surface waters leads to upwelling while (b) convergence of surface waters leads to sinking.

**UPWELLING e DOWNWELLING** costituiscono le due fasi del cosiddetto **EKMAN PUMPING**, ovvero del «pompaggio» di masse d'acqua verso la superficie o verso il fondo ad opera dell'effetto del vento, ma questo ha anche implicazione sulla circolazione delle acque intorno alle aree di affondamento o risalita delle acque.

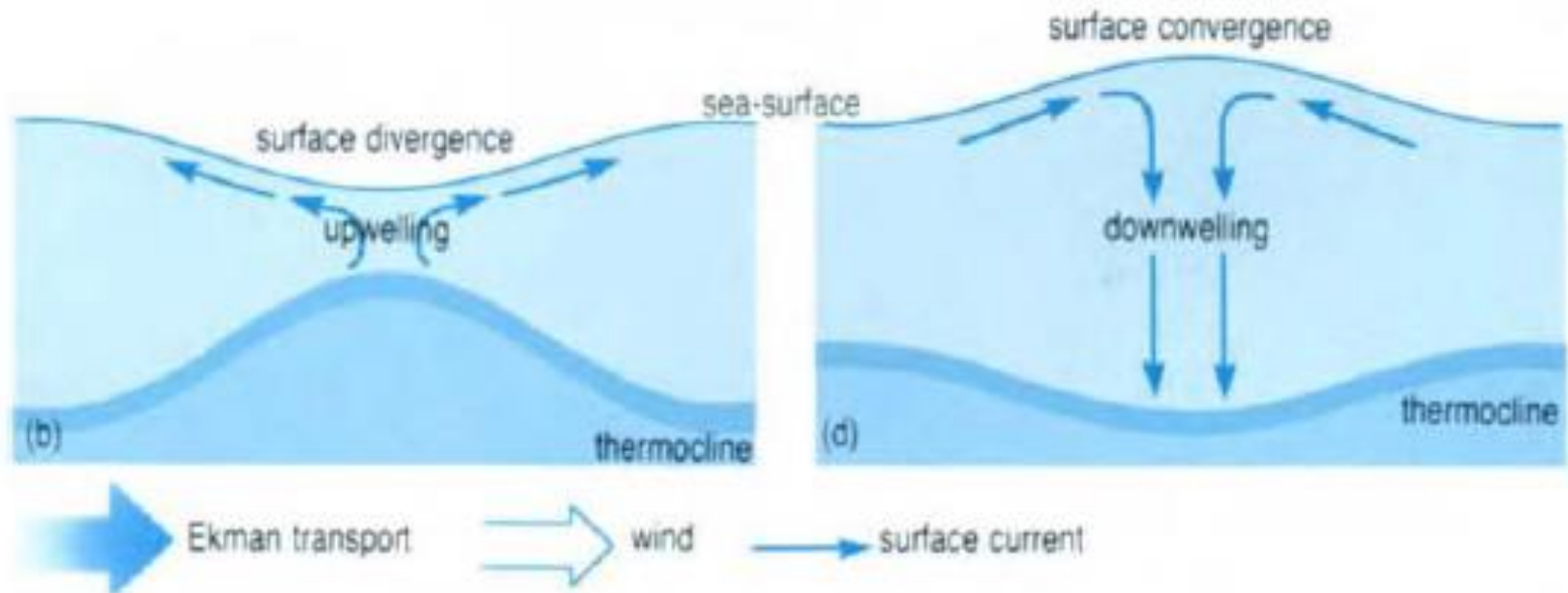
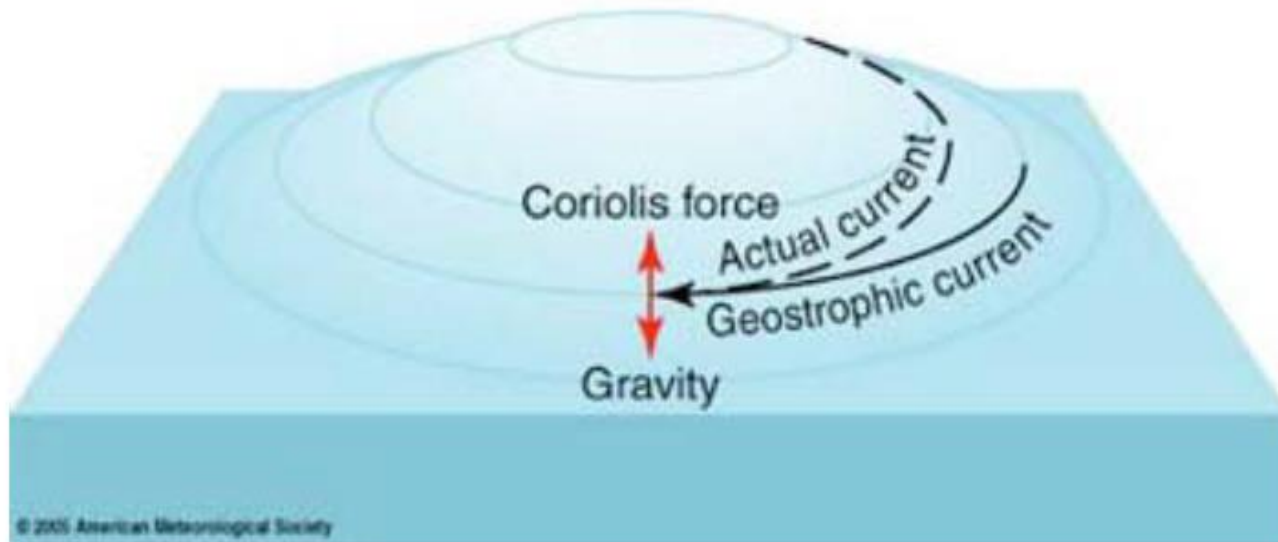


Figure 3.24 The effect of a cyclonic wind in the Northern Hemisphere (a) on surface waters. (b) on the shape of the sea-surface and thermocline. Diagrams (c) and (d) show the effects of an anticyclonic wind in the Northern Hemisphere. (Remember that in the Southern Hemisphere, cyclonic = clockwise and anticyclonic = anticlockwise.)

Nelle zone di downwelling, il meccanismo di trasporto di Ekman, trascina le acque provocandone la convergenza.

Il livello dell'acqua si innalza e si crea una zona di alta pressione. La sovrapposizione dovuta al peso della massa d'acqua così accumulata da origine a correnti ad andamento circolare, che girano attorno al rigonfiamento in senso orario.

Queste correnti che nascono dall'equilibrio tra la forza di gradiente di pressione e la forza di Coriolis prendono il nome di flussi geostrofici. E sono responsabili ad esempio della rotazione delle masse d'acqua e di aria attorno ai nuclei di bassa ed alta pressione in oceano come in atmosfera



Analogamente, nelle zone di upwelling, si instaurerà un flusso geostrofico circolare di senso inverso, antiorario nell'emisfero Nord.

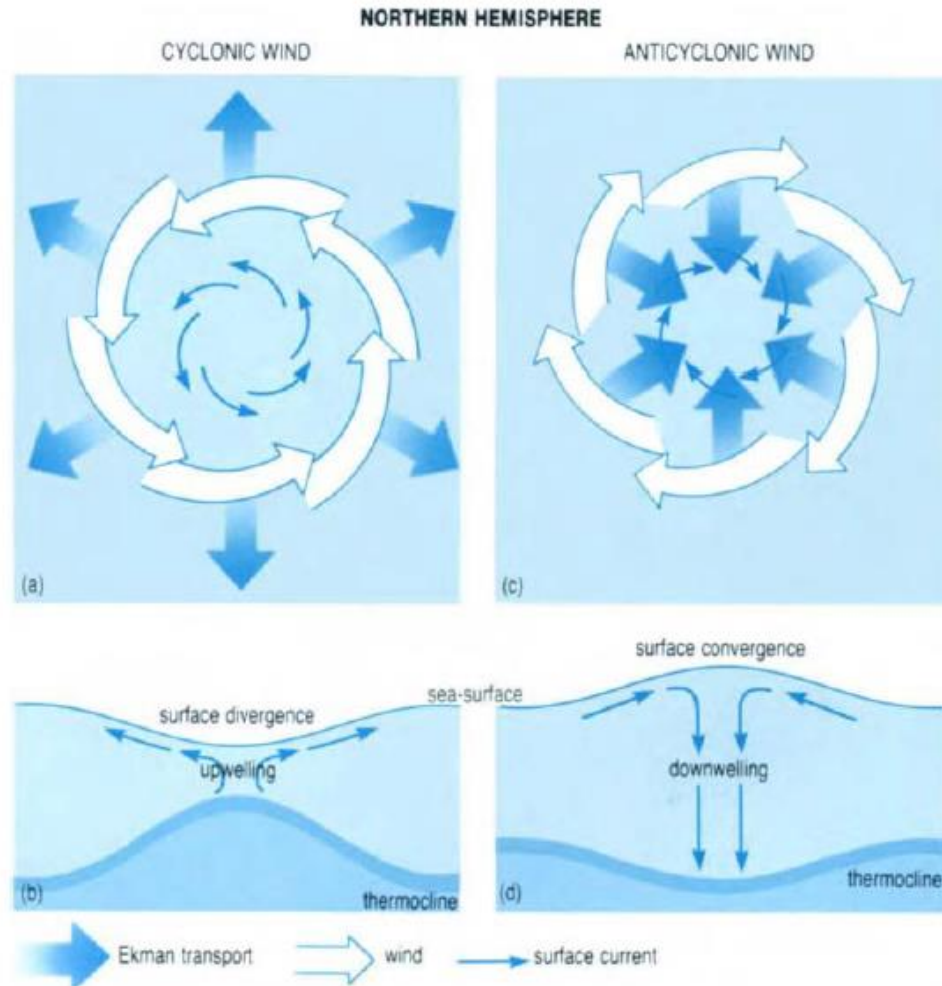


Figure 3.24 The effect of a cyclonic wind in the Northern Hemisphere (a) on surface waters. (b) on the shape of the sea-surface and thermocline. Diagrams (c) and (d) show the effects of an anticyclonic wind in the Northern Hemisphere. (Remember that in the Southern Hemisphere, cyclonic = clockwise and anticyclonic = anticlockwise.)

**EMISFERO NORD**  
**Coriolis a destra del moto**

**CICLONI**  
**ANTICICLONI**

**Basse pressioni**  
**Alte pressioni**

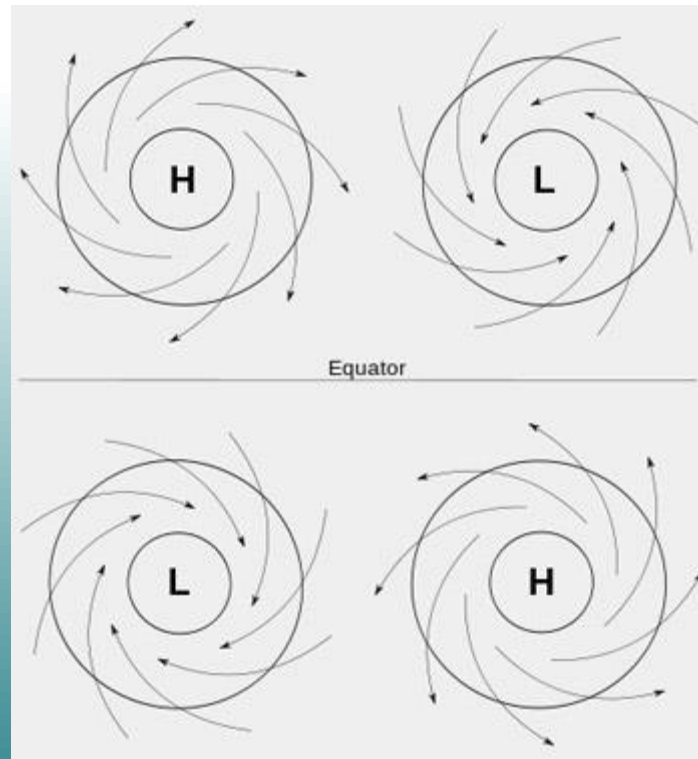
**Rotazione antioraria**  
**Rotazione oraria**

**EMISFERO SUD**  
**Coriolos a sinistra del moto**

**CICLONI**  
**ANTICICLONI**

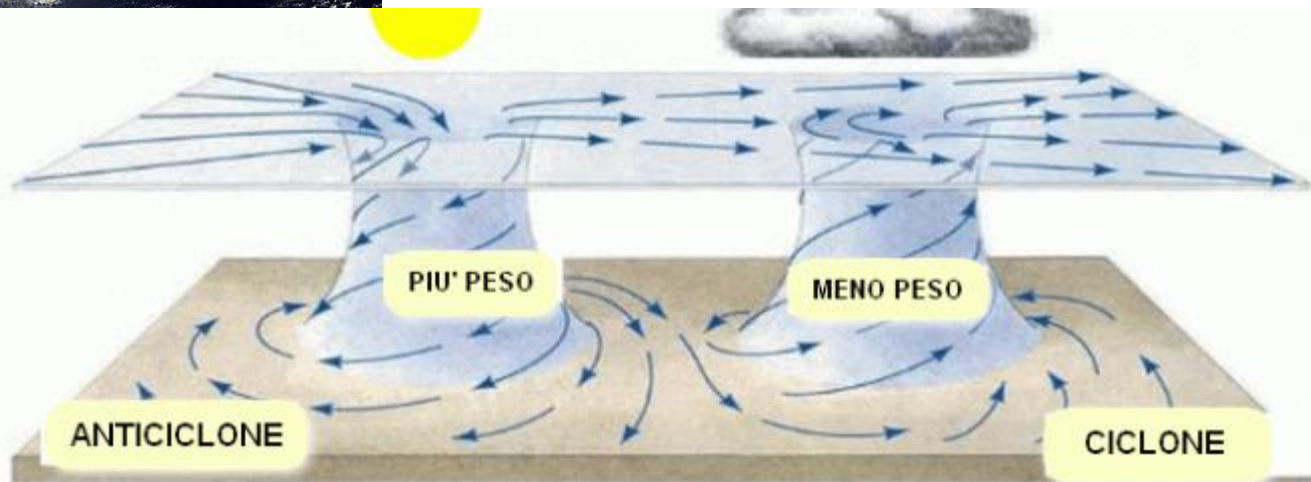
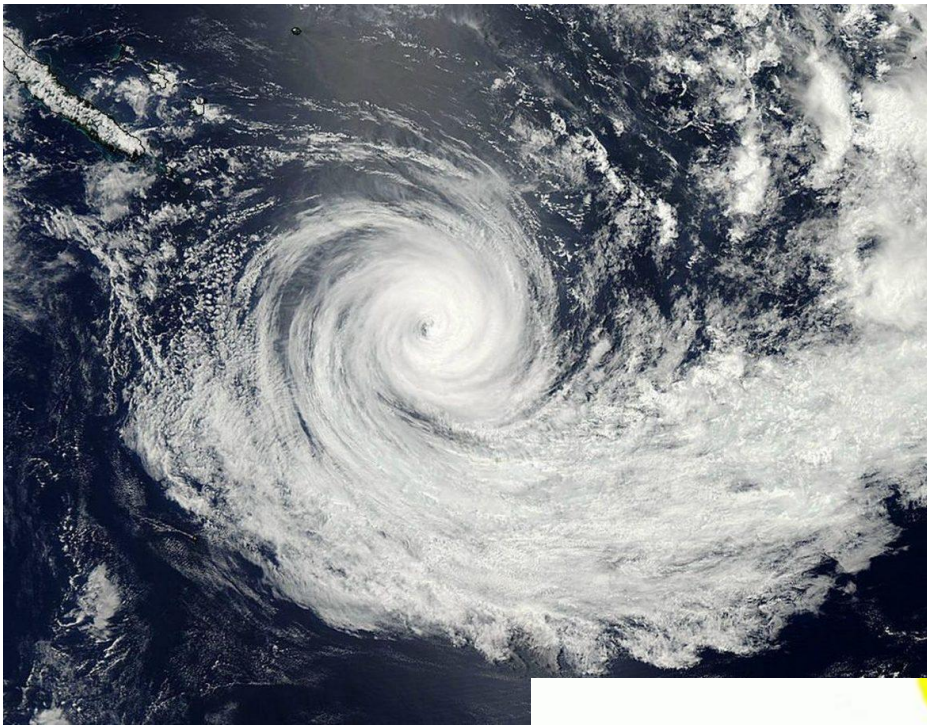
**Basse pressioni**  
**Alte pressioni**

**Rotazione oraria**  
**Rotazione antioraria**



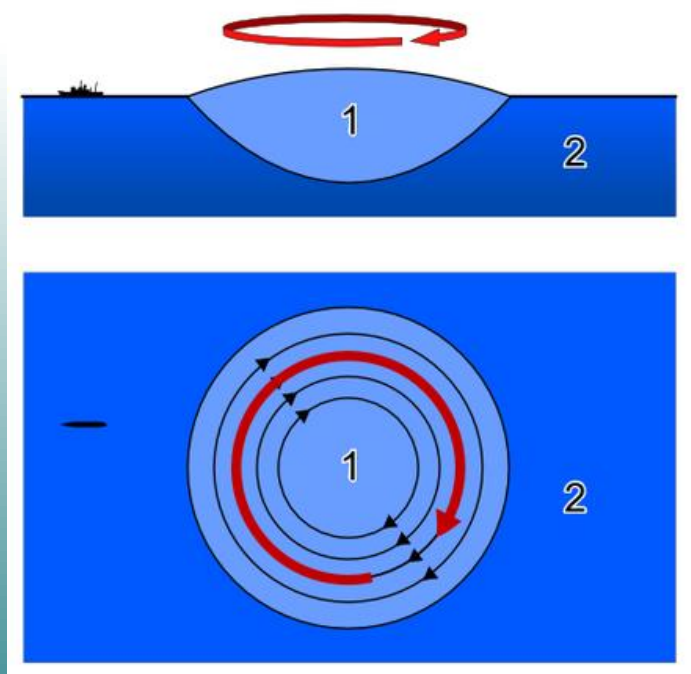
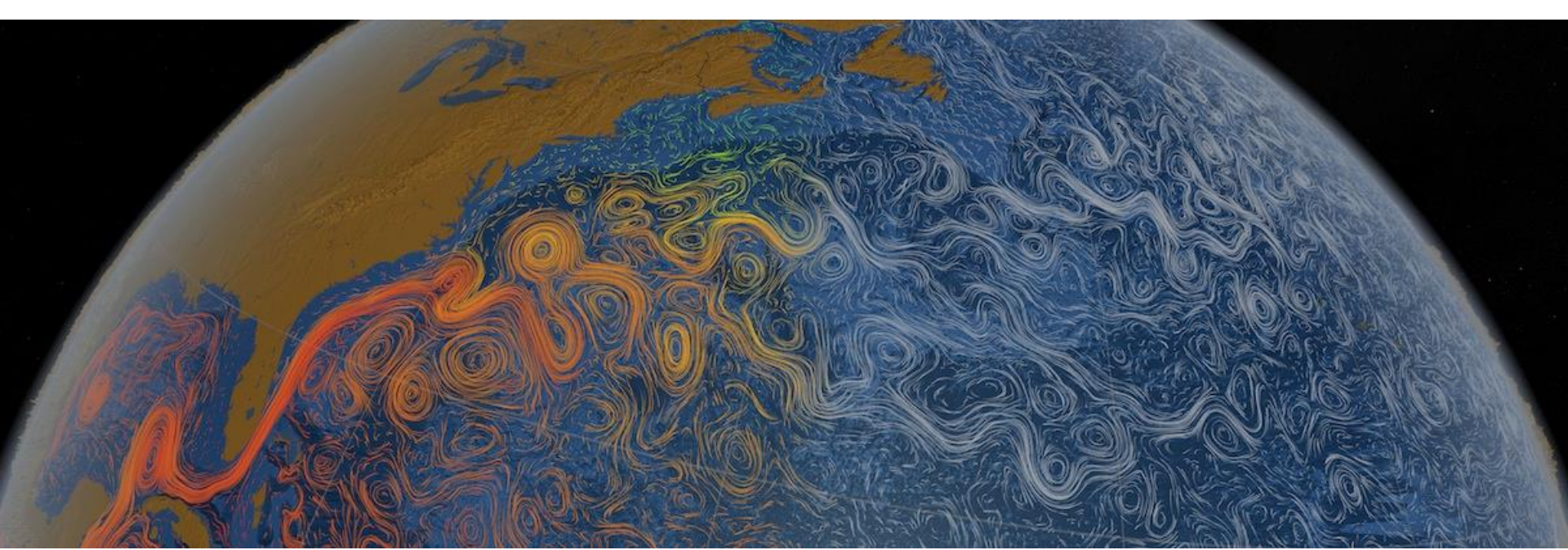
**Abbiamo quindi visto che:**

- **L'effetto del vento sulla superficie del mare provoca un trasporto netto della massa d'acqua a  $90^\circ$  dalla direzione del vento – TRASPORTO DI EKMAN – a destra o a sinistra del vento a seconda della forza di Coriolis e quindi dell'emisfero in cui ci troviamo.**
- **La convergenza o la divergenza di masse d'acqua in una determinata regione innescano movimenti verticali delle masse d'acqua – UPWELLING e DOWNWELLING**
- **Divergenze e convergenze sono in grado di attivare un gradiente di pressione che genera una circolazione rotatoria ciclonica o anticiclonica, il cui verso dipende dall'emisfero in cui ci troviamo. Queste circolazioni in atmosfera o in oceano si definiscono GEOSTROFICHE**



ISOBARE DI SUPERFICIE

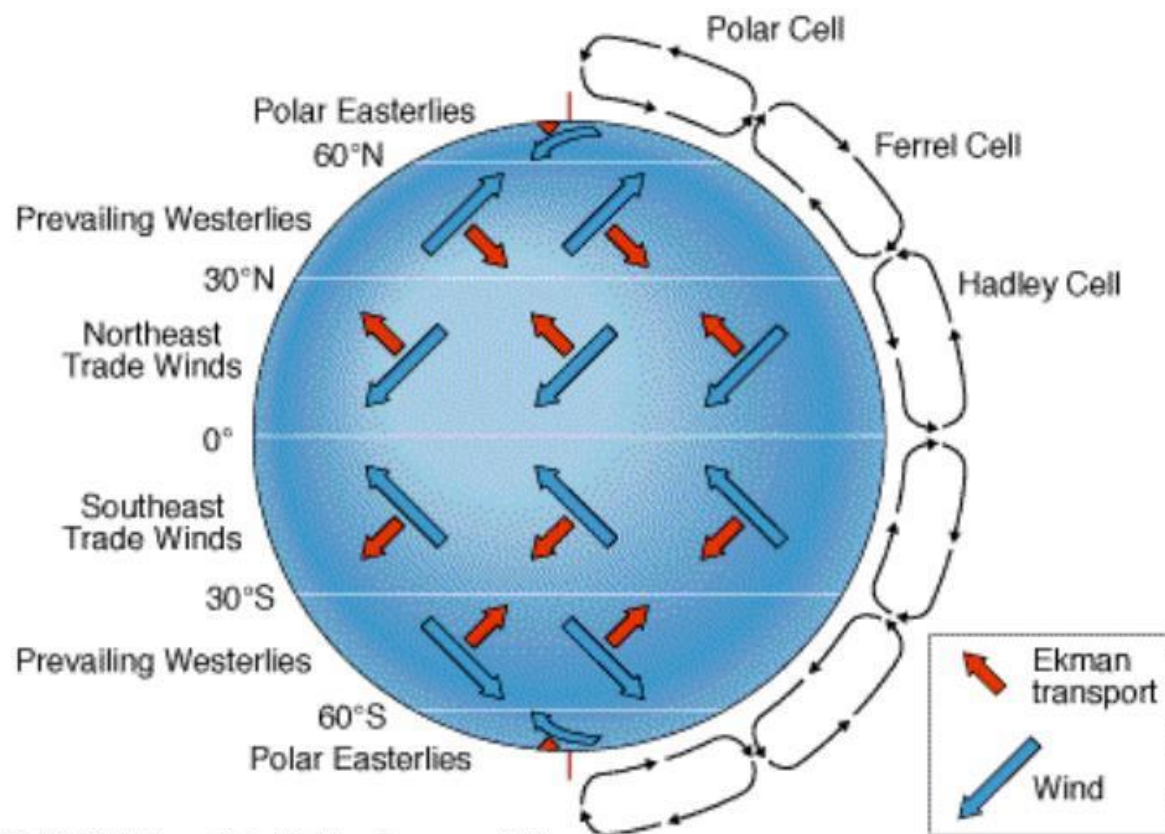






# Open Ocean Surface Currents

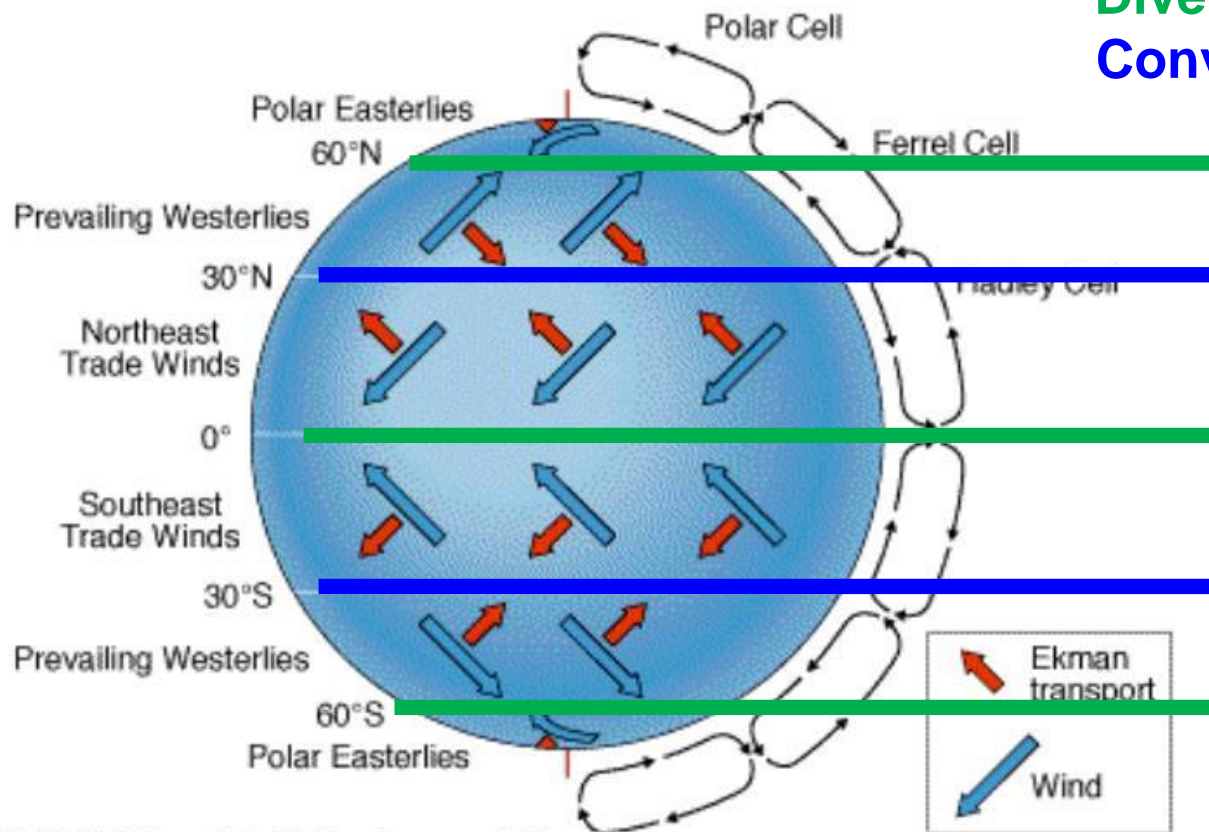
## Ekman surface transport



# Open Ocean Surface Currents

## Ekman surface transport

Divergenza  
Convergenza



# Convergenza e divergenza innescano quindi dei moti verticali ed una circolazione geostrofica rotatoria

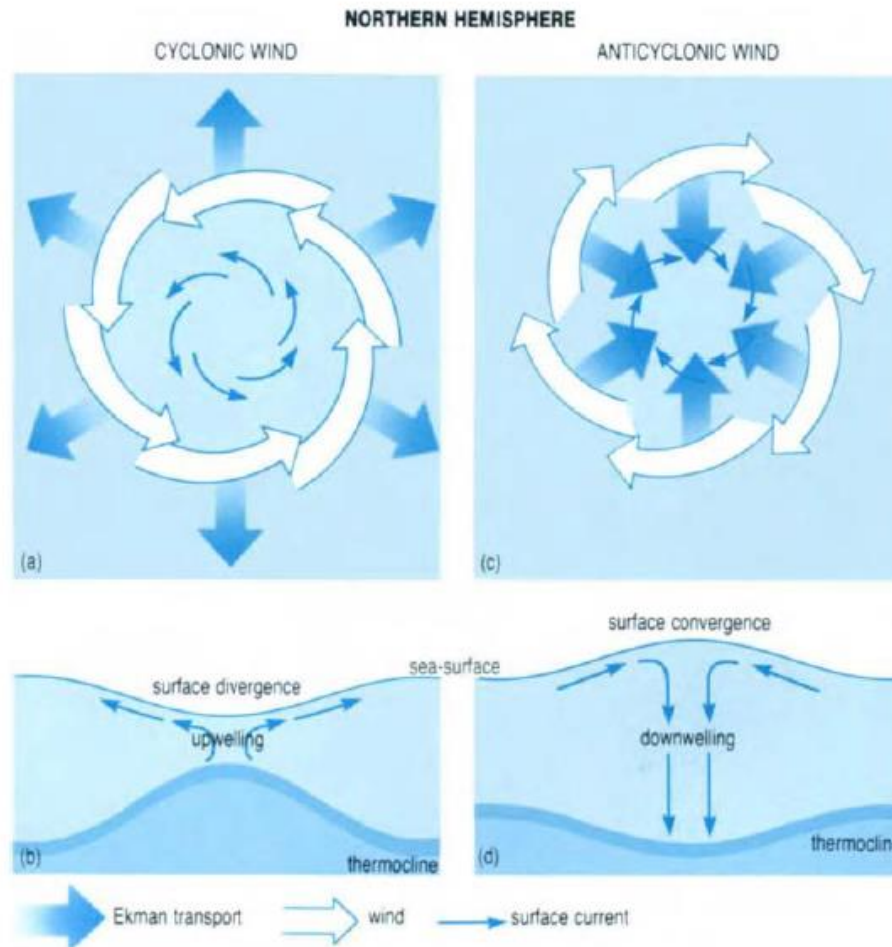
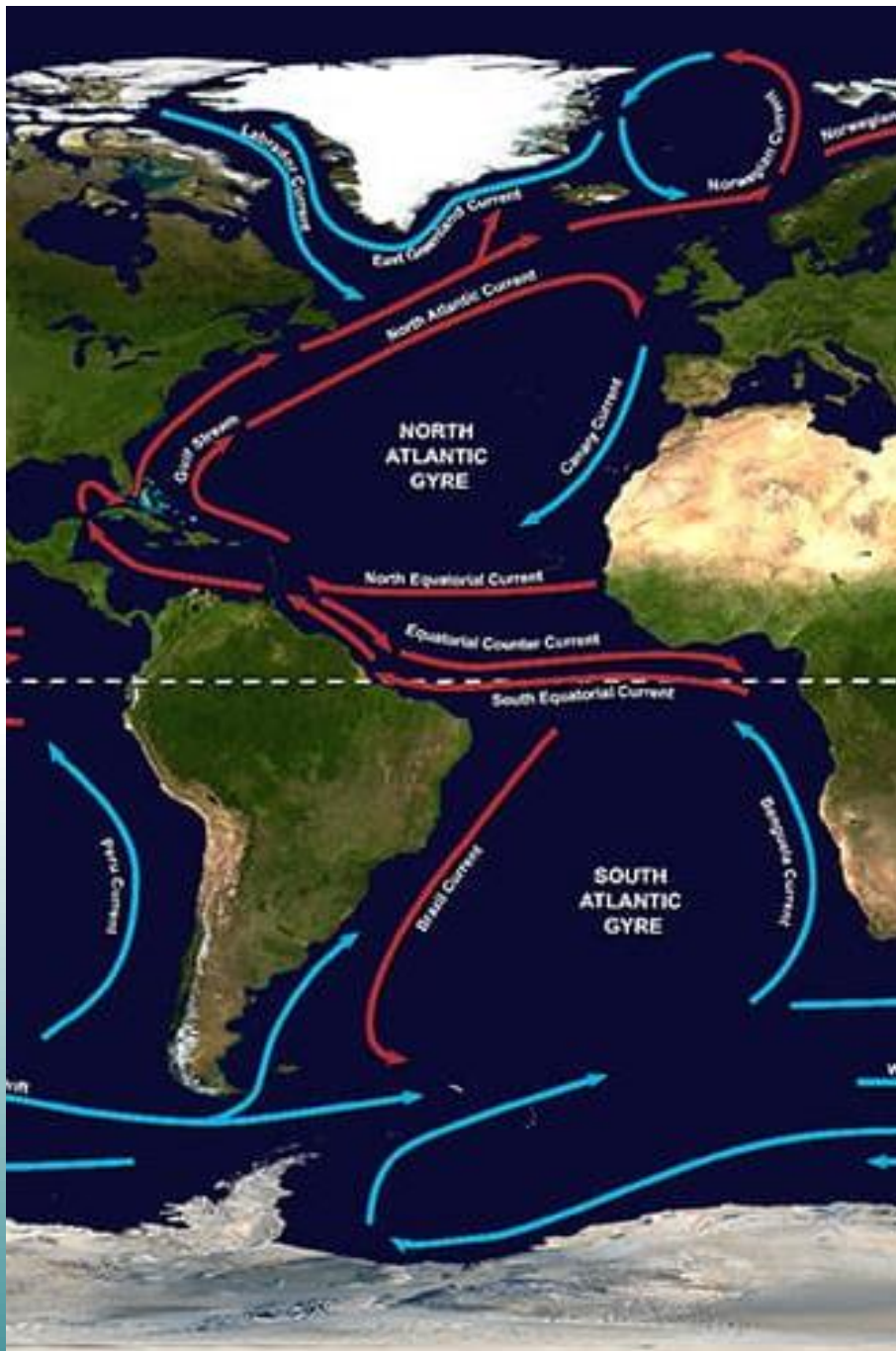


Figure 3.24 The effect of a cyclonic wind in the Northern Hemisphere (a) on surface waters. (b) on the shape of the sea-surface and thermocline. Diagrams (c) and (d) show the effects of an anticyclonic wind in the Northern Hemisphere. (Remember that in the Southern Hemisphere, cyclonic = clockwise and anticyclonic = anticlockwise.)



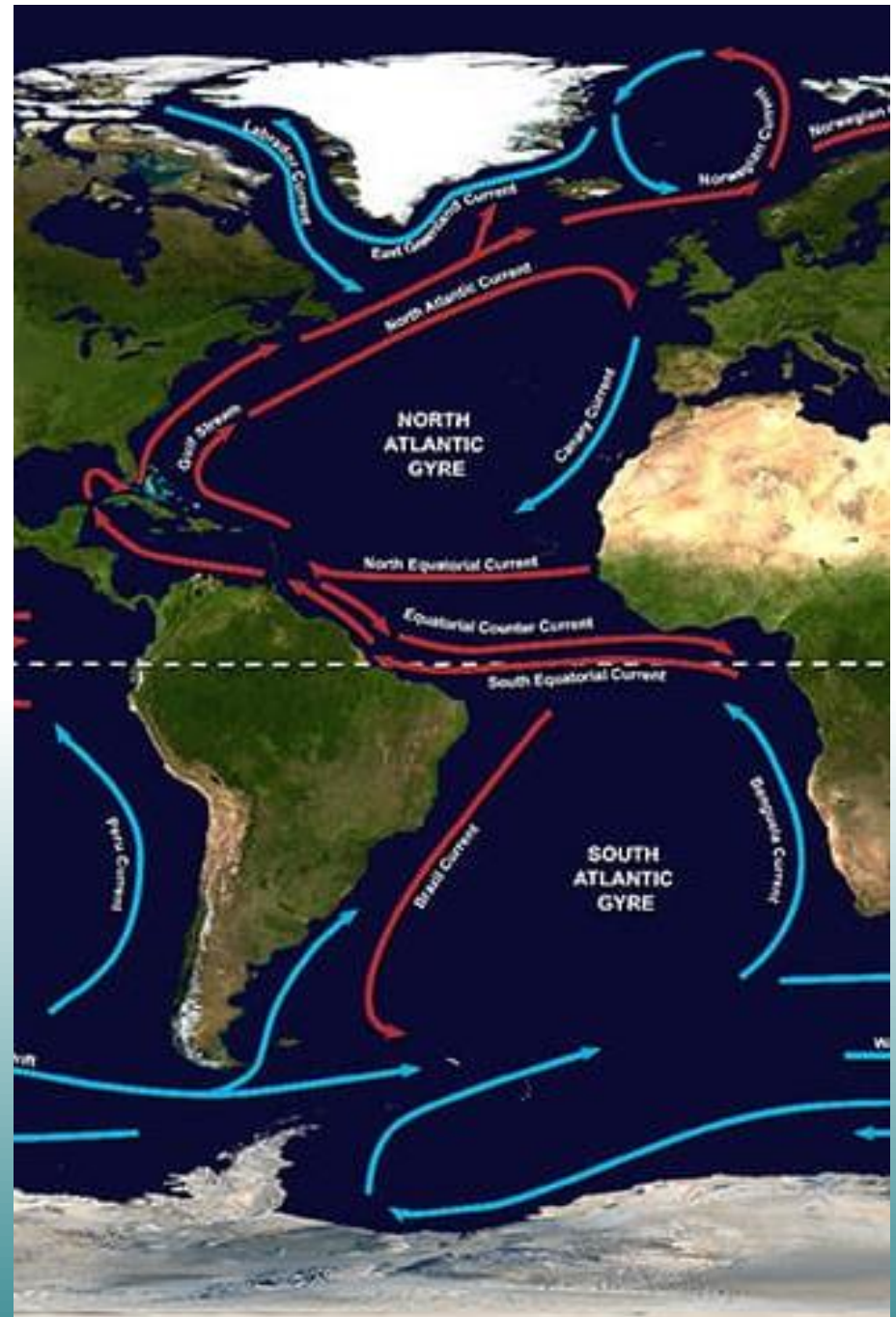
**Nelle regioni subtropicali, le acque sono sotto l'effetto degli alisei a sud e dei venti occidentali a nord.**

**Questi due sistemi di venti, attraverso il trasporto di EKMAN prima e attraverso l'instaurarsi di flussi geostrofici dopo, sono responsabili della nascita dei gyre anticiclonici delle zone subtropicali di entrambi gli emisferi.**

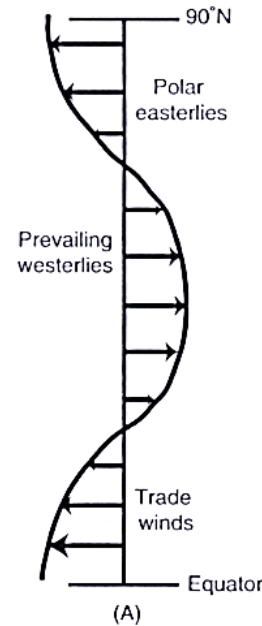
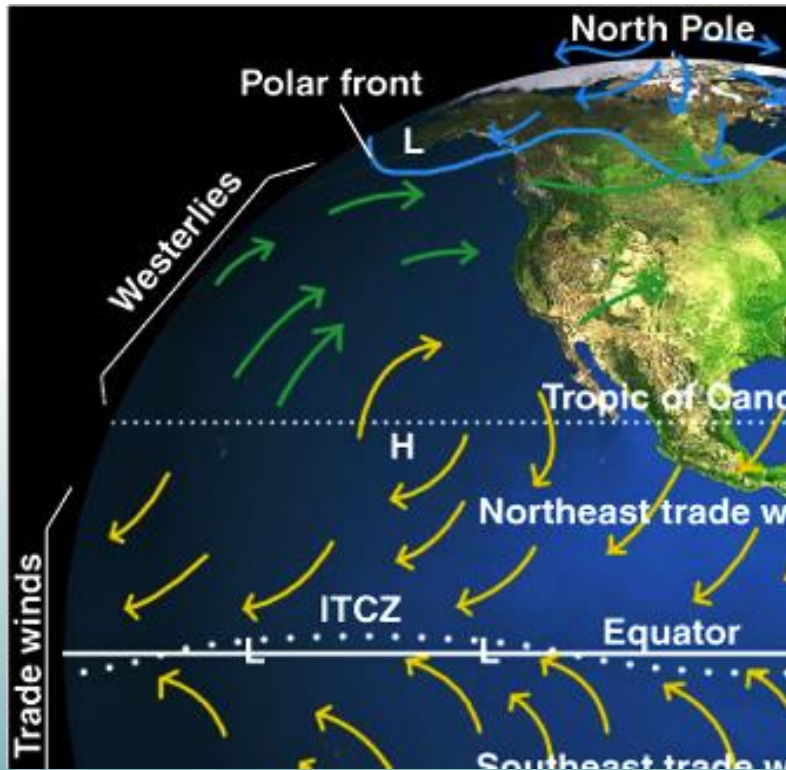
Analogamente nella zona polare dei due emisferi, i venti da ovest, muovendo attraverso il trasporto di Ekman le acque verso l'equatore, abbassano il livello del mare. Si instaurerà quindi una divergenza e conseguenzialmente le correnti gireranno in senso opposto, ovvero antiorario (orario) nel NH (SH).

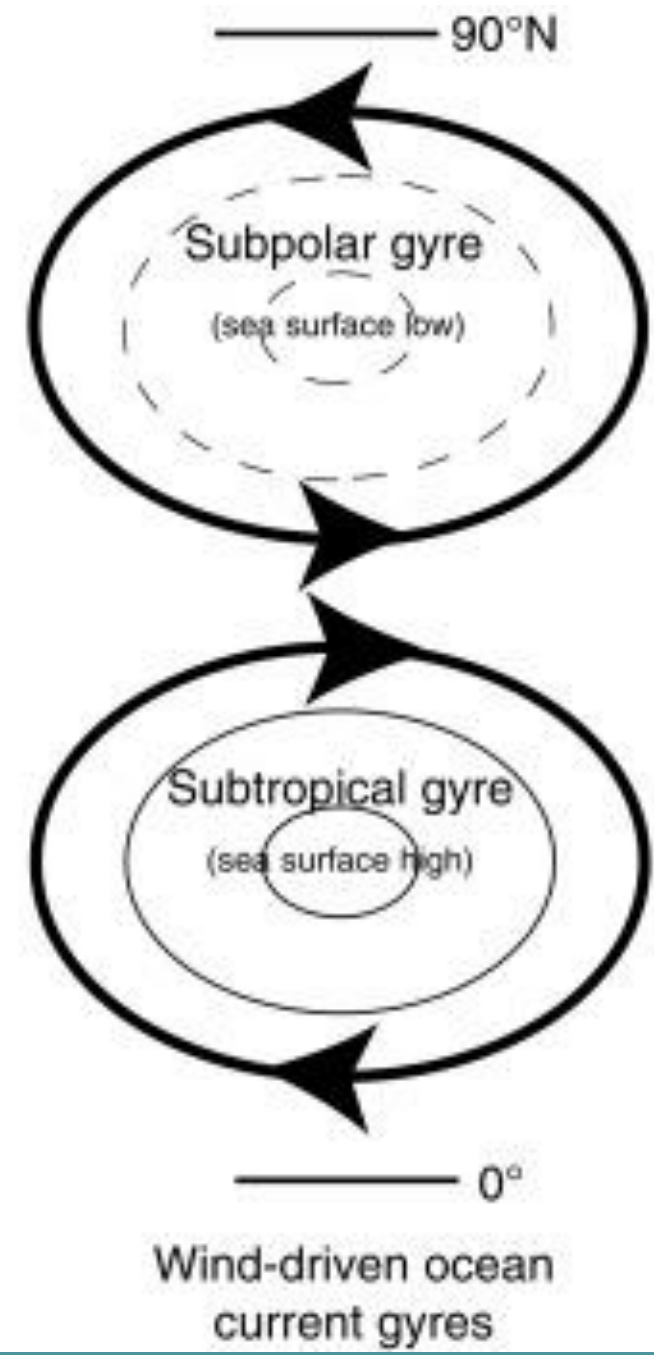
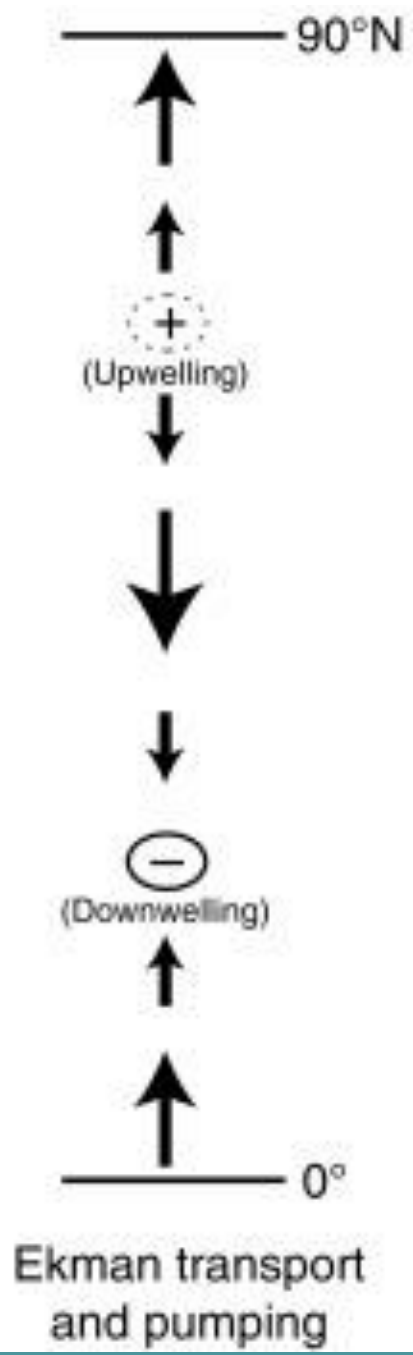
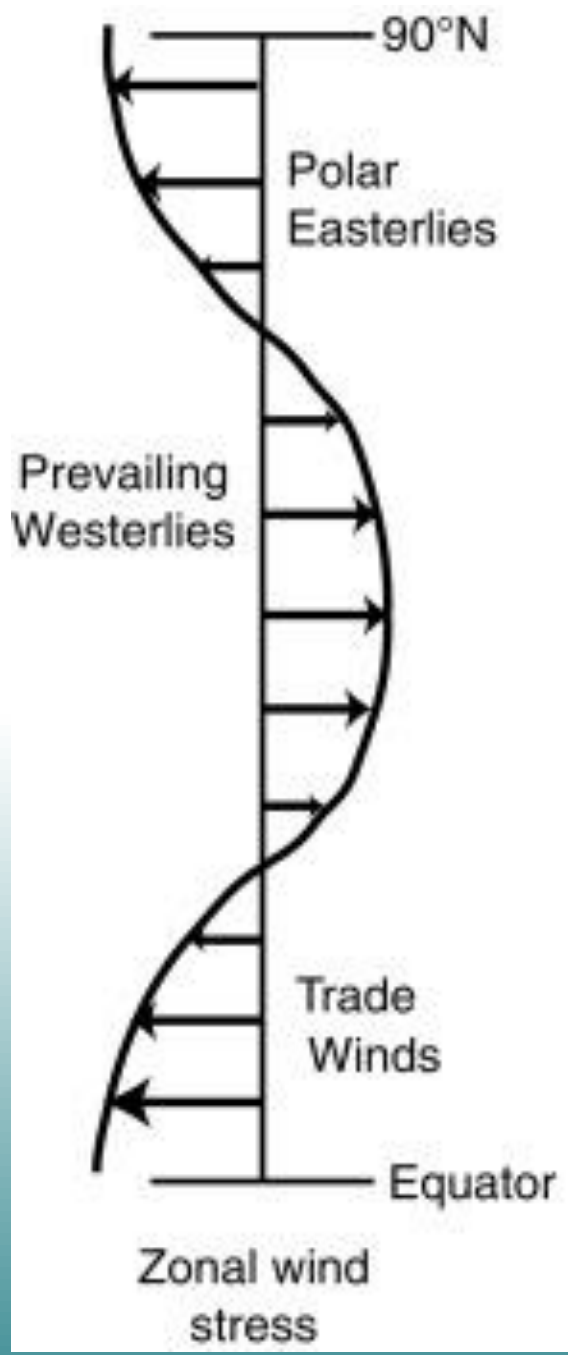
E' questa l'origine delle correnti cicloniche dell'Alaska e dell'Atlantico settentrionale e anche, nel SH, della Corrente Circumpolare Antartica.

In questo modo, anche se l'azione diretta del vento si limita a uno strato d'acqua di soli 100m di spessore, le convergenze e divergenze del trasporto di Ekman mettono in movimento masse d'acqua notevoli in tutta la profondità dell'oceano.



# CORRENTI SUPERFICIALI Indotte dal vento

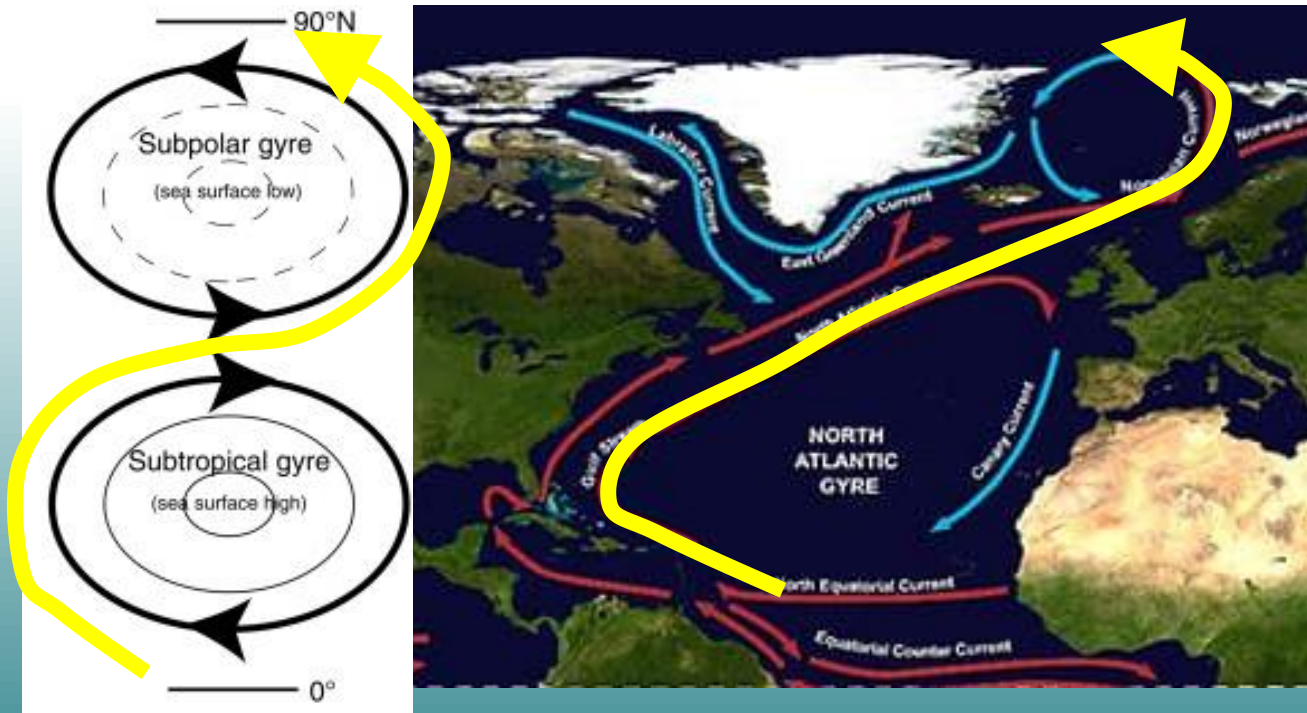




Un chiaro esempio di correnti che mette insieme la circolazione dei gyre subtropicale e polare nell’Emisfero Nord sono la Corrente del Golfo e la corrente del Kuroshio.

La Corrente del Golfo che scorre verso nord-est nell’Atlantico nord-occidentale e la Corrente di Kuroshio del Pacifico nordoccidentale.

Sono tra le correnti di superficie più veloci del pianeta con velocità medie tra i 3 e i 4 km/h, con punte maggiori lungo i margini continentali. Queste correnti sono anche relativamente larghe e profonde, spesso le loro sezioni non misurano più di 50-100 km.

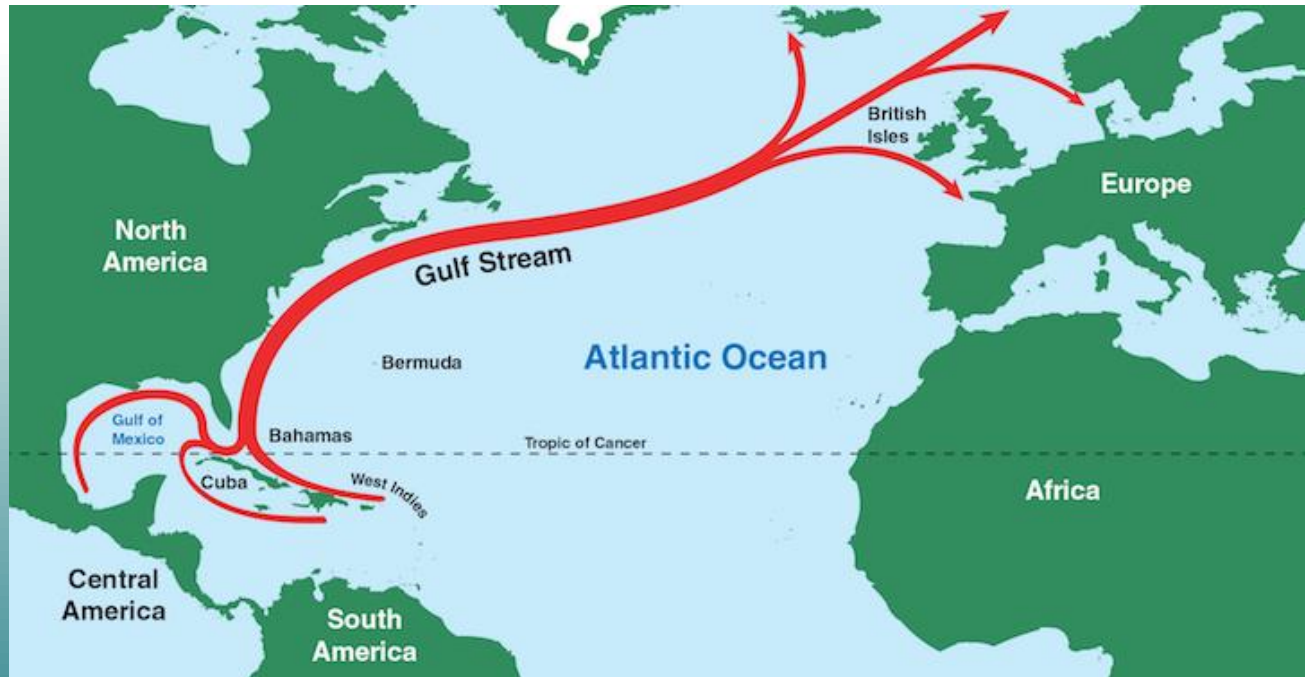




**Questo tipo di correnti giocano un ruolo cruciale nel sistema climatico globale.**

**Infatti, la Corrente del Golfo, generata dall'effetto del vento sul mare trasporta acque calde dai caraibi verso nord, contribuendo a ridistribuire alle alte latitudini il surplus energetico della fascia equatoriale.**

**A scala più piccola, in particolare nell'Oceano Atlantico, una branca settentrionale della Corrente del Golfo, la Corrente Nord Atlantica, trasporta calore verso il nord Atlantico, dove il suo effetto nel riscaldare l'atmosfera contribuisce al riscaldamento dell'Europa che registra a parità di latitudine, temperature più alte rispetto al versante americano dell'oceano.**



The surface circulation of the North Atlantic includes an anticyclonic subtropical gyre and a cyclonic subpolar gyre that stretches northward into the Nordic Seas with depiction of intense, narrow western boundary currents and recirculations





The Gulf Stream System consists of multiple segments with different names.

The subtropical Gulf Stream System begins where the North Equatorial Current, joined by the northward low latitude western boundary current, enters the Caribbean Sea through the complex of the Antilles islands.

After entering the Gulf of Mexico, the western boundary current, now named the Loop Current, flows northward to the middle of the Gulf and turns east toward the Straits of Florida characterized by high sea surface temperature (SST). From the Gulf of Mexico, the western boundary current escapes into the North Atlantic. It turns northward along the coast of Florida and forms the Florida Current and the Gulf Stream.

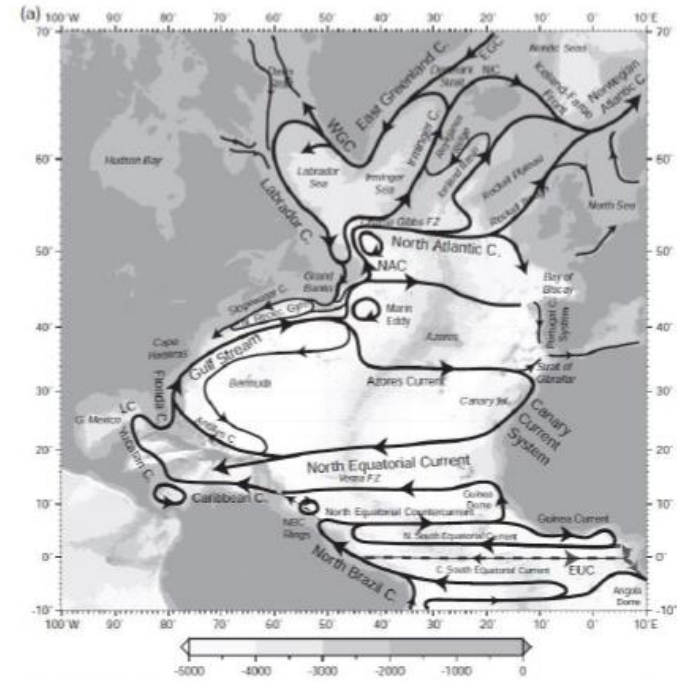
The Florida Current/Gulf Stream is a narrow, intense, northward flow. Maximum surface velocities exceed 180 cm/sec

The current extends to the ocean bottom over the continental slope while its typical width remains <100 km; its volume transport increases to more than 90 Sv.

the Gulf Stream is one of the most powerful currents in the world's oceans in terms of volume transport (up to 140 Sv), maximum velocity (up to 250 cm/ sec), average velocity (about 150 cm/sec), and eddy variability carrying a warm, saline core of surface water far eastward into the North Atlantic.

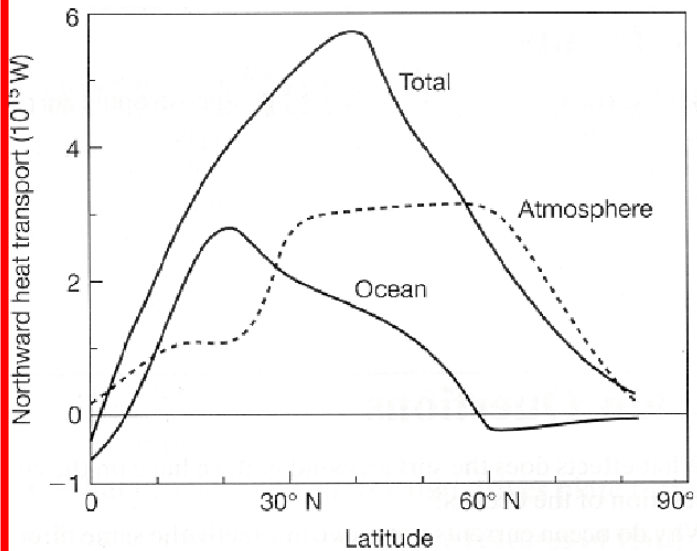
The remainder of the Gulf Stream continues eastward and southward, splitting into two branches, one at 42-43° N and one farther south at 35° N, called the Azores Current.

The Azores Current extends eastward toward the Strait of Gibraltar where a small amount of surface water flows into the Mediterranean Sea.





## Poleward heat transport



**Sebbene siano diverse le stime presenti in letteratura sulla quantità di calore trasferito verso i poli da oceano ed atmosfera, Tutte concordano sul fatto che alle medie latitudini il contributo dell'oceano è paragonabile, se non superiore a quello atmosferico.**

