

F CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE LAS AGUAS OCEÁNICAS

Introducción a la Oceanografía Física



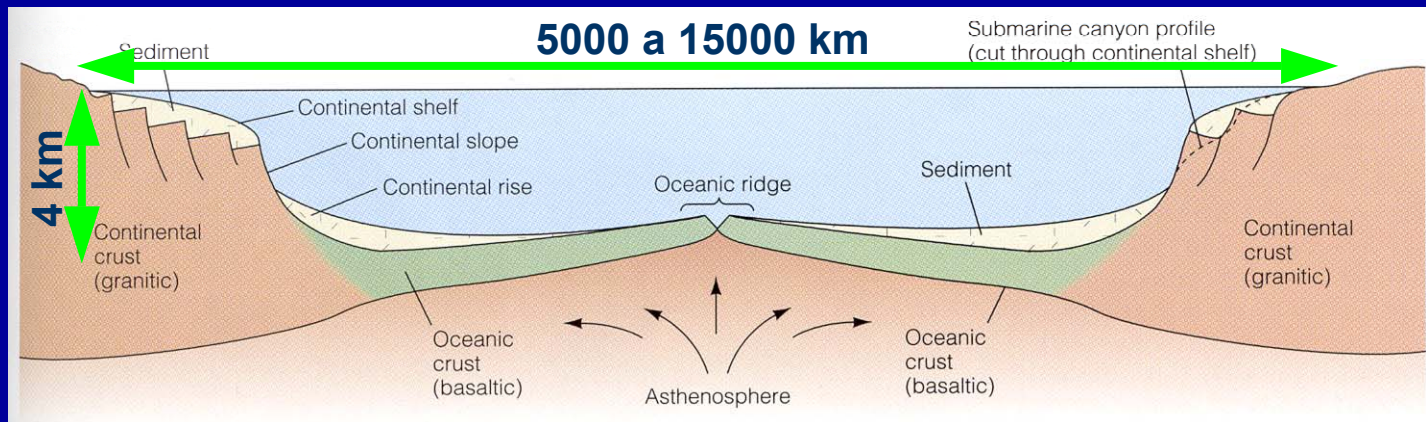
Bloque F – Caracterización de los movimientos de las aguas oceánicas

- 1.- Introducción.
- 2.- Fuerzas y circulación oceánica.
- 3.- Circulación atmosférica.
- 4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.
- 5.- Circulación superficial inducida por el viento.
 - 5.1.- Modelo de Ekman.
 - 5.2.- Flujo geostrófico.
 - 5.3.- Corrientes inerciales.
- 6.- Circulación vertical inducida por el viento.
 - 6.1.- Afloramiento ecuatorial.
 - 6.2.- Afloramiento costero.
 - 6.3.- Circulación de Langmuir.
- 7.- Descripción de la circulación profunda.

1.- Introducción.

❖ ¿Qué son las corrientes oceánicas?

- Se denomina así a las masas de agua de los océanos en movimiento.
- Este término se aplica en general cuando el agua fluye horizontalmente.
 - En el océano las escalas horizontales predominan sobre las verticales.
 - La estratificación del océano contribuye a este predominio.

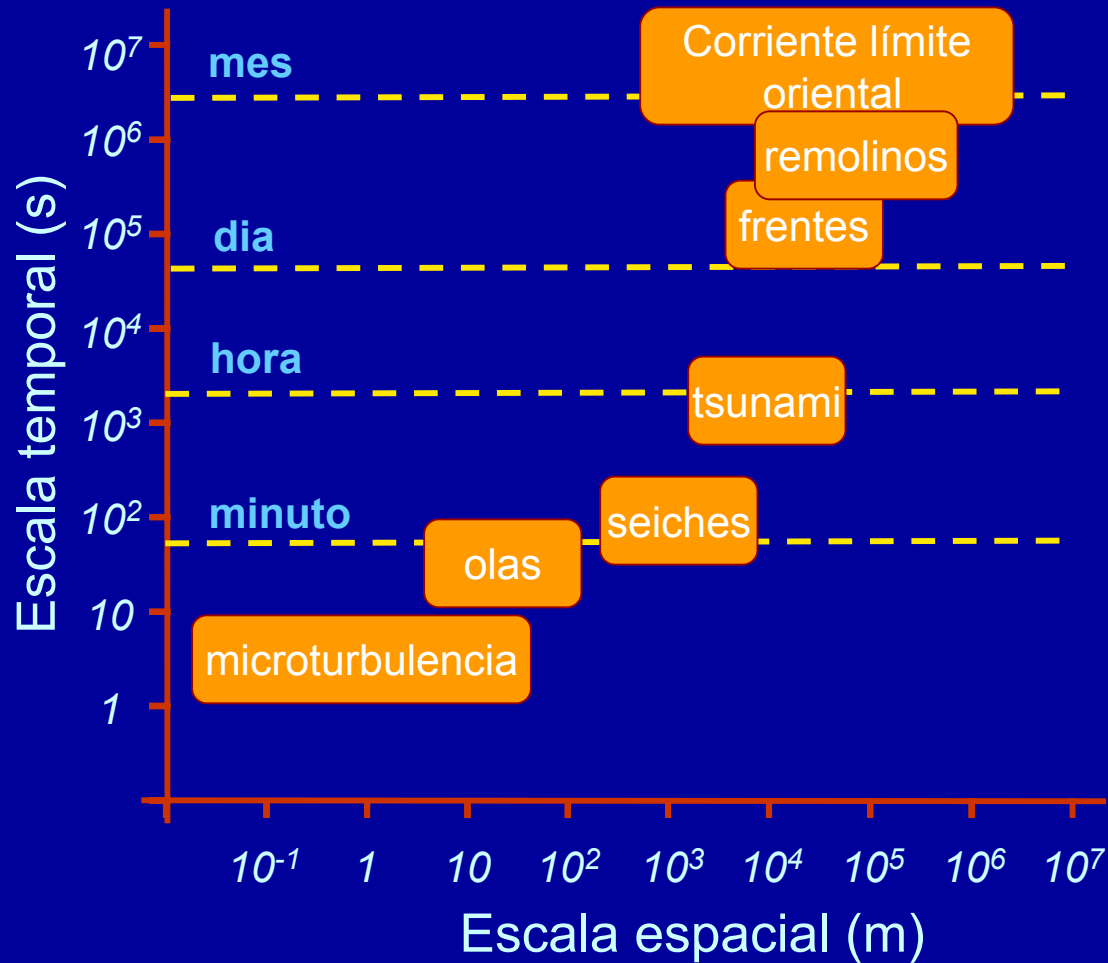


1.- Introducción.

- Pero las masas de agua se pueden mover también verticalmente,
 - Zonas de **convergencia**
 - Descenso del agua.
 - Importancia: Formación de masas de agua, transporte de gases a las aguas profundas,....
 - Zonas de **divergencia**
 - Ascenso del agua.
 - Importancia: Subida de agua rica en nutrientes a la superficie (afloramientos costeros),...
- El **movimiento** de las aguas en el océano es **complejo** y experimenta fuertes **variaciones espaciales y temporales**.
- Además las **corrientes oceánicas** se presentan en un **amplio rango** de escalas espaciales y temporales.



1.- Introducción.



Escalas espaciales y temporales de los fenómenos dinámicos en los océanos

1.- Introducción.

❖ ¿Por qué son importantes las corrientes en el océano?

- Se encargan de redistribuir el calor sobre la superficie terrestre.
 - Transfieren calor de las regiones tropicales a las regiones polares.
 - Influyen en el tiempo atmosférico y el clima.
- Son responsables de distribuir los nutrientes en la superficie de los océanos.
 - Mediante movimientos verticales en zonas de divergencia estos nutrientes llegan a la superficie.
 - Estos nutrientes controlan la productividad biológica y los recursos pesqueros.
- Dispersan los organismos vivos que se acumulan en determinados lugares de los océanos
- Tienen a homogeneizar algunas propiedades oceánicas (temperatura, salinidad, nutrientes, sustancias tóxicas).
- Juegan un papel muy importante en el comercio marítimo, y han sido claves para la llegada del hombre a lugares remotos.

1.- Introducción.

❖ ¿Cuál es el mecanismo generador de las corrientes oceánicas?

- La entrada principal de energía que pone en movimiento las aguas de los océanos, entra a través de la atmósfera.
 - El viento realiza un aporte considerable,
 - Directamente, al comunicar su energía al agua.
 - Indirectamente, a través de las diferencias de presión que se producen por apilamiento del agua por acción del viento en algunas zonas.
 - También se producen a través de la interfase océano-atmósfera algunos procesos que generan cambios en la densidad del agua de mar,
 - Enfriamiento por pérdida de calor.
 - Aumento de la salinidad por evaporación.

2.- Fuerzas y circulación oceánica.

❖ Ecuación del movimiento del agua en los océanos

- La ecuación que describe el movimiento del agua en los océanos procede de la segunda Ley de Newton.

$$F=ma$$

donde

F → resultante de las fuerzas que actúan sobre la masa de agua.

m → Masa del agua.

a → Aceleración del agua

- En fluidos se expresa como fuerza por unidad de masa, F' , que será

$$F'=F/m=a=dv/dt$$

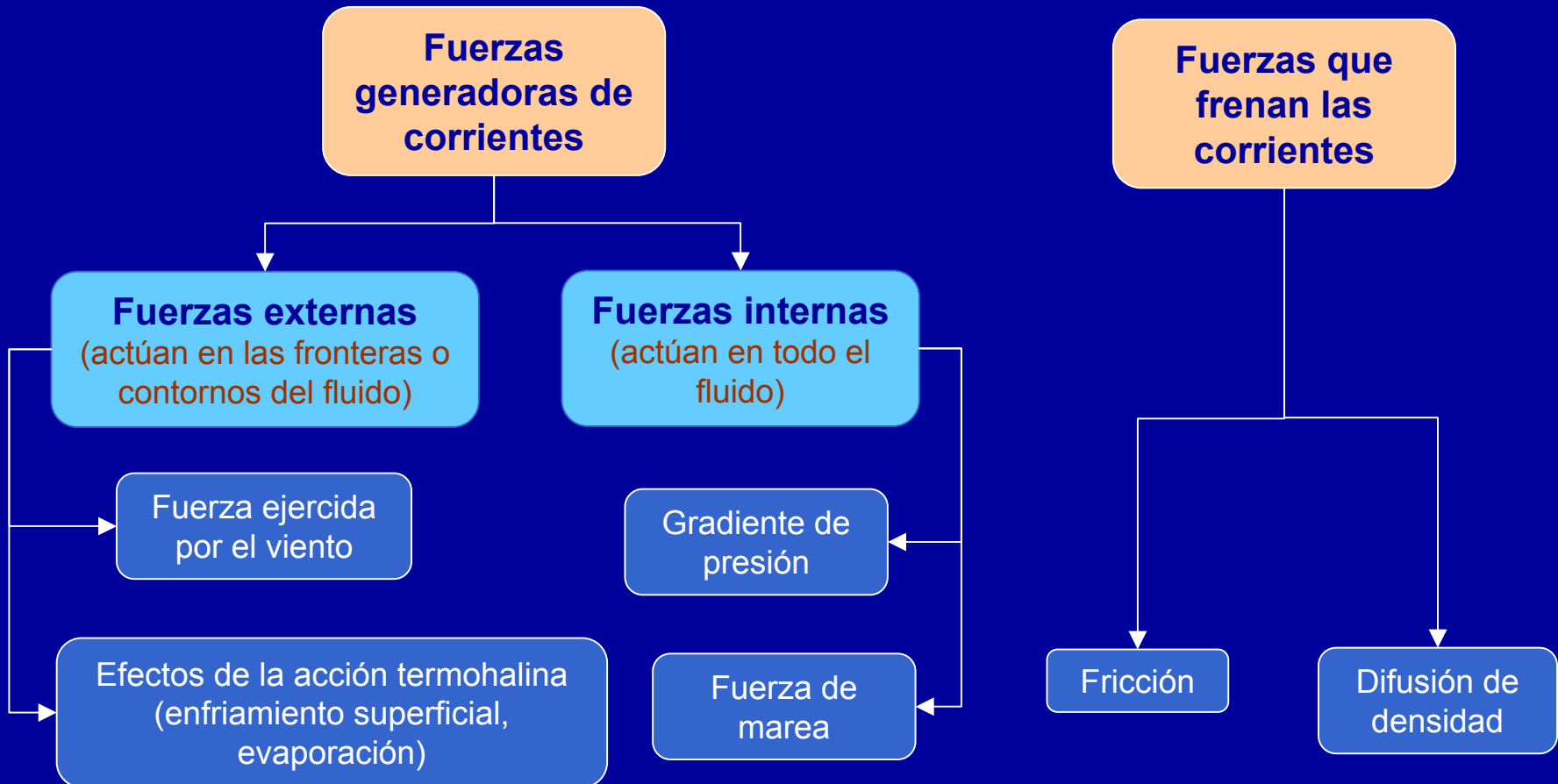
donde

v → Velocidad de la masa de agua.

2.- Fuerzas y circulación oceánica.

❖ Clasificación de las fuerzas

- Se pueden clasificar de distintos modos atendiendo a criterios diversos:
- **Primer criterio**



2.- Fuerzas y circulación oceánica.

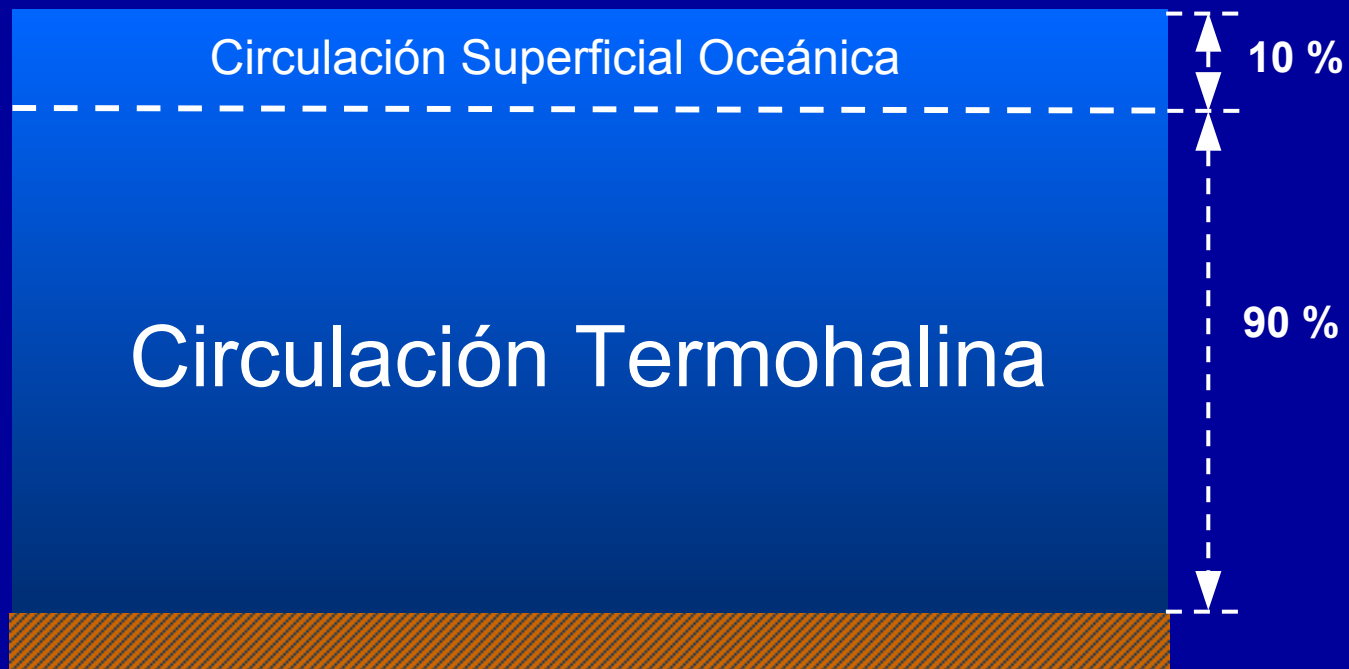
▪ Segundo criterio



2.- Fuerzas y circulación oceánica.

❖ Características generales de la circulación general oceánicas

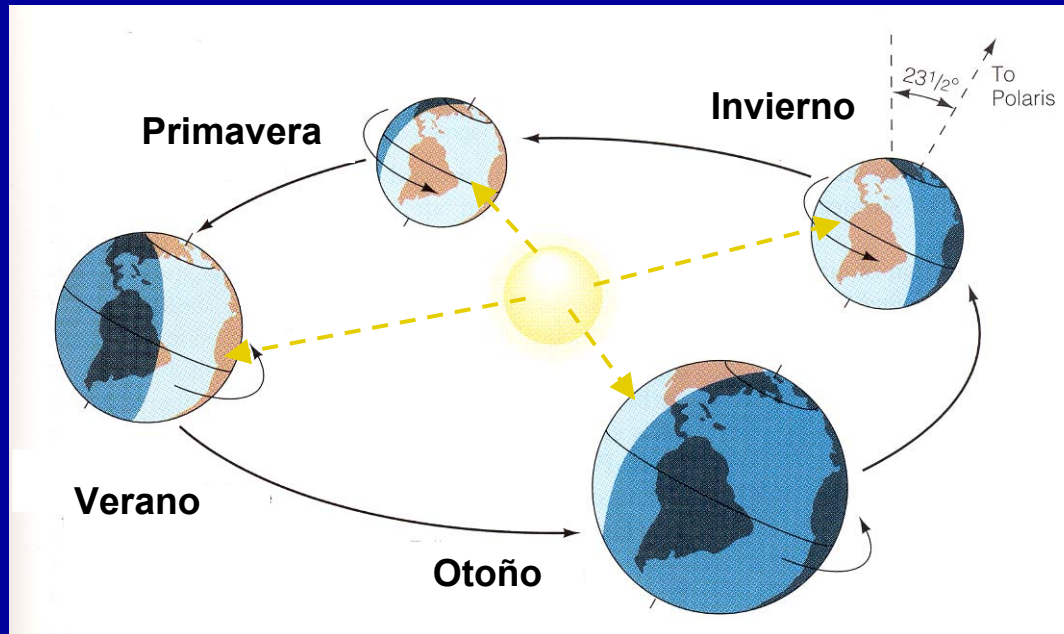
- Hay fundamentalmente dos tipos de circulación en el océano.
 - Circulación debida al viento (en la superficie)
 - Circulación termohalina (en la zona profunda)



3.- Circulación atmosférica.

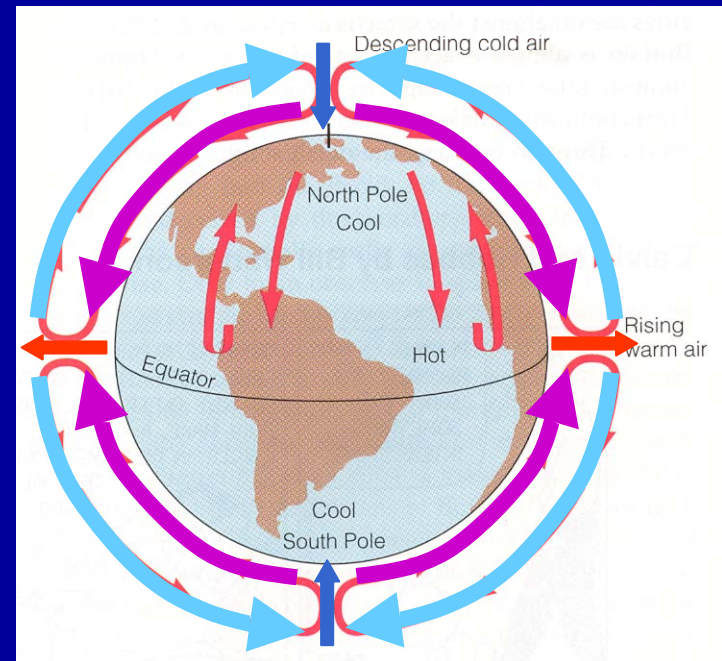
❖ Características generales de la circulación atmosférica.

- Se conoce como **viento** al movimiento de las masas de aire.
- ¿Qué hace a las **masas de aire desplazarse** ?
 - Como respuesta a los **cambios de presión**.
 - El **movimiento** se realiza desde áreas de **altas presiones** a zonas de **bajas presiones**.
 - La **posición** de las zonas se relaciona con el **calentamiento desigual** de la Tierra.



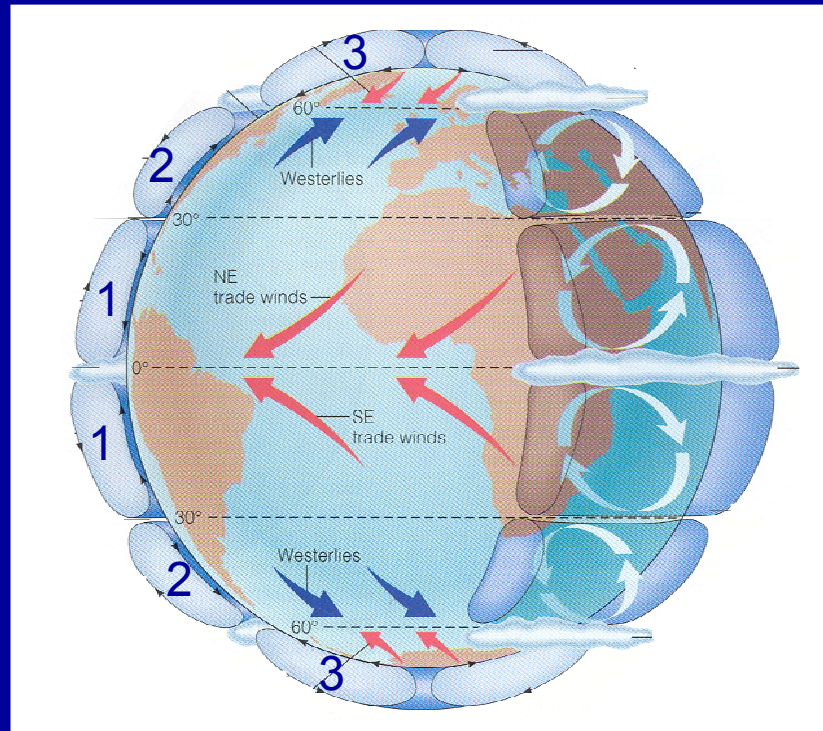
3.- Circulación atmosférica.

- La zona de mayor calentamiento se sitúa cerca del Ecuador.
 - El aire se expande y disminuye su densidad.
 - Esto genera una zona de bajas presiones de aire que se eleva.
- La zona de menor calentamiento se sitúa en los Polos
 - El aire se contrae y aumenta su densidad.
 - Esto genera una zona de altas presiones de aire que desciende.
- Esto da lugar a una célula de circulación con las siguientes características:
 - El viento se dirige de los Polos al Ecuador cerca de la superficie.
 - Se dirige del Ecuador a los Polos en los niveles superiores.



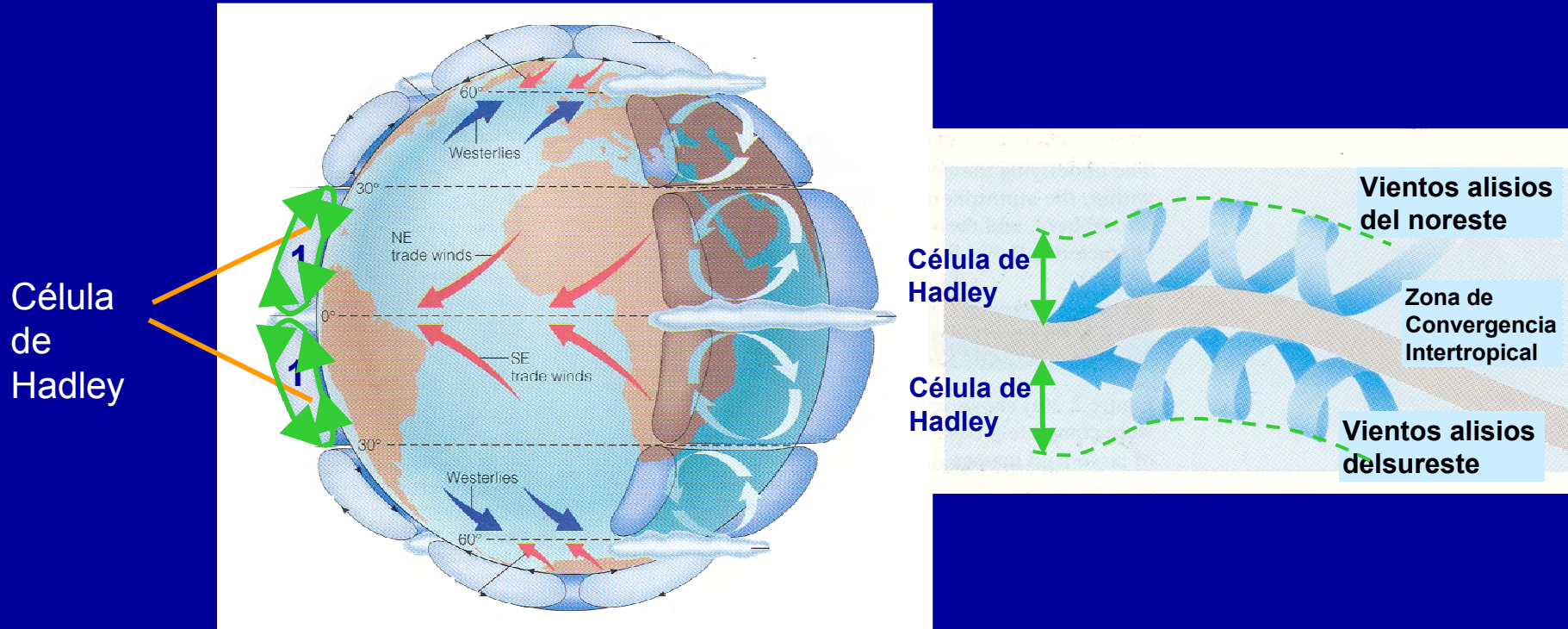
3.- Circulación atmosférica.

- Este esquema de circulación no concuerda con la realidad porque,
 - No se ha tenido en cuenta el efecto de Coriolis.
 - Los vientos se desvían a la derecha de la dirección de movimiento en el Hemisferio N.
 - Los vientos se desvían a la izquierda de la dirección de movimiento en el Hemisferio S.
 - En vez de existir una sola célula de circulación se distinguen tres.



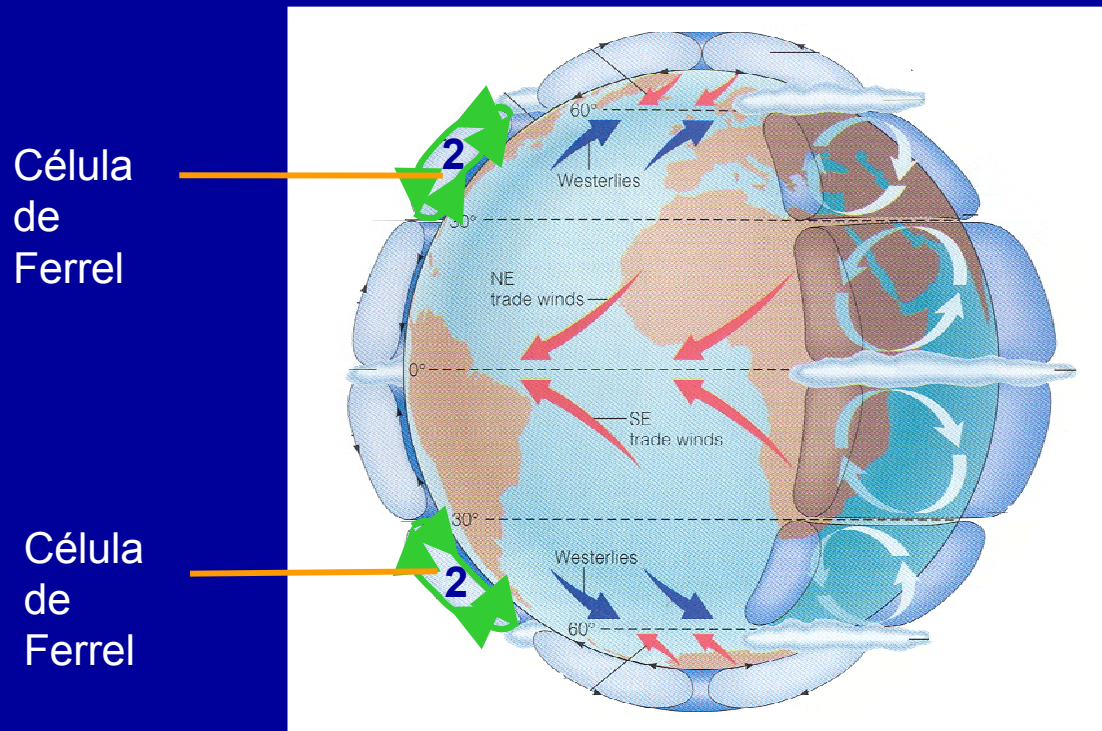
3.- Circulación atmosférica.

- Cuando el aire que se ha elevado en el Ecuador se encuentra a 30° de latitud es lo bastante denso para **descender** a la superficie.
- La mayor parte de ese aire **vuelve al Ecuador** al alcanzar la superficie, pero **desviándose** por el efecto de Coriolis y completando el circuito.
- A este circuito o **célula de circulación atmosférica** se le llama **célula de Hadley**.



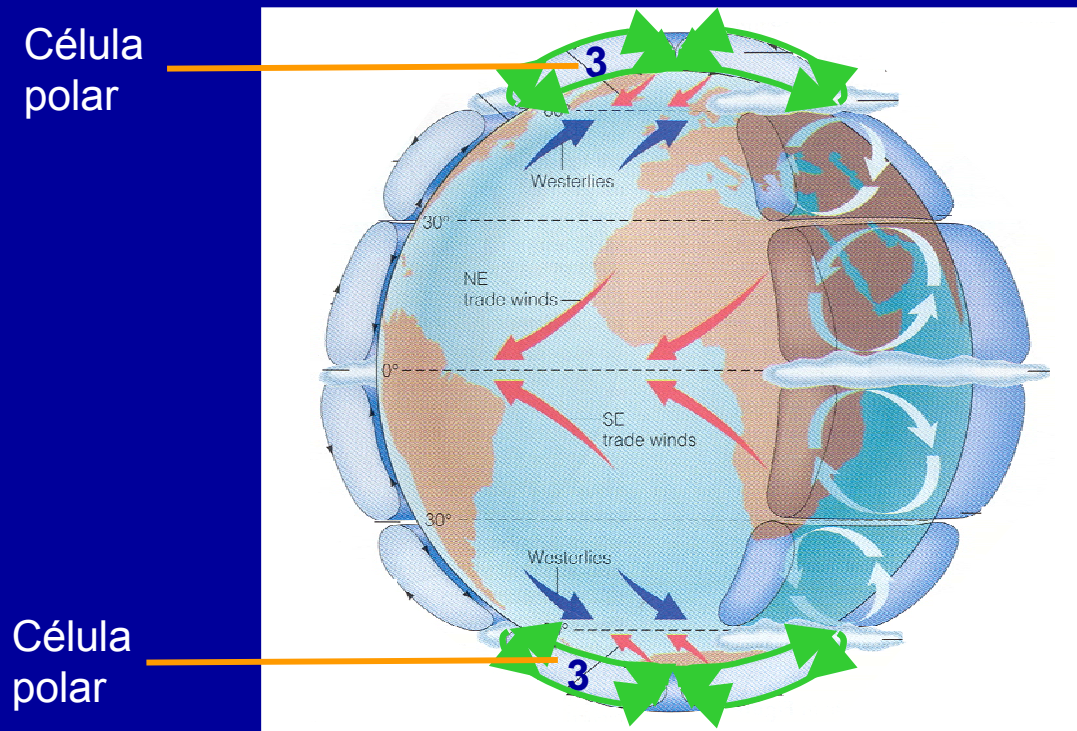
3.- Circulación atmosférica.

- Parte del aire que desciende a 30° de latitud se desplaza hacia el Polo, desviándose por el efecto de la aceleración de Coriolis.
- Entre $50 - 60^\circ$ este aire se encuentra con otro que procede de altas latitudes y converge y sube.
- A esta célula de circulación situada en latitudes medias se le llama célula de Ferrel.

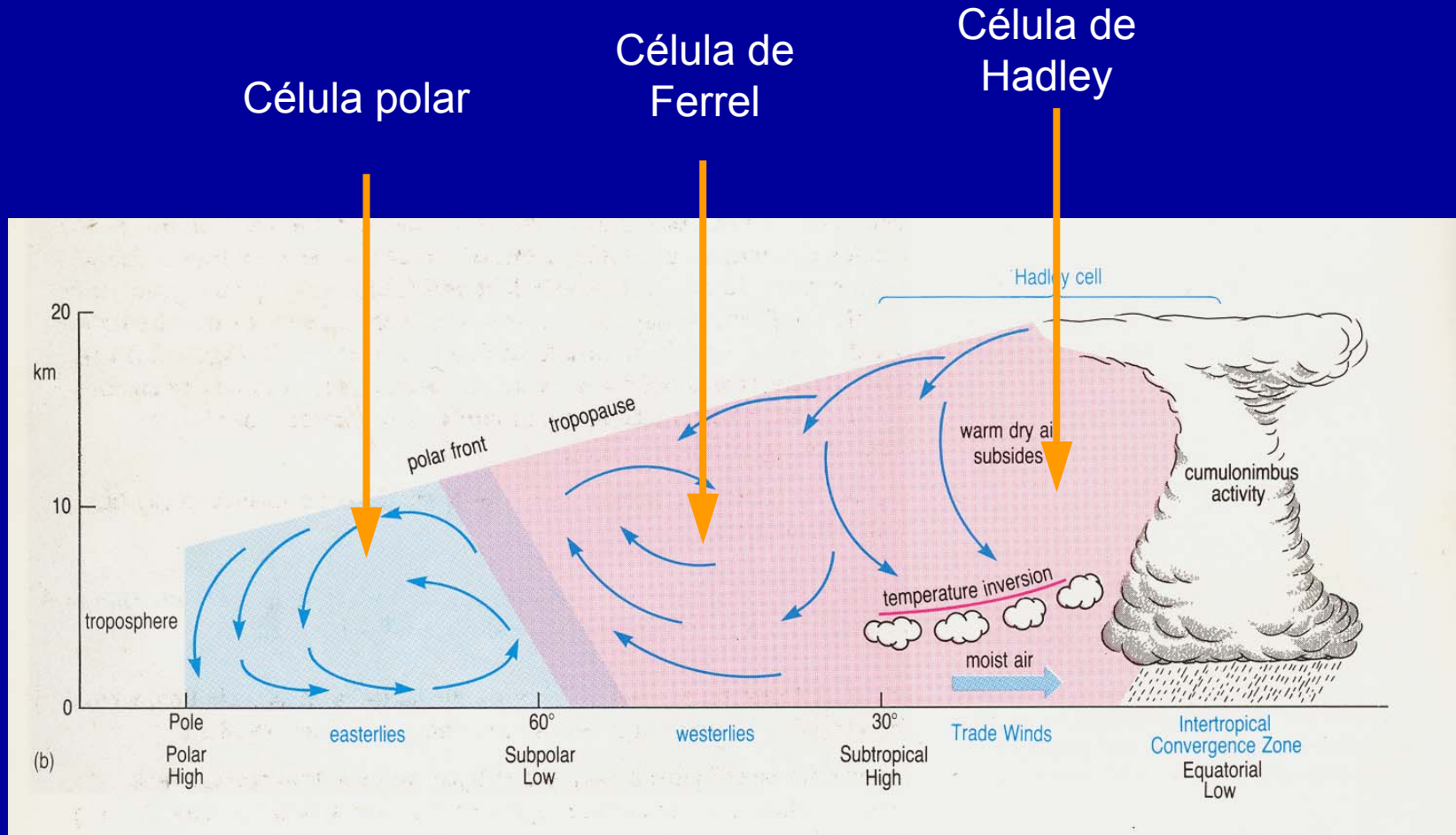


3.- Circulación atmosférica.

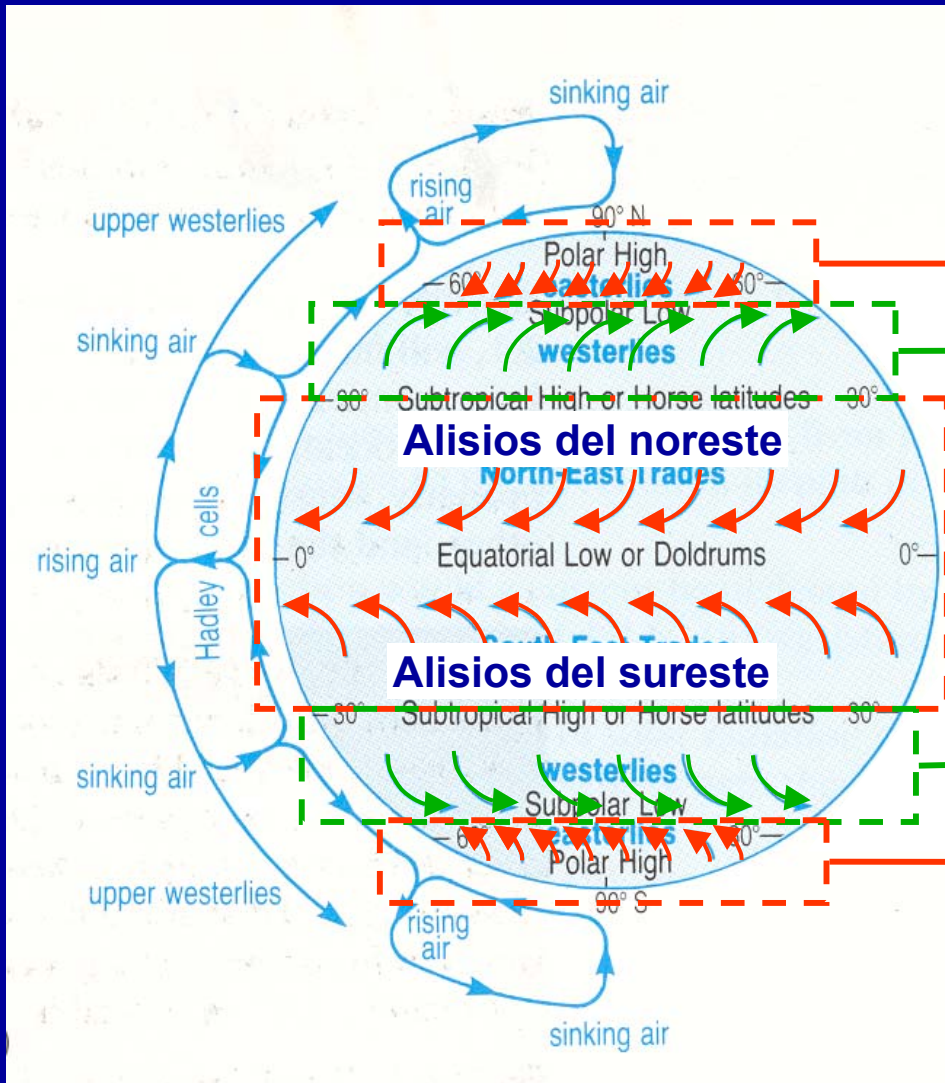
- El aire que se enfría sobre los Polos se desplaza hacia el Ecuador.
- Entre 50 -60° de latitud el aire se ha calentado lo suficiente para ascender, volviendo hacia el Polo para cerrar el circuito.
- A esta célula de circulación situada en latitudes altas se le llama célula polar.



3.- Circulación atmosférica.



3.- Circulación atmosférica.



❖ Sistemas de vientos.

Vientos del este (60-90°).

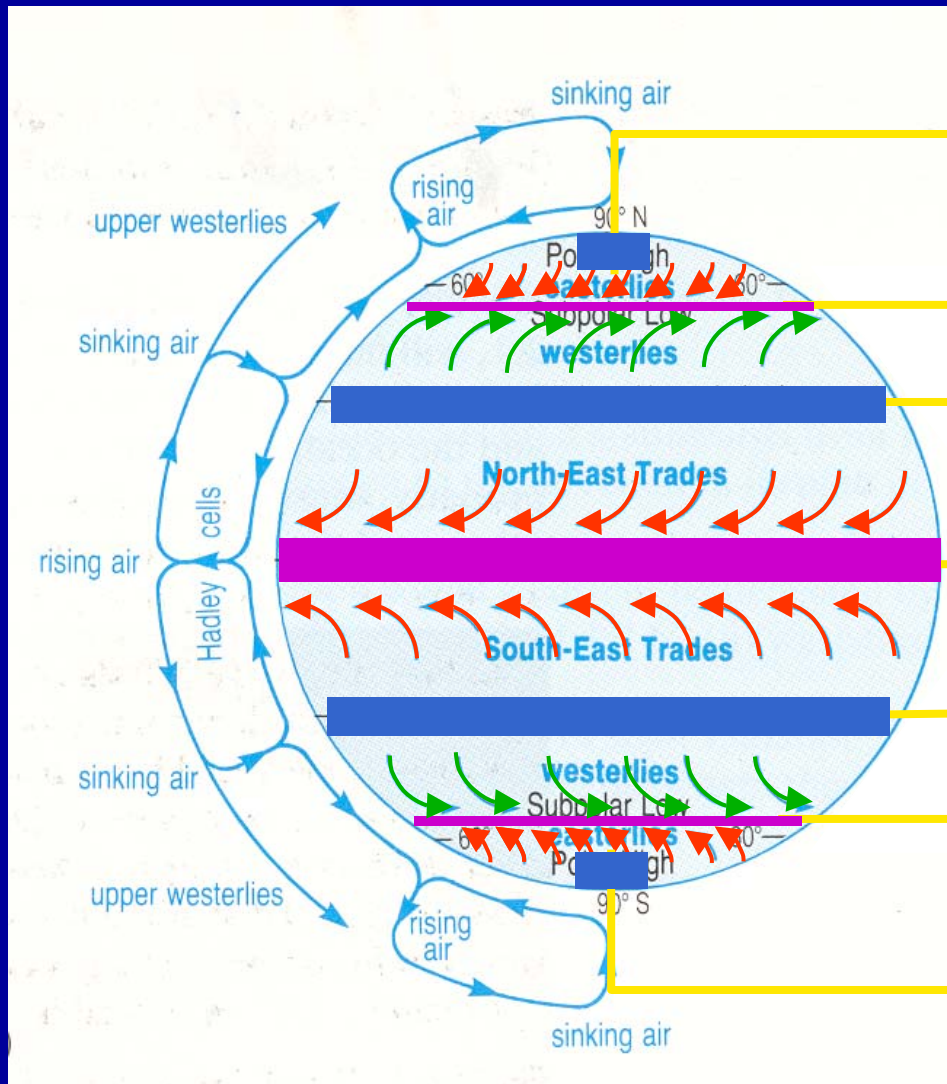
Vientos del oeste (30-60°).
Vientos que soplan hacia los Polos desviándose hacia el este.

Alisios (0-30°). Vientos que soplan hacia el ecuador desviándose hacia el oeste.

Vientos del oeste (30-60°).

Vientos del este (60-90°). Vientos que soplan hacia el Ecuador desviándose hacia el oeste.

3.- Circulación atmosférica.



❖ Sistemas de presiones.

Alta Polar (90°). Área de altas presiones donde divergen los vientos.

Baja Subpolar (60°).

Horse latitudes (30°) o zona de calmas subtropical.

Doldrums o zona de convergencia Intertropical (0°). Área de bajas presiones donde convergen los alisos.

Horse latitudes (30°). Área de altas presiones donde divergen los vientos.

Baja Subpolar (60°). Área de bajas presiones donde convergen los vientos

Alta Polar (90°).

3.- Circulación atmosférica.

Región	Nombre	Presión	Vientos superficiales	Tiempo atmosférico
Ecuador (0°)	Doldrums o ZCIT	Baja	Vientos variables y débiles	Nuboso, precipitación abundante todas las estaciones
0°-30°N y S	Vientos alisios	—	Del noreste en el H.N. y del sureste en el H.S.	Verano húmedo e invierno seco
30°N y S	Horse latitudes	Alta	Vientos variables y débiles	Poca nubosidad, seco todas las estaciones
30°-60°N y S	Vientos del oeste	—	Del suroeste en el H.N. y del noroeste en el H.S.	Invierno húmedo y verano seco
60°N y S	Frente polar	Baja	Variables	Zona nubosa y tormentosa con muchas precipitaciones
60°-90°N y S	Vientos del este	—	Del noreste en el H.N. y del sureste en el H.S.	Aire frío polar con temperaturas muy bajas
90°N y S	Polos	Alta	Hacia el sur en el H.N. y hacia el norte en el H.S.	Aire frío seco, escasas precipitaciones todo el año

3.- Circulación atmosférica.

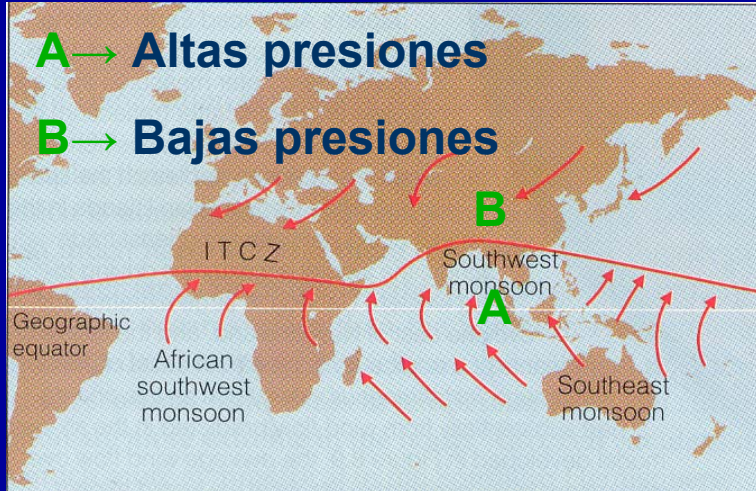
❖ Desviaciones del esquema de circulación de seis células.

- Este modelo de seis células de circulación atmosférica representa la situación promediada a lo largo de varios años.
- Desviaciones de este esquema se producen debido a,
 - La presencia de las masas continentales, y sus diferencias de calor específico respecto a las aguas oceánicas (monsoones y brisas)
 - Las masas continentales tienen valores bajos de calor específico, y las aguas oceánicas valores altos.
 - En consecuencia las masas continentales se calientan y enfrían más rápidamente que las aguas oceánicas adyacentes.
 - La existencia de perturbaciones en este esquema de circulación atmosférica general (borrascas y anticiclones).

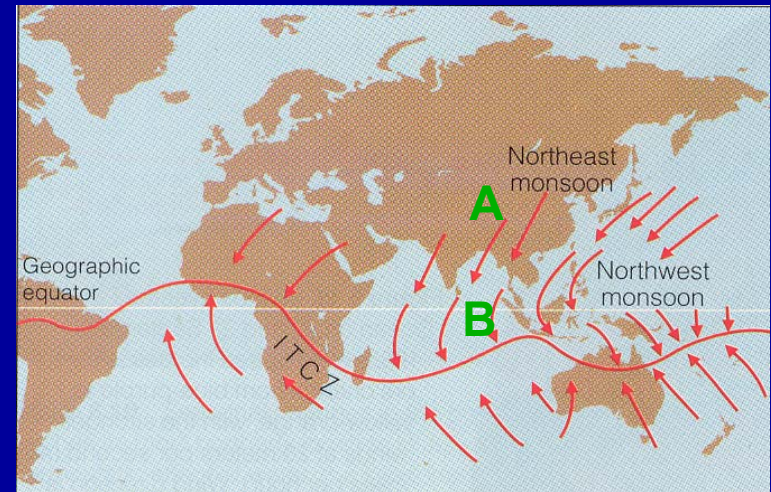
3.- Circulación atmosférica.

➤ Monsoones.

- Un monsoon es un sistema de vientos que cambia de dirección estacionalmente debido a las diferencias de calor específico del océano y las masas continentales.
- En primavera, la tierra se calienta más que el océano adyacente. El aire caliente sobre la tierra se eleva y es reemplazado por aire más fresco procedente del océano.
- En otoño, la tierra se enfría más rápidamente que el océano. El aire se enfría y desciende sobre la tierra generando vientos seos y frios que se dirigen al océano.



Monsoones en Julio

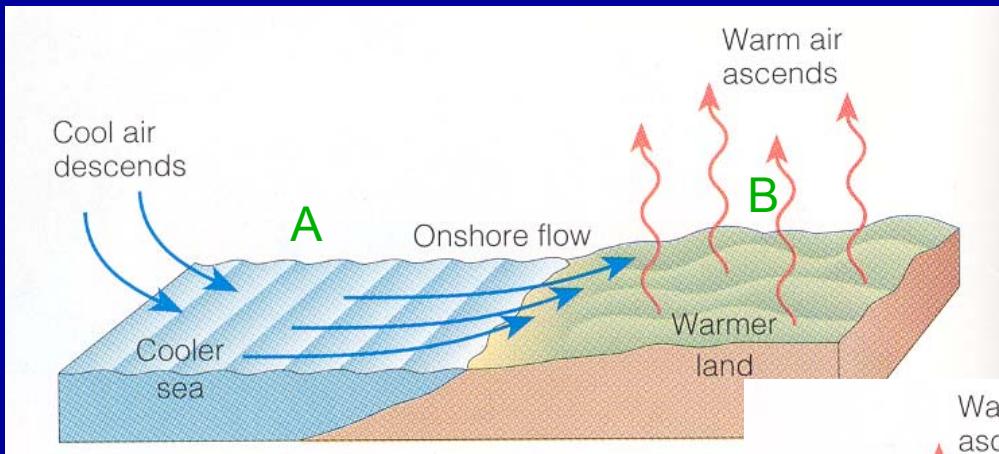


Monsoones en Enero

3.- Circulación atmosférica.

➤ Brisas.

- Las brisas son un sistema de vientos que cambia de dirección diariamente.
- Durante el día la tierra se calienta más que el océano adyacente.
- Durante la noche la tierra se enfría más rápidamente que el océano.

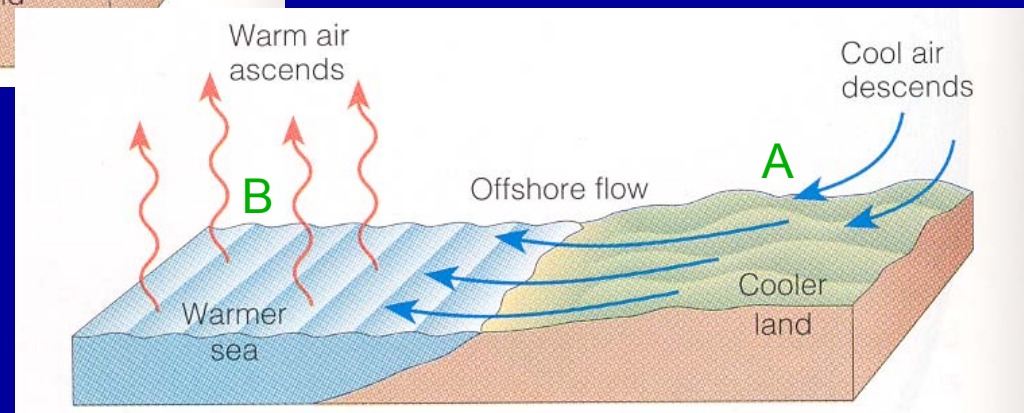


Brisas durante el día

A → Altas presiones

B → Bajas presiones

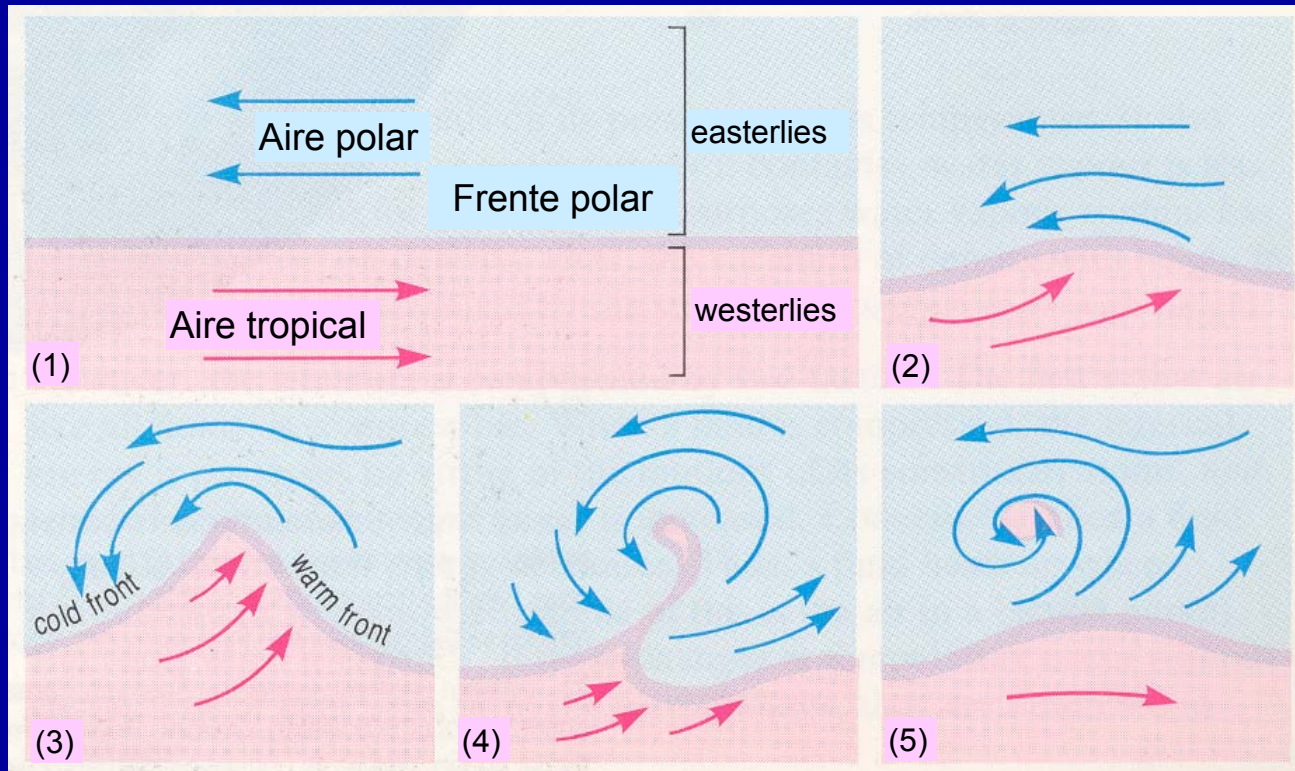
Brisas durante la noche



3.- Circulación atmosférica.

➤ Borrascas y anticiclones.

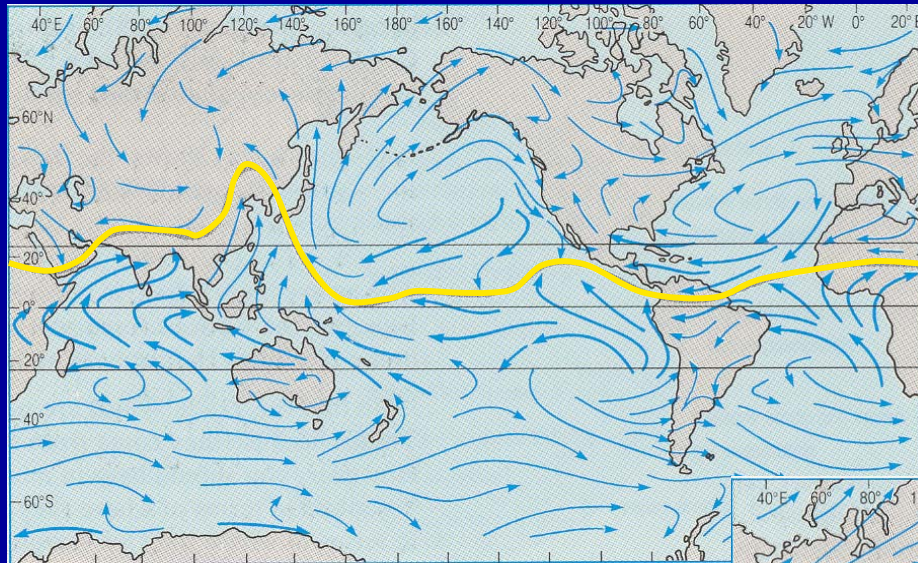
- La existencia de anticiclones, borrascas y tormentas tropicales y extratropicales, suponen desviaciones a este esquema de seis células de circulación.



Esquema de desarrollo de una tormenta extratropical

3.- Circulación atmosférica.

❖ Vientos dominantes y posición de la ZCIT.

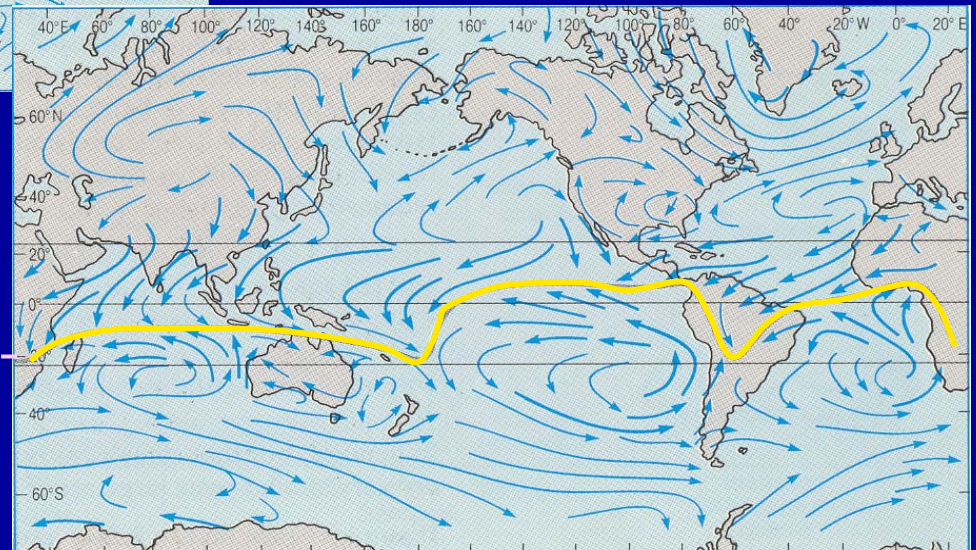


Circulación
atmosférica
en Julio

→ Posición de ZCIT

Circulación
atmosférica
en Enero

← Posición
de ZCIT



4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

❖ Características generales de la circulación superficial oceánica.

- La **circulación superficial del océano** abarca a las aguas situadas entre la superficie y la parte superior de la pycnoclina, afectando solo a casi el **10%**
- La **fuerza primaria** responsable de la circulación superficial de los océanos se debe al **viento**, que arrastra (fricción) a las aguas situadas cerca de la superficie.
 - La **energía del viento** es transferida del aire al agua en forma de momento.
 - Parte de esa energía se emplea para **generar las olas**.
 - La **otra parte de la energía** se utiliza para **conducir las corrientes oceánicas**.
- Si no existieran continentes sobre la Tierra, las **corrientes superficiales oceánicas** seguirían perfectamente el **patrón** marcado por los principales **sistemas de vientos**.
- Sin embargo, la **distribución de las masas continentales** influye como veremos en la **naturaleza y la dirección** de las corrientes superficiales oceánicas.
- Otros factores que influyen en el movimiento de las corrientes oceánicas superficiales son las **fuerzas de gravedad, fricción y Coriolis**.

4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

❖ Corrientes Ecuatoriales, Corrientes Límites y Giros.

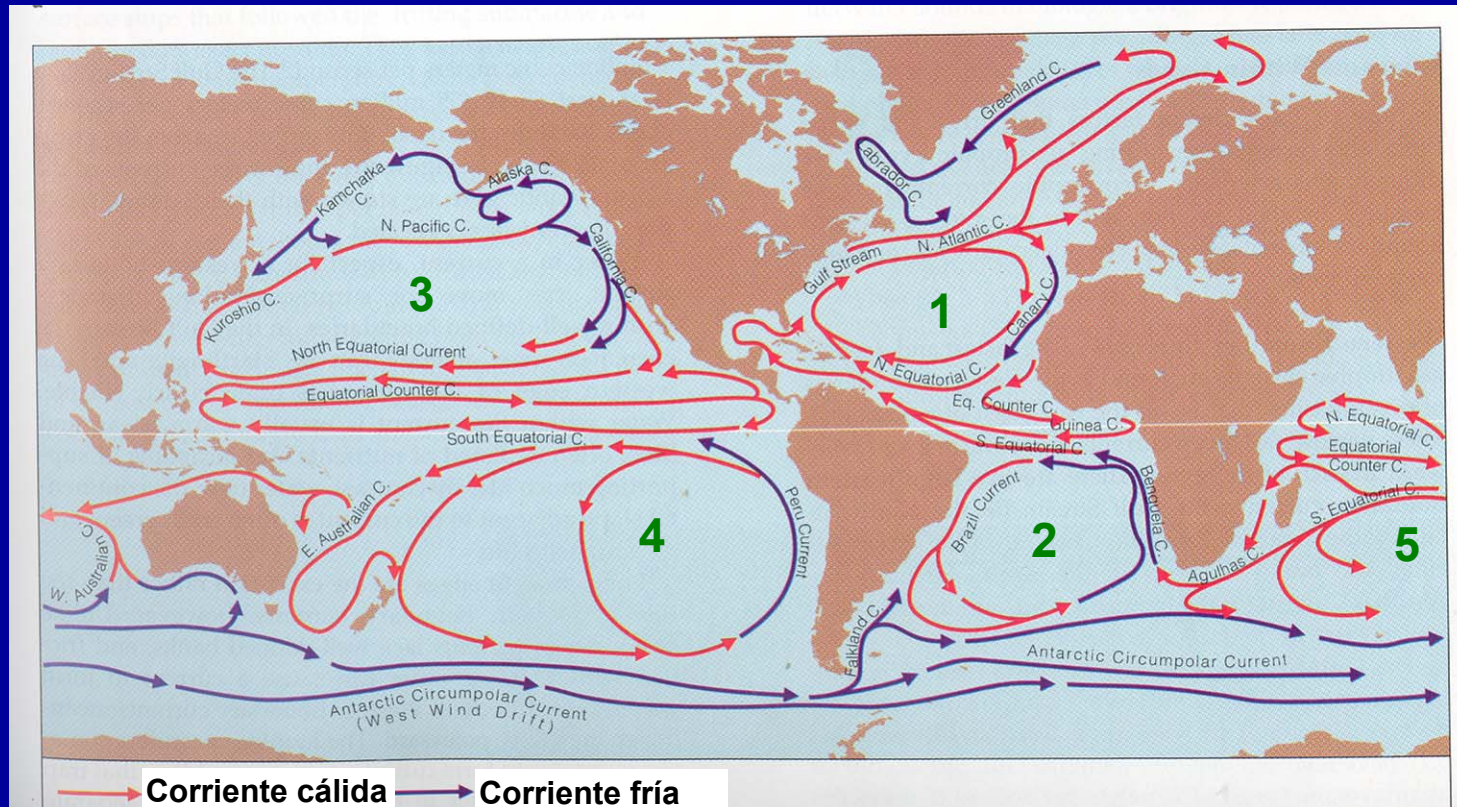


Sistema de vientos y corrientes oceánicas superficiales del Atlántico

- Los vientos alisios ponen en movimiento las masas de agua entre los trópicos y desarrollan las corrientes ecuatoriales.
- Estas corrientes se desplazan hacia el oeste y giran cuando alcanzan el margen oriental de las cuencas oceánicas.
- La desviación producida por la fuerza de Coriolis hace que las corrientes se alejen del Ecuador constituyendo las corrientes límite o de margen occidental.
- Entre 30 y 60° de latitud los vientos del oeste dirigen el agua hacia el este de las cuencas oceánicas.
- Al atravesar las cuencas oceánicas el efecto de Coriolis y las barreras continentales dirigen el agua hacia el Ecuador como corrientes límite o de margen oriental.
- En conjunto estas corrientes crean unas estructuras donde el agua gira en círculos, llamadas giros subtropicales.

4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

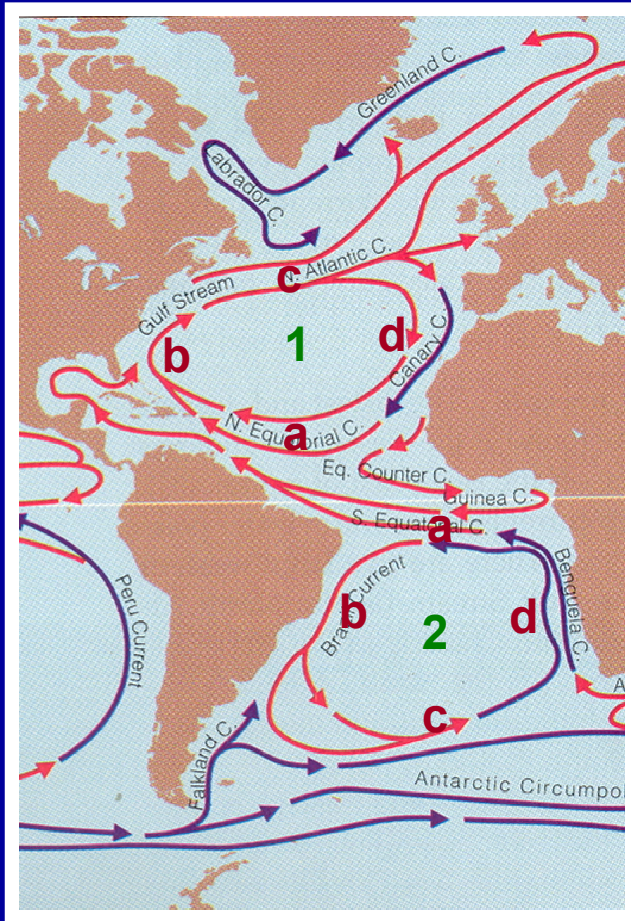
- Hay 5 giros subtropicales en el mundo,
 - El Giro del Atlántico Norte (1), el Giro del Atlántico Sur (2), el Giro del Pacífico Norte (3), el Giro del Pacífico Sur (4) y el Giro del Océano Índico (5).



Sistema de corrientes oceánicas superficiales

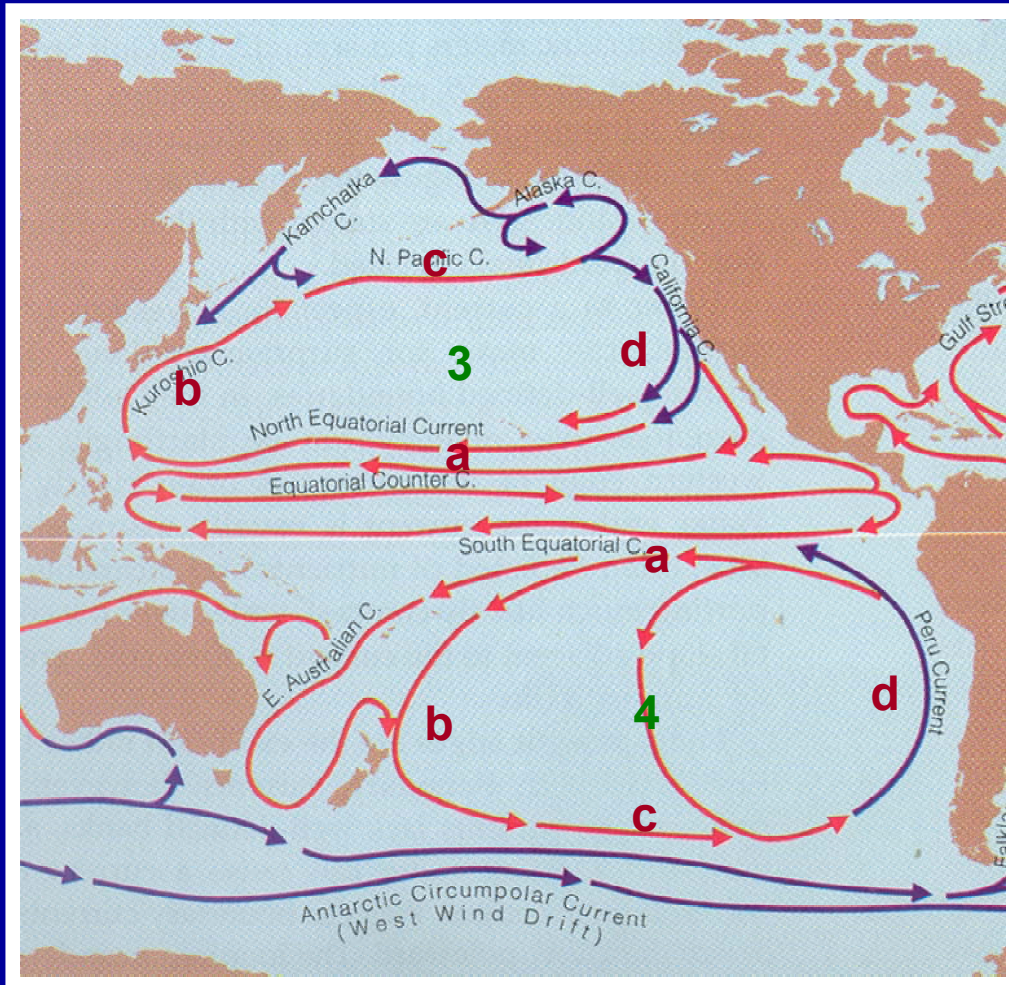
4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

- El centro de los giros subtropicales está situado a 30 °.
- Los giros subtropicales rotan en sentido horario en el Hemisferio Norte, y antihorario en el Hemisferio Sur.



- Giro del Atlántico Norte (1):
 - a) Corriente Norecuatorial.
 - b) Corriente del Golfo.
 - c) Corriente Noratlántica.
 - d) Corriente de Canarias.
- Giro del Atlántico Sur (2):
 - a) Corriente Surecuatorial.
 - b) Corriente de Brasil.
 - c) Corriente del Atlántico Sur.
 - d) Corriente de Benguela.

4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.



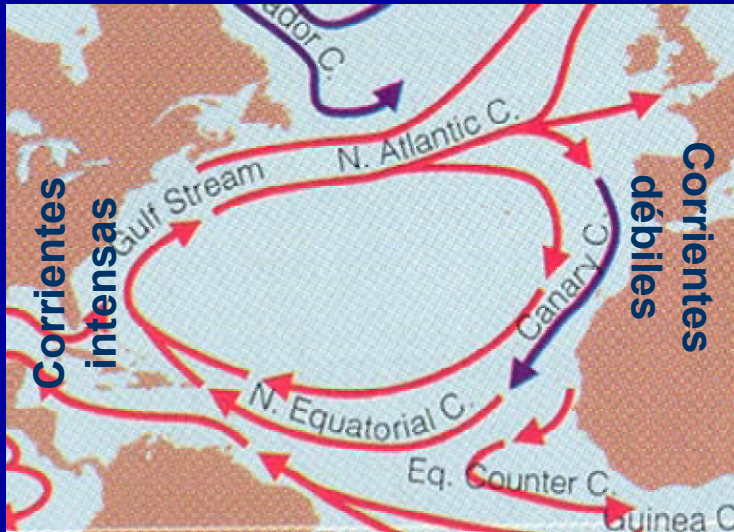
- Giro del Pacífico Norte (3):
 - a) Corriente Norecuatorial.
 - b) Corriente de Kuroshio.
 - c) Corriente del Pacífico Norte.
 - d) Corriente de California.
- Giro del Pacífico Sur (4):
 - a) Corriente Surecuatorial.
 - b) Corriente Australiana del Este.
 - c) Corriente del Pacífico Sur.
 - d) Corriente de Perú o de Humbolt.

4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.



- Giro del Océano Índico (5):
 - a) Corriente Surecuatorial.
 - b) Corriente de Angulhas.
 - c) Corriente Sur del Océano Índico.
 - d) Corriente Australiana del Oeste.

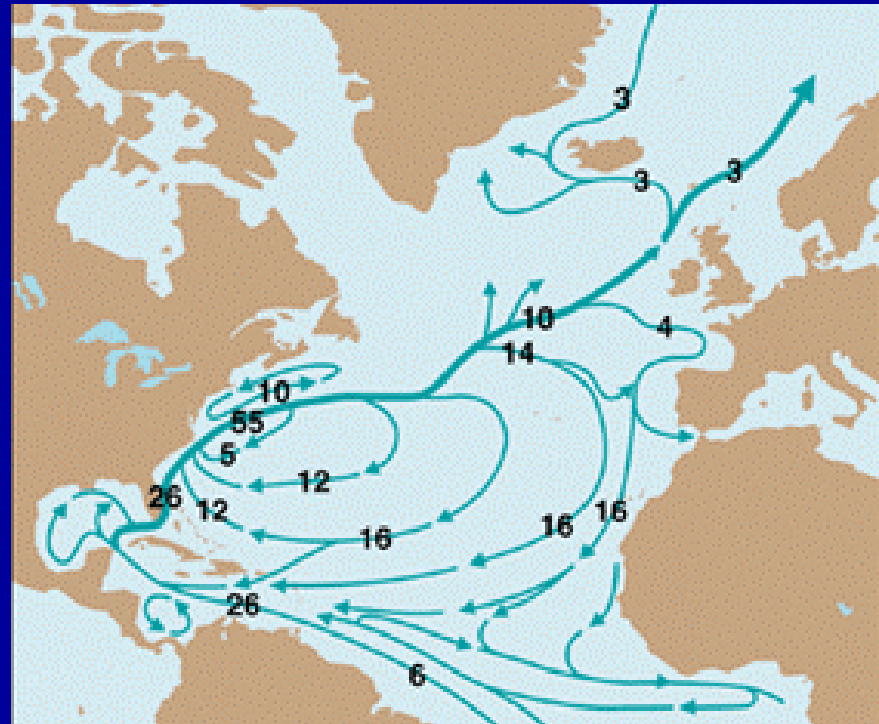
4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.



Circulación en el giro subtropical del Atlántico Norte.

Los números indican el flujo del agua en millones de metros cúbicos por segundo (Sv).

- Las corrientes en el margen occidental de los océanos son más intensas (2 m/s) que en el margen oriental (0.2-0.5 m/s). Hay una intensificación hacia occidente de las corrientes.



4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

Tipo de corriente	Nombres	Características	Intensidad
Corriente de margen occidental	Corriente del Golfo Corriente de Brasil Corriente de Kuroshio Corriente Australiana del Este Corriente de Angulhas	Corriente cálida Estrecha (<100 km) Profunda (hasta 2 km)	Rápidas, cientos de km al día
Corriente de margen oriental	Corriente de Canarias Corriente de Benguela Corriente de California Corriente de Perú Corriente Australiana del Oeste	Corriente fría Extensa (~1000 km) Poco profunda (<500 m)	Lentas, decenas de km al día

4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

- En las altas latitudes del Hemisferio Norte, las masas continentales y los vientos del este favorecen la generación de los Giros Subpolares.
- En estos giros las corrientes circulan en sentido opuesto a como lo hacen en los giros subtropicales adyacentes.
- Hay dos Giros Subpolares:
 - Giro Subpolar del Atlántico Norte (1)
 - Giro Subpolar del Pacífico Norte (2)

a) Corriente del Atlántico Norte
b) Corriente de Groenlandia
c) Corriente del Labrador

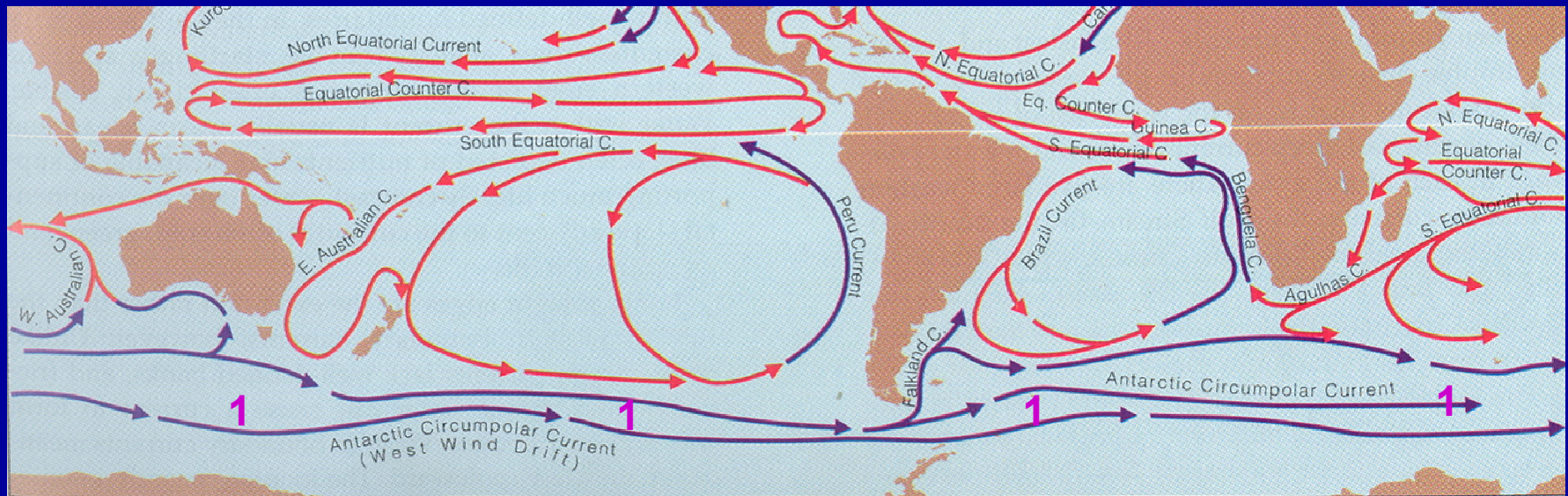
a) Corriente del Pacífico Norte
b) Corriente de Alaska
c) Corriente de Oyashio



4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

❖ Otras grandes corrientes.

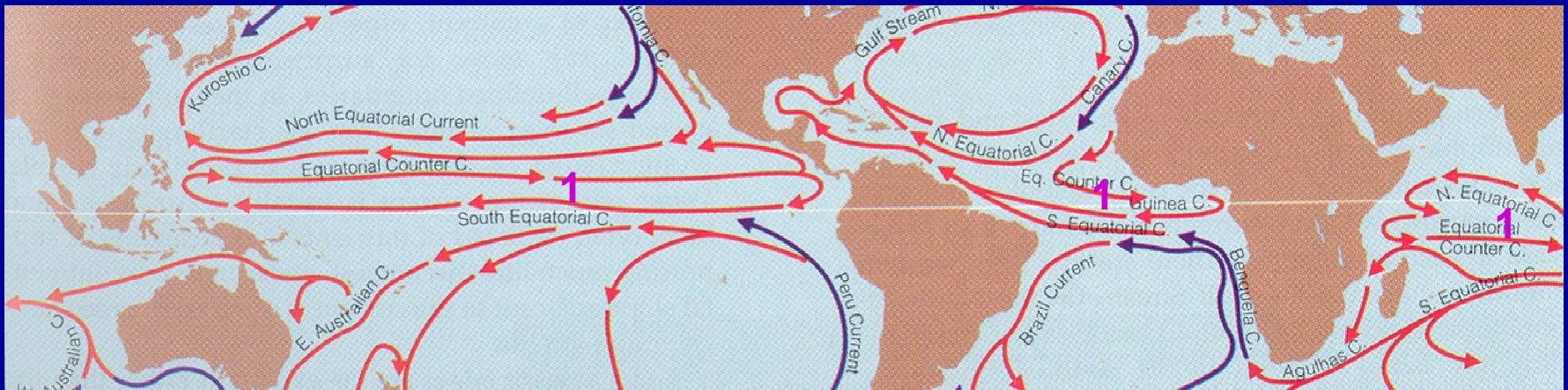
- En las altas latitudes del Hemisferio Sur, no hay masas continentales que impidan el flujo oceánico. De este modo:
 - Los vientos del oeste dan lugar a la **Corriente Circumpolar Antártica (1)**, que fluye hacia el este recorriendo todo el planeta.
 - Los vientos del este que soplan sobre el continente antártico conducen a la **Corriente Polar Ártica (2)**, que fluye hacia el oeste en una franja estrecha, alrededor de la Antártida.



4.- Descripción de la circulación superficial oceánica.

❖ Otras grandes corrientes.

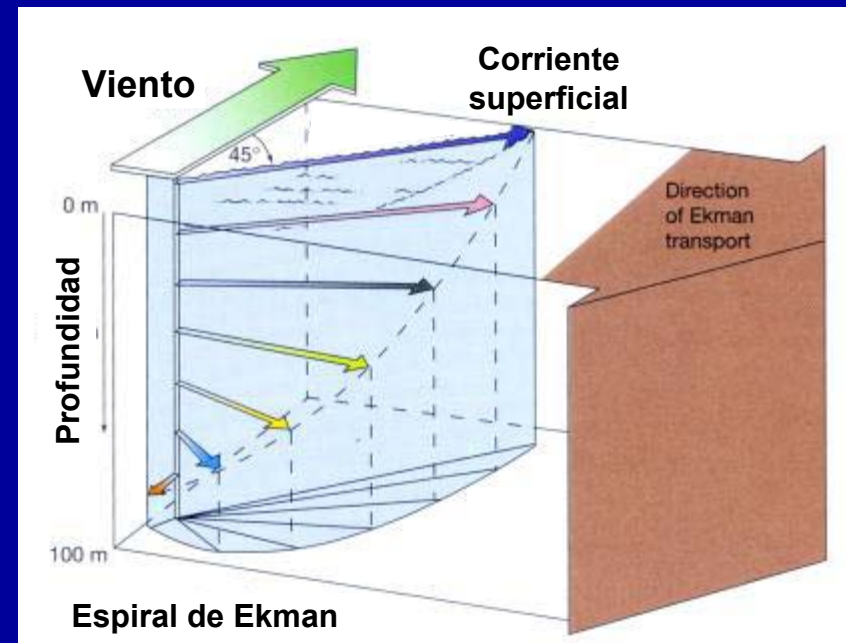
- En las bajas latitudes cerca del Ecuador (entre 4 y 10°N) y en todos los océanos se aprecia una corriente que se dirige hacia el este, denominada **Contracorriente Ecuatorial (1)**.
 - Los **vientos alisios** producen un apilamiento del agua que transportan hacia el oeste con las corrientes ecuatoriales.
 - Esto genera una pendiente en la superficie del mar y un **gradiente de presiones horizontal** que se dirige hacia el este.
 - Como los vientos se debilitan en la **ZCIT**, el agua es capaz de fluir desde la zona de altas presiones a la de bajas presiones, en dirección contraria a los alisios, dando lugar a la **Contracorriente Ecuatorial**.



5.- Circulación superficial inducida por el viento.

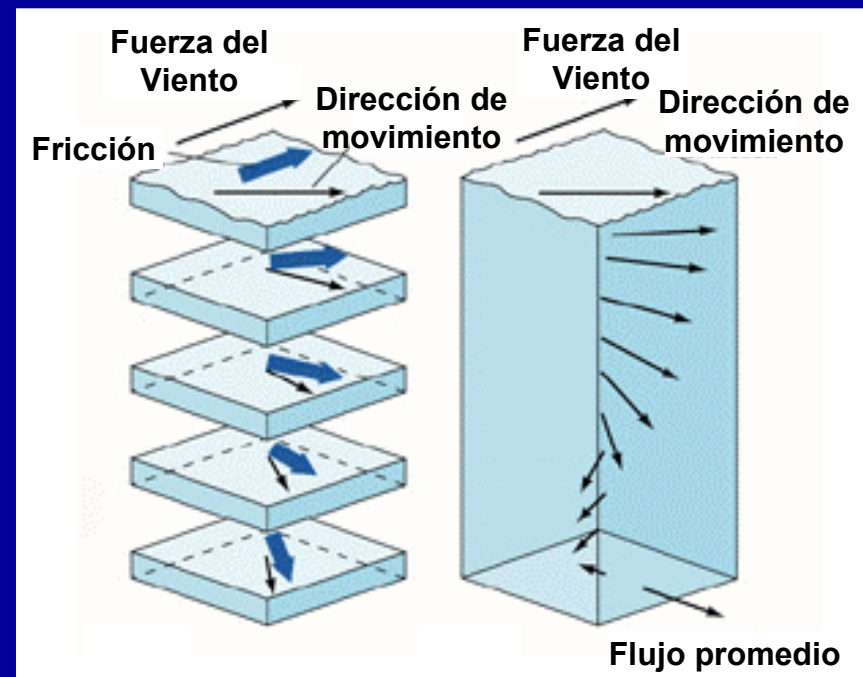
5.1 Espiral de Ekman y transporte de Ekman

- En 1893 Fridtjof Nansen en una expedición en el Ártico observó que el hielo se desviaba de 20 a 40° a la derecha de la dirección en que soplaban el viento.
- Esto le sucede también a las aguas superficiales situadas a distintas profundidades en el Hemisferio Norte.
- Nansen le pasó esta información a V. Walfrid Ekman, que desarrolló la teoría que explica estas observaciones, conocida como el modelo de la espiral de Ekman.
- Esta teoría describe la velocidad y dirección del flujo de las aguas superficiales a distintas profundidades.
- Esta espiral está producida por la acción conjunta del viento soplando sobre la superficie, el efecto de Coriolis y la fricción del agua.



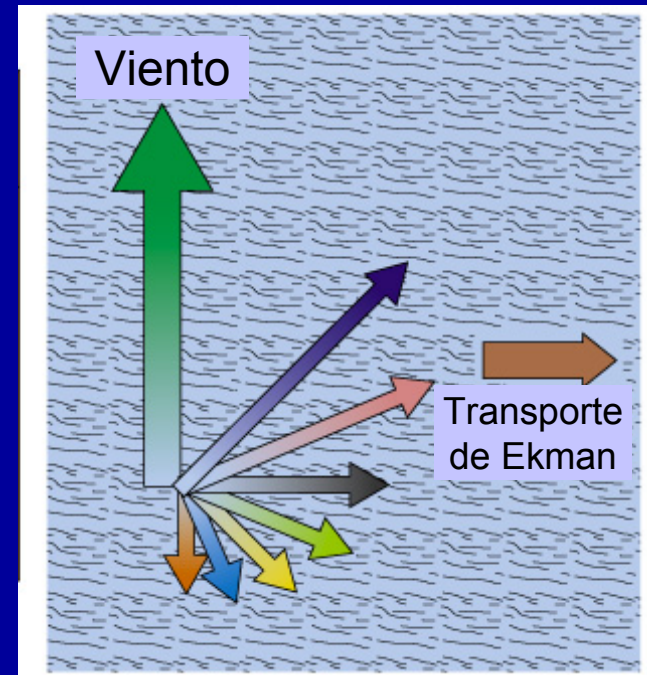
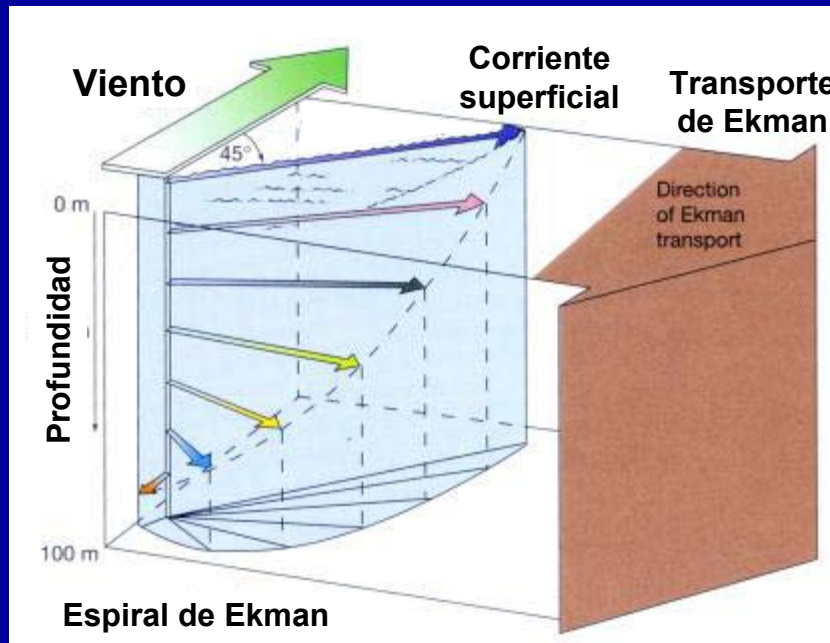
5.- Circulación superficial inducida por el viento.

- Según la **teoría de Ekman**, aplicada a una columna de agua homogénea, el viento que sopla sobre la superficie pone en movimiento esta columna de agua.
- Esta teoría toma al océano como formado por un **infinito número de capas**
 - La **capa superior** está sujeta al arrastre del viento en la superficie de arriba y a la fricción que la siguiente capa ejerce en su superficie inferior.
 - La **segunda capa** está sometida a la fricción que ejerce la capa superior en su superficie de arriba y a la fricción con la tercera capa en su superficie inferior.
 - Y así sucesivamente.
- Además como las capas se mueven, sobre todas ellas actúa la **fuerza de Coriolis**.
- Estudiando el **balance de estas fuerzas** Ekman dedujo que:
 - La **velocidad de las capas disminuye exponencialmente** con la profundidad.
 - La **dirección de la corriente se desvía 45°** de la del viento en superficie y este ángulo de desviación **se incrementa** con la profundidad
- Esto ocurre hasta llegar a una profundidad donde **cesa el movimiento (100-150 m)**.



5.- Circulación superficial inducida por el viento.

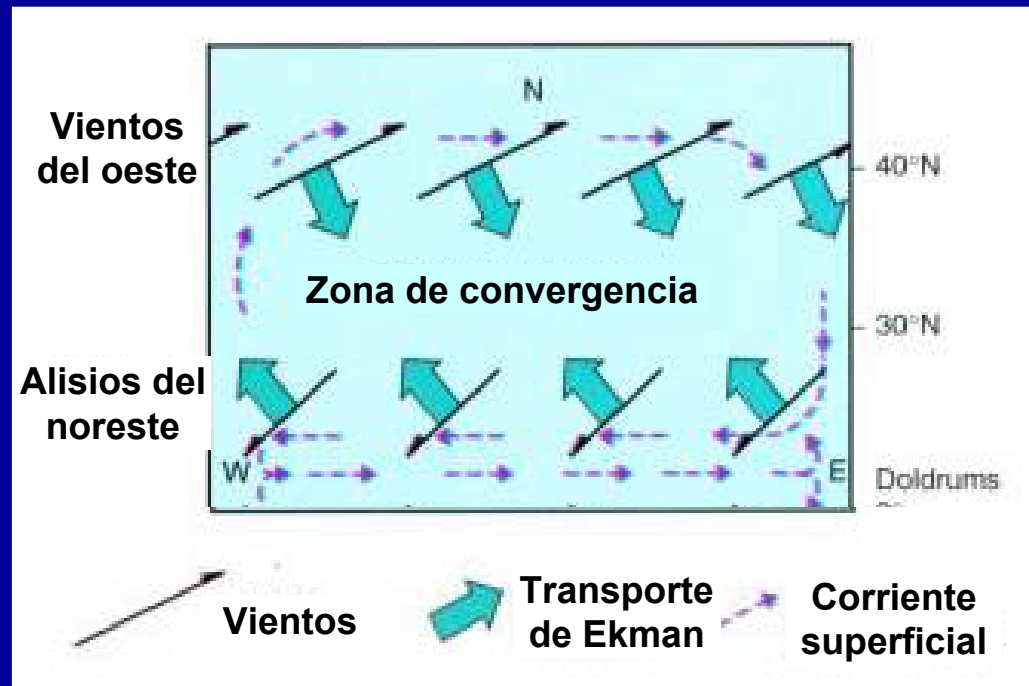
- Aunque la capa superficial fluye con un ángulo de 45° respecto al viento, sin embargo, el transporte total promedio de todas las capas de agua es un movimiento neto formando un ángulo de 90° con la dirección del viento (a la derecha de la dirección del viento en el Hemisferio Norte y a la izquierda en el Hemisferio Sur).
- Este movimiento promedio de todas las láminas se conoce como Transporte de Ekman.



5.- Circulación superficial inducida por el viento.

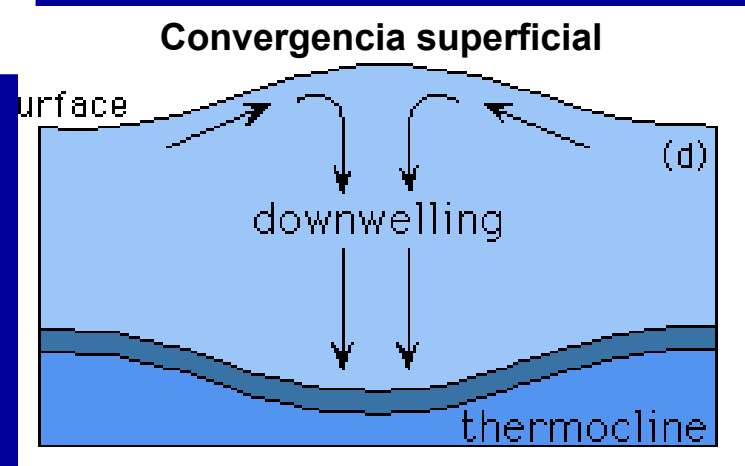
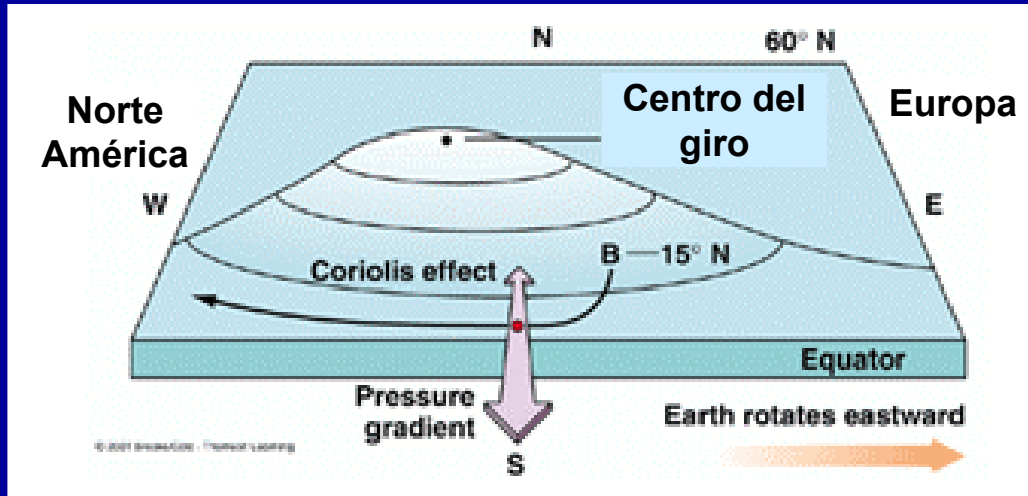
❖ Relación entre el modelo de Ekman y los Giros Subtropicales

- Tomando como ejemplo el Giro Subtropical del Atlántico Norte, y recordando que el transporte de Ekman se realiza 90° a la derecha de la dirección del viento en el Hemisferio Norte, se tiene que,
 - El transporte de Ekman producido por los alisios se dirige al Polo y el de los vientos del oeste hacia el Ecuador.
 - Esto produce una zona de convergencia en el centro del giro.



5.- Circulación superficial inducida por el viento.

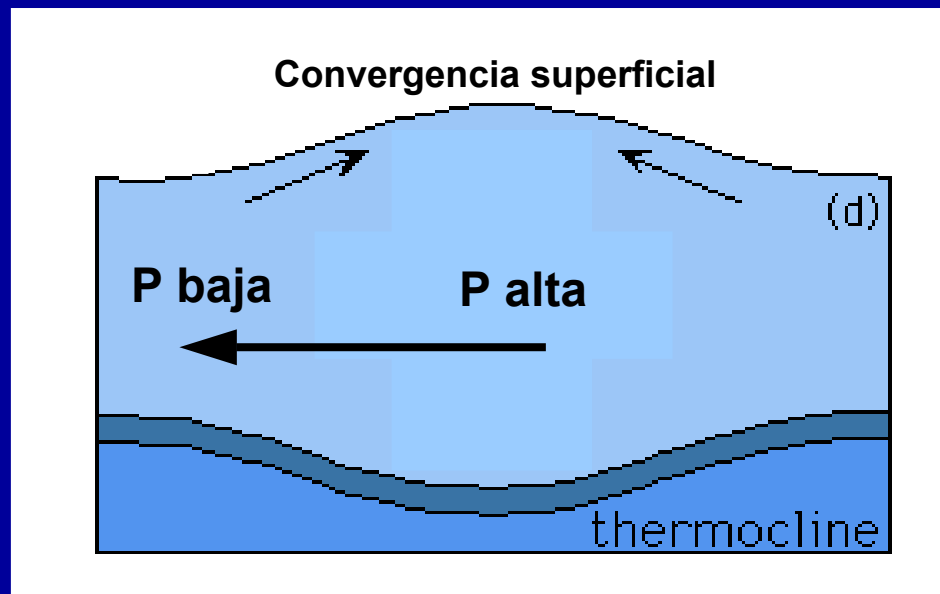
- Como consecuencia el agua se acumula o apila en el centro del giro.
- Como resultado el agua en el centro de los giros se sitúa 2 m por encima del agua en los márgenes.



5.- Circulación superficial inducida por el viento.

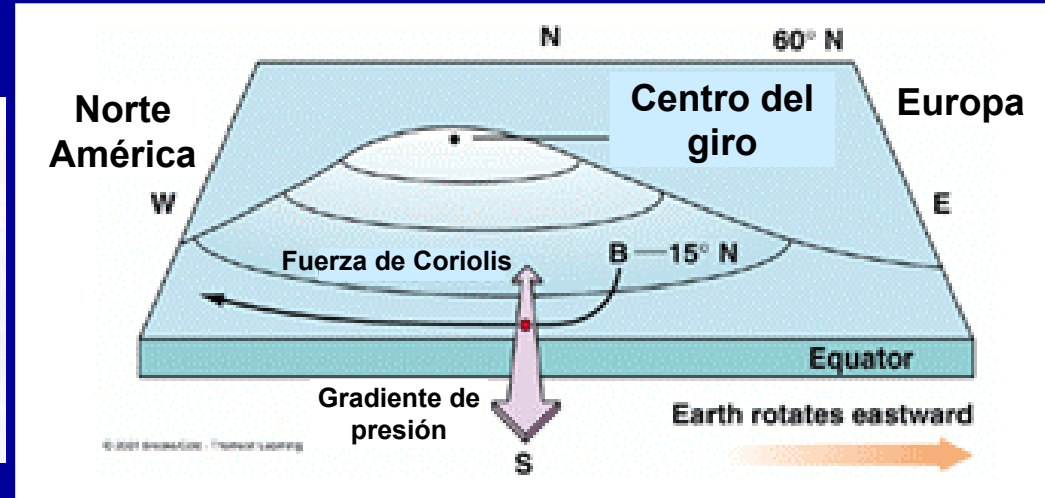
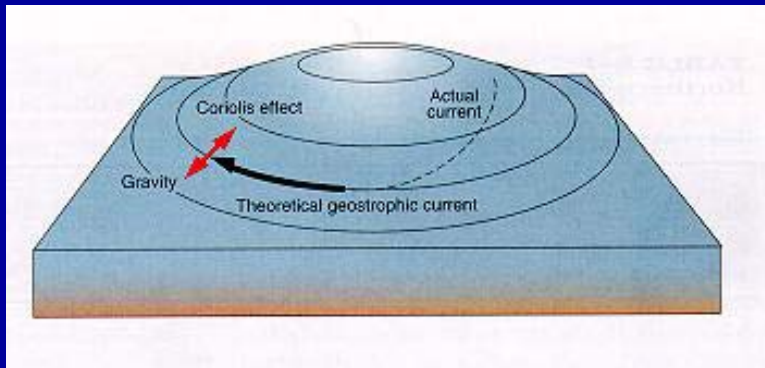
5.2 Flujo geostrófico.

- Hemos visto que la **convergencia** del agua en los **Giros Subtropicales** produce una **acumulación** del agua en el centro de los giros.
- Como resultado de esto en el **centro del giro** la **presión** será **mayor** que en los **márgenes**, creándose una **diferencia** o **gradiente** de presión.
- Como consecuencia el **agua** tenderá a **moverse** desde la zona de **altas presiones** (centro del giro) a la zona de **bajas presiones** (los bordes).

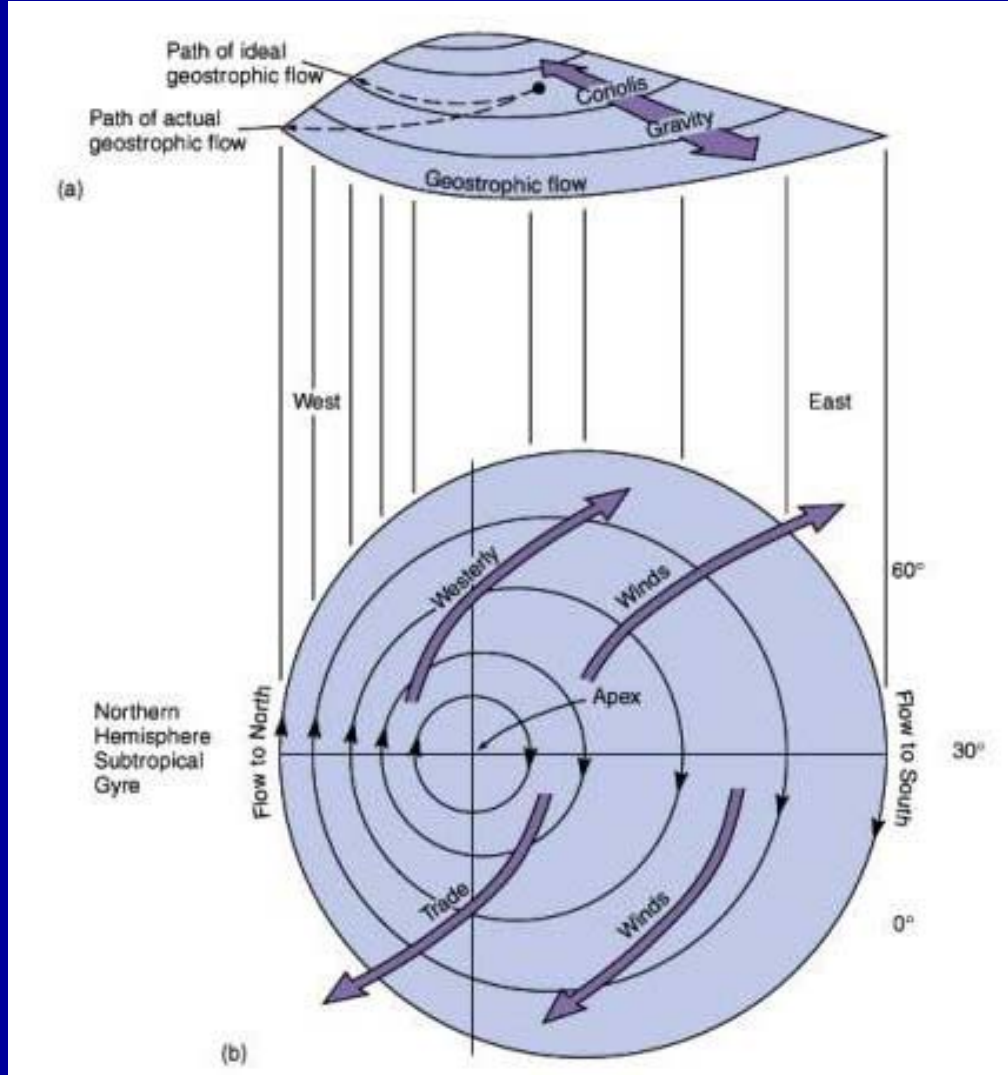


5.- Circulación superficial inducida por el viento.

- Sin embargo el efecto de Coriolis desviará el agua hacia la derecha de su trayectoria (en el Hemisferio Norte) al desplazarse ésta desde la zona de altas presiones a la de bajas presiones.
- Eventualmente se alcanzará un estado estacionario en el que la fuerza del gradiente de presión (que apunta hacia el borde del giro) se igualará con la fuerza de Coriolis (que apunta hacia el centro).
- Cuando ocurre esto, se dice que existe un flujo geostrófico, y las corrientes fluyen alrededor del giro paralelas a los contornos de elevación constante.



5.- Circulación superficial inducida por el viento.



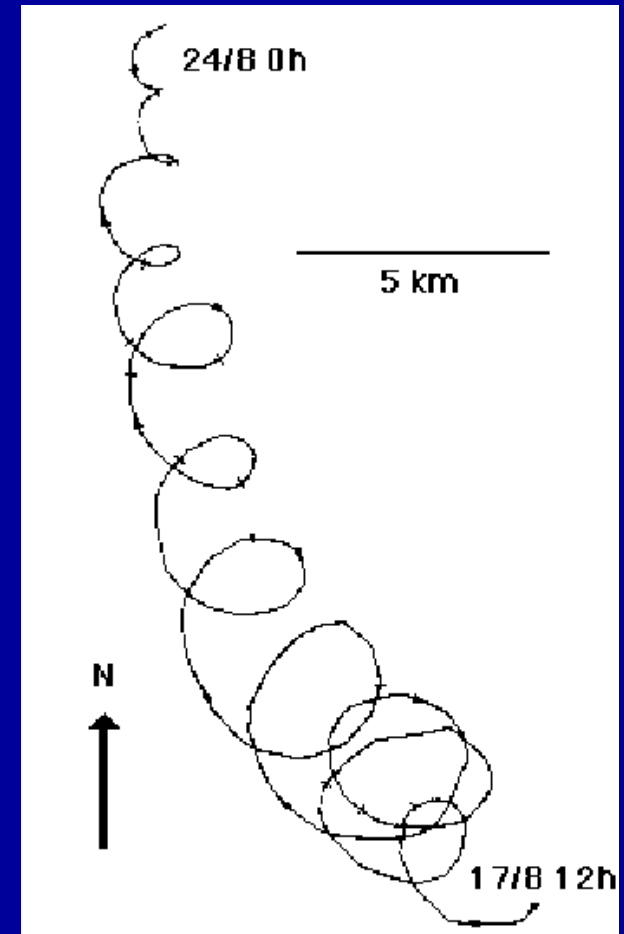
Flujo geostrófico

5.- Circulación superficial inducida por el viento.

5.3 Corrientes inerciales.

- Veamos ahora que ocurre si el viento que ha generado las corrientes deja de soplar súbitamente (asumiendo que la superficie del océano es horizontal).
- A causa de la inercia el agua no queda en reposo enseguida.
- Mientras el agua se mueva la fricción y la fuerza de Coriolis continúan actuando:
 - Las fuerzas de fricción pueden ser muy pequeñas de modo que la energía impartida por el viento al agua antes de dejar de soplar, tarda algún tiempo en disiparse.
 - Sin embargo la fuerza de Coriolis no deja de actuar desviando al agua de su trayectoria.
- Como consecuencia bajo la acción de la fuerza de Coriolis la trayectoria del agua será curvilínea, y es conocida como corriente de inercia o corriente inercial.

Movimientos
inerciales observados
en el Mar Báltico



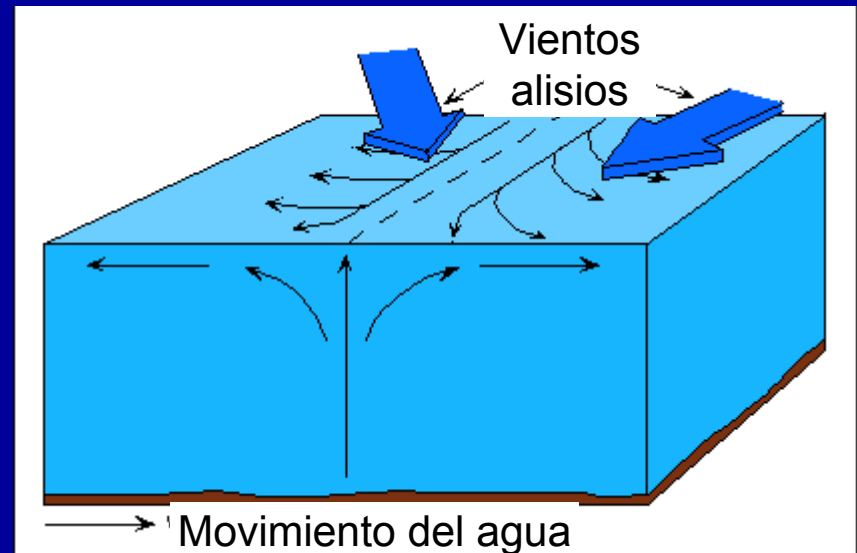
6.- Circulación vertical inducida por el viento.

- La circulación superficial generada por el viento en ocasiones puede inducir movimientos verticales, que son denominados circulación vertical inducida por el viento.
- Estos movimientos verticales pueden ser ascendentes, denominándoseles entonces como afloramientos o upwelling.
- Pero también pueden ser descendentes conociéndose entonces como downwelling.
- Los afloramientos ocurren en lugares donde las aguas superficiales divergen, esto es, se alejan de un área superficial oceánica.
- Por el contrario el downwelling ocurre en lugares de convergencia, allí donde las aguas superficiales se encuentran.

6.- Circulación vertical inducida por el viento.

6.1 Afloramiento ecuatorial.

- Hemos visto que la zona de convergencia intertropical (ZCIT) es aquella donde convergen los alisios del noreste (Hemisferio N.) y del sureste (Hemisferio S.).
- Aunque el efecto de Coriolis es débil cerca del Ecuador, las aguas aún se desvían de la dirección en que sopla el viento.
- Como fue discutido, el transporte de Ekman da lugar a que las aguas superficiales sean transportadas,
 - En el Hemisferio Norte, 90° a la derecha de la dirección del viento.
 - En el Hemisferio Sur, 90° a la izquierda de la dirección del viento.
- Como se observa en la figura esto produce una divergencia de las aguas superficiales en la región ecuatorial, que se alejan en esta zona.
- Este agua es reemplazada por agua subsuperficial que asciende dando lugar al afloramiento ecuatorial.
- Esta agua subsuperficial es fría y rica en nutrientes.



6.- Circulación vertical inducida por el viento.

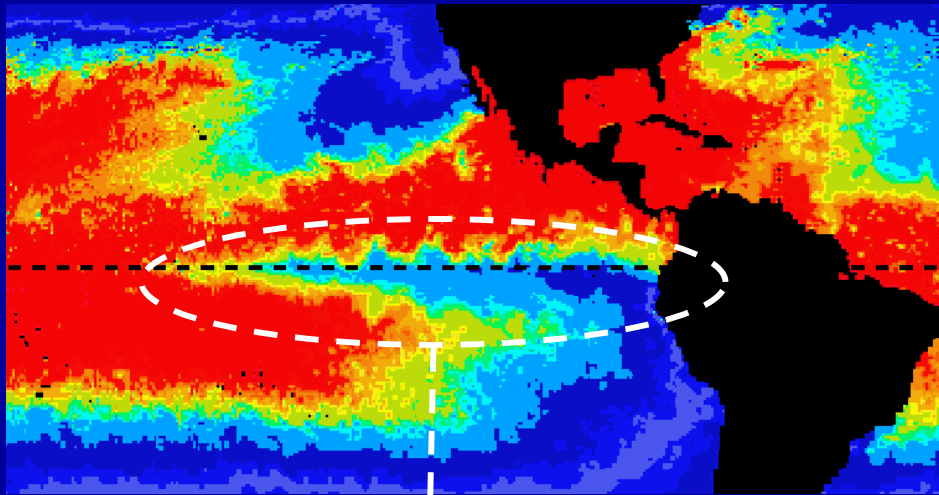
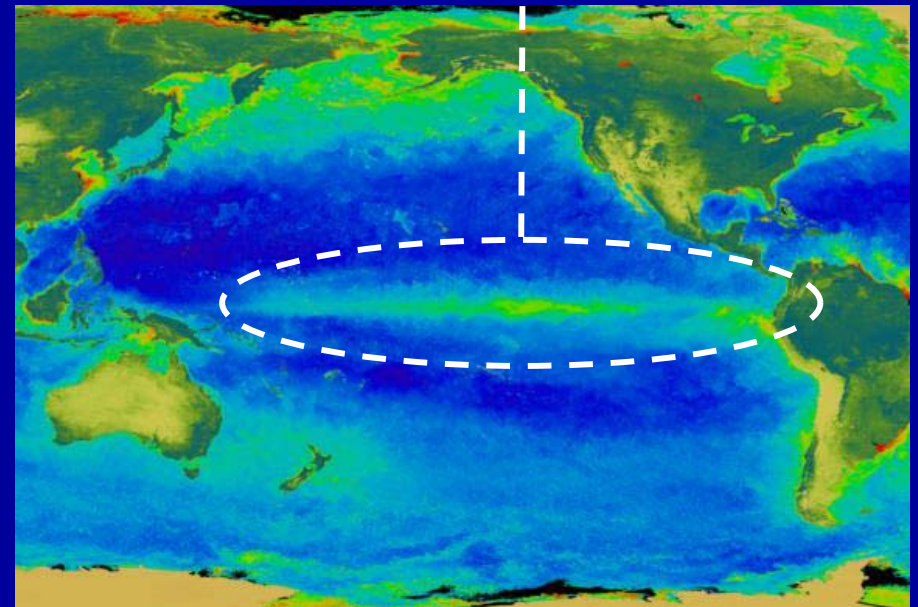


Imagen de satélite de temperatura de la superficie del mar

Afloramiento ecuatorial

Imagen de satélite de color del océano



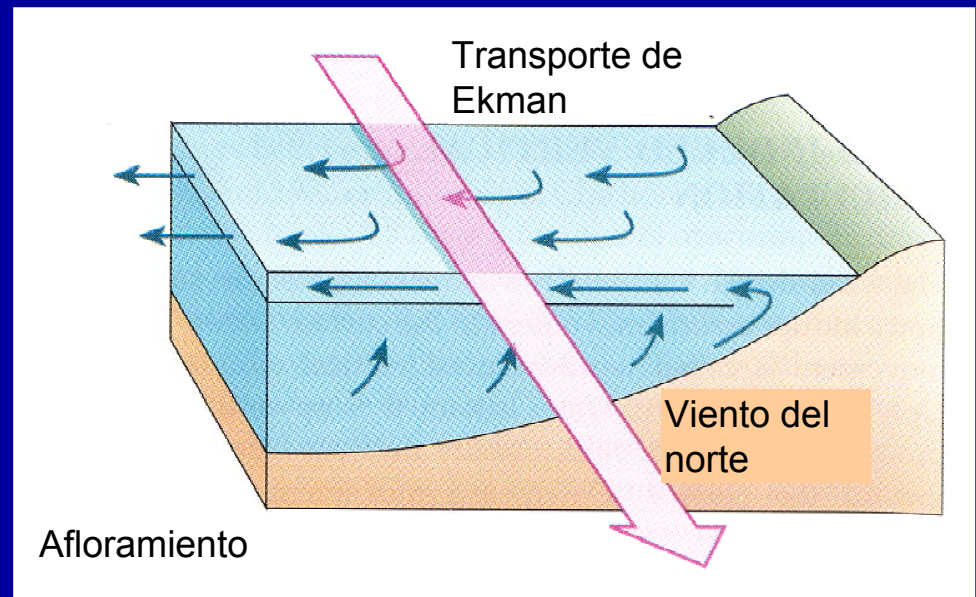
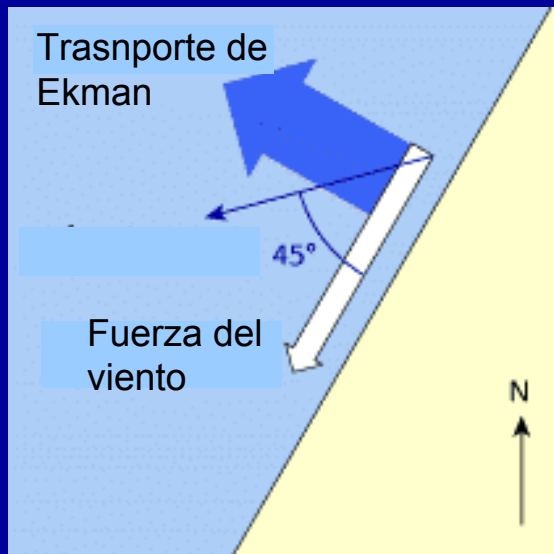
Afloramiento ecuatorial

6.- Circulación vertical inducida por el viento.

6.2 Afloramiento costero.

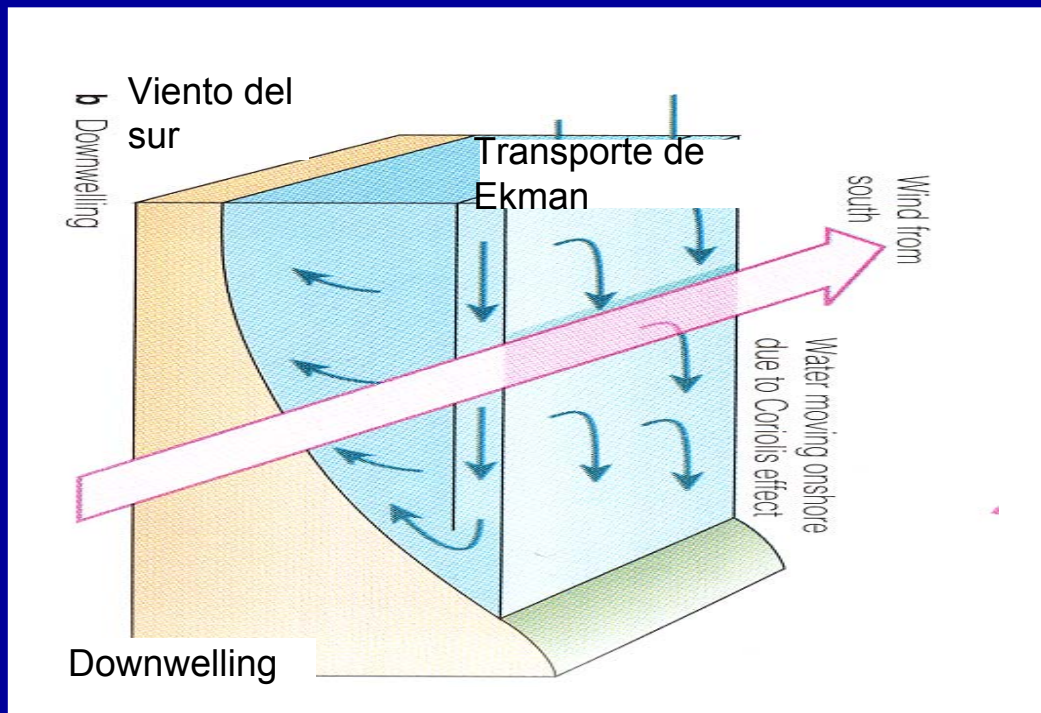
- Cuando los vientos soplan paralelos a la costa, puede ocurrir que el transporte de Ekman sea de tal forma que el agua superficial es transportada perpendicularmente a la costa alejándose de ésta.
- Este agua desplazada de la franja costera ha de ser reemplazada por otra situada por debajo, que asciende a lo largo de la costa dando lugar al afloramiento costero.
- Este agua que asciende es fría y rica en nutrientes, y dar lugar a un aumento de la productividad biológica.

Afloramiento en el Hemisferio Norte



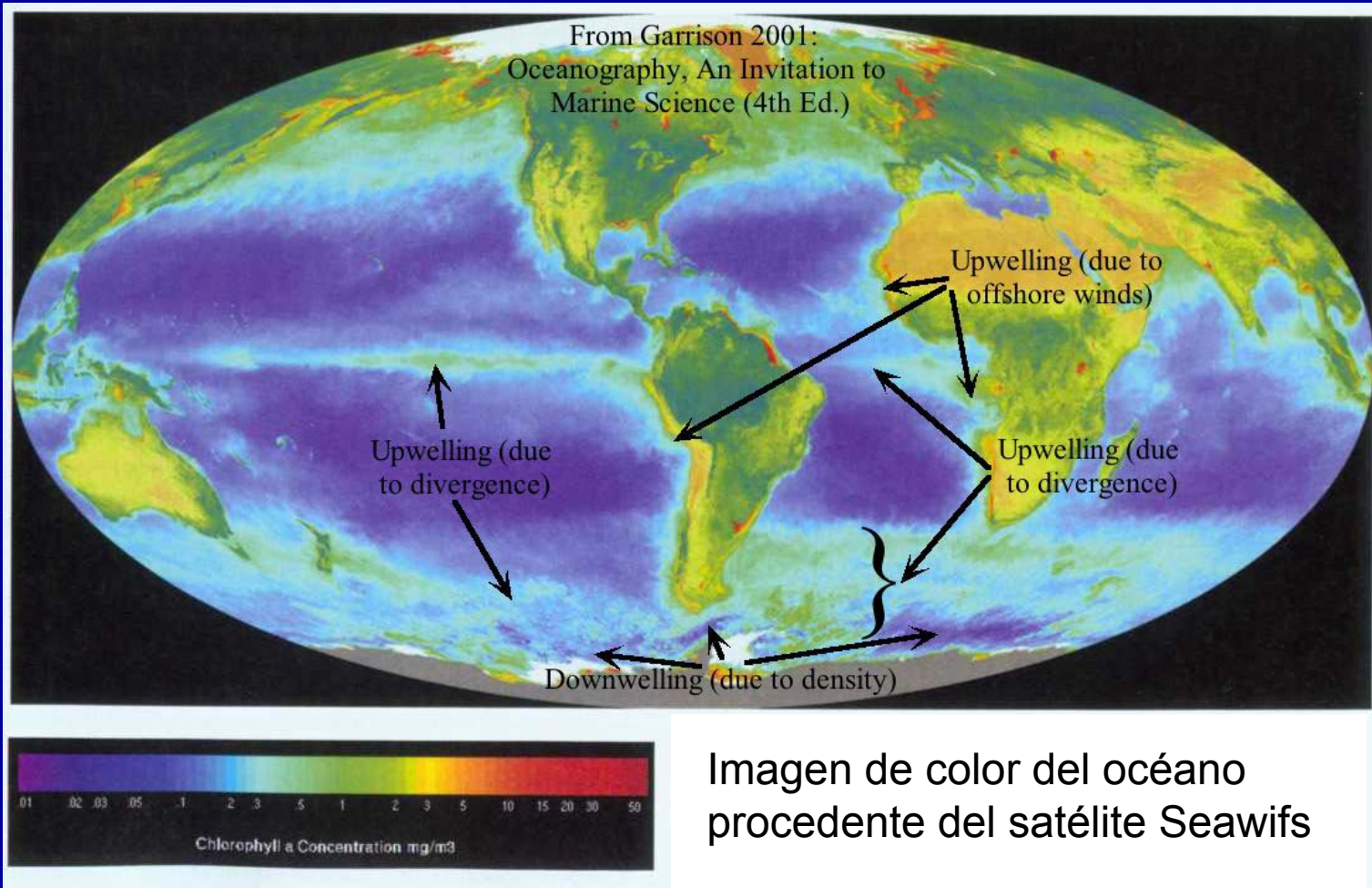
6.- Circulación vertical inducida por el viento.

- Si el viento sopla paralelo a la costa pero en sentido contrario al caso anterior, el transporte de Ekman es perpendicular a la costa, pero en este caso se dirige acercándose a la misma.
- Como consecuencia, el agua converge cerca de la costa y da lugar a la presencia de downwelling.



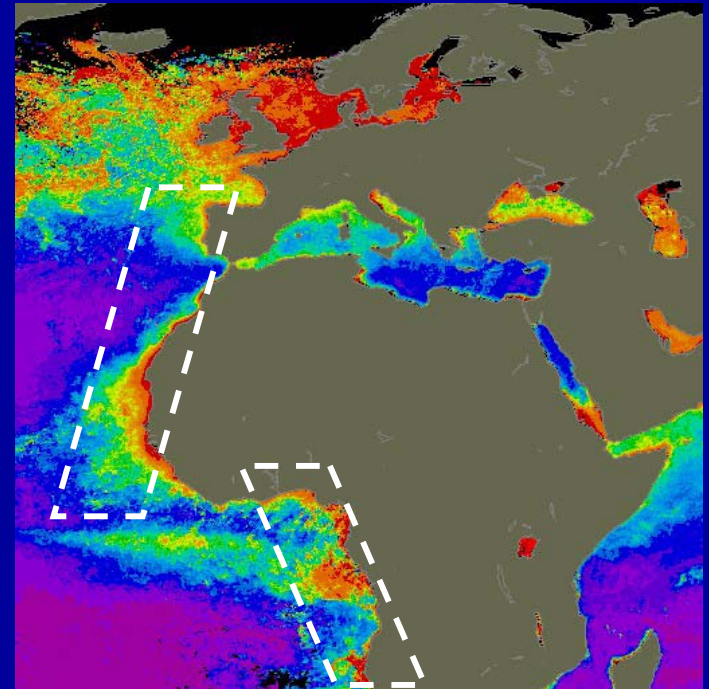
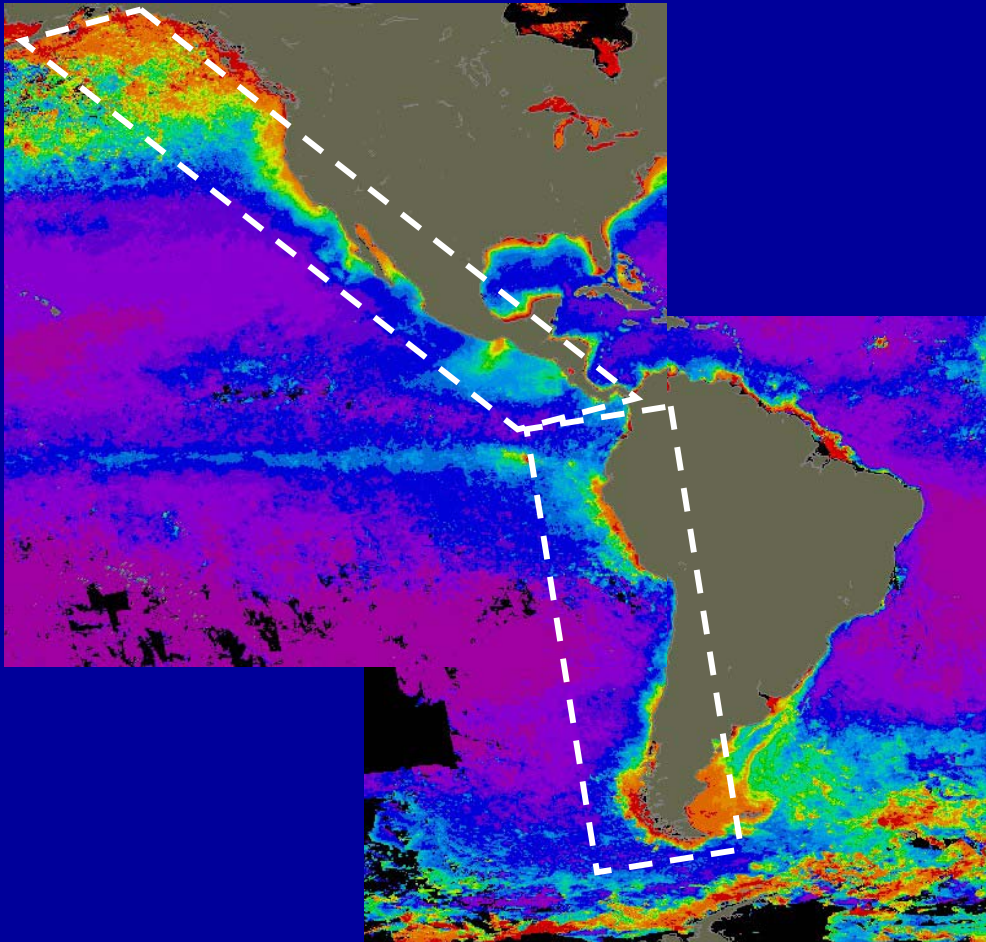
Downwelling en el Hemisferio Norte

6.- Circulación vertical inducida por el viento.



6.- Circulación vertical inducida por el viento.

Lugares donde está presente el afloramiento costero



Imágenes de satélite de color del océano del sensor CZCS

6.- Circulación vertical inducida por el viento.

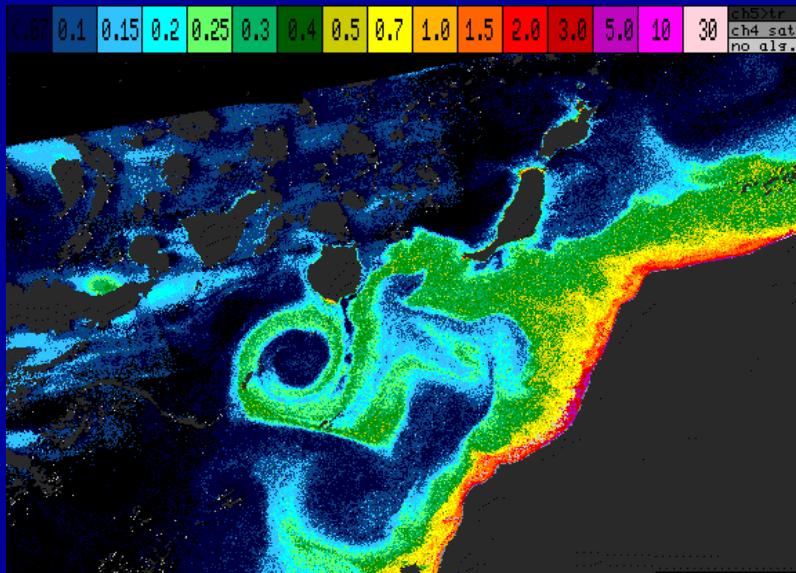
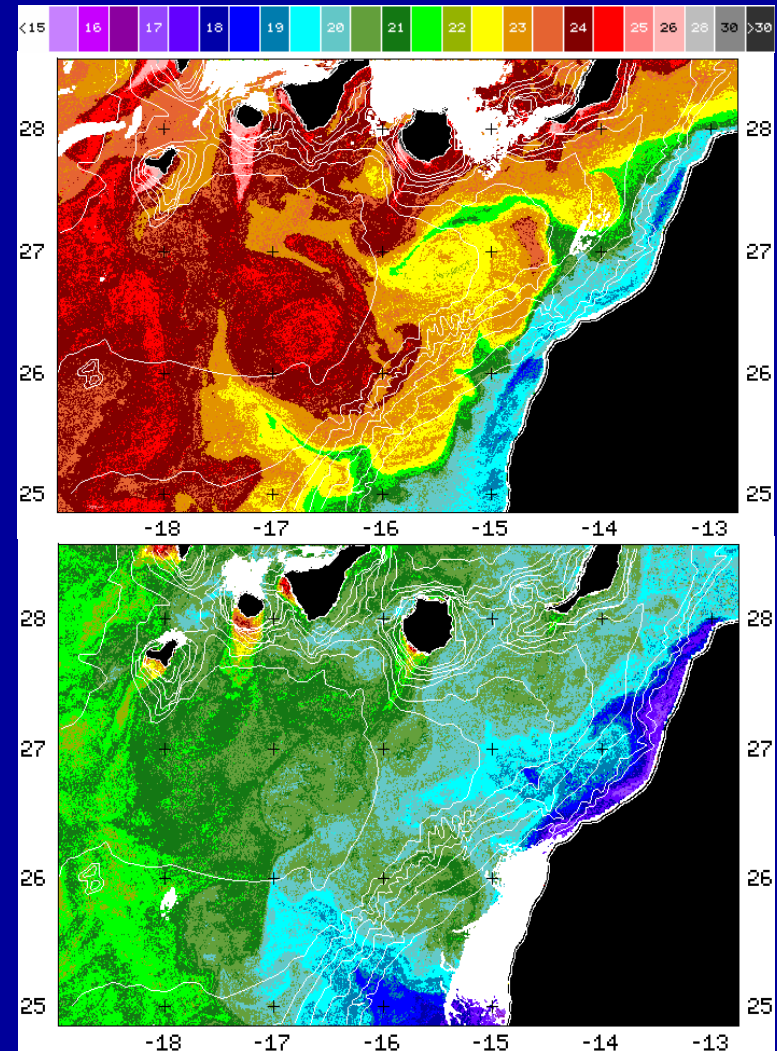
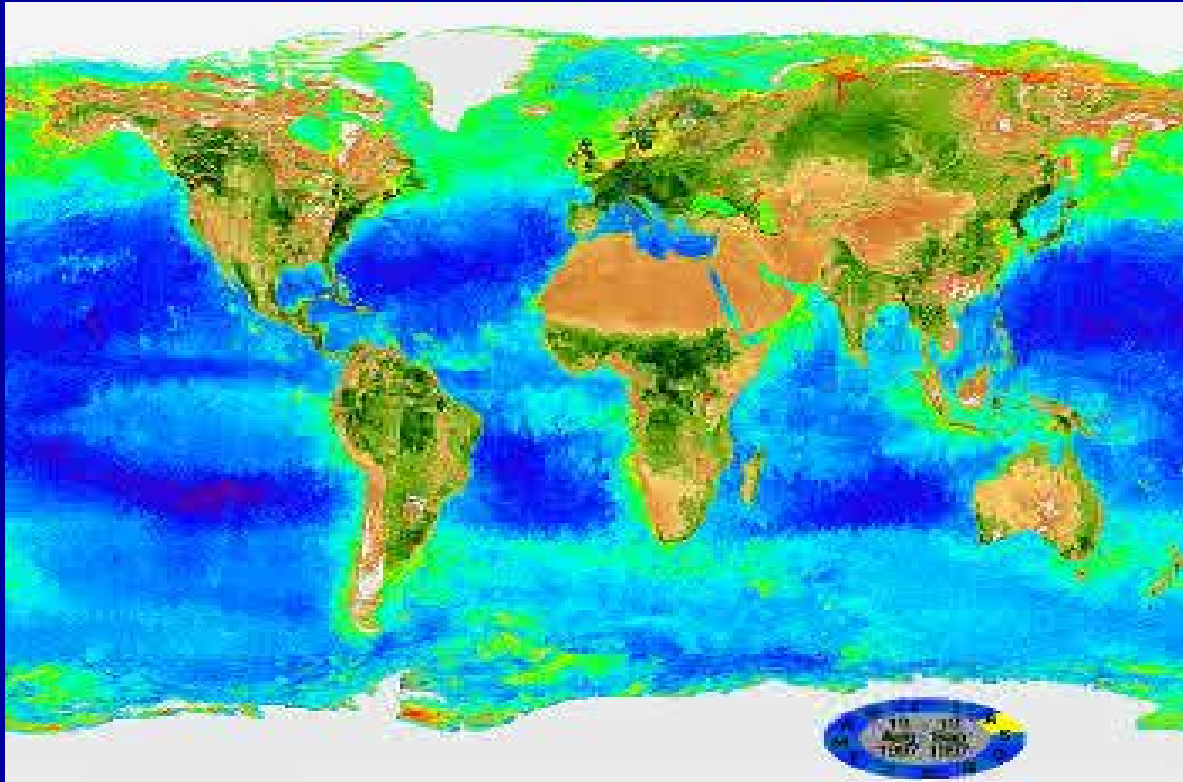


Imagen de satélite de color del océano del sensor CZCS

Imagen de satélite de temperatura de la superficie del mar del sensor AVHRR



6.- Circulación vertical inducida por el viento.

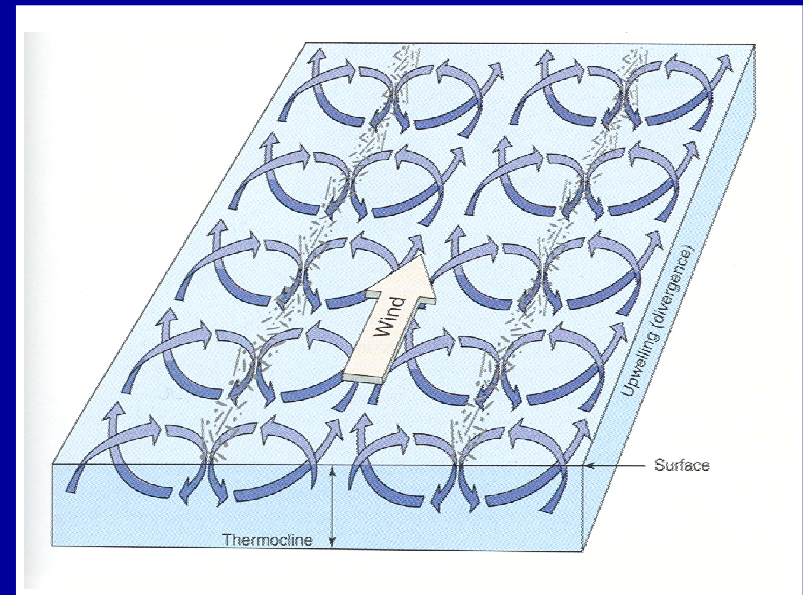
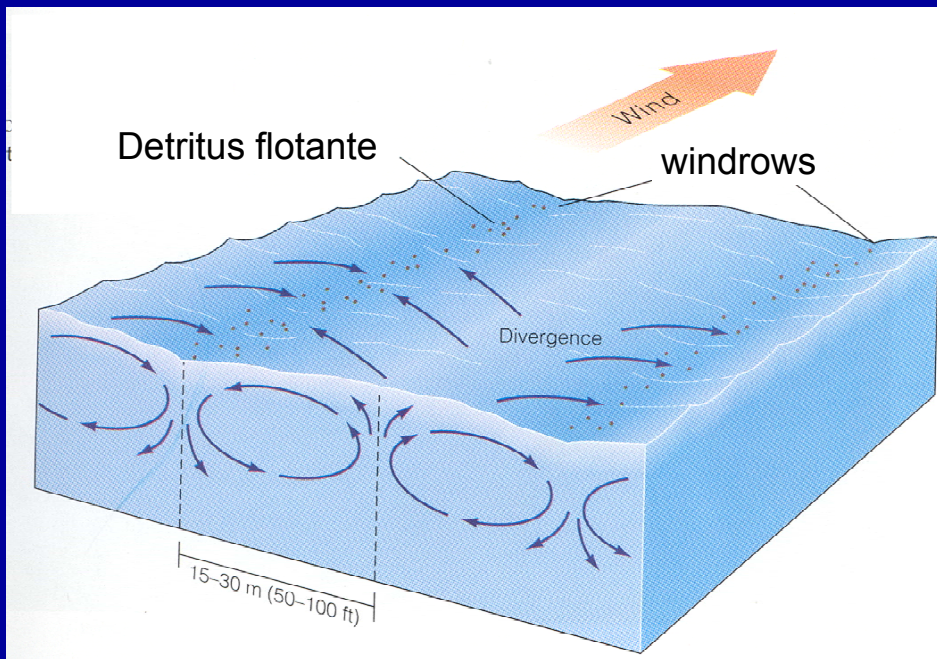


Animación del color del océano realizada con las imágenes del satélite Seawifs

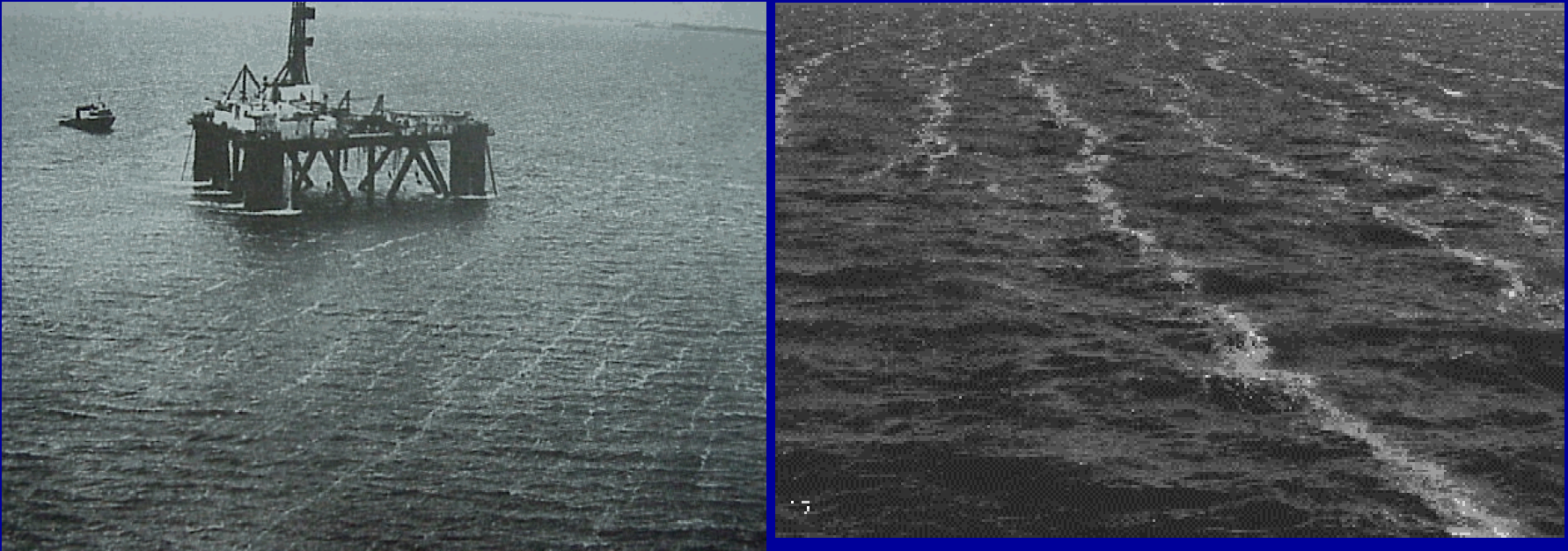
6.- Circulación vertical inducida por el viento.

6.3 Circulación de Langmuir.

- En ciertas circunstancias en el océano abierto un viento que sopla de forma estacionaria puede producir la presencia de zonas de convergencia y divergencia.
- Langmuir propuso que este viento daba lugar a la presencia de una serie de vórtices helicoidales con su ejes paralelos al viento.
- Estos vórtices resultan de la inestabilidad de la capa superior del océano y su tamaño oscila entre 15 y 30 m.



6.- Circulación vertical inducida por el viento.

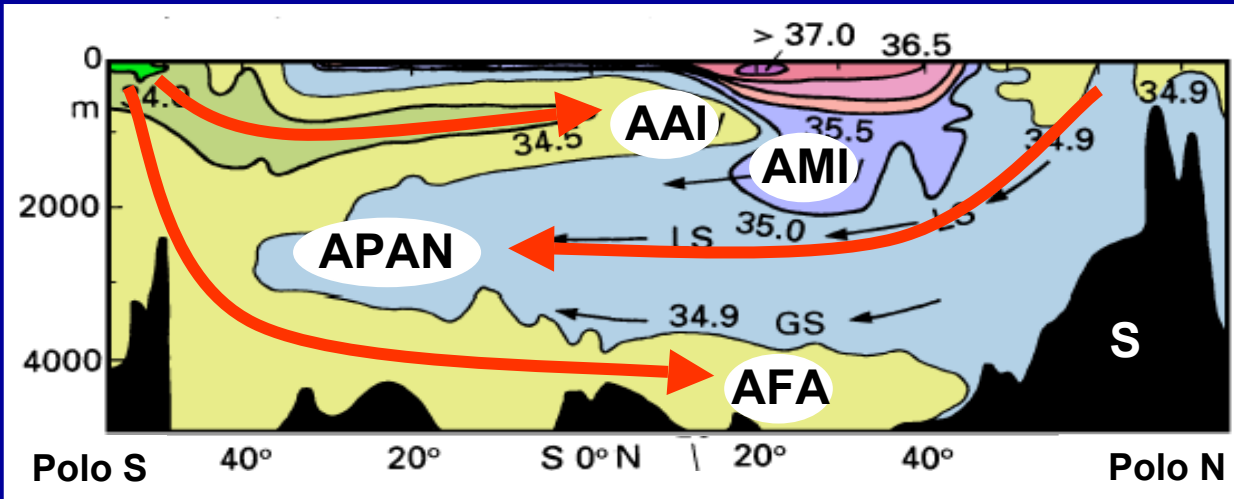


Circulación de Langmuir

7.- Descripción de la circulación profunda.

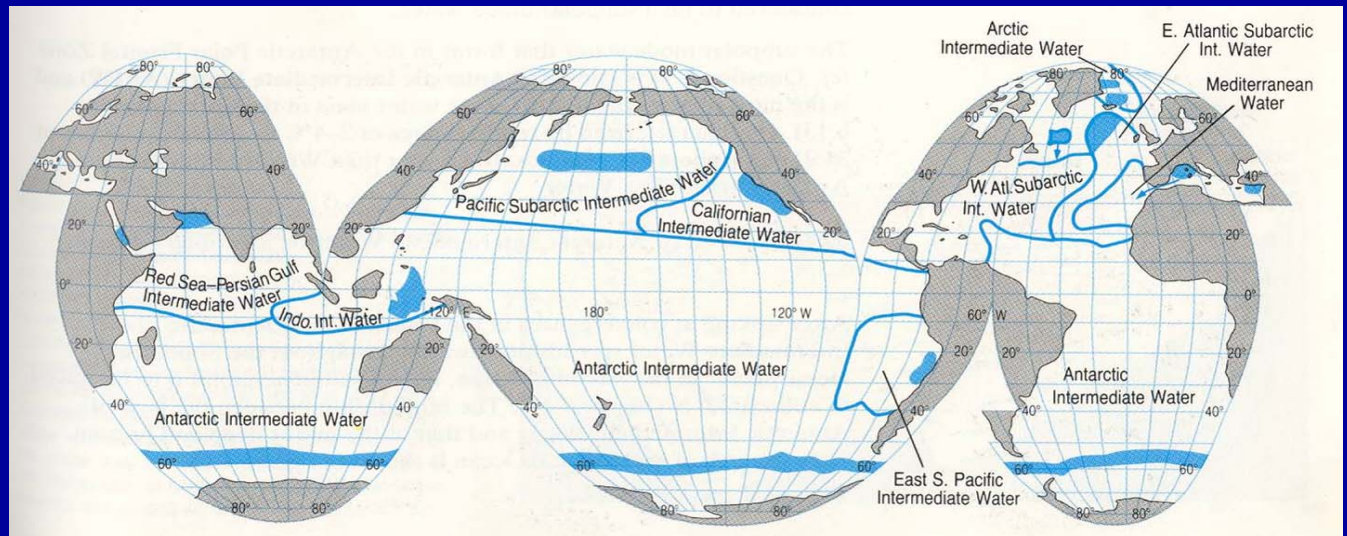
- Se denomina **circulación termohalina** a la circulación en la zona más profunda de los océanos (debajo de la termoclina).
- Está producida por cambios en la **temperatura** y la **salinidad** del agua, que producen a su vez cambios en la **densidad** y está relacionada con la **formación de las masas de agua**.
- A través de estos cambios el agua desciende y se sitúa a la profundidad que le corresponde para que los océanos mantengan una estratificación de densidad estable, desplazándose a este nivel.
- La formación (y consecuente hundimiento) de las masas de agua tiene lugar en **lugares muy concretos** de los océanos, donde se dan las condiciones específicas para su formación.

7.- Descripción de la circulación profunda.



Perfil S-z del Atlántico

Lugares de formación del Agua Intermedia

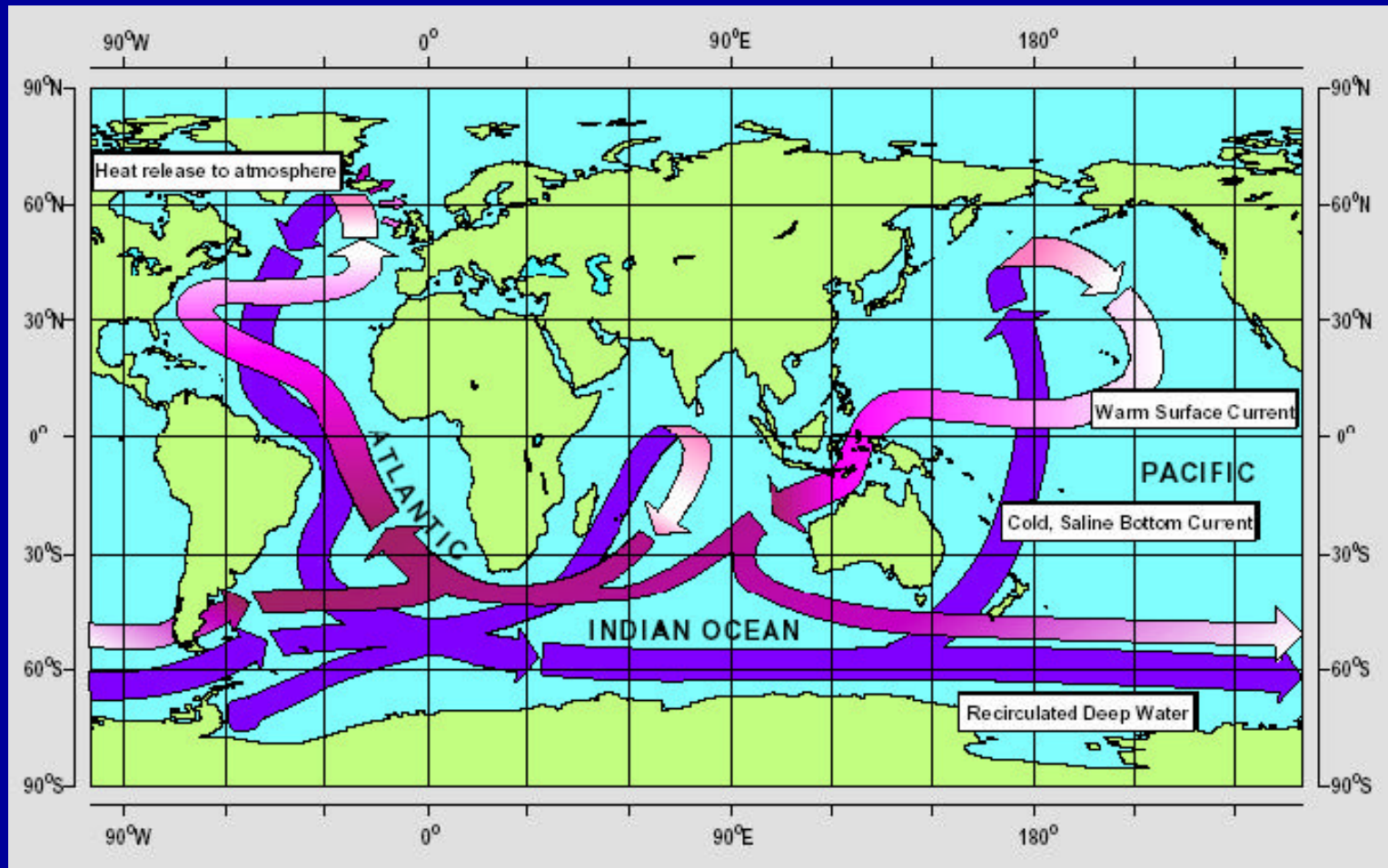


7.- Descripción de la circulación profunda.

- A través de esta circulación termohalina las distintas cuencas oceánicas intercambian agua entre sí.
- Por cada metro cúbico de agua que pasa de la superficie a las aguas profundas, otro debe pasar de las aguas profundas a la superficie.
- Es difícil especificar donde ocurre este flujo vertical ascendente.
- Se cree que ocurre de forma gradual, difusa y uniforme a través de todas las cuencas oceánicas, y que gracias a esto es posible la existencia de la termoclina permanente.
- Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene que la circulación superficial y la circulación profunda de los océanos se encuentran conectadas.
- Un modelo simple de circulación que integra la circulación superficial y la circulación profunda de los océanos es el modelo de la cinta transportadora.

7.- Descripción de la circulación profunda.

Modelo de cinta transportadora simple



7.- Descripción de la circulación profunda.

Modelo de cinta transportadora detallado

