CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA E DO OCEANO

Capitão-de-fragata Álvaro Milho Semedo
milho.semedo@marinha.pt
alvaro.semedo@yahoo.com
7 de Agosto de 2010 – Escola Naval

CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA E DO OCEANO

- Ventos (escala global e regional)
- Correntes oceânicas
- Clima global

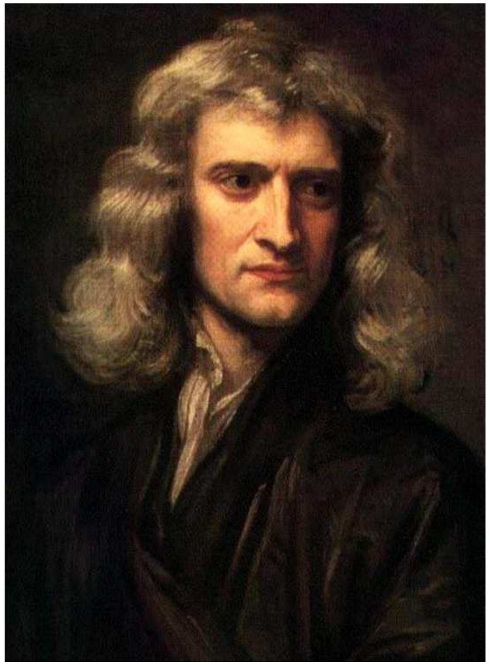
Porque há vento na atmosfera?
Porque há correntes no oceano?
Como se relacionam o vento e as correntes?
Qual é o impacto do vento nos oceanos?

Vento (correntes) = ar (água) em movimento (3 dimensões)

Primeira Lei de Newton (Lei da inércia)
Todo corpo permanece no seu estado de repouso
ou de movimento retilíneo e uniforme, a menos que seja
obrigado a mudar seu estado por forças nele exercidas.

Segunda Lei de Newton (Principio fundamental da dinâmica*)*
Para que um corpo parado se movimente é preciso que
sobre ele actue alguma força.
A aceleração que um corpo adquire é diretamente proporcional
à(s) força(s) que actua(m) sobre ele e tem a mesma
direção e o mesmo sentido dessa(s) força(s).

$$F=m.a$$



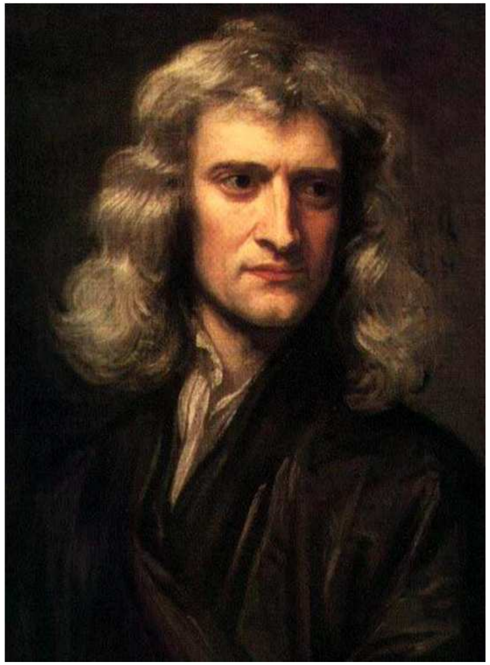
Sir Isaac Newton (1643-1927)

Vento (correntes) = ar (água) em movimento (3 dimensões)

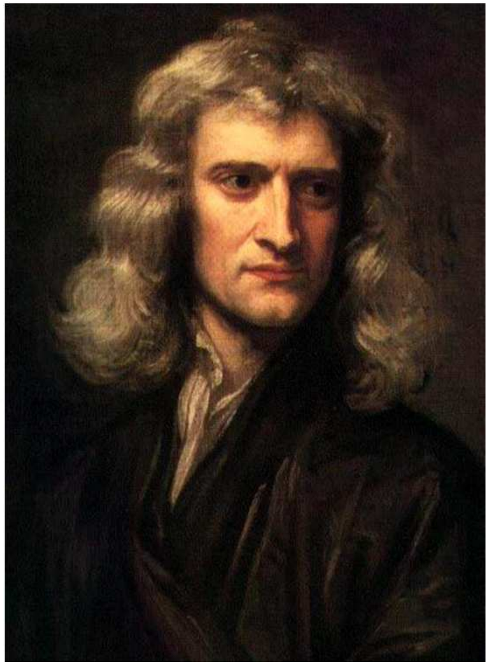
Primeira Lei de Newton (Lei da inércia)
Todo corpo permanece no seu estado de repouso
*ou de **movimento** retilíneo e uniforme, a menos que seja*
*obrigado a mudar seu estado por **forças** nele exercidas.*

Segunda Lei de Newton (Principio fundamental da dinâmica)
*Para que um corpo parado se **movimente** é preciso que*
*sobre ele actue alguma **força**.*
*A **aceleração** que um corpo adquire é diretamente proporcional*
*à(s) **força**(s) que actua(m) sobre ele e tem a mesma*
direção e o mesmo sentido dessa(s) força(s).

$$F = m . a$$


Sir Isaac Newton (1643-1927)

Vento (correntes) = ar (água) em movimento (3 dimensões)



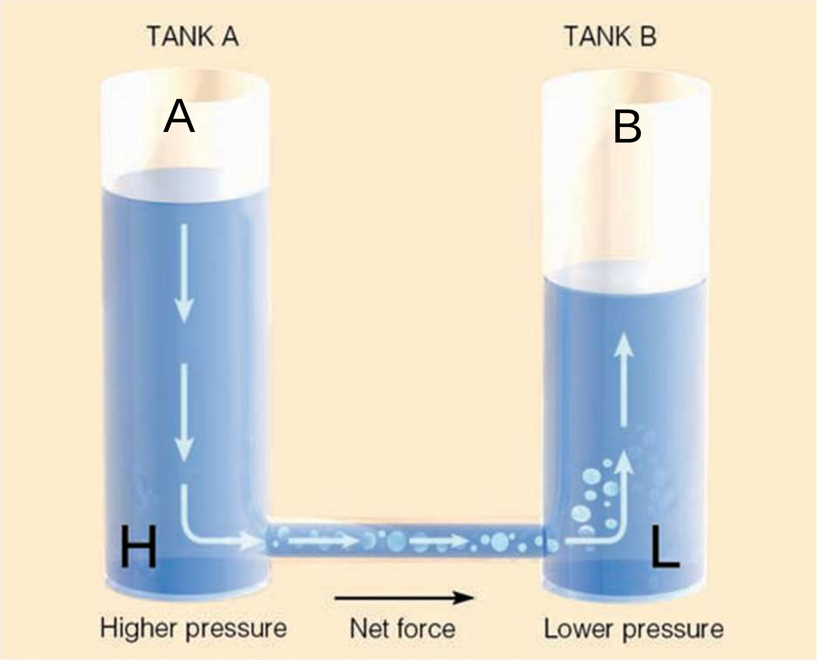
Sir Isaac Newton (1643-1927)

Forças envolvidas na geração do vento

1. Força de gradiente de pressão (pressão=força/área)
2. Força de Coriolis
3. Fricção (ou atrito)
4. Força centrípeta

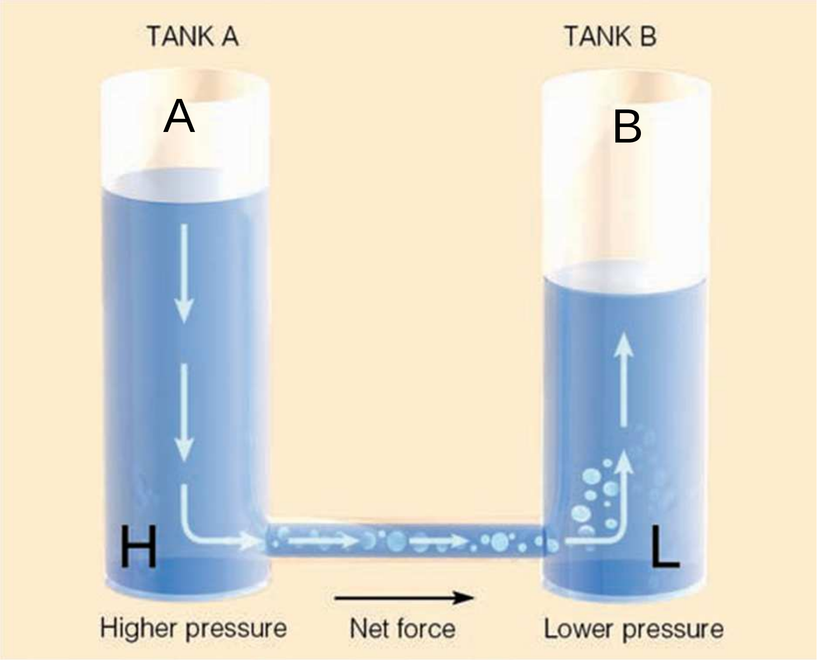
$$\Sigma F = m.a$$

Forças envolvidas na geração do vento


TANK A
TANK B
A
B
H
L
Higher pressure
Net force
Lower pressure

Pressão = força por unidade de área

Forças envolvidas na geração do vento

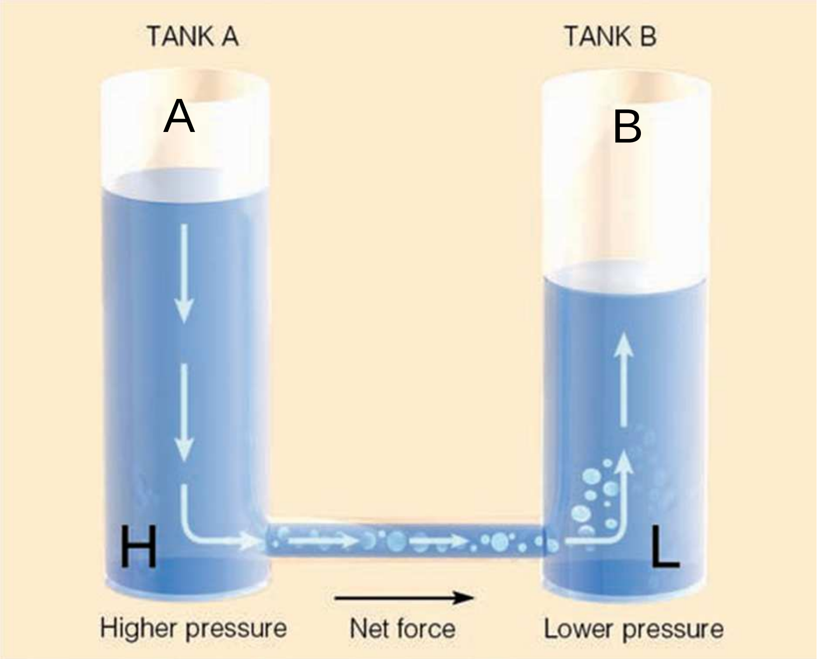

TANK A
TANK B
A
B
H
L
Higher pressure
Net force
Lower pressure

Pressão = força por unidade de área

Diferenças de pressão na horizontal provocam deslocamento de massa – vento (correntes).

Quanto maior for a diferença de pressão maior a velocidade do vento (da corrente).

Forças envolvidas na geração do vento


TANK A
TANK B
A
B
H
L
Higher pressure
Net force
Lower pressure

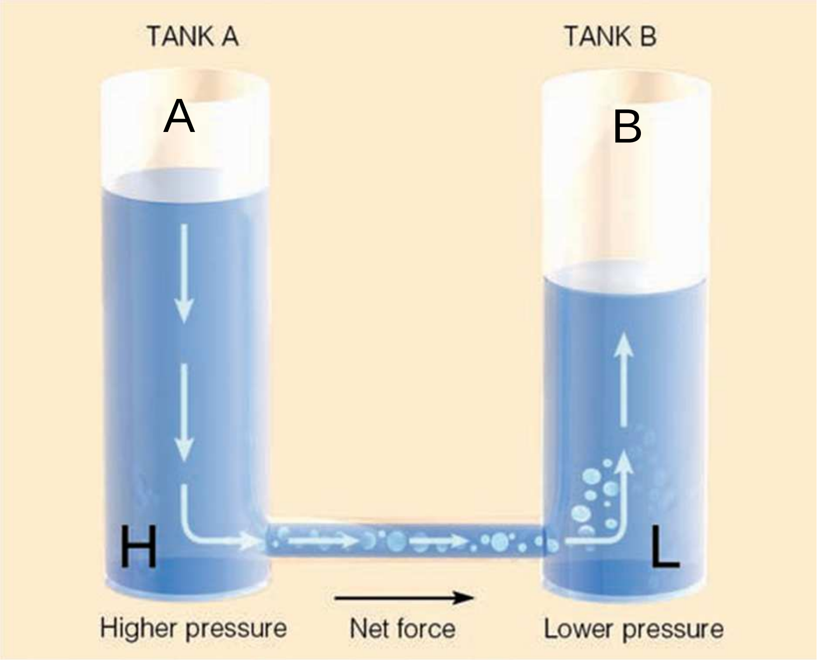
Pressão = força por unidade de área

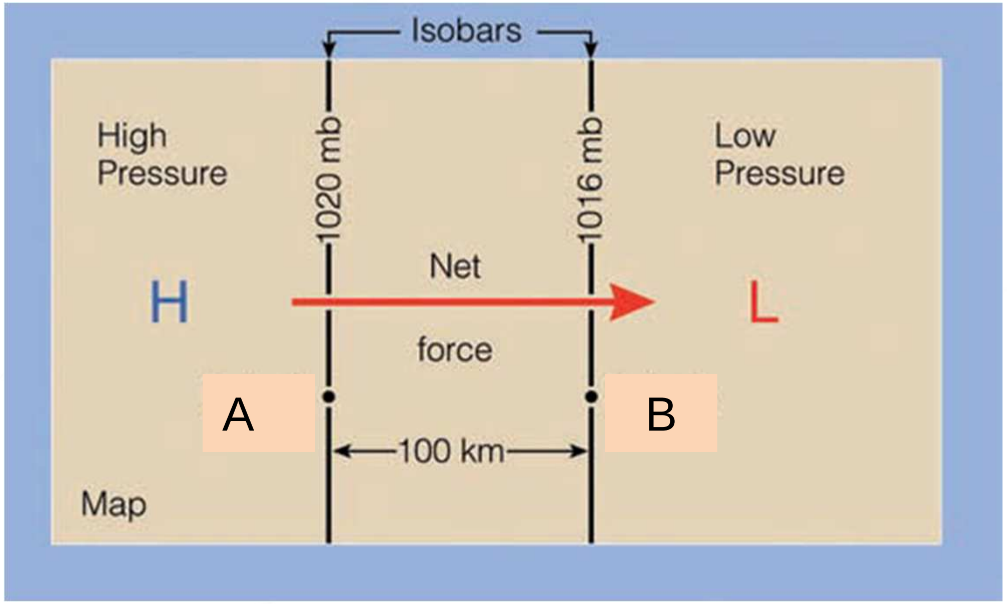
Diferenças de pressão na horizontal provocam deslocamento de massa – vento (correntes).

Quanto maior for a diferença de pressão maior a velocidade do vento (da corrente).

$$Gradiente\ de\ pressão = \frac{diferença\ de\ pressão\ (P_A - P_B)}{distância\ (X_A - X_B)} \quad \Leftrightarrow \quad FGP = \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

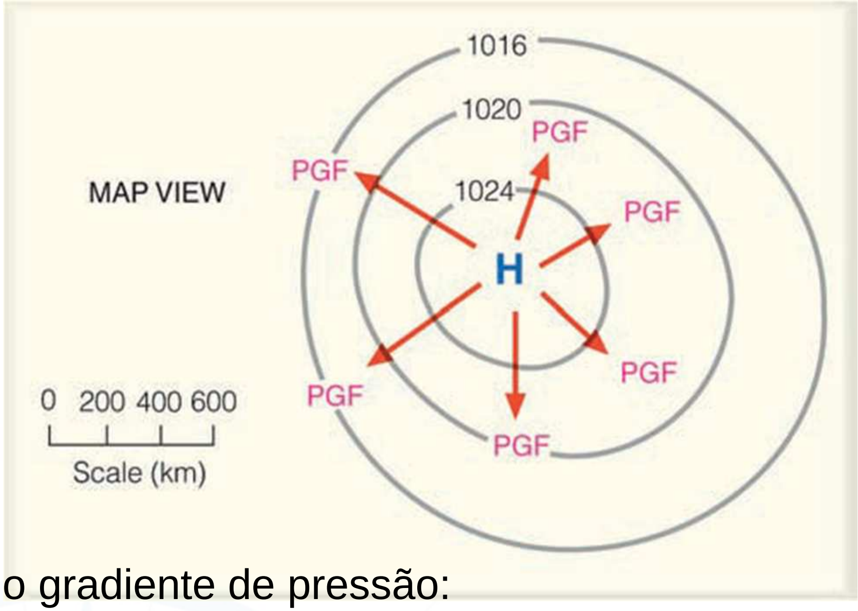
Forças envolvidas na geração do vento

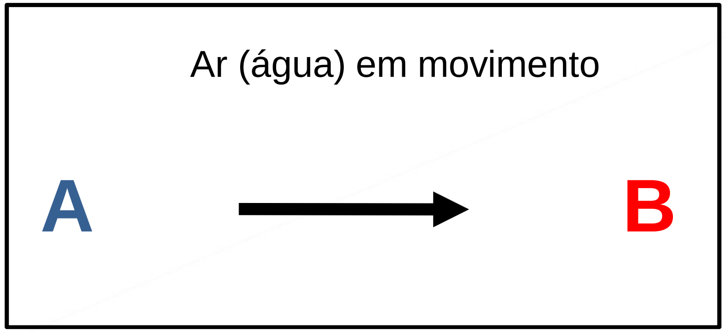

TANK A
TANK B
A
B
H
L
Higher pressure
Net force
Lower pressure


Isobars
High
Pressure
1020 mb
1016 mb
Low
Pressure
Net
force
H
L
A
B
100 km
Map

$$\boxed{\text{Gradiente de pressão} = \frac{\text{diferença de pressão}\,(P_A - P_B)}{\text{distância}\,(X_A - X_B)} \quad \Leftrightarrow \quad FGP = \frac{\Delta p}{\Delta x}}$$

Forças envolvidas na geração do vento


1016
1020
1024
MAP VIEW
H
PGF
PGF
PGF
PGF
PGF
PGF
0 200 400 600
Scale (km)


Ar (água) em movimento

A **B**

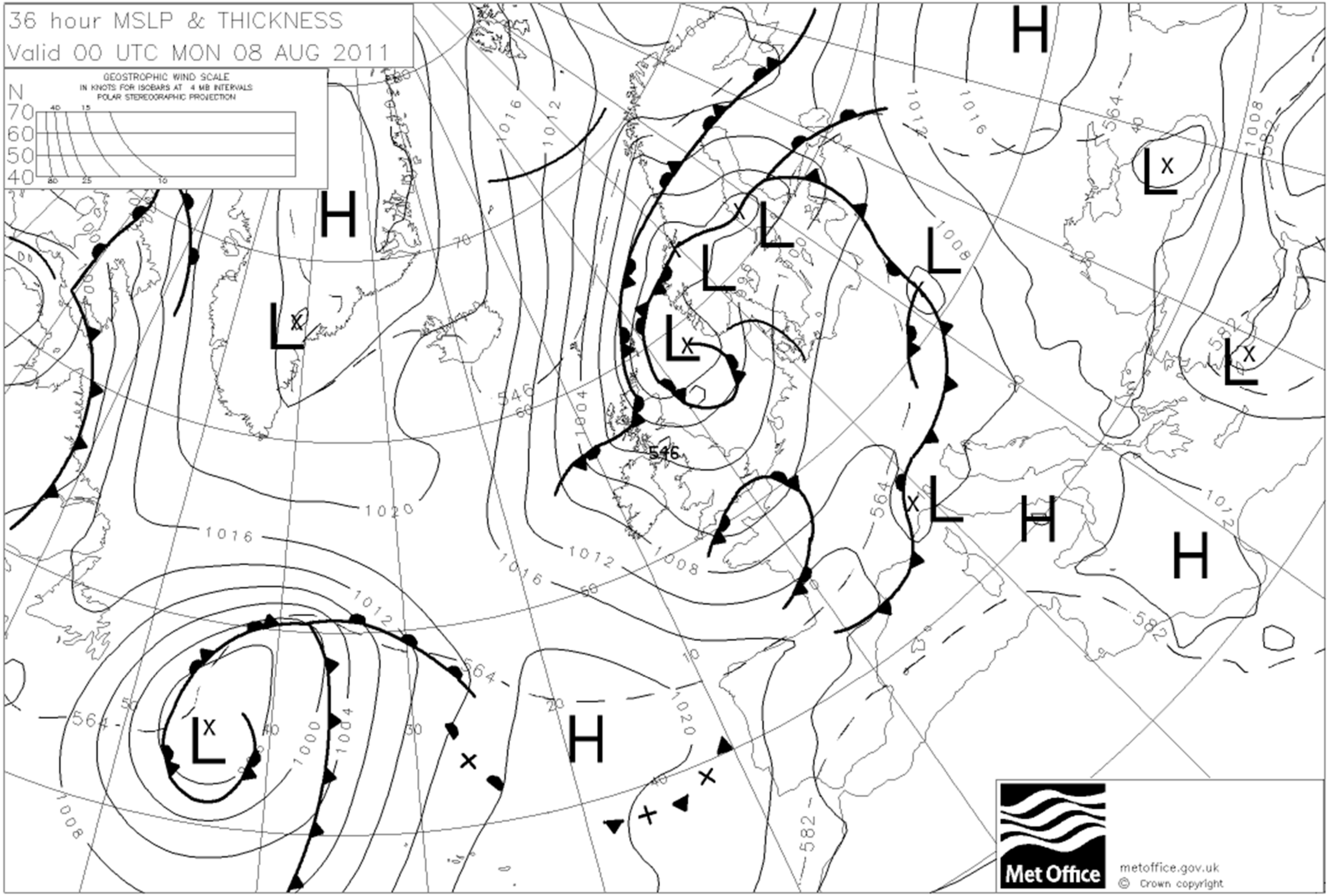
Força do gradiente de pressão:

A FGP é a força responsável pelo ar (água) em movimento (vento e correntes).
Perpendicular às isóbaras (linhas de igual pressão)
Direcção das altas para as baixas pressões
Magnitude da FGP ~ espaçamento das isóbaras (gradiente de pressão)

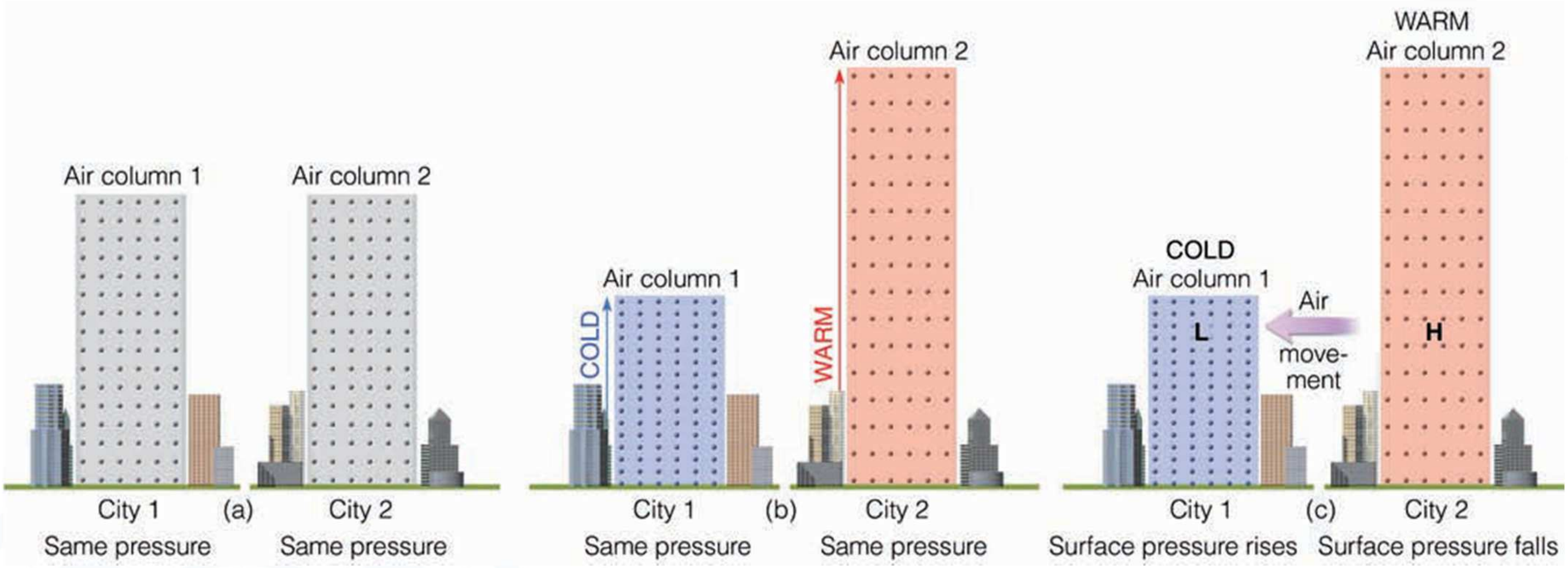
$$\boxed{FGP = \frac{\Delta p}{\Delta x}}$$

$$\boxed{\Delta x \downarrow \quad => \quad FGP \uparrow}$$

36 hour MSLP & THICKNESS
Valid 00 UTC MON 08 AUG 2011

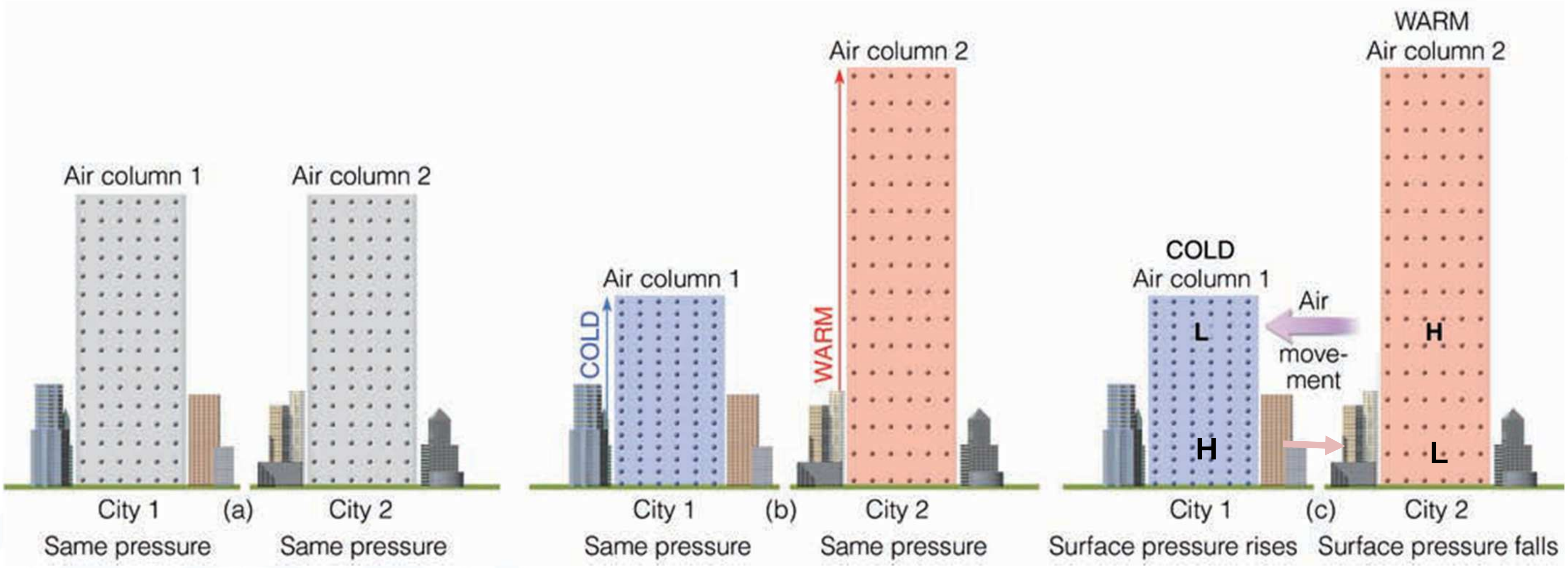

GEOSTROPHIC WIND SCALE
IN KNOTS FOR ISOBARS AT 4 MB INTERVALS
POLAR STEREOGRAPHIC PROJECTION
N
70
60
50
40
40
15
80
25
10
H
L
1020
1016
1012
1008
1004
1000
546
564
582
Met Office
metoffice.gov.uk
© Crown copyright

Forças envolvidas na geração do vento


Air column 1
Air column 2
City 1
(a)
City 2
Same pressure
Same pressure
Air column 1
COLD
Air column 2
WARM
City 1
(b)
City 2
Same pressure
Same pressure
COLD
Air column 1
L
Air
move-
ment
WARM
Air column 2
H
City 1
(c)
City 2
Surface pressure rises
Surface pressure falls

O arrefecimento ou aquecimento da coluna de ar provocará variações de pressão que darão origem a variações horizontais de pressão (força de gradiente de pressão – FGP) que provocará… vento.

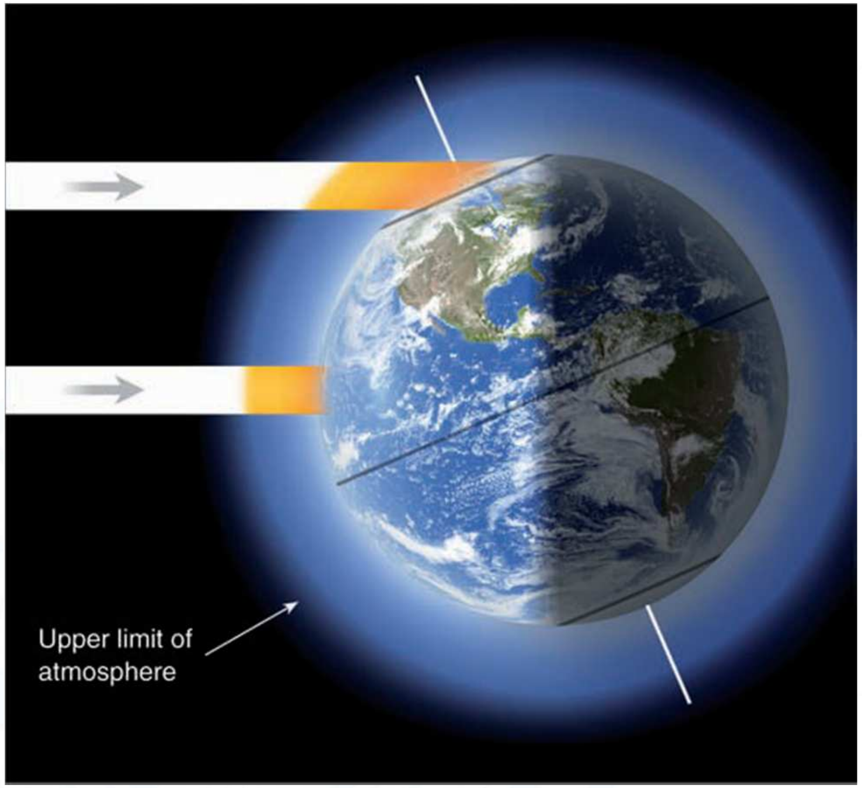
Forças envolvidas na geração do vento

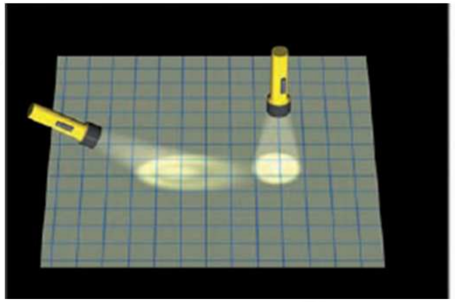

Air column 1
Air column 2
City 1
(a)
City 2
Same pressure
Same pressure
Air column 1
COLD
Air column 2
WARM
City 1
(b)
City 2
Same pressure
Same pressure
COLD
Air column 1
WARM
Air column 2
L
H
Air
move-
ment
H
L
City 1
(c)
City 2
Surface pressure rises
Surface pressure falls

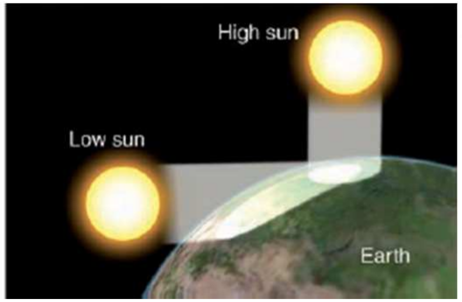
Ar quente é menos denso e sobe…
Ar frio é mais denso e desce…

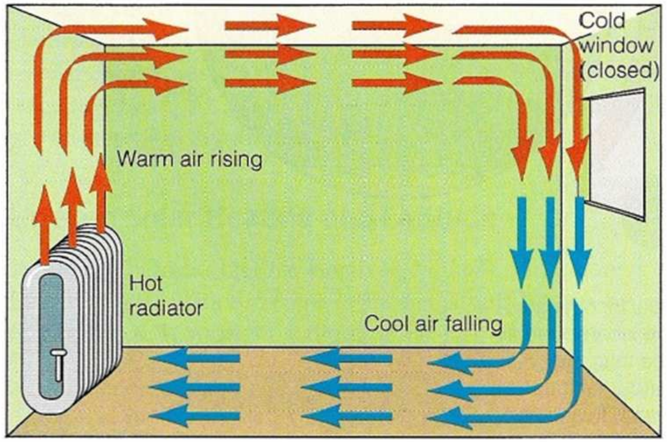
Circulação geral da atmosfera

O aquecimento diferenciado da superfície da terra dá origem a diferenças de pressão na atmosfera. Estas diferenças de pressão dão origem a gradientes de pressão, responsáveis pelo vento na atmosfera.


Upper limit of atmosphere




High sun
Low sun
Earth


Cold window (closed)
Warm air rising
Hot radiator
Cool air falling

Vento (correntes) = ar (água) em movimento (3 dimensões)

Gaspard-Gustave de Coriolis
(1792-1843)

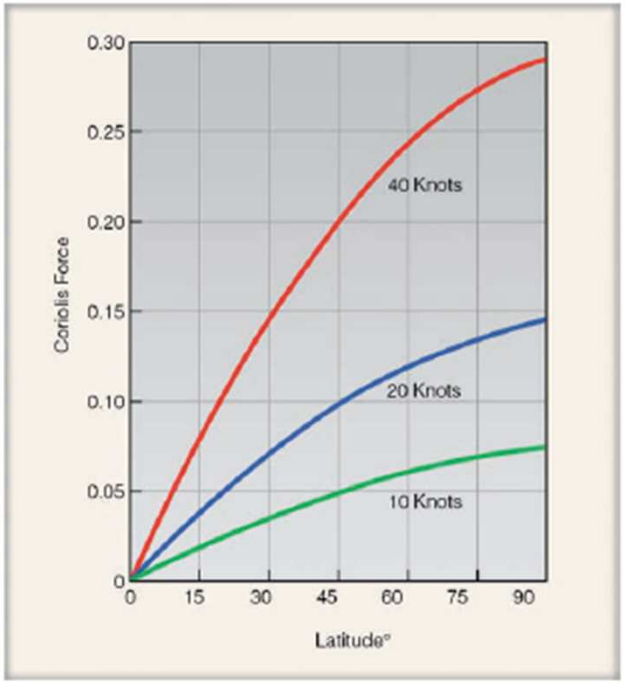
Forças envolvidas na geração do vento

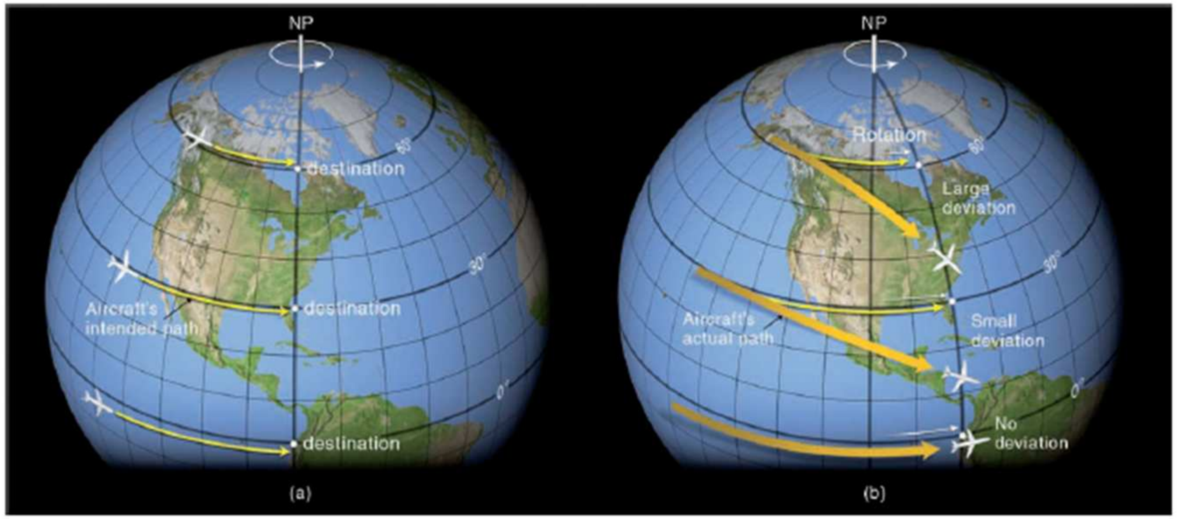
1. Força de gradiente de pressão (pressão=força/área)
2. **Força de Coriolis**
3. Fricção (ou atrito)

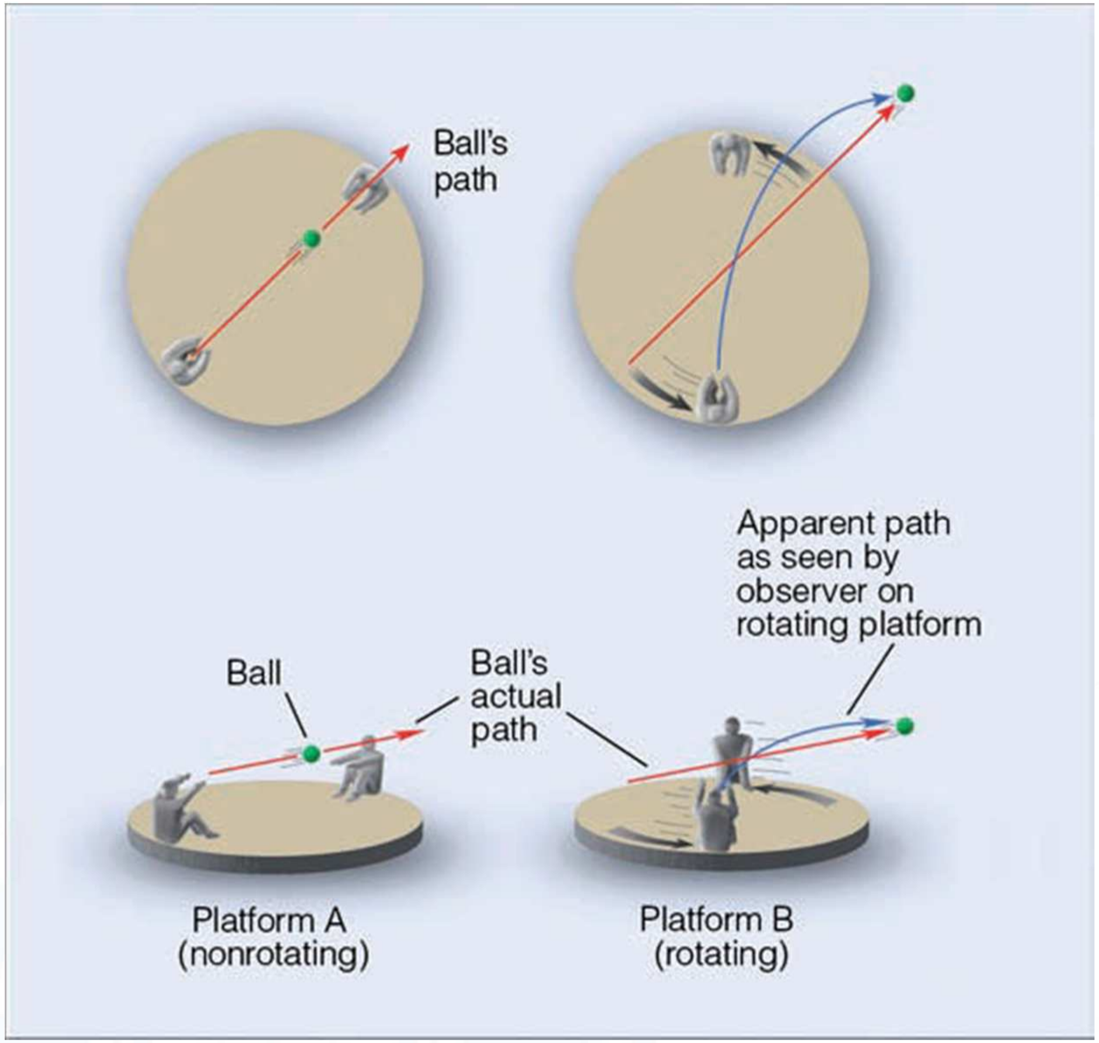
$$\sum F = m.a$$

Forças envolvidas na geração do vento

- Força aparente
- Efeito de rotação da terra
- Deflexão das trajectórias para a direita (esquerda) no pólo Norte (Sul)
- (Efeito na direcção do vento e não na velocidade do vento)
- Máximo efeito nos pólos e mínimo (nulo) no equador
- Aumenta com a velocidade do vento



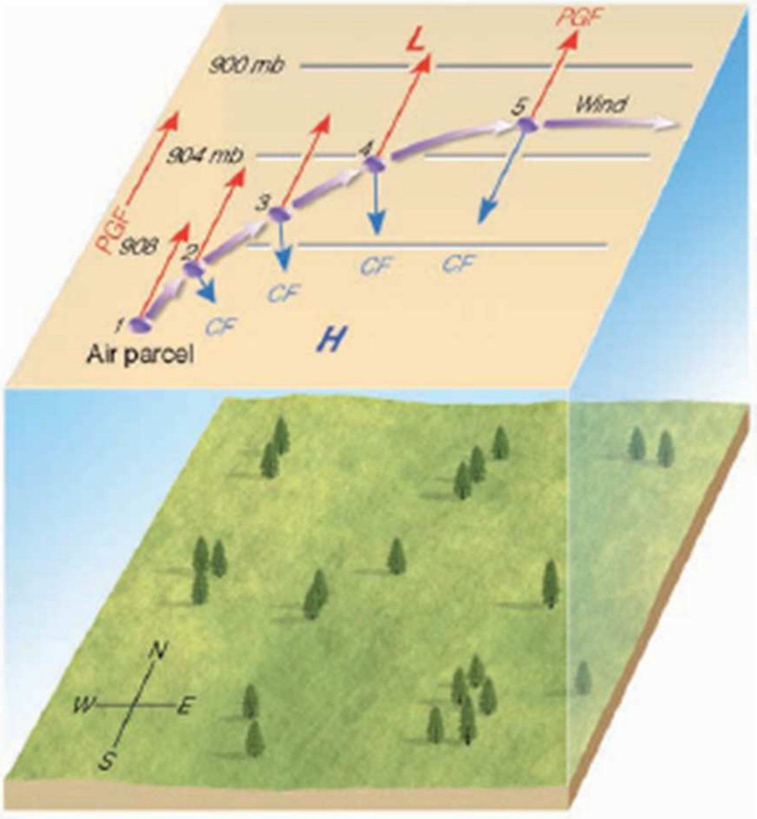

NP
destination
Aircraft's intended path
destination
destination
60°
30°
0°
(a)
NP
Rotation
Large deviation
Small deviation
No deviation
Aircraft's actual path
60°
30°
0°
(b)


Ball's path
Apparent path as seen by observer on rotating platform
Ball
Ball's actual path
Platform A (nonrotating)
Platform B (rotating)

Gaspard-Gustave de Coriolis
(1792-1843)

video

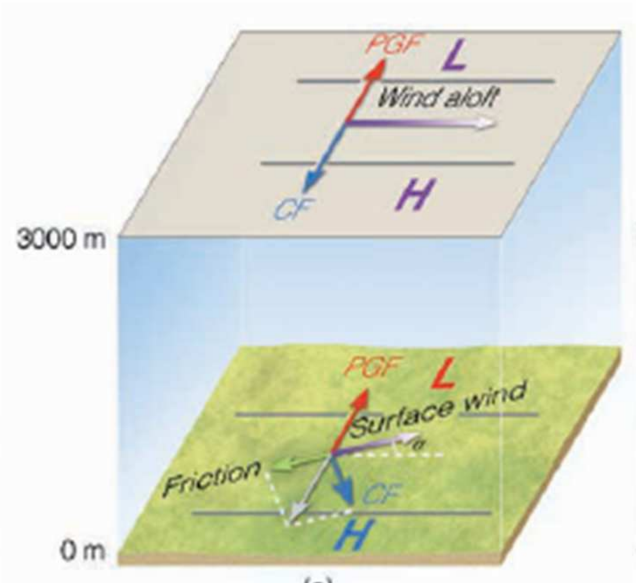
Forças envolvidas na geração do vento


PGF
L
900 mb
5
Wind
904 mb
4
3
PGF
908
2
CF
CF
CF
CF
CF
1
Air parcel
H
N
W
E
S

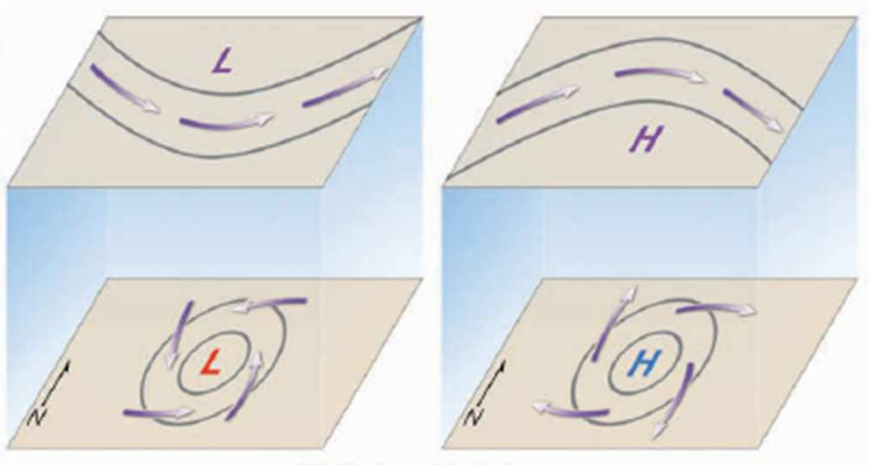
O vento é paralelo ás isóbaras…em resultado do balanço entre a força do gradiente de pressão e a força de coriolis (vento geoestrófico).

Forças envolvidas na geração do vento

O vento é paralelo ás isóbaras…em resultado do balanço entre a força do gradiente de pressão e a força de coriolis (vento geoestrófico).


PGF
L
Wind aloft
CF
H
3000 m
PGF
L
Surface wind
Friction
CF
H
0 m

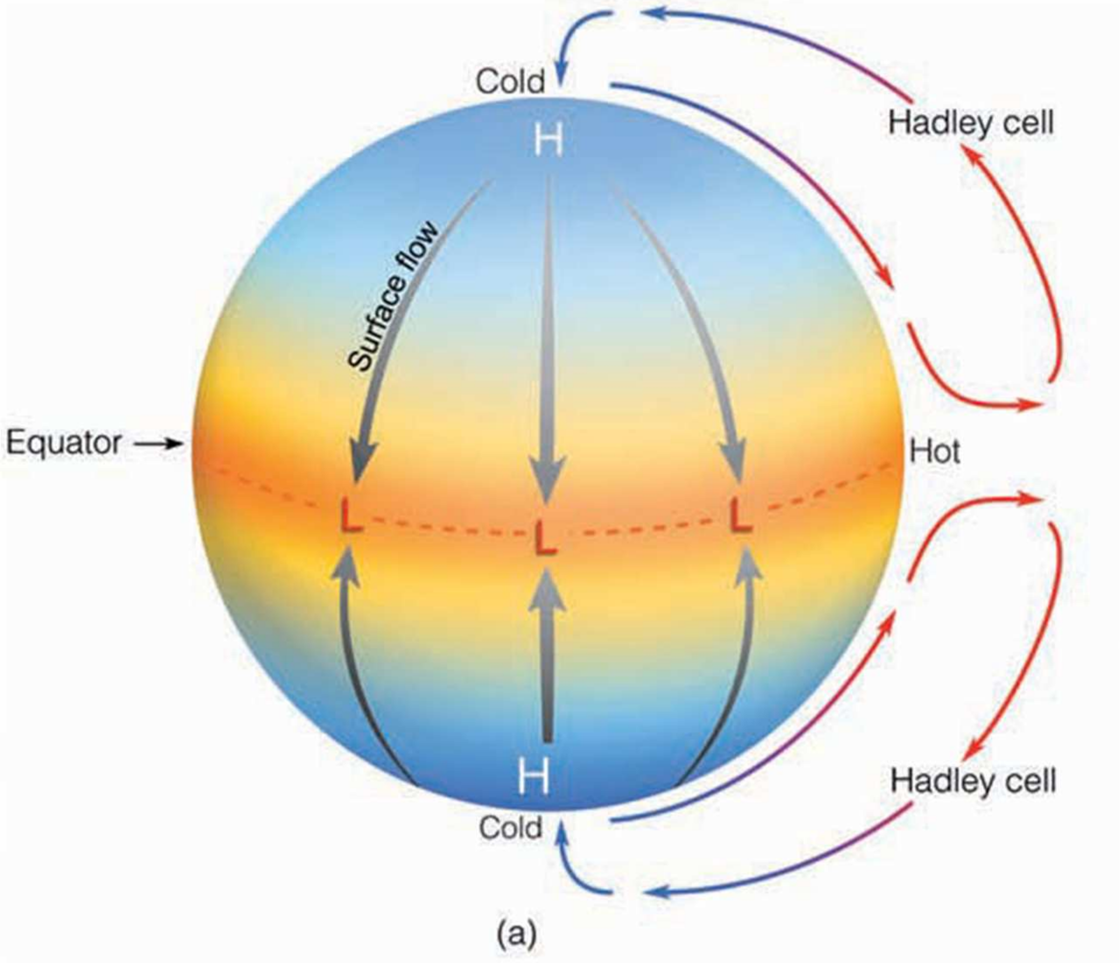
(a)

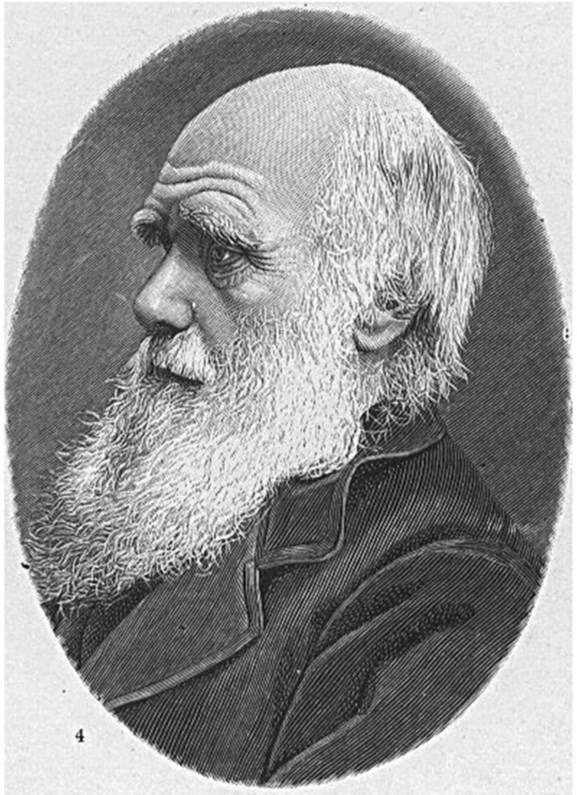


(b) Northern Hemisphere

Efeito de atrito (fricção) – reduz a velocidade do vento perto da superfície, reduzindo a força de corilis.

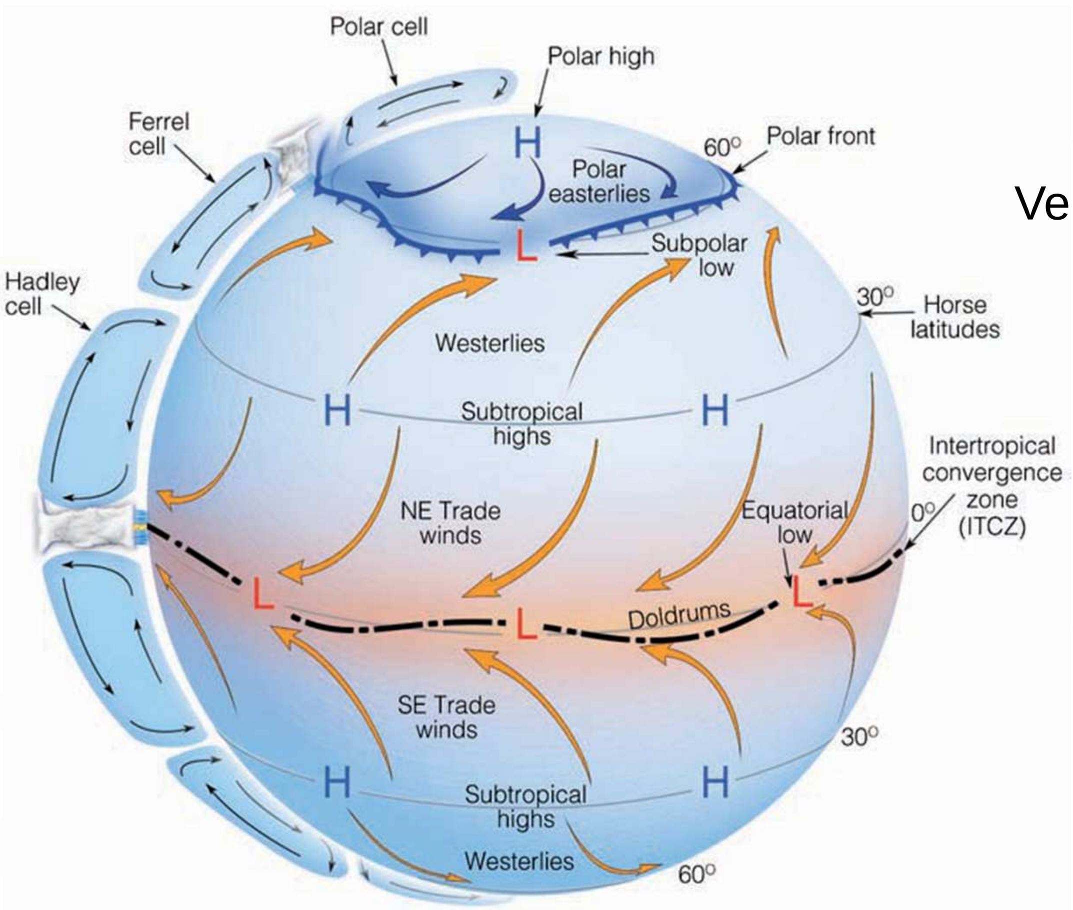
Circulação geral da atmosfera


Cold
H
Hadley cell
Surface flow
Equator
Hot
L
L
L
Hadley cell
H
Cold
(a)



George Hadley (1685-1768)

Circulação geral da atmosfera

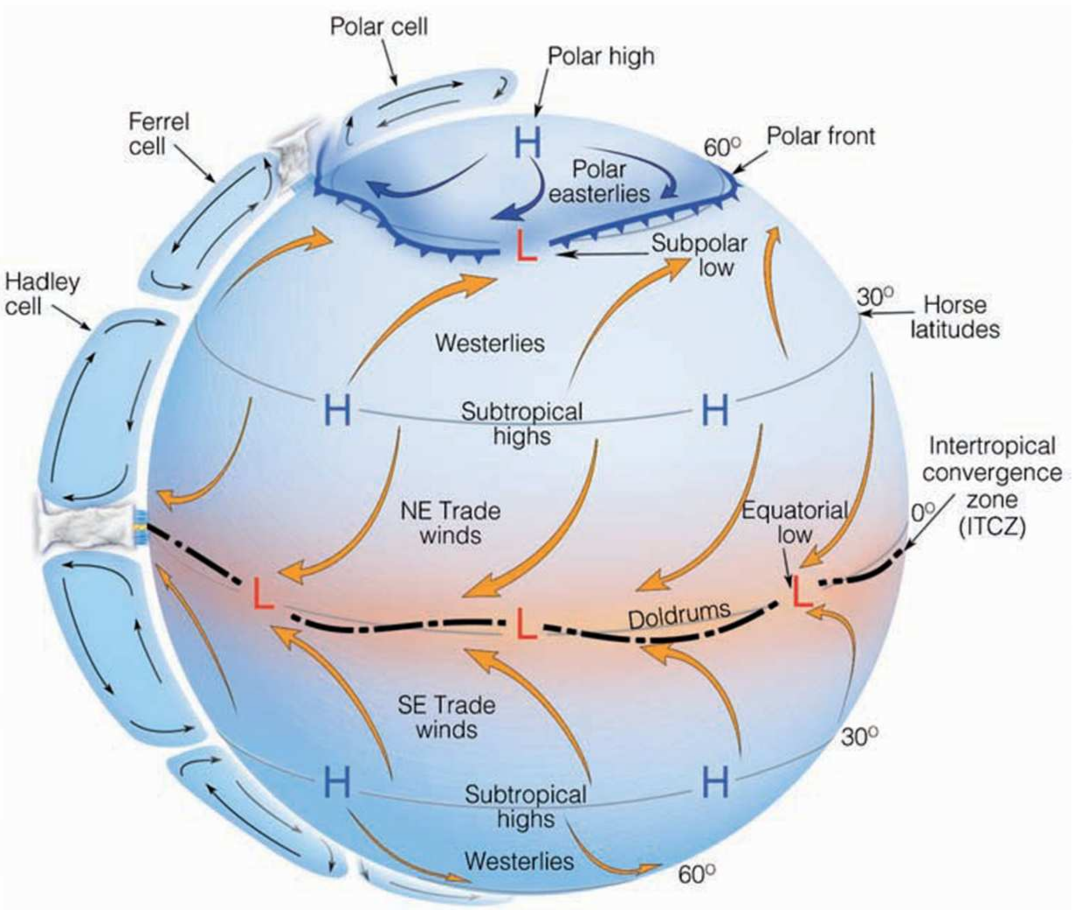

Polar cell
Polar high
Ferrel cell
H
60°
Polar front
Polar easterlies
L
Subpolar low
Hadley cell
30°
Horse latitudes
Westerlies
H
Subtropical highs
H
Intertropical convergence zone (ITCZ)
NE Trade winds
Equatorial low
0°
L
L
Doldrums
L
SE Trade winds
30°
H
Subtropical highs
H
Westerlies
60°

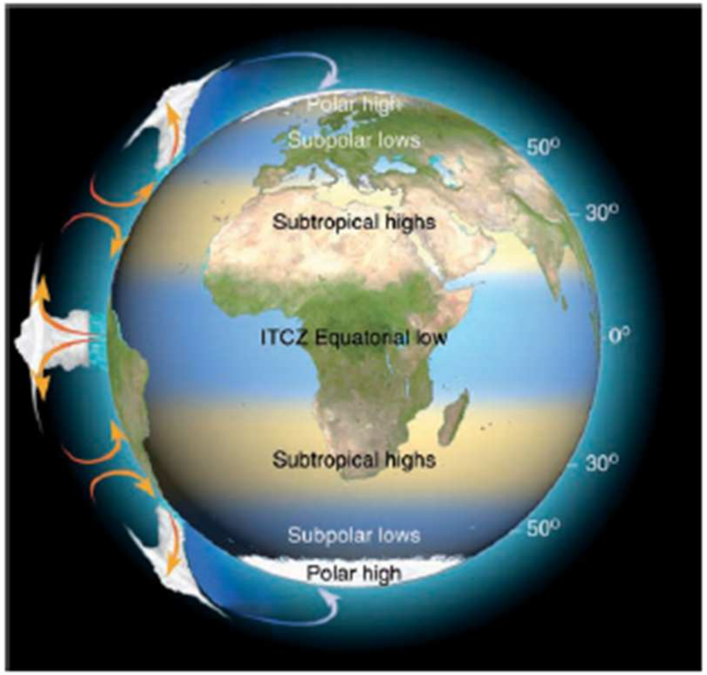
Ventos de Oeste (Westerlies)

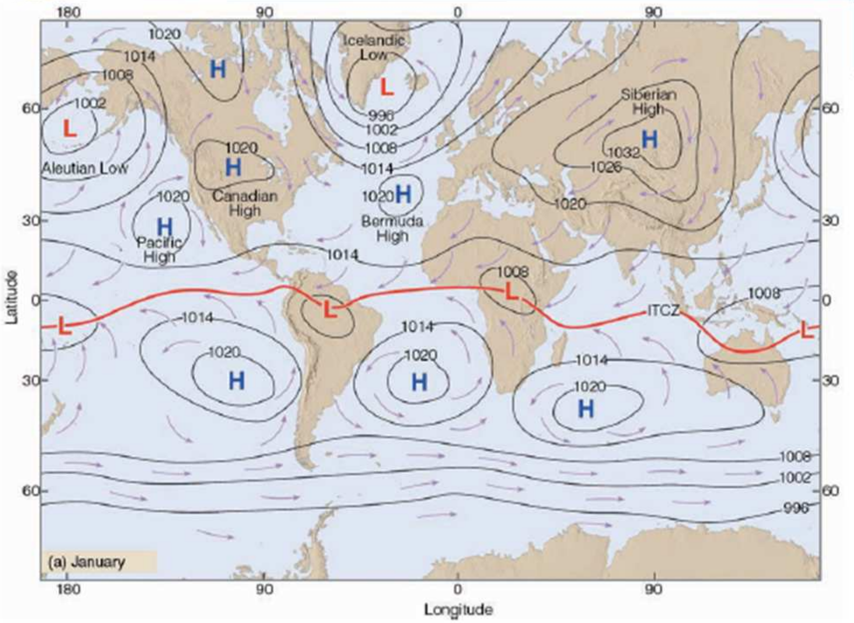
Ventos Alísios (Trades)

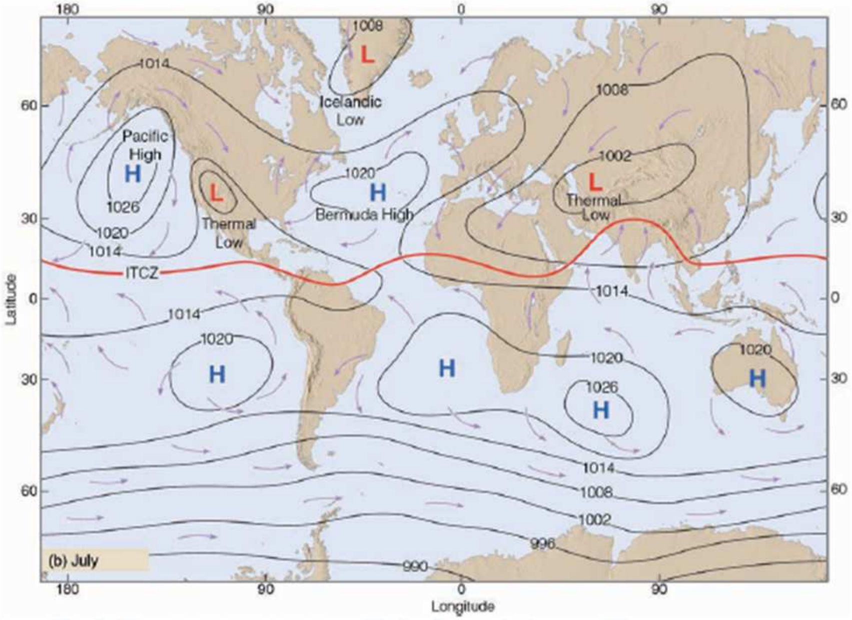
Zona de Convergência Intertropical

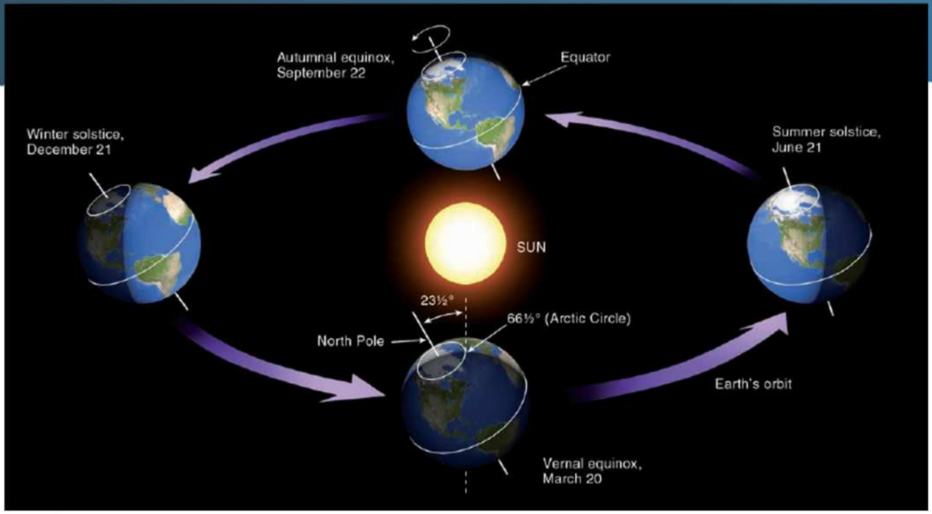
Circulação geral da atmosfera

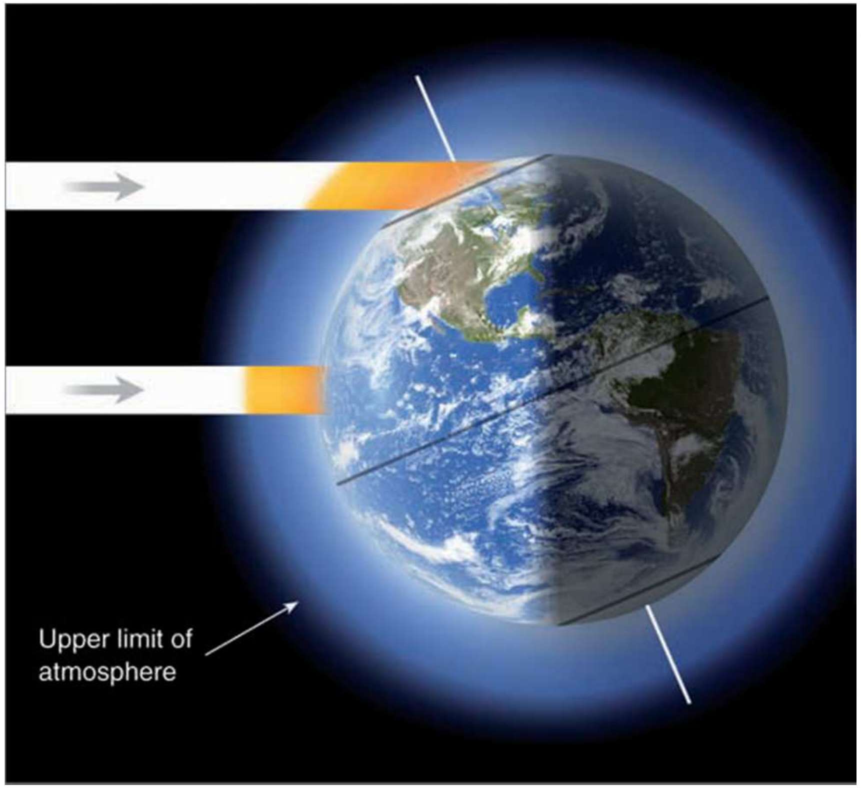

Polar cell
Polar high
Ferrel cell
H
60°
Polar front
Polar easterlies
L
Subpolar low
Hadley cell
Westerlies
30°
Horse latitudes
H
Subtropical highs
H
Intertropical convergence zone (ITCZ)
NE Trade winds
Equatorial low
0°
L
L
Doldrums
L
SE Trade winds
30°
H
Subtropical highs
H
Westerlies
60°


Polar high
Subpolar lows
50°
Subtropical highs
30°
ITCZ Equatorial low
0°
Subtropical highs
30°
Subpolar lows
50°
Polar high


Icelandic Low
Aleutian Low
Canadian High
Pacific High
Bermuda High
Siberian High
ITCZ
Latitude
Longitude
(a) January

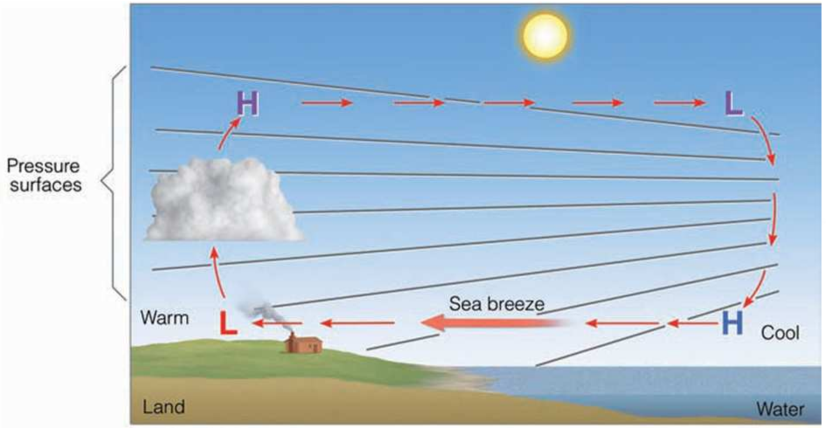

Icelandic Low
Pacific High
Thermal Low
Bermuda High
Thermal Low
ITCZ
Latitude
Longitude
(b) July


Autumnal equinox, September 22
Equator
Winter solstice, December 21
Summer solstice, June 21
SUN
23½°
66½° (Arctic Circle)
North Pole
Earth's orbit
Vernal equinox, March 20

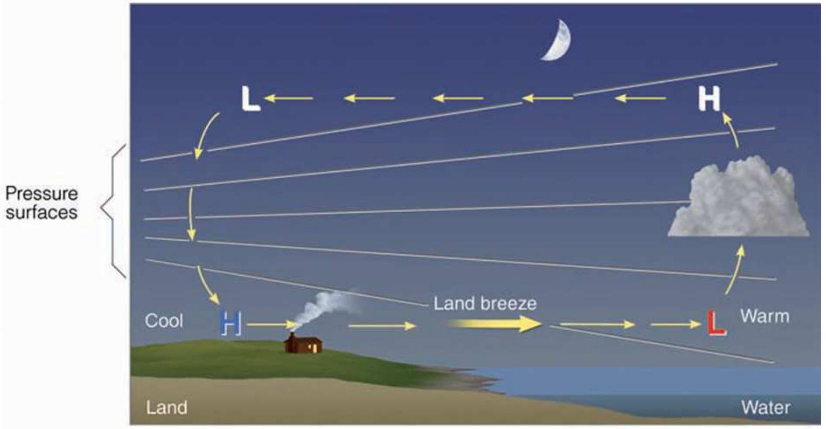

Upper limit of atmosphere

Brisa marítima e brisa de terra

O aquecimento diferenciado da superfície da terra dá origem a diferenças de pressão na atmosfera e nos oceanos. Estas diferenças de pressão dão origem a gradientes de pressão, responsáveis por ventos (atmosfera) e correntes (oceano).

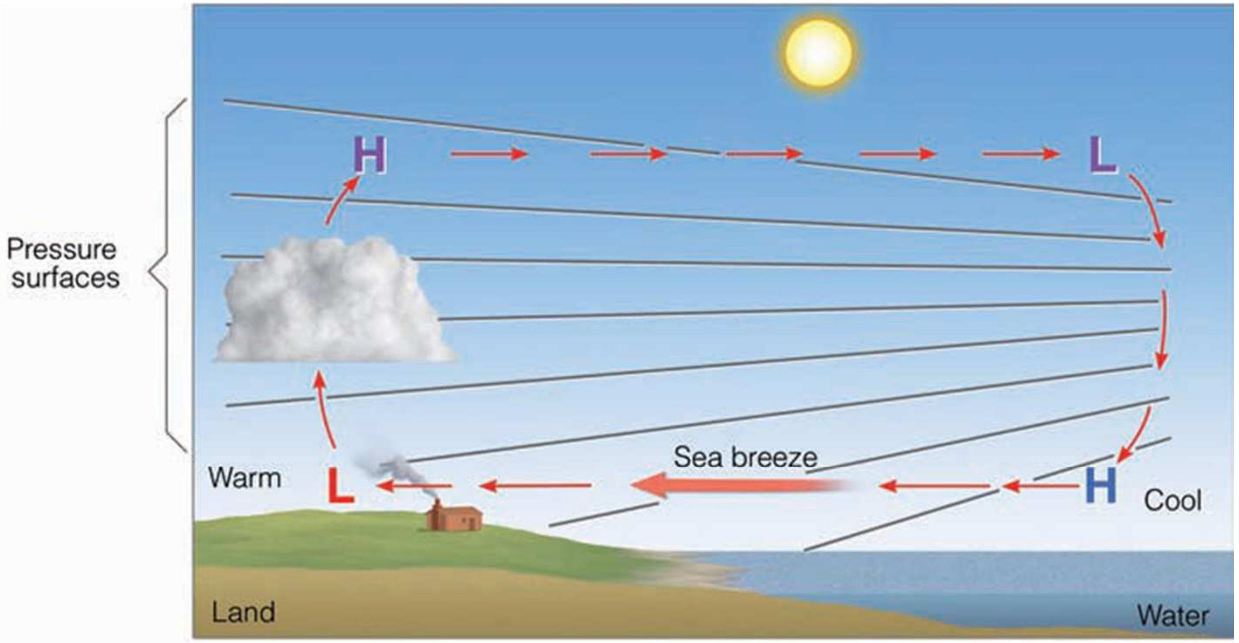

Pressure surfaces
H
L
Warm
L
Sea breeze
H
Cool
Land
Water

(a) Sea breeze

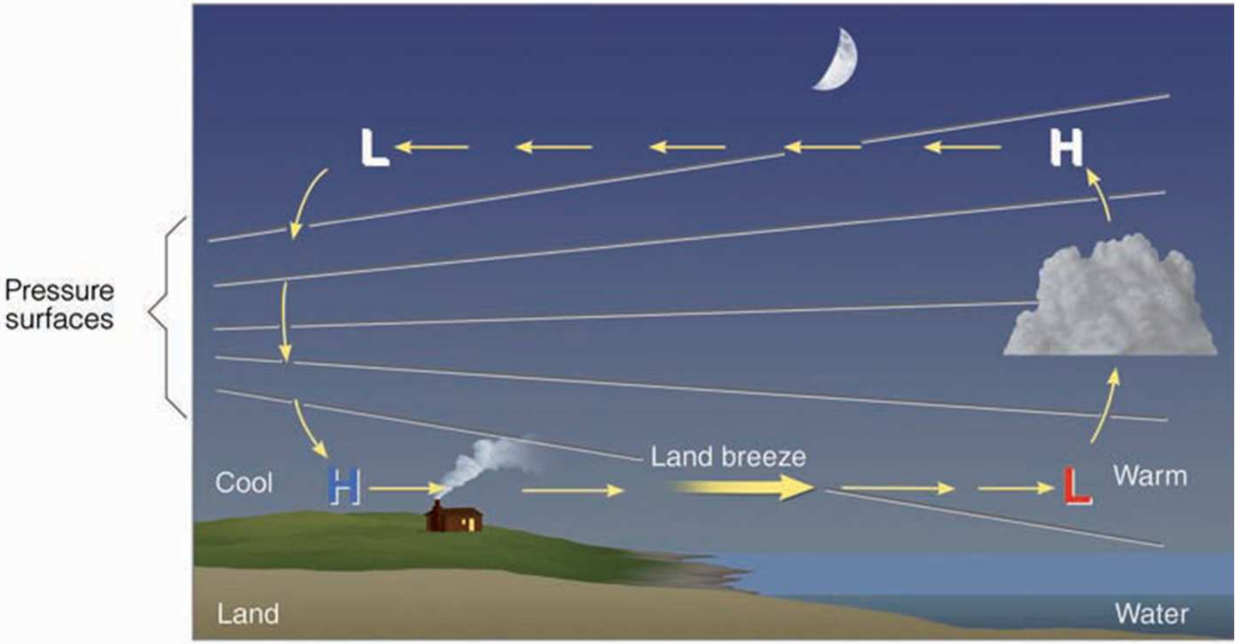

L
H
Pressure surfaces
Cool
H
Land breeze
L
Warm
Land
Water

(b) Land breeze

Brisa marítima e brisa de terra


Pressure surfaces
H
L
Warm
L
Sea breeze
H
Cool
Land
Water

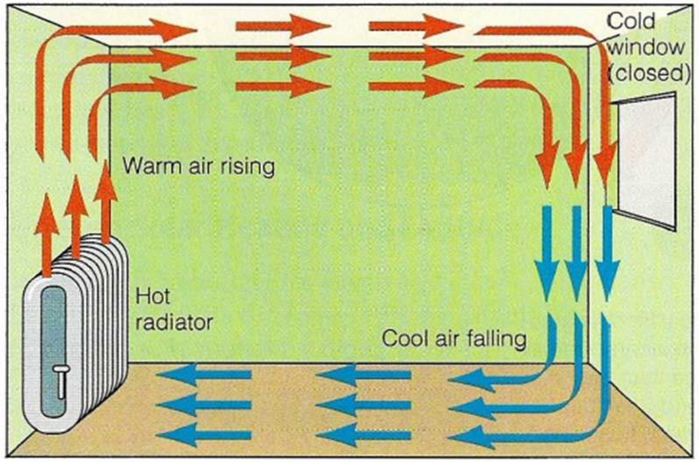
(a) Sea breeze

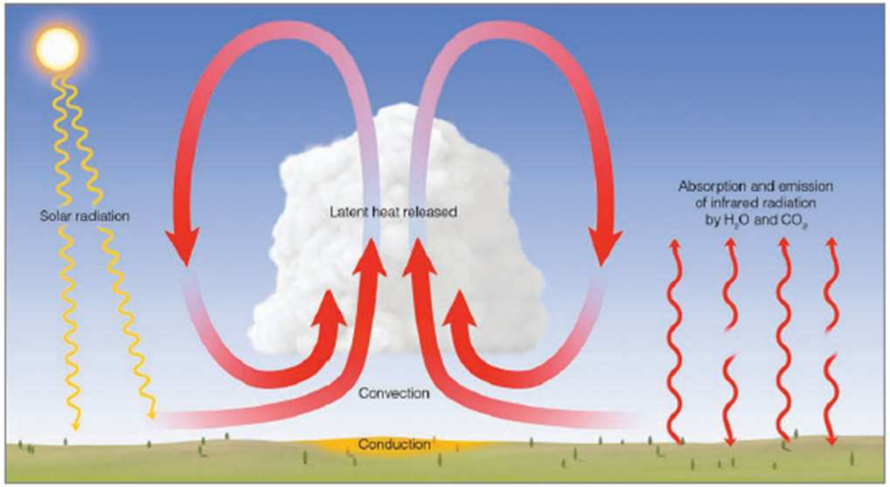

L
H
Pressure surfaces
Cool
H
Land breeze
L
Warm
Land
Water

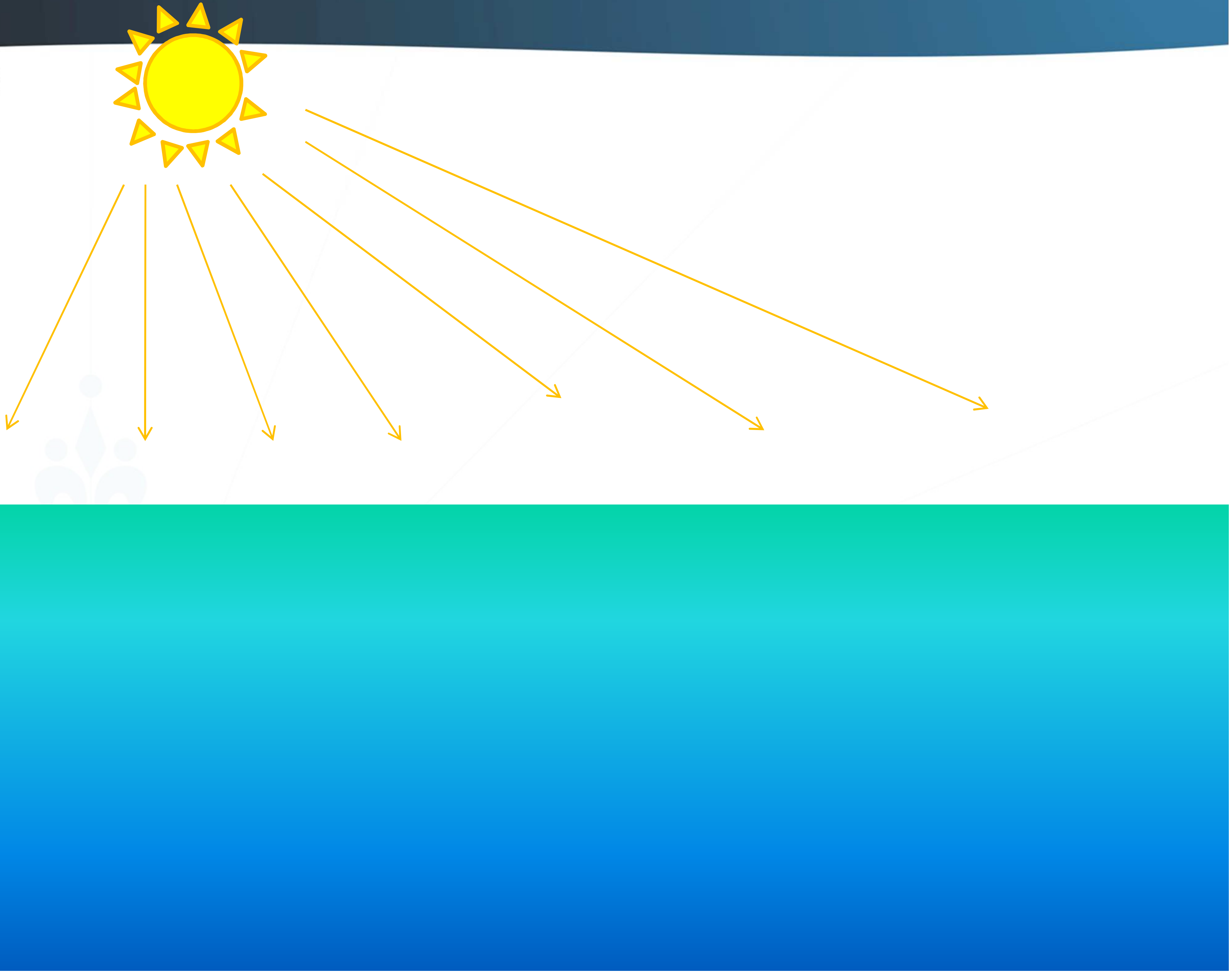
(b) Land breeze

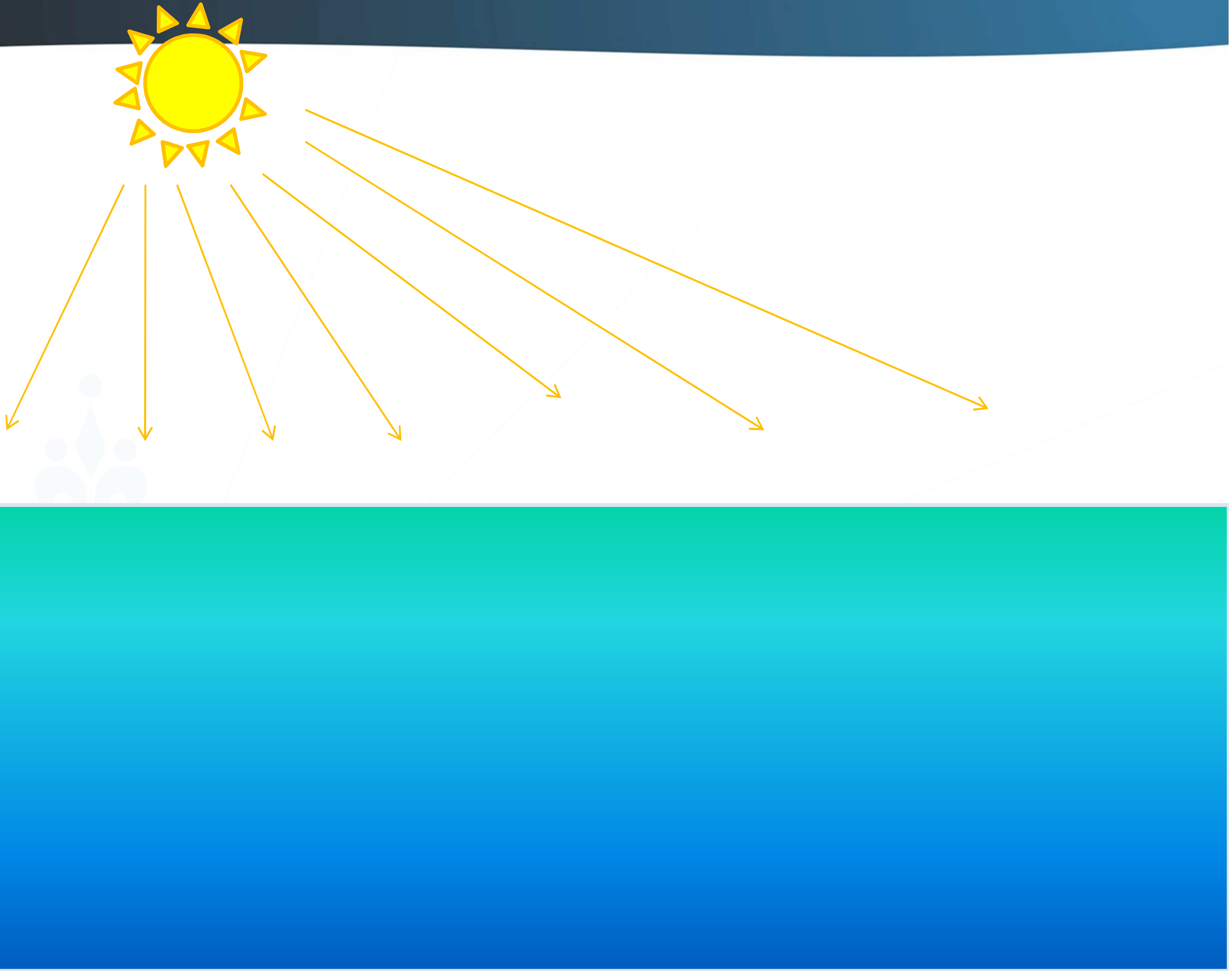
Circulação geral da atmosfera

O aquecimento diferenciado da superfície da terra dá origem a diferenças de pressão na atmosfera. Estas diferenças de pressão dão origem a gradientes de pressão, responsáveis pelo vento na atmosfera.


Cold window (closed)
Warm air rising
Hot radiator
Cool air falling

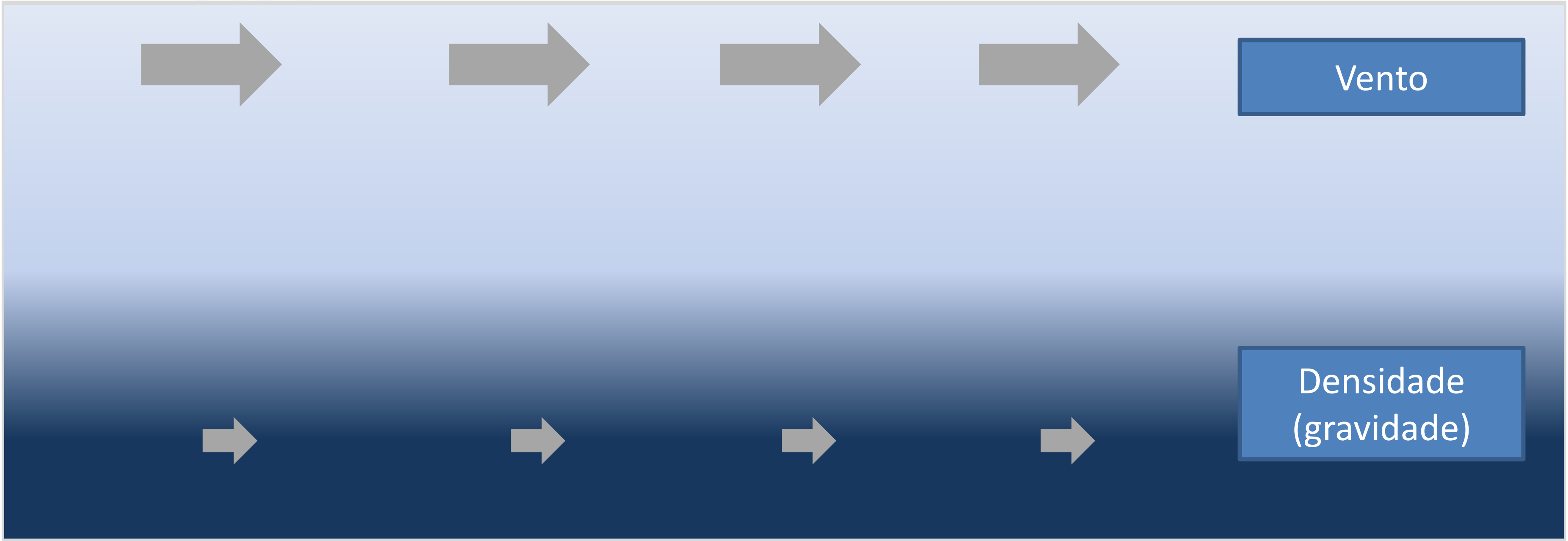

Solar radiation
Latent heat released
Absorption and emission of infrared radiation by H_2O and CO_2
Convection
Conduction





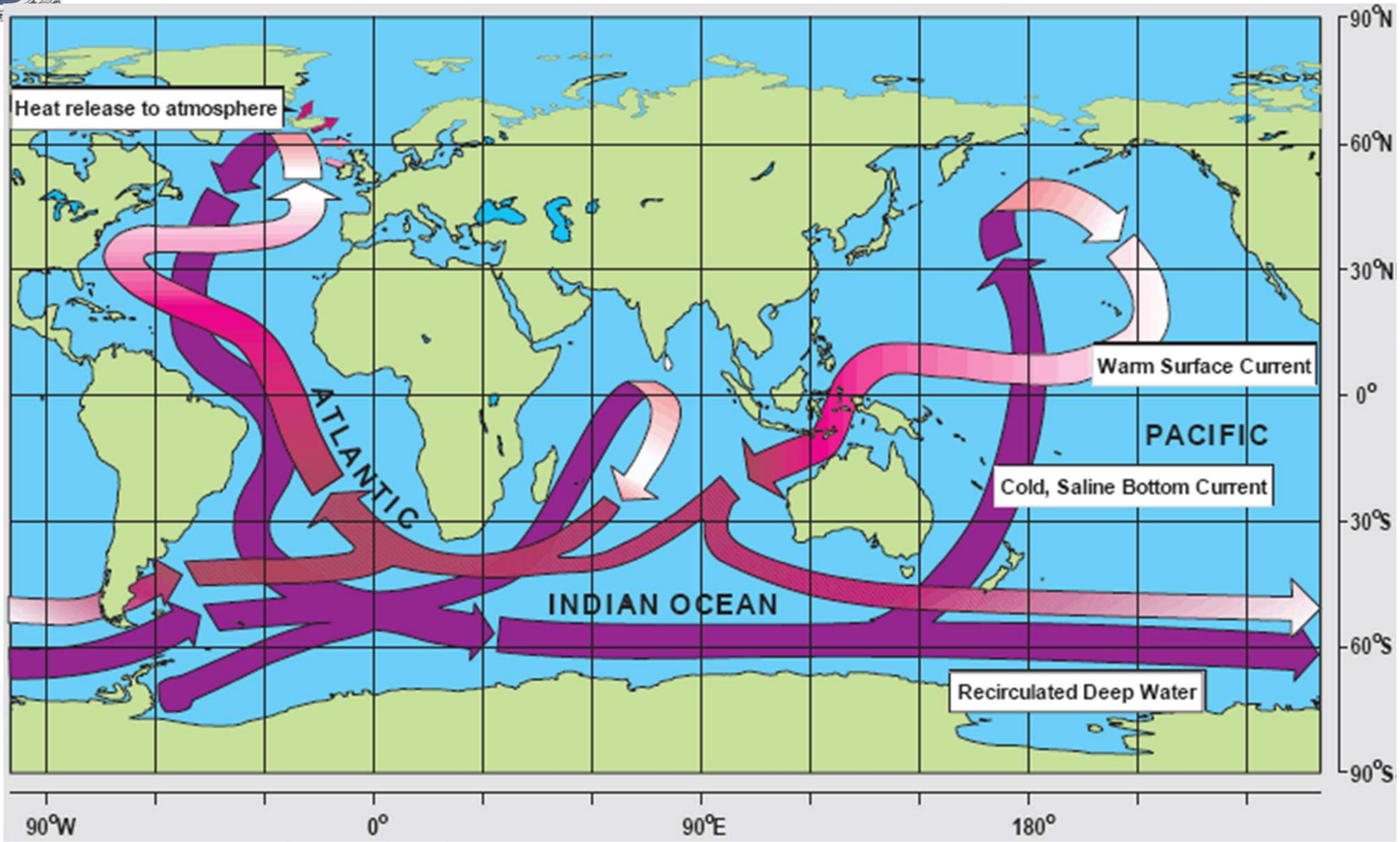
Correntes oceânicas (água em movimento):

Correntes de superfície (vento)
Circulação termohalina (densidade)



Vento

Densidade (gravidade)

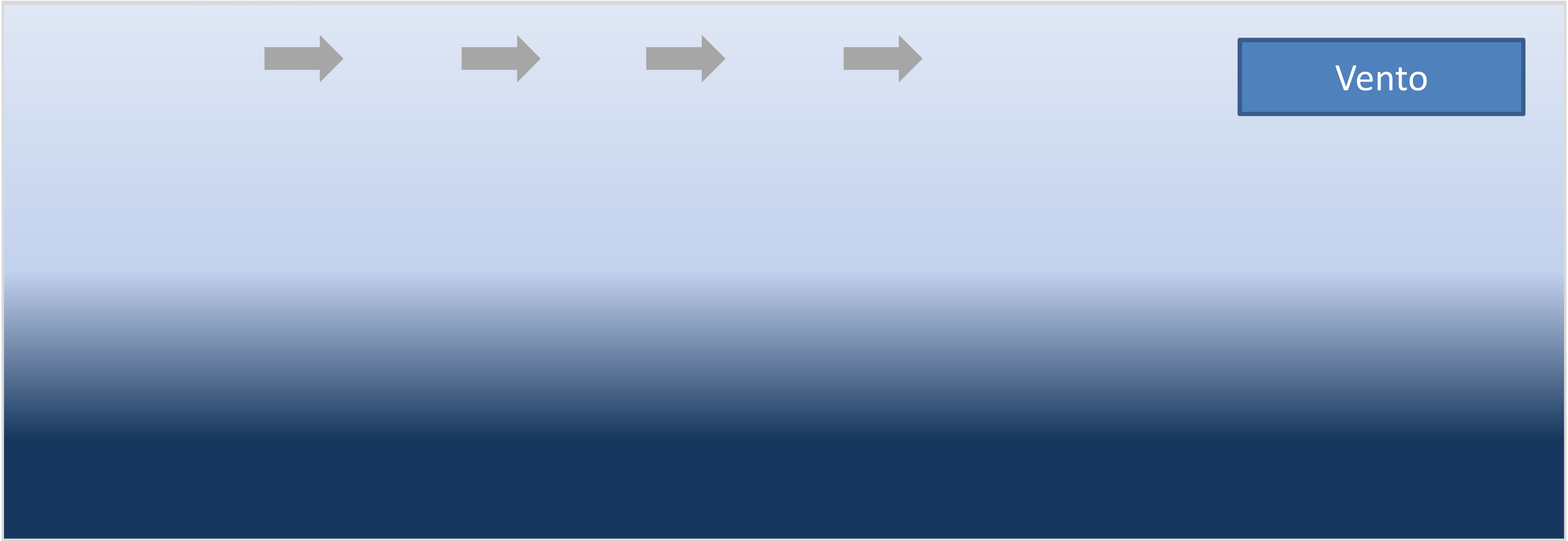

Heat release to atmosphere
ATLANTIC
Warm Surface Current
PACIFIC
Cold, Saline Bottom Current
INDIAN OCEAN
Recirculated Deep Water
90°N
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
90°S
90°W
0°
90°E
180°

video

Correntes à superfície – vento

Forças motrizes por detrás das correntes de vento:

- Vento (força de arrastamento)
- Efeito (ou força) de Coriolis
- Força do gradiente de pressão

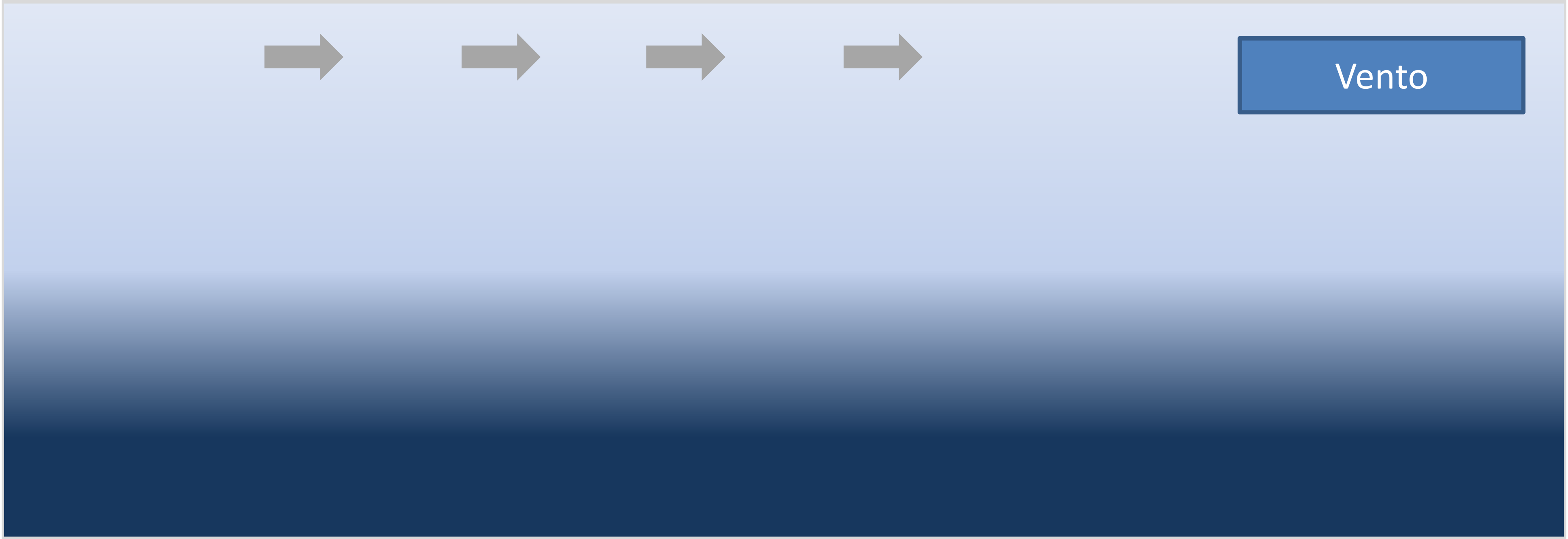


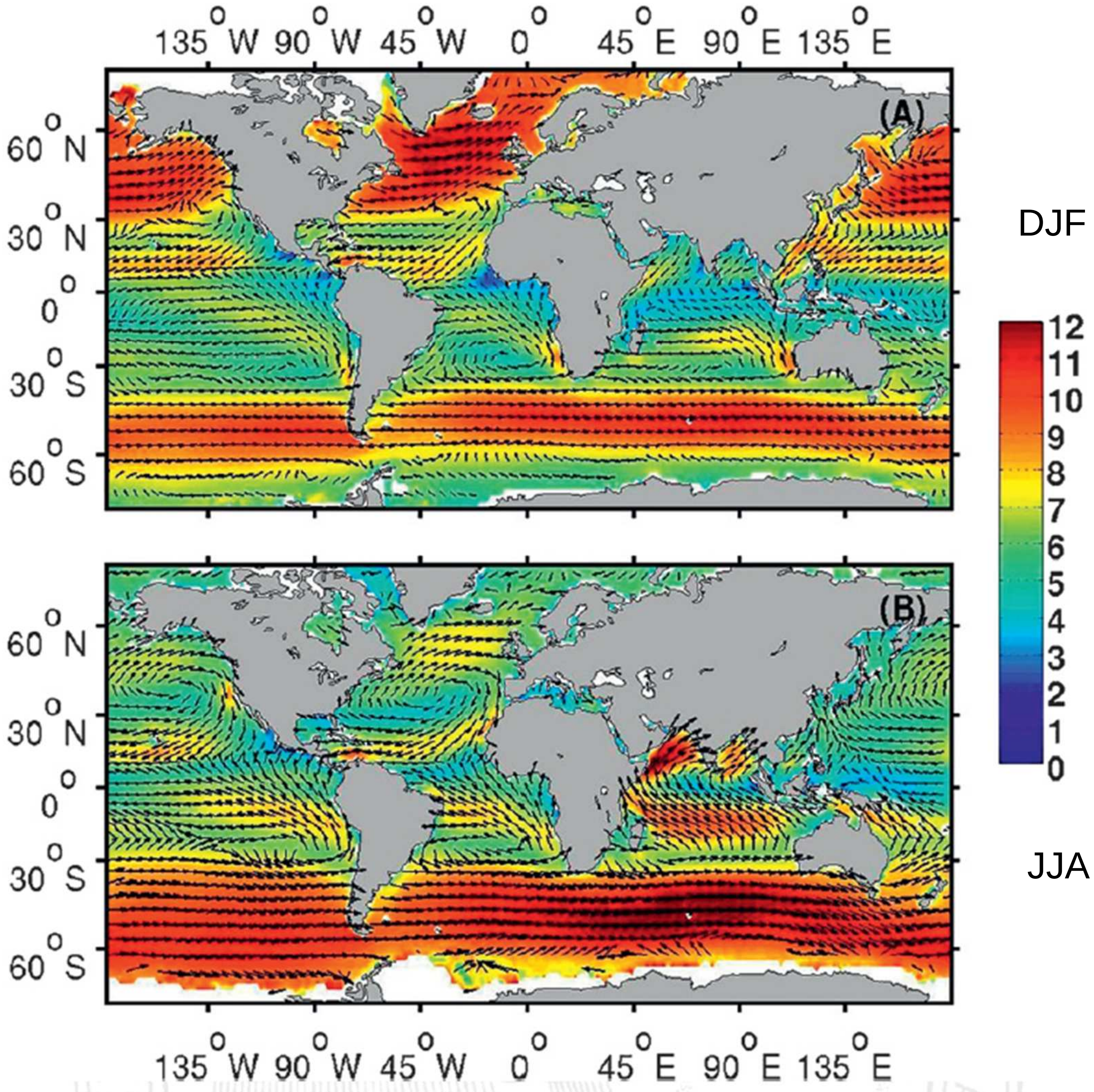
Correntes à superfície – vento

Forças motrizes por detás das correntes de vento:

- Vento (força de arrastamento)
- Efeito (ou força) de Coriolis
- Força do gradiente de pressão

Efeito combinado - geostrofia

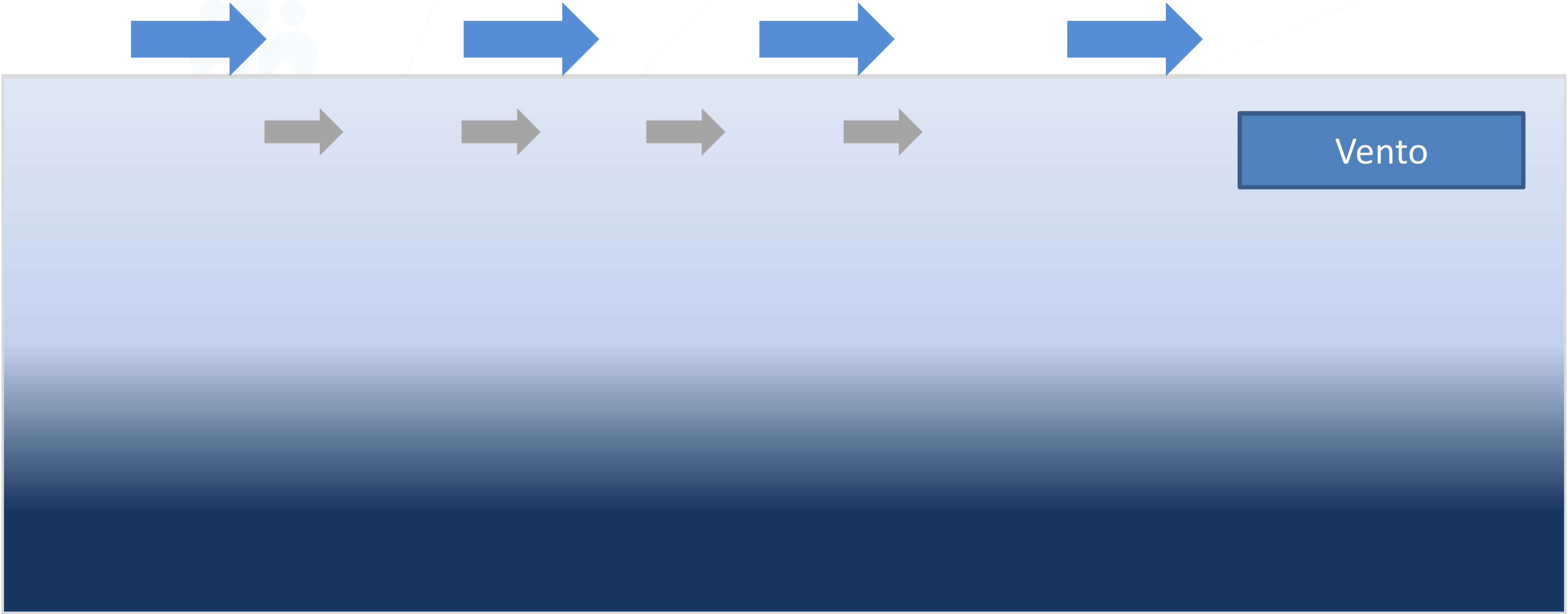



135°W 90°W 45°W 0° 45°E 90°E 135°E
60°N
30°N
0°
30°S
60°S
(A)
DJF
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
(B)
JJA

Correntes à superfície – vento

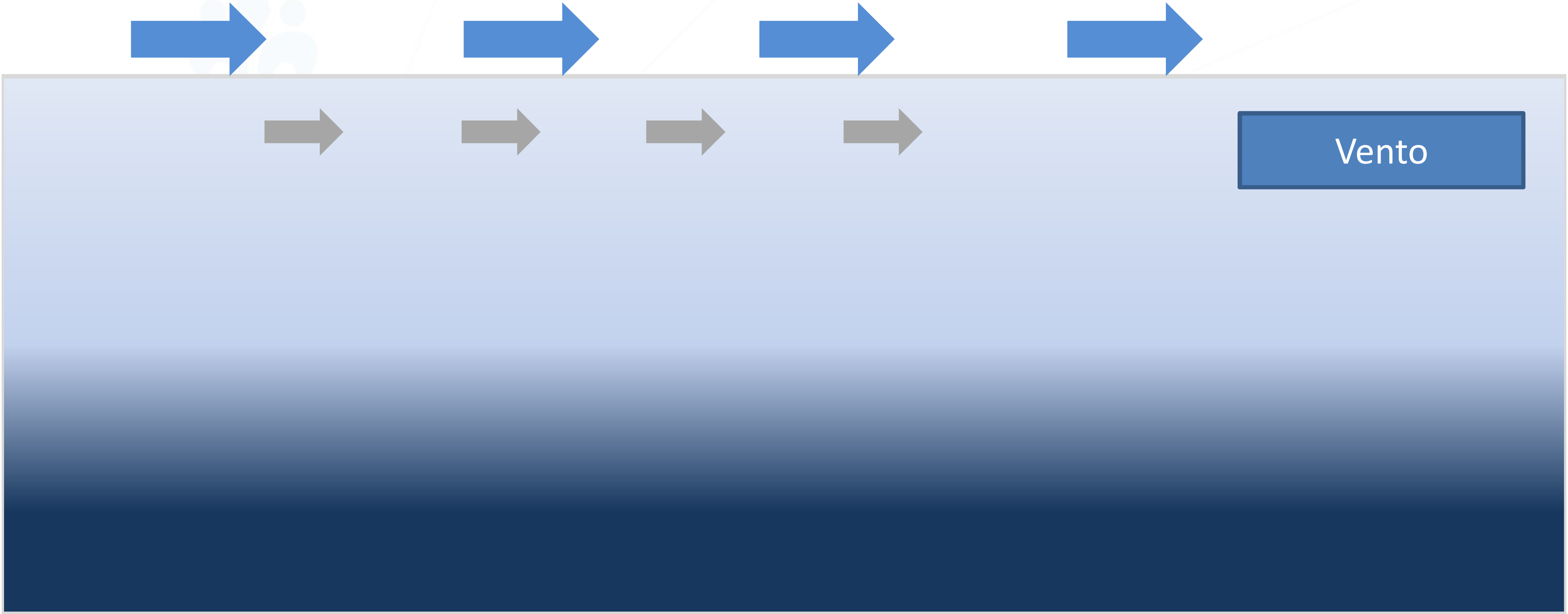
O vento é "ineficiente": $U_c = (3\text{-}4\%).U_v$

Exemplo, uma velocidade do vento de 50 km/h (muito vento) provoca uma corrente da ordem de 1.5-2 km/h.



Correntes à superfície – vento

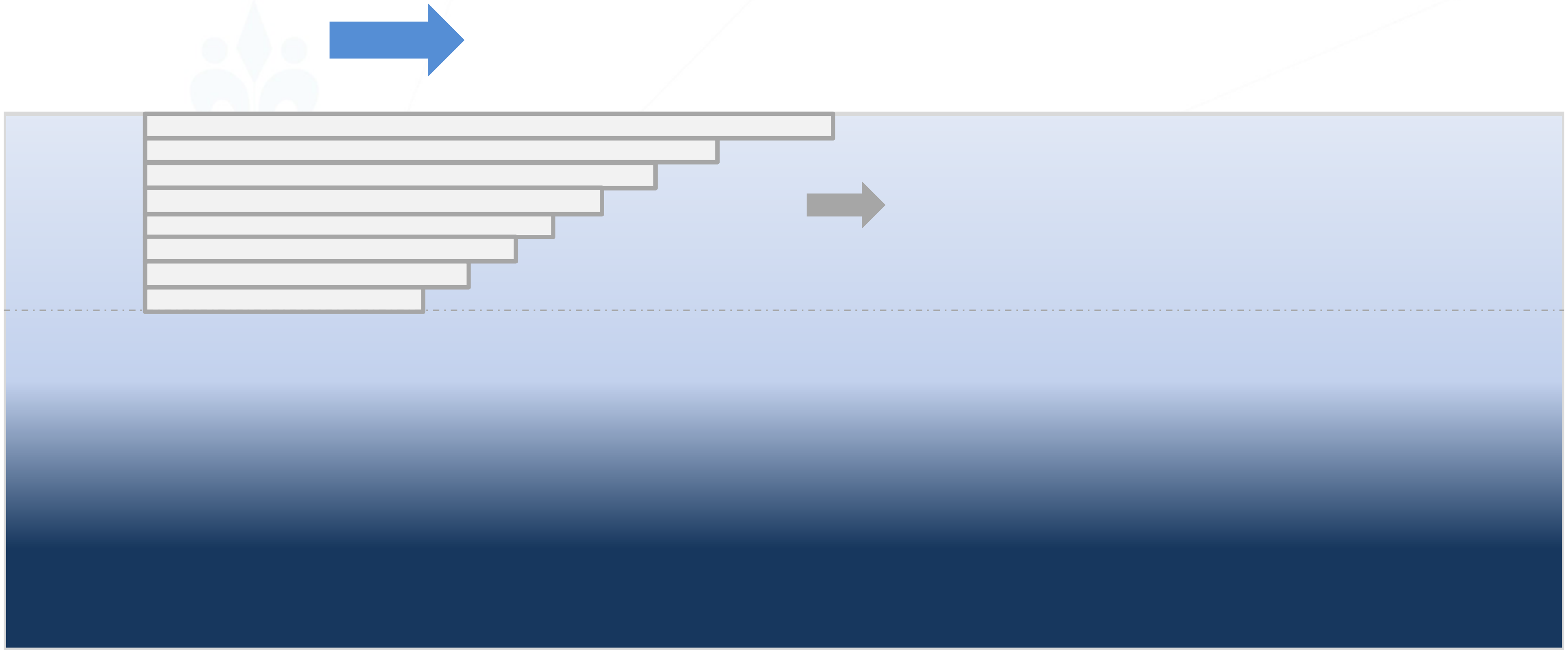
Vento (força de arrastamento)**:**
As moléculas de ar em movimento colidem com as moléculas de ar à superfície e arrastam a água na direcção do vento.
A camada de superficie “fornece” energia à camada adjacente, e assim sucessivamente.



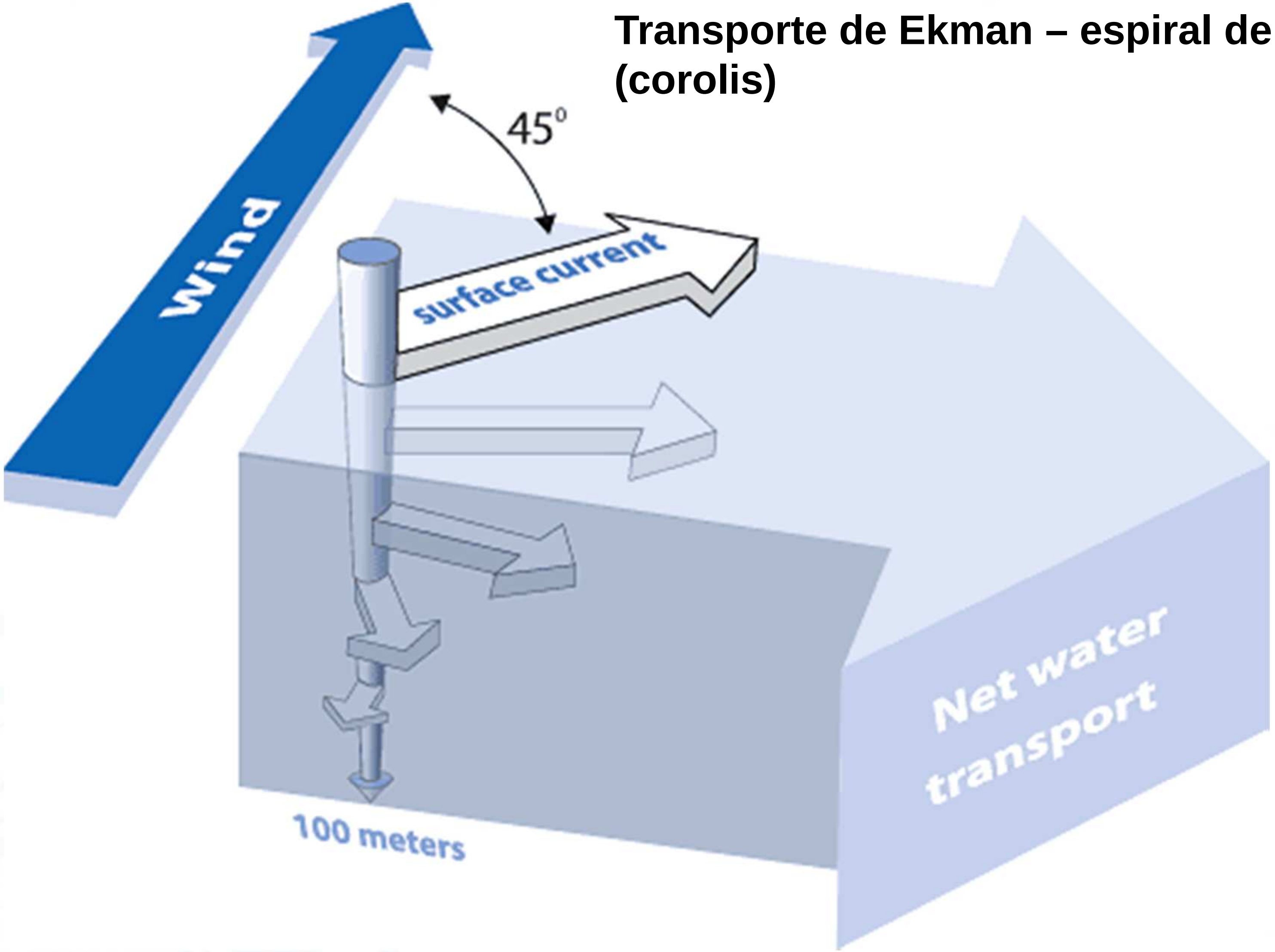
Correntes à superfície – vento

Vento (força de arrastamento)**:**
As moléculas de ar em movimento colidem com as moléculas de ar à superfície e arrastam a água na direcção do vento.
A camada de superficie “fornece” energia à camada adjacente, e assim sucessivamente.

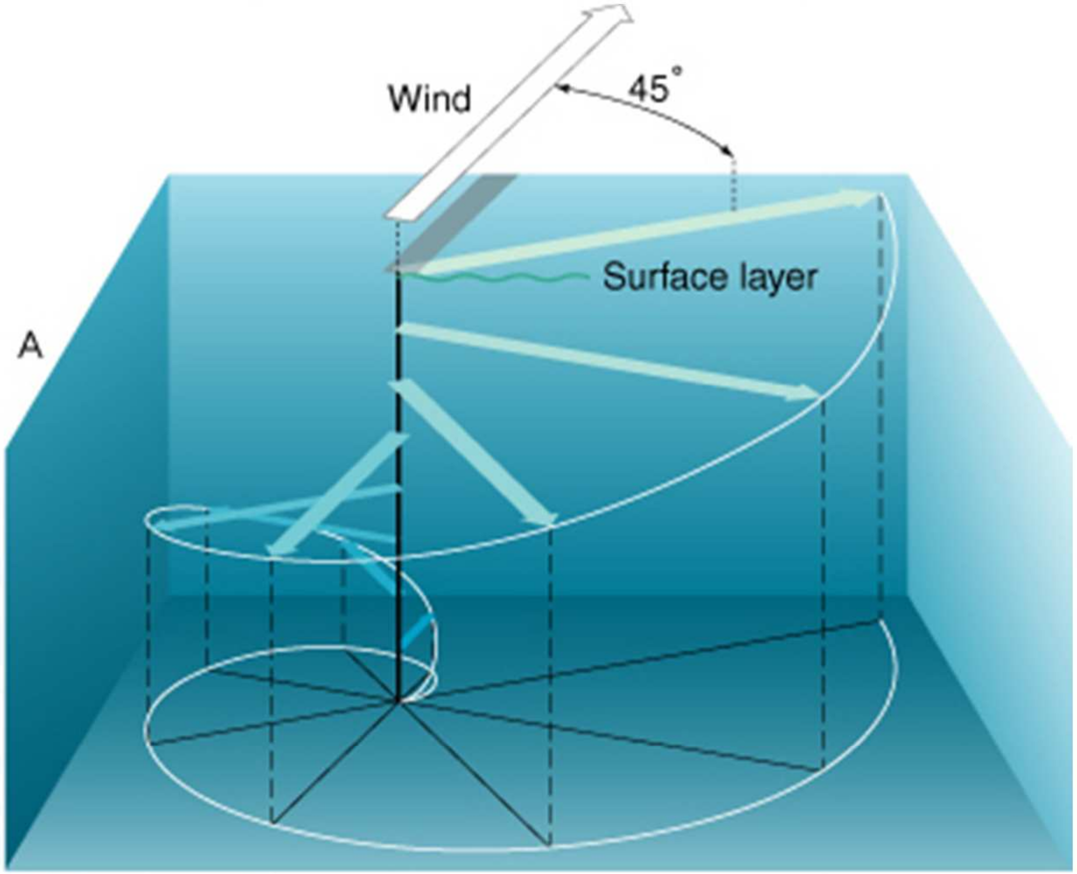
Correntes à superfície – vento



Transporte de Ekman – espiral de Ekman (corolis)

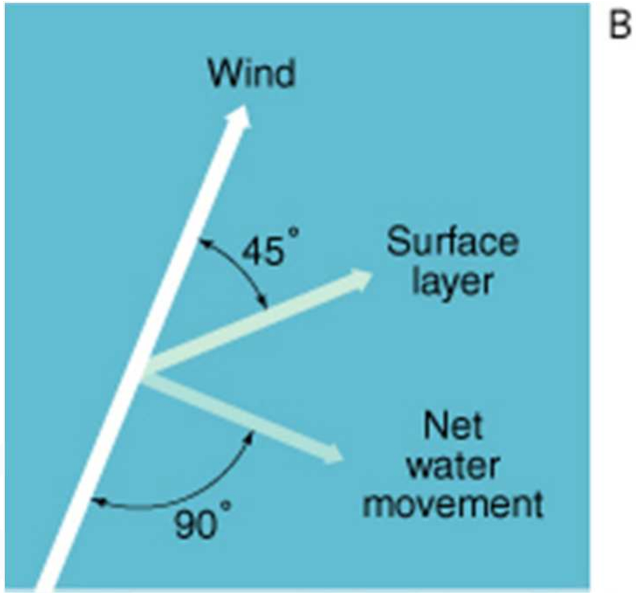

Wind
45°
surface current
Net water transport
100 meters

Transporte de Ekman – espiral de Ekman


Wind
45°
Surface layer
A

Correntes à superfície – vento

Devido à espiral de Ekman, o transporte (transporte de Ekman) é 90º para a direita da direcção do vento (para a esquerda no hemisfério sul).

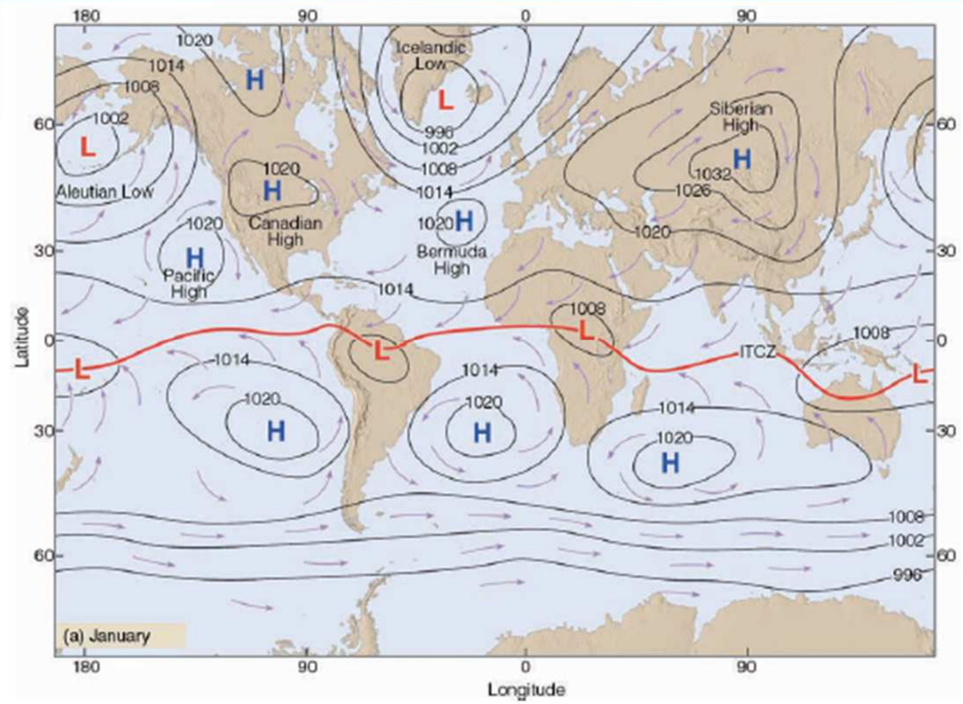

B
Wind
45°
Surface layer
Net water movement
90°

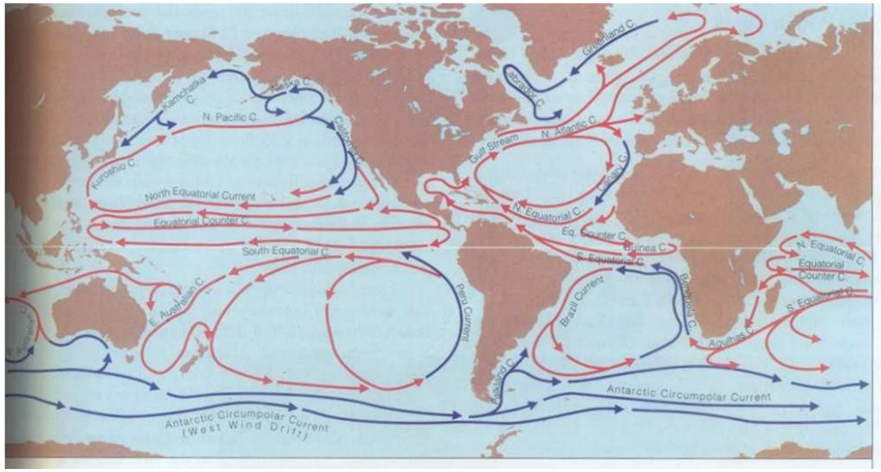
Correntes à superfície – vento

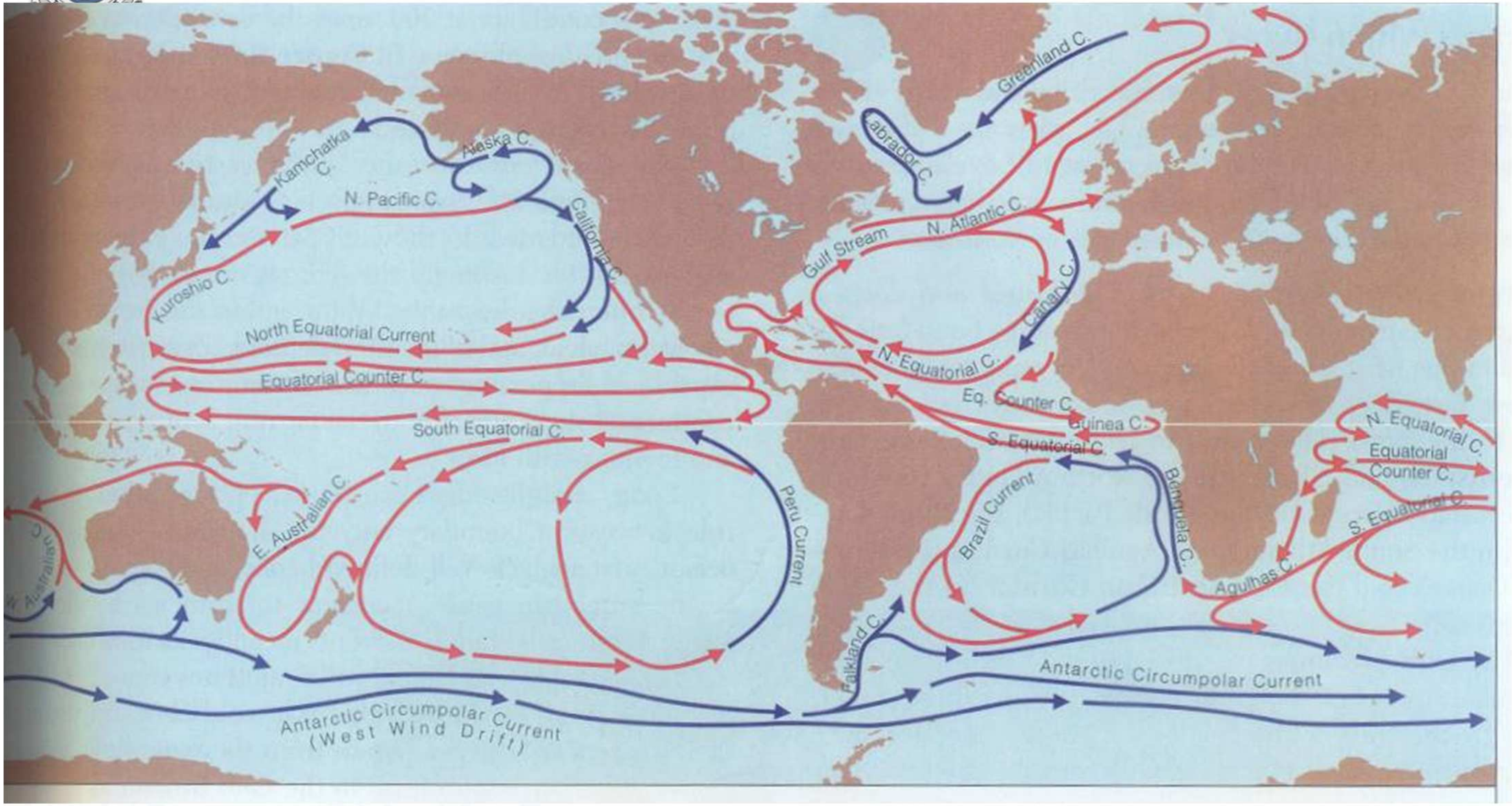
Existem 6 giros de correntes à superfície:

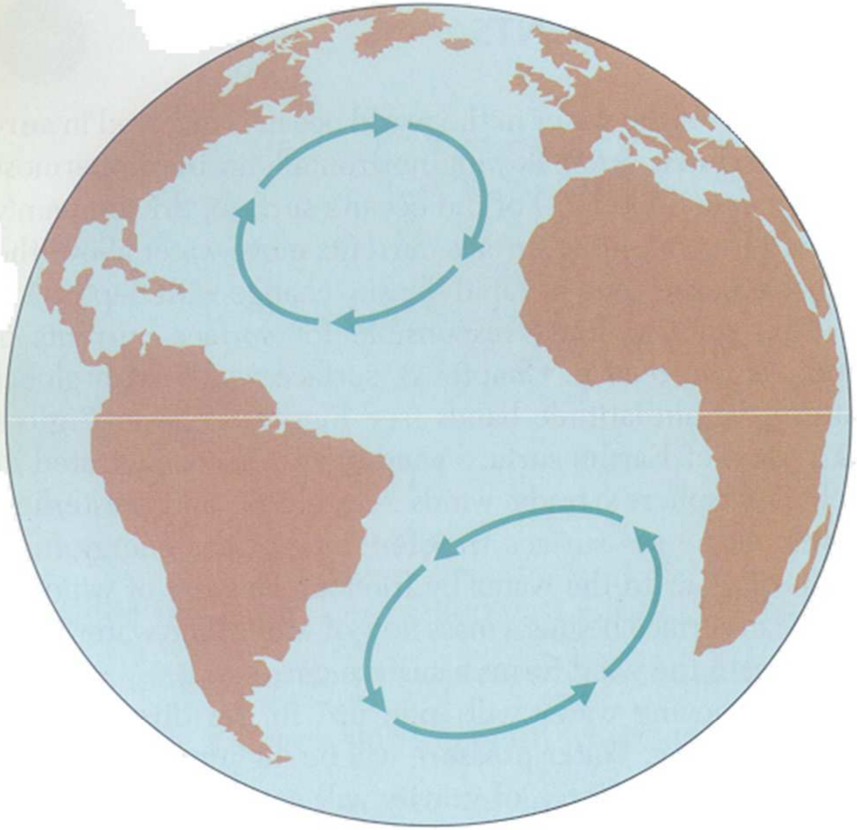
- 5 giros geostróficos (giro do Atlântico Norte, giro do Atlântico Sul, Giro do Oceano Pacífico, Giro do Pacifico Norte, e giro do Pacifico Sul.

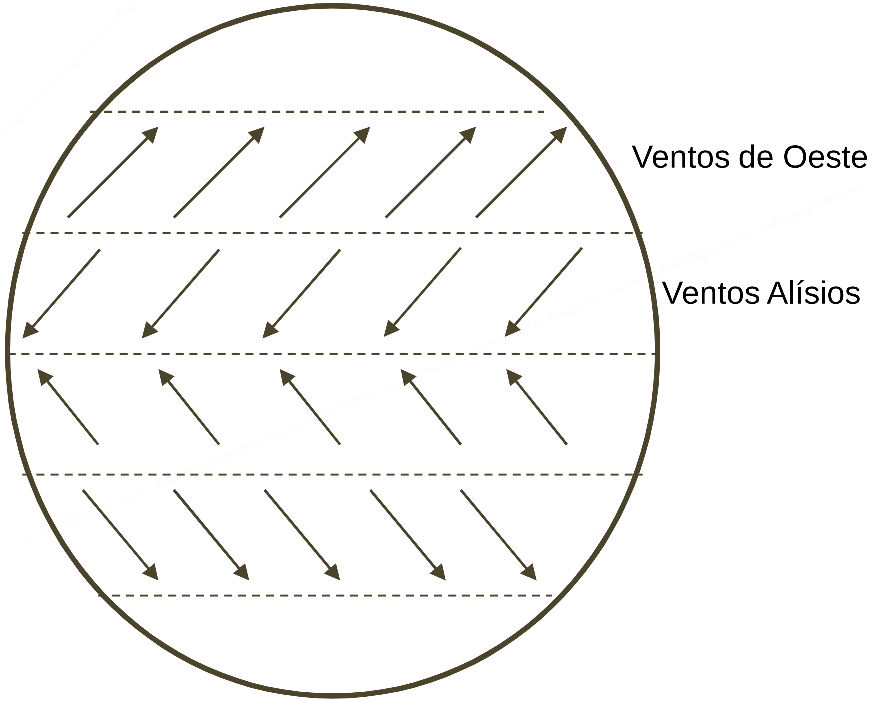
- 1 corrente circumpolar Antárctica (é uma corrente em circuito fechada, mas não é uma corrente geostrófica, nem é deflectida por nenhum continente).

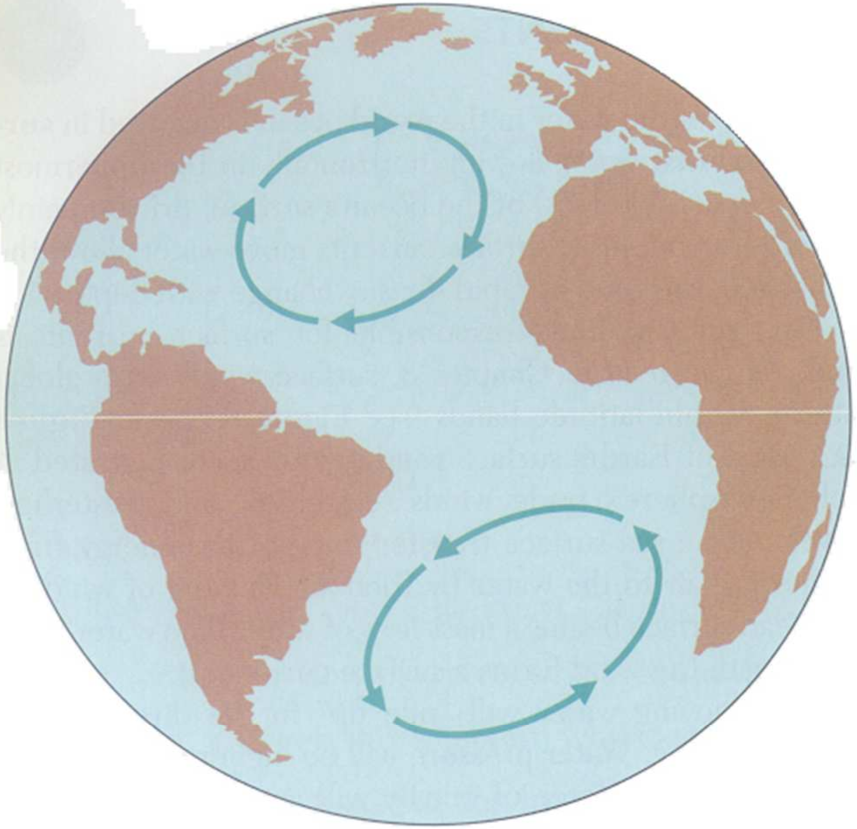

180
90
0
90
Latitude
Longitude
60
30
0
30
60
Icelandic Low
L
H
Aleutian Low
Canadian High
Pacific High
Bermuda High
Siberian High
ITCZ
1020
1014
1008
1002
996
1026
1032
(a) January

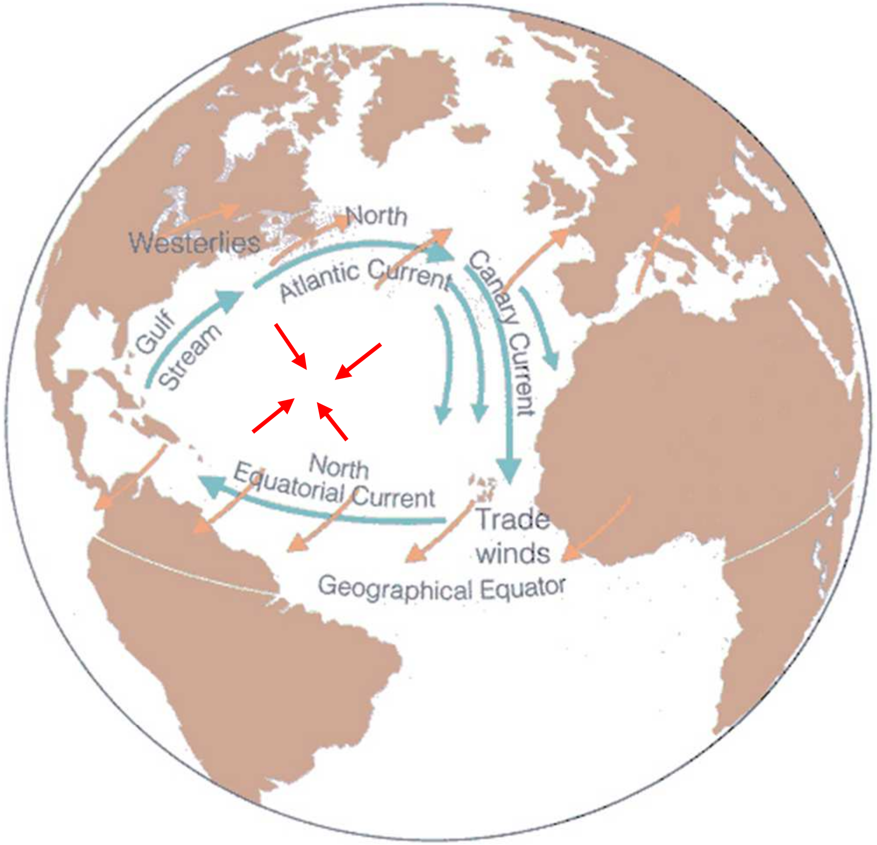

Kamchatka C.
Alaska C.
N. Pacific C.
California C.
Kuroshio C.
North Equatorial Current
Equatorial Counter C.
South Equatorial C.
E. Australian C.
Peru Current
Greenland C.
Labrador C.
Gulf Stream
N. Atlantic C.
Canary C.
N. Equatorial C.
Eq. Counter C.
Guinea C.
S. Equatorial C.
Brazil Current
Benguela C.
Falkland C.
Agulhas C.
N. Equatorial C.
Equatorial Counter C.
S. Equatorial C.
Antarctic Circumpolar Current
Antarctic Circumpolar Current (West Wind Drift)

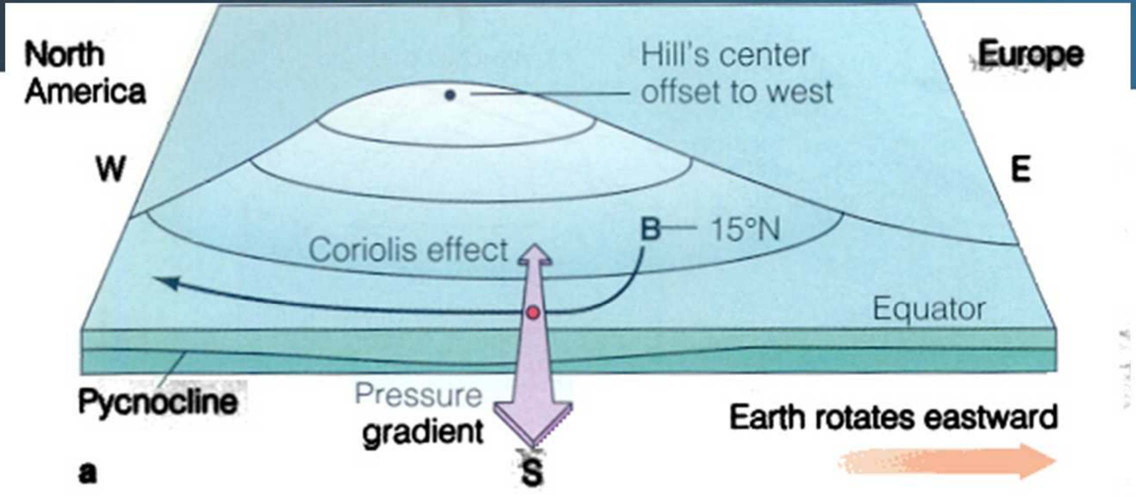

Greenland C.
Labrador C.
Kamchatka C.
Alaska C.
N. Pacific C.
California C.
Gulf Stream
N. Atlantic C.
Canary C.
Kuroshio C.
North Equatorial Current
N. Equatorial C.
Equatorial Counter C.
Eq. Counter C.
Guinea C.
South Equatorial C.
S. Equatorial C.
N. Equatorial C.
Equatorial Counter C.
E. Australian C.
Peru Current
Brazil Current
Benguela C.
S. Equatorial C.
W. Australian C.
Agulhas C.
Falkland C.
Antarctic Circumpolar Current
Antarctic Circumpolar Current (West Wind Drift)

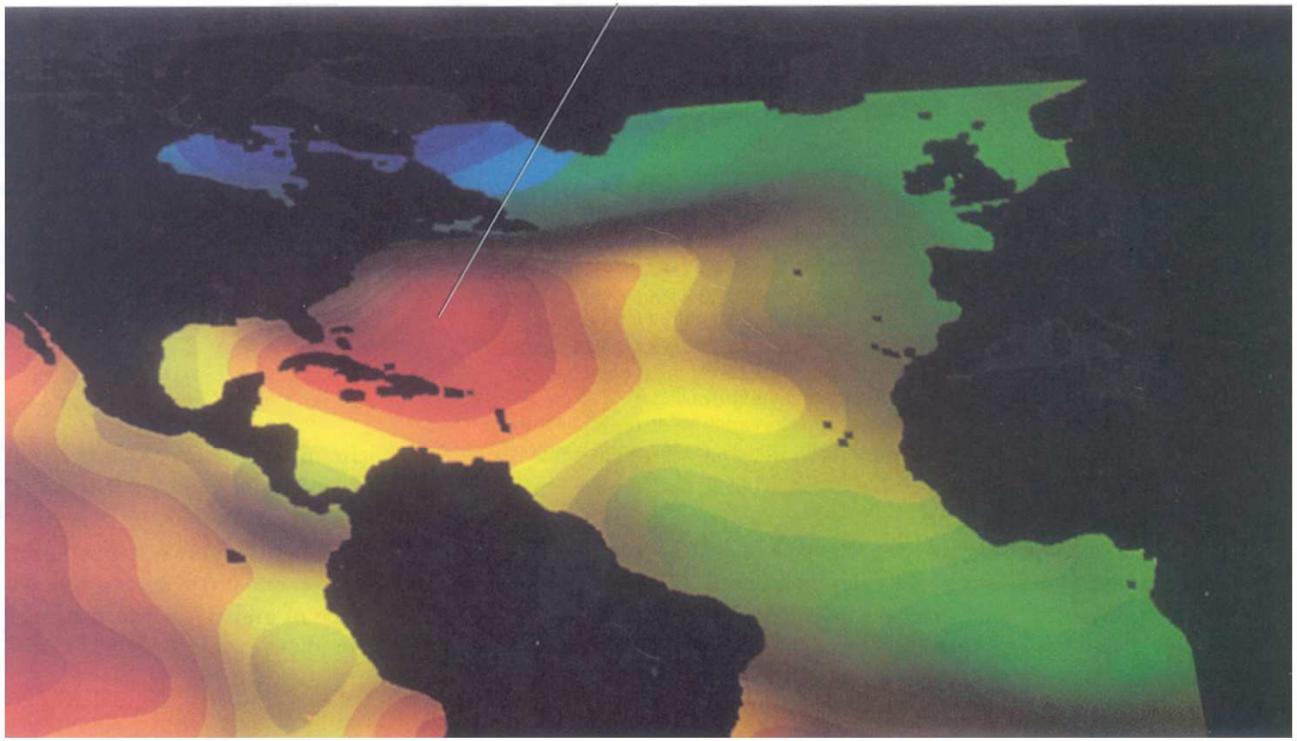


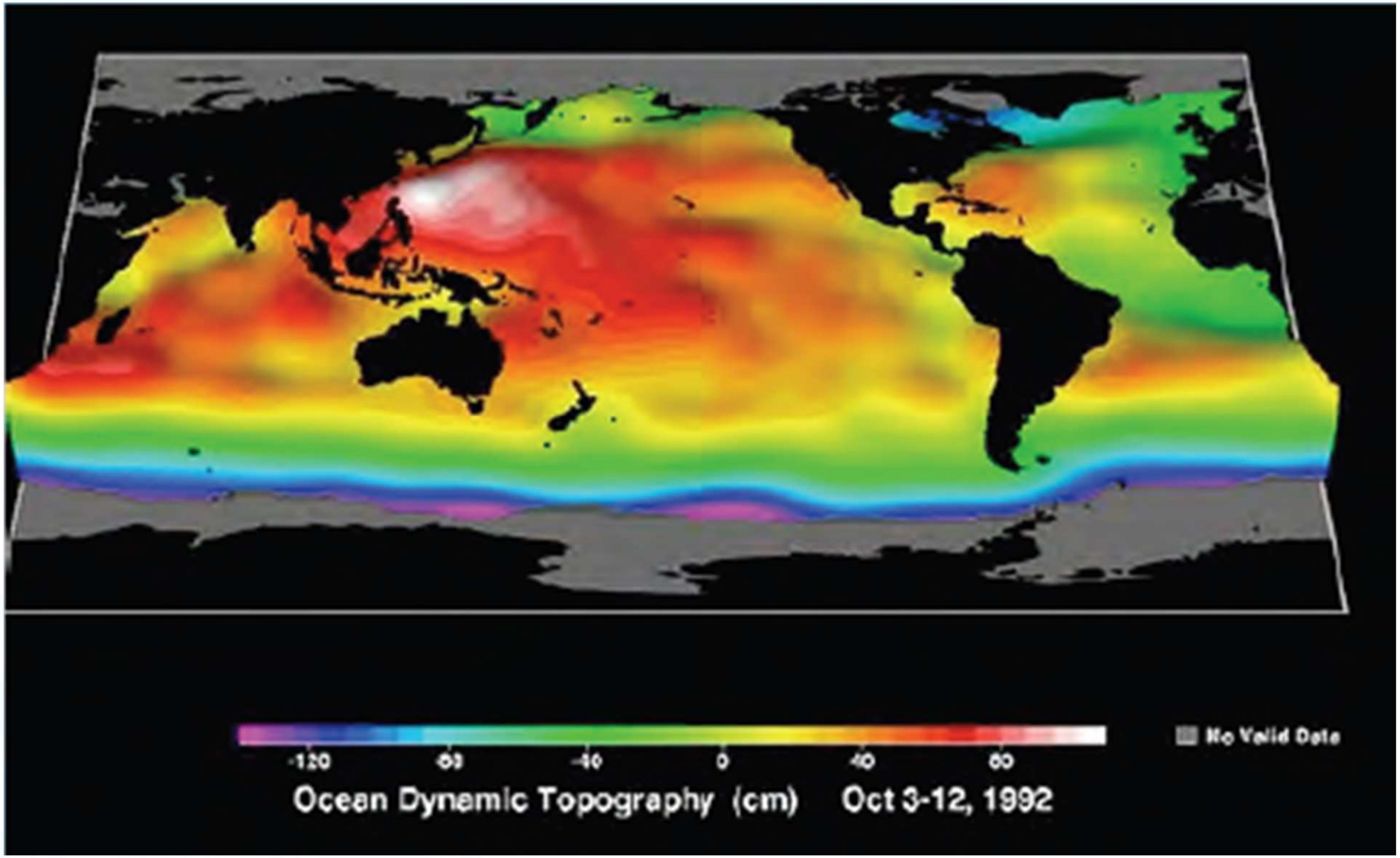

Ventos de Oeste
Ventos Alísios



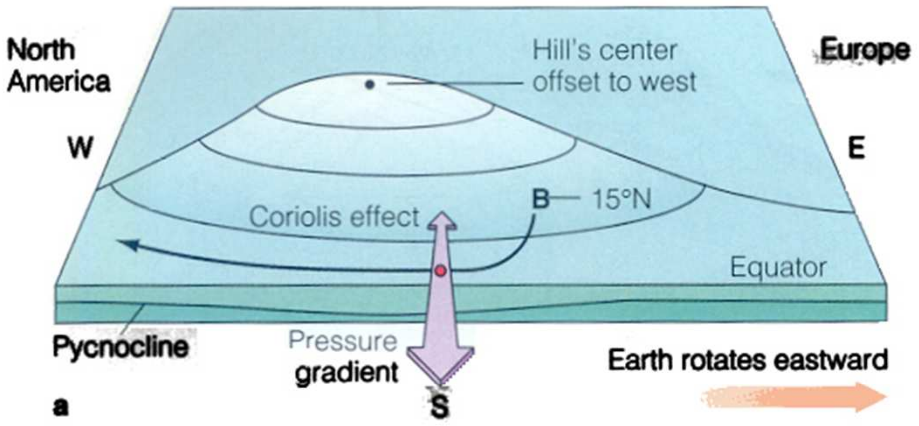

Westerlies
North
Atlantic Current
Gulf
Stream
Canary Current
North
Equatorial Current
Trade
winds
Geographical Equator


North America
Hill's center offset to west
Europe
W
E
B— 15°N
Coriolis effect
Equator
Pycnocline
Pressure gradient
Earth rotates eastward
a
S




-120
-80
-40
0
40
80
▨ No Valid Data

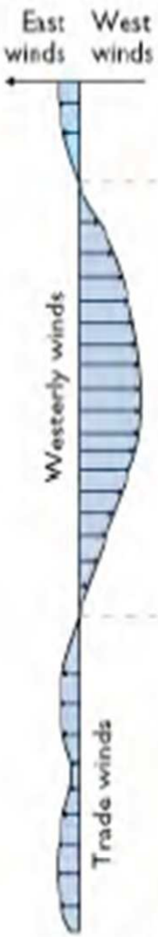
Ocean Dynamic Topography (cm) Oct 3-12, 1992

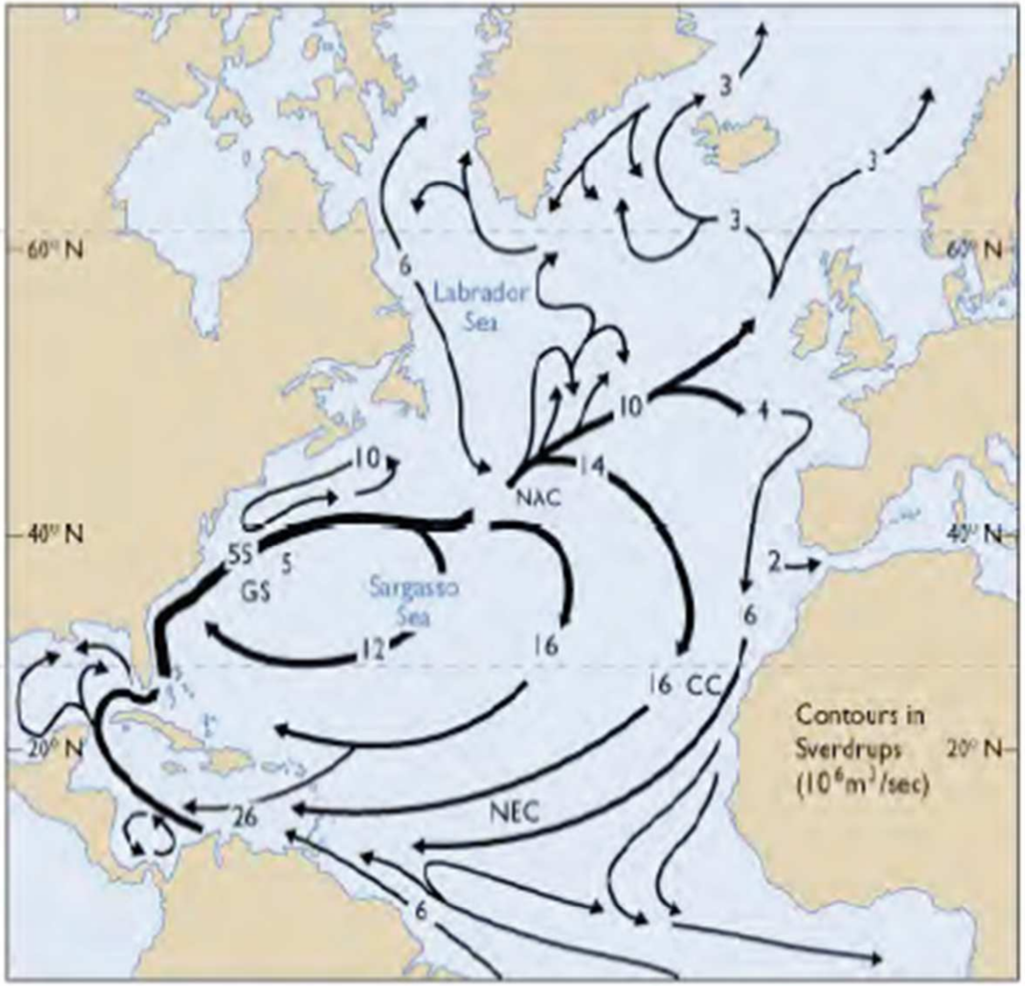

North America
Hill's center offset to west
Europe
W
E
B
15°N
Coriolis effect
Equator
Pycnocline
Pressure gradient
Earth rotates eastward
a
S

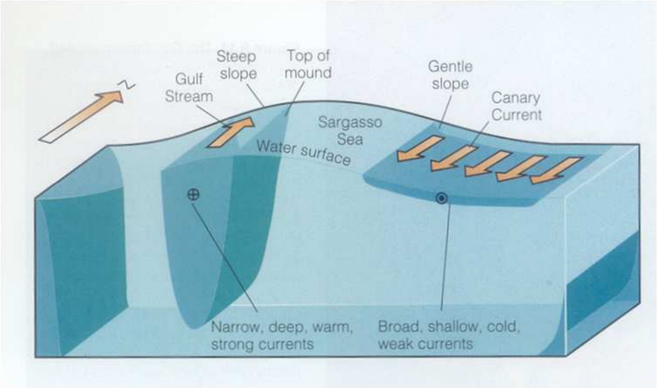
O transporte de Ekman empurra a água para o centro do giro (~1 m)

Mas a gravidade actua no sentido de nivelar a água, gerando-se um gradiente de pressão (FGP)

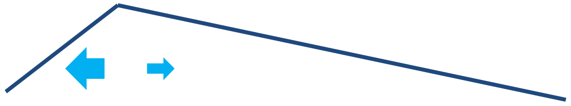
O balanço entre a FGP e a força de Coriolis (balanço geostrófico), determina o sentido das correntes em torno do giro.

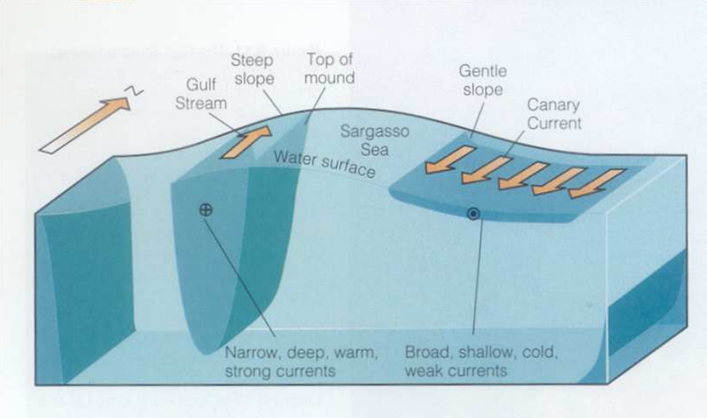


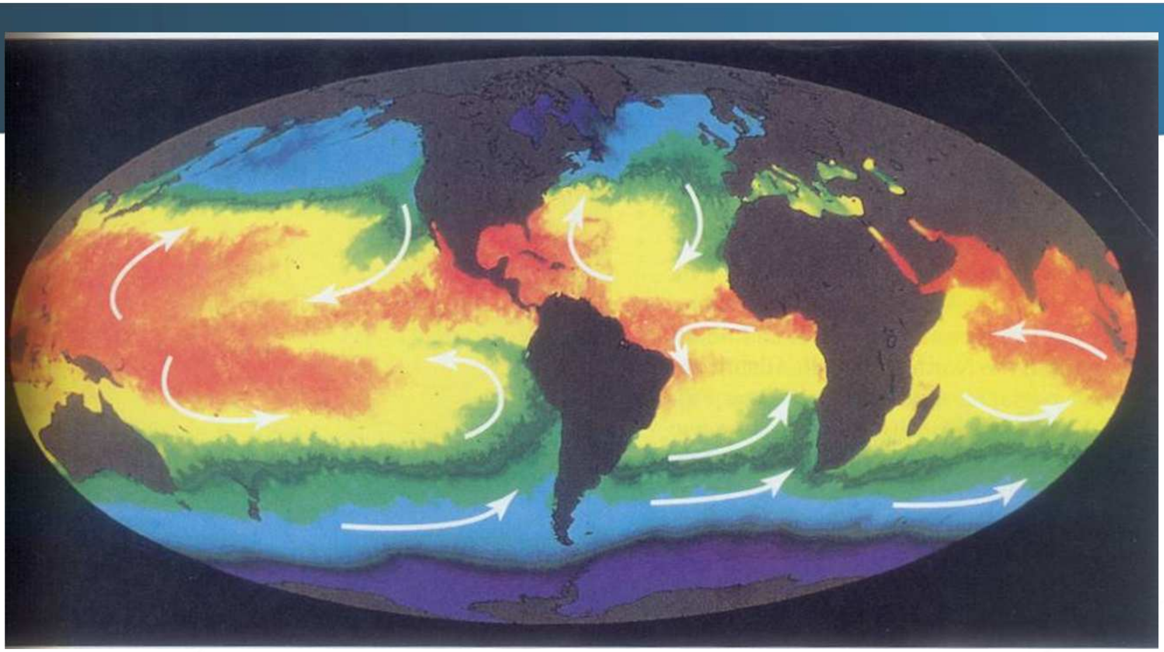

60° N
40° N
20° N
60° N
40° N
20° N
Labrador Sea
Sargasso Sea
NAC
GS
NEC
CC
55
5
10
12
16
16
14
10
26
6
6
6
4
3
3
3
2
Contours in Sverdrups ($10^6 m^3/sec$)

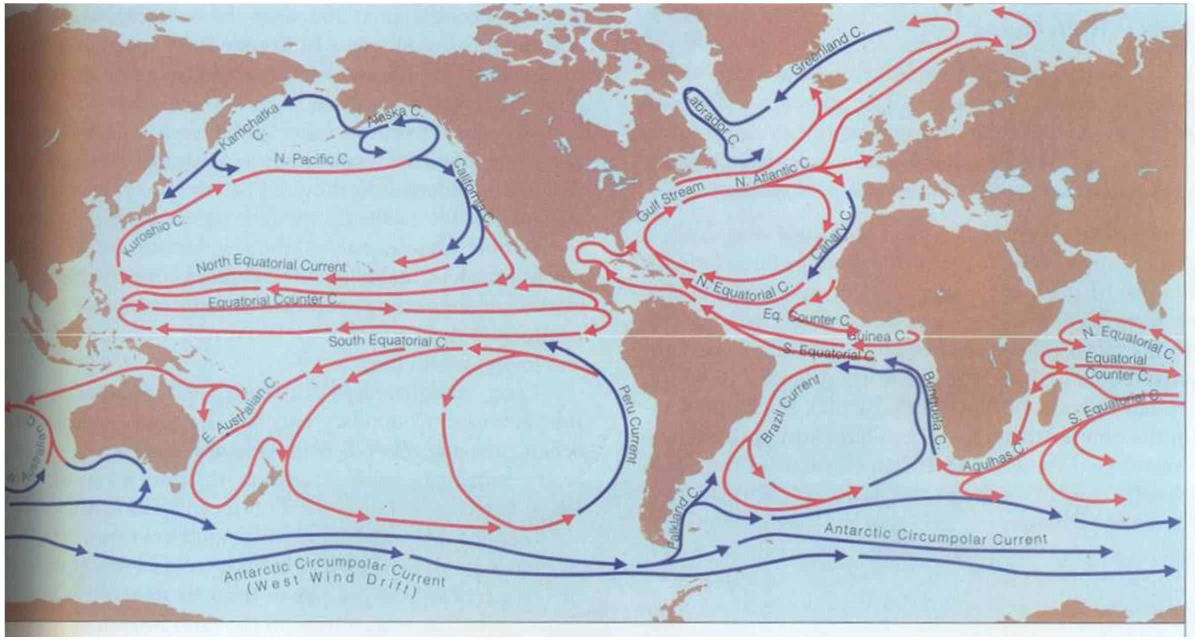

Gulf Stream
Steep slope
Top of mound
Gentle slope
Canary Current
Sargasso Sea
Water surface
Narrow, deep, warm, strong currents
Broad, shallow, cold, weak currents

As correntes nos giros não são simétricas; há uma intensificação das correntes a Oeste, em comparação com as correntes a Leste.




Steep slope
Top of mound
Gentle slope
Gulf Stream
Canary Current
Sargasso Sea
Water surface
Narrow, deep, warm, strong currents
Broad, shallow, cold, weak currents



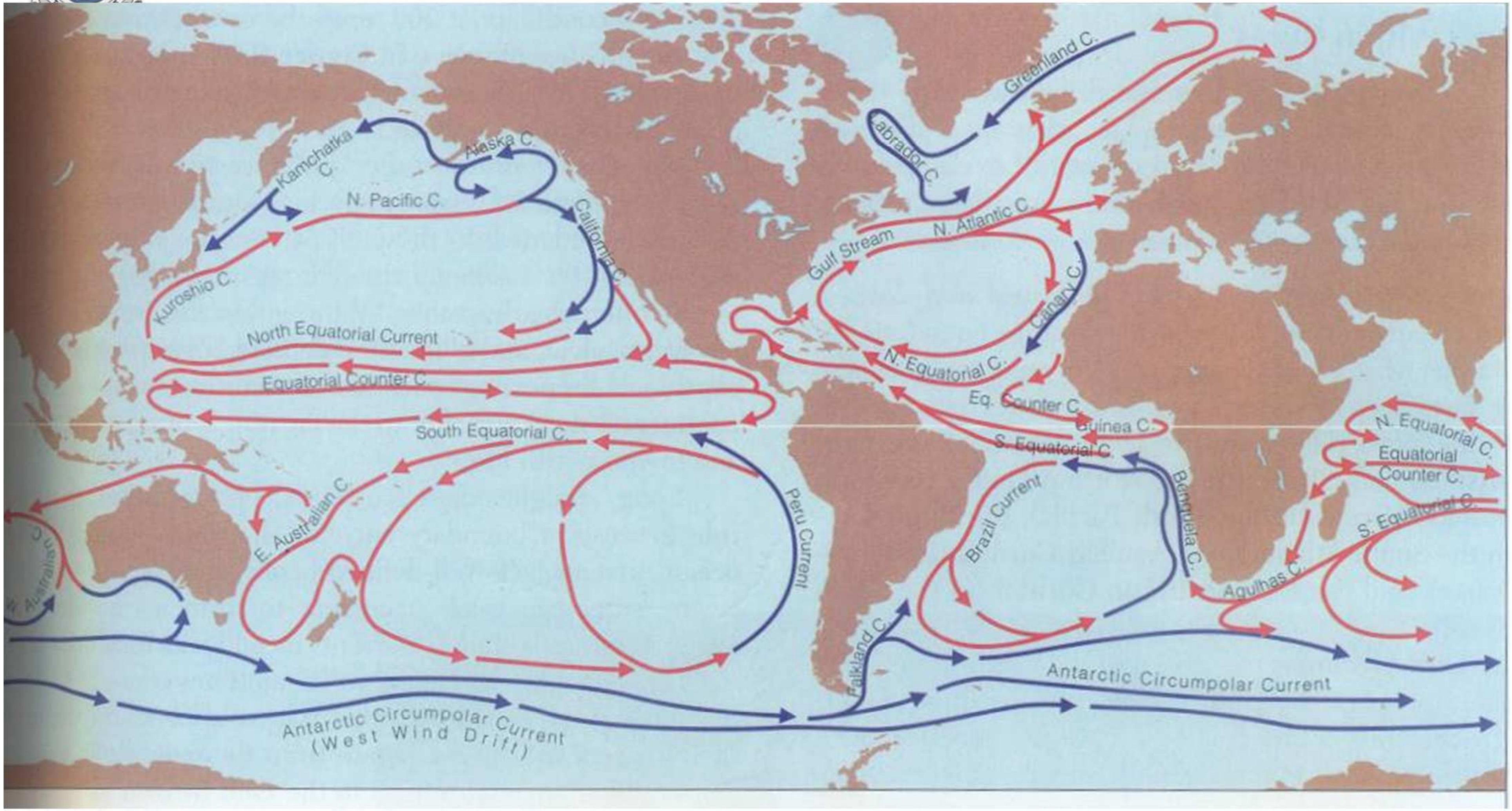

Greenland C.
Labrador C.
Kamchatka C.
Alaska C.
N. Pacific C.
California C.
Kuroshio C.
Gulf Stream
N. Atlantic C.
Canary C.
North Equatorial Current
N. Equatorial C.
Equatorial Counter C.
Eq. Counter C.
Guinea C.
South Equatorial C.
S. Equatorial C.
N. Equatorial C.
Equatorial Counter C.
S. Equatorial C.
E. Australian C.
W. Australian C.
Peru Current
Brazil Current
Benguela C.
Agulhas C.
Falkland C.
Antarctic Circumpolar Current
Antarctic Circumpolar Current (West Wind Drift)

Assimetria das correntes:

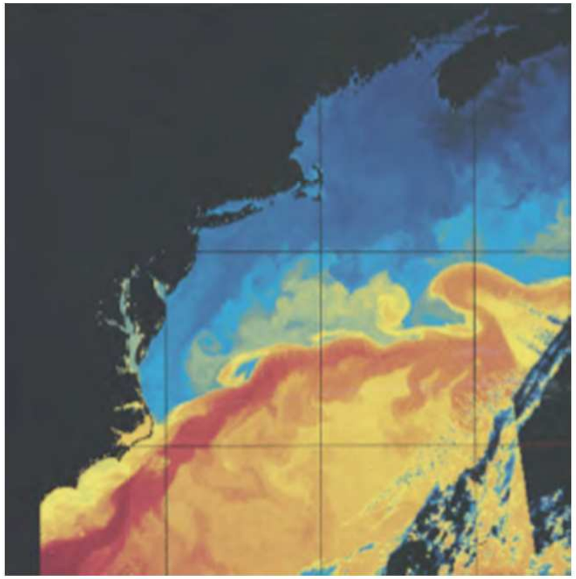
Correntes a Oeste (quentes):
- Rápidas
- Profundas
- Estreitas
- Limites bem definidos

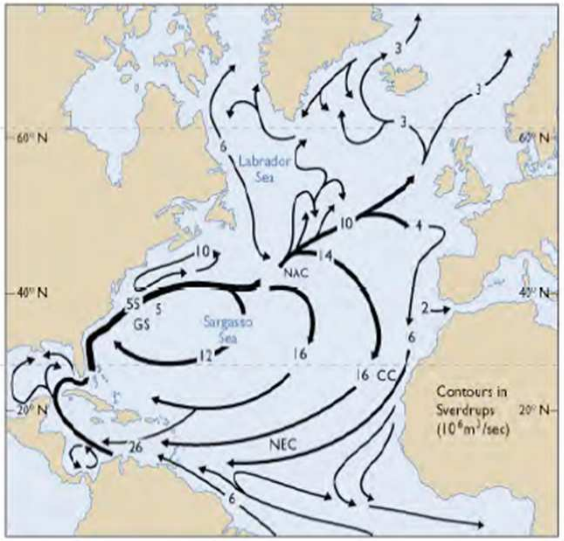
Correntes a Leste (frias):

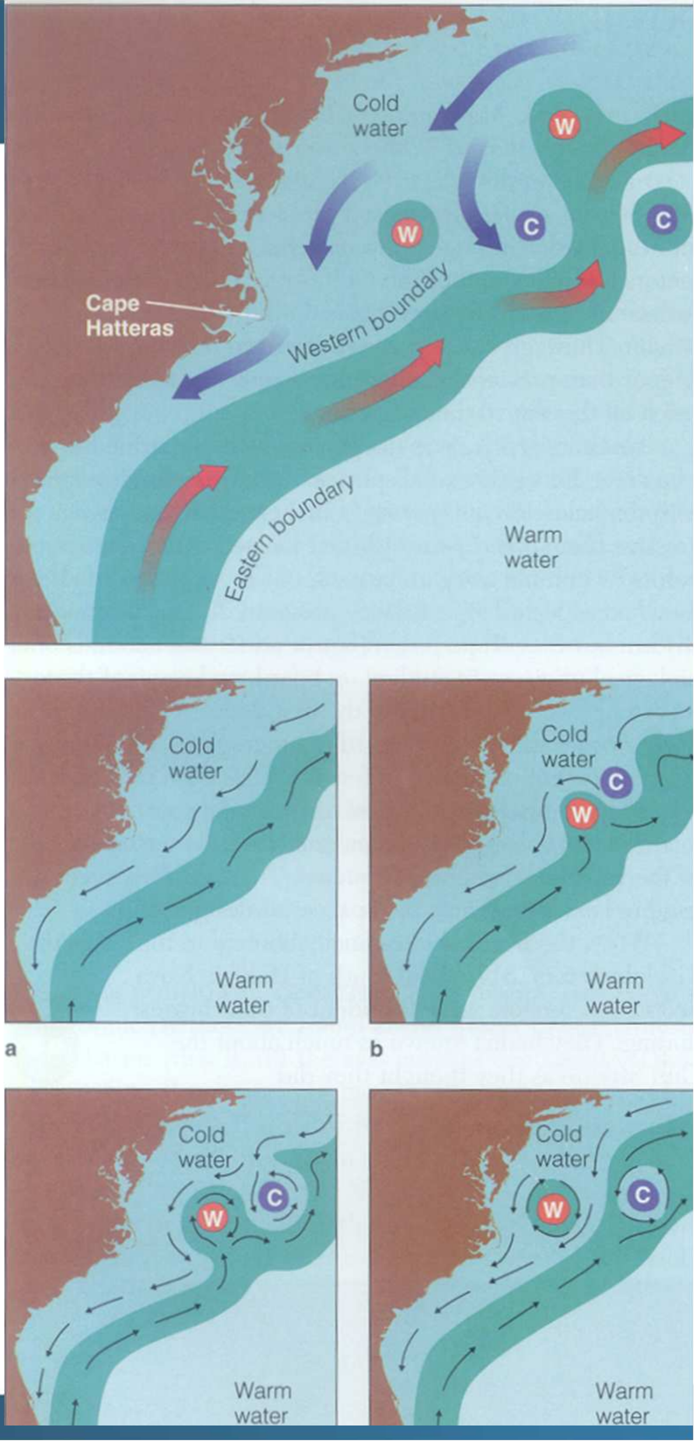
- Lentas
- Pouco profundas
- Largas
- Limites difusos


Greenland C.
Labrador C.
Alaska C.
Kamchatka C.
N. Pacific C.
California C.
Kuroshio C.
North Equatorial Current
Equatorial Counter C.
South Equatorial C.
Gulf Stream
N. Atlantic C.
Canary C.
N. Equatorial C.
Eq. Counter C.
Guinea C.
S. Equatorial C.
Brazil Current
Benguela C.
Peru Current
E. Australian C.
W. Australian C.
Falkland C.
Agulhas C.
N. Equatorial C.
Equatorial Counter C.
S. Equatorial C.
Antarctic Circumpolar Current
Antarctic Circumpolar Current (West Wind Drift)

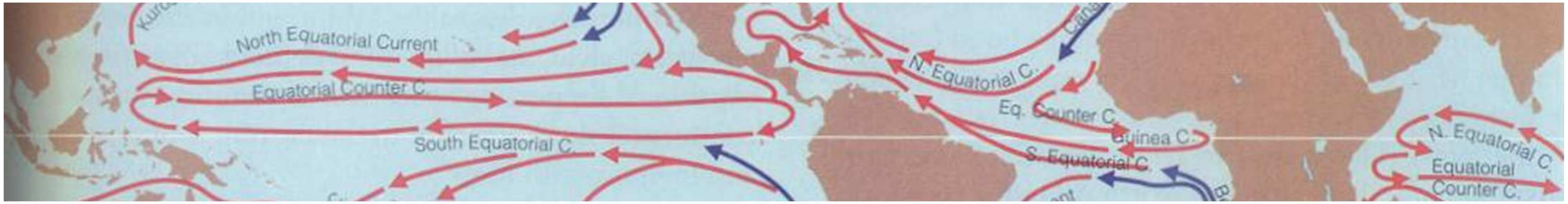
Corrente do Golfo

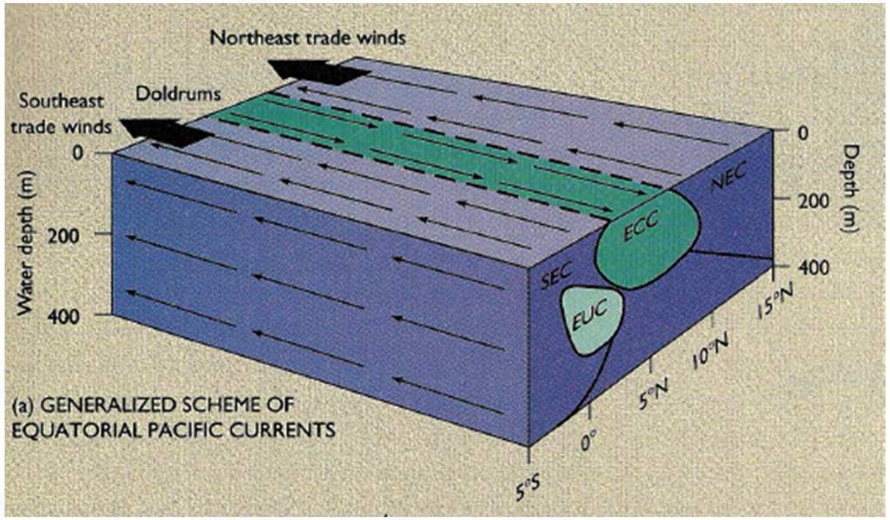



60° N
60° N
40° N
40° N
20° N
20° N
Labrador Sea
Sargasso Sea
GS
NAC
NEC
CC
55
5
10
10
14
4
3
3
3
3
6
2
6
16
16
12
26
6
Contours in Sverdrups (10⁶m³/sec)

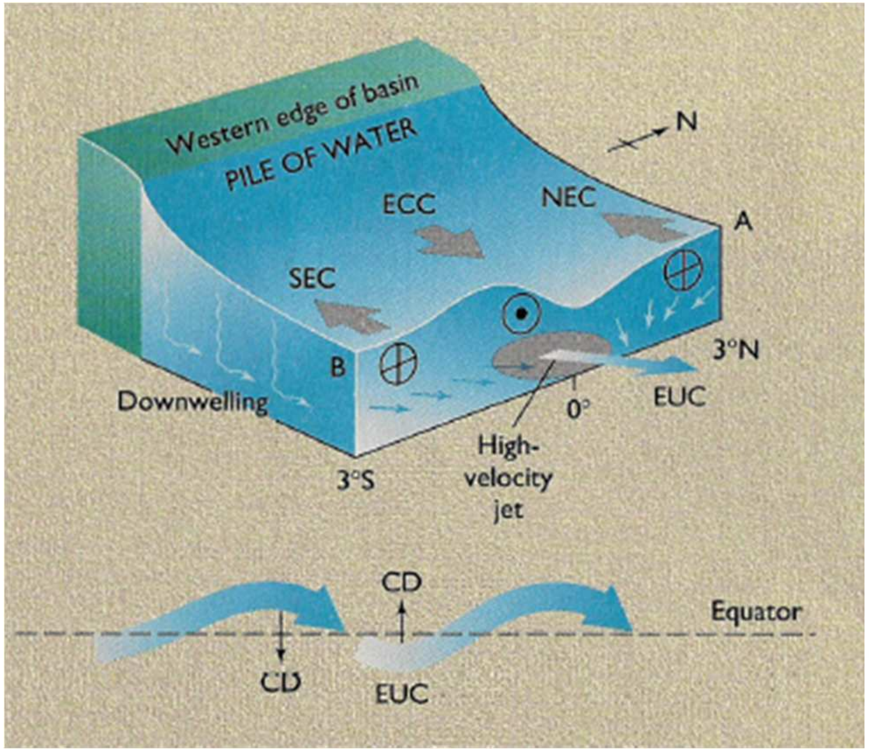

Cold water
W
C
W
C
Cape Hatteras
Western boundary
Eastern boundary
Warm water
Cold water
Warm water
a
Cold water
C
W
Warm water
b
Cold water
W
C
Warm water
Cold water
W
C
Warm water

Correntes equatoriais

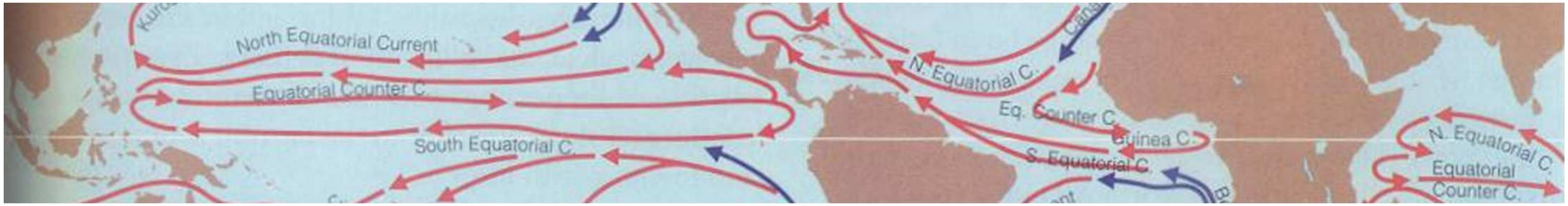

Kuro
North Equatorial Current
Equatorial Counter C.
South Equatorial C.
Cana
N. Equatorial C.
Eq. Counter C.
Guinea C.
S. Equatorial C.
N. Equatorial C.
Equatorial
Counter C.

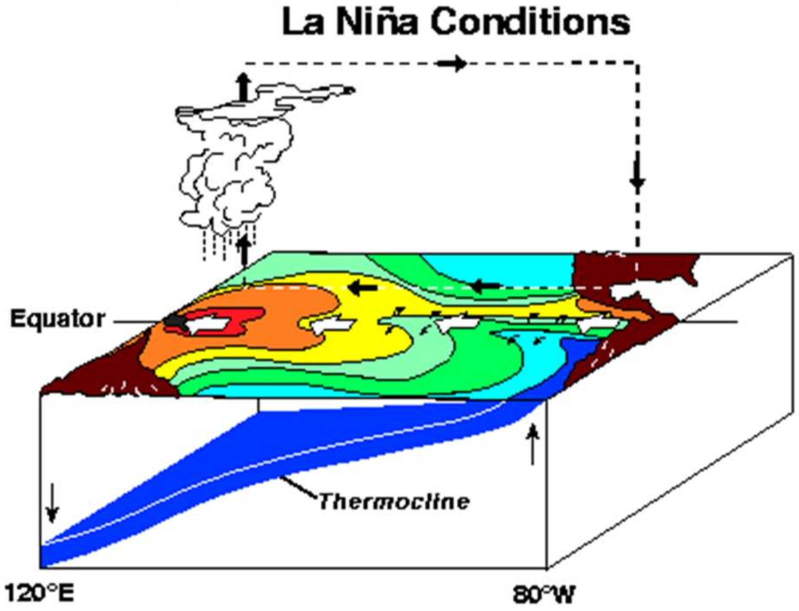

Northeast trade winds
Southeast
trade winds
Doldrums
0
200
400
Water depth (m)
0
200
400
Depth (m)
NEC
ECC
SEC
EUC
15°N
10°N
5°N
0°
5°S

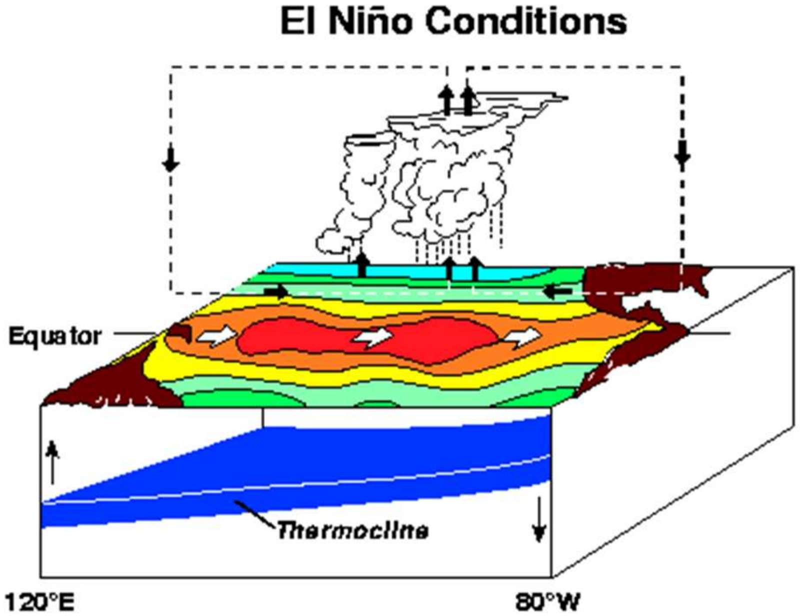
(a) GENERALIZED SCHEME OF EQUATORIAL PACIFIC CURRENTS

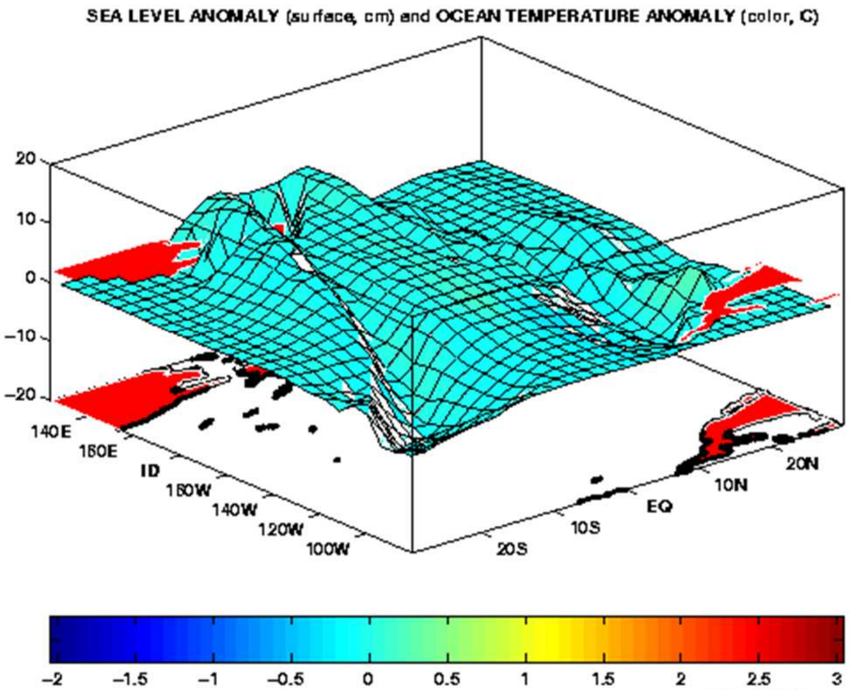

Western edge of basin
PILE OF WATER
N
ECC
NEC
A
SEC
B
3°N
EUC
Downwelling
0°
3°S
High-
velocity
jet
CD
Equator
CD
EUC

Correntes equatoriais

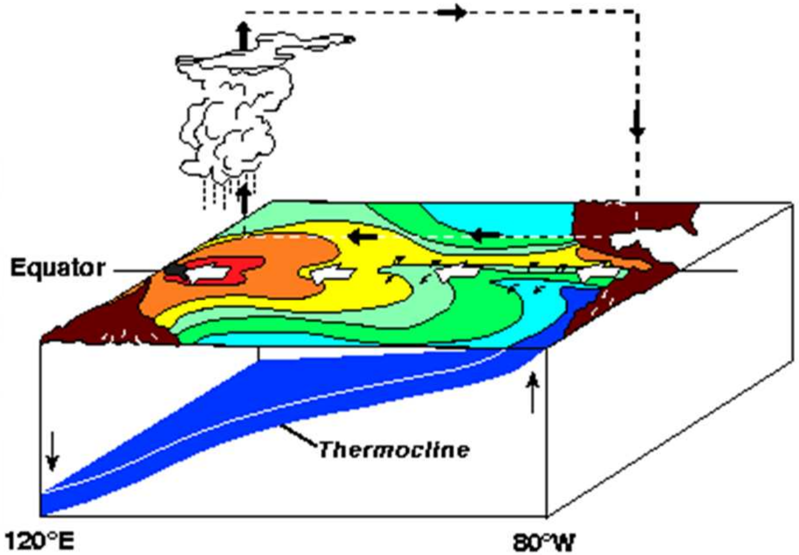

North Equatorial Current
Equatorial Counter C.
South Equatorial C.
N. Equatorial C.
Eq. Counter C.
Guinea C.
S. Equatorial C.
N. Equatorial C.
Equatorial Counter C.


La Niña Conditions
Equator
Thermocline
120°E
80°W

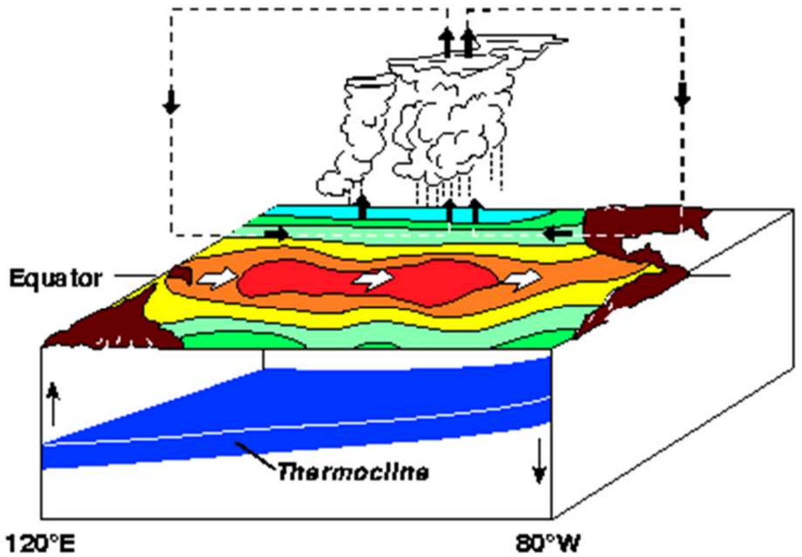

El Niño Conditions
Equator
Thermocline
120°E
80°W

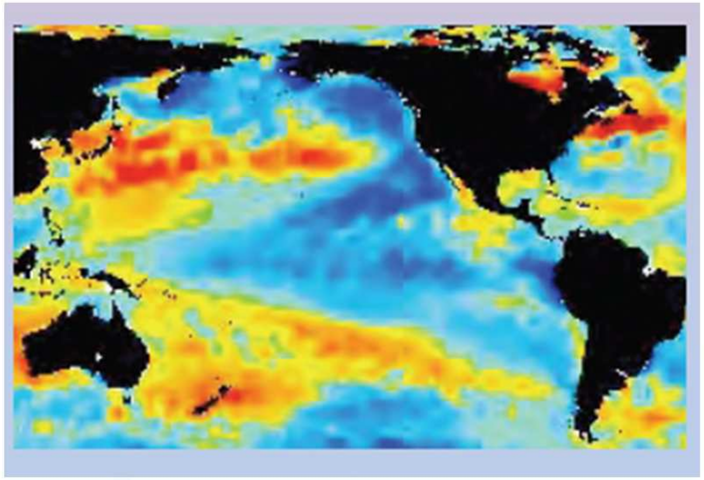


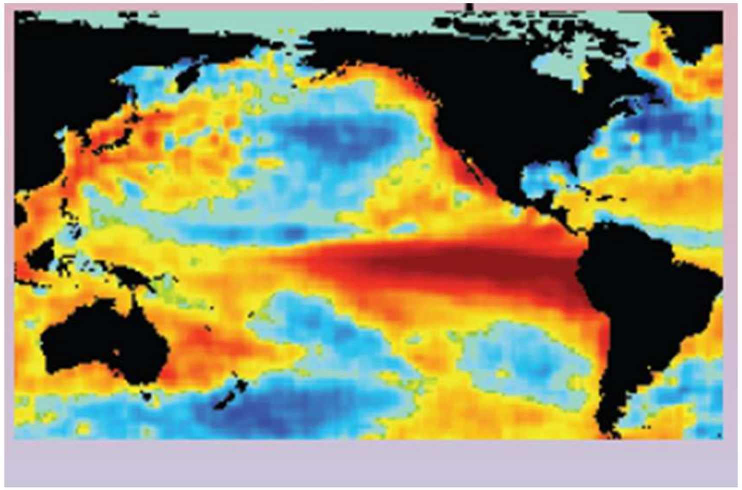
La Niña Conditions


Equator
Thermocline
120°E
80°W

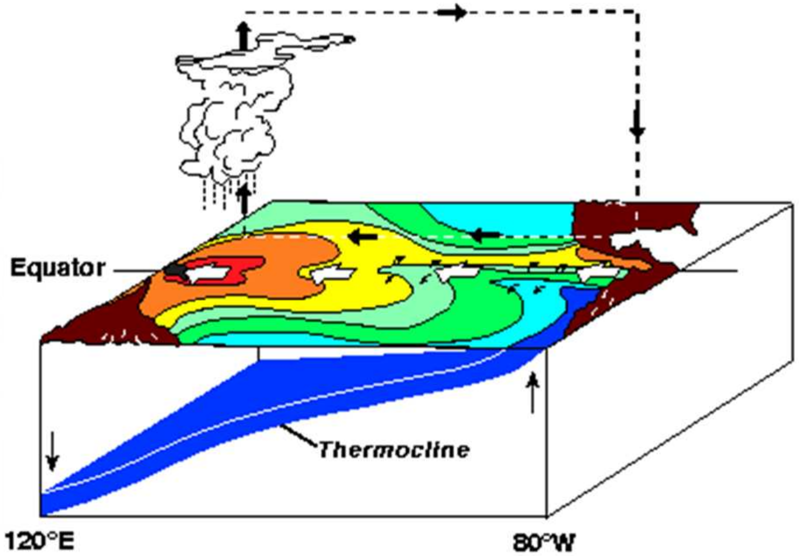
El Niño Conditions


Equator
Thermocline
120°E
80°W

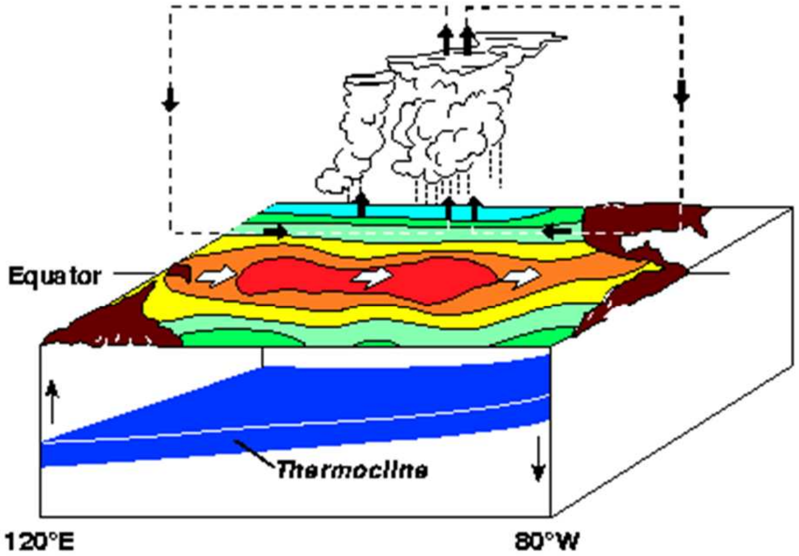




La Niña Conditions


Equator
Thermocline
120°E
80°W

El Niño Conditions


Equator
Thermocline
120°E
80°W

Obrigado
Gracias