



GF 3022 Contaminación Atmosférica

Dispersión atmosférica y modelación de procesos

Laura Gallardo

Profesora Asociada, Departamento de Geofísica

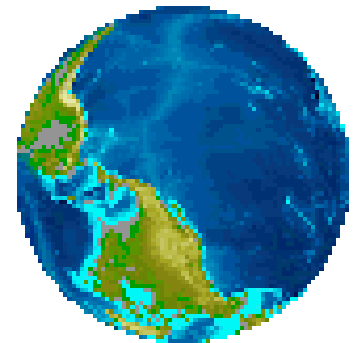
Investigadora Asociada del Centro de Modelamiento Matemático

Universidad de Chile

laura@dgf.uchile.cl

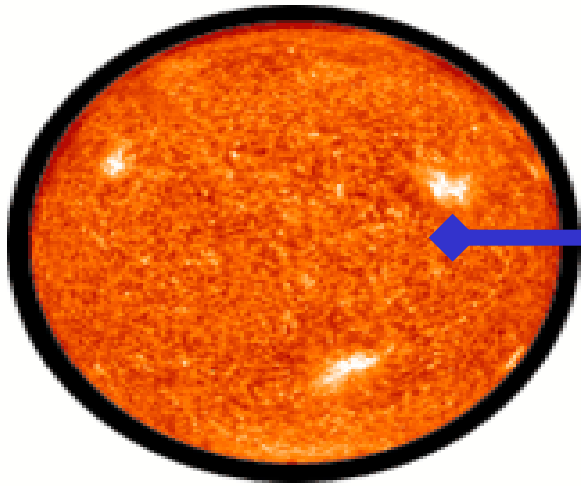
GF 3022

- Circulación atmosférica
 - Balance radiativo
 - Circulación de Hadley
 - Ondas de Rossby
 - Circulaciones radiativas
- Dinámica atmosférica
 - Fuerzas actuantes
 - Coordenadas atmosféricas
 - Efecto centrífugo
 - Efecto de Coriolis
 - Navier-Stokes
 - Escala sinóptica y aproximaciones
 - Balance hidrostático
 - Balance geostrófico

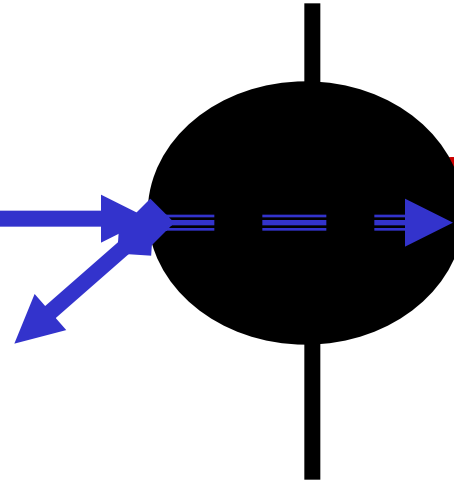




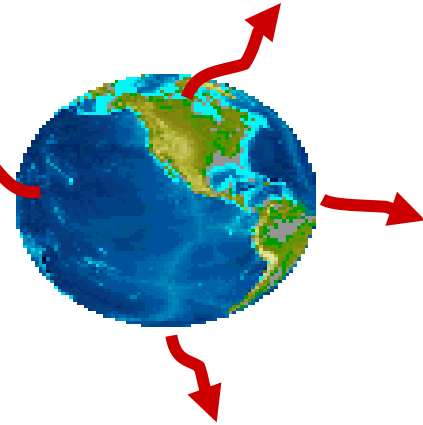
El sol: nuestra fuente de energía ca. 1367 W/m^2



$1367 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$



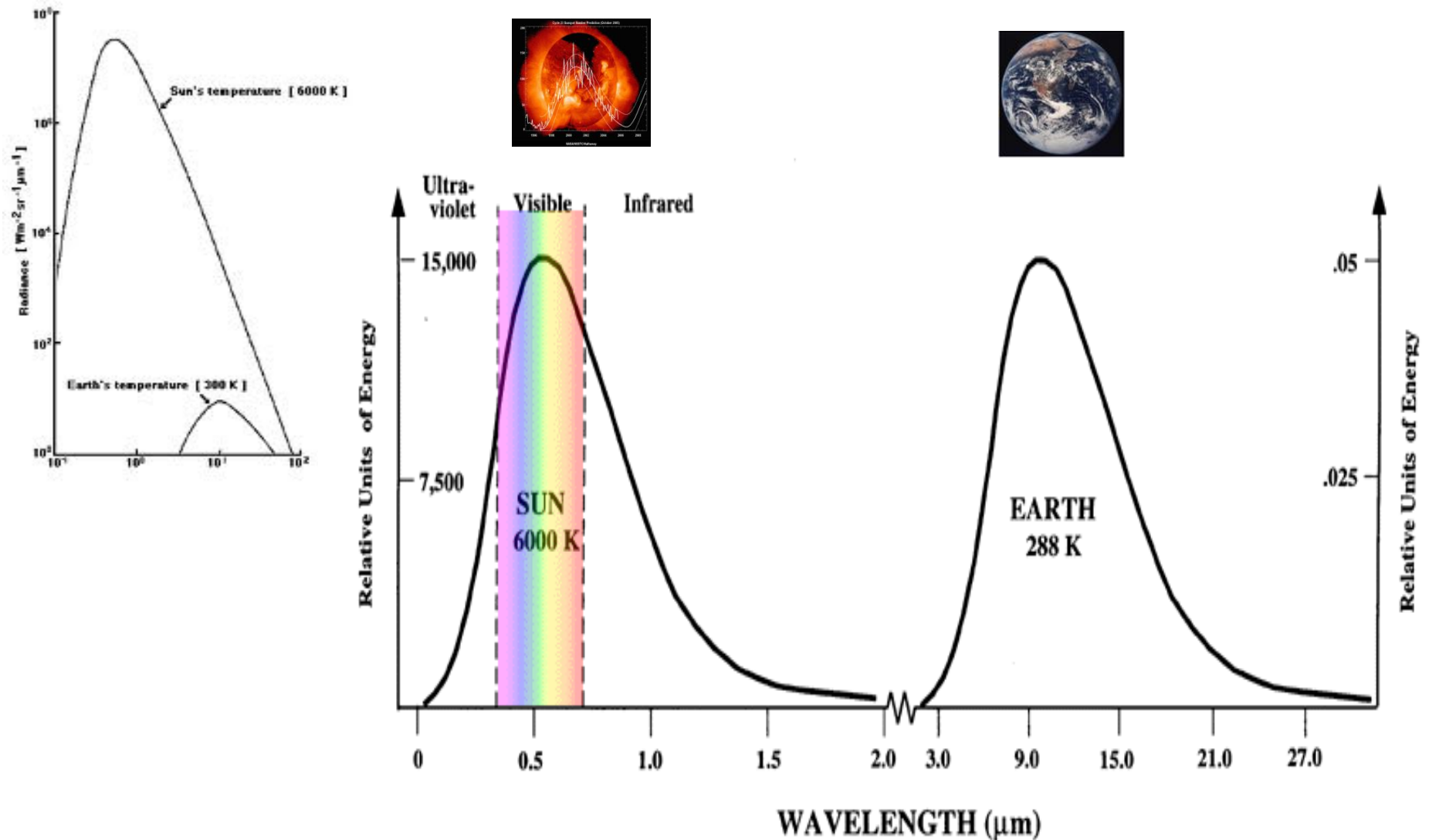
πR^2



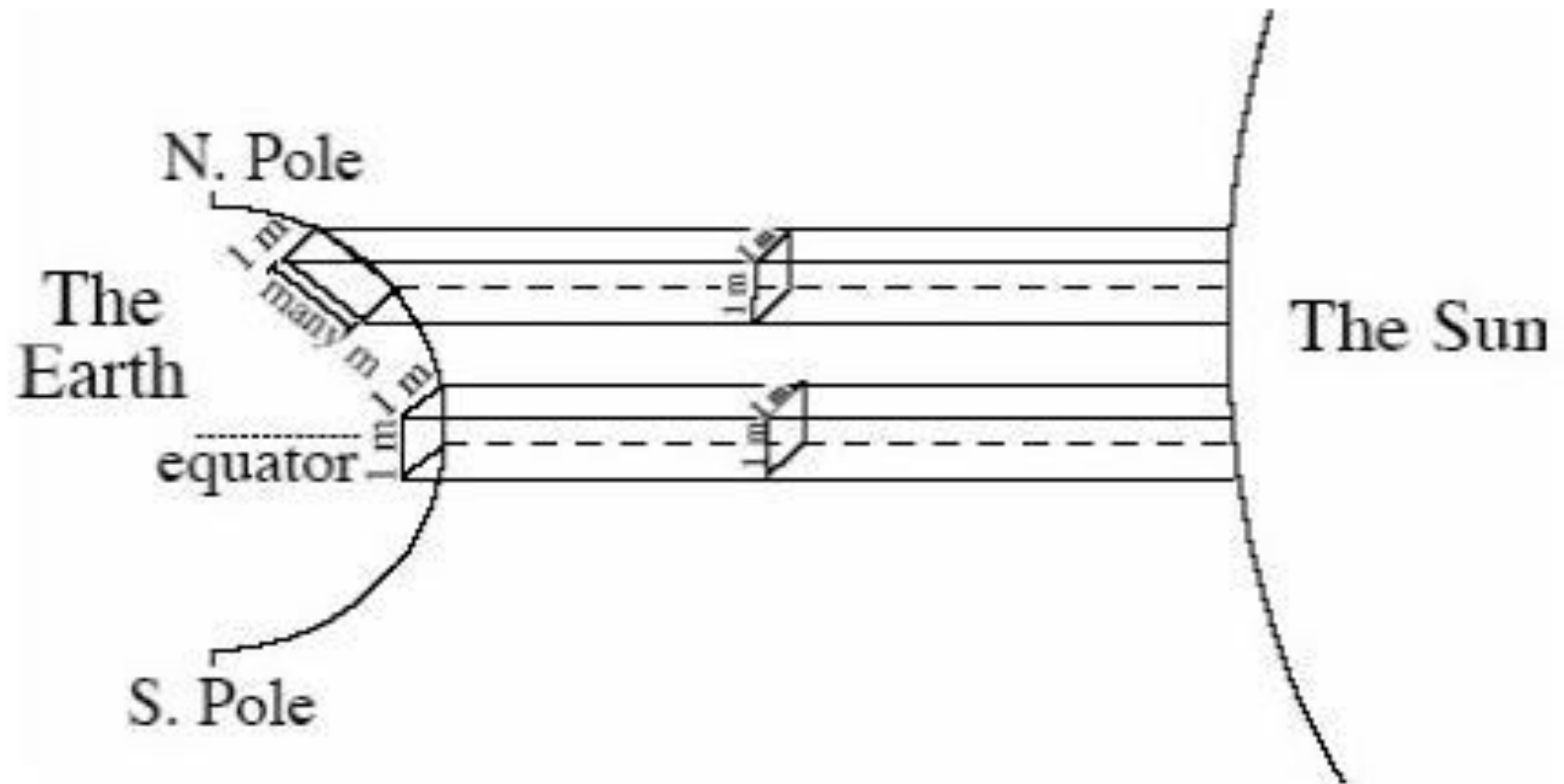
$4\pi R^2$

La energía solar (**ondas cortas**) es parcialmente reflejada y absorbida por la atmósfera pero en su mayoría calienta la superficie terrestre dando lugar a emisión térmica (**ondas largas**)

El Sol y la Tierra como cuerpos negros

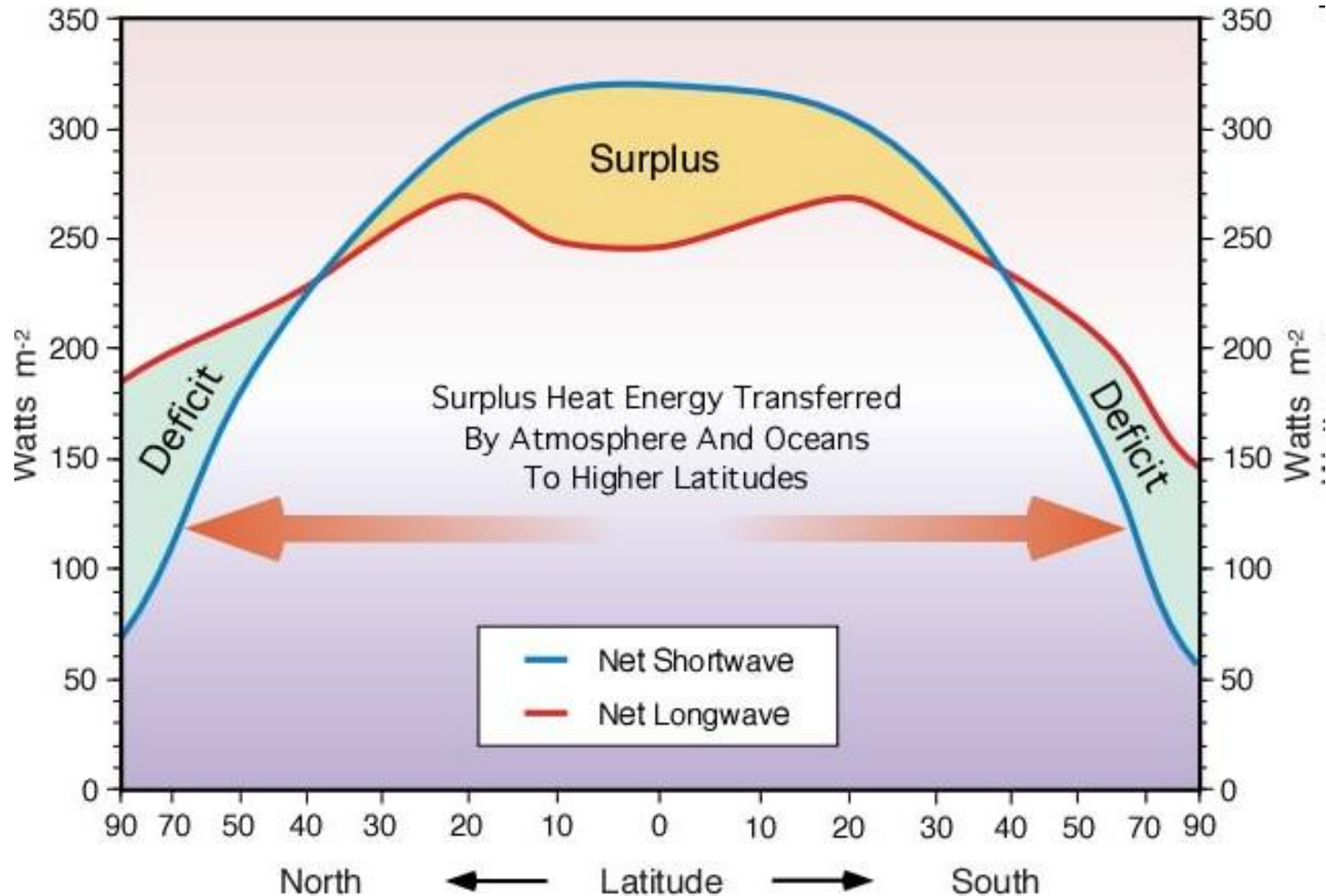


Pero no llega la misma energía a todo el globo...

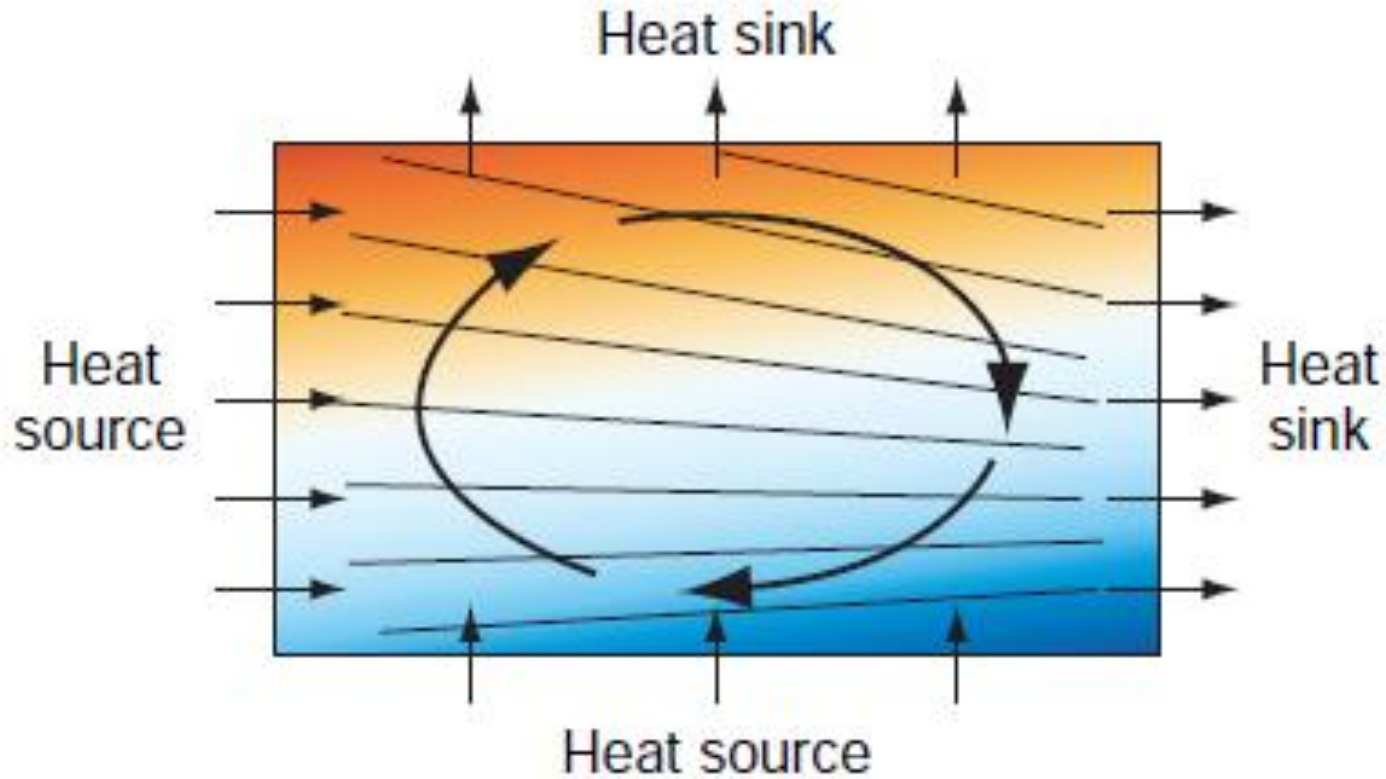


LGK 2011

El calentamiento diferencial entre el ecuador y los polos como motor del movimiento troposférico



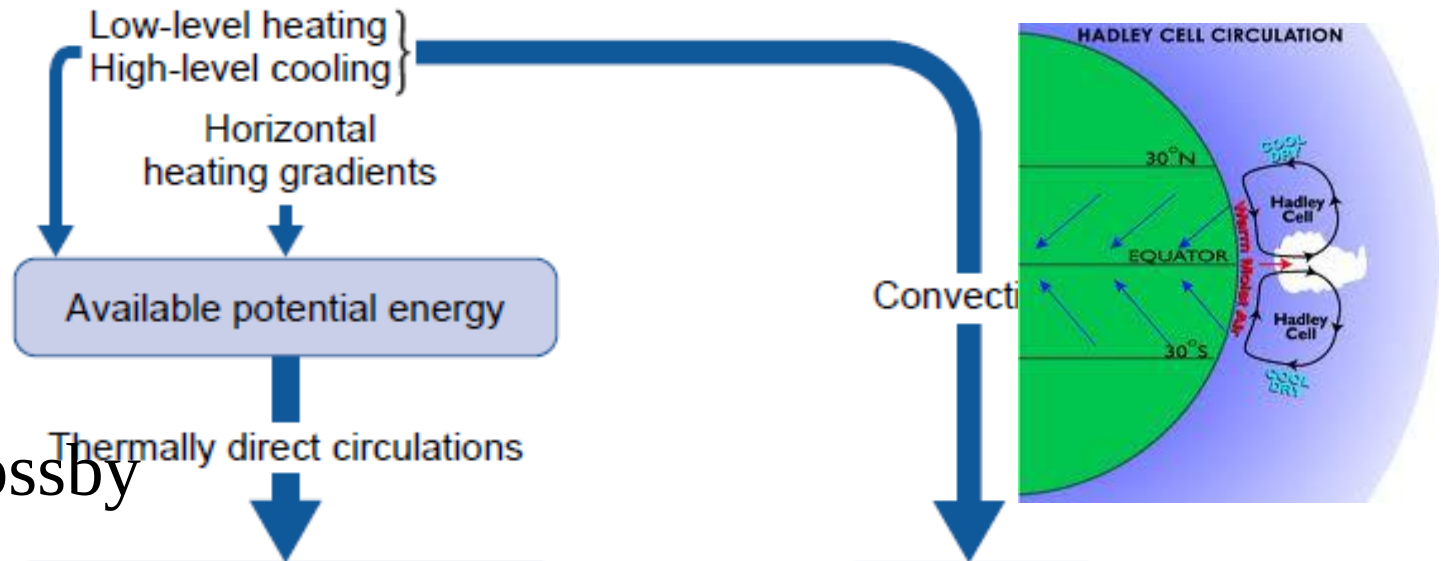
Cómo se mueve el aire: circulación directa



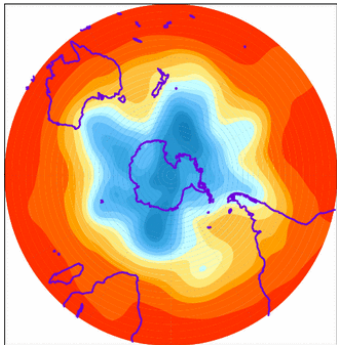
El aire se mueve por diferencias de presión que, a su vez, son generadas por el calentamiento diferencial del aire

La atmósfera como una máquina térmica

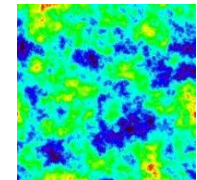
Circulación de Hadley



Ondas de Rossby



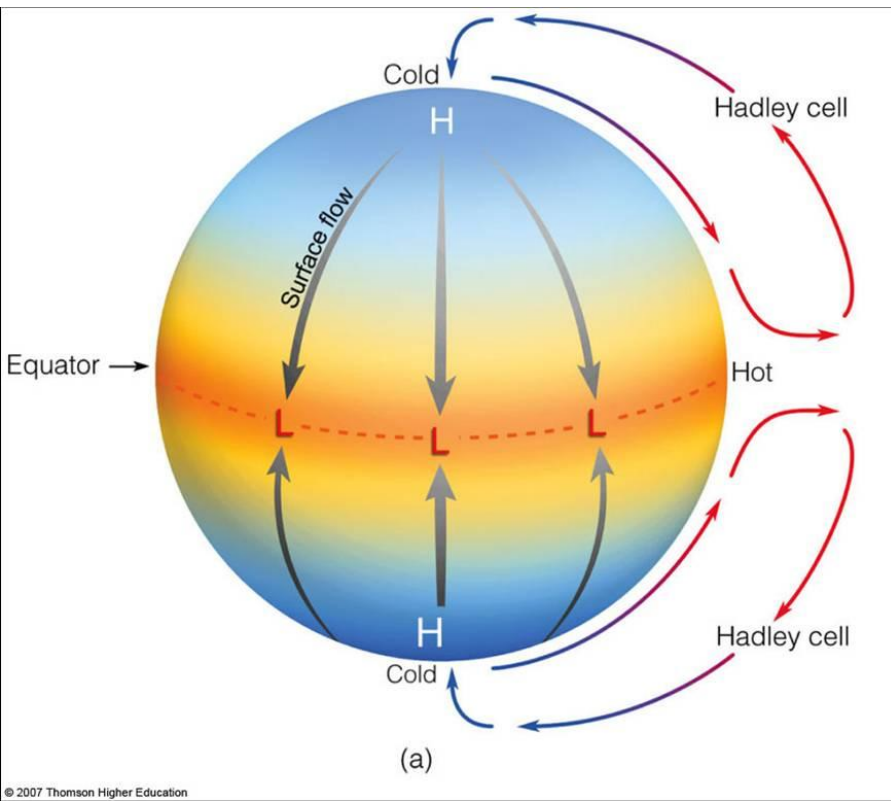
Turbulencia



Kinetic energy
of random
molecular motions

¿Cómo redistribuir la energía?: Circulación General à la George HADLEY (~1735)

Hadley, G. **1735**. Concerning the cause of the general **trade winds**. Phil. Trans. Roy. Soc., 29, 58-62.

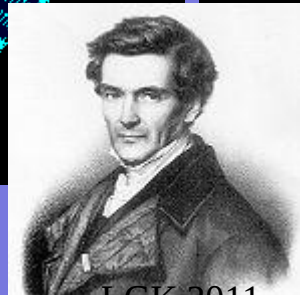
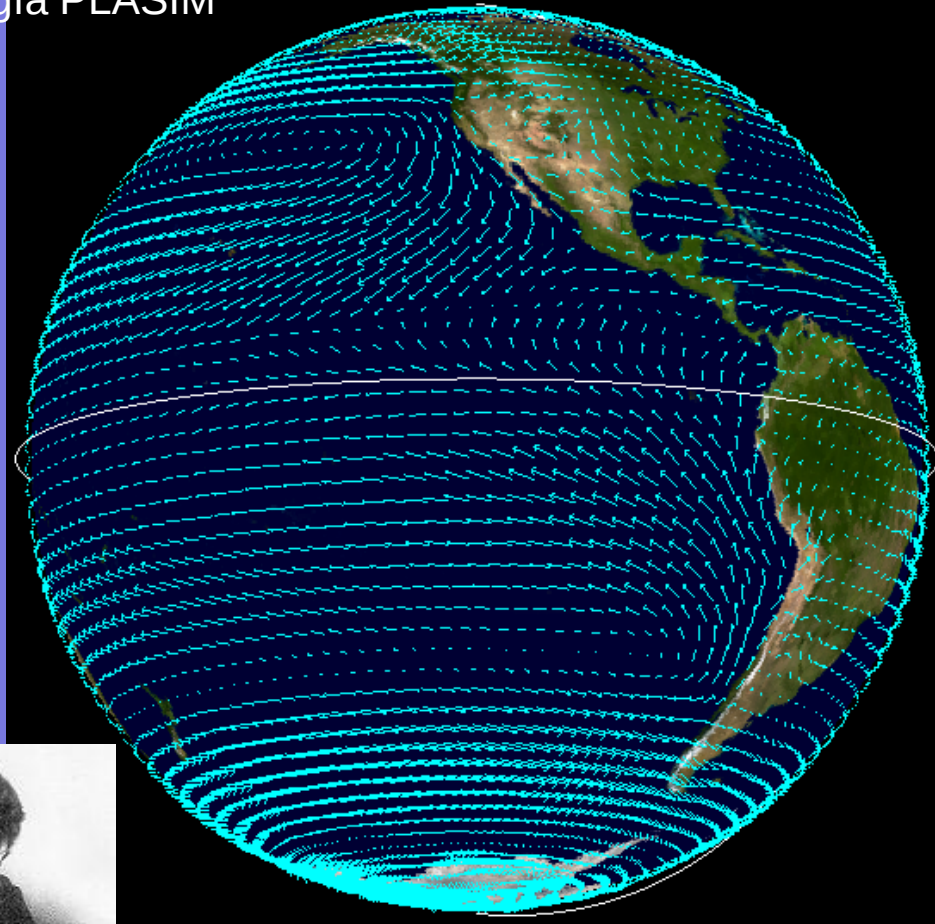
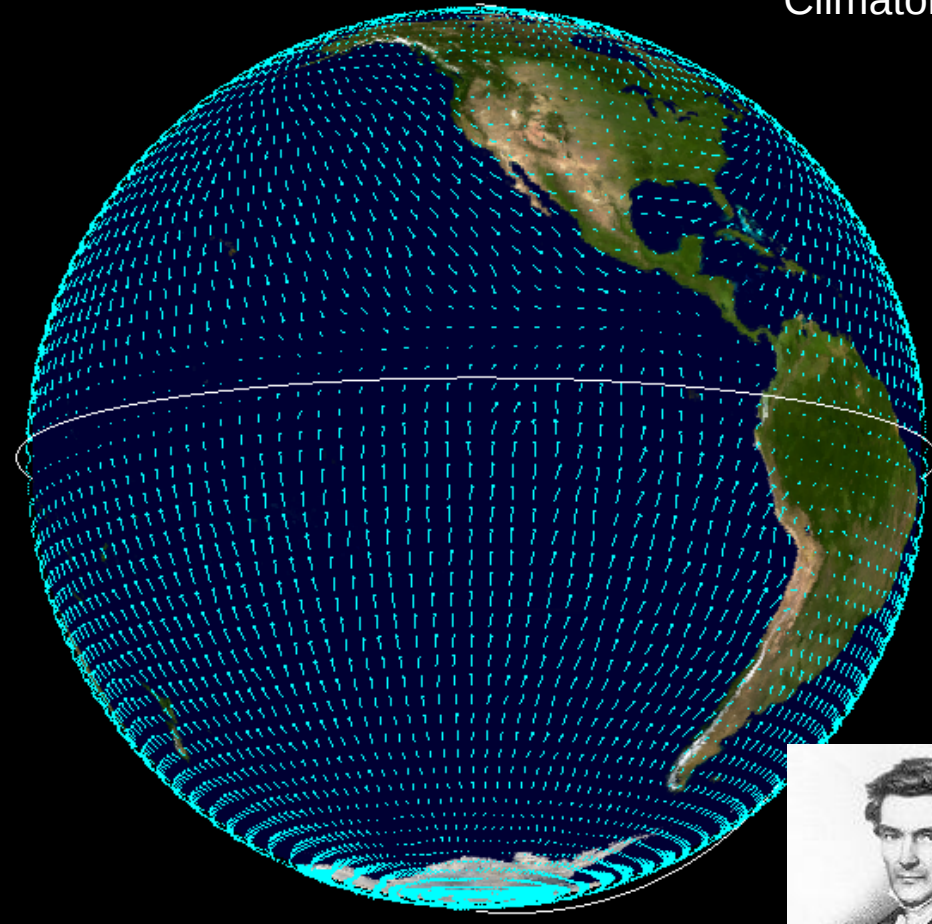


GK 2011

Introducción a la Meteorología – Sist. Latitudes Medias

UCH/FCFM/DGF – R. Garreaud

Vientos a 1000 hPa
Climatología PLASIM

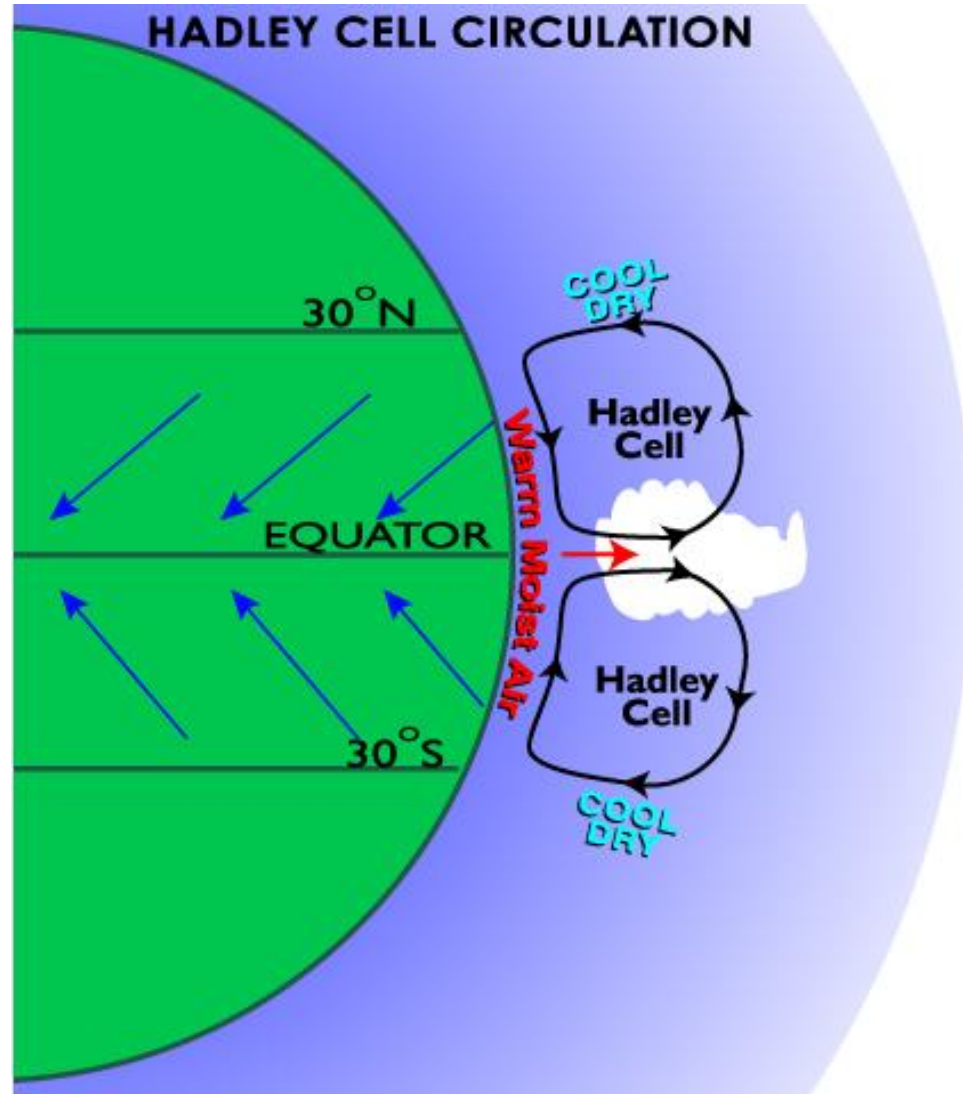


LGK 2011
Gaspard Gustav Coriolis
1792-1843

$$\Omega = \Omega_0 / 100$$

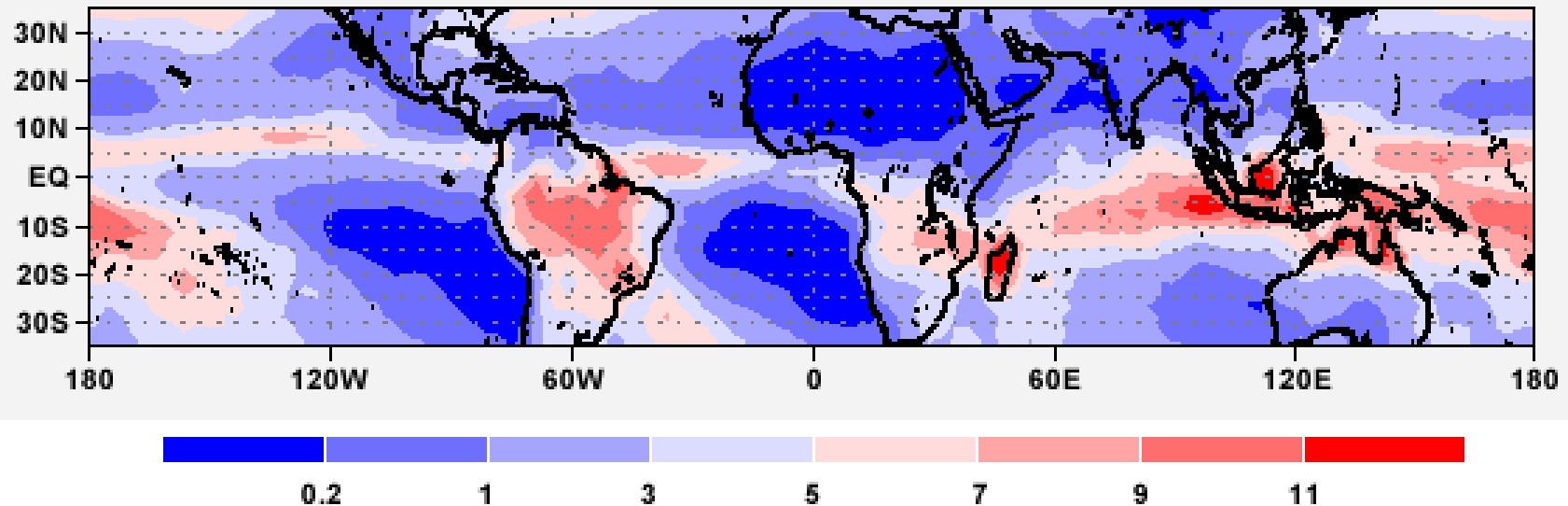
$$\Omega = \Omega_0 = 2\pi / 24 \text{ hrs}^{-1}$$

La rotación terrestre limita la extensión de la circulación de Hadley



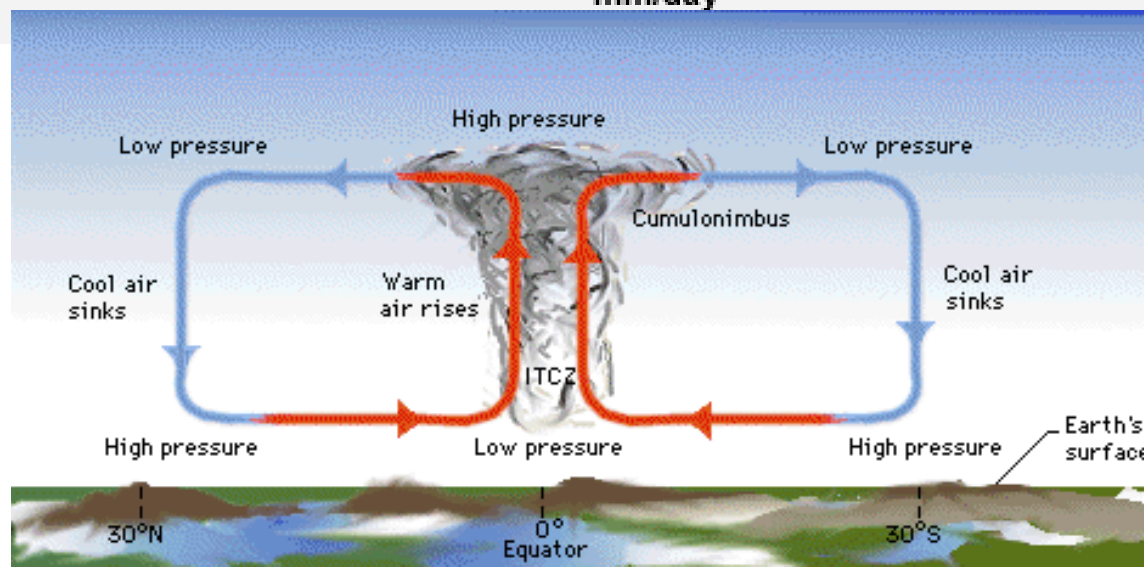
ITCZ...Zona de Convergencia Intertropical

Monthly Mean GPCP Precipitation Rate, Jan 1979 - 2006



mm/day

NOAA NESDIS/NASA

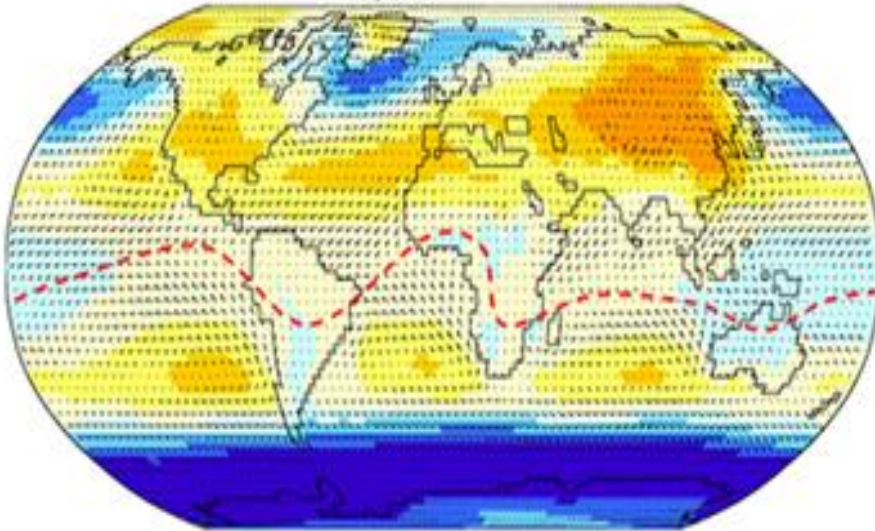


ITCZ...cambia según el sol...y el gradiente de T entre polo y ecuador

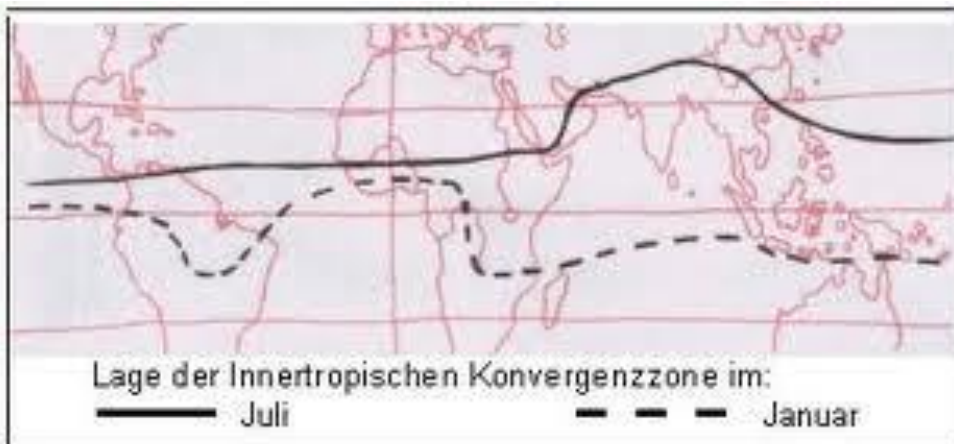
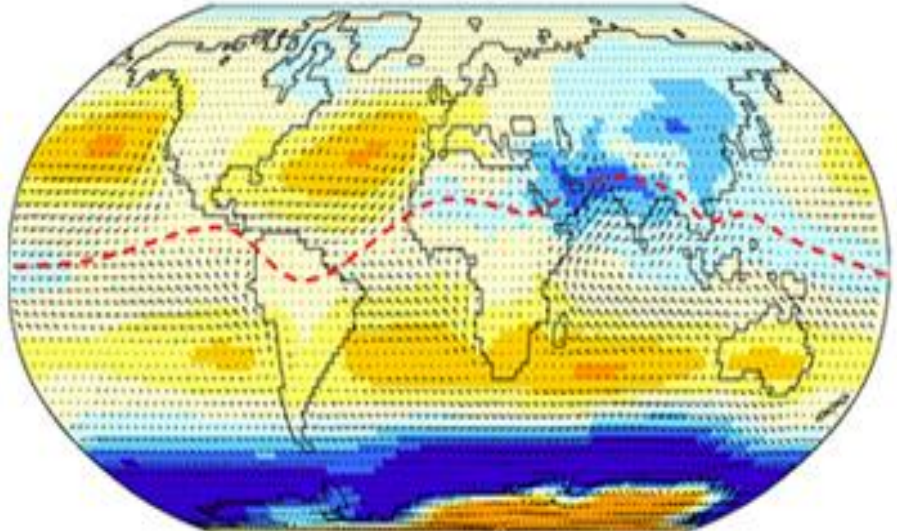
Repeat of Fig. 6.30

Monthly Composites: Sea Level Pressure and Surface Winds

Jan



Jul



015 1020 1025 mb



ect, 1959-1997 Climatologies
sity of Oregon, March 2000

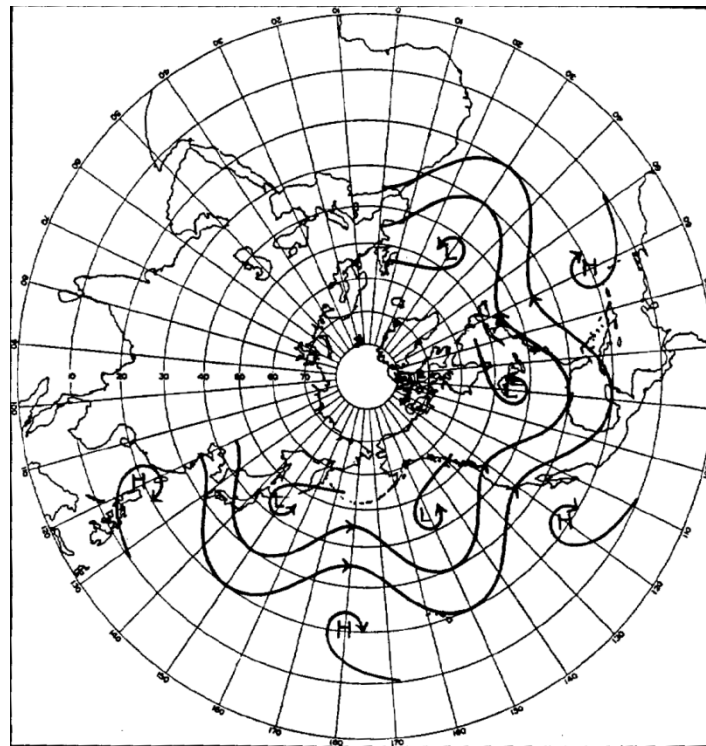
Lage der Innertropischen Konvergenzzone im:

— Juli

- - - Januar

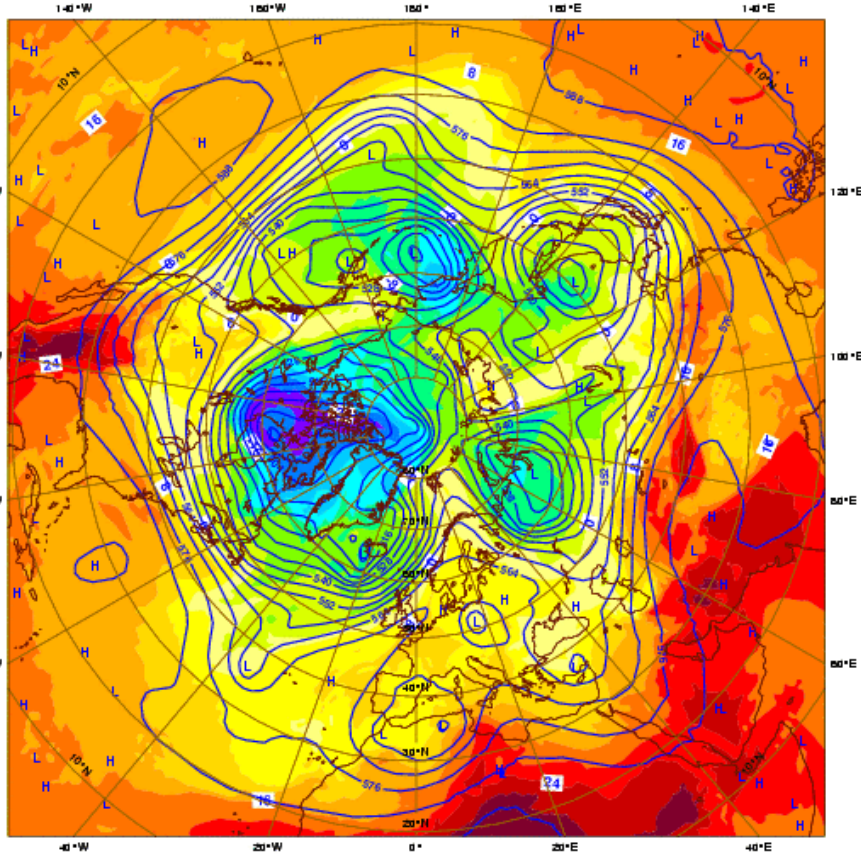
¿Cómo redistribuir la energía?: Circulación General à la Gustav ROSSBY (~1939)

Rossby, C-G., 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere Quart. J. Roy. Meteor. Soc. (suppl), 66, 68-87.

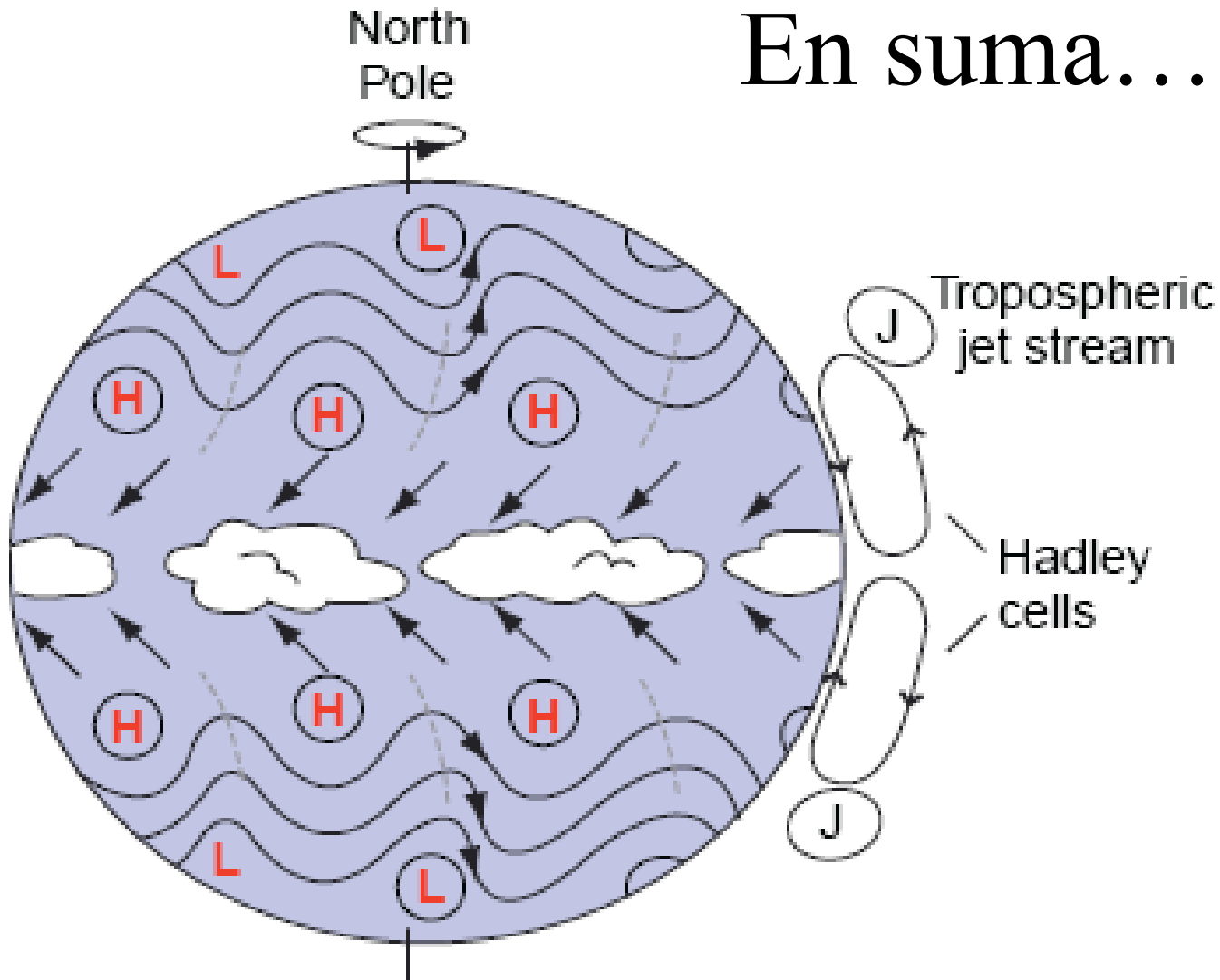


Circulación en latitudes medias y altas

Monday 25 April 2011 00UTC ©ECMWF Analysis t+000 VT: Monday 25 April 2011 00UTC
850 hPa Temperature / 500 hPa Geopotential



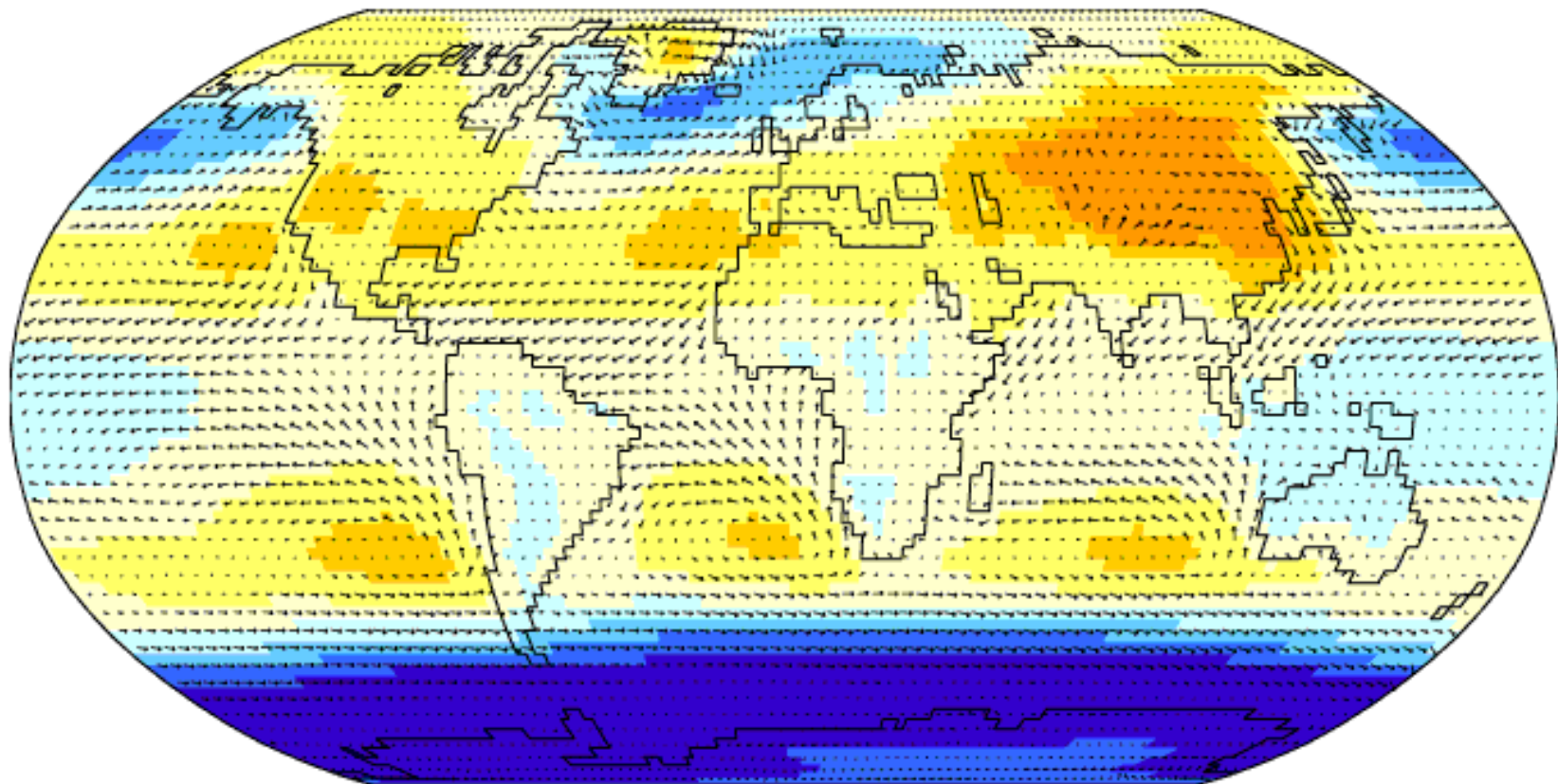
En suma...



Pero océanos y continentes no están uniformemente distribuidos y generan gradientes...

Sea-Level Pressure and Surface Winds

Dec



995 1000 1005 1010 1015 1020 1025 mb



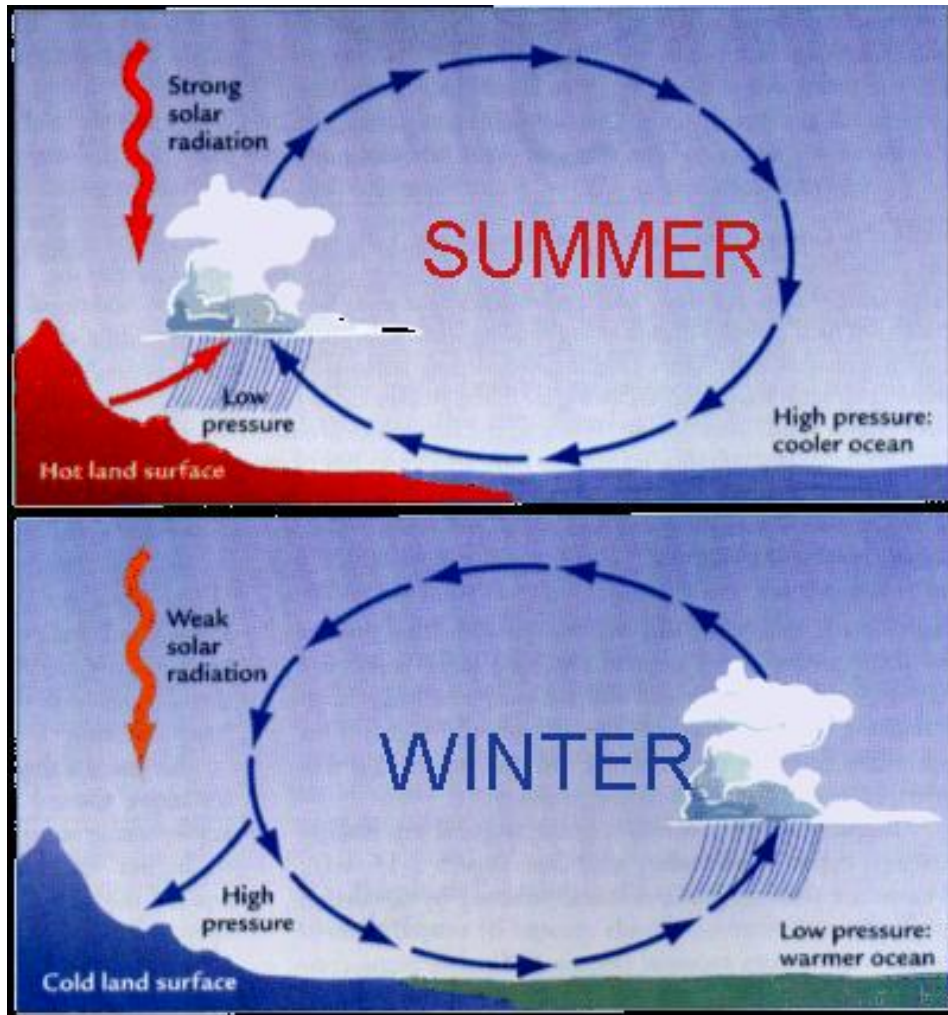
1 2 4 8 16 32 m/sec

Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

LGK 2011

http://www.eoearth.org/article/Global-scale_circulation_of_the_atmosphere

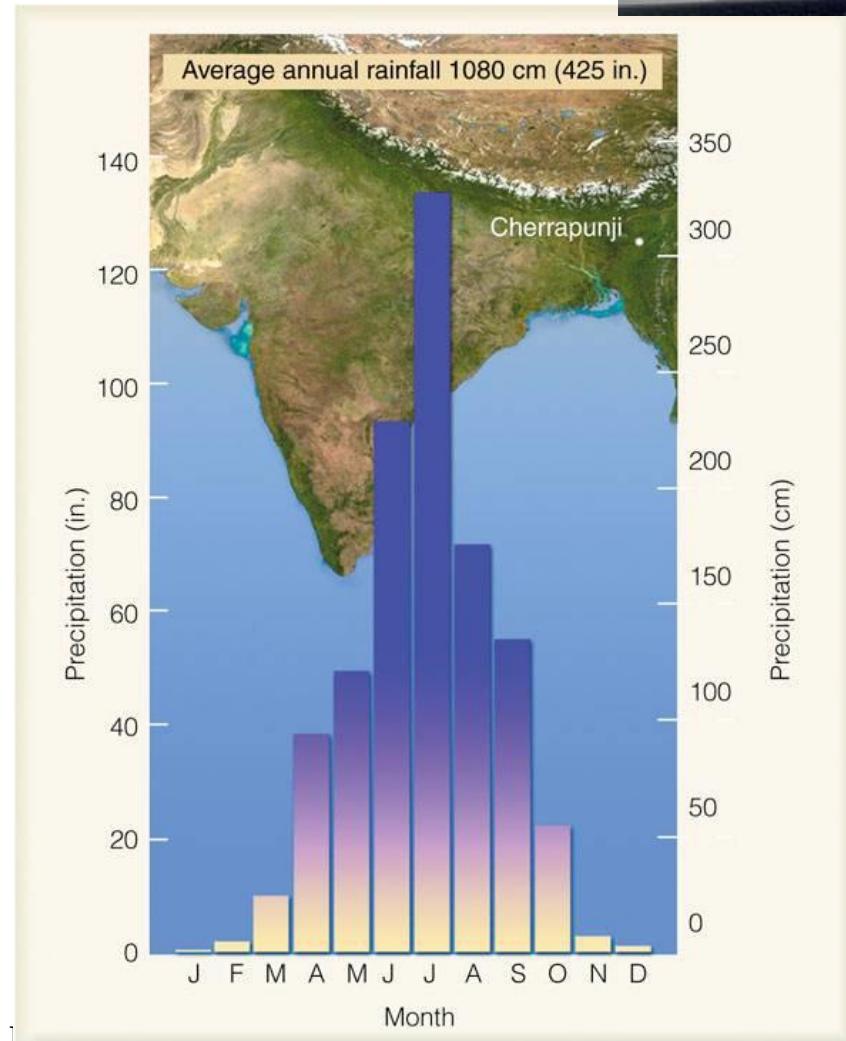
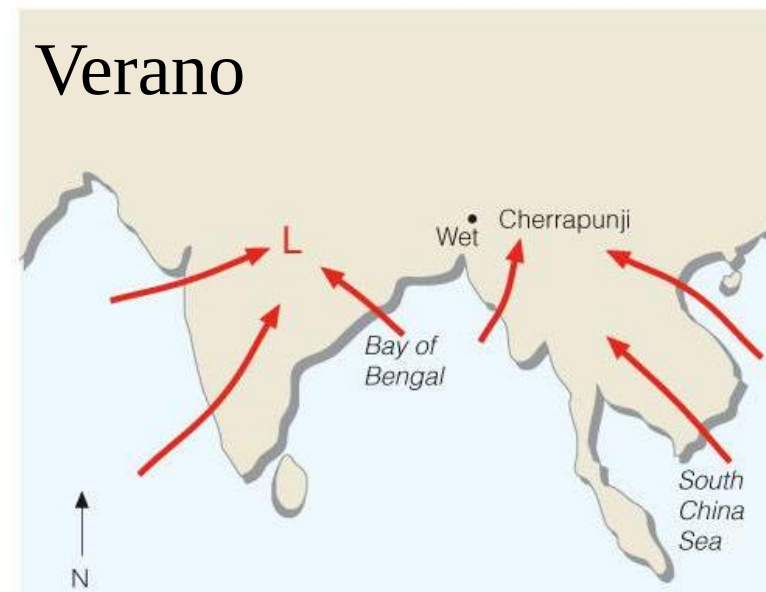
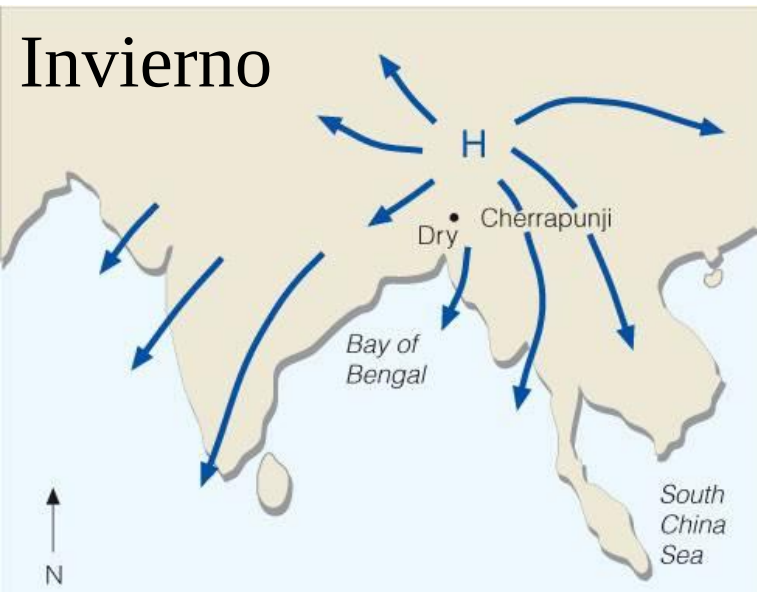
Monsoons



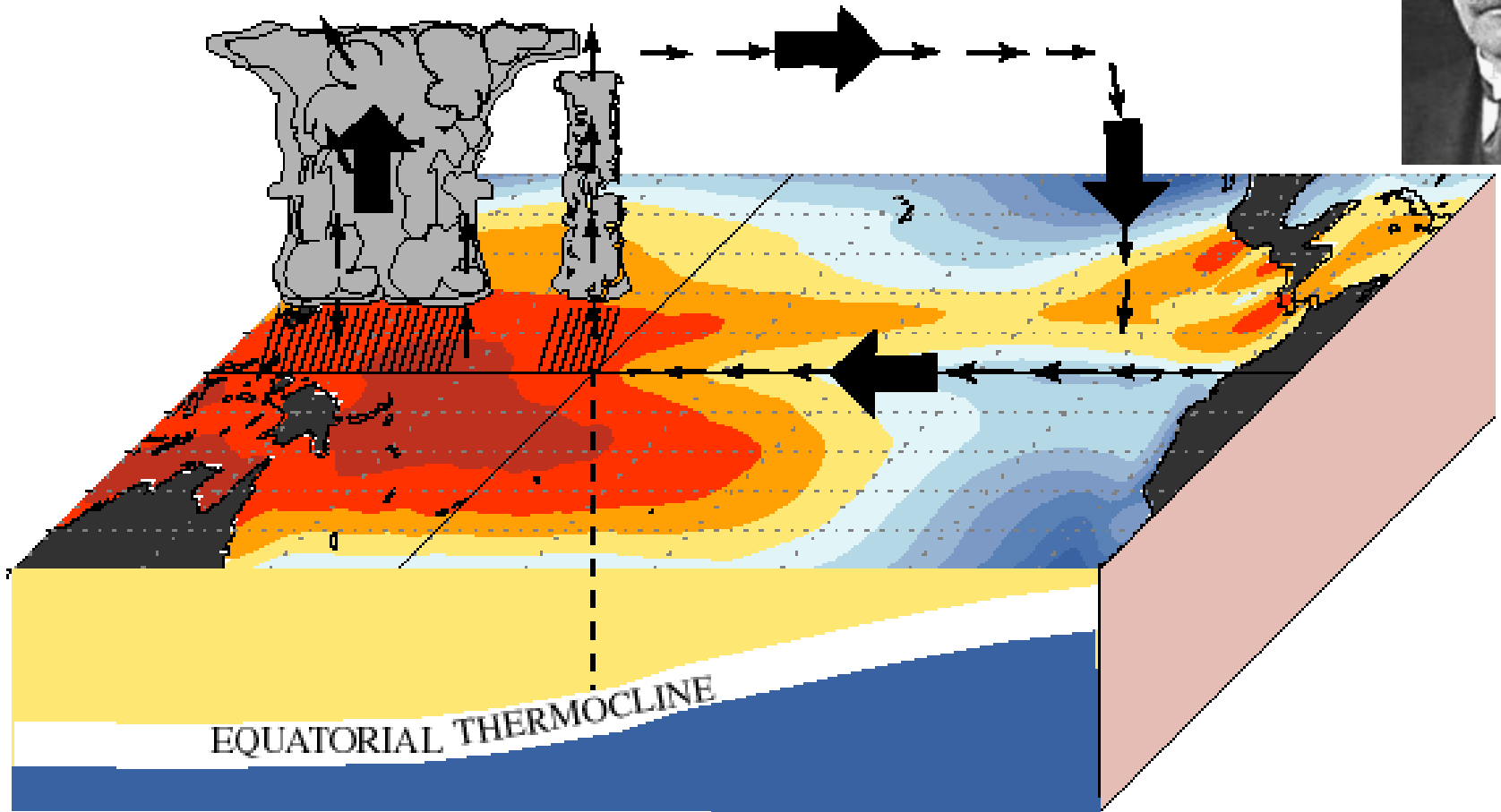
Vientos/precipitaciones estacionales asociados al contraste térmicos entre océano y continentes



Monsón de la India



Circulación de Walker



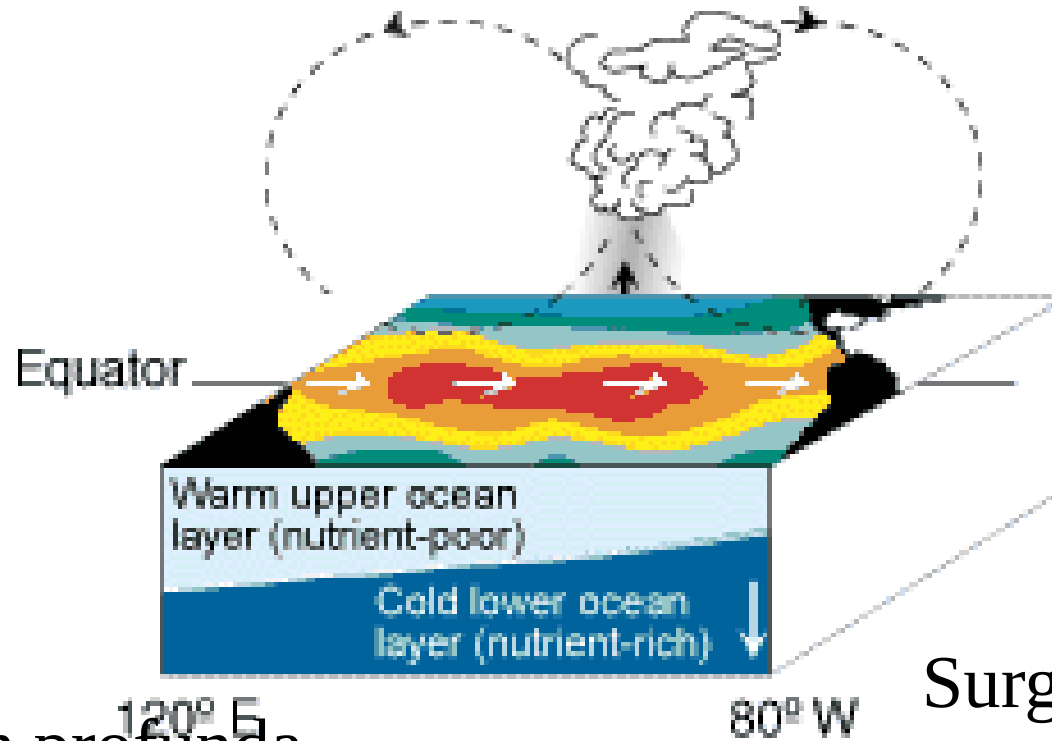
Convección
profunda e intensa

Surgencia de agua
frías y ricas en
nutrientes

LGK 2011

<http://www.srh.noaa.gov/fwd/?n=basics>

Pero cada 2,3, 7 años....El Niño: la circulación de Walker se debilita y...



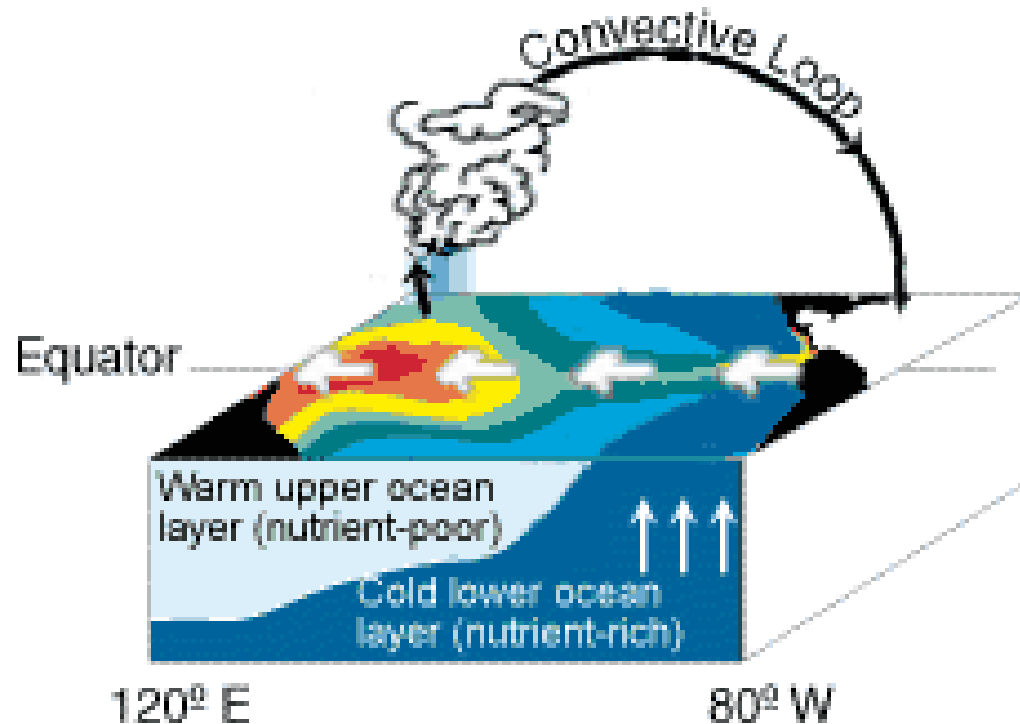
Convección profunda debilitada y corrida al este

Surgencia de agua frías y ricas en nutrientes debilitada...aguas más cálidas y pobres

LGK 2011

<http://www.srh.noaa.gov/fwd/?n=basics>

Pero cada 2,3, 7 años....La Niña: la circulación de Walker se refuerza...



Convección
profunda e
intensa
fortalecida

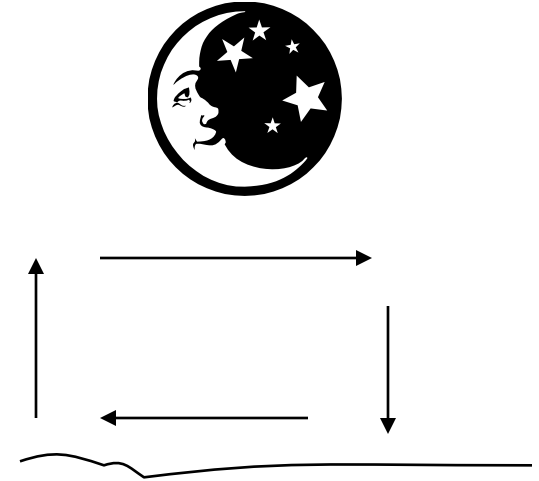
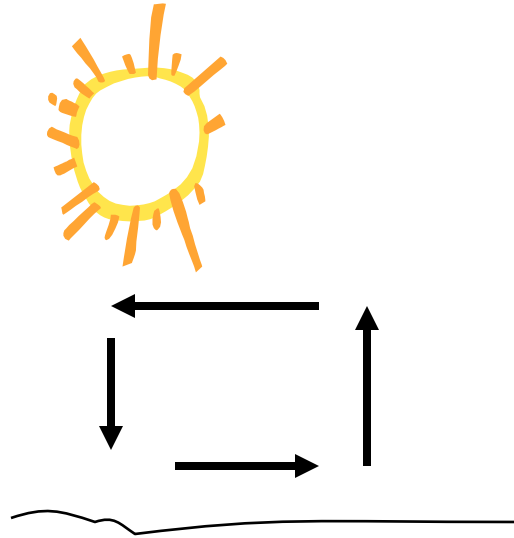
Surgencia de agua
frías y ricas en
nutrientes

LGK 2011

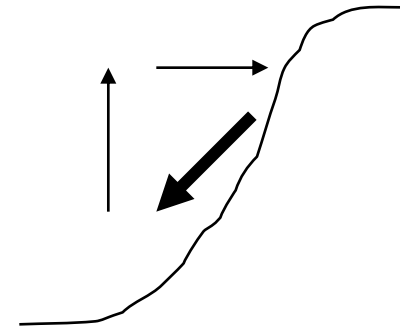
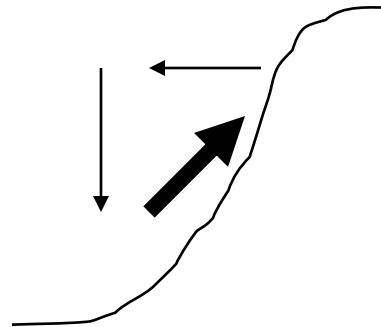
<http://www.srh.noaa.gov/fwd/?n=basics>

Circulaciones de mesoescala

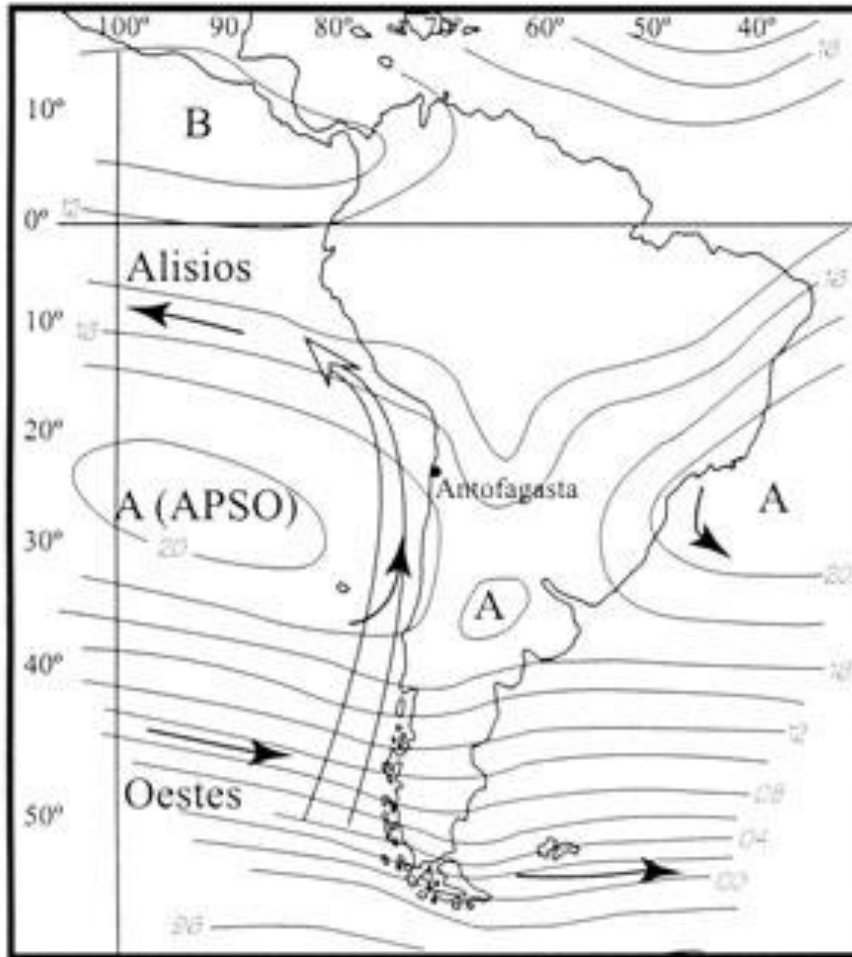
Brisa marina y terral



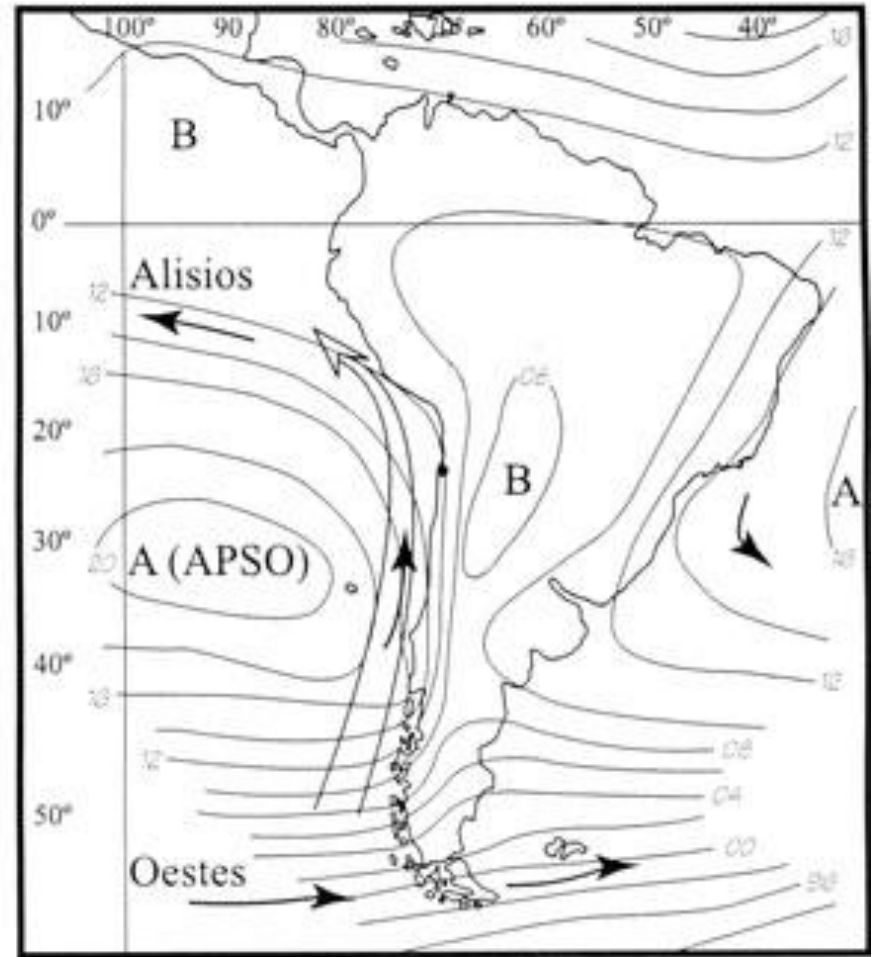
Valle-Montaña



Condición característica



a: Invierno



b: Verano

LGR 2011

Trabajo en grupos



De acuerdo a lo que conoces de la circulación general de la atmósfera:

¿Qué hace que la alta del Pacífico se corra al sur/norte durante el verano/invierno?

¿Qué ocurre entonces con los vientos oestes que prevalecen en el sur de Chile?

¿Cómo cambia lo anterior en un año de El Niño?



Pausa (10 minutos)



En la atmósfera rige la segunda ley de Newton

$$\sum \vec{f} = m\vec{a}$$

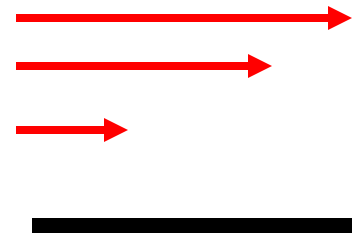
Pero siendo un sistema en rotación, se corrige por Coriolis y por centrífuga:

$$\sum \vec{f} = m(\vec{a} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} - \Omega^2 \vec{r})$$

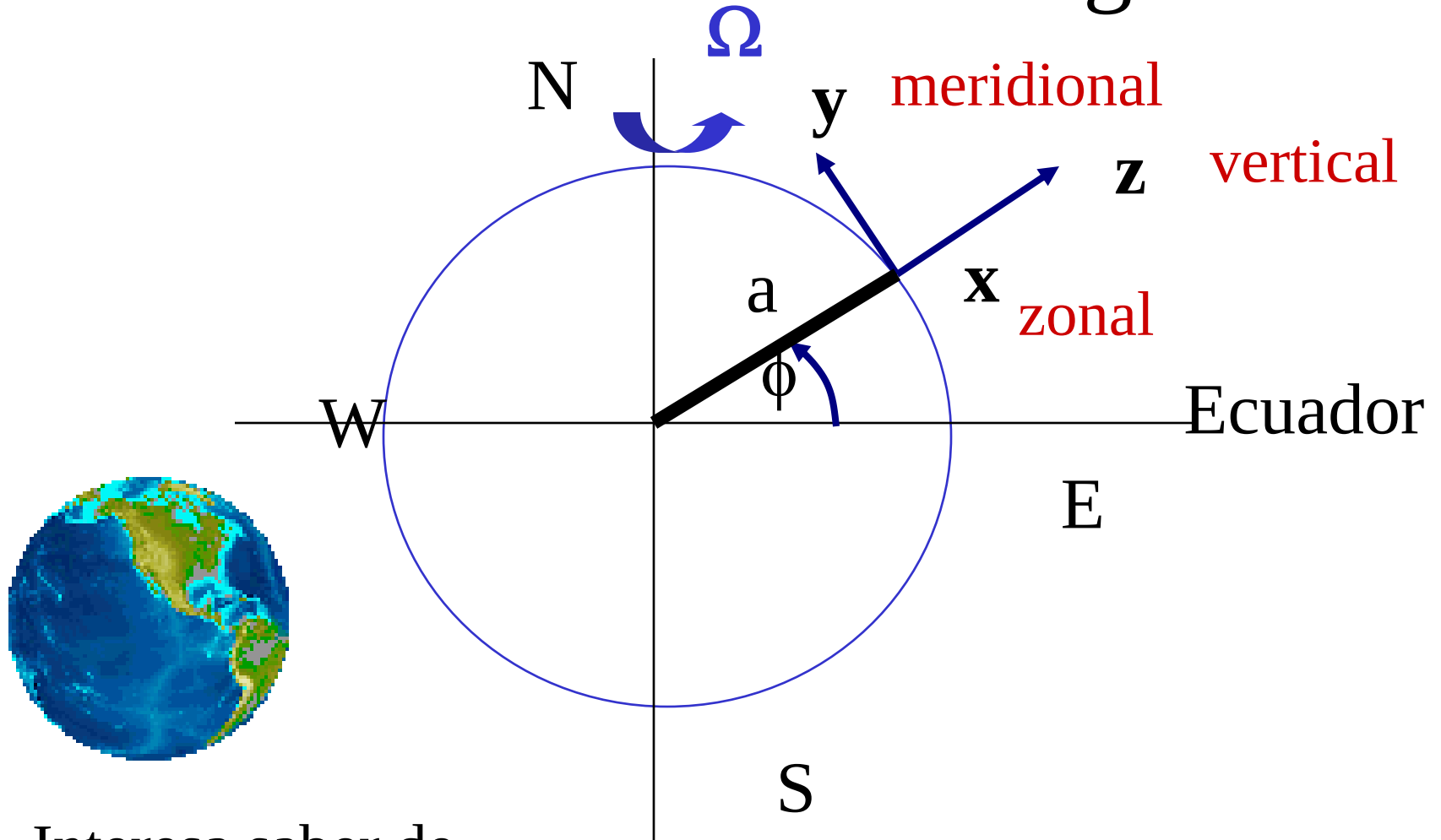
Y además se conservan la masa y la energía

Las fuerzas reales son:

- Gradiente de presión $\frac{F_{\Delta p}}{m} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p$
- Gravitacional $\frac{F_G}{m} = -\frac{GM_{\text{Tierra}}}{r^2} \hat{r} \approx -g \hat{r}$
- Roce, fricción o cizalle



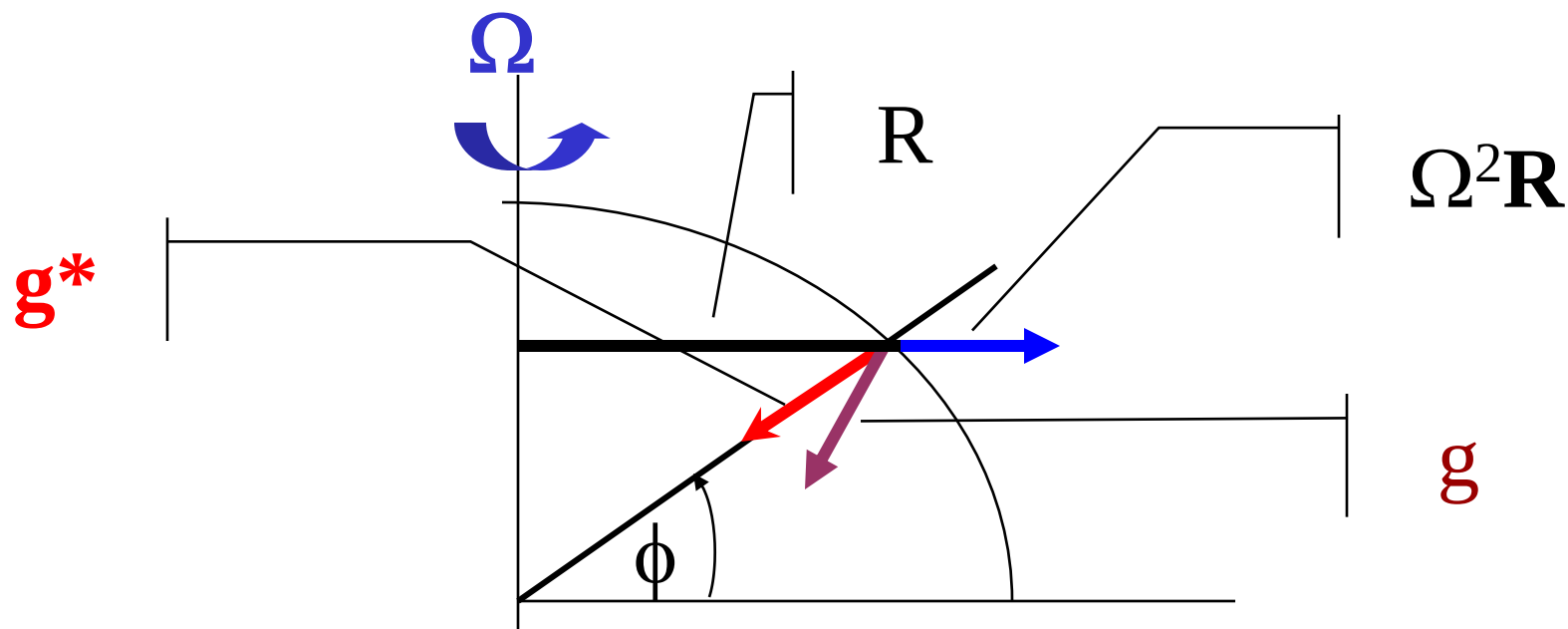
Coordenadas Meteorológicas



NB. Interesa saber de
dónde viene el viento



El efecto centrífugo

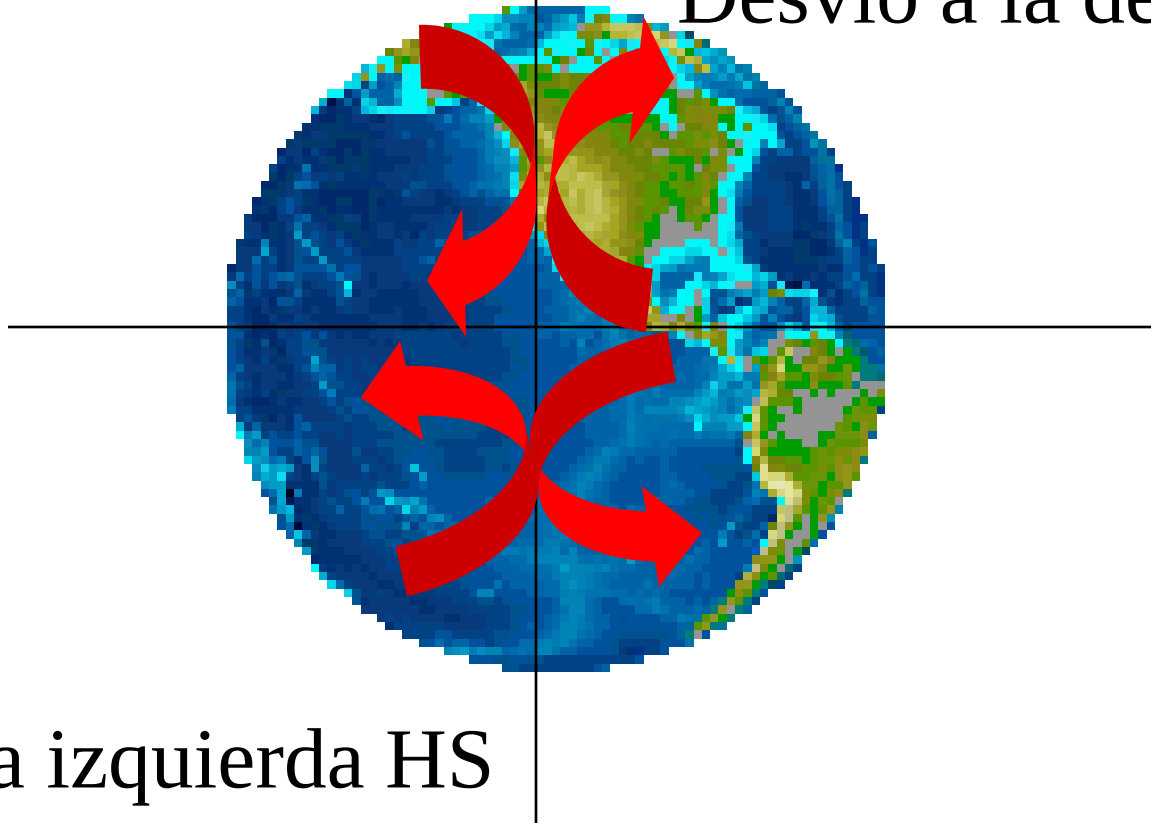


$$\vec{g} = -\frac{GM_{\text{Tierra}}}{r^2} \hat{r} + \Omega^2 \vec{r} = \vec{g}^* + \Omega^2 \vec{R}$$

El efecto de Coriolis

$$\sum \vec{f} = m(\vec{a} + \boxed{2\vec{\Omega} \times \vec{v}} - \Omega^2 \vec{r})$$

Desvío a la derecha HN



Desvío a la izquierda HS

NASA for kids



LGK 2011

http://www.nasa.gov/audience/forstudents/brainbites/nonflash/bb_home_corioliseffect.html

Coriolis Effect...the british way.. Reading University



<http://www.met.reading.ac.uk/users/?usersearch=&staffonly=1>



LGK 2011

<http://www.youtube.com/watch?v=Wda7azMvabE>

Y claro, la energía se conserva...

$$C_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dQ}{dt}, \alpha = \frac{1}{\rho}$$

En un volumen de aire, la energía interna cambia si hay transformación entre energía térmica y mecánica y/o por efectos de radiación, conducción o transf. de calor latente.

Y la masa se conserva...

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \vec{v})$$

Lavoisier, 1789



Ec. de continuidad para el aire

LGK 2011

Conservación del momentum

$$\hat{x} : \frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \varphi}{a} + \frac{uw}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega v \sin \varphi - 2\Omega w \cos \varphi + F_x$$

$$\hat{y} : \frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \varphi}{a} + \frac{vw}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + 2u \sin \varphi + F_y$$

$$\hat{z} : \frac{dw}{dt} + \frac{u^2 + v^2}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + 2\Omega u \cos \varphi + F_z$$

Conservación de la energía

$$C_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = \frac{dQ}{dt}, \alpha = \frac{1}{\rho}$$

Conservación de la masa

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{v}$$

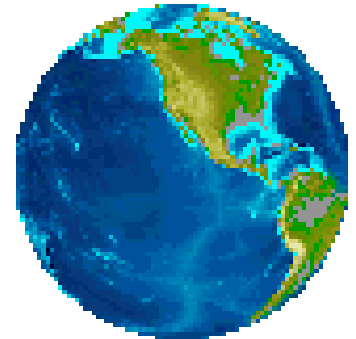
$$\{u, v, w, T, p, \rho\} \quad \forall \quad \{\vec{r}, t\}$$

Ecuación de estado para gas ideal

$$p = \rho R T$$

LGK 2011

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$$



Ecuaciones de Navier-Stokes



Claude-Louis Navier
1785-1836

Newton's second law

$$\frac{D_r u}{Dt} - \frac{uv \tan \phi}{r} - 2\Omega \sin \phi v + \frac{c_{pd} \theta}{r \cos \phi} \frac{\partial \Pi}{\partial \lambda} = - \left(\frac{uw}{r} + 2\Omega \cos \phi w \right) + S^u$$

$$\frac{D_r v}{Dt} + \frac{u^2 \tan \phi}{r} + 2\Omega \sin \phi u + \frac{c_{pd} \theta}{r} \frac{\partial \Pi}{\partial \phi} = - \left(\frac{vw}{r} \right) + S^v$$

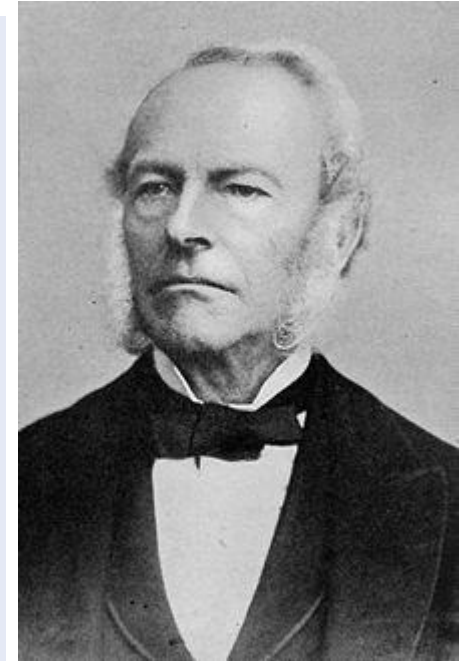
$$\frac{D_r w}{Dt} + c_{pd} \theta \frac{\partial \Pi}{\partial r} + \frac{\partial \Pi}{\partial r} = \left(\frac{u^2 + v^2}{r} \right) + 2\Omega \cos \phi u + S^w$$

mass continuity

$$\frac{D_r}{Dt} \left(\rho_d r^2 \cos \phi \right) + \rho_d r^2 \cos \phi \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{u}{r \cos \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{\partial w}{\partial r} \right] = 0$$

thermodynamics

$$\frac{D_r \theta}{Dt} = S^\theta$$

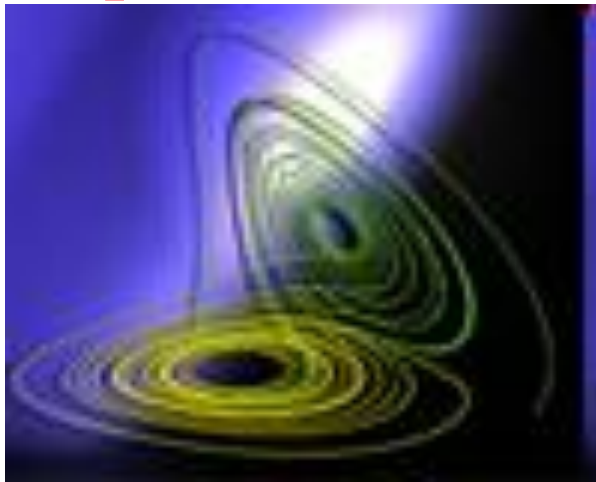


George G. Stokes
1819-1903

No lineales, sin solución analítica....caóticas

Las ecuaciones que describen la evolución del estado atmosférico son integrables en el tiempo si se conocen las CI y CB pero:

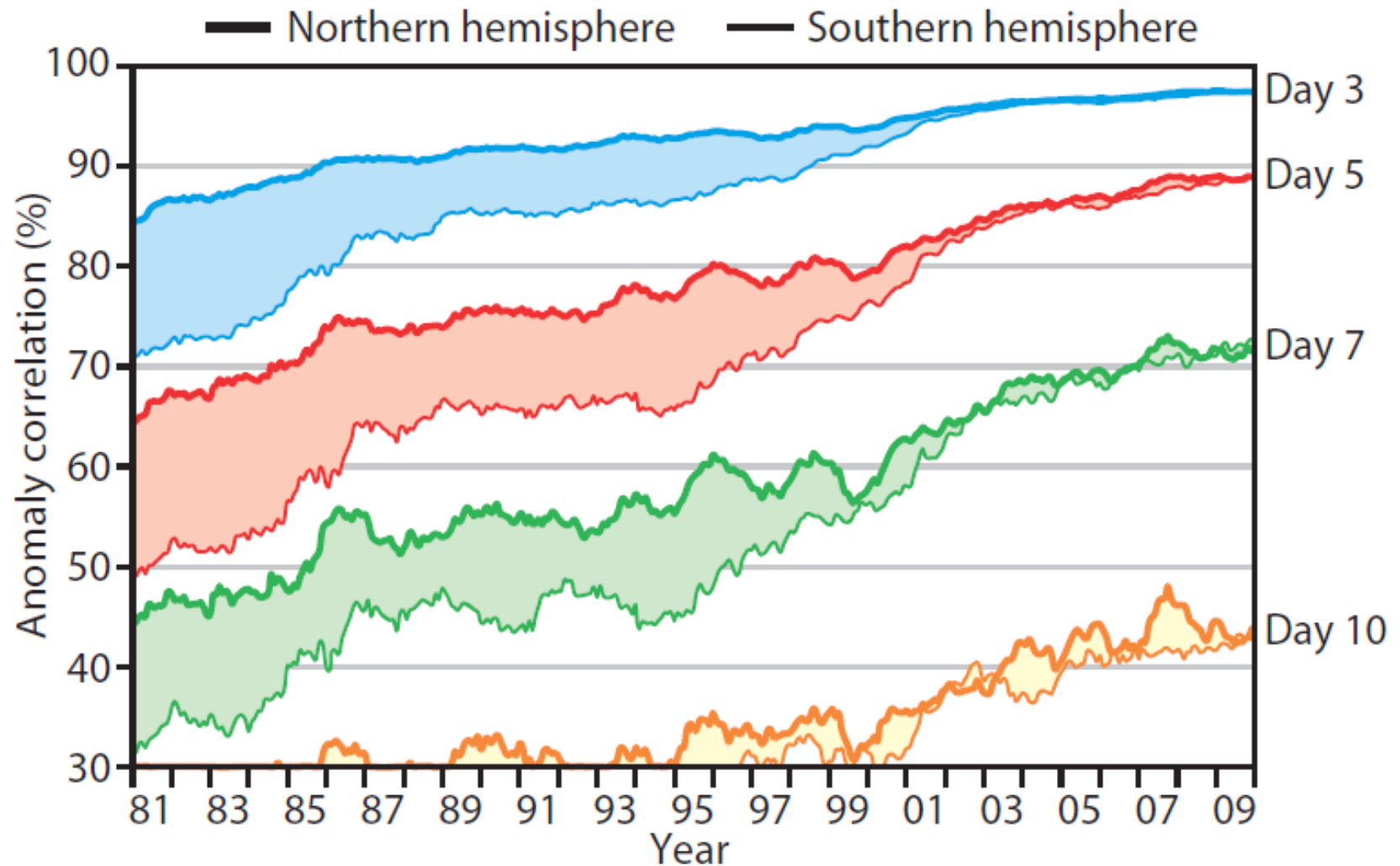
- El sistema es caótico y por ello los errores (en las CI) se propagan y crecen limitando la predictabilidad



<http://www.ecmwf.int/research/predictability/>

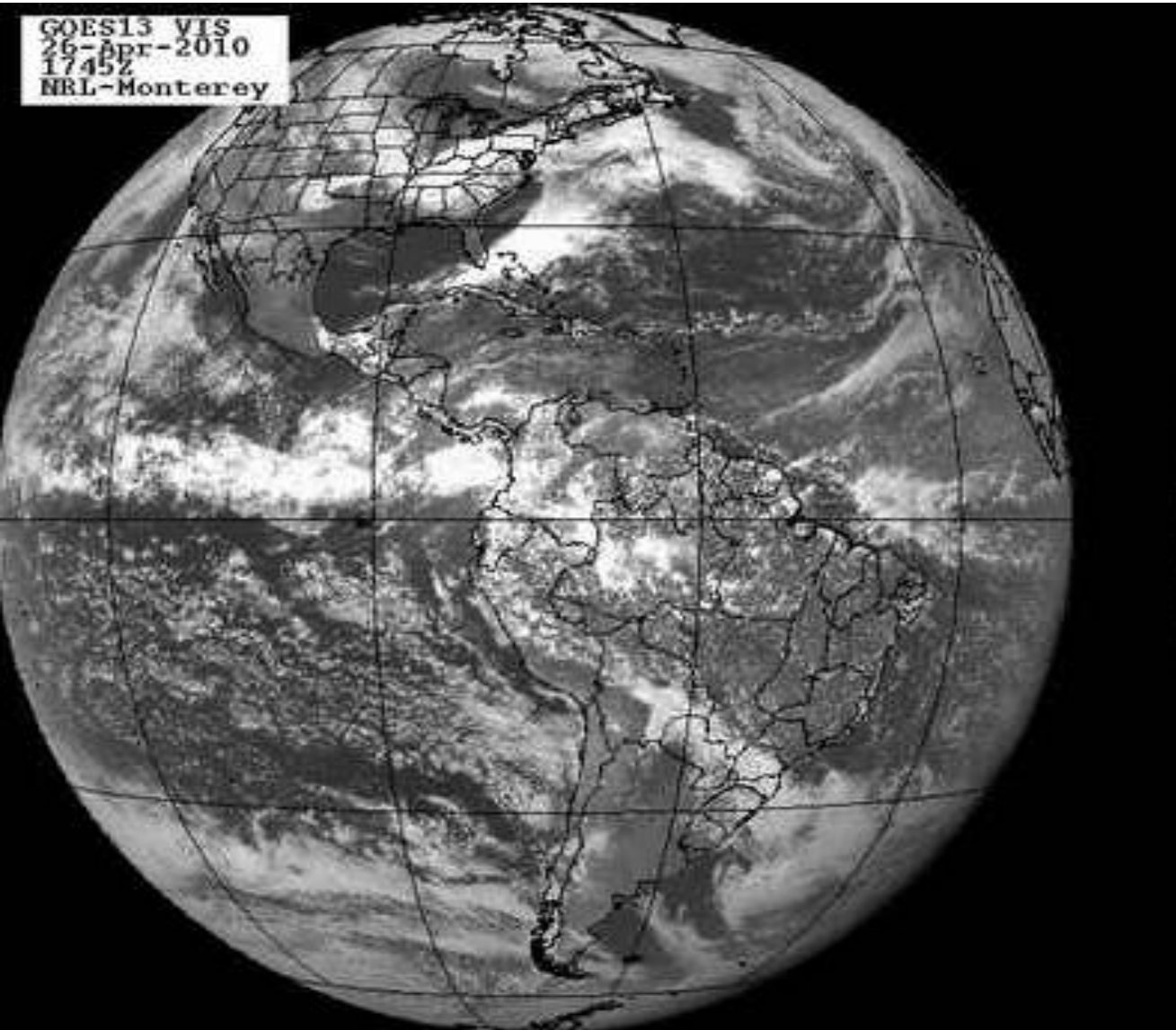
LGK 2011

Evolution of Forecasting Accuracy



LGK 2011

Escala sinóptica



$U \sim 10 \text{ m/s}$; $W \sim 1$
 cm/s ;
 $L \sim 10^6 \text{ m}$; $D \sim 10^4$
 m ;
 $\Delta P / \rho \sim 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$
 $\Omega \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Aproximación geostrófica...

escala sinóptica

$$\hat{x} : \frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \varphi}{a} + \frac{uw}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega v \sin \varphi - 2\Omega w \cos \varphi$$

$$\frac{U}{L/U} - \frac{UU}{a} + \frac{UW}{a} = \frac{\Delta P}{\rho L} + fU - fW$$

$$10^{-4} \quad 10^{-5} \quad 10^{-8} \quad 10^{-3} \quad 10^{-3} \quad 10^{-6}$$

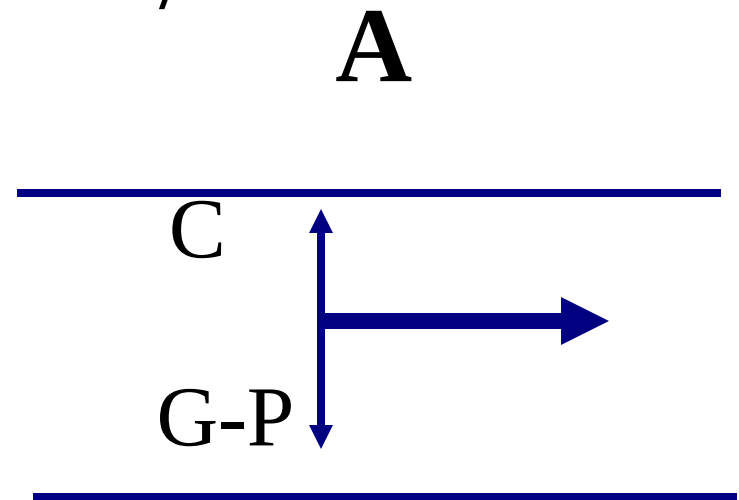
$$\hat{x} : -fv \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad f = 2\Omega \sin \varphi$$

Aproximación geostrófica

$$\hat{x} : -fv \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad f = 2\Omega \sin \varphi$$

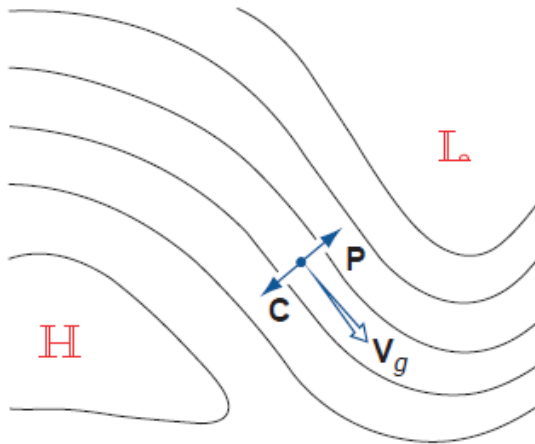
$$\hat{y} : fu \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\vec{v}_g = \frac{1}{\rho f} \hat{z} \times \nabla p$$



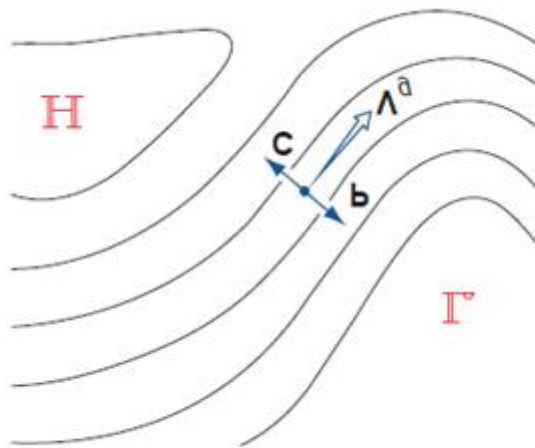
Vale en ausencia de
fricción y curvatura con
un 10-15% de error

Viento geostrófico en HS y HN

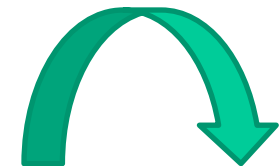


Circulación ciclónica

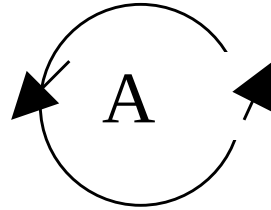
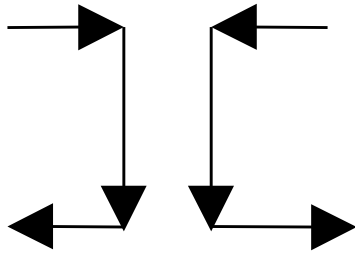
HN: $f > 0$



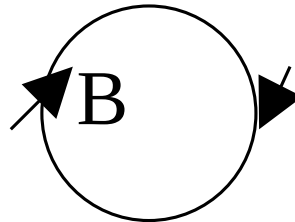
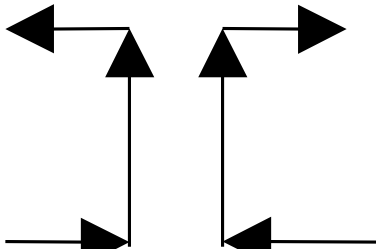
HS: $f < 0$



Circulación ciclónica



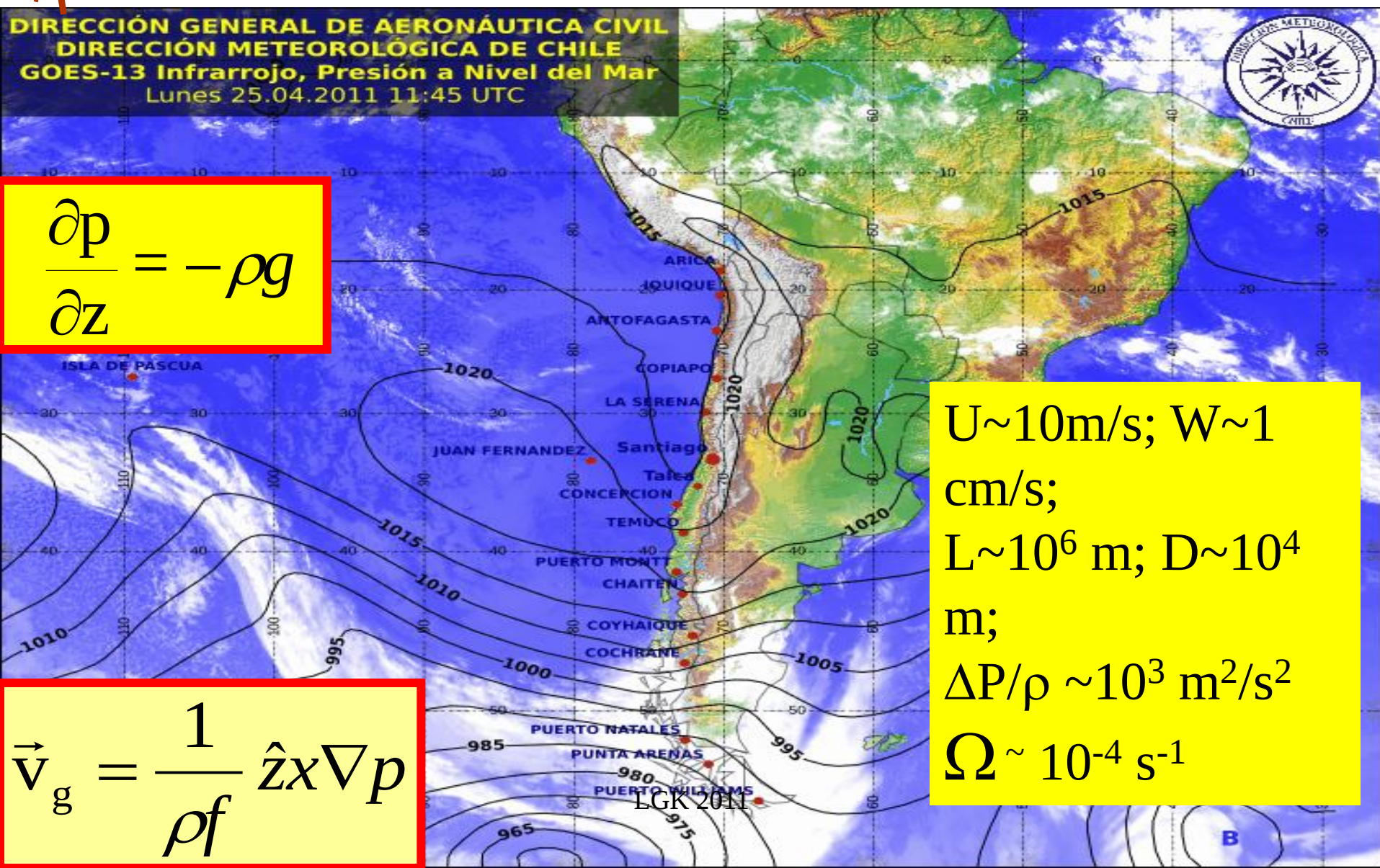
Alta (HS)
Circulación
anticiclónica



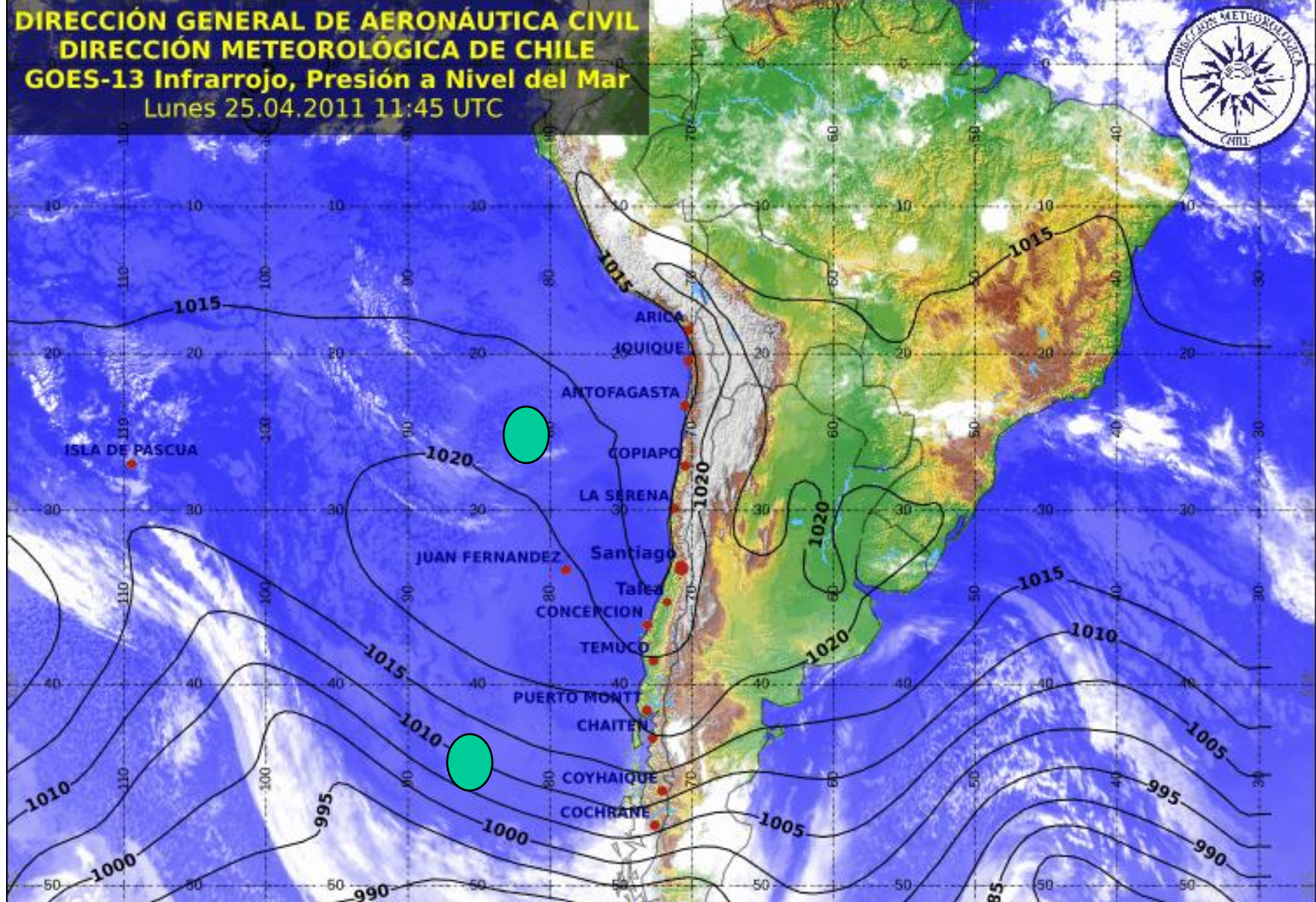
Baja (HS)
Circulación
ciclónica



Escala sinóptica: valen los balances hidrostático y geostrófico



DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL
DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
GOES-13 Infrarrojo, Presión a Nivel del Mar
Lunes 25.04.2011 11:45 UTC

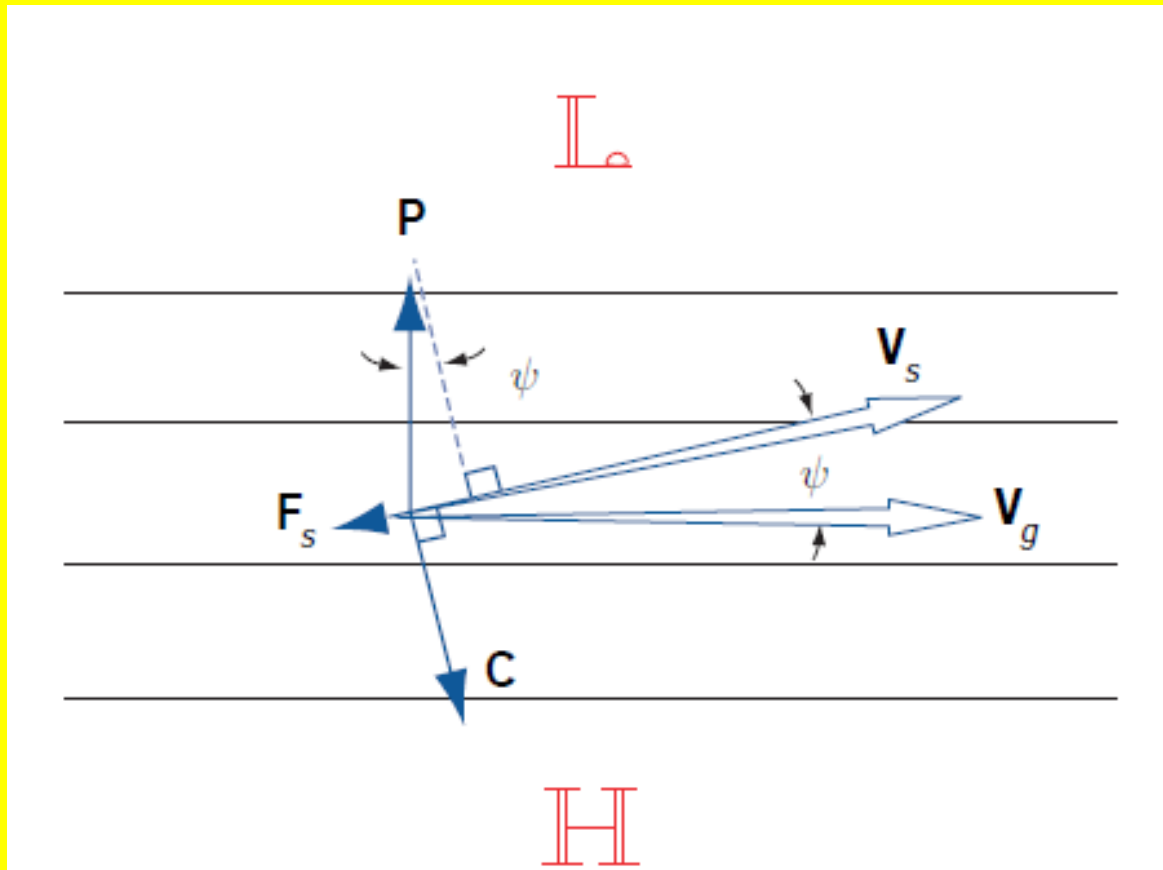


¿Hacia dónde? ¿Dónde sopla más fuerte el viento?

LGK 2011

¿Cómo se llenan las bajas?

(Un efecto de la fricción en la superficie)



Próximamente

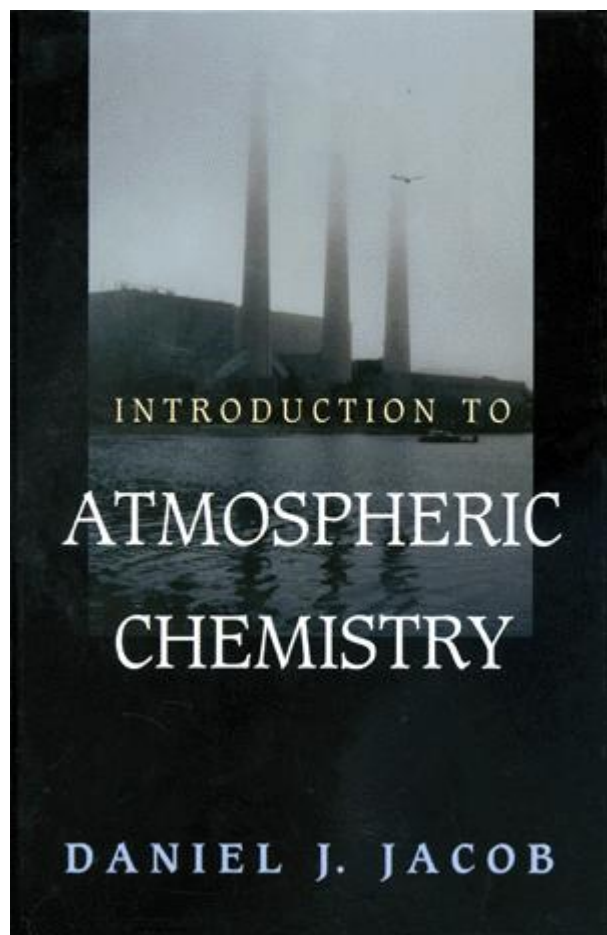
- Mezcla y transporte vertical



- ¿Cómo se hace un pronóstico del tiempo?



Lectura Obligatoria



- Capítulo 4.1 & 4.2:
Atmospheric transport
- <http://acmg.seas.harvard.edu/people/faculty/djj/book/index.html>