

Meteorología Aplicada a la Contaminación Atmosférica

Ana Maria Cordova L.
Departamento de Meteorología
Universidad de Valparaíso



- Conceptos generales y factores meteorológicos de la contaminación atmosférica
- Temas específicos y aplicaciones



Aplicaciones de la meteorología en problemas de Contaminación Atmosférica



Diagnóstico:

- distinguir causas
- evaluar impacto de medidas de control

Pronóstico:

- manejo de episodios
- estudios de impacto

Comprensión del problema:

- no “resuelve” el problema
- elimina soluciones inefectivas
- ayuda en el manejo del problema

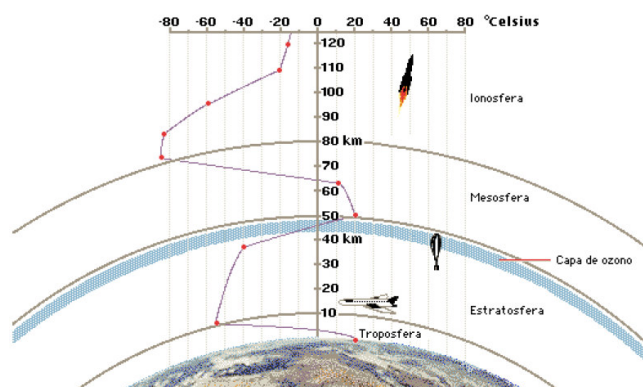


Conceptos generales de Meteorología y Clima



- Qué es la atmósfera?
- Cómo se mueve la atmósfera
- Balance energético de la atmósfera

Que es la atmósfera?



El 90% de la masa atmosférica se encuentra bajo los 10-15 Km.

Capas de la atmósfera



ALTURA	CAPAS	FENOMENOS
De 1.000 km en adelante	EXOSFERA	Vacío casi absoluto. Zona de circulación de satélites geofísicos.
De 400 a 1.000 km.	MESOSFERA	Producción de iones. Transformación de los rayos cósmicos primarios en secundarios.
De 80 a 400 km.	IONOSFERA	Producción de iones. Capas electrizadas. Reflejan ondas radio. Auroras y bólidos.
De 25 a 80 km.	QUIMIOSFERA	Reacciones químicas. Presencia de capa de ozono. Filtro de la radiación ultravioleta.
De 10 a 25 km.	ESTRATOSFERA	Aire prácticamente en calma. Nubes irisadas.
De 0 a 10 km.	TROPOSFERA	Fenómenos meteorológicos: nubes, vientos, lluvia, etc.

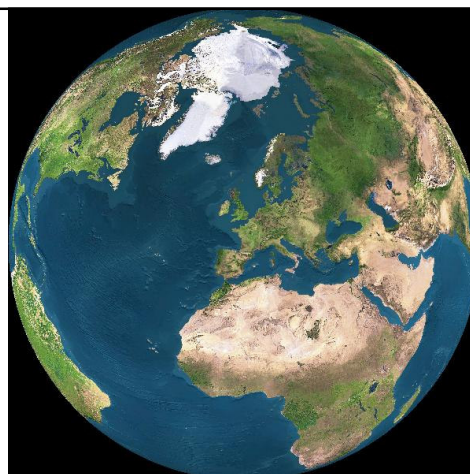
Capa Limite



- Esta dentro de la troposfera y es la capa mas cercana al suelo. Ocurre la mayor parte de los problemas de contaminación atmosférica.
- Su altura varia en el tiempo, tiene un ciclo diario y estacional
 - Ejemplo . Santiago
 - Verano 1000 m
 - Invierno 300m

▲ 70% de la Tierra esta cubierta por océanos;

▲ 30% cubierta por tierra



Sin la atmósfera y sin los gases de efecto invernadero la temperatura de la Tierra sería de -18°C en lugar de 15°C .

Composición Química de la Atmósfera



- Unidades: Densidad expresada en Kg/m^3 o partículas/ cm^3
- Razón de mezcla de masa (Kg de la especie por Kg de aire) y razón de mezcla en volumen (moléculas de la especie por molécula de aire)
- $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$
- $1 \text{ ppb} = 10^{-9}$
- $1 \text{ ppt} = 10^{-12}$

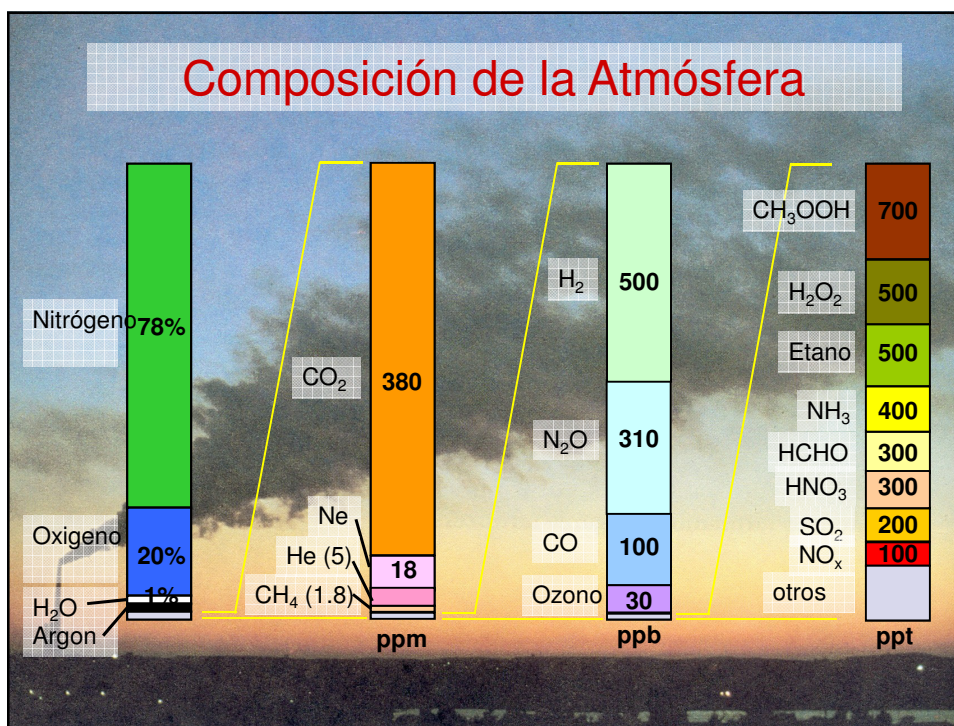
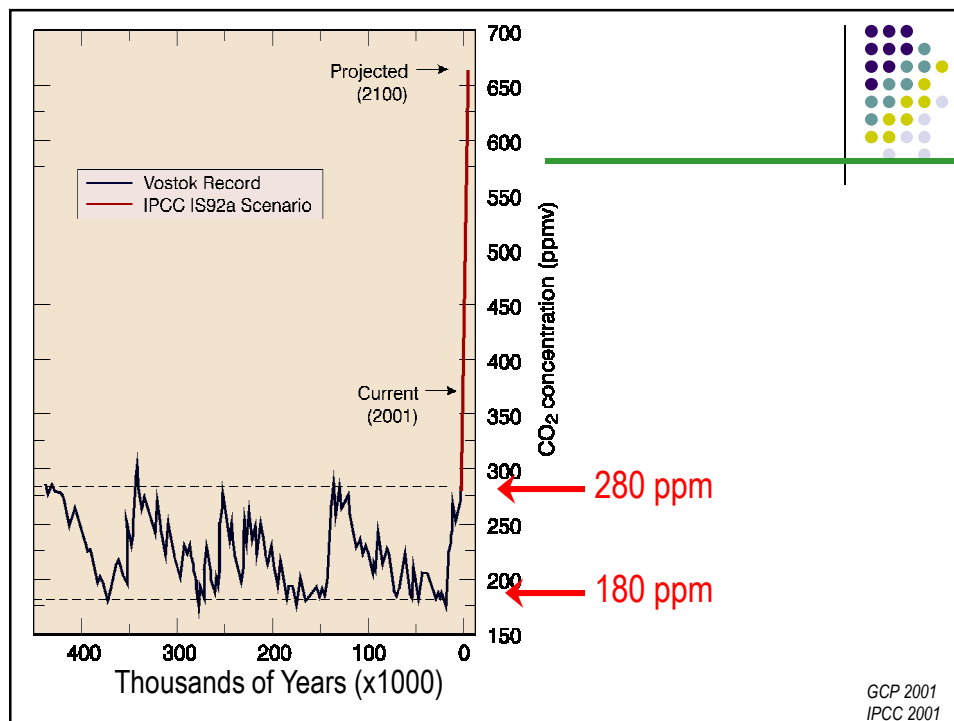
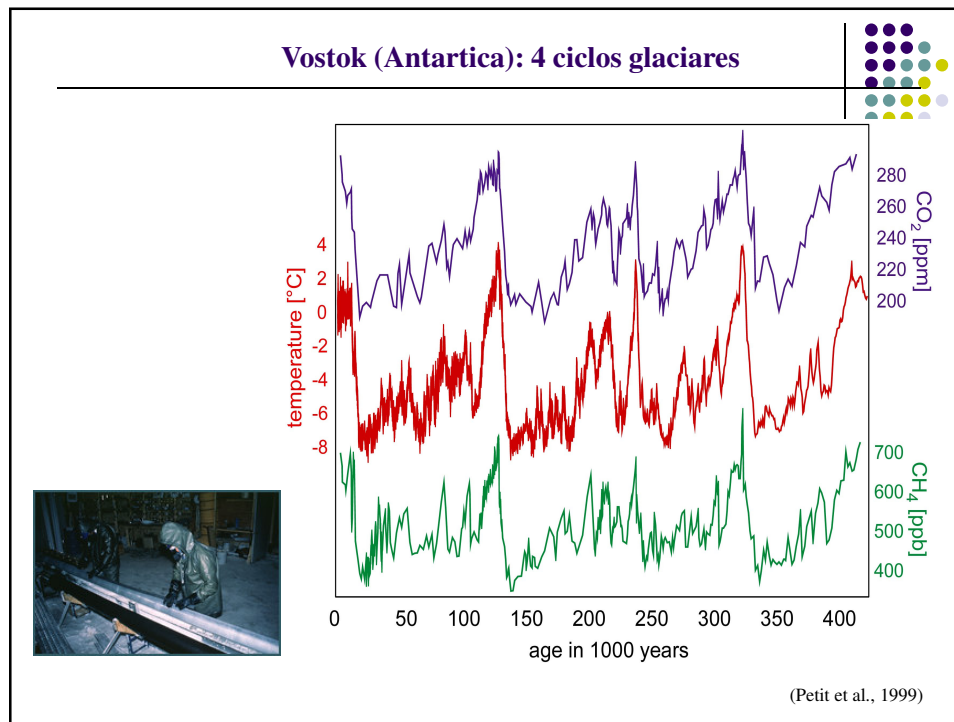
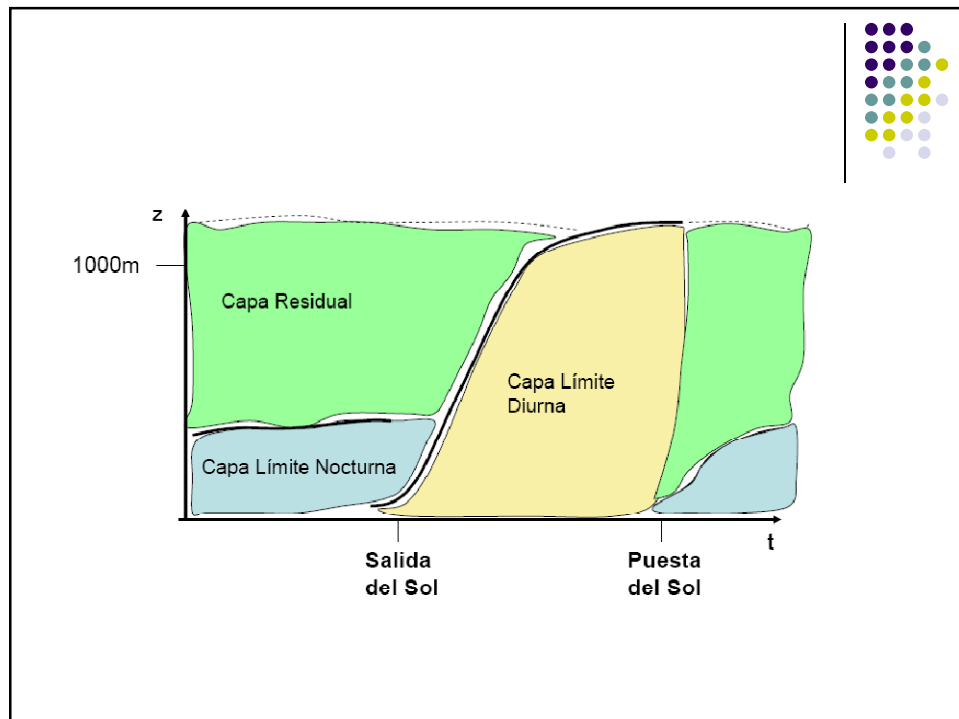
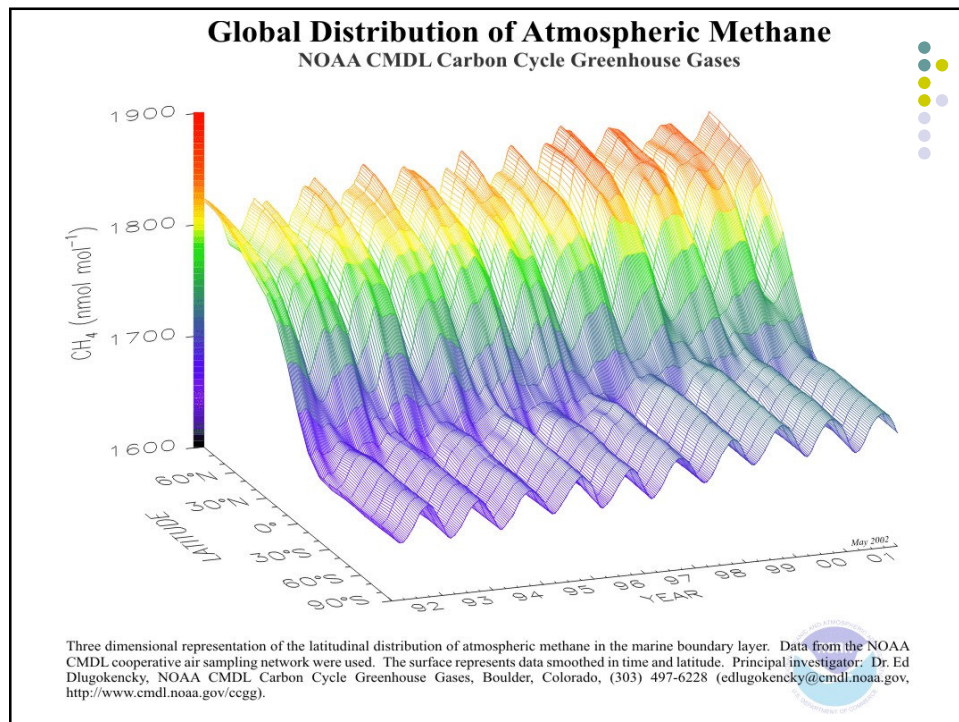


Table 1.1
Chemical Composition of the Atmosphere

Constituent	Chemical Formula	Volume Mixing Ratio in Dry Air	Major Sources and Remarks
Nitrogen	N ₂	78.084%	Biological
Oxygen	O ₂	20.948%	Biological
Argon	Ar	0.934%	Inert
Carbon dioxide	CO ₂	360 ppmv	Combustion, ocean, biosphere
Neon	Ne	18.18 ppmv	Inert
Helium	He	5.24 ppmv	Inert
Methane	CH ₄	1.7 ppmv	Biogenic and anthropogenic
Hydrogen	H ₂	0.55 ppmv	Biogenic, anthropogenic, and photochemical
Nitrous oxide	N ₂ O	0.31 ppmv	Biogenic and anthropogenic
Carbon monoxide	CO	50-200 ppbv	Photochemical and anthropogenic
Ozone (troposphere)	O ₃	10-500 ppbv	Photochemical
Ozone (stratosphere)	O ₃	0.5-10 ppm	Photochemical
Nonmethane hydrocarbons		5-20 ppbv	Biogenic and anthropogenic
Halocarbons (as chlorine)		3.8 ppbv	85% anthropogenic
Nitrogen species	NO _y	10 ppt-1 ppm	Soils, lightning, anthropogenic
Ammonia	NH ₃	10 ppt-1 ppb	Biogenic
Particulate nitrate	NO ₃ ⁻	1 ppt-10 ppb	Photochemical, anthropogenic
Particulate ammonium	NH ₄ ⁺	10 ppt-10 ppb	Photochemical, anthropogenic
Hydroxyl	OH	0.1 ppt-10 ppt	Photochemical
Peroxyl	HO ₂	0.1 ppt-10 ppt	Photochemical
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂	0.1 ppb-10ppb	Photochemical
Formaldehyde	CH ₂ O	0.1-1 ppb	Photochemical
Sulfur dioxide	SO ₂	10 ppt-1 ppb	Photochemical, volcanic, anthropogenic
Dimethyl sulfide	CH ₃ SCH ₃	10 ppt-100 ppt	Biogenic
Carbon disulfide	CS ₂	1 ppt-300 ppt	Biogenic, anthropogenic
Carbonyl sulfide	OCS	500 pptv	Biogenic, volcanic, anthropogenic
Hydrogen sulfide	H ₂ S	5 ppt-500 ppt	Biogenic, volcanic
Particulate sulfate	SO ₄ ²⁻	10 ppt-10 ppb	Photochemical, anthropogenic





Presión Atmosférica



- Es la presión que ejerce el peso de toda la masa de una columna de aire sobre un nivel dado.
- A nivel del mar es
 - 101320 Pa = 1013.2 hPa
 - hPa es hectoPascal = 100 Pa = 1mbar
- Pa = Pascal la unidad de medida de la presión.
- La masa de la atmósfera es del orden de $5,3 \times 10^{18}$ Kg

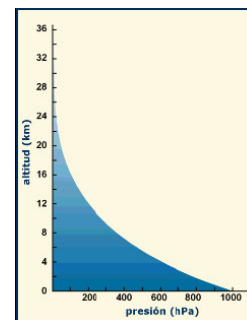
Ecuación Hidrostática



- Relación entre presión y altura

$$dp/dz = \rho g$$

- ρ = densidad del aire
- g = aceleración de gravedad ($9,8 \text{ m s}^{-2}$)



La presión disminuye cerca de 1.2 hPa/10 metros (hasta 5 km).

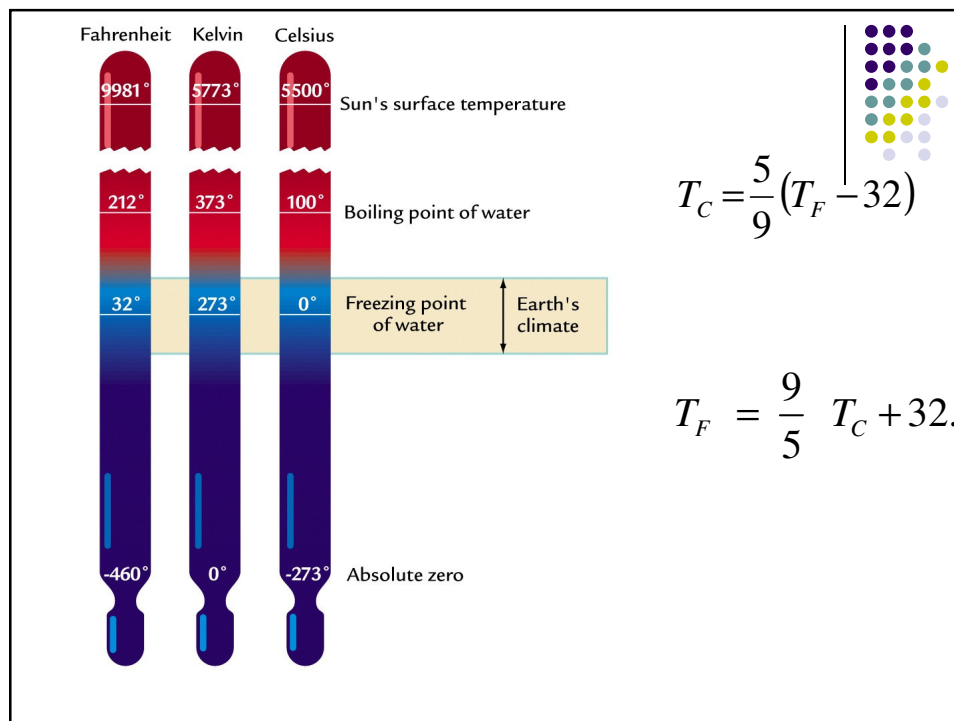
Ecuación de los gases ideales

- La densidad del aire no es constante

$$p = \rho RT$$

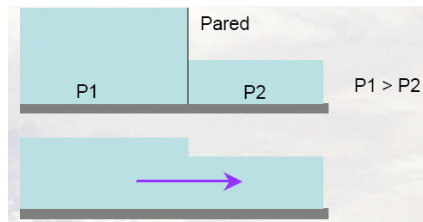
$R =$ constante 287 J/Kg/K

$T =$ temperatura (K) ($T_{\text{kelvin}} = T_{\text{celcius}} + 273,15$)



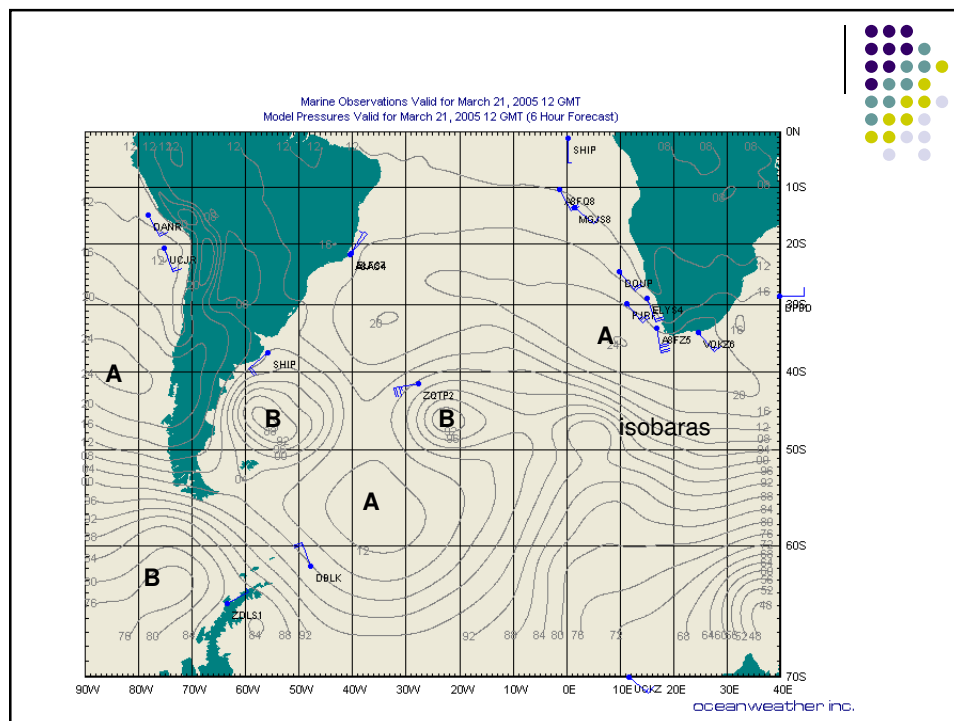
El viento

- Es el movimiento del aire como resultado de las diferencias de presión atmosférica.
- Diferencia de presión entre lado izquierdo y derecho del fluido, produce un flujo desde la zona de **alta** presión hacia la zona de **baja** presión.



Fuerza de gradiente de presión:

(diferencia de presión) / (distancia entre dos puntos)



Isobaras



- La separación entre las isobaras indica las variaciones de presión sobre el mapa, a estas variaciones de presión se le llama **gradiente de presión**.
 - Isobaras mas juntas, indican un gradiente de presión grande que produce vientos más fuertes,
 - isobaras más separadas, el gradiente de presión es mas pequeño y el viento es más débil.

Factores que controlan el viento



- la fuerza las variaciones de presión,
- el efecto de la rotación terrestre y
- la fricción del aire con la superficie.

Efecto de la rotación terrestre o de Coriolis

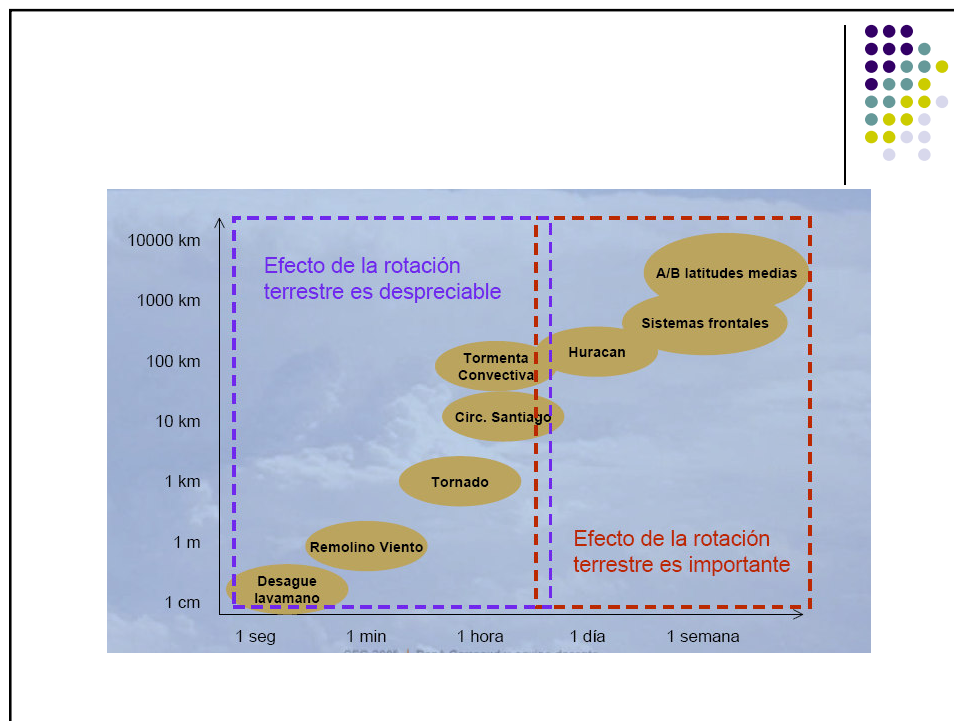
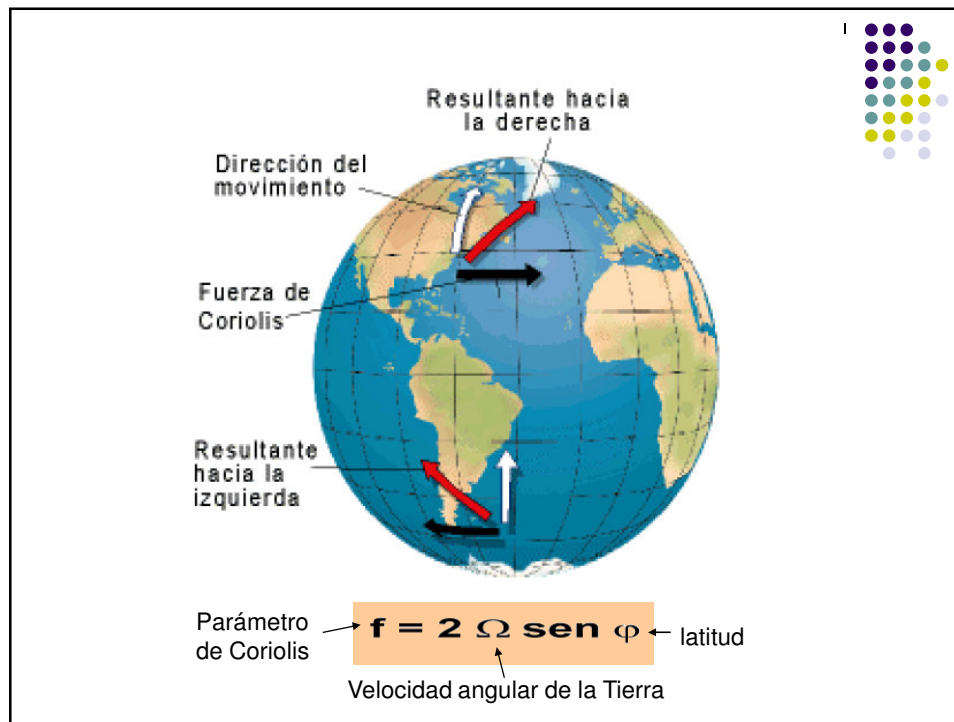


- El viento no cruza las isobaras en ángulo recto, sino que se produce una desviación del viento debido a la rotación de la Tierra.

Propiedad de la Fuerza de Coriolis



- Actúa sobre cuerpos no fijos a la tierra
- Siempre defleca el movimiento hacia la izquierda (derecha) en el hemisferio sur (norte)
- Su magnitud es zero en el ecuador y máxima en los polos
- Su magnitud es dependiente de la velocidad de rotación de la tierra (o el planeta en cuestión). $F_C=0$ para rotación nula.



Viento Geostrófico



- El viento que resulta del equilibrio entre la fuerza de presión y la de coriolis
- Se lo define también como el viento que existiría en la atmósfera libre (sin fricción) en el caso de un movimiento horizontal sin aceleración.

$$V_g = \frac{\alpha \Delta p}{f \Delta n}$$

α = Volumen específico del aire

Δp = Diferencial de presión

f = Parámetro de Coriolis

Δn = Distancia entre las isobaras

El efecto de la fricción en superficie



- Disminuye la rapidez del viento y desviar el movimiento del aire a través de las isobaras, hacia el área de bajas presiones.
- El grado de irregularidad del terreno determina el ángulo que se desvía el viento respecto a las isobaras, como también la magnitud de su disminución.
- Sobre los océanos el aire se desvía entre 10° a 20° respecto a las isobaras y su rapidez disminuye aproximadamente a 2/3 respecto de su valor si no hubiese roce.
- Sobre terrenos muy irregulares donde la fricción es grande, el viento se puede desviar hasta en 45° y su rapidez reducirse hasta en un 50%.
- A alturas superiores a 1.0 – 1.5 km, el viento ya no es afectado por la fricción.



- **Ciclones:** isobaras cerradas o centros de bajas presiones y al viento alrededor de esos centros se le llama circulación ciclónica, porque tiene el mismo sentido que el de la rotación de la Tierra: horario en el hemisferio sur y antihorario en el hemisferio norte. A las isobaras
- **Anticiclones** cerradas o centros de altas presiones y al viento alrededor de esos centros se le llama circulación anticiclónica, porque es opuesto a la rotación terrestre.

Donde las isobaras son curvas sin cerrarse:

- **Cuñas:** las regiones de altas presiones se les llama cuñas y el viento en las cuñas es anticiclónico y
- **Vaguadas.** Regiones de bajas presiones y el viento es ciclónico.



“tendencia de la presión”

- Es una indicación del tiempo que se aproxima y es útil en los pronósticos de corto plazo.
- Es la variación de presión en el tiempo, se mide cada 3 horas en unidades de hPa/horas.
- Para la tendencia de la presión se usan los términos:
 - de subiendo, que significa aumentando la presión, indicativo que se producirá buen tiempo,
 - bajando la presión atmosférica, indicativo de aproximación de mal tiempo y
 - estacionaria que representa sin cambio significativo de tiempo presente.

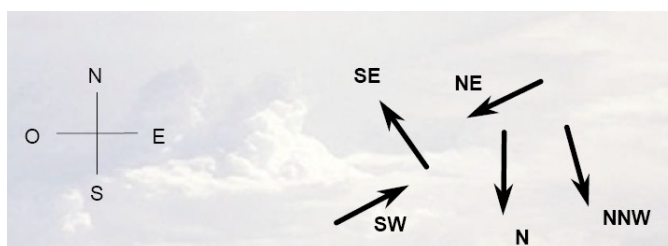
Escala de Viento de Beaufort...empleada en navegación

Numero de Escala	m/s	Km/h	Denominación
0	0 - 0.5	0 - 1	Calma
1	0.6 - 1.7	2 - 6	Ventolina
2	1.8 - 3.3	7 - 12	Suave
3	3.4 - 5.2	13 - 18	Leve
4	5.3 - 7.4	19 - 26	Moderado
5	7.5 - 9.8	26 - 35	Regular
6	9.9 - 12.4	36 - 44	Fuerte
7	12.5 - 15.2	45 - 54	Muy Fuerte
8	15.3 - 18.2	55 - 65	Temporal
9	18.3 - 21.5	66 - 77	Temporal fuerte
10	21.6 - 25.1	78 - 90	Temporal muy fuerte
11	25.2 - 29	91 - 104	Tempestad
12	Mas de 29	Mas de 105	Huracan

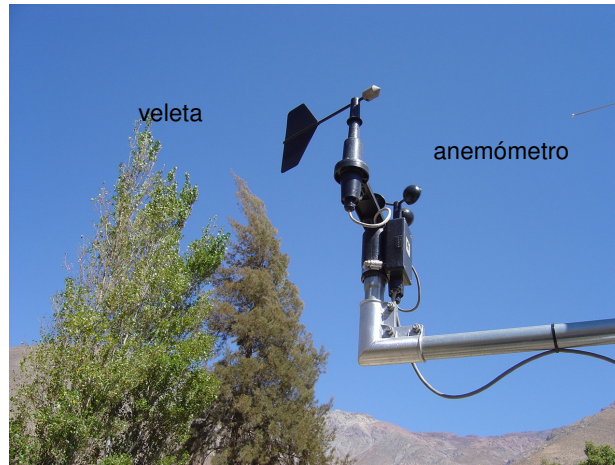


Dirección del Viento

- El viento es una variable vectorial, y en consecuencia además de su magnitud necesitamos conocer su dirección.
- La dirección del viento se designa según la dirección geográfica desde donde el viento esta soplando. (desde donde viene).



Como medir



Circulación general

- La Tierra recibe la energía solar según la siguiente ecuación

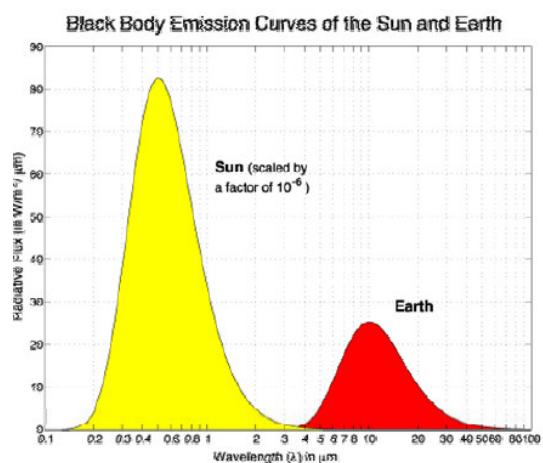
$$E_s = S \pi R^2 (1 - \alpha)$$

S= constante solar ($S = 1370 \text{ J/m}^2/\text{s}$)

R= radio de la tierra

A= albedo terrestre

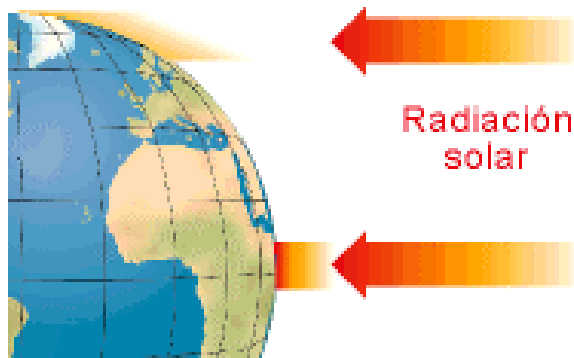
πR^2 = área transversal que la Tierra interpones al flujo de radiación solar



Un cuerpo negro absorbe toda la luz y toda la energía que incide sobre él.



Radiación Solar



Radiación y la atmósfera



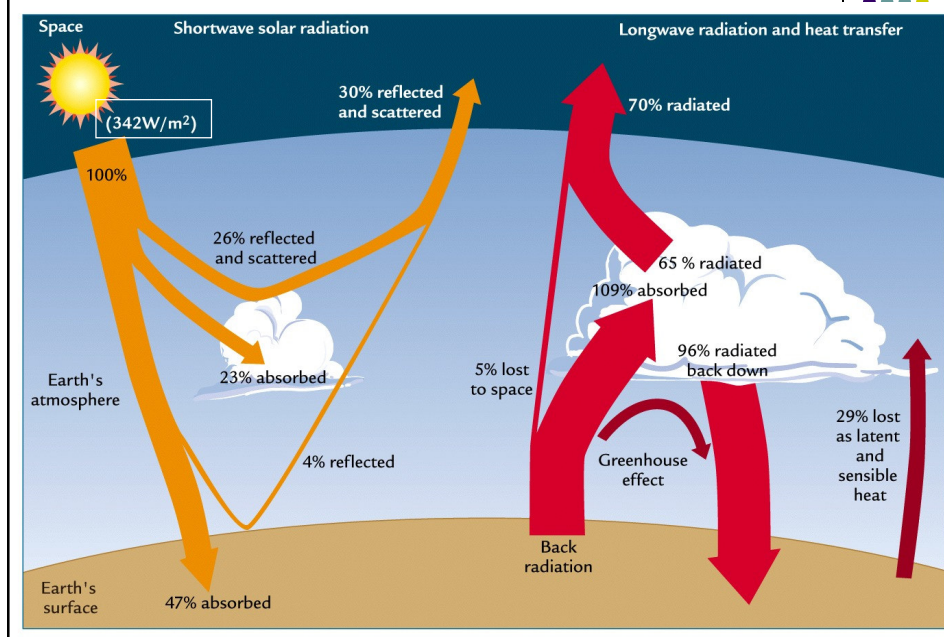
Table 1: Electromagnetic spectrum

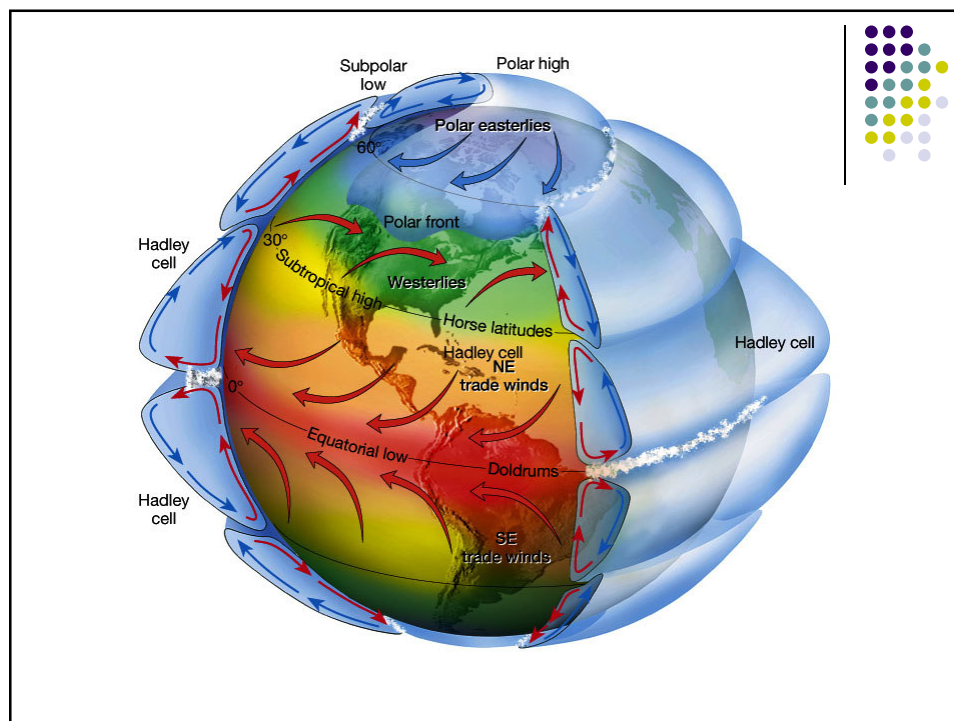
Regime	Wavelength	Reaching to
X-ray	0.01-10 nm	Thermosphere
UV	10-390 nm	Stratosphere
Visible	390-760 nm	Surface
Infrared	0.7- 1000 μm	Surface
μ -wave	0.1-20 cm	
Radio	20 cm-kms	

Table 2: Solar radiation arriving at Surface

Regime	Wavelength	%
UV	10-390 nm	7%
VIS	390-760 nm	46%
IR	0.7- 1000 μm	47%

Balace de radiación terrestre





Entre los trópicos

- Se tiene una zona de bajas presiones ecuatoriales, donde convergen los vientos alisios del sureste y del noreste, produciendo movimientos ascendentes, con convección profunda y abundante nubosidad con precipitación continua e intensa. Esta región de encuentro de los alisios se conoce como la **zona de convergencia intertropical (ZCIT)**.

Entre 25 y 35° de latitud



- Se originan los vientos alisios, se tiene la zona de altas presiones subtropicales. En esta franja se produce subsidencia y divergencia en superficie, los gradientes de presión son muy débiles por lo que los vientos son flojos y variables.

Entre 45 y 60° de latitud



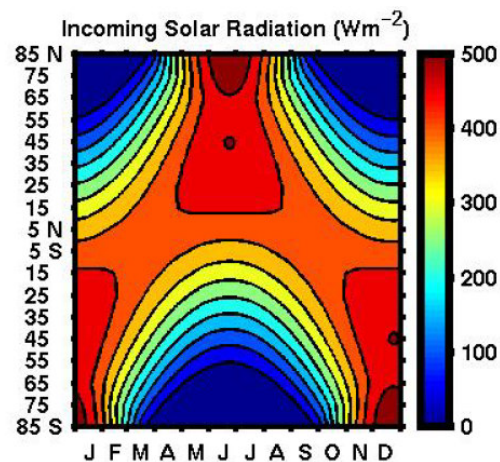
- Se encuentra una franja de presiones muy bajas asociadas al frente polar, que se produce por convergencia de los vientos del oeste y los este polares, en una zona conocida como bajas presiones subpolares o de ciclones migratorios.

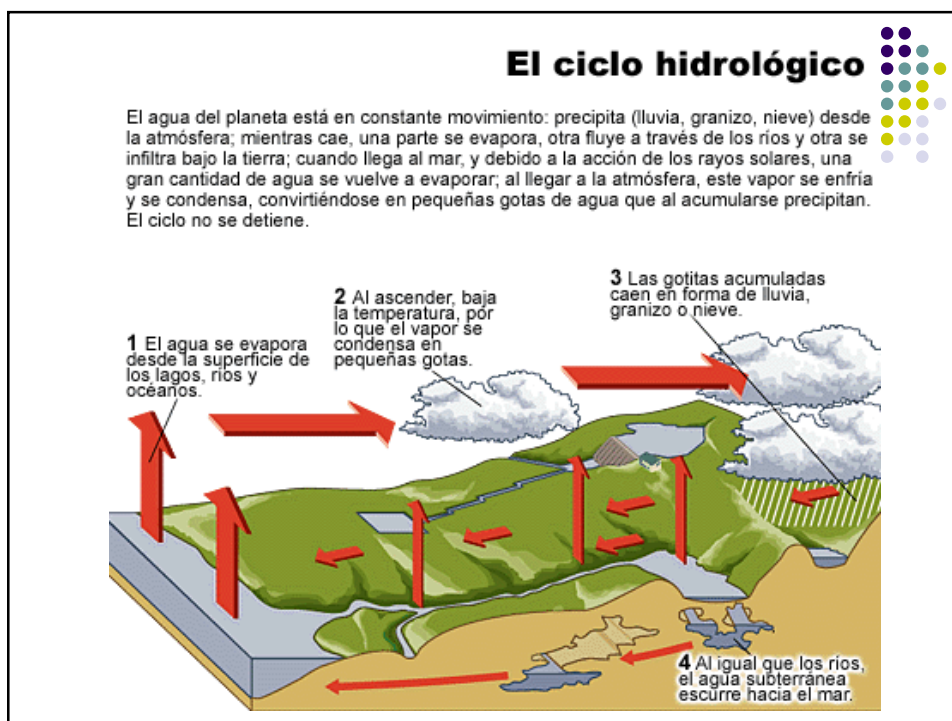
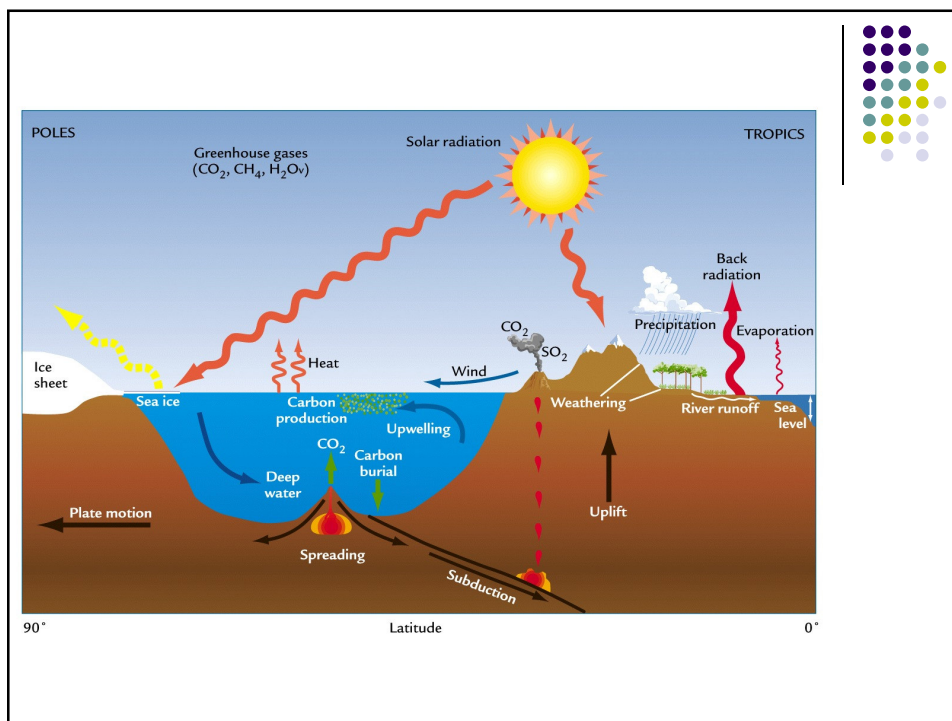
Zonas polares

- se producen las altas presiones polares, de origen frío, región de nacimiento de los estees polares, por la divergencia en superficie



Variación estacional y latitudinal de la radiación solar





Vapor de Agua



- La atmósfera terrestre contiene cantidades variables de agua en forma de vapor.
- La mayor parte se encuentra en los cinco primeros kilómetros del aire, dentro de la troposfera, y procede de diversas fuentes terrestres gracias al fenómeno de la evaporación.

La humedad



- Las precipitaciones suelen acompañar al aire muy húmedo,
- El aire seco tiende a hacer que el agua terrestre se evapore, en vez de enviar más líquido sobre la Tierra.

Humedad relativa



- Cuánto vapor de agua existe expresado como porcentaje de la cantidad máxima que puede contener el aire saturado a una determinada temperatura.
- Se expresa en tanto por ciento,

Punto de Rocío



- Si una masa de aire se enfría lo suficiente, alcanza una temperatura llamada punto de rocío, por debajo de la cual no puede mantener toda su humedad en estado de vapor y éste se condensa, convirtiéndose en líquido, en forma de gotitas de agua.
- Si la temperatura es lo suficiente baja se originan cristales de hielo.
- Casi siempre se necesita algo, sobre lo que el vapor pueda condensarse, es decir, superficies o cuerpos apropiados donde depositarse.
- en la atmósfera ese "algo" son los núcleos de condensación.

La Precipitación



- La precipitación puede, producirse por la caída directa de gotas de agua o de cristales de hielo que se funden,
- Las gotas son mayores cuanto más alta está la nube que las forma y más elevada es la humedad del aire
- Las gotas caen en virtud de su peso, y lo hacen a una velocidad que varía entre 4 y 8 m/s, según sea el tamaño de las mismas y la influencia del viento

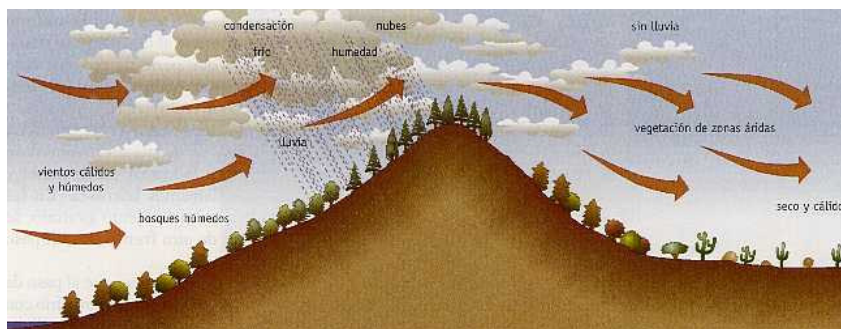
Diámetro v/s Velocidad de Caída



Clase de gota	Diámetro en mm	Velocidad de caída m/s
Gota de lluvia grande	5	9
Gota de lluvia pequeña	1	4
Lluvia fina	0.5	2.5
Llovizna	0.2	1.5
Gotita de nube grande	0.1	0.3
Gotita de nube común	0.05	0.08
Núcleos de gotitas incipientes	0.01	0.003
	0.002	0.0001
	0.001	0.00005

Tipos de lluvias

- de convección (en la zona ecuatorial)
- ciclones o de frente (en zonas templadas)
- orográficas o de relieve (masas de aire que precipitan en barlovento).

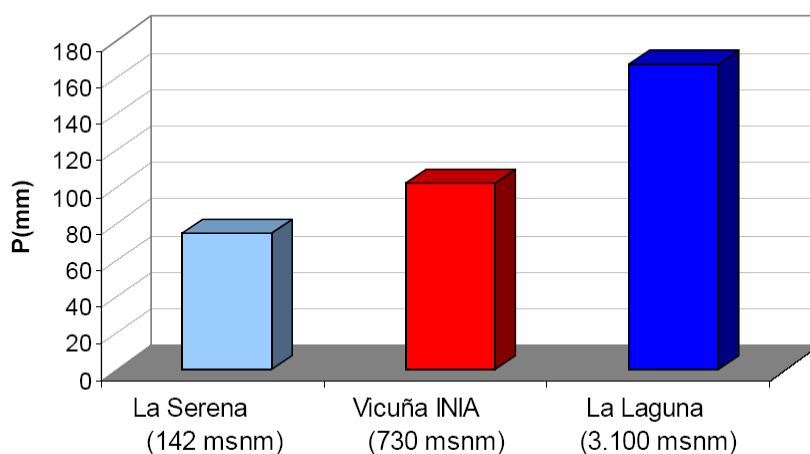


Nombres de la Lluvia



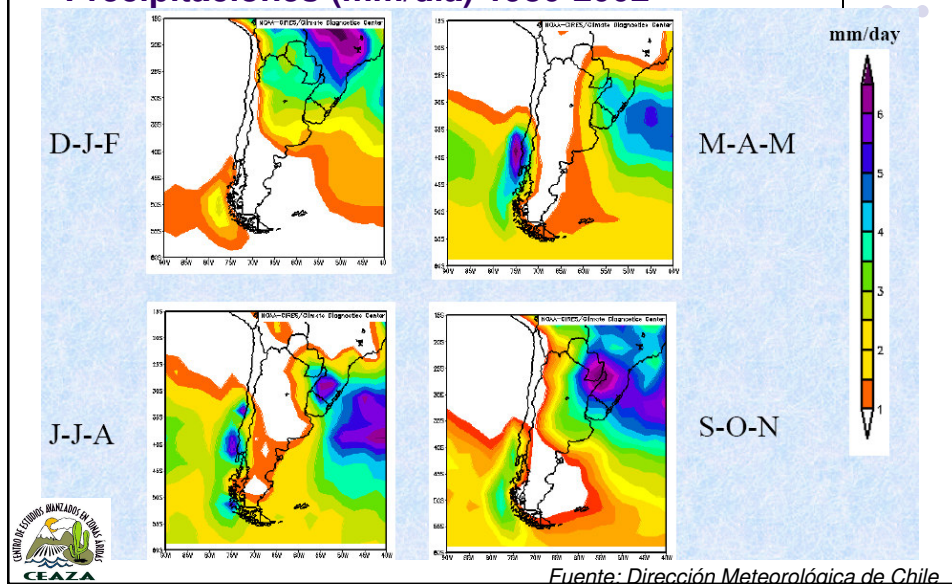
- Lluvia si es continua, regular y el diámetro de sus gotas es superior a 0,5 milímetros.
- Llovizna cuando las gotas que caen son menudas, con un diámetro inferior a 0,5 mm y se presentan de forma pulverizada, como flotando en el aire.
- Chubasco, chaparrón o aguacero, si cae de golpe, con intensidad, y por poco rato, como durante el verano y climas tropicales.
- manga de agua si la lluvia es tan violenta y abundante que provoca riadas e inundaciones

Precipitaciones Valle del Elqui 1974-2003

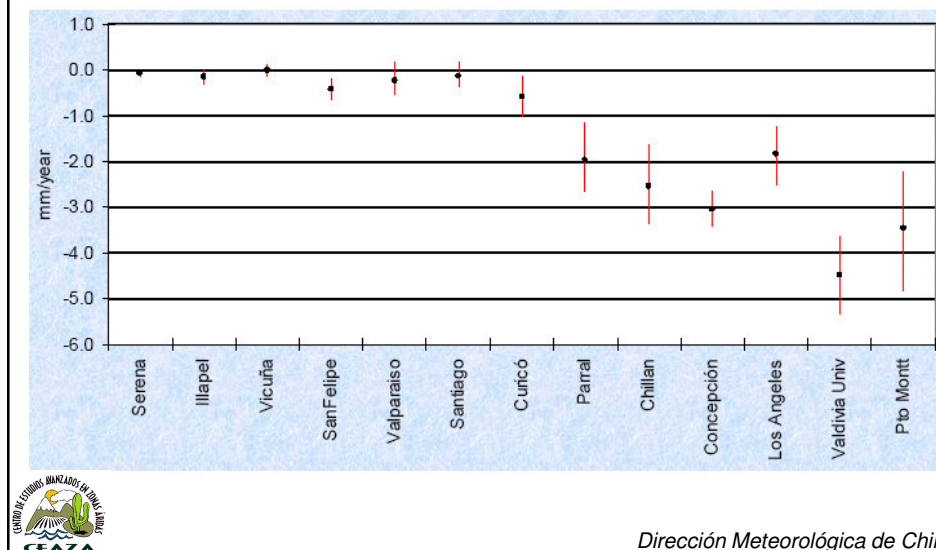


Régimen de Precipitaciones en Chile

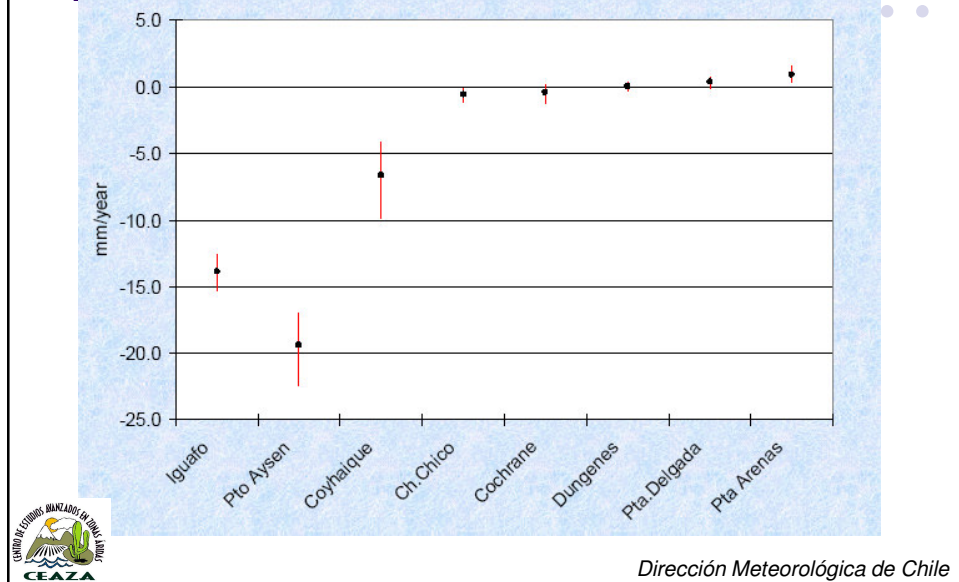
Precipitaciones (mm/día) 1980-2002



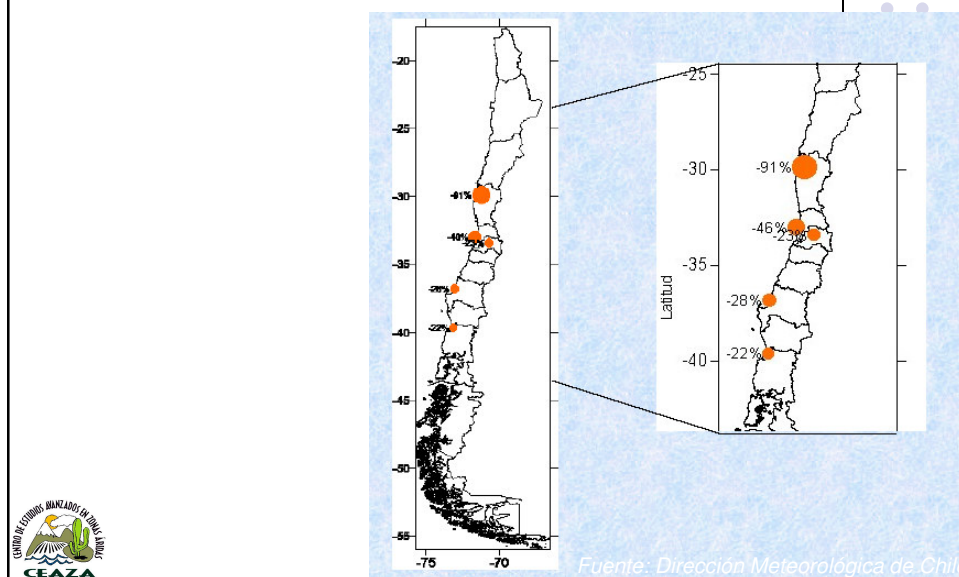
Tendencia de precipitación 1930-2000



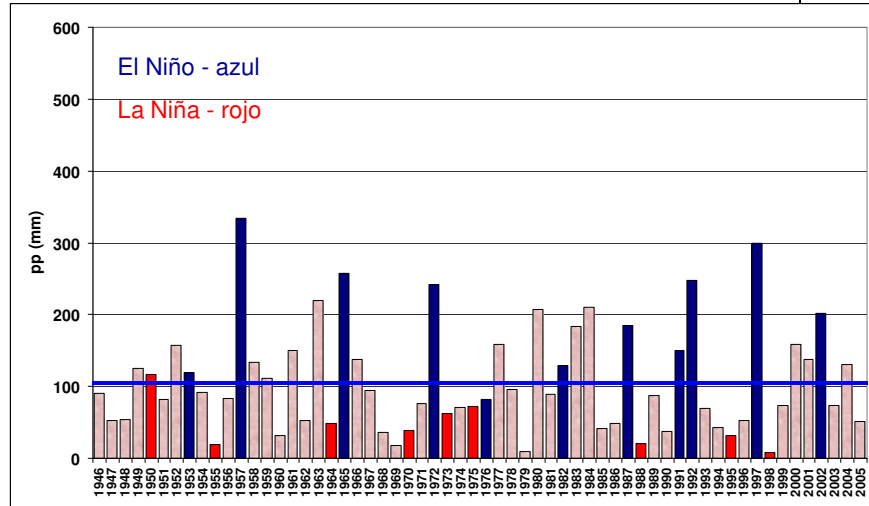
Tendencia de precipitación 1930-2000



Tendencia de Precipitación Anual (%) 1900-2000



Ovalle Lluvias 1946- 2005



Formación de Nieve

- inician su vida en las nubes,
- aire sobresaturado de vapor de agua,
- la temperatura del aire por debajo de 0°C , a la cual la nube llega a estar saturada

EL GRANIZO



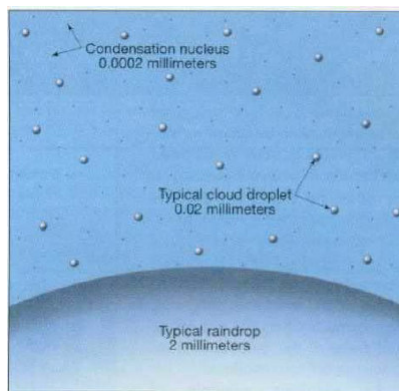
- El tamaño de estas partículas oscila, normalmente, entre unos milímetros y dos o más centímetros.
- Al contrario de la nieve, que se da casi siempre en invierno o regiones heladas propicias, el granizo se produce, generalmente, tanto en verano como en la estación invernal.
- Para la génesis de tormentas de granizo la atmósfera debe encontrarse **inestable**, es decir, deben reinar especiales condiciones de temperatura y humedad que permitan el desarrollo de tormentas eléctricas con violentas corrientes ascendentes de aire. Cuando existe una corriente de aire cálido y húmedo que se mueve cerca de la superficie terrestre, y un chorro de aire más seco sopla a mayor altitud, en sentido transversal, las condiciones son favorables para iniciarse una tormenta eléctrica
- No toda tormenta eléctrica produce granizo.

LA NIEBLA



- Es otro de los fenómenos producidos por la condensación del vapor de agua atmosférico.
- Es una nube tan baja que toca el suelo.
- Las diferencias entre una nube y la niebla son la altitud a la que cada una se origina, y que las nubes contienen cristallitos de hielo.

Diferencia de tamaño entre una gota de nube y una gota de lluvia



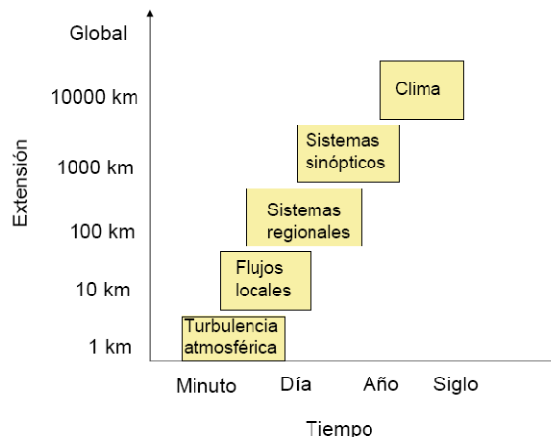
Aprox. un millón de gotas de nubes forman una gota de lluvia

LA VISIBILIDAD

- La visibilidad se define como la distancia horizontal máxima a la que un observador puede distinguir claramente algunos objetos de referencia en el horizonte.

REDUCCION DE LA VISIBILIDAD PROVOCADA POR METEOROS			
METEORO	VISIBILIDAD	HUMEDAD	CONSTITUCIÓN
NIEBLA	< 1 Km	90-100%	agua o hielo
NEBLINA	1-2 Km	80-90%	agua o hielo
CALIMA	> 2 Km	< 80%	partículas sólidas
BRUMA	> 2 Km	< 80%	partículas sólidas
LLUVIA	< 3 Km	100 %	agua o hielo
LLOVIZNA	< 1 Km	100 %	agua o hielo

Escala de los sistemas meteorológicos



ESCALAS DE LOS MOVIMIENTOS ATMOSFÉRICOS



- Macroescala o escala planetaria:** En esta escala se encuentran los más grandes patrones de viento, como los alisios en latitudes tropicales, con dirección predominante del este, o los vientos del oeste en latitudes medias. El flujo se produce alrededor de todo el globo y puede durar semanas con pocos cambios.



- **Escala sinóptica:** Es la que se representa comúnmente en las cartas sinópticas. Sus dimensiones son de cientos a miles de kilómetros y la duración de los eventos del orden de días a 1 - 1½ semana.
 - Los ciclones y anticiclones de latitudes medias, que tienen un movimiento medio en dirección oeste – este.

En estas dos escalas los movimientos son predominantemente horizontales, casi (pero sólo casi) sin movimiento vertical.



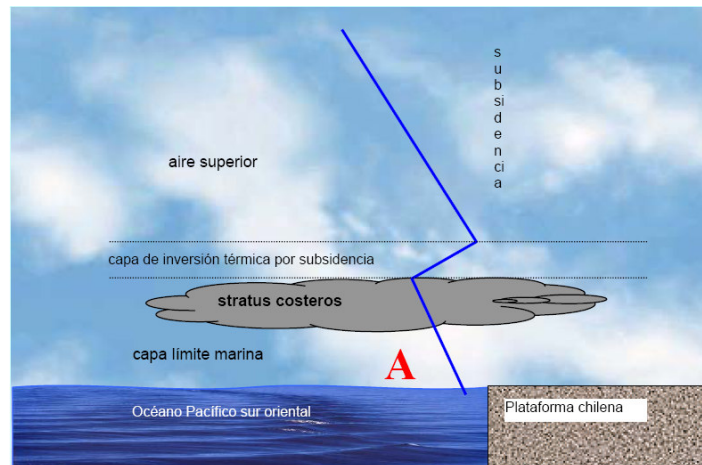
- **Mesoescala:** Los movimientos en esta escala se producen en áreas más pequeñas del orden de 100 km o menos, y su duración típica es de horas a 1-2 días.
 - Se encuentran en esta escala los vientos que se producen en áreas costeras o brisas de mar y tierra y vientos en zonas montañosas o brisas de valle – montaña. Aquí los movimientos verticales pueden ser de gran magnitud.



- Microescala: Movimientos de pequeñas dimensiones y muy corta duración, generalmente caóticos,
 - remolinos de polvo o turbulencia, con movimientos verticales muy intensos.



Inversión térmica



Masas de Aire

- El concepto de masa de aire fue desarrollado en Noruega por los meteorólogos Bergeron y Bjerkness en los años 20 como parte de su teoría sobre el Frente Polar.
- Una masa de aire se define como un volumen de aire de gran extensión cuyas propiedades físicas, sobre todo temperatura y humedad, son uniformes en el plano horizontal.

Clasificación de las masas de aire



MASA DE AIRE	SÍMBOLO	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD ESPECÍFICA (G/KG)	PROPIEDADES
Ártica continental Antártica continental invierno	Ac AAc	-55 a -35	0.05 a 0.2	Muy fría, muy seca, muy estable
Polar continental invierno verano	Pc	-35 a -20 5 a 15	0.2 a 0.6 4 a 9	Fría, seca y muy estable Fría, seca y estable
Polar marítima invierno verano	Pm	0 a 10 2 a 14	3 a 8 5 a 10	Fresca, húmeda e inestable Fresca, húmeda e inestable
Tropical continental	Tc	30 a 42	5 a 10	Cálida seca e inestable
Tropical marítima verano	Tm	22 a 30	15 a 20	Cálida, húmeda, estabilidad variable
Ecuatorial marítima	Em	Aprox. 27	Aprox. 19	Cálida, muy húmeda e inestable

Estabilidad e Inestabilidad



- Se dice que la atmósfera se halla estable cuando hay una gran resistencia a que en ella se desarrollen movimientos verticales, por lo que si una "burbuja" se desplaza de su posición de equilibrio tiende a recuperarlo.
- En caso de inestabilidad ocurre lo contrario.

Sistemas frontales



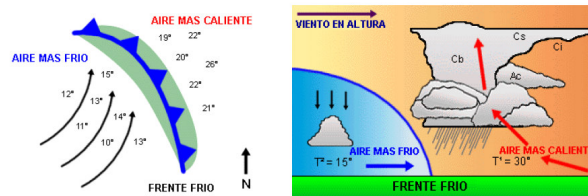
- Las masas de aire se desplazan en conjunto y se "empujan" unas a otras.
- Raramente se mezclan.
- Esta propiedad es la causante del acentuado dinamismo de la atmósfera en la llamada superficie frontal, como se denomina a la superficie de contacto entre dos masas de aire.



- Como la atmósfera tiene tres dimensiones, la separación entre las masas de aire es una superficie llamada superficie frontal, siendo el frente, la línea determinada por la intersección de la superficie frontal y el suelo.
- Los frentes pueden tener
 - una longitud de 500 a 5000 Km.,
 - un ancho de 5 a 50 Km. y
 - una altura de 3 a 20 Km.
 - La pendiente de la superficie frontal puede variar entre 1:100 y 1:500.

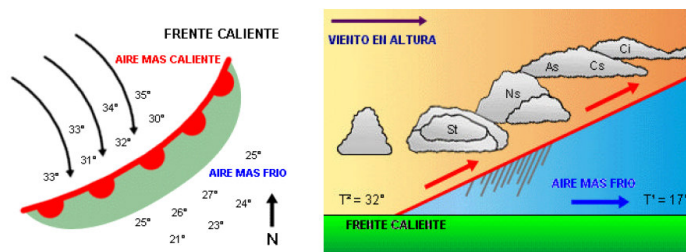
EL FRENTE FRÍO:

- Cuando una superficie frontal se desplaza de tal manera que es el aire frío el que desplaza al aire caliente en superficie, se dice que estamos en presencia de un frente frío.
- El fenómeno es muy violento y en estos ascensos se producen abundantes nubes de desarrollo vertical.
- En los mapas se los representa con una línea azul continua o una negra orlada de "picos".



EL FRENTE CALIDO

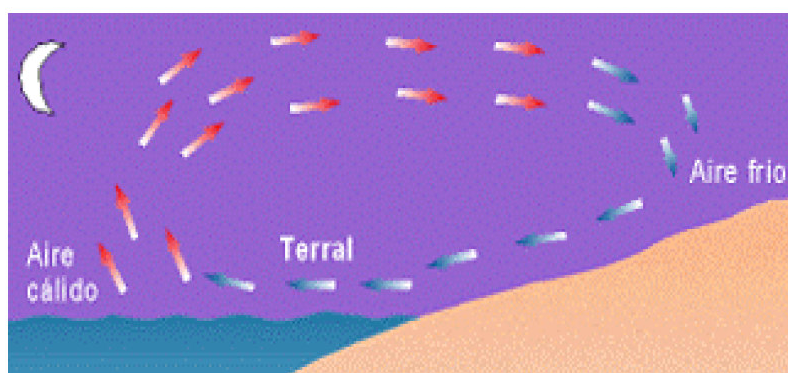
- En este caso, el aire caliente avanza sobre el frío, pero al ser este último más pesado, se pega al suelo y a pesar de retirarse la masa fría, no es desalojada totalmente, de manera que el aire cálido asciende suavemente por la superficie frontal que hace de rampa.



Brisa Marina

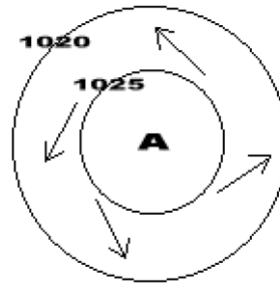


Brisa Terrestre



Anticiclón

- Convergencia en los niveles superiores y divergencia en los inferiores.
- La subsidencia de más de 10.000 m
- El aire que baja se va secando y calentando adiabáticamente, por lo que trae consigo estabilidad y buen tiempo, con escasa probabilidad de lluvia.
- En invierno, sin embargo, el aire que desciende puede atrapar nieblas y elementos contaminantes bajo una inversión térmica.



ANTICICLON ATMOSFERICO (H. S.)