



ÁREA
GEOCIENCIAS

El Sistema Climático

Maestría en Geociencias

2024

Ciclo Hidrológico

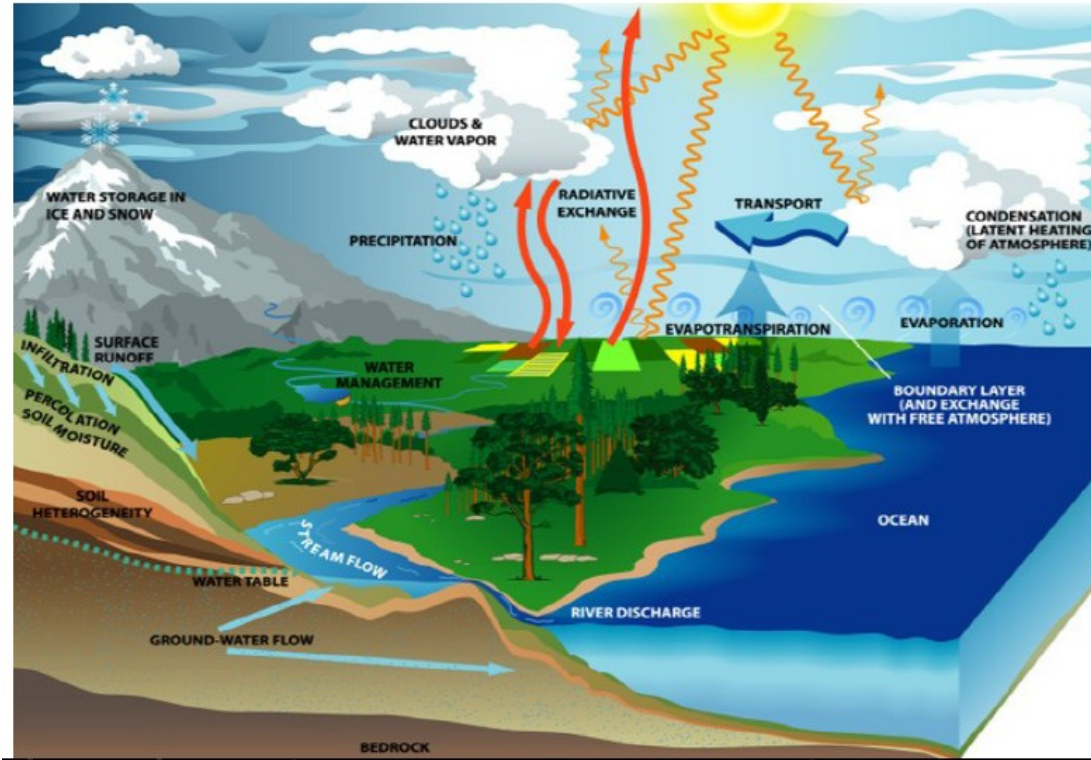


Introducción al ciclo hidrológico



Introducción al ciclo hidrológico

Describe las transformaciones del agua al pasar por los distintos reservorios



Los principales reservorios de agua son:

- los océanos
- hielo, nieve
- agua superficial y subterránea
- la atmósfera
- la biosfera.

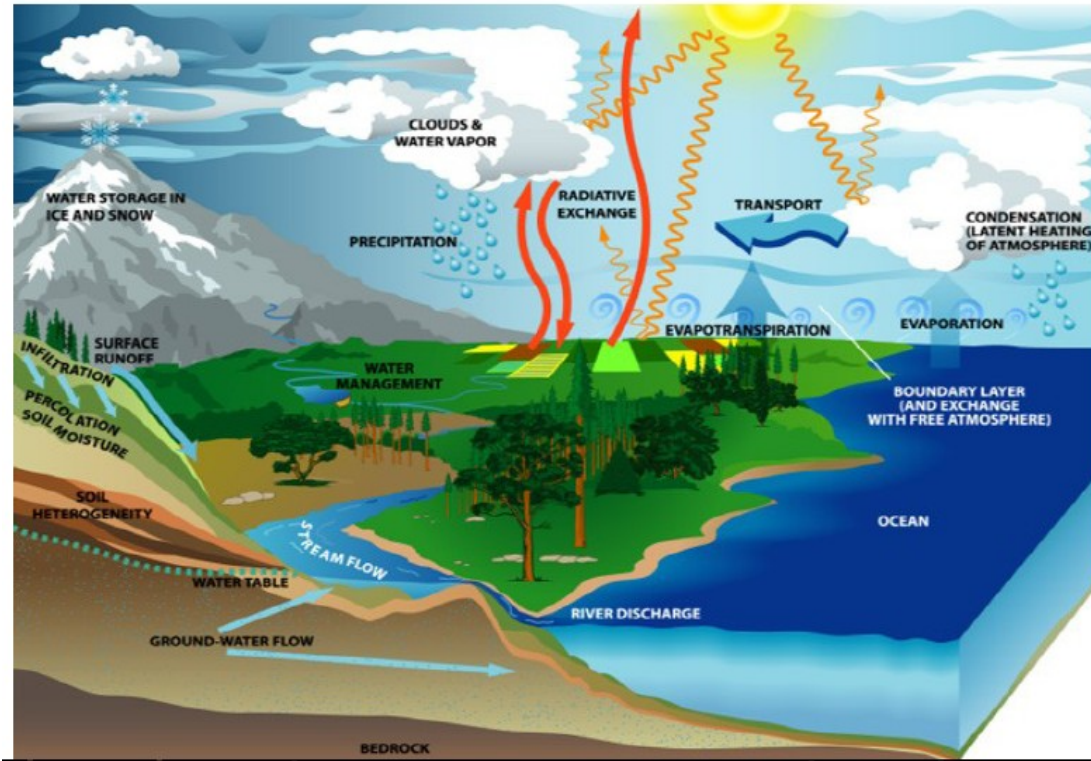
■ Los reservorios se conectan mediante la transferencia de agua (en forma líquida, sólida o gaseosa)

■ El ciclo hidrológico describe los movimientos del agua entre la superficie de la Tierra, el subsuelo, la atmósfera y los océanos.

■ El agua pasa a la atmósfera a través de la evaporación en los océanos y continentes y de la transpiración de las plantas.

Introducción al ciclo hidrológico

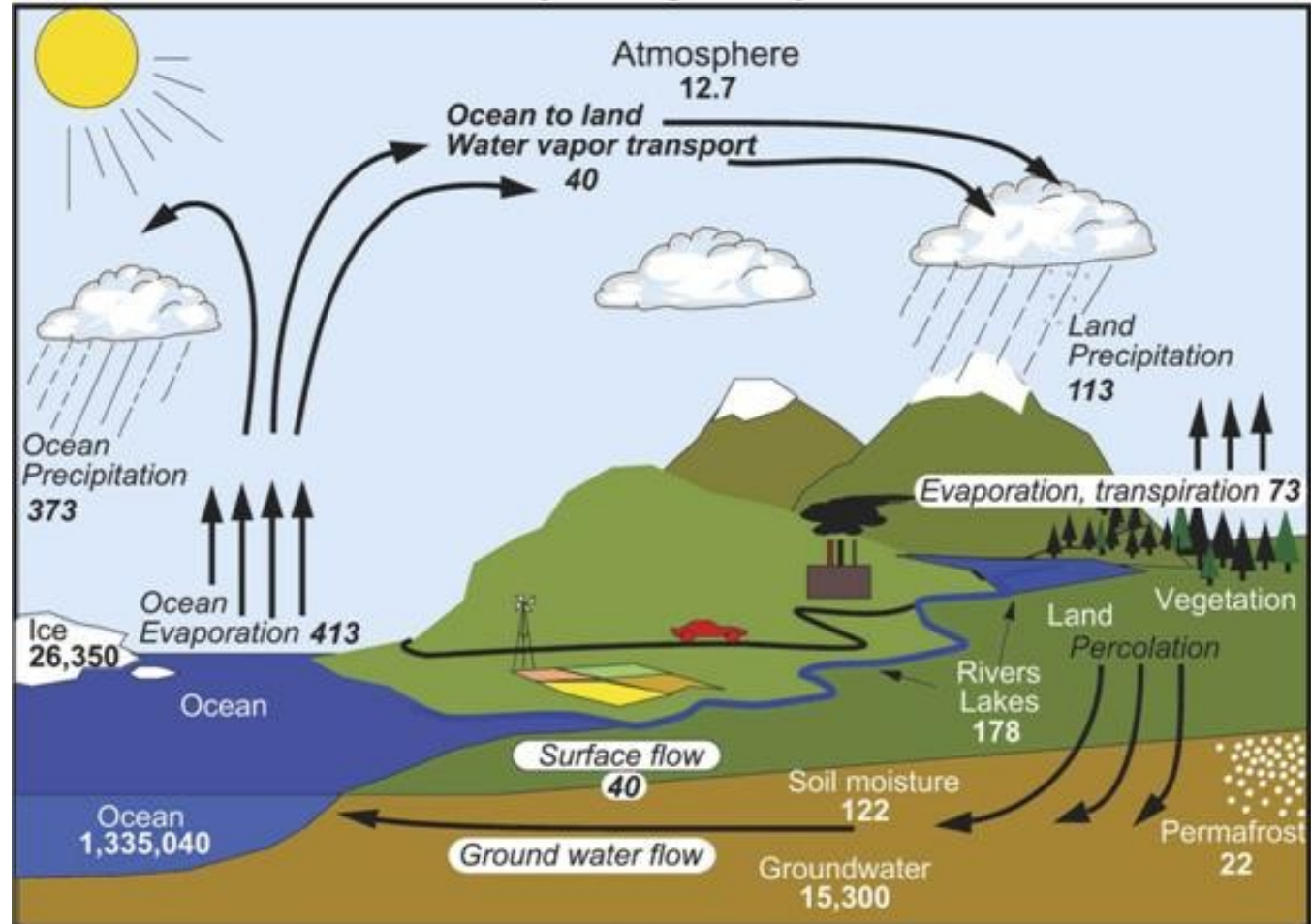
Describe las transformaciones del agua al pasar por los distintos reservorios



El agua es importante dentro del balance energético del sistema climático:

- Liberación de energía (calor latente) en los procesos de condensación y congelación (que es empleada por la atmósfera para conducir/modular los sistemas de circulación)
- Principal gas efecto invernadero (aprox. 50% del efecto invernadero natural → vapor de agua)
- Sus fases líquida y sólida tb contribuyen a la opacidad de la atmósfera a la radiación térmica
- Albedo asociado a las nubes.

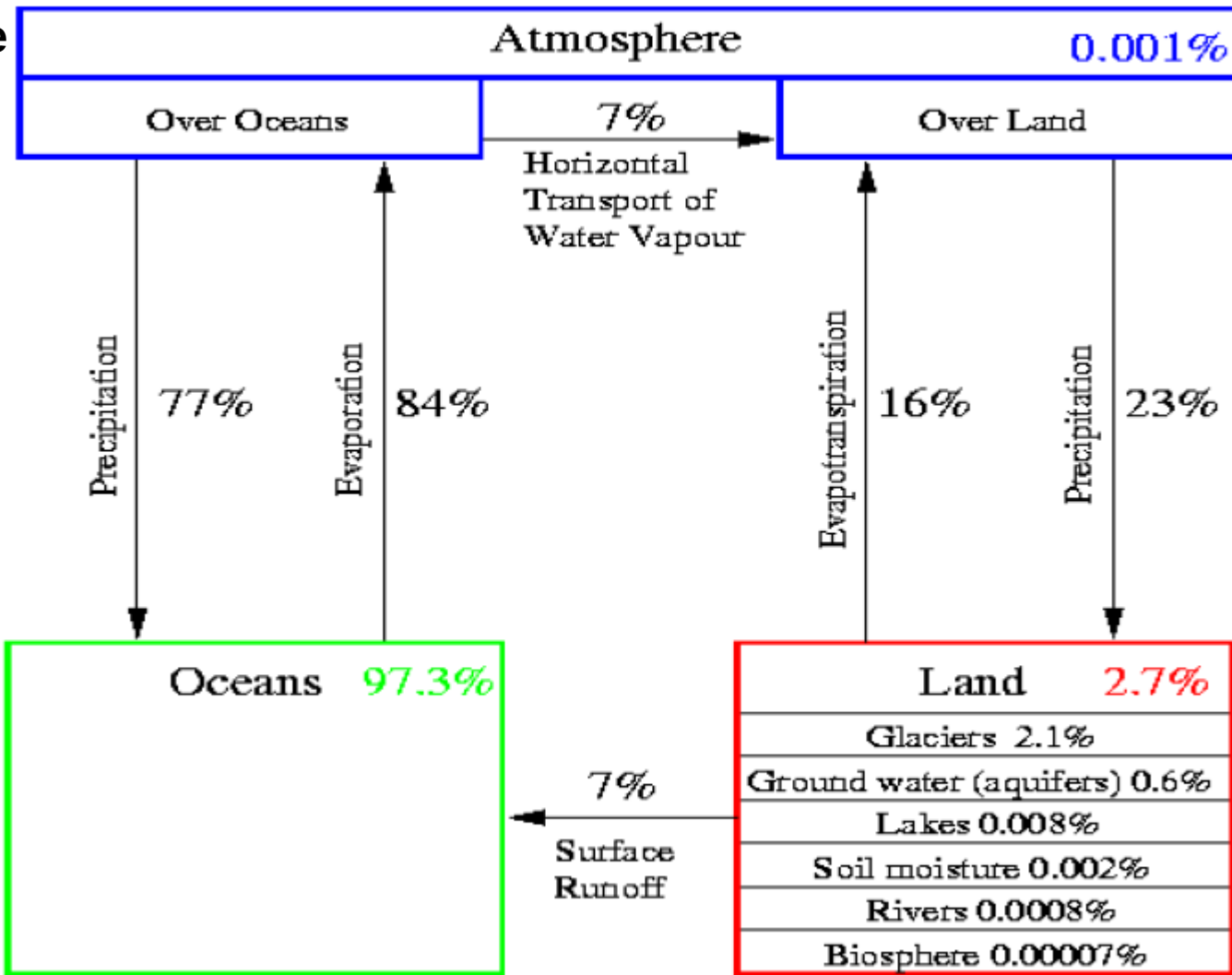
Distribución de agua en el SC



Reservorios en 10^3 km^3

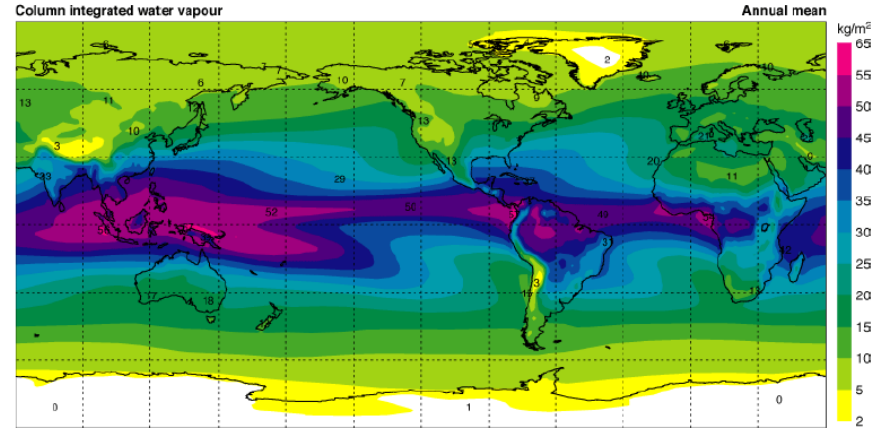
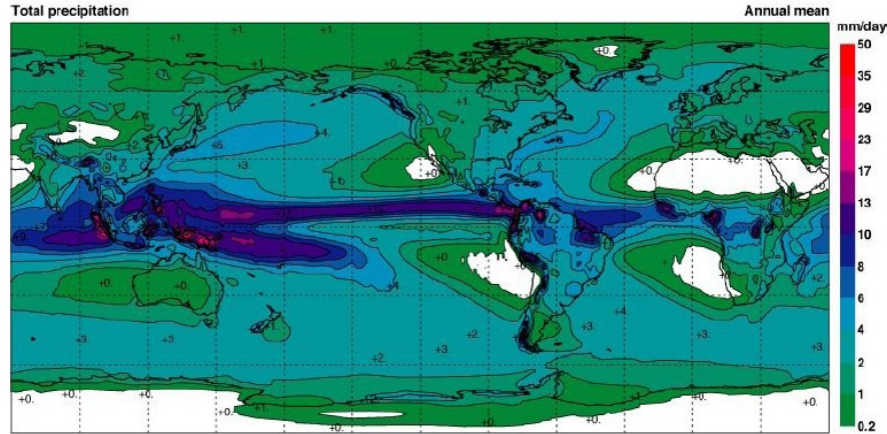
Flujos en $10^3 \text{ km}^3/\text{año}$

Distribución de agua en el SC



→ Transport of water as fraction of total global annual precipitation

Vapor de agua en la columna es similar a la distribución de precipitación



A través de los procesos de evaporación, sublimación y transpiración, el agua pasa de los océanos (y también de continentes y vegetación) a la atmósfera.

Una vez en la atmósfera, el vapor de agua:

- es transportado y redistribuido por los vientos
- condensa y/o congela para formar nubes

Vapor de agua en la atmósfera



¿Porque se formó esta nube, si el cielo estaba claro hacía 4 horas ?

Vapor de agua en la atmósfera

Para que existan nubes el vapor de agua presente en una parcela de aire de la atmósfera debe condensar

Toda parcela de aire se caracteriza por propiedades termodinámicas:

Presión (**P**)

Temperatura (**T**)

Densidad (**ρ**)

En gral, en meteorología, las caracterizaremos además por presión de vapor de agua (**e**)

Presión de vapor de saturación

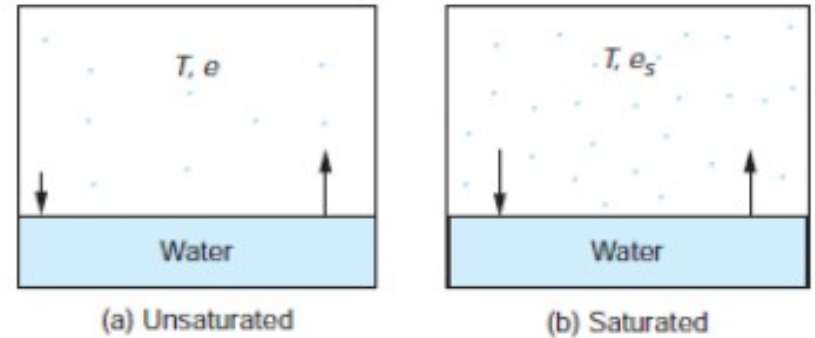
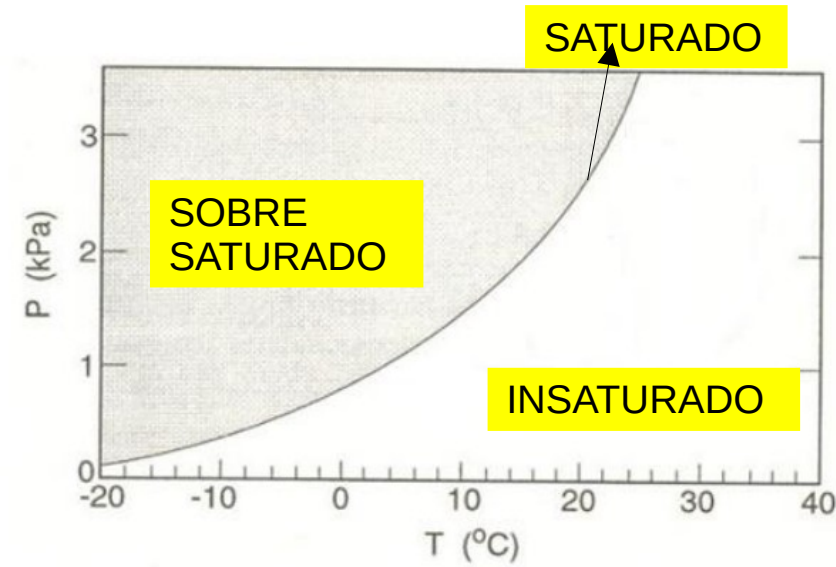


Fig. 3.8 A box (a) unsaturated and (b) saturated with respect to a plane surface of pure water at temperature T . Dots represent water molecules. Lengths of the arrows represent the relative rates of evaporation and condensation. The saturated (i.e., equilibrium) vapor pressure over a plane surface of pure water at temperature T is e_s , as indicated in (b).

Cuando **e** alcanza un punto en que la tasa de evaporación es igual a la tasa de condensación:

el aire está saturado respecto al agua a una cierta T y una e_s , (presión de vapor de saturación)

Vapor de agua en la atmósfera



- Si $e < e_s$ → parcela de aire subsaturada
- Si $e = e_s$ → parcela saturada (HR 100%) → el vapor que se le añade, condensará.
- Si $e > e_s$ → parcela de aire ha sobrepasado las condiciones de saturación. El exceso de vapor condensa y aparecen gotitas de agua.

Mecanismos a través de los cuales una parcela de aire a la temperatura T y con una presión de vapor 'e' alcanza la saturación ($e = e_s$):

- aumentando el contenido de vapor de agua
- enfriando la parcela de aire

Vapor de agua en la atmósfera

Humedad relativa (HR): cociente entre presión parcial de vapor de agua (**e**) y máxima presión de vapor (**e_s**) que podría contener a la **T** del aire en ese momento.

$$HR = \frac{e}{e_s} \cdot 100(\%)$$

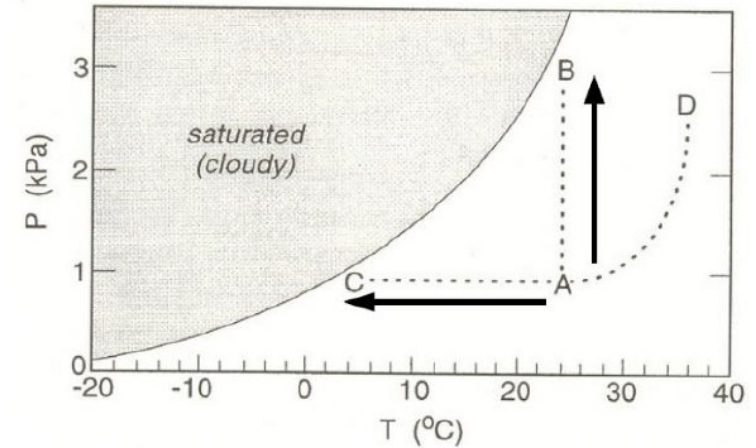
■ Si HR=100% → e = e_s : saturado

■ Si HR>100% → e > e_s : sobresaturado (excedente condensará)

HR aumenta:

(1) Manteniendo T cte (i.e., manteniendo e_s cte), aumentamos conc. de vapor de agua (aumenta e).

(2) Manteniendo el contenido de vapor de agua constante (e cte), enfriamos la parcela (si T disminuye → disminuye e_s)

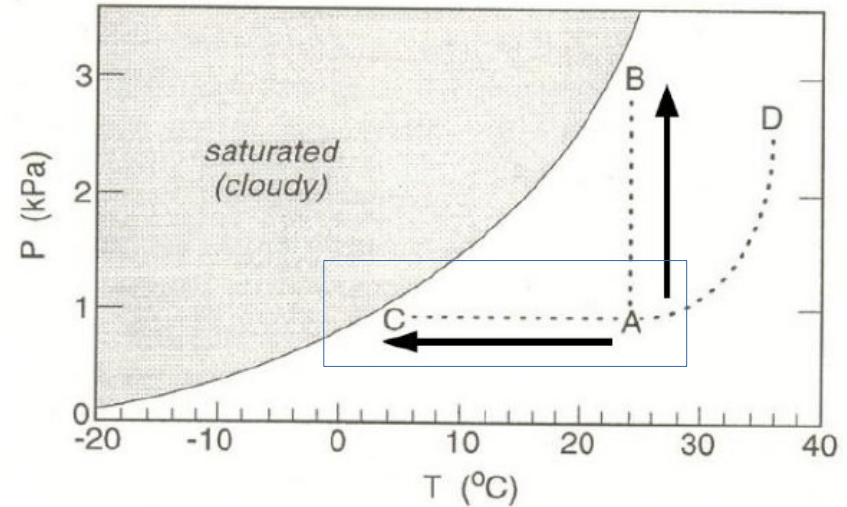


Vapor de agua en la atmósfera

Temperatura del punto de rocío (T_d):

T a la cuál habría que enfriar una parcela de aire para que manteniendo la presión parcial de vapor de agua constante (e cte), se sature ($e = e_s \rightarrow HR=100\%$).

La T_d es una medida del contenido de vapor de agua en la atm.



Vapor de agua en la atmósfera

e_s depende solo de la T y está dado por la ecuación de Clausius-Clapeyron:

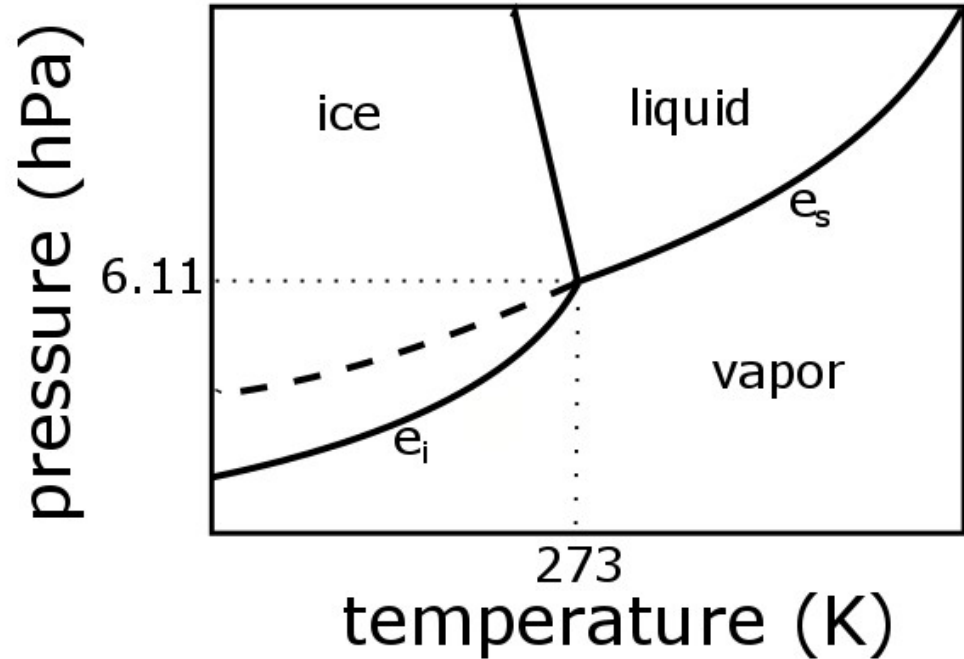
$$\frac{1}{e_s} \frac{de_s}{dT} = \frac{L_v}{R_v T^2}$$
$$e_s = e_0 e^{\left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]}$$

(si L_v se considera constante)

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

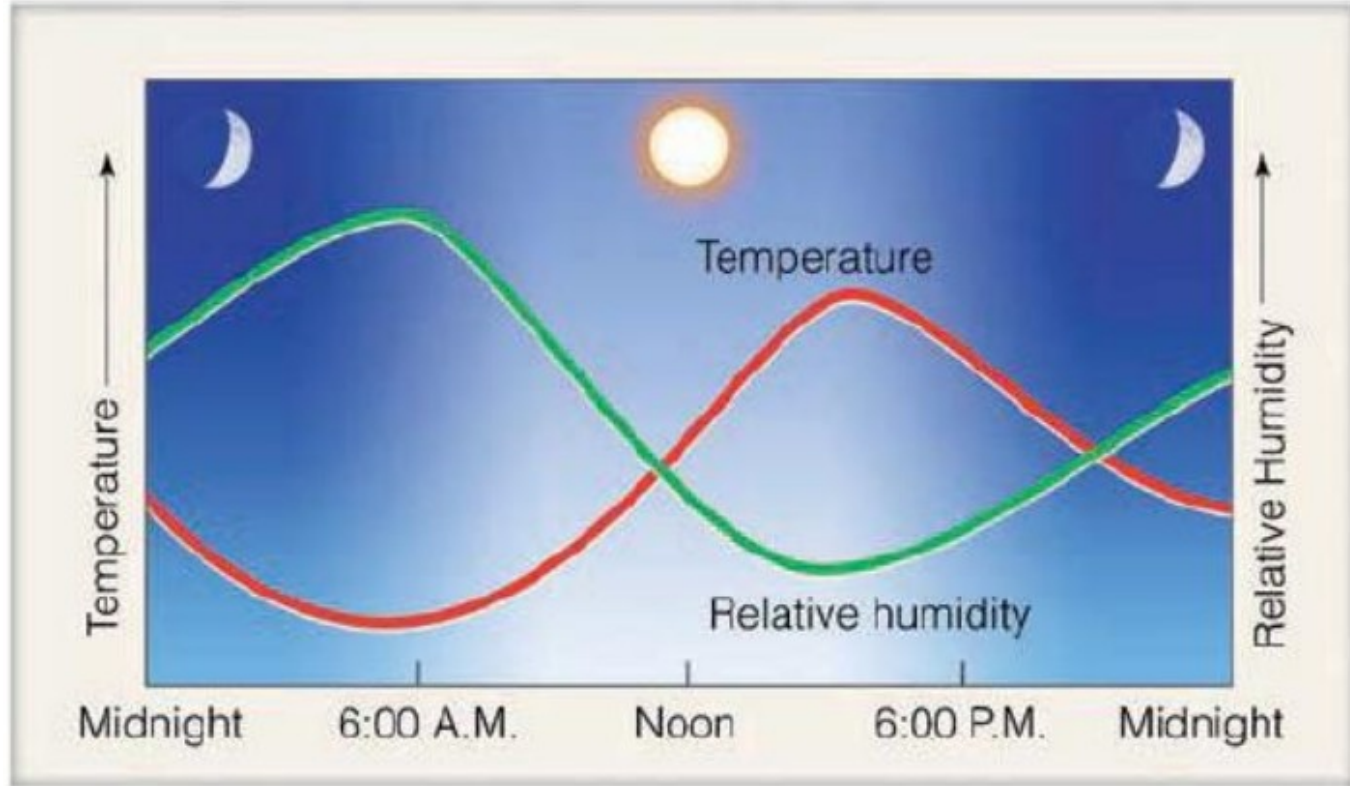
L_v = calor latente vaporización

$R_v = 461 \text{ J/kg/K}$ - cte de vapor de agua



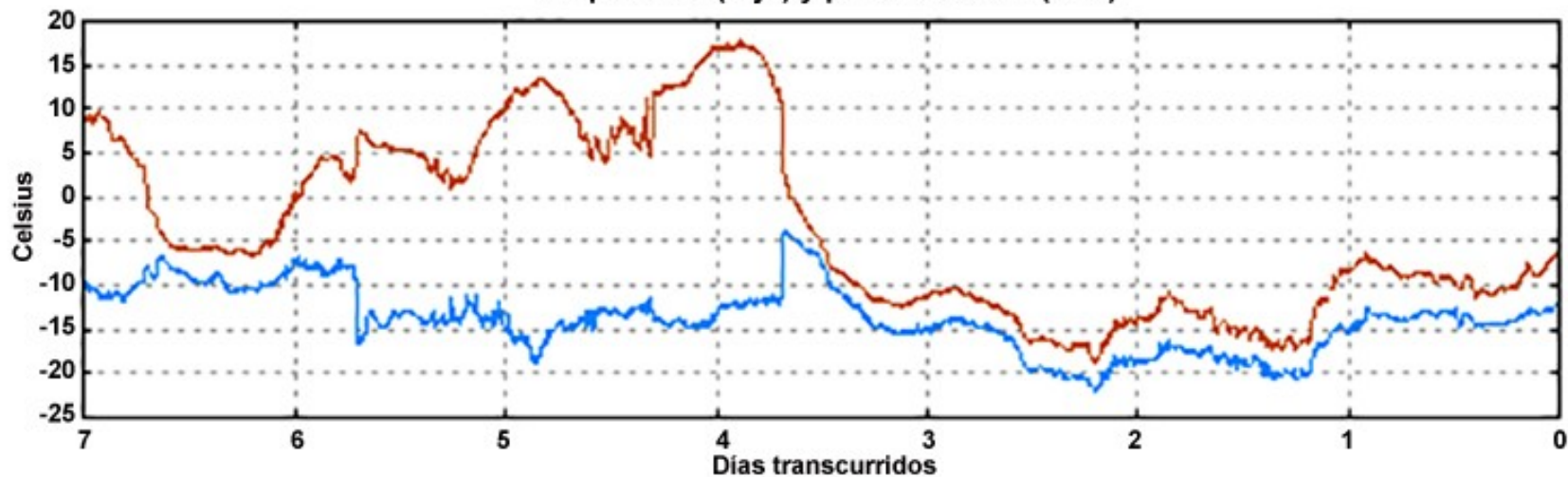
Vapor de agua en la atmósfera

Ciclo diario de humedad relativa



Vapor de agua en la atmósfera

Temperatura (rojo) y punto de rocío (azul)

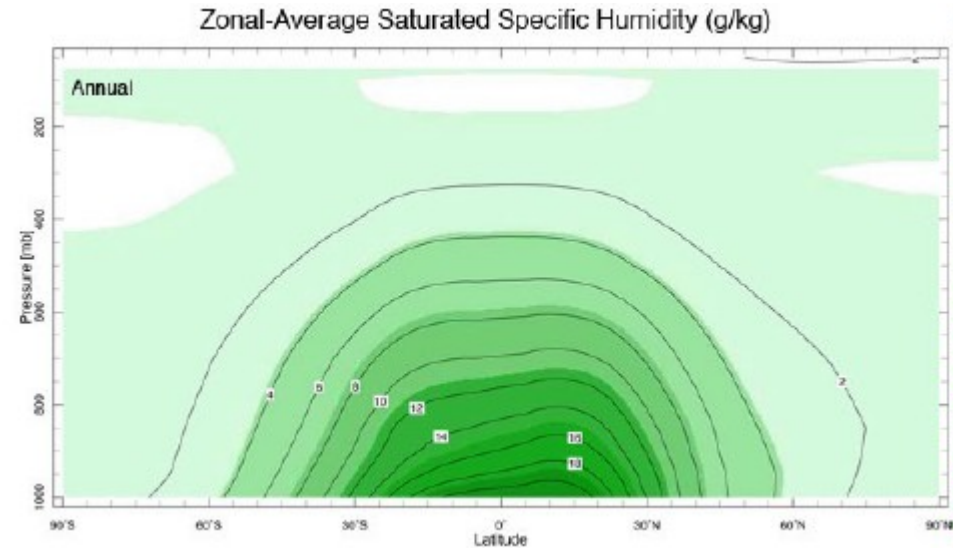
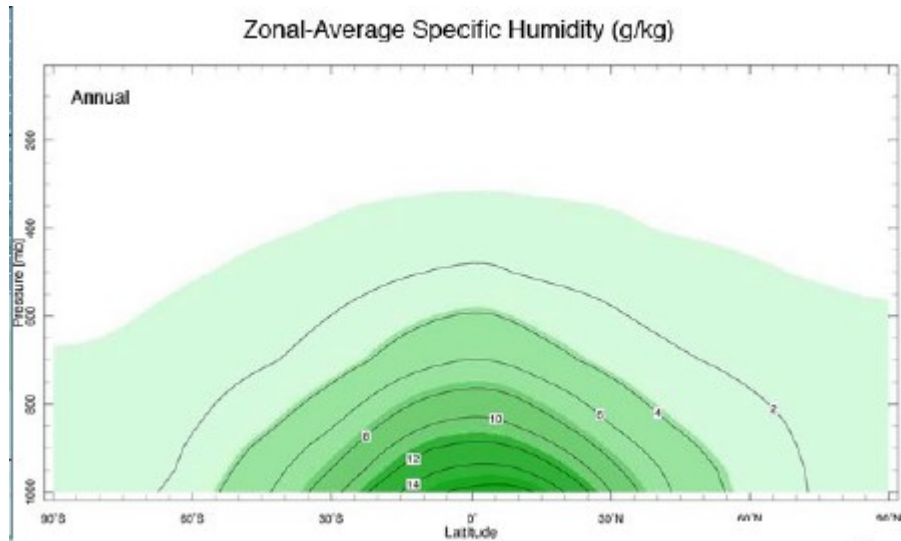


Vapor de agua en la atmósfera

Humedad específica

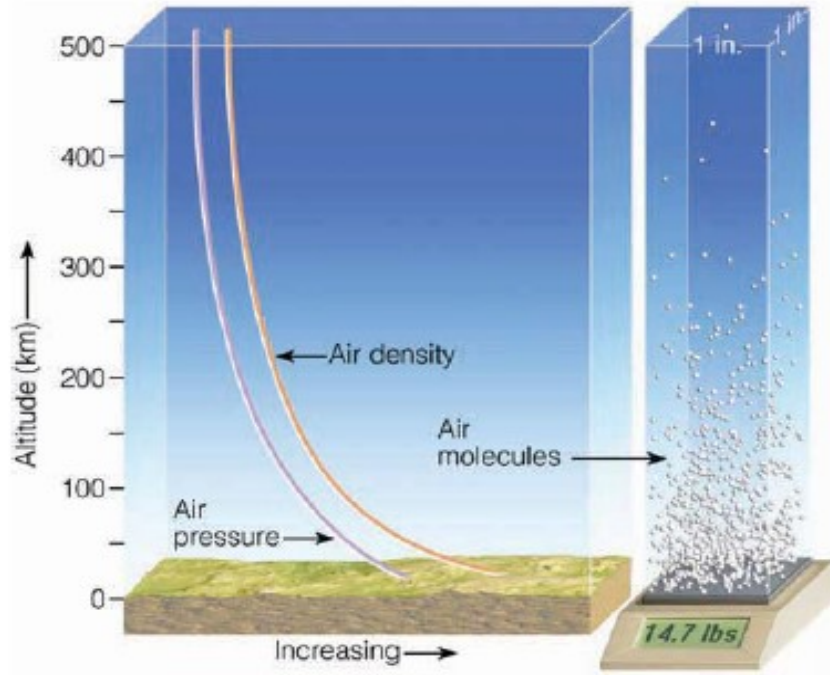
Masa de vapor de agua que tiene una parcela de aire comparado con la masa total de la parcela.

$$q = \frac{\text{masa vapor de agua}}{\text{masa total}}$$



Mientras que dicha masa no se mezcla con otras, el valor de ambos sólo depende de la evaporación/condensación de agua en su interior.

Estructura vertical: balance hidrostático



$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Si no existiera la gravedad no existiría la atmósfera

Si la densidad no es constante y sigue la ecuación de estado de los gases ideales

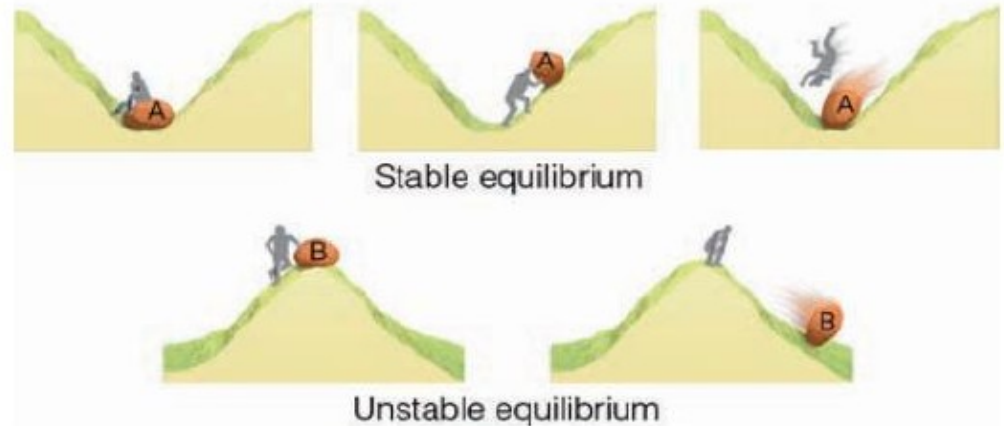
$$PV=nRT \quad P= \rho RT$$

Estabilidad atmosférica

Muchas nubes se forman conforme el aire asciende y se enfría.

Hay veces que en la atmósfera sí se producen movimientos de ascenso de aire y otras no.

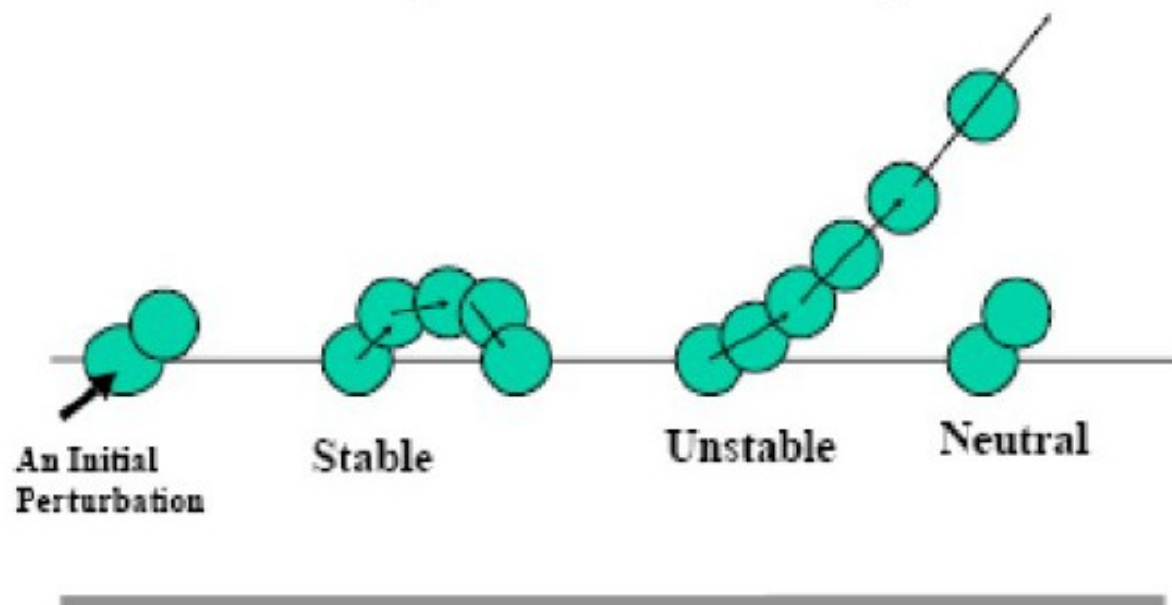
Para entender este comportamiento es necesario introducir el concepto de **estabilidad atmosférica**.



En la atmósfera el aire se encuentra en un **equilibrio estable** cuando, después de haber sido perturbado de su posición original (desplazándolo verticalmente), tiende a retornar a su posición original (se resiste a movimientos verticales de ascenso o descenso).

En la atmósfera el aire se encuentra en un **equilibrio inestable** cuando, después de haber sido perturbado con respecto a su posición de equilibrio, éste sigue alejándose.

Stability in the atmosphere



Si desplazamos la parcela de aire de su altura original puede:
Volver a su altura original : ESTABLE
Continuar su movimiento debido a su empuje: INESTABLE
Mantenerse en el lugar que fue desplazada: NEUTRO

Estabilidad atmosférica

Para determinar la estabilidad del aire hay que comparar la temperatura de la parcela con la del entorno.

La parcela de aire en la atmósfera asciende siempre y cuando su densidad sea menor a la del entorno.

- Sea ρ_{ent} la densidad del entorno. De la ecuación de estado se obtiene que:

$$\rho_{ent} = P/RT_{ent}$$

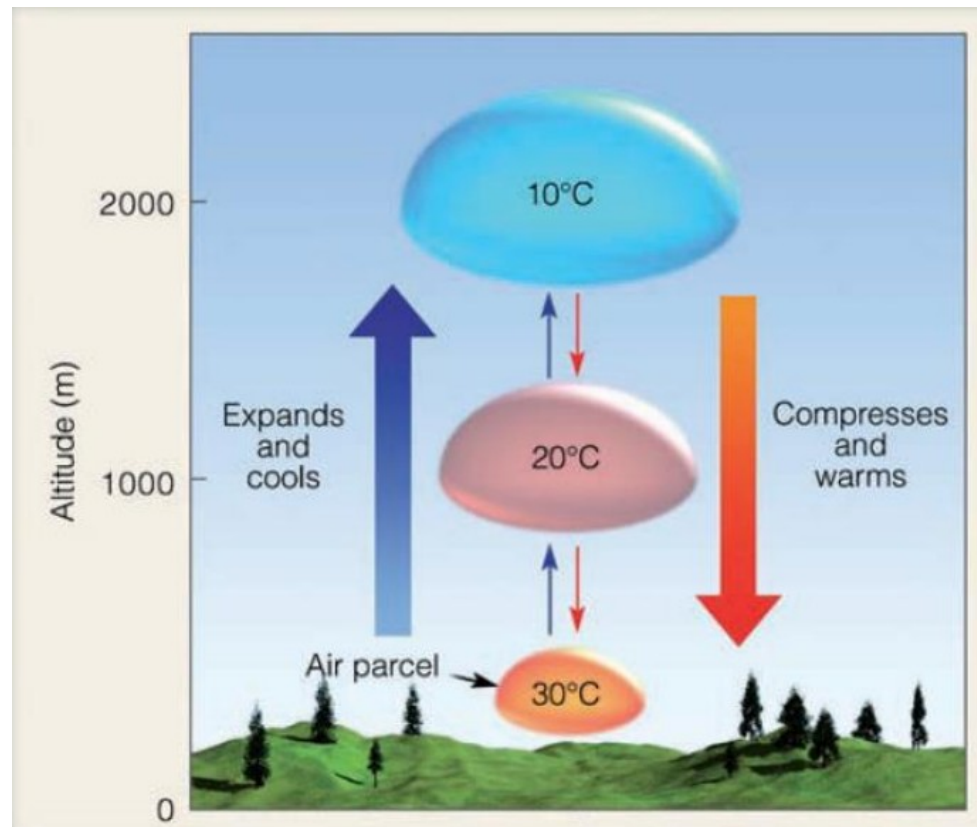
- Sea ρ_{par} la densidad de la parcela de aire, entonces:

$$\rho_{par} = P/RT_{par}$$

- Tanto la parcela como el entorno a la misma altura se encuentran a la misma presión:

❖ Cuando $T_{par} < T_{ent}$ $\rho_{par} > \rho_{ent}$

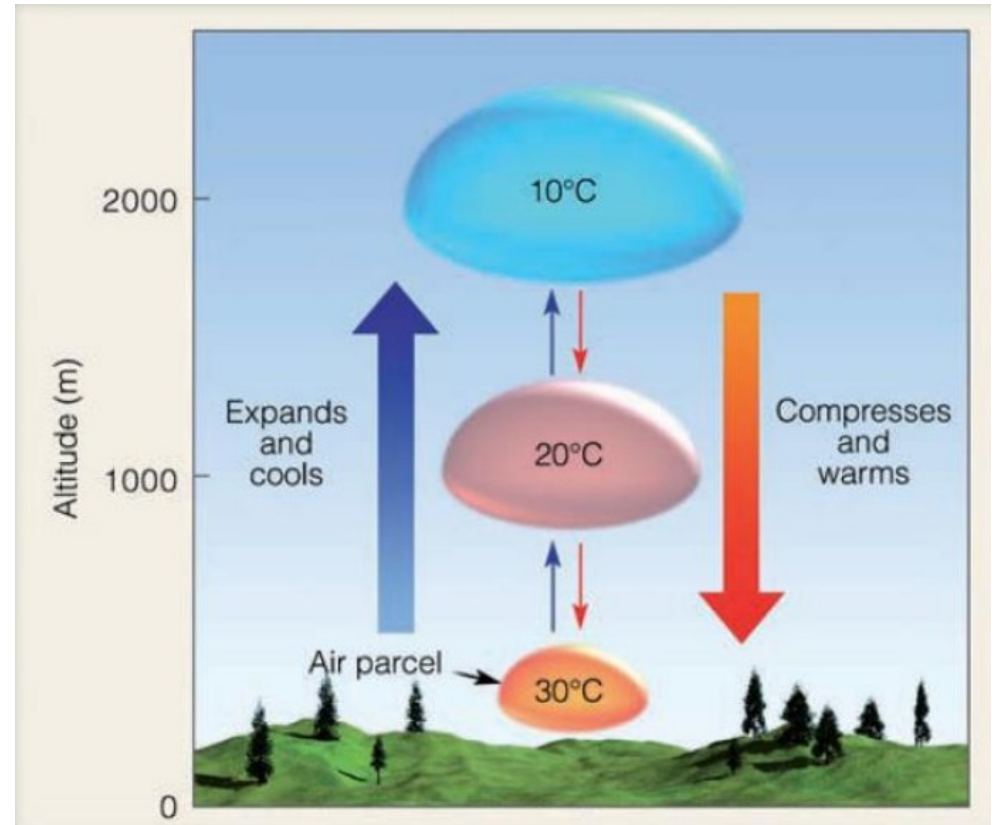
❖ Cuando $T_{par} > T_{ent}$ $\rho_{par} < \rho_{ent}$



Estabilidad atmosférica

Cuando las parcelas de aire ascienden (descienden) en la atmósfera, éstas se expanden (contraen) y como consecuencia de ello se enfría (calientan).

Si durante el proceso de ascenso y enfriamiento, o descenso y calentamiento, esa parcela no intercambia calor con el entorno, entonces se dice que el **proceso es adiabático**.



Estabilidad atmosférica

Gradientes térmicos

Tasa de cambio de T con la altura
2 gradientes térmicos:

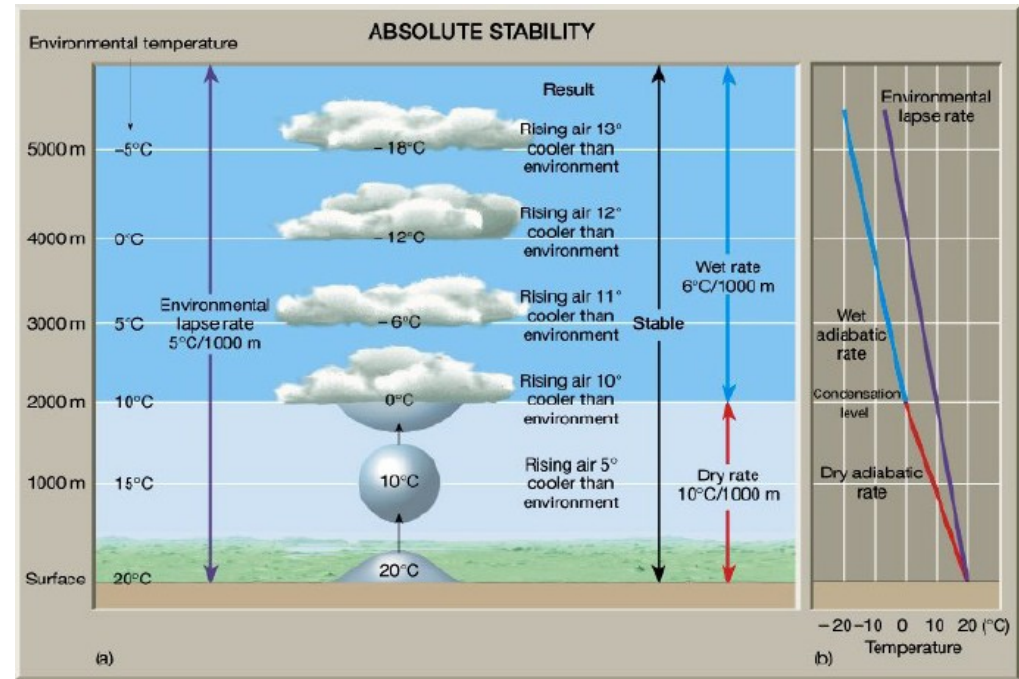
Del entorno

Medido (por ejemplo con sondeos)

De la Parcela:

Cambio de T que experimenta una parcela al desplazarla verticalmente

Se asume es adiabático



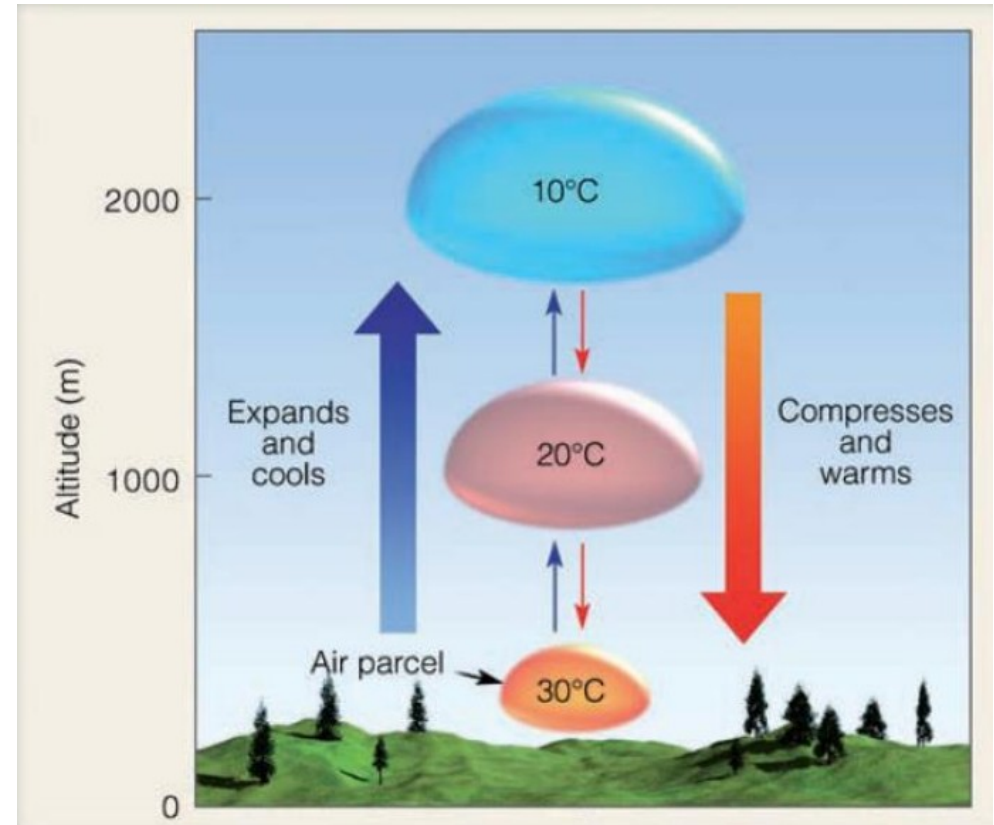
Estabilidad atmosférica

Mientras que la parcela no esté saturada ($T > T_d$), entonces la variación de la temperatura si la parcela asciende sigue el **gradiente adiabático seco** $\Gamma_d = -10^\circ\text{C}/\text{km}$.

(Constante)

En caso de saturación, la variación de la temperatura con la altura sigue el **gradiente adiabático húmedo** ($\Gamma_v = -6^\circ\text{C}/\text{km}$).

(No es constante \rightarrow se puede aproximar)



Estabilidad atmosférica

Gradientes de la parcela

Gradiente adiabático seco

Si la parcela contiene vapor de agua, pero no llega a saturar, a medida que asciende se enfría por expansión adiabática.

La parcela se enfría porque usa parte de su energía interna para expandirse y hacer trabajo sobre el entorno.

En este caso se la considera una parcela “seca” y la tasa de cambio de T con la altura está dada por $dT/dz = -9.8^\circ\text{C}/\text{km}$.

Gradiente adiabático húmedo

Si la parcela contiene vapor de agua y satura, entonces el calor liberado por la formación de agua líquida disminuye el enfriamiento por expansión de la parcela.

En este caso la tasa de cambio de T con la altura depende de la T y la p

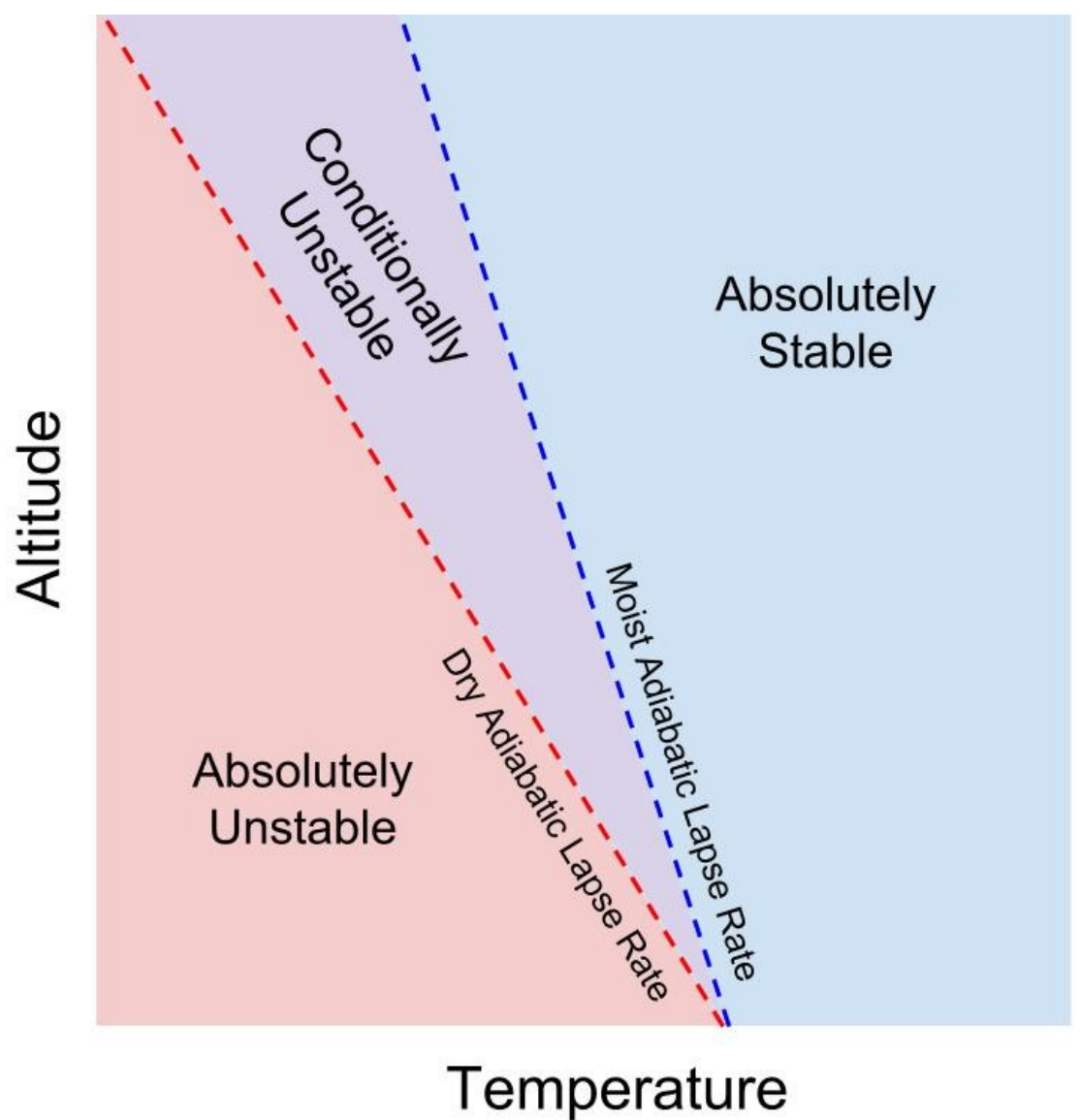
- cerca de la superficie en masas de aire húmedas $dT/dz \sim -4 \text{ C}/\text{km}$

- en la atmósfera libre $dT/dz \sim -6-7 \text{ C}/\text{km}$

Estabilidad

La atmósfera es:

- estable si la tasa de cambio del entorno es menor que el gradiente adiabático húmedo
- inestable si la tasa de cambio del entorno es mayor que el gradiente adiabático seco.
- condicionalmente inestable si la tasa de cambio del entorno se encuentra entre los gradientes seco y húmedo



Temperatura potencial θ

T que alcanzaría una parcela de aire si se comprimiera o expandiera adiabáticamente (sin transferencia de calor) hasta una P de referencia (1000 hPa)

- Ignora el cambio en T debido al trabajo realizado por o sobre la parcela
- Es constante para un proceso adiabático.
- Es proporcional al calor sensible contenido en la parcela (aumenta o decrece cuando calor sensible es adicionado o removido a través de procesos diabáticos como condensación y radiación)

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R_d/c_p}$$

$P_0 = 1000 \text{ hPa}$

$C_p = \text{calor específico a P cte aire seco}$
(1004 J/kg/K)

$R = \text{cte gases ideales}$ (287.04 J/kg/K)

Estabilidad atmosférica

En el caso de una parcela no saturada:

- La estabilidad se puede establecer calculando la temperatura potencial del entorno θ_e

$d\theta_e/dz > 0$ estable

$d\theta_e/dz < 0$ inestable

Recordar que

- Si la parcela no está saturada su θ se mantiene constante cuando se desplaza hacia arriba.
- La parcela se ajusta siempre a la misma presión que el entorno
- En la nivel inicial la parcela tiene la misma θ que el entorno.

Vapor de agua en la atmósfera/estabilidad

ejemplo

Se tienen las siguientes observaciones en superficie:

Presión 1013 hPa

Presión de vapor 825 hPa,

temperatura 15° C

Presión de vapor de saturación (a 15 °C)=1704 hPa

Calcule a partir de estos datos:

1) La humedad relativa en superficie

$$HR = \frac{e}{e_s} \cdot 100(\%) \quad \longrightarrow \quad HR = (825/1704) \cdot 100$$

$$HR = 48\%$$

Vapor de agua en la atmósfera/estabilidad

ejemplo

Se tienen las siguientes observaciones en superficie:

Presión 1013 hPa

Presión de vapor 825 hPa,
temperatura 15° C

Presión de vapor de saturación (a 15 °C)=1704 hPa

Calcule a partir de estos datos:

1) La humedad relativa en superficie

2) Si la temperatura del aire a 1000m es 8 °C, ¿cuál sería el tipo de estabilidad atmosférica?

$T_{sup}=15^{\circ}\text{C}$

$T_{1000\text{m}}=8^{\circ}\text{C}$

$\text{Grad}T_{atm}=-7^{\circ}\text{C}/\text{km}$

Una parcela que INSATURADA asciende de sup a 1000m disminuye su T 10°C/km

$T_{parcela1000\text{m}}=5^{\circ}\text{C}$

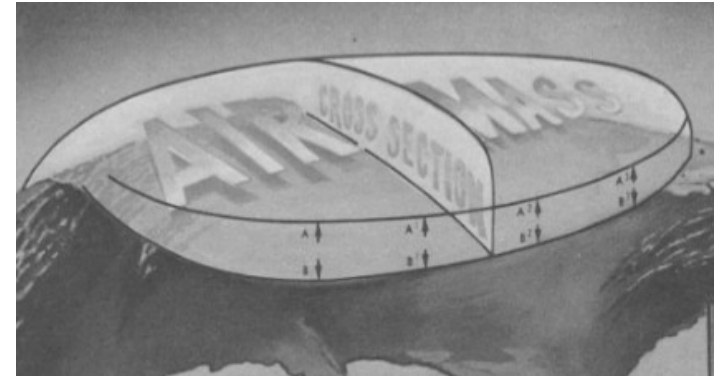
Una parcela que SATURADA asciende de sup a 1000m disminuye su T 6°C/km

$T_{parcela1000\text{m}}=9^{\circ}\text{C}$

Condicionamente inestable

(Paréntesis) Masas de aire:

- Masa de aire
 - Gran volumen de aire cuyas propiedades de **temperatura** y **humedad** se mantienen aprox. constantes en cualquiera de las direcciones horizontales, salvo en los extremos donde sufren un abrupto cambio.
 - Extensión espacial:
 - Horizontal: varios miles de km²
 - Vertical: varios km a alguna decena de km



Masas de aire:

Temperatura Potencial (θ)

Es la T que una parcela de aire seco a una Presión P y Temperatura T, tendría si fuera comprimida o expandida adiabáticamente hasta una P de referencia

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{cp}} \quad R/Cp \text{ aprox } 0.286$$

Pref=1000hPa

Es una cantidad conservativa de una parcela de aire que se mueve en la atmósfera bajo condiciones adiabáticas.

Masas de aire:

Ejemplo

Considere una atmósfera de aire seco que en superficie, a una presión de 1000 hPa registra una temperatura de 21 °C.

Si en 700 hPa la temperatura registrada en un radiosondeo es de 7°C, se podría tratar de la misma masa de aire que encontramos a 1000hPa?

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad \begin{array}{l} R/C_p \\ \text{aprox} \\ 0.286 \end{array}$$

Masas de aire:

Ejemplo

Considere una atmósfera de aire seco que en superficie, a una presión de 1000 hPa registra una temperatura de 21 °C.

Si en 700 hPa la temperatura registrada es de 7°C, se podría tratar de la misma masa de aire que encontramos a 1000hPa?

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad \begin{array}{l} R/C_p \\ \text{aprox} \\ 0.286 \end{array}$$

$$\Theta_1 = 294^\circ\text{K} (1000/1000)^{0.286}$$

$$\Theta_1 = 294^\circ\text{K}$$

$$\Theta_2 = 280^\circ\text{K} (1000/700)^{0.286}$$

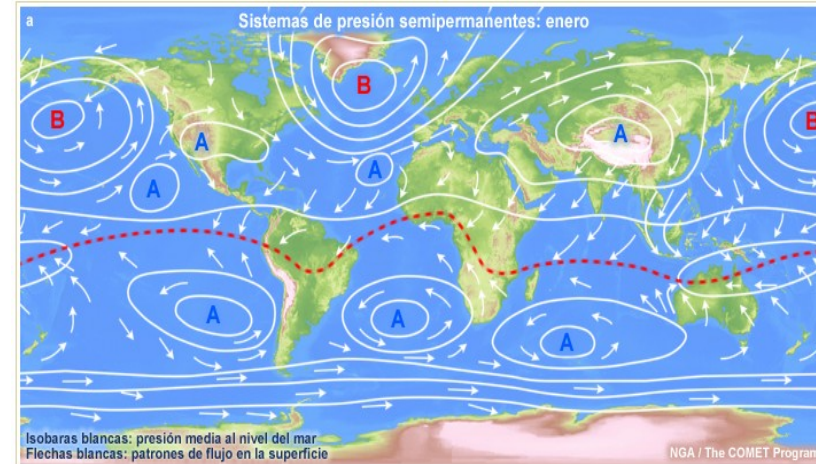
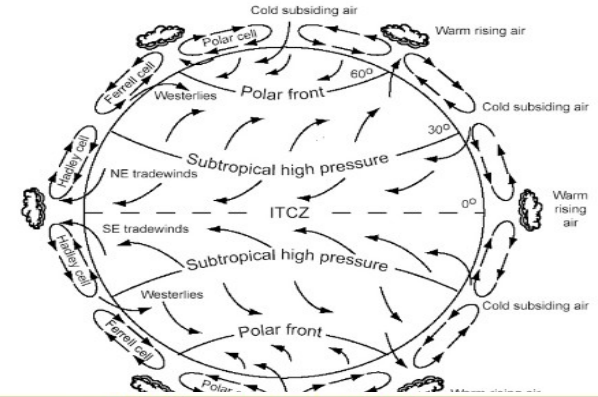
$$\Theta_2 = 310^\circ\text{K}$$

$\Theta_2 = 310^\circ\text{K} > \Theta_1 = 294^\circ\text{K}$ No se trata de la misma masa de aire

**Estabilidad
atmosférica??
(considerar,
atmósfera no
saturada)**

Masas de aire:

- ¿Cómo se forman las masas de aire?
 - Gran volumen de aire estacionado (o con movimiento muy lento) durante varios días e incluso alguna semana sobre una determinada superficie donde las propiedades de T sup y humedad son uniformes.
→ En esas condiciones, la masa de aire va adquiriendo las propiedades de dicha superficie por encontrarse en contacto con ella.



Formación de rocío, heladas, nieblas y nubes



Rocío: Gotitas de agua que se forman sobre aquellas superficies (objetos, vegetación, suelo) a primeras horas de la mañana.

Formación: en noches calmas, sin nubosidad y sin viento, cuando el aire contiene humedad.

■ Las gotitas de agua se forman cuando el aire se enfría durante la noche y el vapor se condensa sobre superficies cuya T es menor que la temperatura del punto de rocío ($T_{sup} < T_d$).

■ Los episodios en los que se forma una mayor cantidad de rocío suelen ser aquellos en los que una masa de aire cálido y húmedo se desplaza hacia zonas donde la T en superficie es muy baja.

■ Si $T_{sup} < T_d$ y esa temperatura sigue disminuyendo hasta alcanzar valores por debajo de los 0°C → las gotitas de rocío se congelan y forman la **escarcha**.

Formación de rocío, heladas, nieblas y nubes



Heladas

- **Blancas:** Se forman por sublimación de vapor de agua sobre superficies muy frías en las que la temperatura es inferior a 0°C o por condensación del rocío cuando la T_{sup} disminuye alcanzando valores negativos.

Las condiciones idóneas para la formación de heladas son las **noches frías** ($T_{\text{sup}} < 0^{\circ}\text{C}$), **sin nubes** (mas pérdida de OL al espacio \rightarrow se enfría más la superficie) **y calmas** (sin vientos).

Negras: Se producen cuando la Temperatura en la noche es inferior a 0°C y no hay humedad en el ambiente.

En estos casos, como no hay humedad en el ambiente no se forma una capa de cristales de hielo alrededor de la planta protegiéndola del frío.

Este tipo de heladas son perjudiciales porque las destruye a nivel interno. Pueden ser mortales para algunos cultivos.

Formación de rocío, heladas, nieblas y nubes

Nieblas: Concentración de pequeñas gotitas de agua líquida en suspensión en la capa de aire más cercana a la superficie

- Surgen en días calmos y noches con HR cercana al 100%. Requieren de la presencia de núcleos de condensación (aerosoles). El tamaño típico de las gotitas de niebla es 10-20 μ m.

Mecanismos de formación:

- 1) Enfriamiento de la capa de aire que se encuentra junto al suelo \rightarrow si T disminuye manteniendo 'e' constante \rightarrow la presión de vapor saturante ' e_s ' va disminuyendo hasta que $e = e_s \rightarrow$ HR=100%. Si T sigue disminuyendo $\rightarrow e > e_s \rightarrow$ HR>100% \rightarrow condensación.
- (2) Incorporación de vapor de agua al ambiente hasta que HR=100%.

Visibilidad inferior a 1km == niebla, mayor a 1km neblina. Sobre el mar: bruma

Formación de rocío, heladas, nieblas y nubes

Nubes

Para que se formen nubes: el vapor de agua debe condensar.

Según lo visto hasta ahora, para ello serían necesarias $HR > 100\%$.

Sin embargo, en la realidad observamos que con $HR < 100\%$ ya existe precipitación.

Esto es debido a la existencia de núcleos de condensación higroscópicos en la atmósfera que permiten la condensación del vapor de agua sobre ellos con $HR < 100\%$.

Esos núcleos de condensación son los aerosoles

Formación de rocío, heladas, nieblas y nubes

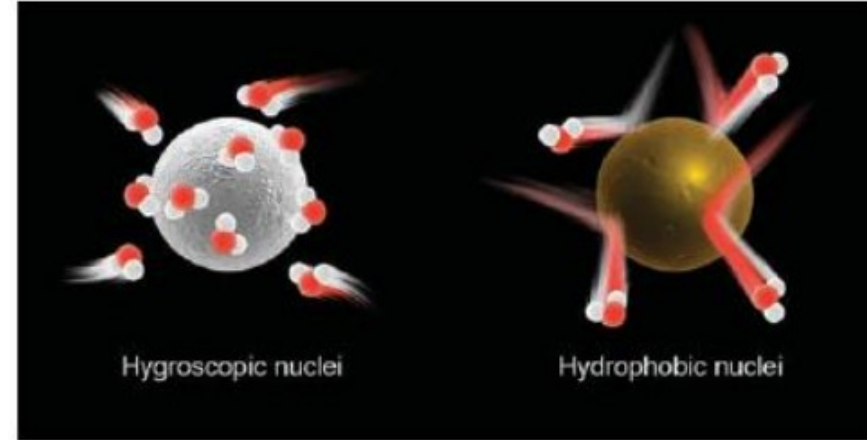
Formación de nubes → Núcleos de condensación

Tipos de núcleos de condensación:

- Aitken nuclei: $r < 0.2\mu\text{m}$
- Large nuclei: $0.2\mu\text{m} < r < 1\mu\text{m}$
- Giant nuclei: $r > 1\mu\text{m}$

¿Cómo llegan a la atmósfera?

- Polvo, erupciones volcánicas, incendios, humo de fábricas, sal marina, ...
- Principales núcleos de condensación: sulfatos
- Muy ligeros --> Pueden permanecer en la atmósfera muchos días



Formación de rocío, heladas, nieblas y nubes

Formación de nubes

Formación de gotículas

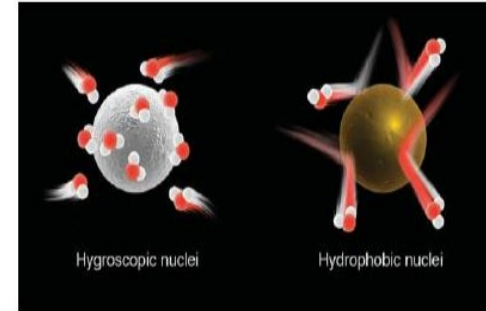
La condensación de vapor debido a supersaturación:

Nucleación Homogénea (poco frecuente)

En la atmósfera, las gotitas nubosas se comienzan a formar cuando el aire ascendente alcanza la saturación

Nucleación Heterogénea

Existencia en la atmósfera de concentraciones de partículas microscópicas, que tienen una gran afinidad con el agua y actúan como centros de condensación: núcleos de condensación



Formación de nubes

Formación de gotículas

Nucleación homogénea:

Para que una gotita sea estable se requiere una saturación muy grande, cuando la supersaturación es del 1% las gotitas cuyos radios son menores a 0.121μ son inestables y se evaporan.

Como los cocientes de saturación que son observados en la atmósfera, es del orden del 1%, la nucleación homogénea de agua a partir de vapor, es un proceso de importancia secundaria, respecto a la nucleación heterogénea.



Formación de nubes

Formación de gotículas

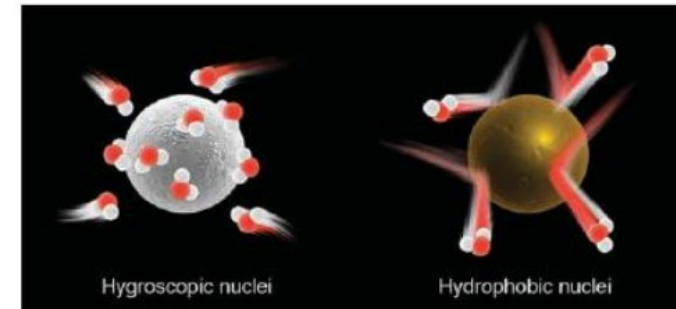
Nucleación heterogénea:

Las gotitas se forman sobre aerosoles. La velocidad de formación de las gotitas nubosas depende del nro de núcleos.

Los aerosoles se clasifican según su afinidad con el agua, en higroscópicos, neutros e hidrófobos.

La nucleación sobre un aerosol neutro requiere igual supersaturación que la nucleación homogénea; sobre un aerosol hidrófobo es más difícil y requiere mayor supersaturación.

Sobre las partículas higroscópicas, que son solubles y tienen afinidad con el agua, la supersaturación necesaria es menor que para la nucleación homogénea.



Formación de nubes

Crecimiento de gotículas

Crecimiento de una población de gotículas que llevan a la formación de una nube

Consideremos una población de gotitas: éstas compiten por el vapor de agua disponible, su velocidad de crecimiento depende de la concentración, tamaño y naturaleza del núcleo y de la intensidad de movimientos turbulentos en la nube.

Dos mecanismos explican la formación de gotas de lluvia:

- Proceso de Bergeron
- Proceso de colisión - coalescencia.

Formación de nubes

Formación de gotículas

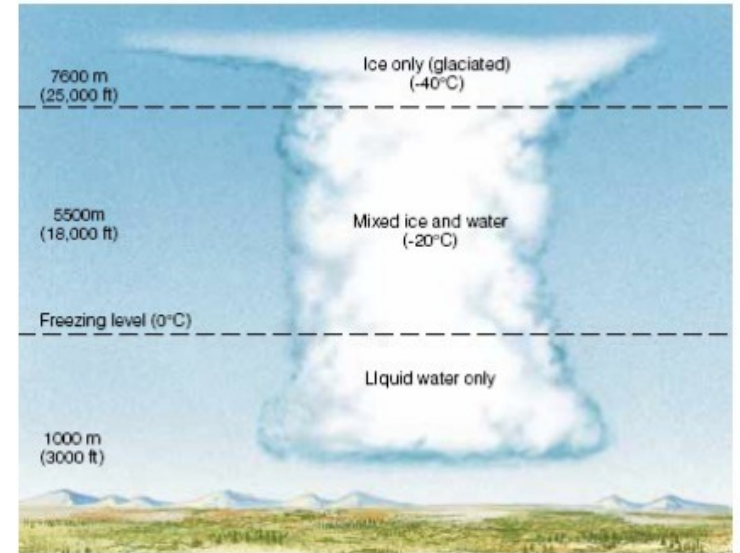
Proceso de Bergeron

Análogo a la formación de una gotícula de agua pura a partir de vapor. En aquel caso es necesario supersaturación para que moléculas de vapor se unan, a través de colisiones para formar gotículas suficientemente grandes para subsistir.

En el caso de congelamiento, debe existir bajas T para que un “*embrión*” de hielo de tamaño suficiente se forme por agregación.

El congelamiento ocurre a T mayores, cuando gotículas superenfriadas se agrupan sobre la superficie de un núcleo de congelamiento.

Éstos son menos abundantes en la atmósfera y se tornan activos a T de al menos -10°C .



T $0 - 10^{\circ}\text{C}$, Nubes compuestas de gotículas de agua líquida.

Entre -10°C y -20°C las gotículas líquidas coexisten con cristales de hielo.

Debajo de -20°C , (T de activación de muchos núcleos de deposición) las nubes consisten en cristales de hielo.

Formación de nubes

Formación de gotículas

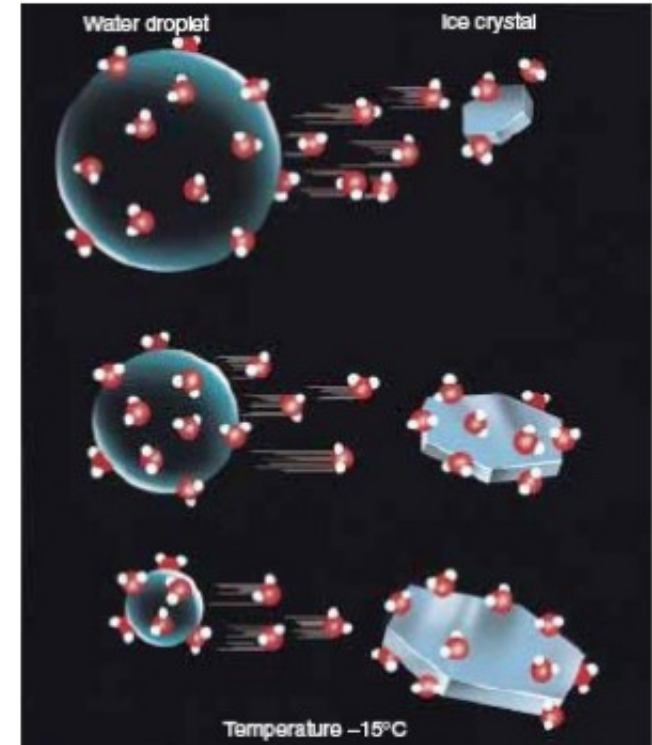
Proceso de Bergeron

Consideremos una nube con $T = -10^{\circ}\text{C}$, donde cada cristal de hielo está rodeado por muchas gotículas líquidas:

Si el aire está saturado con relación al agua líquida, está supersaturado con relación a los recién formados cristales de hielo. Así los cristales de hielo colectan más moléculas de agua por sublimación.

La deposición remueve vapor de agua de la nube, disminuye la HR por debajo de 100%, y las gotículas se evaporan.

La evaporación continua de las gotículas suministra una fuente de vapor y los cristales de hielo crecen a expensas de las gotículas de agua superenfriada



Formación de nubes

Proceso de Bergeron

Los cristales de hielo crecen y pueden comenzar a caer

Acreción:

Durante el descenso los cristales aumentan al interceptar gotículas superenfriadas de nube que se congelan sobre ellos.

El granizo es un caso extremo de crecimiento de hielo por acreción:

- Se produce en cumulonimbus, donde las corrientes ascendentes son fuertes y hay suministro de agua.
- Comienza como pequeños embriones de hielo que crecen colectando gotículas al caer a través de las nubes. Si encuentran una corriente ascendente, son levantadas y recomienzan el trayecto.
- Cada viaje a través de la región de agua superenfriada de la nube puede representar una capa adicional de hielo.

Proceso de Bergeron (o de Cristales de hielo)



Formación de nubes

Proceso de Bergeron

Agregación:

Los cristales de hielo pueden crecer colisionando y adhiriendo unos con otros, formando cristales mayores, que son los copos de nieve.

Cuando la temperatura de la superficie esta por encima de 4°C , los copos de nieve generalmente se derriten antes de alcanzar el suelo y continúan cayendo como lluvia.



Formación de nubes

Crecimiento de las gotas en las nubes

Colisión – coalescencia

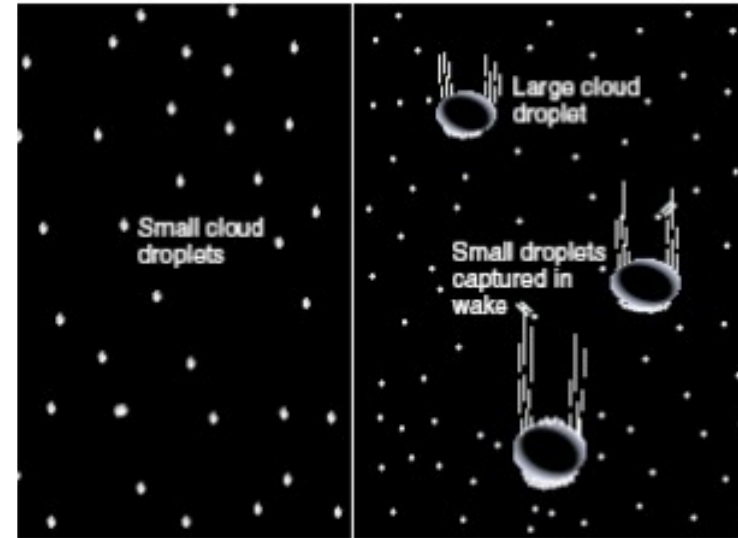
En algunas nubes con topos cálidos ($T > -15^{\circ}\text{C}$).

En combinación con procesos de Bergeron en nubes frías.

Nubes compuestas de gotículas de agua líquida precisan alcanzar diámetros $> 20 \mu\text{m}$ para que se forme precipitación.

Estas gotículas mayores se forman cuando existen partículas higroscópicas, como sal marina.

Las partículas remueven el vapor de agua con $HR < 100\%$ y pueden crecer mucho. Las gotas caen y hacen coalescencia (se combinan) con gotículas menores.



Formación de nubes

Crecimiento de las gotas en las nubes

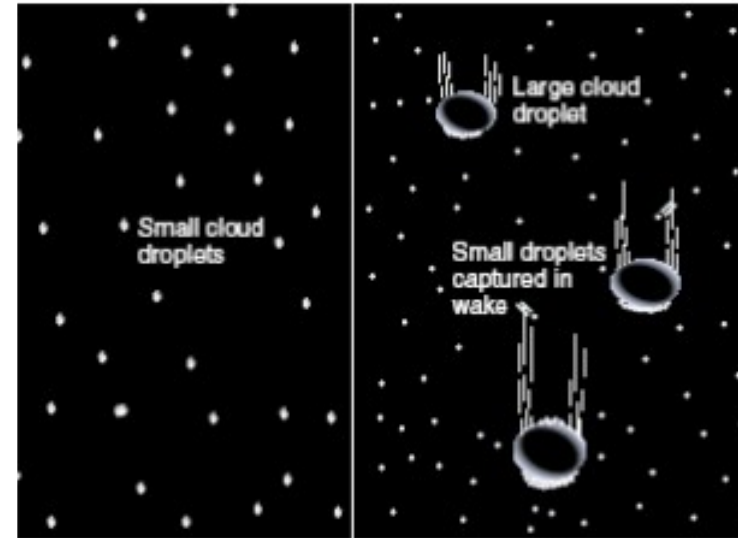
Colisión – coalescencia

Al volverse mayores, caen mas rápido, aumentando sus chances de colisión y crecimiento.

Después de varias colisiones, alcanzan tamaños para llegar a superficie sin evaporarse.

Corrientes ascendentes en las nubes favorecen, permitiendo que las gotículas atraviesen la nube varias veces.

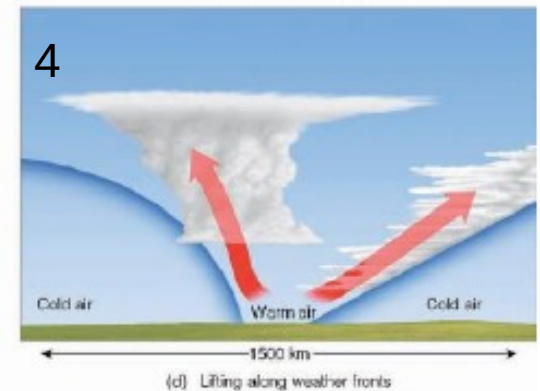
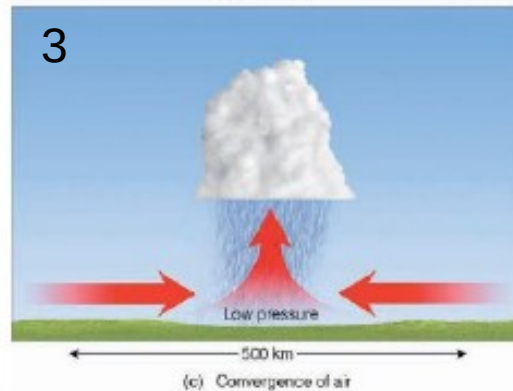
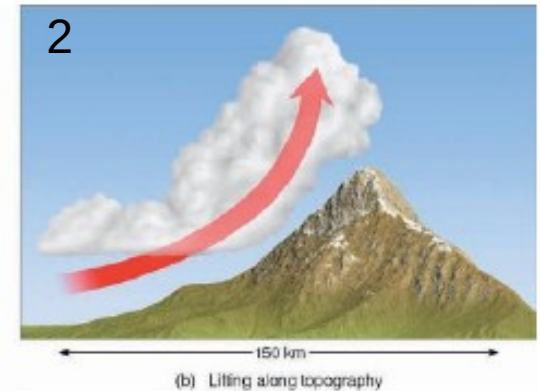
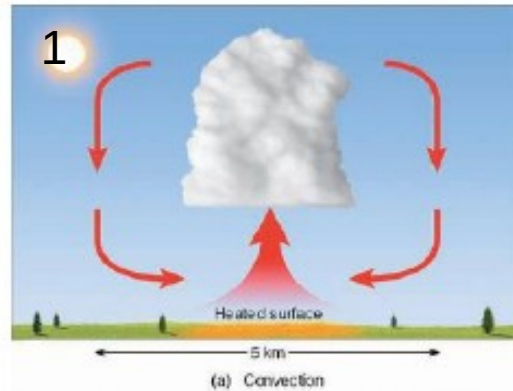
Una combinación del proceso de Bergeron y colisión-coalescencia (en nubes frías) genera gotas mayores que el proceso de colisión – coalescencia por separado (en nubes cálidas).



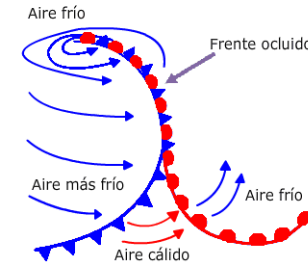
Formación de nubes

Las nubes se forman cuando el aire asciende, se expande y se enfría. La mayoría de las nubes se forman debido a:

- 1) Calentamiento en superficie y libre convección.
- 2) Ascenso de aire sobre la topografía (ej. Montañas)
- 3) Ascenso generalizado de aire debido a convergencia en superficie.
- 4) Ascensos a lo largo de los frentes

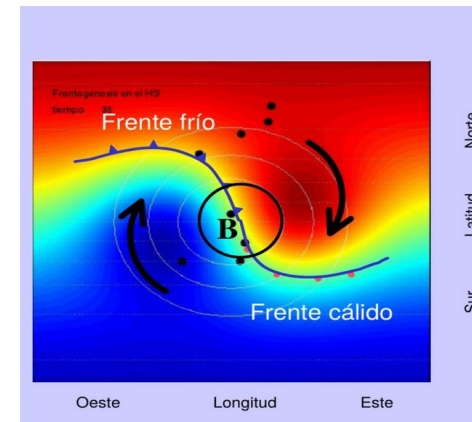


(Paréntesis 2) Frentes



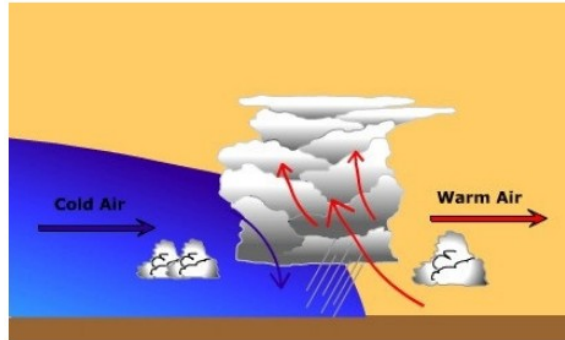
- Un frente es una zona de transición entre masas de aire con distinta T y humedad.
- Estas diferencias de T y Hum. son más marcadas que las existentes dentro de cada masa.
- Los frentes tienen varios km de espesor.

Cuando dos masas de aire con diferente densidad se juntan, se genera un proceso de convección donde el aire frío y denso desciende y el aire cálido y ligero asciende, creándose una zona de baja presión conocida como depresión frontal.

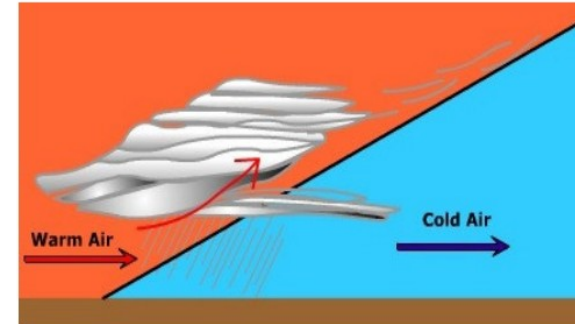


Frentes

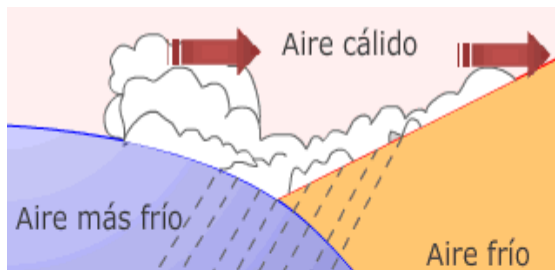
Frente frío



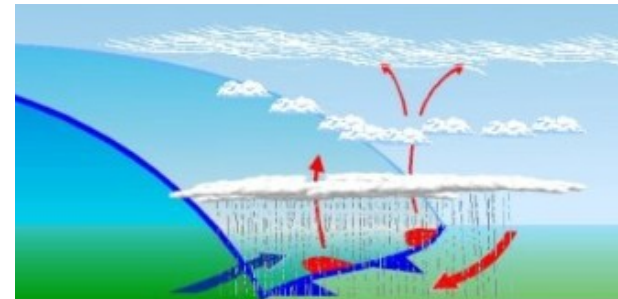
Frente cálido



Frente ocluido



Frente estacionario



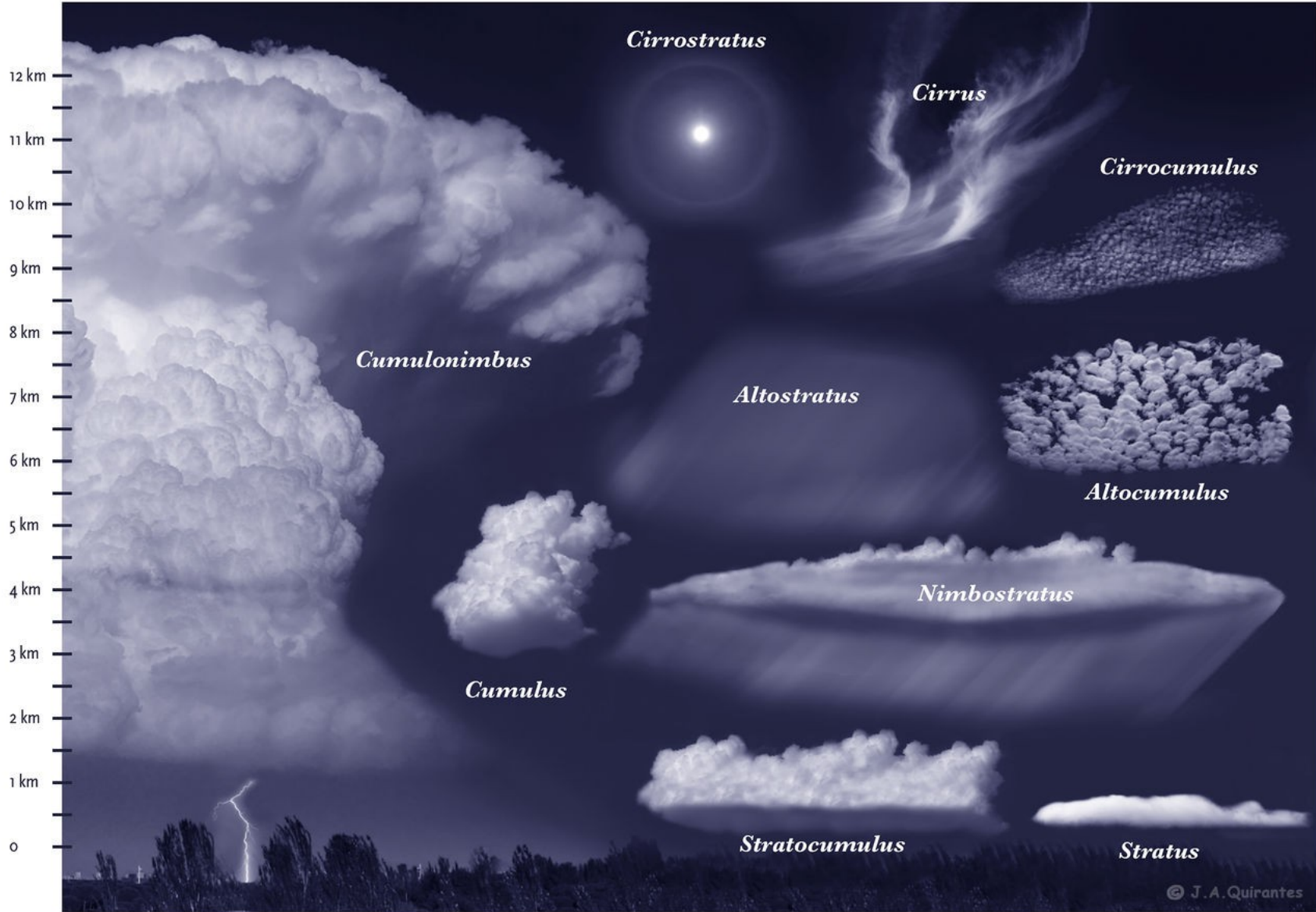
Clasificación de nubes

TABLE 4.2 The Four Major Cloud Groups and Their Types

1. High clouds	3. Low clouds
Cirrus (Ci)	Stratus (St)
Cirrostratus (Cs)	Stratocumulus (Sc)
Cirrocumulus (Cc)	Nimbostratus (Ns)
2. Middle clouds	4. Clouds with vertical development
Altostratus (As)	Cumulus (Cu)
Alto cumulus (Ac)	Cumulonimbus (Cb)

TABLE 4.3 Approximate Height of Cloud Bases above the Surface for Various Locations

Cloud Group	Tropical Region	Middle Latitude Region	Polar Region
High Ci, Cs, Cc	20,000 to 60,000 ft (6000 to 18,000 m)	16,000 to 43,000 ft (5000 to 13,000 m)	10,000 to 26,000 ft (3000 to 8000 m)
Middle As, Ac	6500 to 26,000 ft (2000 to 8000 m)	6500 to 23,000 ft (2000 to 7000 m)	6500 to 13,000 ft (2000 to 4000 m)
Low St, Sc, Ns	surface to 6500 ft (0 to 2000 m)	surface to 6500 ft (0 to 2000 m)	surface to 6500 ft (0 to 2000 m)



CIRROS

- Nubes delgadas como “hilos”
- Se forman en una atmósfera alta y fría,
- Entre 5.000 - 13.700 m, en regiones de aire estable y seco.
- Formados principalmente de cristales de hielo y pueden indicar cambios en el tiempo, (llegada de una perturbación atmosférica o un sistema frontal).
- Cuando se produce un frente frío, la masa de aire frío empuja el aire cálido hacia arriba, creando una zona de inestabilidad y dando lugar a la formación de nubes de tormenta.
- Antes de la llegada del frente frío, puede haber un aumento en la cantidad de cirros en la atmósfera debido a vientos en altura que transportan humedad a la zona donde se está formando el frente.

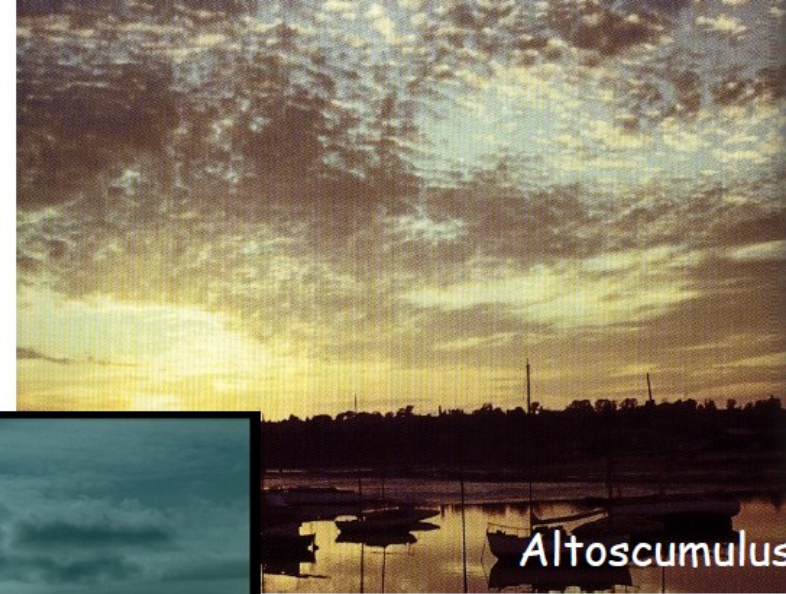
Nubes Altas



ALTOCÚMULOS

- Nubes medias (2 a 6 km).
- Se caracterizan por su aspecto esponjoso o algodonoso.
- Pueden estar compuestas por pequeñas gotas de agua o cristales de hielo, dependiendo de la T .
- Suelen formarse en patrones de bandas o rosetas, y cubrir gran parte del cielo.
- Por lo general, se forman en el frente de un sistema de baja presión y pueden ser precursoras de tormentas o precipitaciones.
- También pueden formarse en condiciones de estabilidad, y su presencia indicar que el clima será más frío o más húmedo.
- En general, no producen precipitaciones fuertes, aunque pueden producir lloviznas ligeras o nieve.

Nubes medias



NIMBOSTRATOS

- Se extienden en capas en el cielo.
- Formadas por agua líquida y cristales de hielo
- Asociados a precipitaciones, pueden persistir durante horas o incluso días.
- Se forman cuando el aire húmedo y cálido asciende y se enfría, lo que provoca la condensación del vapor de agua y la formación de nubes. A medida que las gotas de agua se unen y se hacen más pesadas, caen al suelo en forma de precipitación.
- Los nimbostratos pueden formarse en una variedad de situaciones meteorológicas, como en sistemas frontales o en áreas de baja presión.
- Producen precipitaciones sostenidas

Nubes medias



Nimbostratos

(a veces clasificados como nubes bajas y otras como nubes medias)

ESTRATOCÚMULOS

- Apariencia esponjosa y en forma de parches, que pueden parecer algodinosos o acolchados.
- Formados por gotas de agua, pueden contener cristales de hielo.
- Se pueden formar en capas sueltas o densas, y a menudo cubren gran parte del cielo. Estas nubes pueden formarse en cualquier época del año, pero suelen ser más comunes en climas templados y húmedos.
- Se forman en situaciones meteorológicas diversas, incluyendo frente fríos, sistemas de baja presión y áreas de aire estancado.
- Por lo general, estas nubes no suelen estar asociadas a precipitaciones intensas, aunque pueden producir lloviznas ligeras.

Nubes bajas

Stratocumulus



ESTRATOS

- Nubes bajas, se extienden en capas de apariencia plana y uniforme que cubren gran parte del cielo.
- A diferencia de los cúmulos, no suelen presentar relieves en su superficie. Suelen estar formadas por gotas de agua y se sitúan a una altura de entre 200 y 2.000 m.
- Suelen formarse en situaciones estables, como en áreas de alta presión o cuando una masa de aire frío se desplaza sobre una superficie más cálida. En estos casos, el aire frío impide que el aire cálido y húmedo ascienda, dando lugar a la formación de nubes planas y uniformes.
- No se asocian con precipitaciones intensas, pueden producir lloviznas.
- Se asocian con un tiempo estable y poco variable, y su presencia suele indicar tiempo nublado y fresco

Nubes bajas



Stratos

NUBES DE DESARROLLO VERTICAL

- Nubes convectivas, se forman por la convección del aire que se eleva y se enfría hasta condensar.
- Incluyen cumulonimbos y los altocumulos castellanos. Se caracterizan por presentar protuberancias y relieves en su superficie.
- Los Cumulonimbos pueden alcanzar alturas de hasta 20 km y producir intensas tormentas eléctricas, fuertes vientos y granizo. Se forman cuando el aire caliente se eleva rápidamente y se enfría a una tasa elevada, lo que da lugar a una condensación rápida y una gran liberación de energía.
- Los Altocumulus castellanus son nubes medias que tienen una forma parecida a la de los cumulus, pero se presentan a una altura mayor en la atmósfera. Se caracterizan por presentar protuberancias y relieves en su superficie, lo que les da un aspecto de castillo. Suelen ser un indicio de inestabilidad en la atmósfera y dar lugar a tormentas.



Nubes de desarrollo vertical



Lluvia

Todas las nubes contienen agua, ¿por qué algunas producen precipitación y otras no?

- Cuando la gotícula o cristal desciende por la fuerza de gravedad, la resistencia del aire crece hasta igualar la fuerza de gravedad y la gotícula cae con velocidad constante, **velocidad terminal** (mayor a mayor tamaño de gotícula).
- Esta velocidad terminal es fácilmente compensada por las corrientes ascendentes dentro de la nube, que pueden impedir que las partículas dejen la base de la nube.
- Si ellas descienden de la nube, su velocidad es tan pequeña que ellas recorrerían apenas una pequeña distancia antes de evaporarse en el aire no saturado situado debajo de la nube.

Las gotículas de nube precisan crecer lo suficiente para vencer las corrientes ascendentes en las nubes y sobrevivir como gotas o copos de nieve a un descenso hasta la superficie sin evaporarse.

Para eso, sería necesario juntar en torno de un millón de gotículas de nube para formar una gota de lluvia.

Tormentas

- Fenómeno meteorológico caracterizado por lluvias (pueden ser intensas), vientos, rayos y truenos.
- Se generan en nubes convectivas tipo cumulonimbo.
- Son consecuencia del ascenso de aire cálido y húmedo en un ambiente condicionalmente inestable.
- Cuanto más cálido es el aire de la parcela respecto al ambiente, mayor es la convección
- Mecanismos que desencadenan la convección:
 - Calentamiento desigual de la superficie
 - Topografía
 - Convergencia de vientos en superficie
 - Combinación de convergencia de vientos en superficie con divergencia en altura
 - Sistemas frontales
- Con frecuencia, las tormentas se generan cuando el aire cálido asciende a lo largo de un sistema frontal aunque varios de los mecanismos anteriormente mencionados pueden operar.

Tormentas

Tipos

■ Ordinarias o unicelulares:

- Se forman en días cálidos y húmedos, lejos de sistemas frontales y donde la cizalla vertical es leve
- Expansión horizontal 1km aprox.
- Ciclo de vida 1 hr aprox.
- Raramente generan algún tipo de fenómeno de tiempo severo

■ Multicelulares

- Constituidas por varias celdas (cumulonimbos, pudiendo estar cada una de ellas en diferentes estadios de su ciclo de vida)

■ Superceldas

- Se forman en aquellas regiones donde el viento en altura es muy intenso y rota
- Este aspecto rotacional es el que permite el desarrollo de tornados
- Ciclo de vida puede durar varias horas



Tormentas

Ciclo de vida de célula de tormenta

■ Crecimiento:

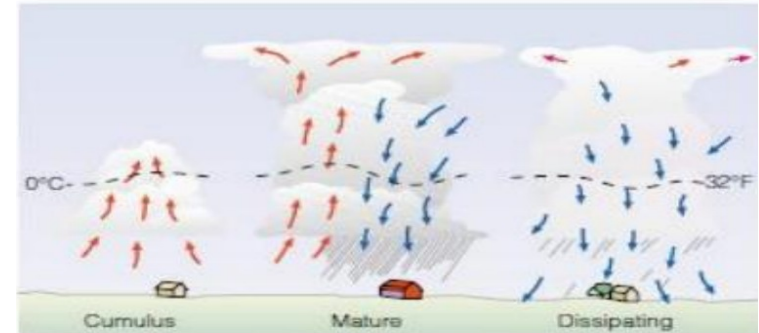
- Fuertes corrientes ascendentes.

■ Madurez:

- Las gotas de agua caen de la base de la nube.
- Sus dimensiones y su concentración son demasiado elevadas para que las corrientes ascendentes puedan sostenerlas.
- Continúan existiendo corrientes ascendentes
- Cuando el aire descendente alcanza la proximidad del suelo se ve forzado a extenderse horizontalmente, produciendo, ráfagas. En esta corriente, la temperatura es mas baja que la del aire que la rodea.

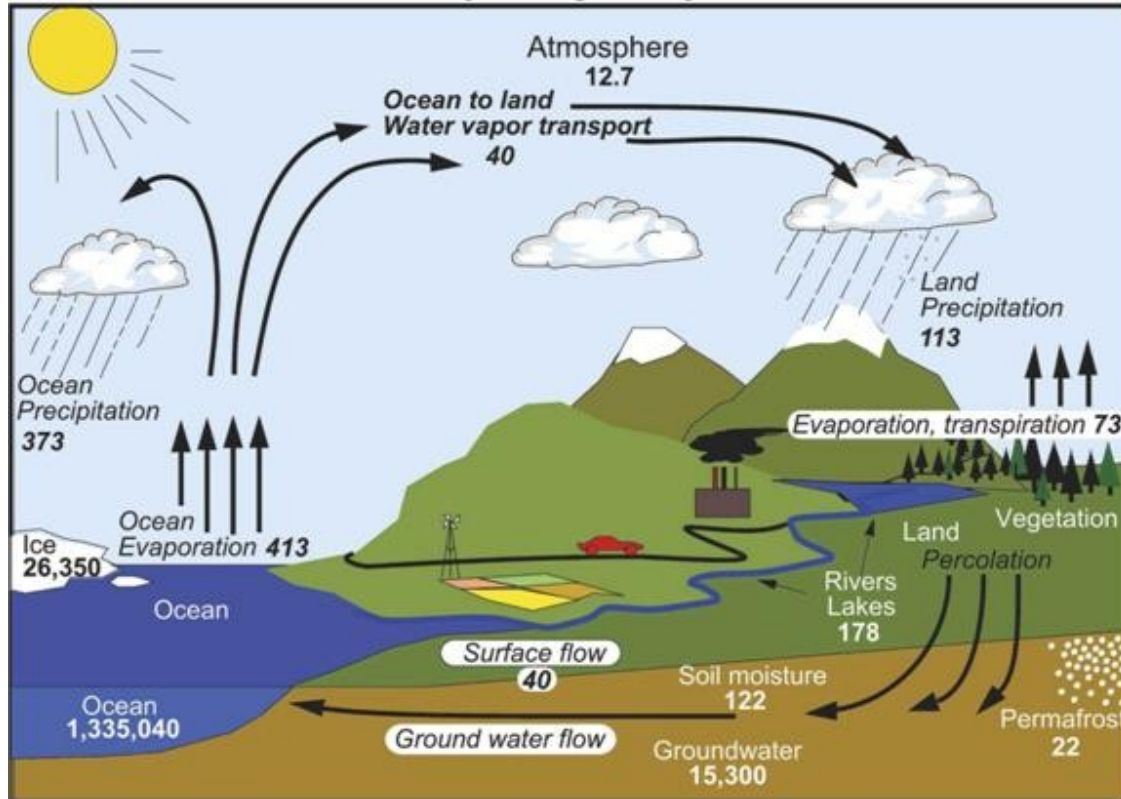
■ Disipación:

- la corriente ascendente desaparece.
- La corriente descendente abarca la totalidad de la célula
- Esta corriente se debilita cuando cesa la formación de gotas de agua y partículas de hielo.
- Mientras la lluvia y la corriente descendente persistan, la célula tormentosa es más fría que el aire que la rodea.



Ciclo Hidrológico

Balace de agua en la superficie



Algunos números

Cantidad de agua (1 año) que mueve el ciclo hidrológico, equivale a 1m de agua distribuido en toda la sup. Terrestre.

**La energía requerida para evaporar 1 m de agua = 80 W/m^2
 $L_v=2453 \text{ kJ/kg}$**

Si toda el agua de la atmósfera condensara, representaría 2.5 cm

**La atmósfera remueve por precipitación aprox. 40 veces al año
(tiempo de residencia del agua: 9 días)**

Vapor de agua aprox. 50% efecto inv.

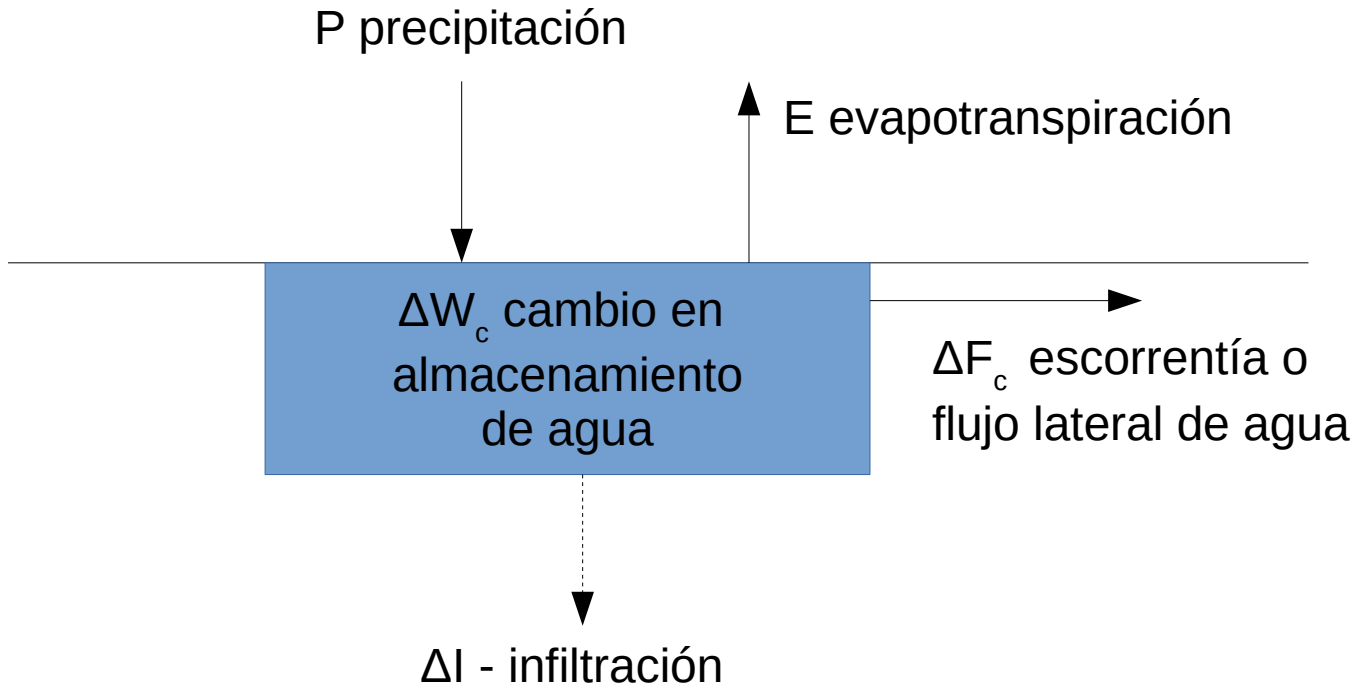
Nubes: aprox .30% efecto inv. y 50% albedo

Ecuación de balance de agua

- Una región donde anualmente la evaporación es mayor que la precipitación (más escorrentía) tendrá una pérdida anual de agua.
- Las zonas subtropicales de los océanos son grandes fuentes de vapor de agua para la atmósfera.
- La región de la zona de convergencia tropical, en cambio, es una zona de continuo flujo de vapor de agua de la atmósfera a los océanos.
- Sobre los continentes, las regiones subtropicales también tienden a tener un balance hídrico negativo (muchos de los desiertos están aquí), mientras que en latitudes mayores a 40° el balance es positivo.
- Nuestro país, a pesar de estar en la región subtropical tiene un balance hídrico anual positivo. A una latitud similar Chile tiene un balance hídrico negativo que contiene el desierto de Atacama, el mas seco del mundo

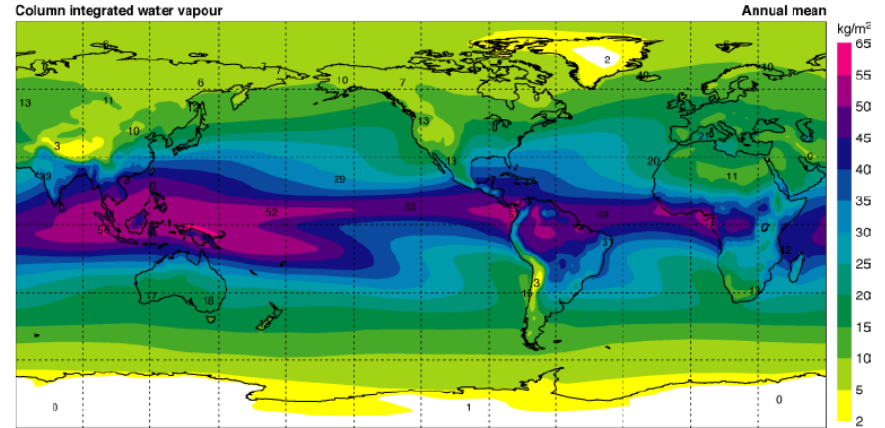
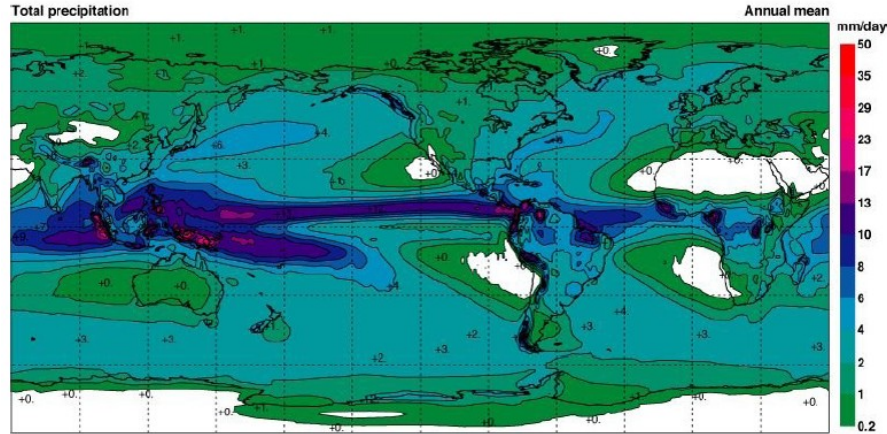
Balance de agua en la superficie de continente

$$\Delta W_c = P - E - \Delta F_c - \Delta I$$



Ecuación de balance de agua

Vapor de agua en la columna es similar a la distribución de precipitación



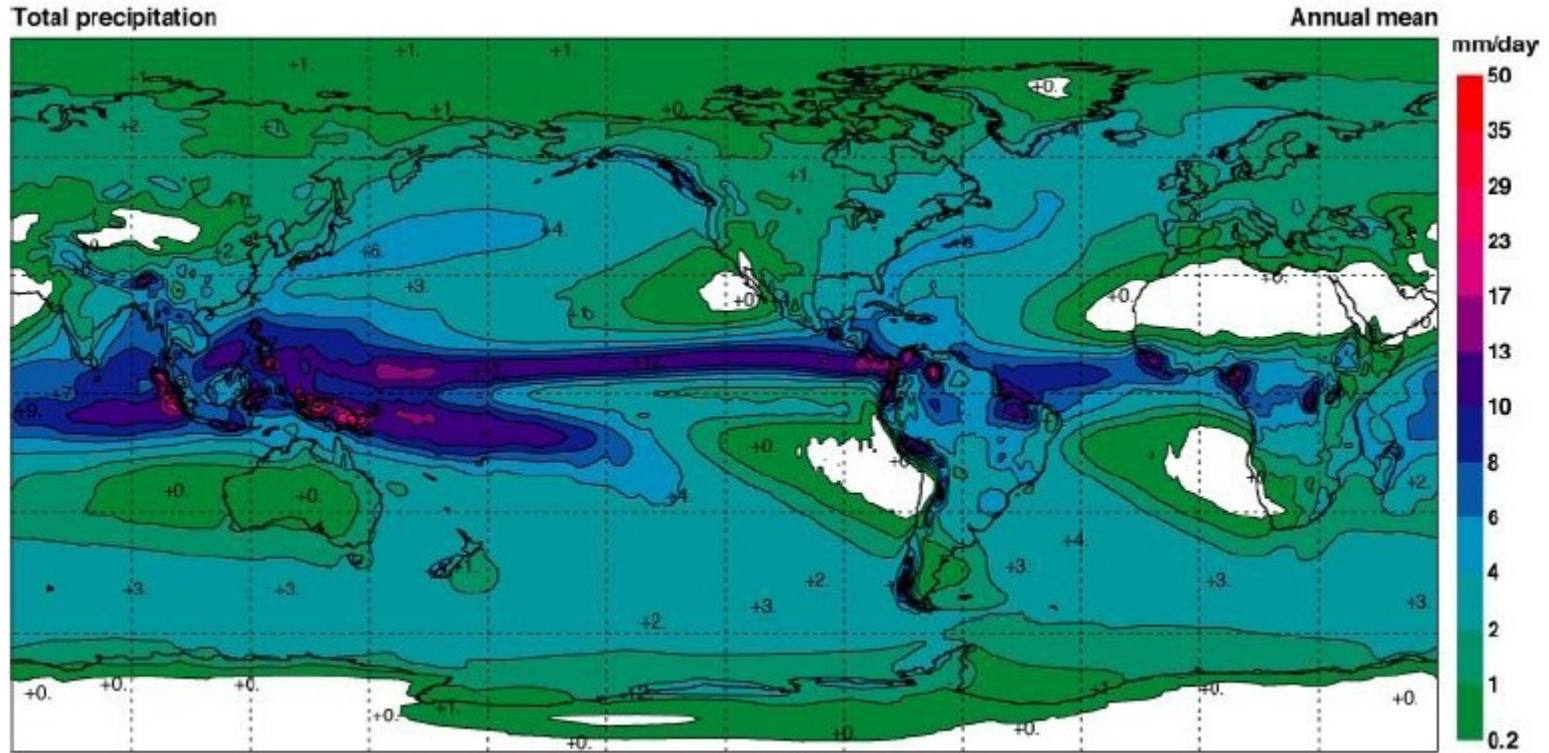
A través de los procesos de evaporación, sublimación y transpiración, el agua pasa de los océanos (y también de continentes y vegetación) a la atmósfera.

Una vez en la atmósfera, el vapor de agua:

- es transportado y redistribuido por los vientos
- condensa y/o congela para formar nubes

Ecuación de balance de agua

Precipitación



Ecuación de balance de agua

Precipitación

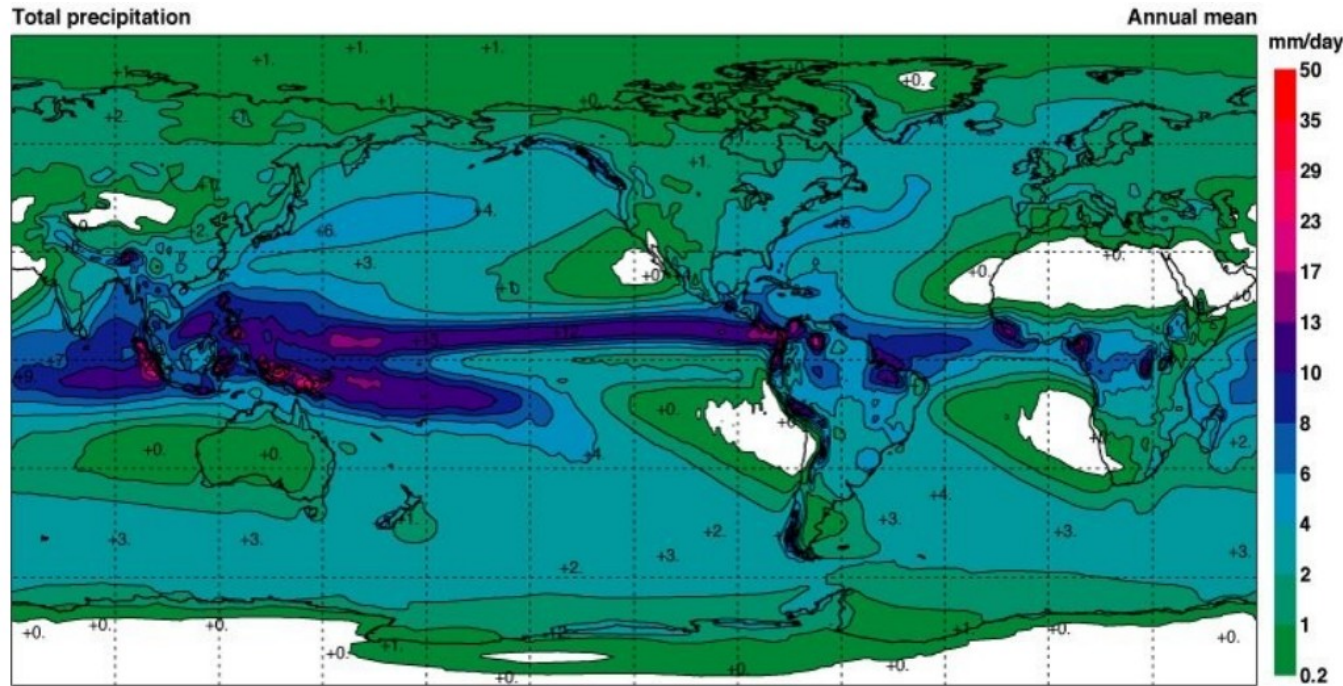
Decrecimiento de la precipitación desde el ecuador hacia los polos.

Zonas ecuatoriales oceánicas: regiones con las máximas pp (ZCIT).

20-30 ° latitud: escasas pp (anticiclones subtropicales semipermanentes)

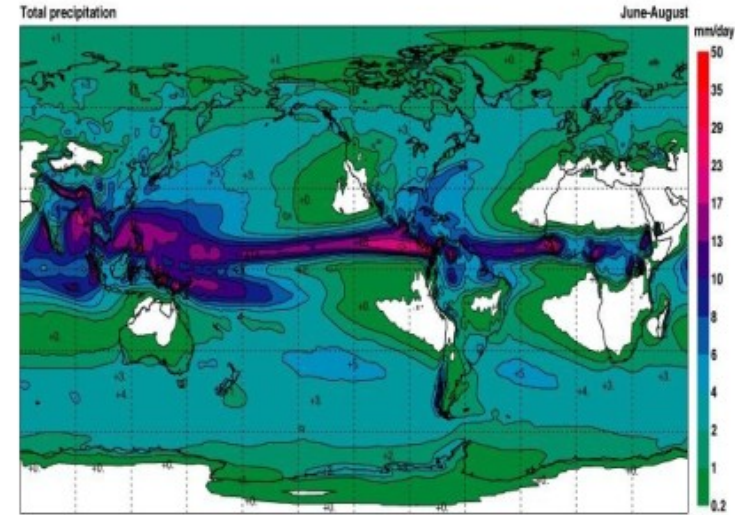
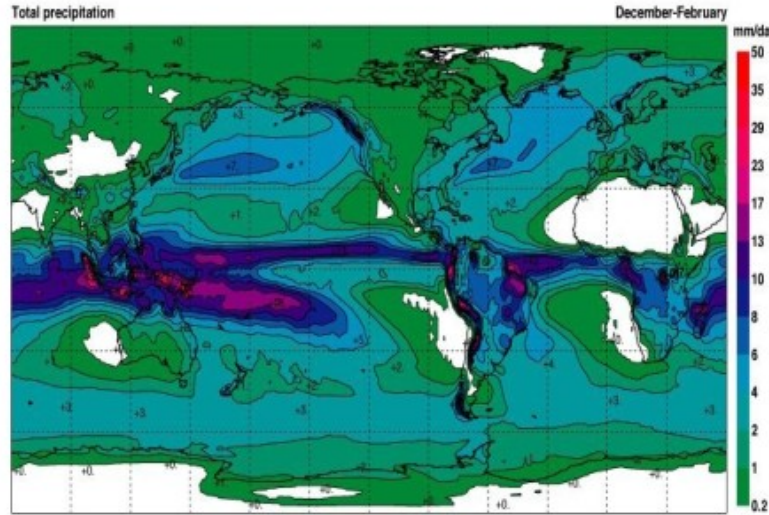
Bordes occidentales de los continentes presentan en gral. Menores pp que los bordes orientales.

Entre los 50-60° de latitud, especialmente sobre los océanos se observa un nuevo incremento de las pp debido a pasajes de sistemas de bajas presiones (cinturón polar de bajas presiones), que luego decrecen hasta los polos (alta polar).



Ecuación de balance de agua

DIC-FEB

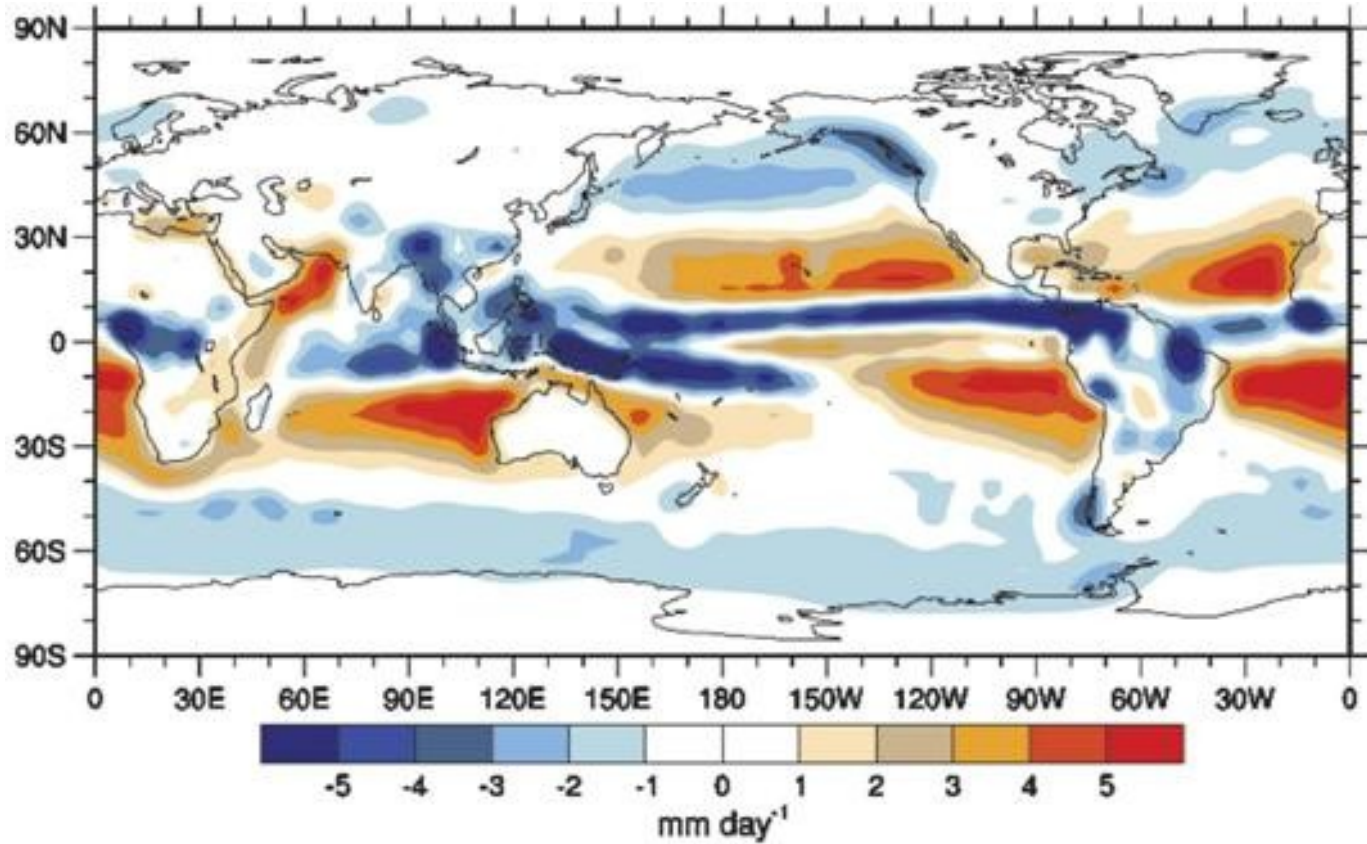


JUN-AGO

- la existencia del monzón de verano en la India.
- la existencia de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur en Sudamérica y de la Zona de convergencia del Pacífico Sur en DEF.
- el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical.
- la existencia de máximos de precipitación en los extra-tropicos durante los hemisferios de invierno. Estos máximos tienden a ocurrir al este de los continentes.
 - la migración de la convección sobre América del Sur asociado a la Zona de Convergencia Intertropical.

Ecuación de
balance de agua

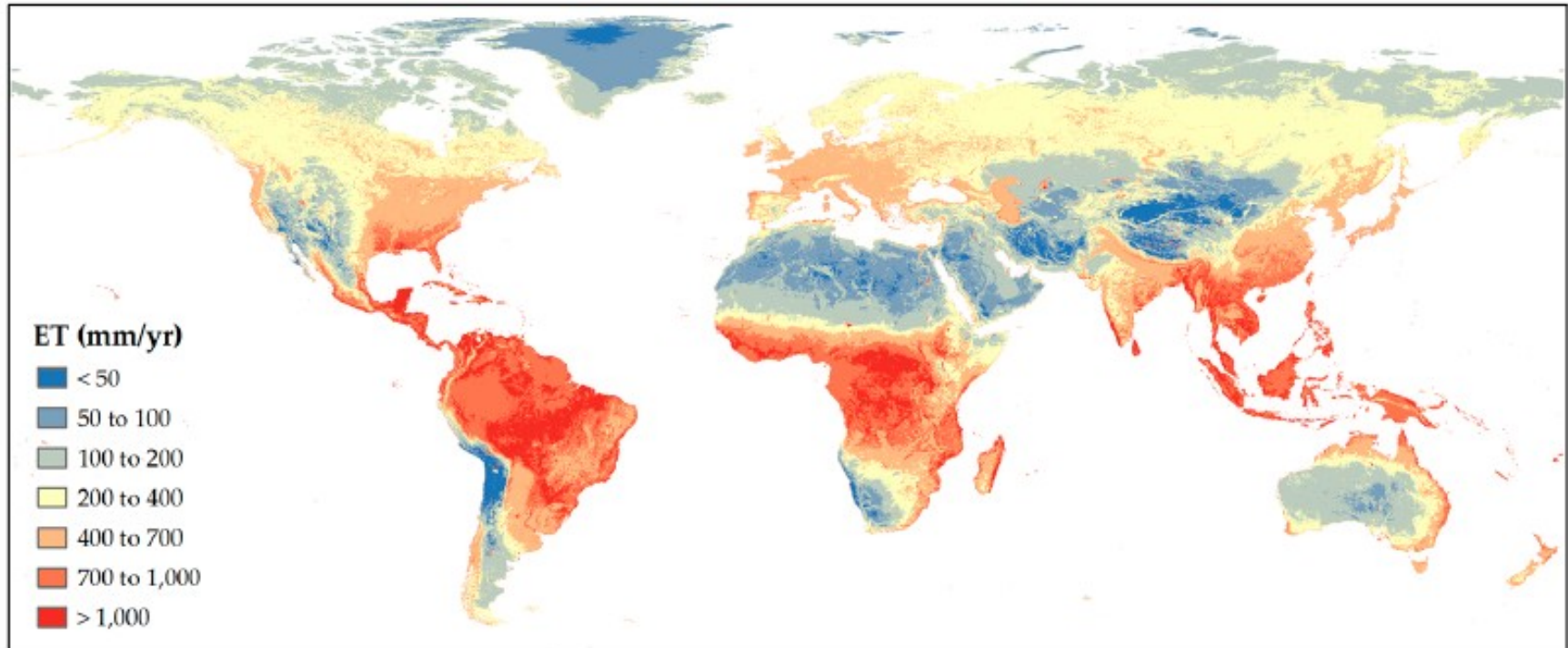
Evaporación - Precipitación



Ecuación de balance de agua

Evapotranspiración

Suma de todos los procesos que controlan la evaporación desde el suelo, vegetación y cuerpos de agua, y de la transpiración de las plantas.



Ecuación de balance de agua

Evaporación

$$E = -\rho C_w |v| (q_a - q_s)$$

ρ - densidad del aire

v - velocidad del viento

q_s - humedad específica de saturación a la T del mar

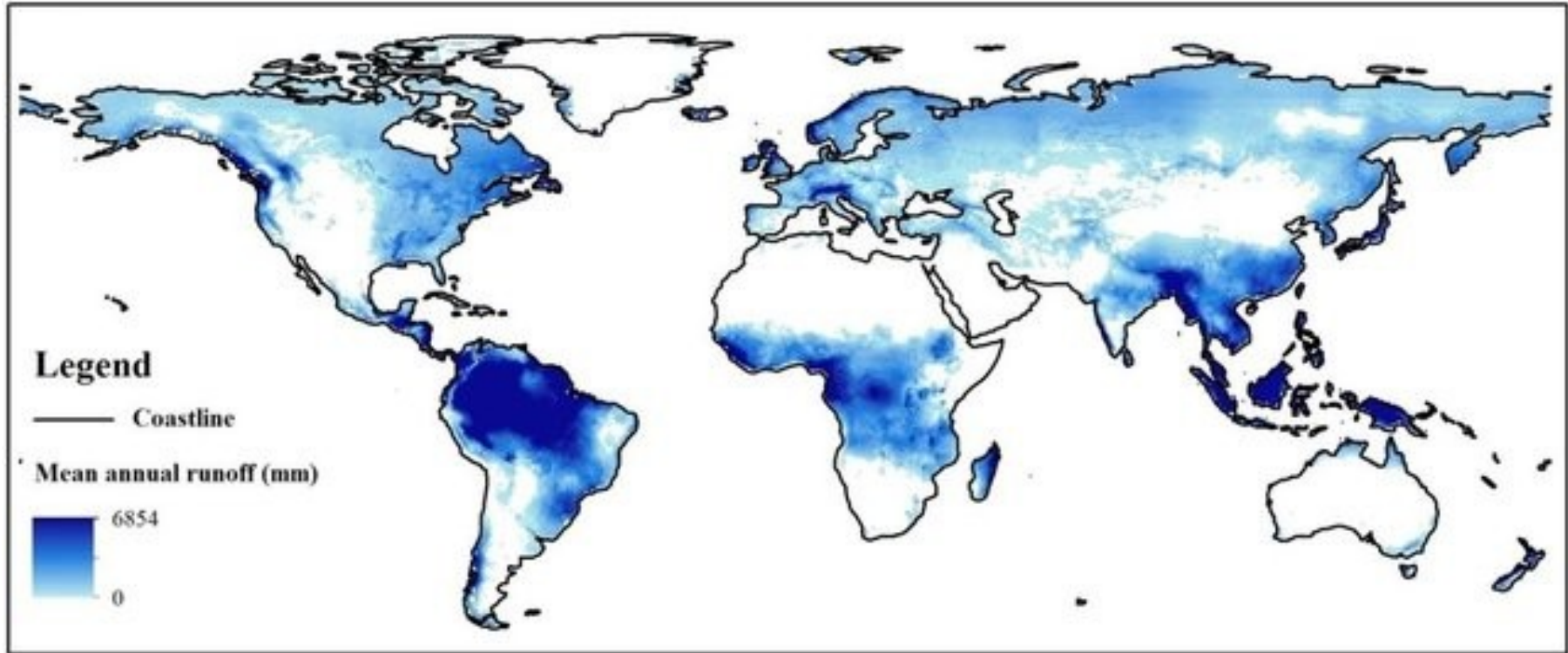
q_a - humedad específica del aire a 10m de la superficie

C_w - coeficiente de difusión turbulenta

(asociado a la rugosidad de la superficie)

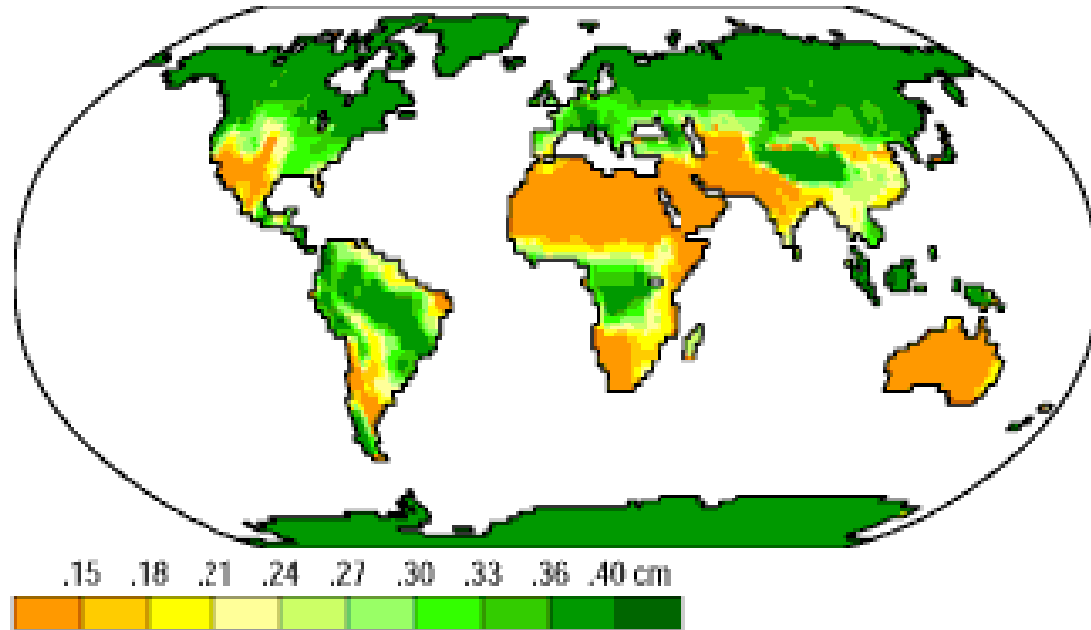
$$q = \frac{\text{masa vapor de agua}}{\text{masa total}}$$

Escorrentía



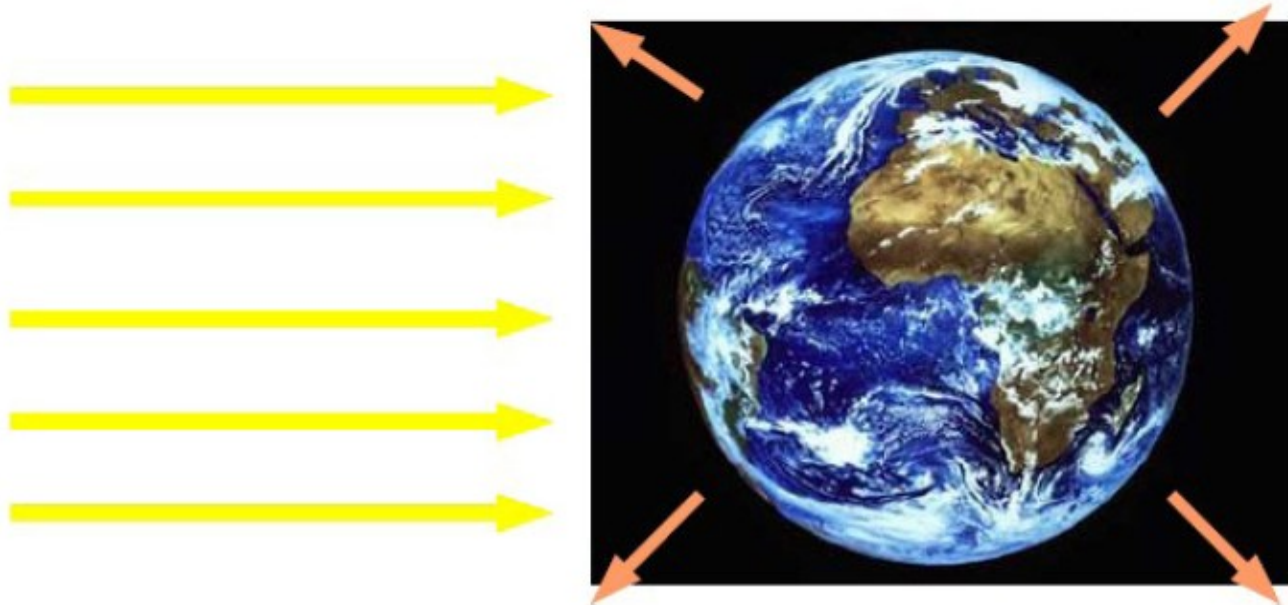
Humedad del suelo

Soil Moisture



De que depende la intensidad del ciclo hidrológico?

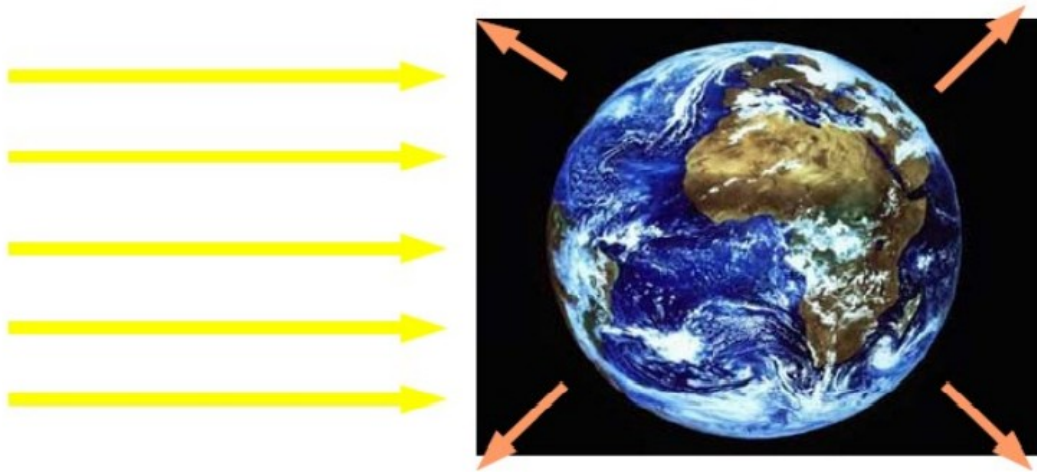
En una clase anterior vimos que la temperatura de equilibrio de la Tierra está dada por el balance energético en el tope de la atmósfera.



Factores de los que depende la intensidad del Ciclo hidrológico

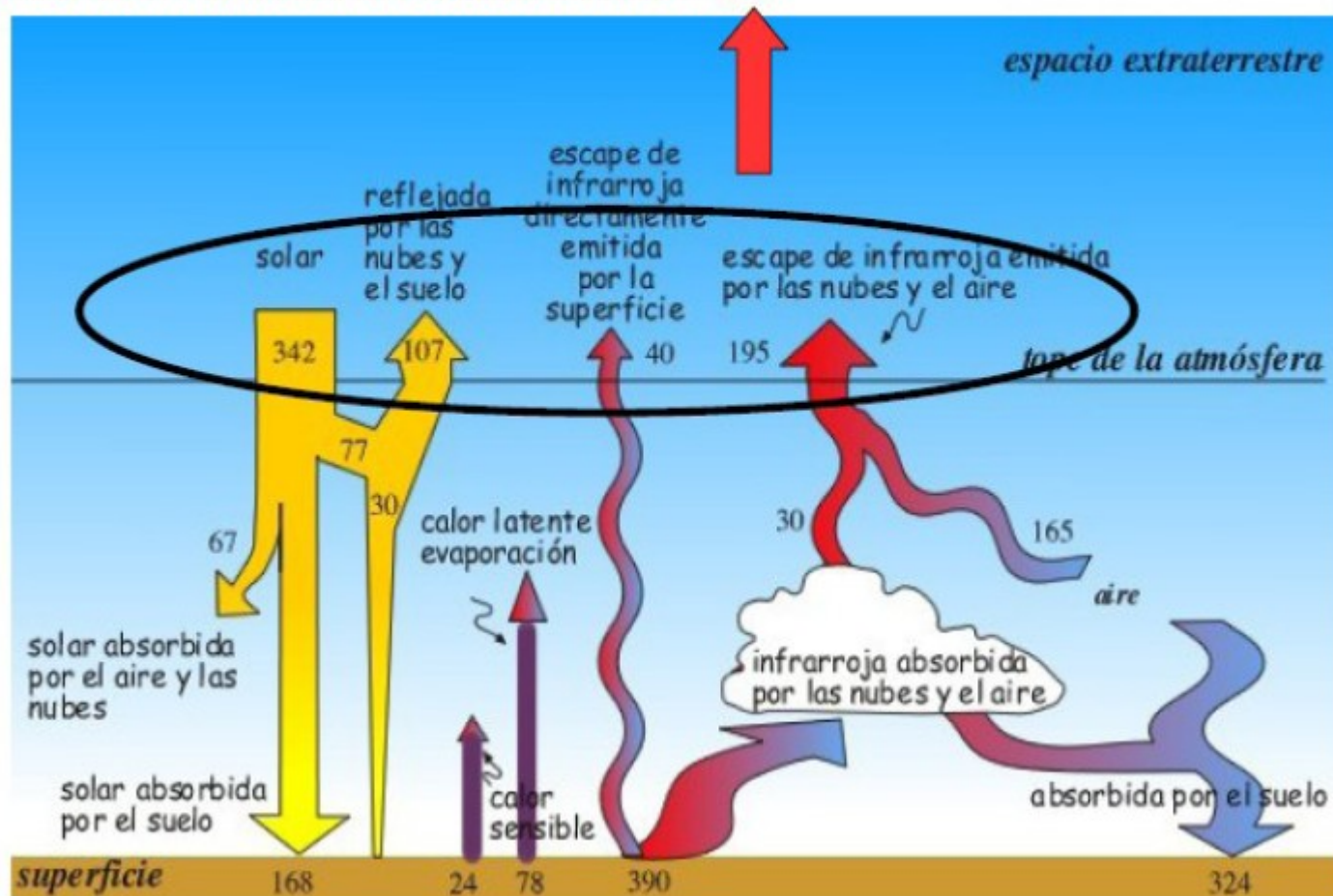
De que depende la intensidad del ciclo hidrológico?

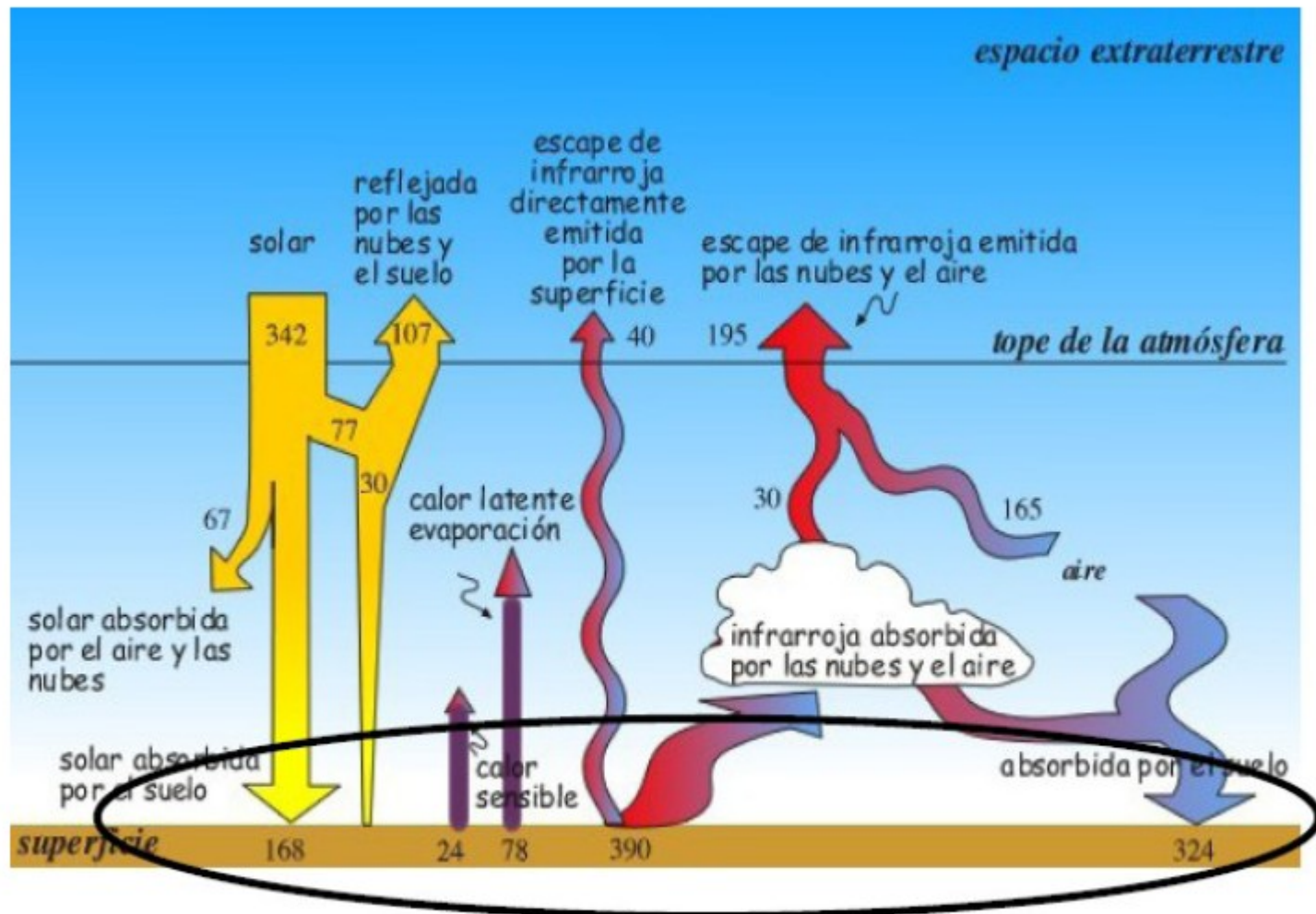
En una clase anterior vimos que la temperatura de equilibrio de la Tierra está dada por el balance energético en el tope de la atmósfera.



Cambios en los forzantes del sistema climático y en sus componentes que generen variaciones en la RS absorbida o RT emitida (e.g. cambios en insolación, cambios en albedo, cambios en efecto invernadero), dan lugar a variaciones en T_{sup} con efectos sobre el ciclo hidrológico.

Cambios en la radiación solar absorbida, o en la radiación terrestre emitida, altera el balance energético y dará lugar a una temperatura terrestre diferente. Ejemplo de cambios que aumentarían la temperatura: aumento de actividad solar, disminución del albedo, aumento de GEI.





¿Que ocurre si cambia el balance radiativo en la superficie?

El balance energético en la superficie es:

$$\text{Rad. Solar} - \text{Rad. terrestre} - \text{Calor latente} - \text{Calor Sensible} = 0$$

Recordemos que:

$$\text{Calor Sensible} \ll \text{Calor Latente}$$

y podemos aproximar el balance energético de la superficie como:

$$\text{Rad. Solar} - \text{Rad. terrestre} - \text{Calor latente} = 0$$

Entonces:

$$\text{Calor latente} = \text{Rad. Solar} - \text{Rad. terrestre}$$

Pero, por definición:

$$\text{Calor Latente} = L_v \times \text{Evaporación}$$

o sea que

$$\text{Evaporación} = 1/L_v (\text{Rad. Solar} - \text{Rad. terrestre})$$

Por lo tanto, la evaporación depende del balance radiativo en superficie.

Si (Rad. Solar – Rad. terrestre) aumenta,

la evaporación y la intensidad del ciclo hidrológico aumenta.

Notar que un aumento del ciclo hidrológico no necesariamente cambia la cantidad de vapor de agua en la atmósfera.

Lo que cambia es la velocidad con que el agua se mueve entre los reservorios. Por ejemplo, entre los océanos y la atmósfera.

- Al igual que en el balance de energía la atmósfera juega un papel fundamental en transportar el exceso de energía tropical hacia los polos, la circulación atmosférica transporta vapor de agua de los océanos a los continentes para cerrar el ciclo hidrológico.
- Así para seguir entendiendo el funcionamiento del sistema climático debemos comprender cómo funciona la circulación atmosférica.

