



# Unidad 1

**Fundamentos físicos y dinámicos de la atmósfera:  
composición, balance radiativo y circulación general**

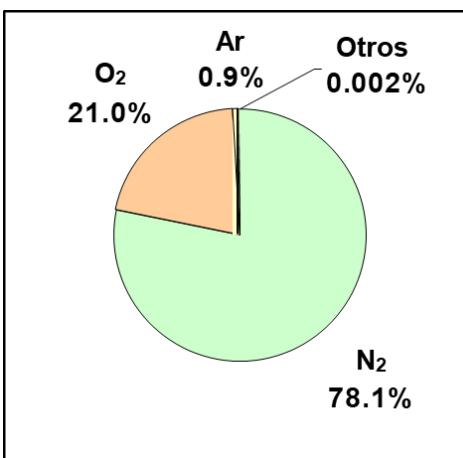


## Composición atmósfera terrestre

En la atmósfera terrestre se pueden distinguir dos regiones con distinta composición, la **homosfera** y la **heterosfera**.

La **homosfera** ocupa los 100 km inferiores y tiene una composición constante y uniforme.

Gas	ppmv	%
Nitrógeno ( $N_2$ )	780.840	78,084
Oxígeno ( $O_2$ )	209.460	20,946
Argón (Ar)	9.340	0,934
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	421	0,042
Neón (Ne)	18,18	0,001818
Helio (He)	5,24	0,000524
Metano ( $CH_4$ )	1,79	0,000179
Kriptón (Kr)	1,14	0,000114
Hidrógeno ( $H_2$ )	0,55	0,000055
Óxido nitroso ( $N_2O$ )	0,3	0,00003
Xenón (Xe)	0,09	$9 \times 10^{-6}$
Ozono ( $O_3$ )	0,0 - 0,07	$0 - 7 \times 10^{-6}$
Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ )	0,02	$2 \times 10^{-6}$
Yodo ( $I_2$ )	0,01	$1 \times 10^{-6}$
Monóxido de carbono (CO)	0,1	0,00001
Amoníaco ( $NH_3$ )	Trazas	



La **heterosfera** se extiende desde los 80 km hasta el límite superior de la atmósfera (unos 10 000 km); está estratificada, es decir, formada por diversas capas con composición diferente.

km	Capa de
80 - 400	Nitrógeno molecular
400 - 1100	Oxígeno atómico
1100 - 3500	Helio
3500 - 10000	Hidrógeno



## Composición de la atmósfera cerca de la superficie

### Gases Variables

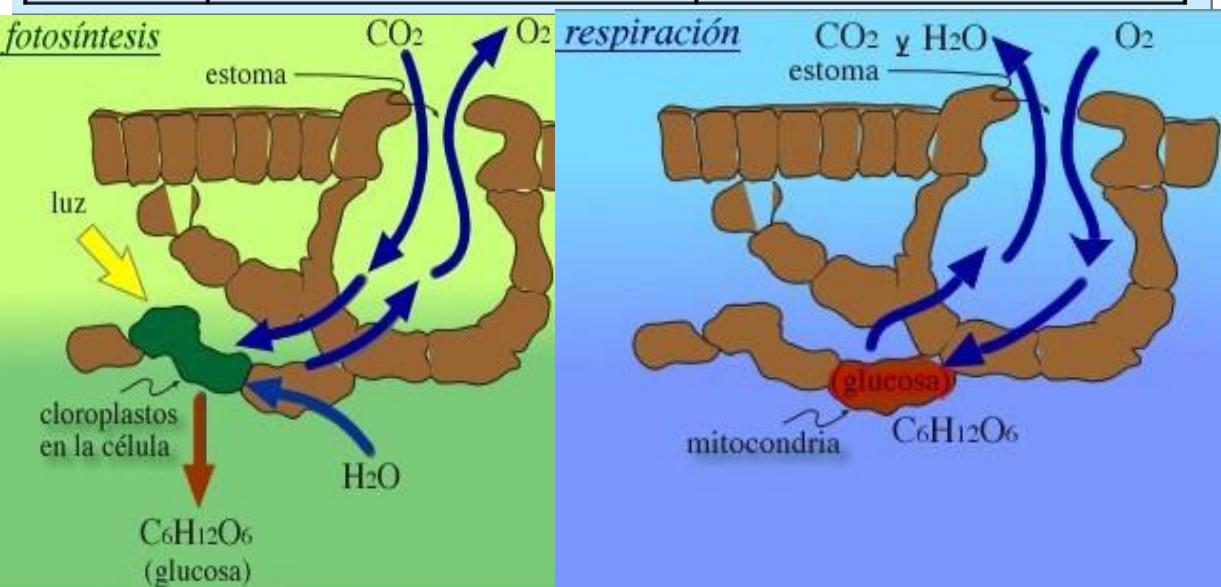
Gases (y partículas)	Símbolo	Porcentaje (en volúmenes)	Partes por millón (ppm)
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	0 a 4	
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,035	355 (379*)
Metano	CH <sub>4</sub>	0,00017	1,7
Óxido de nitrógeno	N <sub>2</sub> O	0,00003	0,3
Ozono	O <sub>3</sub>	0,000004	0,04
Partículas (polvo, hollín, etc.)		0,000001	0,01
Clorofluorocarbonos (CFCs)		0,00000001	0,0001

\* IPCC, 2007:AR4

Adaptado de Ahrens (1993)

### Fuentes y Sumideros de distintos gases

Gases	Fuentes	Sumideros
N <sub>2</sub>	Descomposición de materia orgánica.	Procesos biológicos: bacterias en el suelo.
O <sub>2</sub>	Fotosíntesis	1 Descomposición de materia orgánica 2 Formación de óxidos 3 Respiración





## OZONO ( $O_3$ )

El ozono ( $O_3$ ) es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno, muy reactiva y con propiedades distintas al oxígeno diatómico ( $O_2$ ) que respiramos.

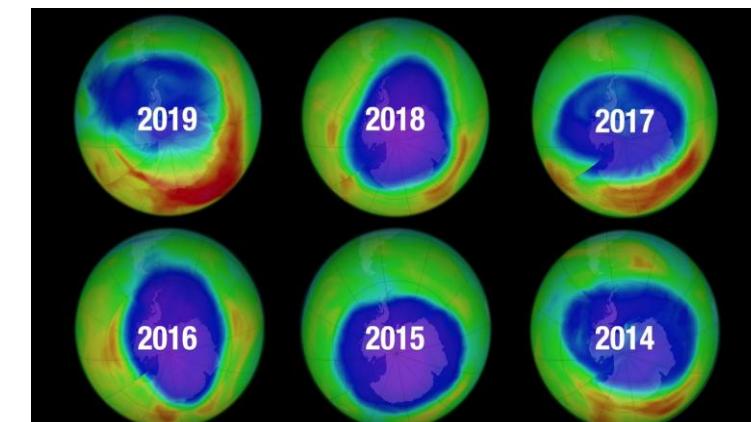
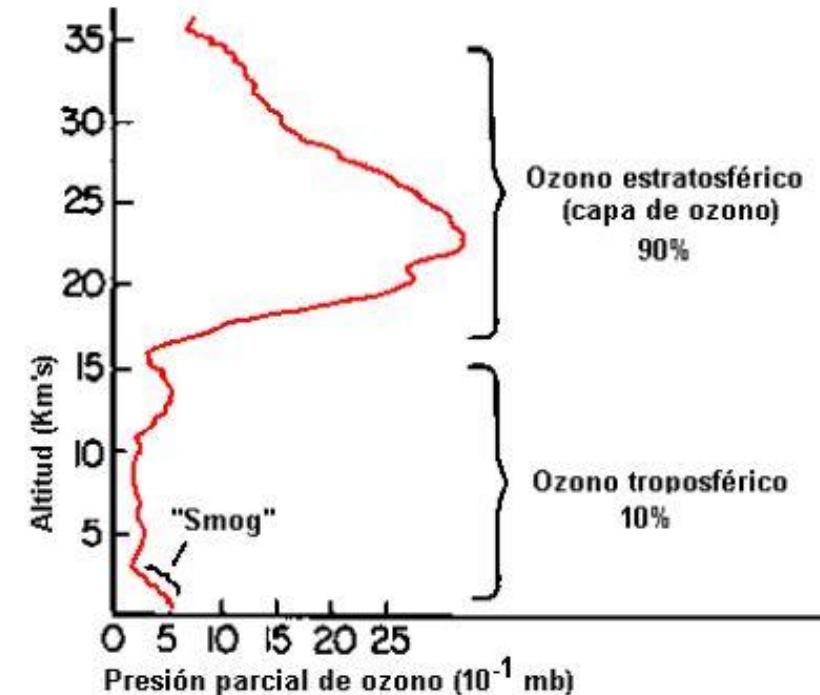
### Características principales:

- **Estado físico:** Gas incoloro en condiciones normales, con un olor característico (se percibe después de tormentas eléctricas o cerca de equipos eléctricos).

- **Formación natural:** En la estratosfera, la radiación ultravioleta (UV) del Sol rompe moléculas de  $O_2$  y permite la formación de  $O_3$ .

### Distribución:

- **Estratosfera:** Forma la *capa de ozono*, que filtra gran parte de la radiación UV-B y UV-C, protegiendo la vida en la Tierra.
- **Troposfera:** Puede formarse por reacciones fotoquímicas de contaminantes ( $NO_x$  y  $COVs$ ) y actuar como contaminante secundario dañino para la salud y la vegetación.





## El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Es un gas compuesto por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno, con propiedades físicas y químicas muy relevantes para la atmósfera, el clima y los sistemas biológicos.

### Características generales

**Estado físico:** Gas incoloro e inodoro a temperatura y presión normales.

**Origen Natural:** Respiración de animales y microorganismos. Descomposición de materia orgánica. Erupciones volcánicas y fuentes hidrotermales. Incendios forestales naturales.

**Antropogénico:** Combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural).

Deforestación y cambio de uso del suelo.

Procesos industriales (fabricación de cemento, siderurgia, etc.).

**Importancia ambiental:** En el ciclo del carbono: Parte esencial del intercambio de carbono entre atmósfera, océanos, suelos y seres vivos.

**Efecto invernadero:** Gas traza que atrapa calor en la atmósfera. Es responsable de cerca del 66 % del forzamiento radiativo neto de todos los gases de efecto invernadero de larga duración.





## El metano ( $\text{CH}_4$ )

Es un hidrocarburo simple formado por un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno, perteneciente a la familia de los alkanos. Es uno de los gases más relevantes tanto en la química atmosférica como en el cambio climático.

**Origen Natural:** Producción biogénica por arqueas metanogénicas en ambientes anaerobios (humedales, arrozales, intestinos de rumiantes, termitas).

Emisiones geológicas (filtraciones naturales de gas, volcanes, hidratos de metano marinos).

**Antropogénico:** Ganadería intensiva (fermentación entérica). Vertederos de residuos sólidos.

Producción y transporte de combustibles fósiles (gas natural, petróleo, carbón).

Quema incompleta de biomasa.

**Importancia ambiental:** Efecto invernadero: Es el segundo gas más importante en el calentamiento global de origen humano después del  $\text{CO}_2$ . Potencial de calentamiento global (PCG) a 100 años  $\approx 28\text{-}34$  veces mayor que el  $\text{CO}_2$ . Vida media atmosférica  $\approx 12$  años.





## El óxido nitroso ( $N_2O$ ),

También llamado gas hilarante, es un compuesto formado por dos átomos de nitrógeno y uno de oxígeno. Tiene importancia tanto en la química atmosférica como en la medicina e industria.

**Origen Natural:** Procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación en suelos y océanos.

**Antropogénico:** Uso de fertilizantes nitrogenados (mayor fuente).

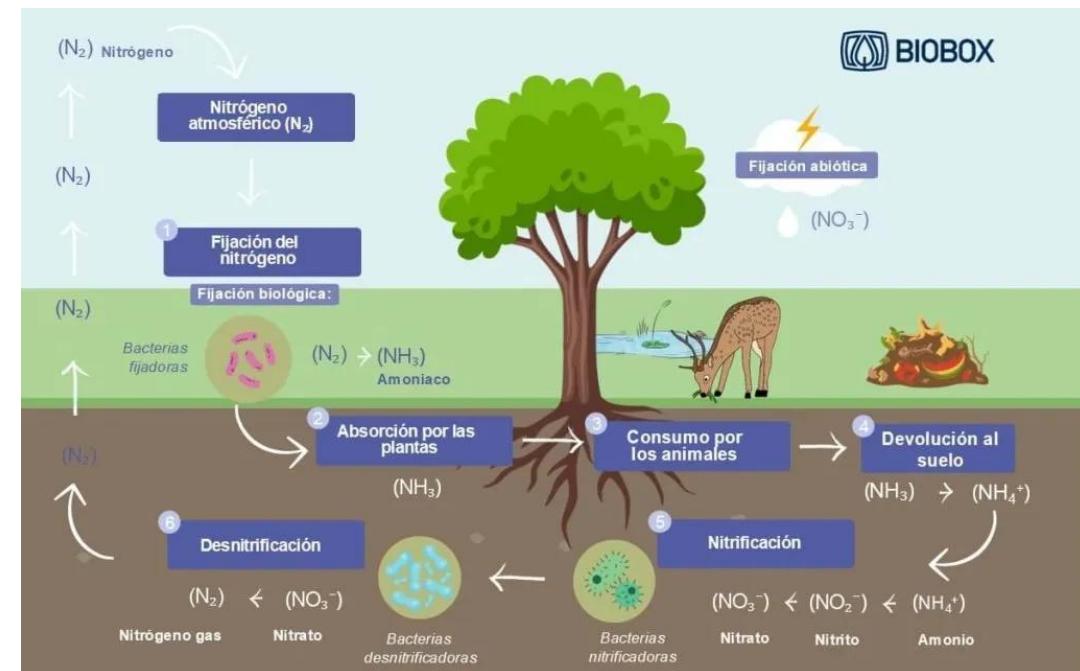
Producción industrial de ácido nítrico

Manejo de estiércol y residuos ganaderos.

Combustión de biomasa y combustibles fósiles.

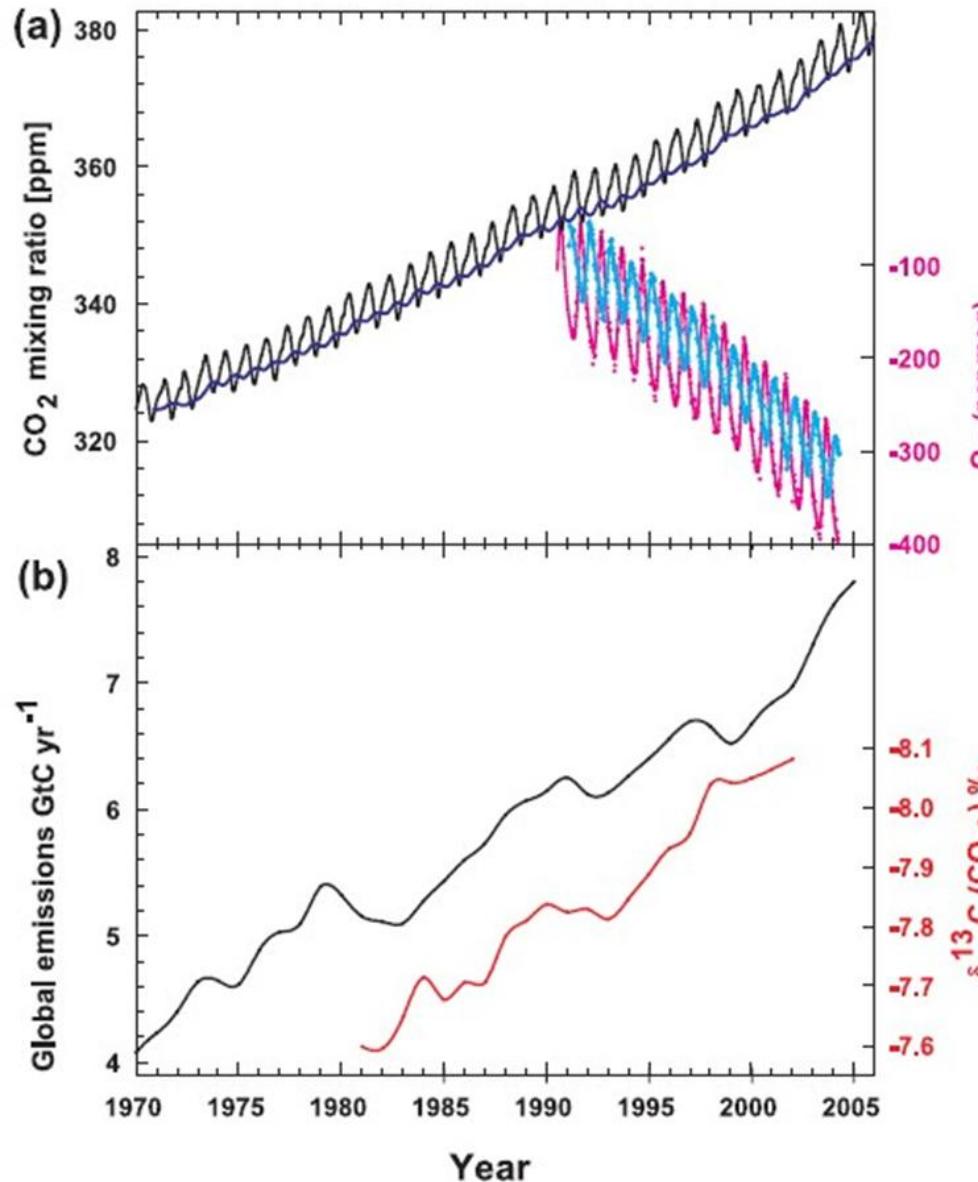
Emisión desde plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Importancia ambiental:** Gas de efecto invernadero: Potencial de calentamiento global (PCG) a 100 años  $\approx 265\text{-}298$  veces mayor que el  $CO_2$ . Vida media atmosférica  $\approx 114$  años. Destrucción de ozono estratosférico: Es actualmente la sustancia más importante que agota la capa de ozono.



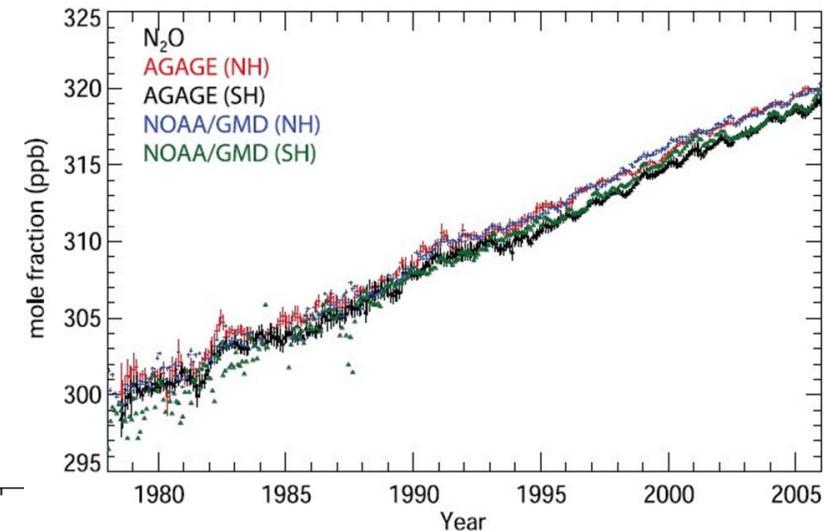
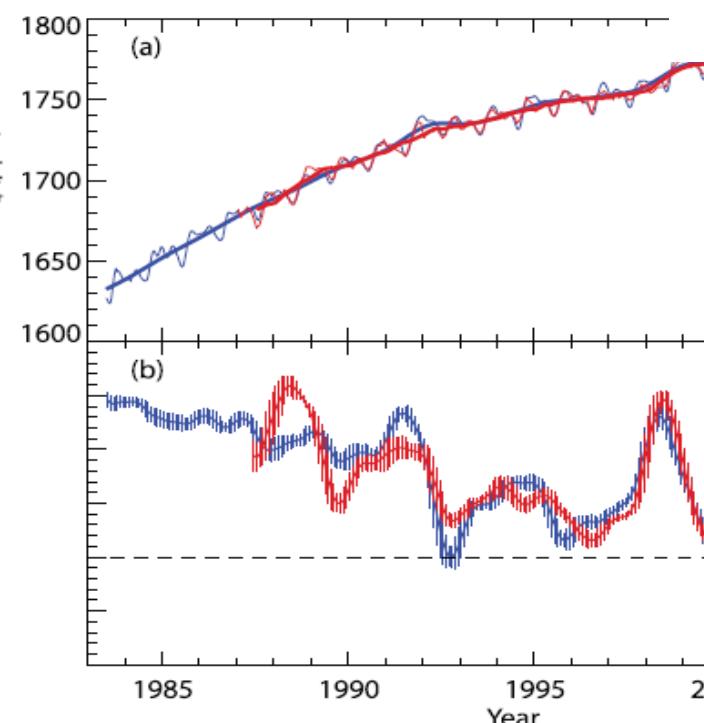


Gas	Cambios en la concentración atmosférica
$\text{CO}_2$	288 ppm durante el período 1000-1750 a 368 ppm en el año 2000 (aumento del $31\pm4\%$ )
$\text{CH}_4$	700 ppb durante el período 1000-1750 a 1.750 ppb en el año 2000 (aumento $151\pm25\%$ )
$\text{N}_2\text{O}$	270 ppb durante el período 1000-1750 a 361 ppb en el año 2000 (aumento del $17\pm5\%$ )
$\text{O}_3$ troposférico	Aumento del $35\pm15\%$ entre los años 1750-2000, con variaciones según las regiones.
$\text{O}_3$ estratosférico	Disminución en los años 1970-2000, con variaciones según la altitud y latitud.
HFC, PFC, y $\text{SF}_6$	Aumento global durante los últimos 50 años.



## AUMENTO DE LA CONCENTRACION GLOBAL DE CO<sub>2</sub>

## AUMENTO DE LA CONCENTRACION GLOBAL DE CH<sub>4</sub>

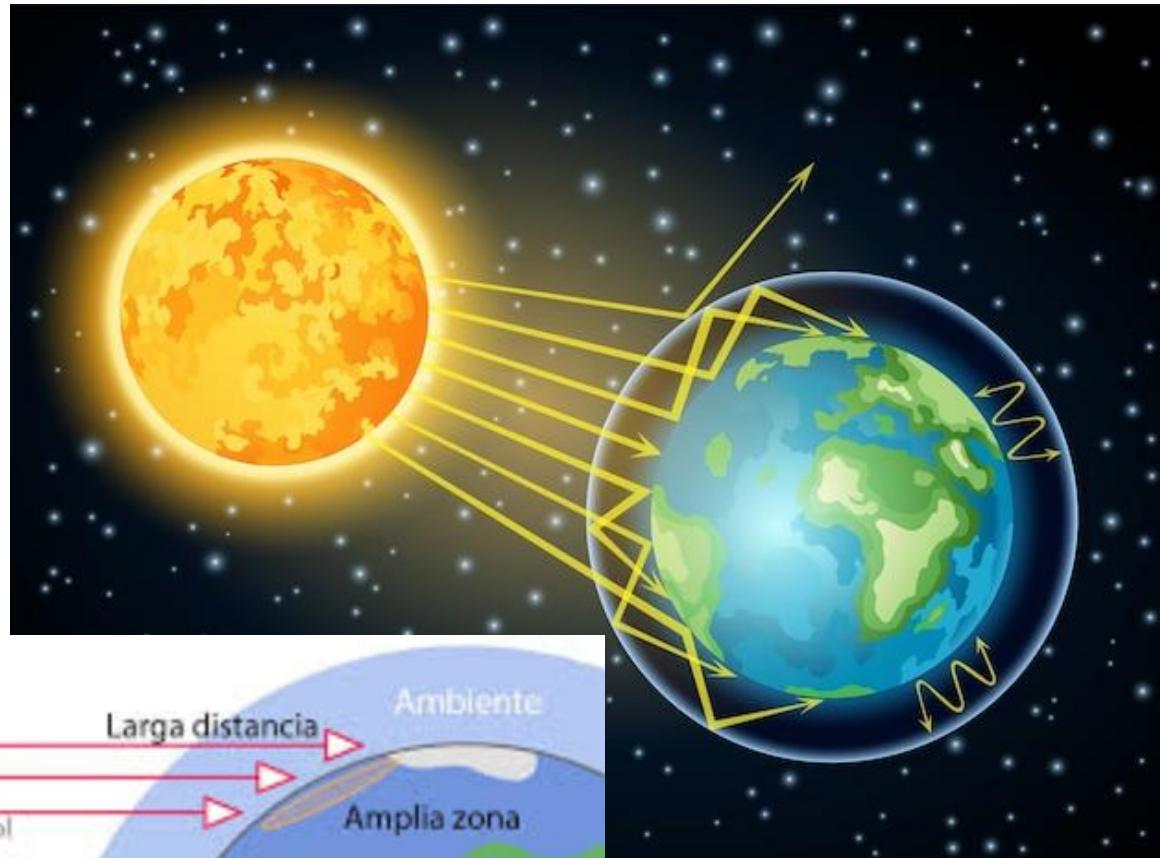


## AUMENTO DE LA CONCENTRACION GLOBAL DE N<sub>2</sub>O



## Balance de radiación global - The Earth's Radiation Budget

- La **irradiación solar** es la magnitud que mide la energía por unidad de área de radiación solar incidente en una superficie colocada en un lugar y rango de tiempo bien especificados.
- La magnitud es frecuentemente designada por los medios de comunicación social como **radiación solar**.
- Su valor depende críticamente de la latitud, la época del año, las horas del día y el clima imperante en el lugar.





## 1. Valores máximos en latitudes tropicales:

Se observa que la altura es mayor (400–500) cerca del ecuador durante casi todo el año, lo que es consistente con la tropopausa tropical alta (~16–18 km).

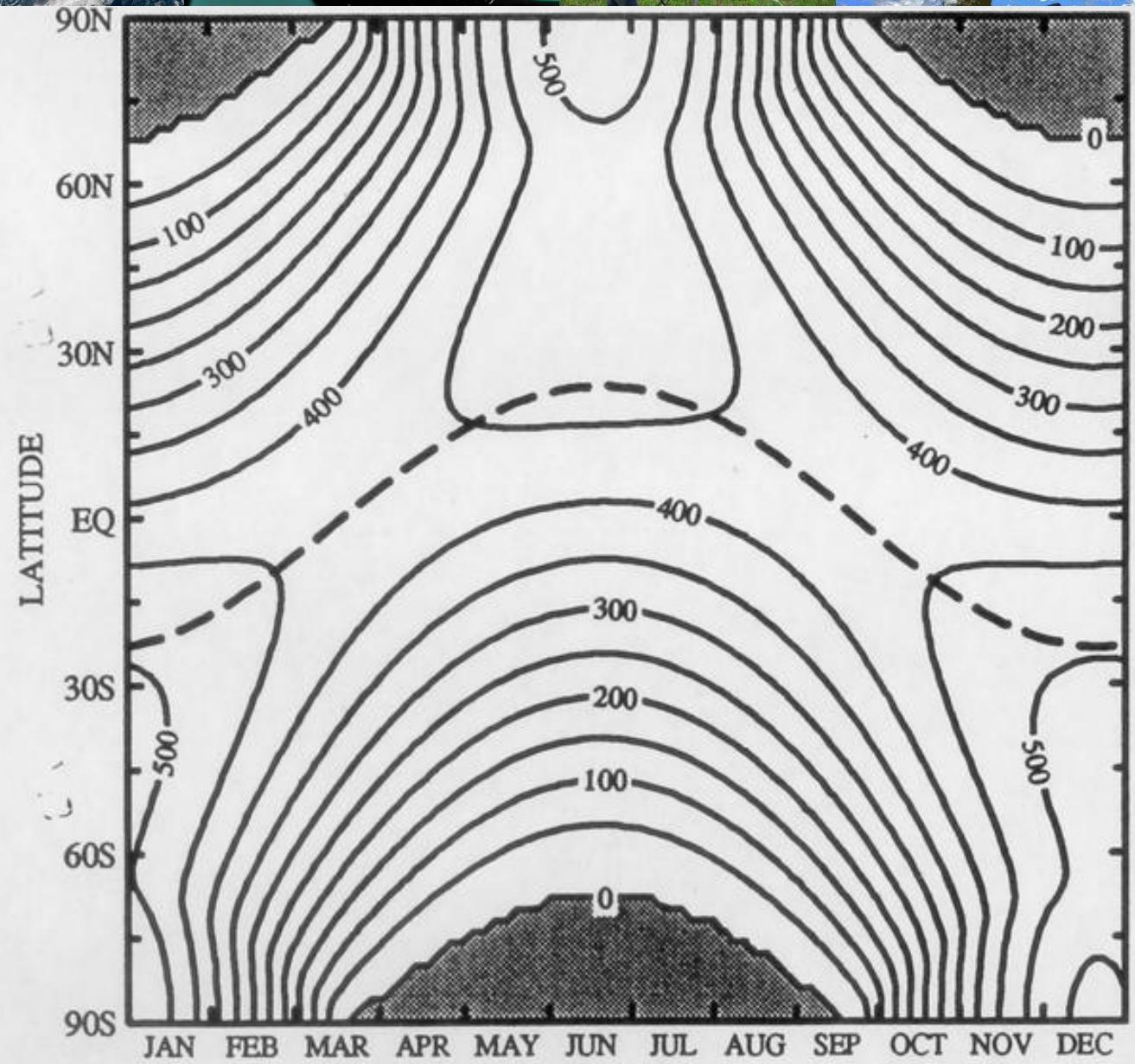
## 2. Valores mínimos en latitudes polares:

En ambos hemisferios, la altura disminuye hacia los polos (100–200), reflejando una tropopausa más baja (~8–10 km).

## 3. Desplazamiento estacional:

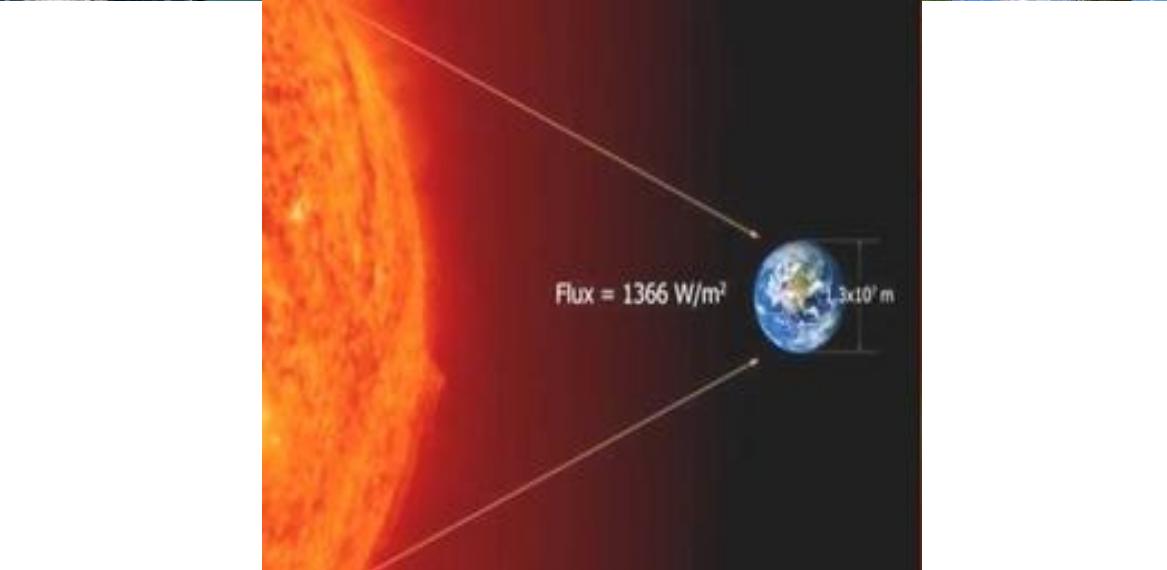
El patrón simétrico no es estático:

1. En **junio-julio-agosto**, la zona de mayor altura se desplaza ligeramente hacia el hemisferio norte (verano boreal).
2. En **diciembre-enero-febrero**, el máximo se desplaza hacia el hemisferio sur (verano austral).





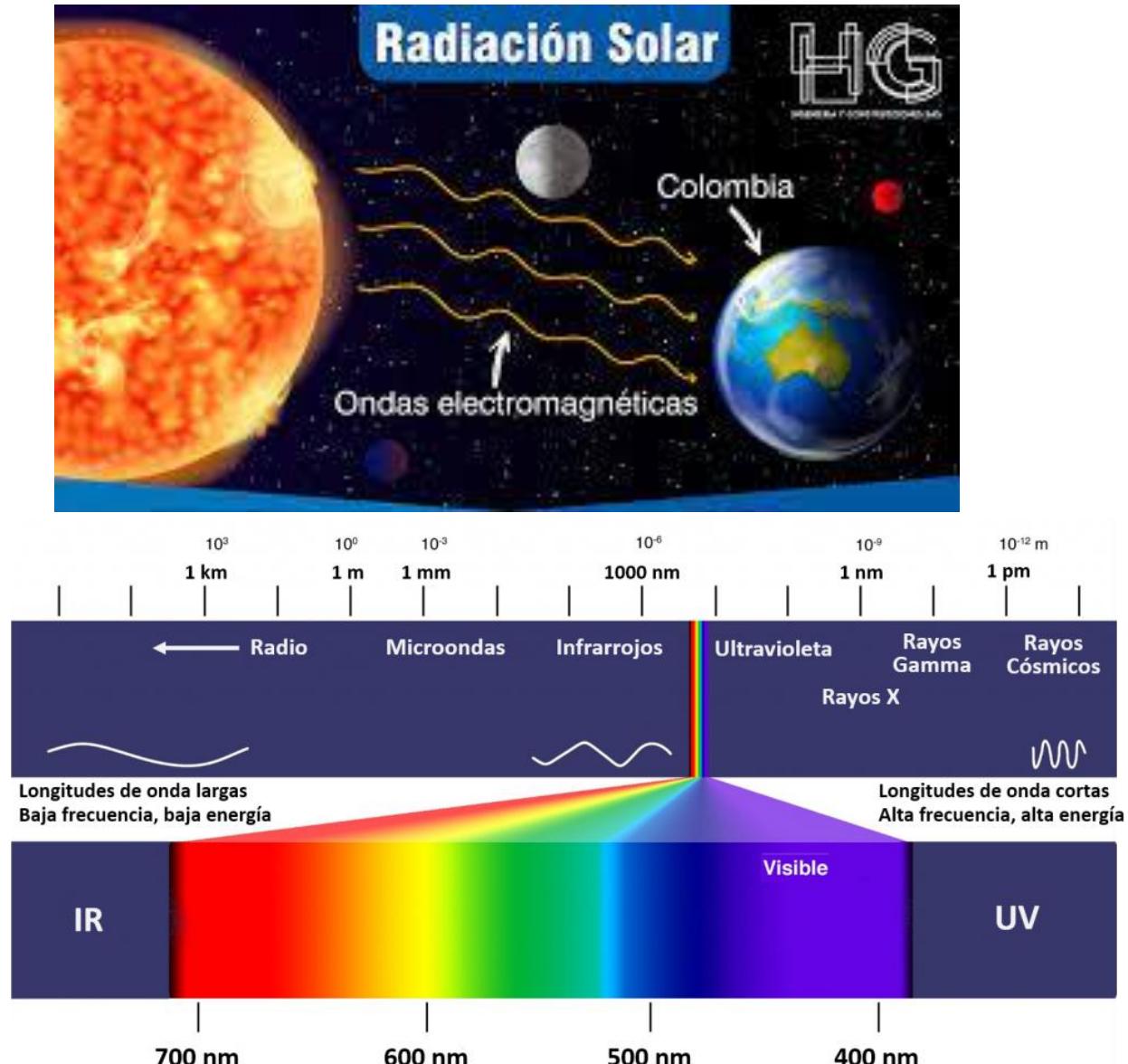
- El origen de la radiación electromagnética proveniente del Sol es la reacción de fusión nuclear que se produce constantemente en su interior. En ella dos núcleos de hidrógeno (protones) se combinan para formar un núcleo de helio, liberando energía en el proceso el mismo que en la llamada "bomba de hidrógeno".
- El hidrógeno constituye el 74,9% de la masa del Sol, y el helio el 23,8% (en leve pero constante incremento) y sólo el 1,3% restante corresponde a otros elementos químicos.





El calor generado por la reacción de fusión nuclear es responsable de que el Sol sea una gigantesca masa incandescente, cuya superficie exterior que vemos como "disco solar". tiene una temperatura aproximada de 5.505 °C.

Como cualquier cuerpo incandescente, emite radiación electromagnética en un amplio rango de longitudes de onda (o frecuencias) que abarcan desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, cuya máxima intensidad está en la región que la vista humana identifica como la amarilla del arco iris.





La radiación electromagnética del Sol se propaga en el vacío con la llamada velocidad de la luz, que es de aproximadamente 299.792 km/s. Esto significa que su energía fluye (como lo hace una corriente de agua) con esa velocidad. La medida física de este flujo es la potencia, la cantidad de energía que fluye por unidad de tiempo (la magnitud análoga para una corriente de agua es el caudal).

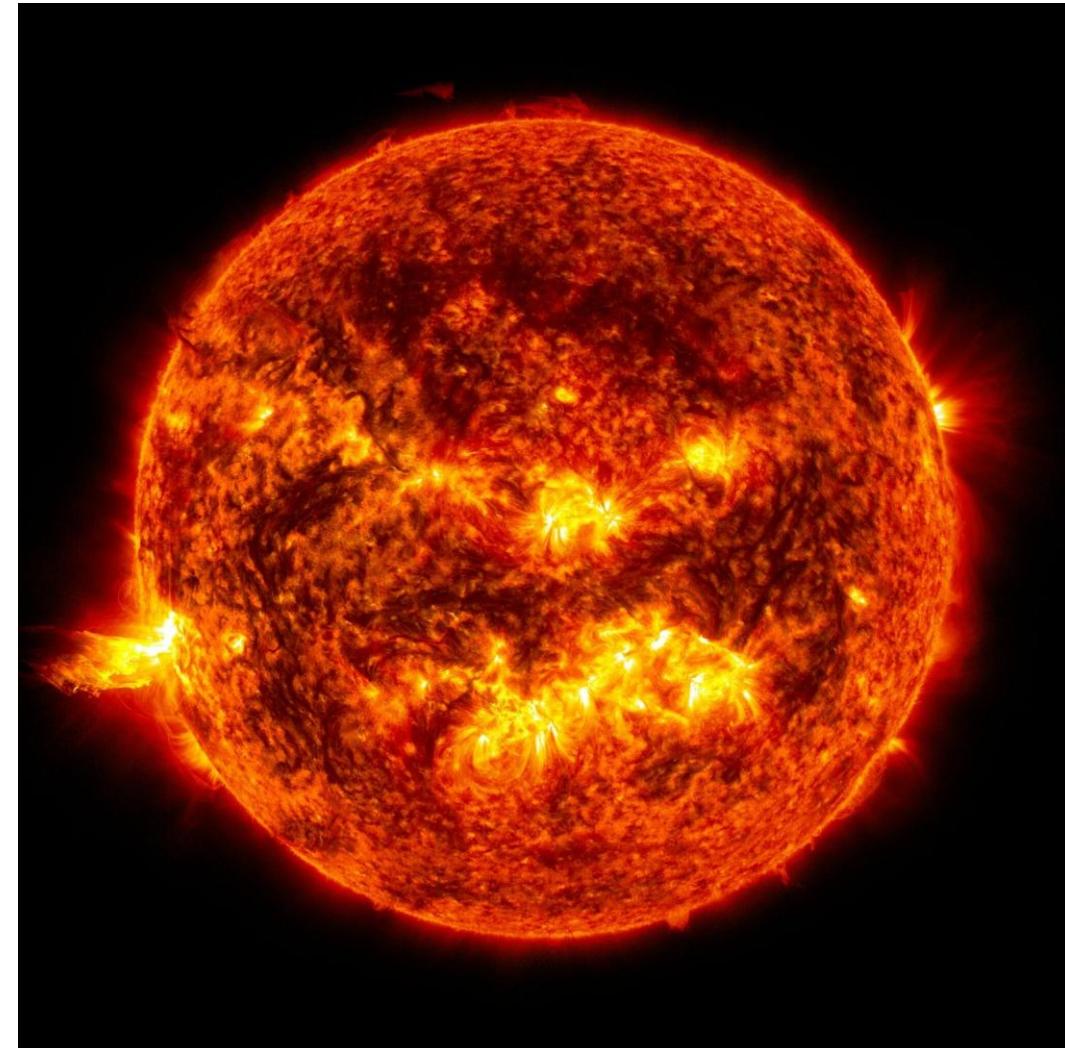
La unidad estándar internacionalmente usada para la potencia es el Watt (W) como en cualquier artefacto eléctrico domiciliario (en castellano mal denominada vatio al ignorar que fue elegida en homenaje a las contribuciones científicas de James Watt).





Después de abandonar la superficie del Sol su radiación se expande de modo casi homogéneo y constante en el tiempo a través del espacio circundante, salvo por la cíclica influencia de las manchas solares (ciclos de 11 años). La potencia de radiación solar se distribuye así sobre la superficie de una esfera cuyo radio aumenta constantemente con la velocidad de la luz, disminuyendo su valor por unidad de área como la inversa del cuadrado de ese radio.

Cuando este frente de onda esférico llega a la atmósfera de la Tierra (donde dicho radio toma el valor de la distancia de la Tierra al Sol, unos 150 millones de kilómetros), la potencia por unidad de área del espectro total de la radiación (irradiancia solar fuera de la atmósfera) es de aproximadamente  $1.367 \text{ W/m}^2$ .





Imagina que la luz del Sol es como cuando tiras una piedra en el agua y se forman ondas que se van expandiendo en círculos cada vez más grandes.

En este caso, la piedra es el Sol, y las “ondas” son la energía de la luz que viaja en todas direcciones a la velocidad de la luz.

A medida que esas ondas se alejan, el círculo (o mejor, la esfera en 3D) se hace cada vez más grande.

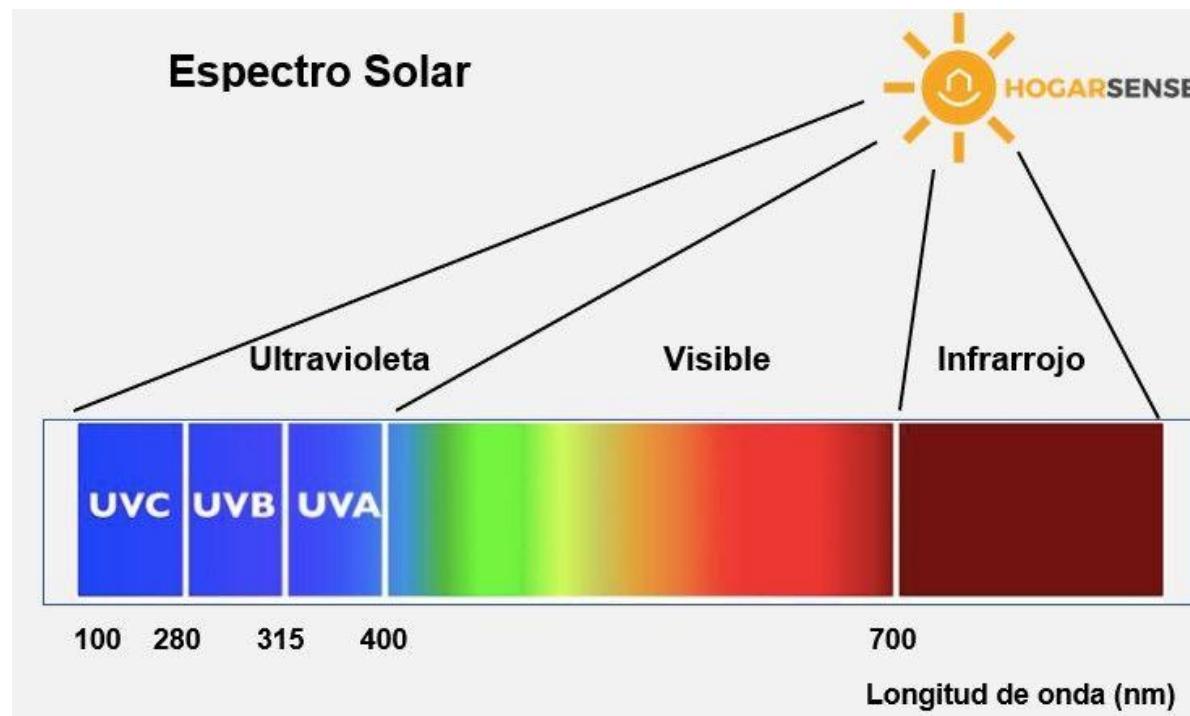
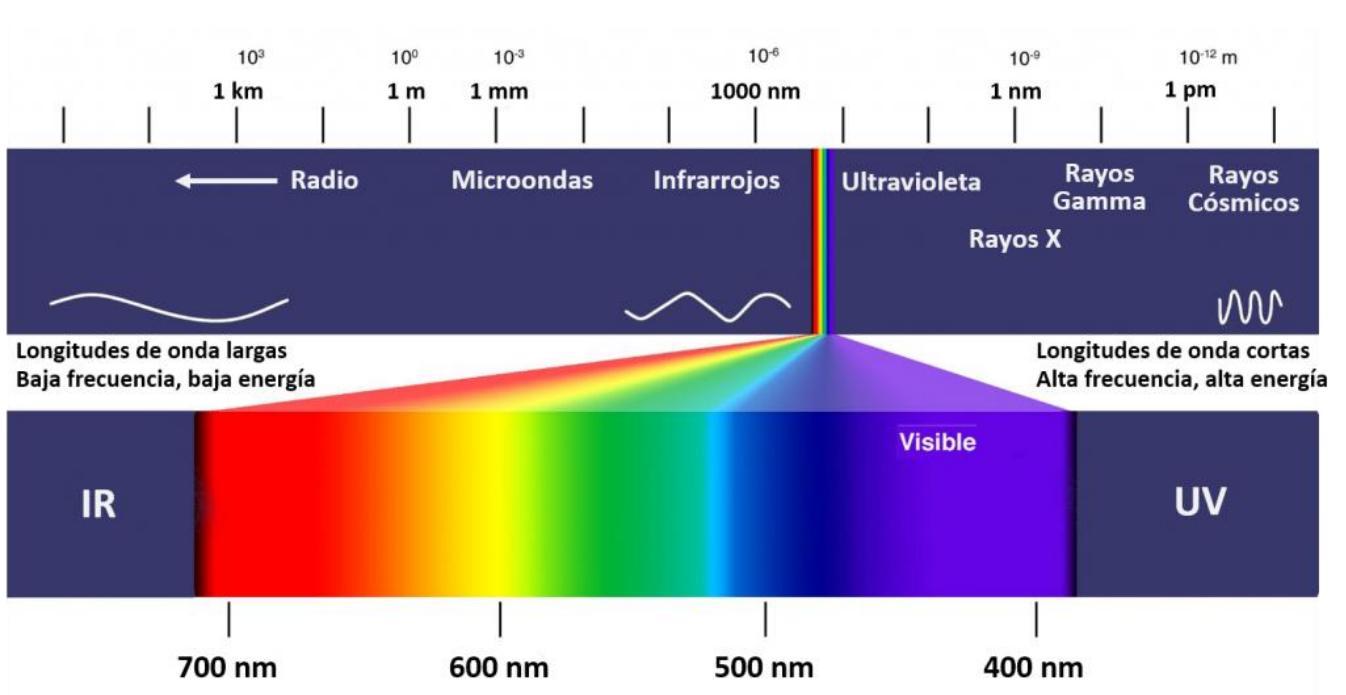
Como la misma cantidad de energía se reparte sobre una superficie cada vez mayor, la energía que recibe cada pedacito de superficie es menor. Esto se llama la ley del inverso del cuadrado: Si estás cerca del Sol, la luz es intensa (muchísima energía en poca área). Si estás lejos del Sol, la luz se debilita porque esa misma energía se reparte sobre una superficie mucho más grande.



👉 Un ejemplo fácil: A 1 metro de una bombilla sientes la luz fuerte. A 2 metros, la intensidad no se reduce a la mitad, sino a la cuarta parte. A 3 metros, se reduce a la novena parte.



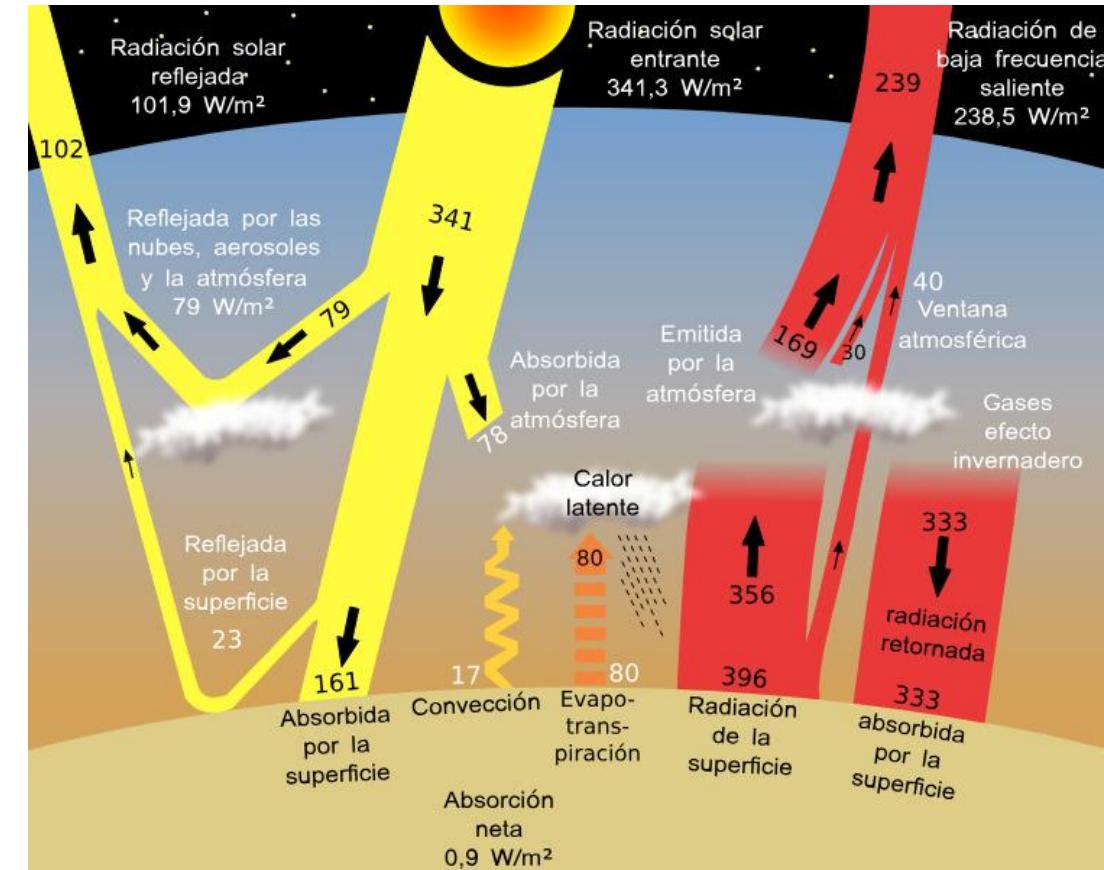
El balance energético Tierra-atmósfera es el equilibrio entre la energía entrante del Sol y la energía saliente de la Tierra. La energía emitida por el Sol se emite en forma de luz de onda corta y energía ultravioleta. Al llegar a la Tierra, una parte se refleja al espacio por las nubes, otra es absorbida por la atmósfera y otra parte se absorbe en la superficie terrestre.

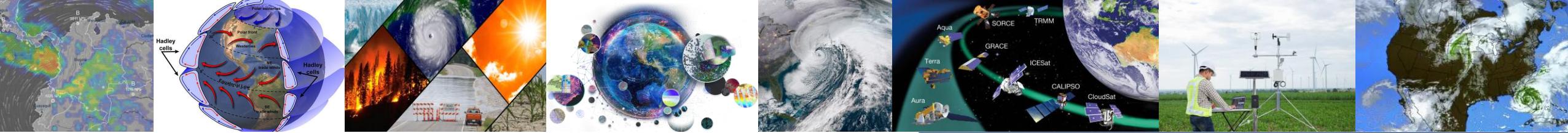




La energía que entra refleja, absorbe y emite el sistema terrestre constituye el balance de radiación terrestre. Basado en el principio físico de conservación de la energía, este balance representa el equilibrio entre la radiación entrante, que es casi exclusivamente solar, y la radiación saliente, que es en parte solar reflejada y en parte emitida por el sistema terrestre, incluida la atmósfera. Un balance desequilibrado puede provocar un aumento o disminución de la temperatura atmosférica y, con el tiempo, afectar al clima.

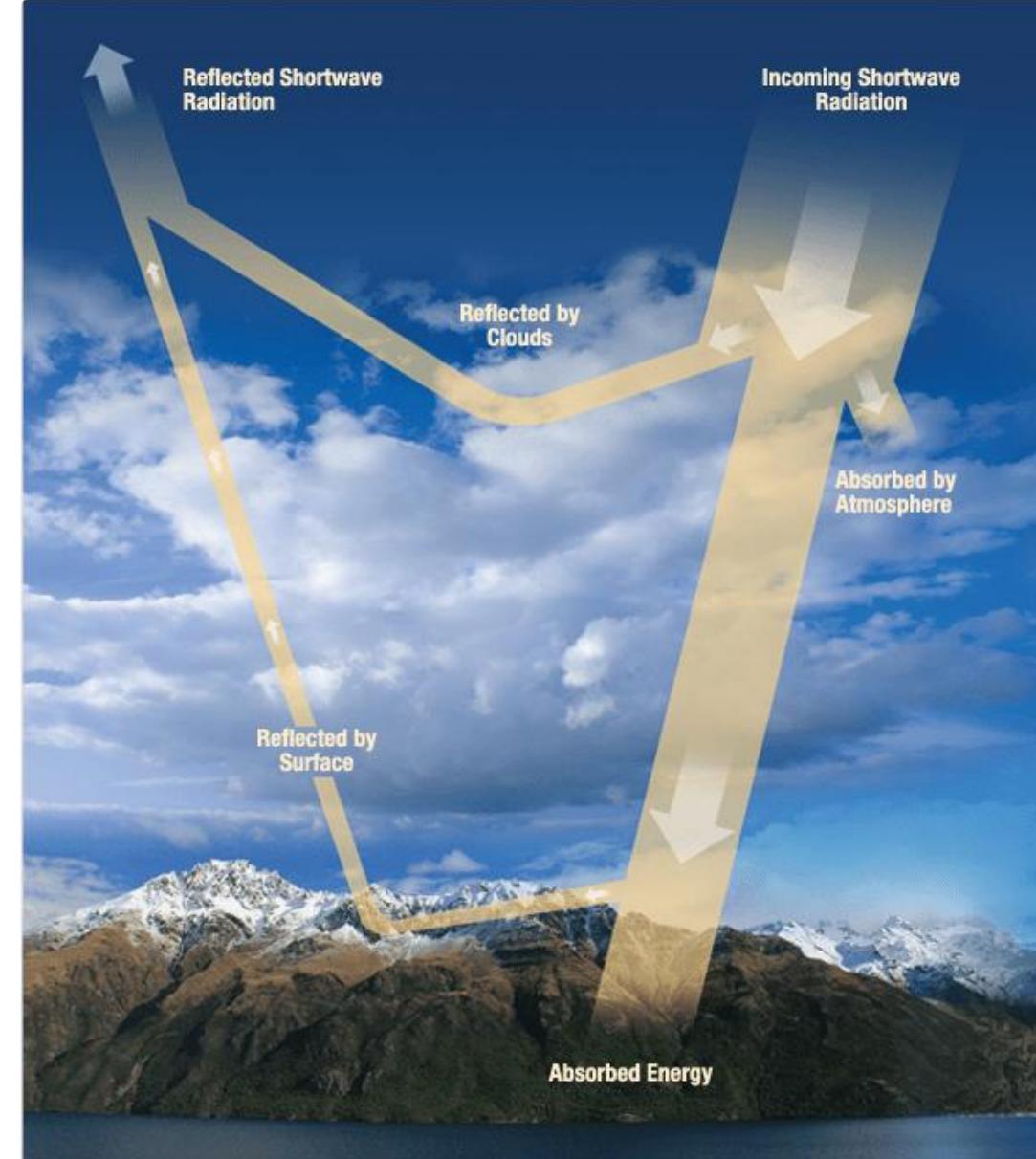
Sin embargo, dado que la Tierra es mucho más fría que el Sol, su energía radiante es infrarroja (de longitud de onda larga), mucho más débil. Podemos ver indirectamente cómo esta energía se irradia a la atmósfera en forma de calor, elevándose desde una carretera caliente y creando destellos en días calurosos y soleados.





## RADIACIÓN SOLAR ENTRANTE

La energía ultravioleta, la visible y una porción limitada de la infrarroja (en conjunto, a veces denominadas "radiación de onda corta") provenientes del Sol impulsan el sistema climático terrestre. Parte de esta radiación entrante se refleja en las nubes, parte es absorbida por la atmósfera y parte atraviesa la superficie terrestre. Las partículas de aerosol más grandes en la atmósfera interactúan con la radiación y la absorben, provocando su calentamiento. El calor generado por esta absorción se emite como radiación infrarroja de onda larga, parte de la cual se irradia al espacio.



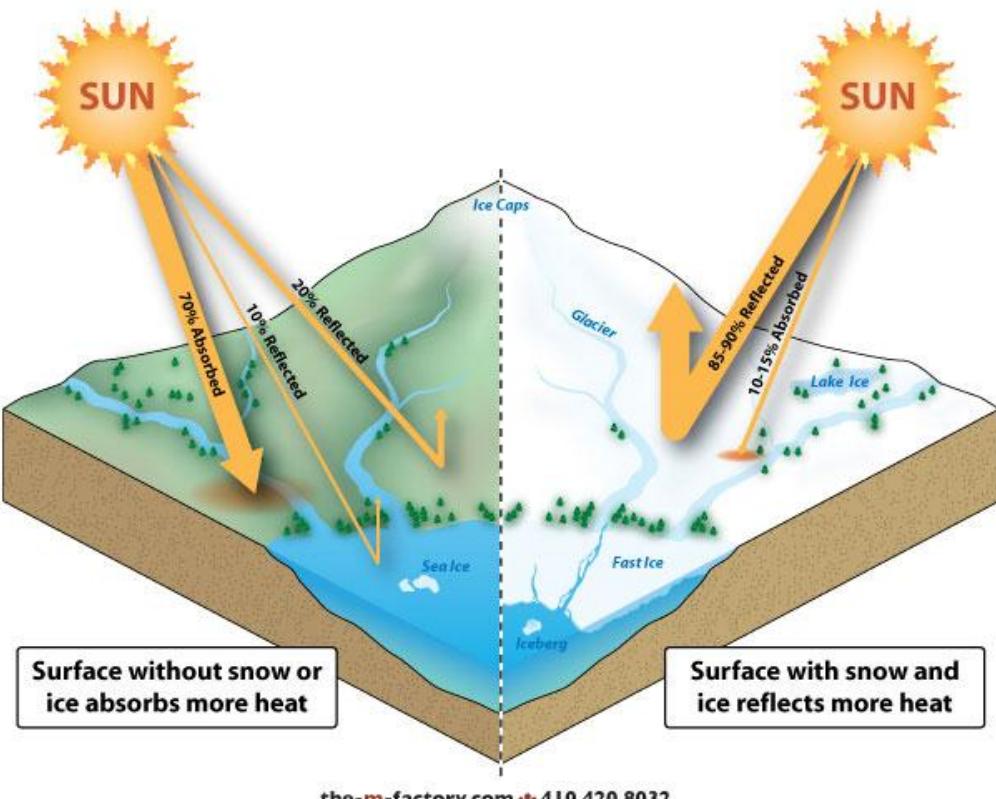


Ejemplos de albedo

Superficie	Albedo típico
Superficies terrestres	
Asfalto fresco	0.04 <sup>2</sup>
Asfalto gastado	0.12 <sup>2</sup>
Océano abierto	0.06 <sup>3</sup> (0.05 a 0.10)
Ceniza volcánica	0.07
Bosque de coníferas (verano)	0.08 <sup>4</sup> 0.09 a 0.15
Árboles caducifolios	0.15 a 0.18
Suelo desnudo	0.17 <sup>5</sup>
Desiertos terrestres	0.21
Hierba verde	0.25 <sup>5</sup>
Arena del desierto	0.40 <sup>6</sup>
Nubes (promedio)	0.50
Nubes brillantes	0.78
Hielo oceánico	0.5-0.7 <sup>5</sup>
Hormigón nuevo	0.55 <sup>5</sup>
Nieve fresca	0.80-0.90 <sup>5</sup>

## ENERGÍA ABSORBIDA

La radiación solar que pasa a través de la atmósfera de la Tierra se refleja en la nieve, el hielo u otras superficies o es absorbida por la superficie de la Tierra.

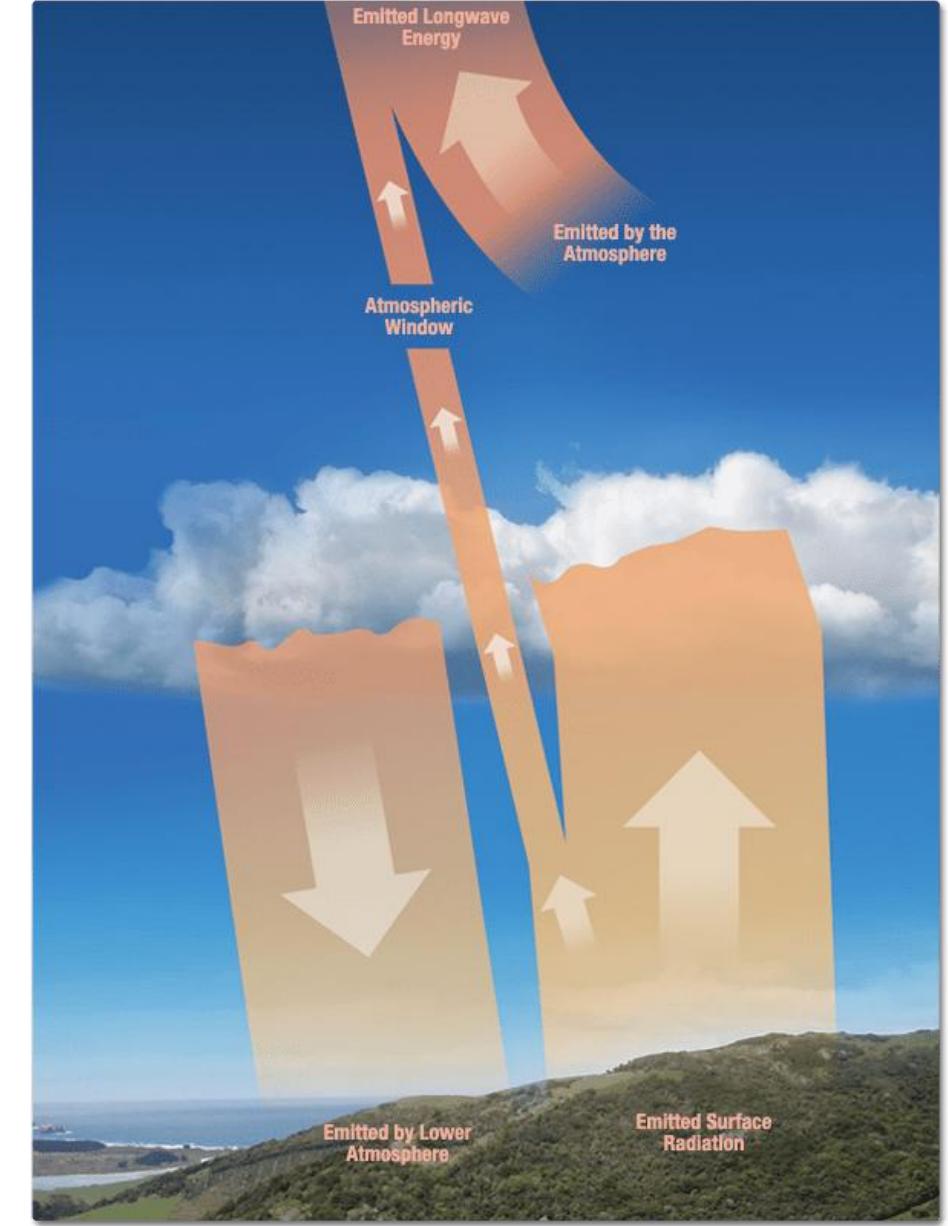


El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella.



## Radiación de onda larga emitida

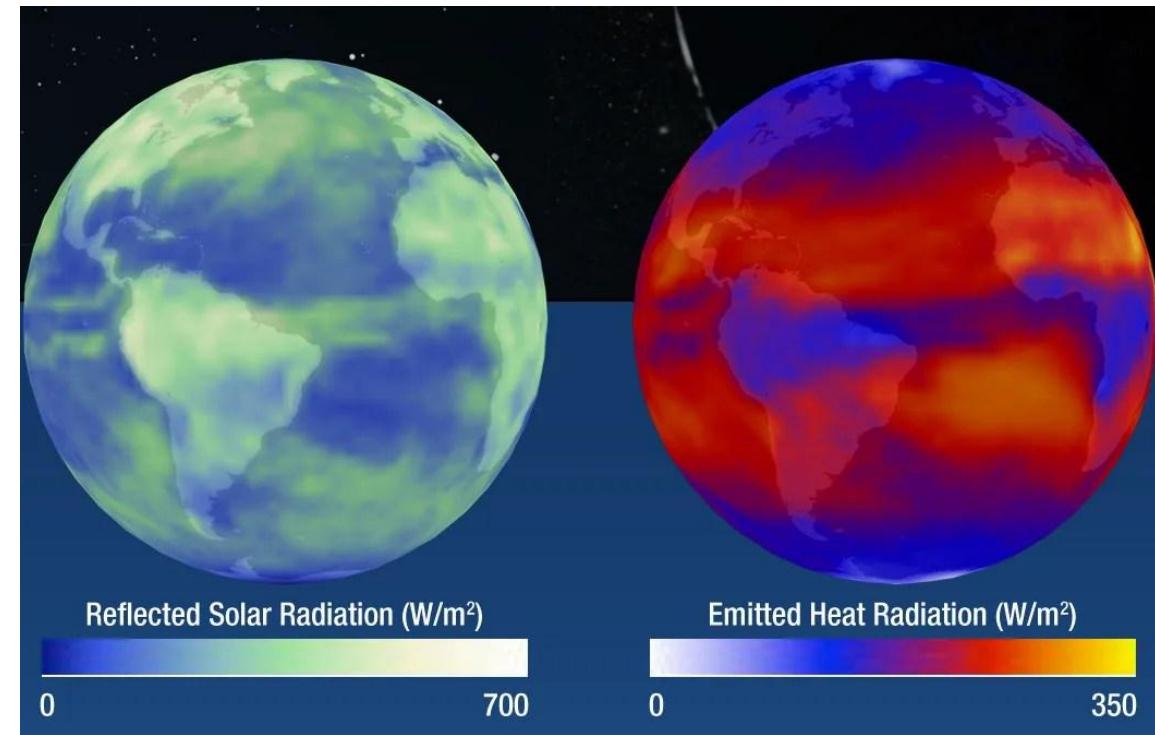
El calor resultante de la absorción de la radiación de onda corta entrante se emite como radiación de onda larga. La radiación de la atmósfera superior calentada, junto con una pequeña cantidad de la superficie terrestre, se irradia al espacio. La mayor parte de la radiación de onda larga emitida calienta la atmósfera inferior, lo que a su vez calienta la superficie de nuestro planeta.

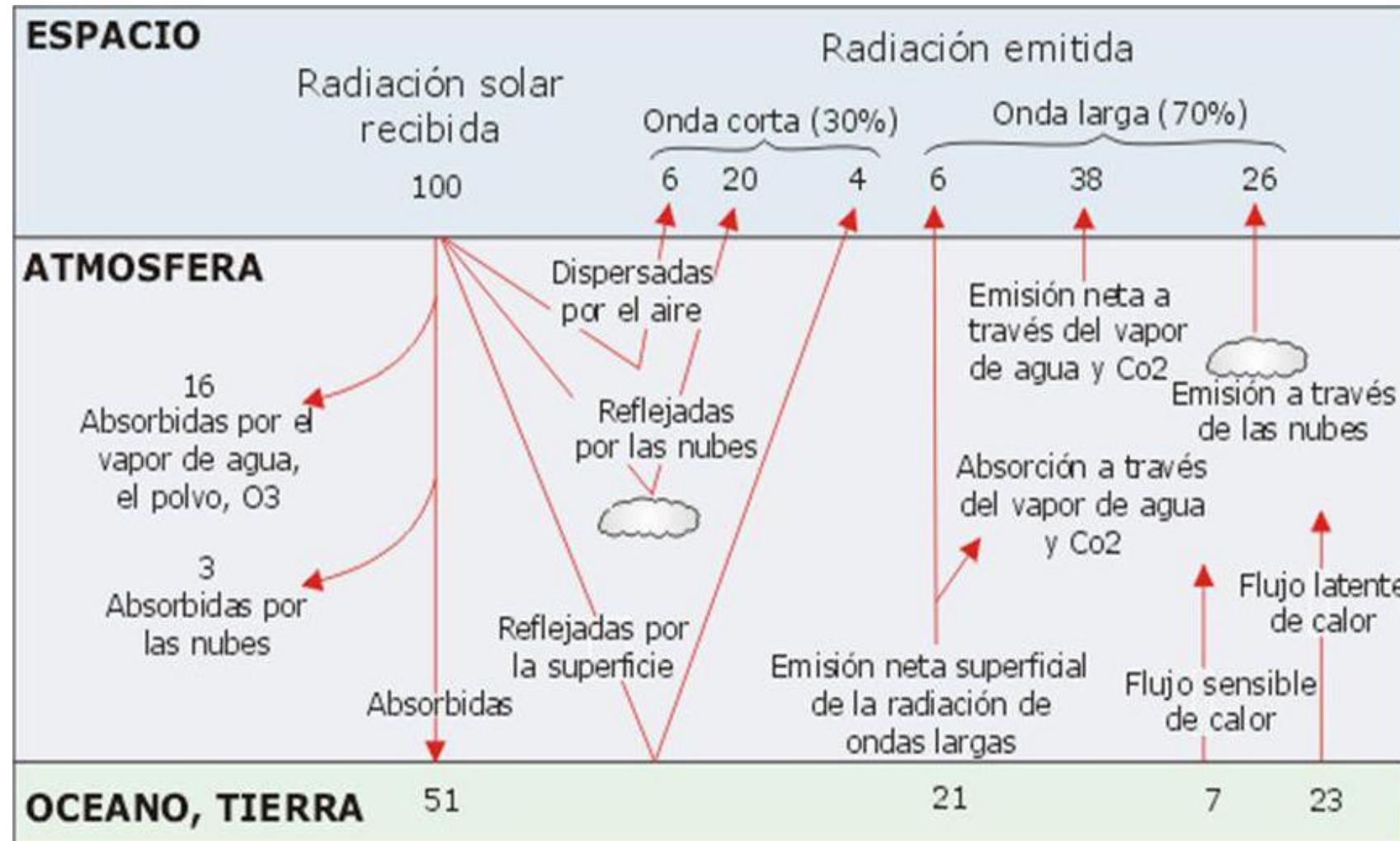


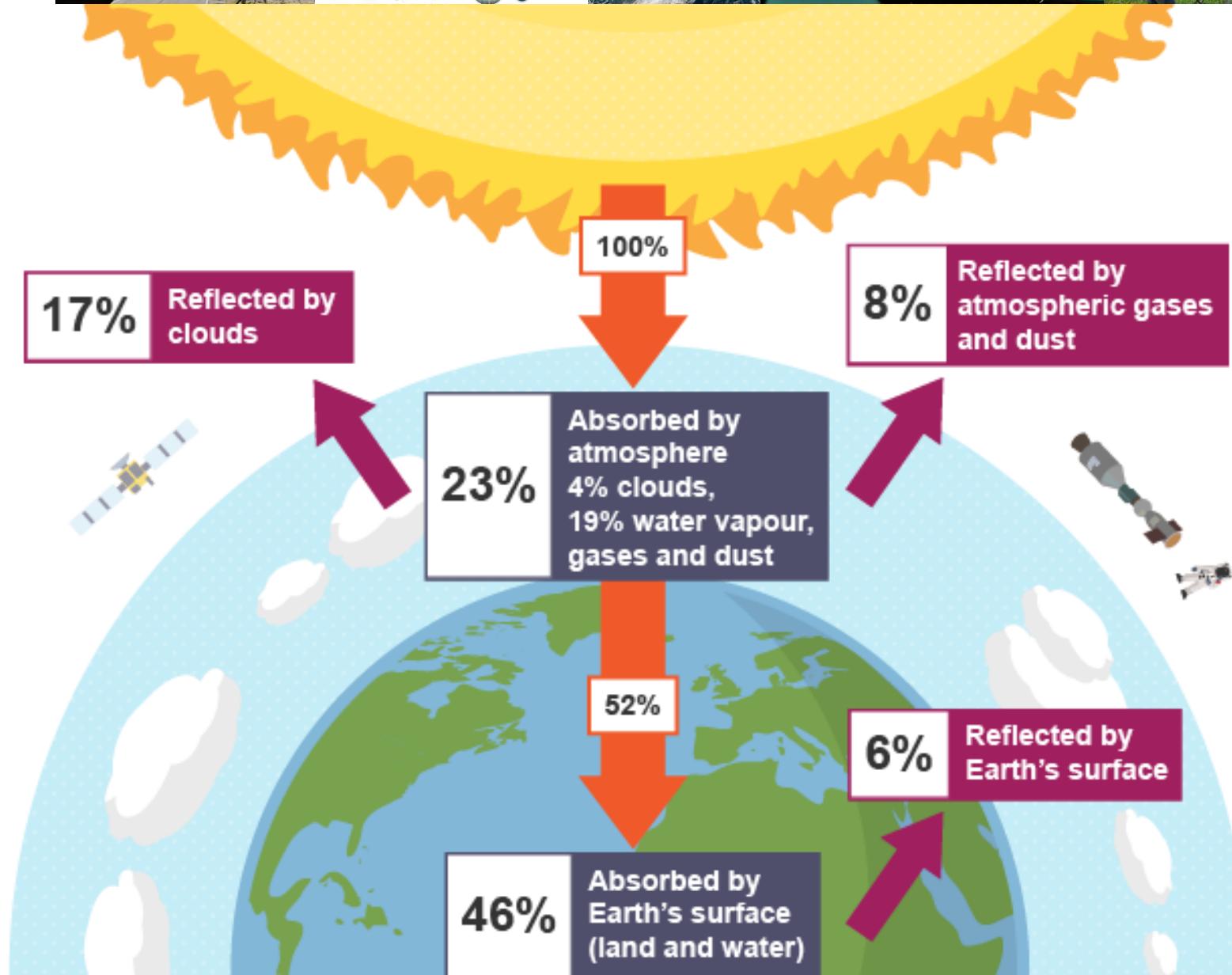


## EFFECTO INVERNADERO

- Los gases de efecto invernadero en la atmósfera (como el vapor de agua y el dióxido de carbono) absorben la mayor parte de la radiación infrarroja de onda larga emitida por la Tierra, lo que calienta la atmósfera inferior. A su vez, la atmósfera calentada emite radiación de onda larga, parte de la cual irradia hacia la superficie terrestre, manteniendo nuestro planeta cálido y, en general, confortable.
- El aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y el metano, incrementa la temperatura de la atmósfera inferior al restringir el paso de la radiación emitida hacia el exterior, lo que provoca el "calentamiento global" o, en términos más generales, el cambio climático global.





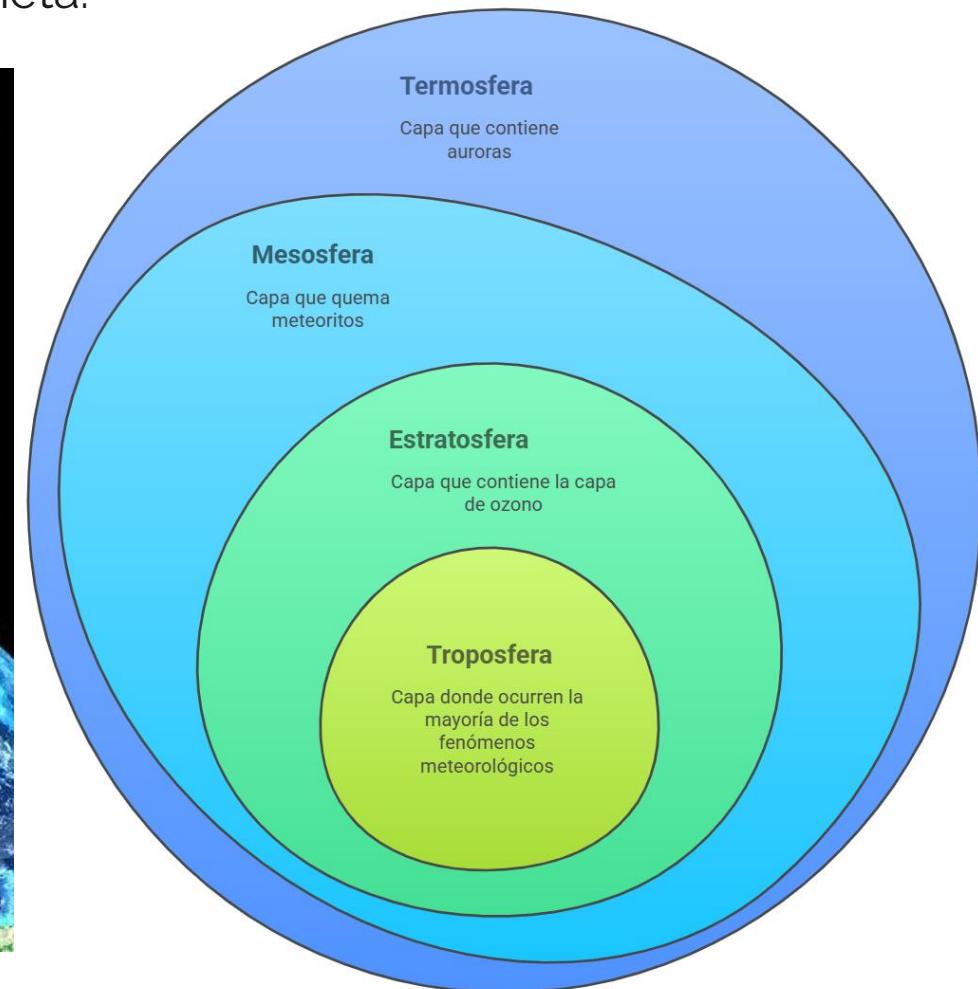
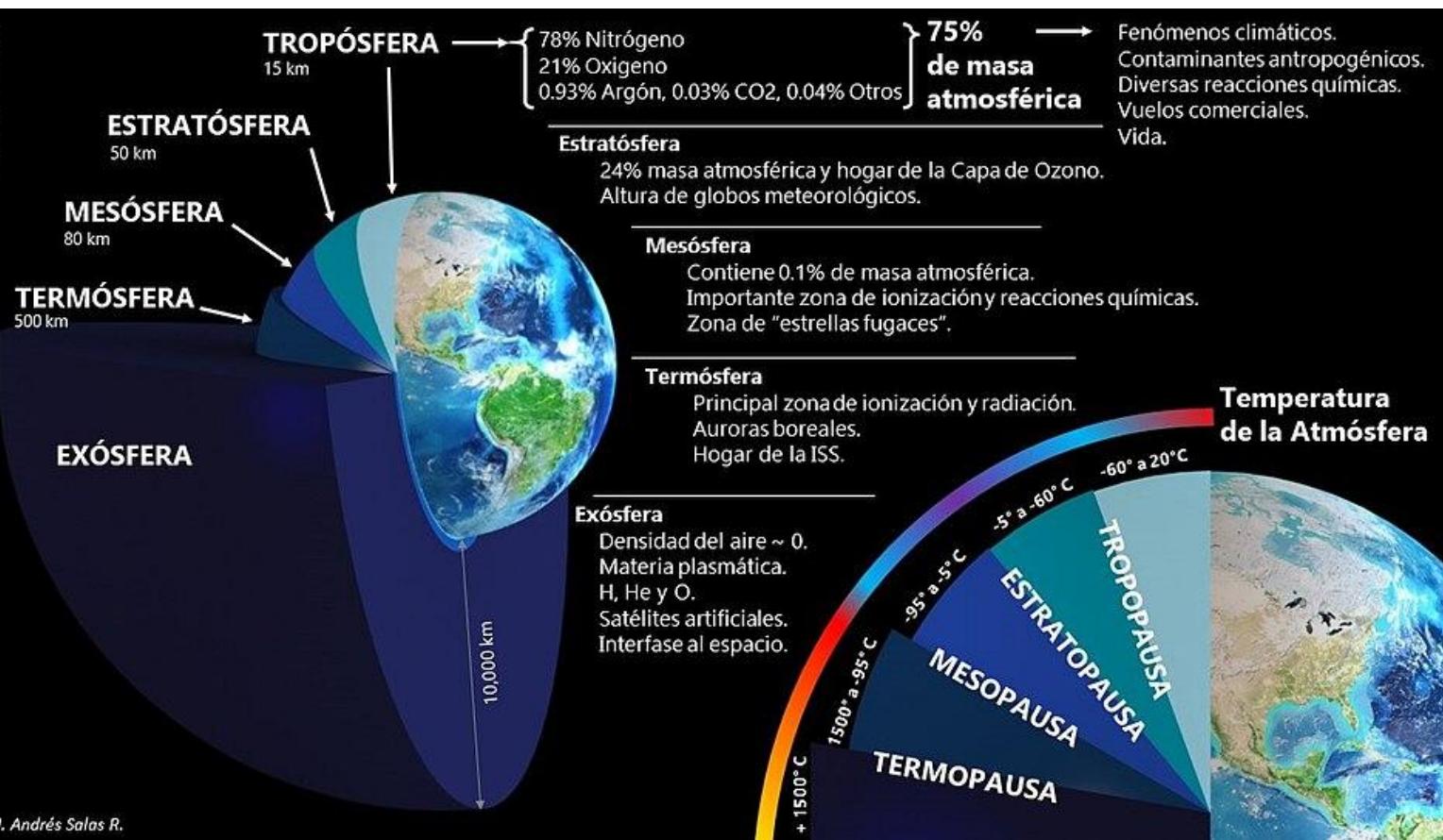


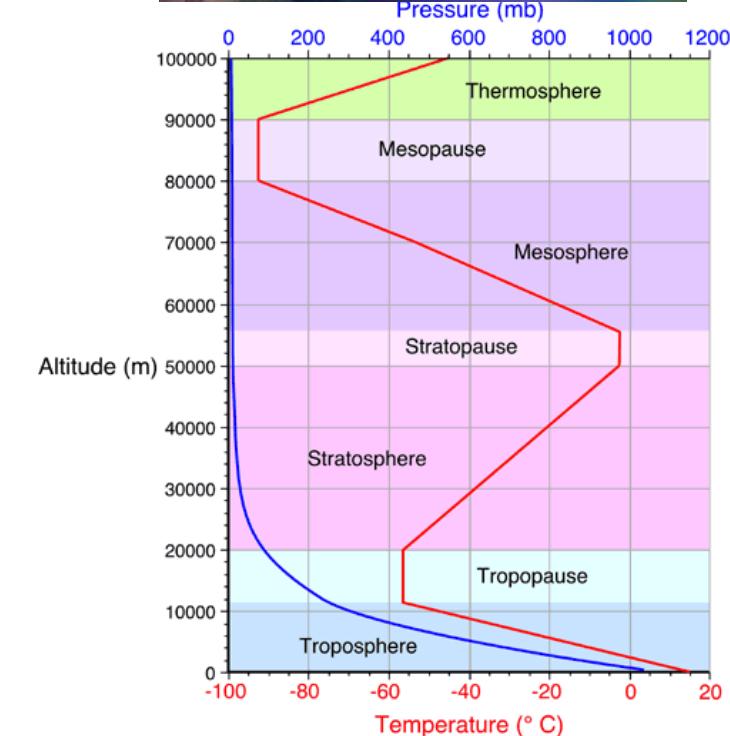
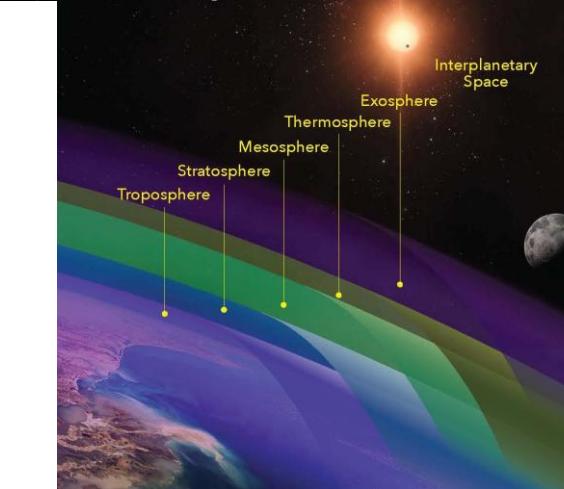
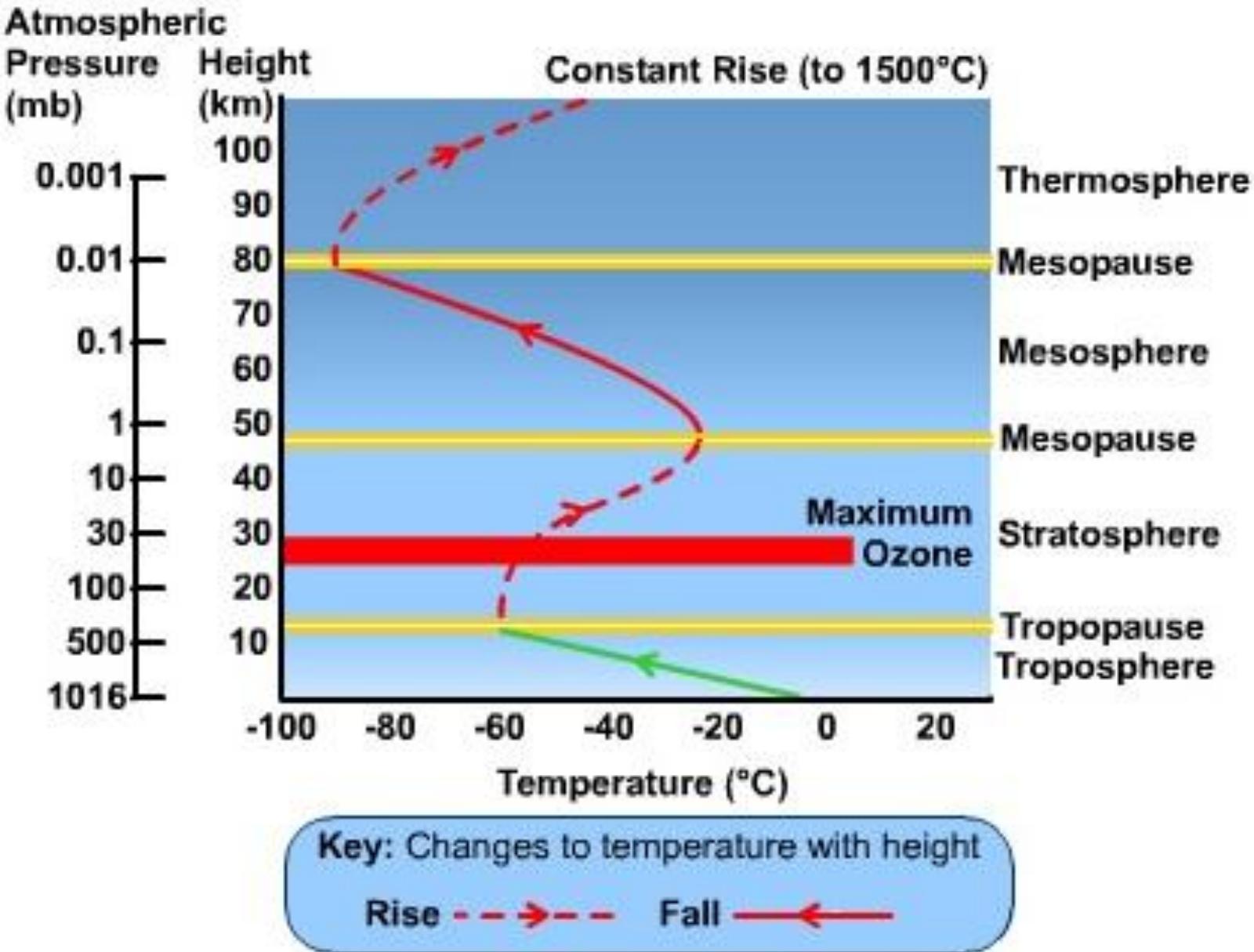


## Cuando hablamos de la atmósfera de la Tierra, ¿a qué nos referimos?

Imagine un pastel de capas, envolviendo la Tierra. Así es esencialmente la atmósfera de la Tierra: capas sobre capas de gas que rodean la Tierra, trabajando para proteger el planeta.

\*Proporciones Redondas.



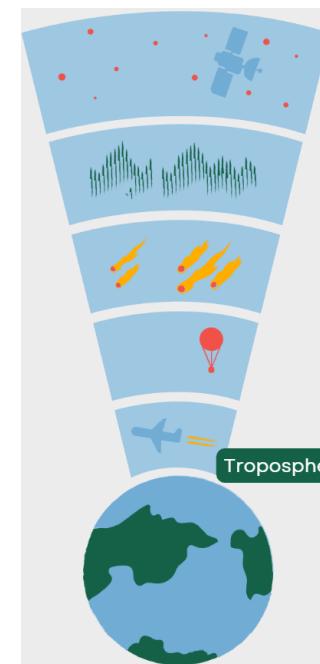




## Troposfera

Es la capa atmosférica más baja. Contiene todo el aire que las plantas necesitan para la fotosíntesis y los animales para respirar. El clima terrestre se produce en esta capa, ya que es donde se encuentra gran parte de la masa atmosférica, incluyendo la mayor parte del vapor de agua. La troposfera es también la capa atmosférica más densa debido a la compresión de las capas superiores.

La troposfera se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 9.140 metros en las regiones polares y aproximadamente 17.940 metros en el ecuador, con cierta variación debido al clima. La troposfera está delimitada por la tropopausa , un límite marcado en la mayoría de los lugares por una inversión térmica (es decir, una capa de aire relativamente cálido sobre otra más fría), y en otros por una zona isotérmica con la altura.



## La Atmósfera Terrestre

1

Es la capa gaseosa que envuelve la Tierra.

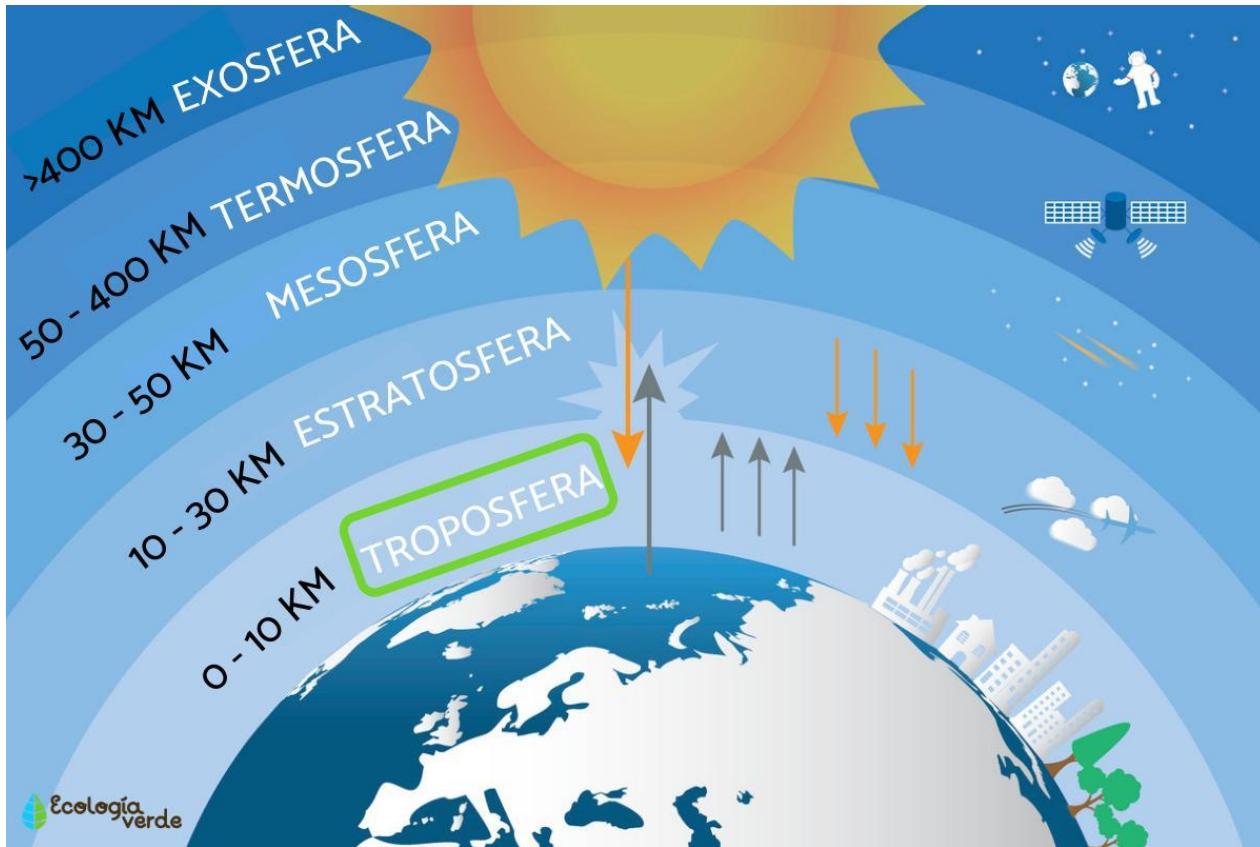
2

Casi todos los fenómenos meteorológicos ocurren en su capa más baja, la troposfera. Esta contiene aproximadamente el 99% del vapor de agua de la atmósfera.



La troposfera interactúa con la superficie terrestre, creando gradientes de temperatura que impulsan el movimiento del aire y el agua. El agua de la superficie terrestre se convierte en vapor de agua mediante la evaporación y la transpiración y se desplaza por la troposfera, donde se condensa formando nubes. Los vientos mueven las nubes y el agua regresa en forma de precipitación: lluvia, nieve, aguanieve y granizo.

En la troposfera, la temperatura disminuye con la altitud debido a que el aire se vuelve más fino en las partes más altas de la capa. Esta disminución de temperatura explica por qué vemos nieve en las cimas de las montañas altas.

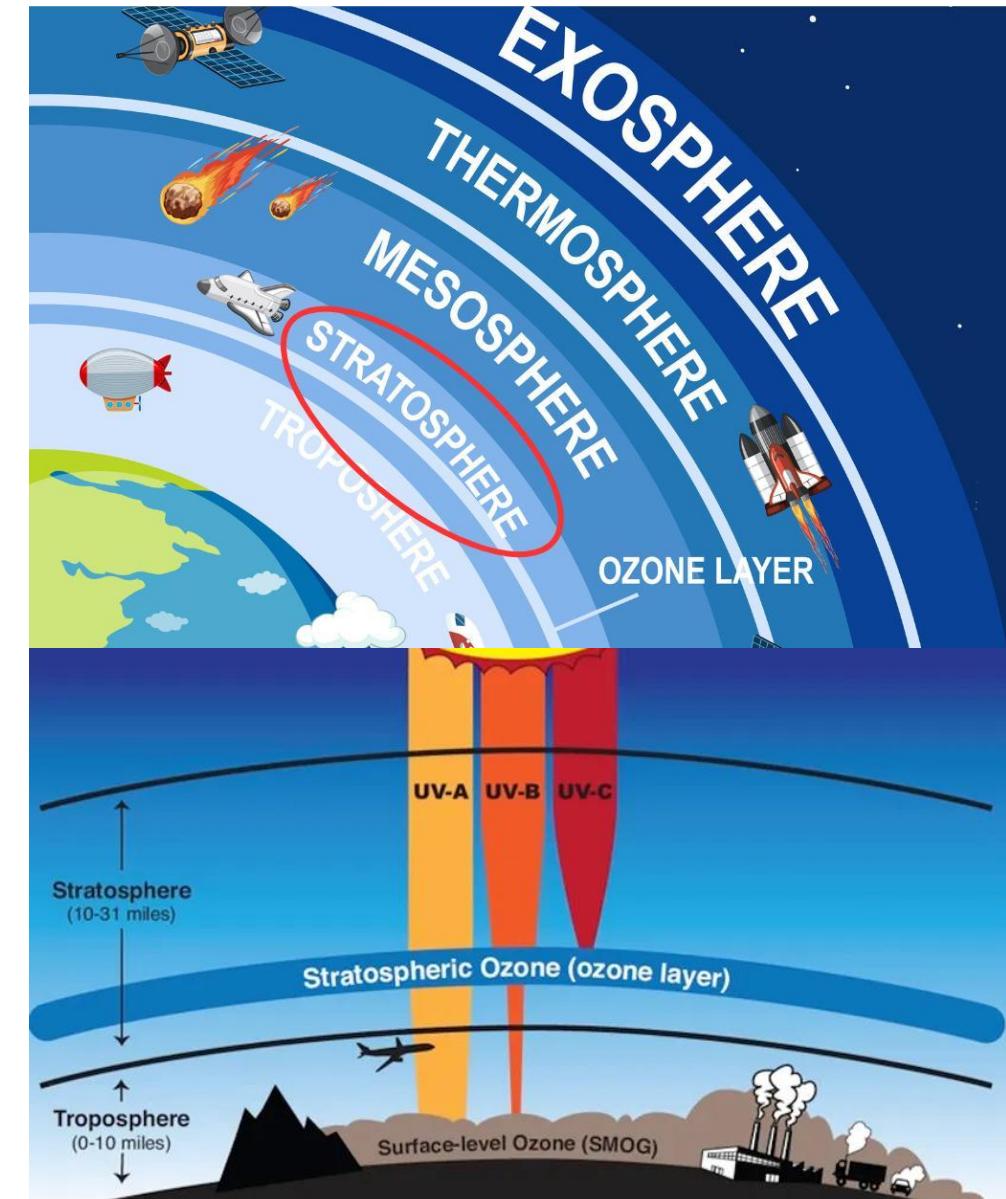




## Estratosfera

La estratosfera es la capa superior a la troposfera. En comparación con la troposfera, la estratosfera inferior experimenta aire menos turbulento debido a la reducción de la convección, el movimiento vertical del aire en la atmósfera. Esta región es donde vuelan los aviones comerciales de pasajeros.

A diferencia de la troposfera, las temperaturas comienzan a aumentar a medida que aumenta la altitud dentro de esta capa, en gran parte debido a la presencia de la capa de ozono, que absorbe y protege la Tierra de la radiación ultravioleta del sol. Esta variación de temperatura crea estabilidad, con aire más frío y denso en la parte inferior y aire cálido y menos denso en la parte superior.

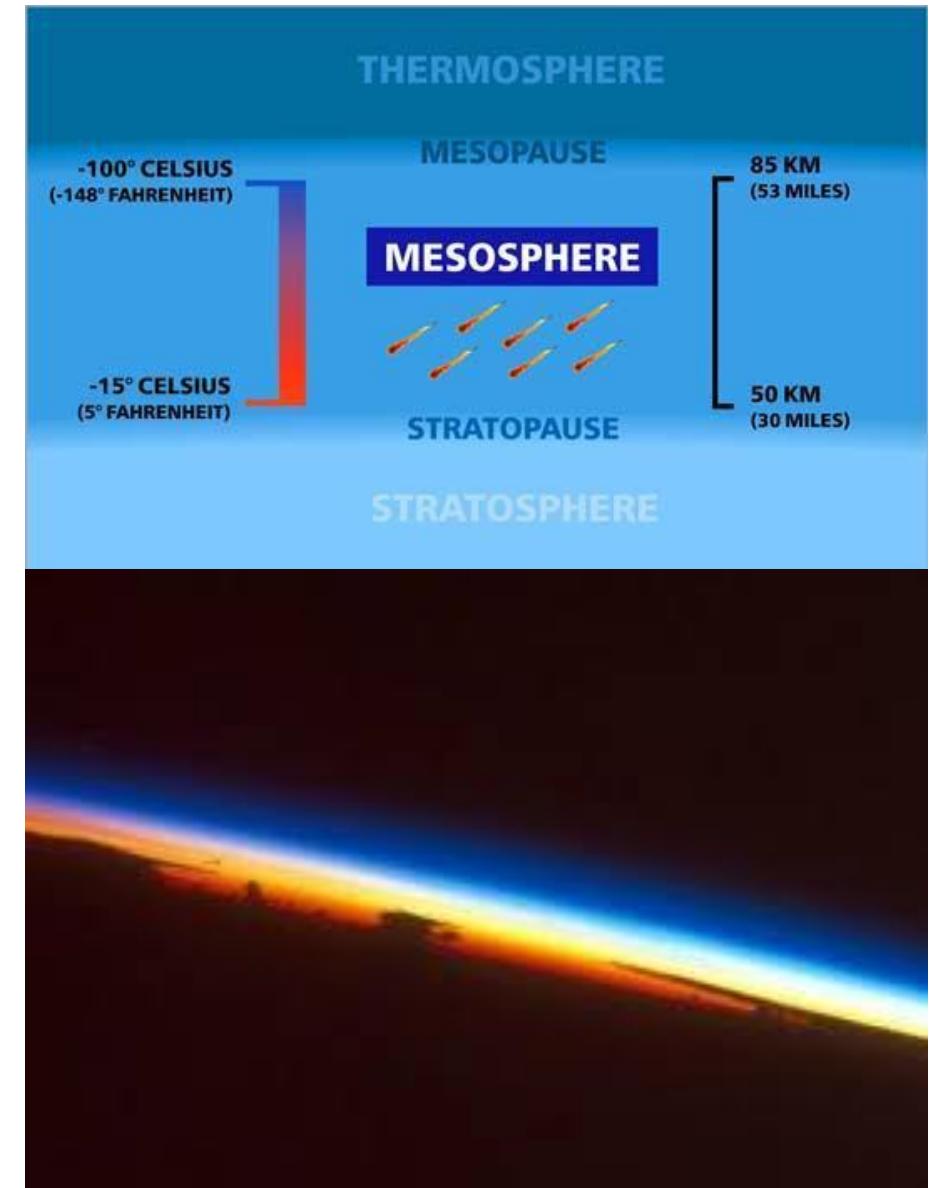




## Mesosfera

La mesosfera es la capa intermedia entre la estratosfera y la termosfera. Los meteoros se queman al entrar en la mesosfera debido a su velocidad de desplazamiento y a la mayor presencia de moléculas de gas en la mesosfera en comparación con las capas atmosféricas exteriores. Esto genera fricción y calor, que incineran los meteoros entrantes.

Al igual que la troposfera, las temperaturas comienzan a disminuir con el aumento de la altitud. La mesosfera es la capa atmosférica más fría, el límite entre la mesosfera y la termosfera, es la parte más fría de toda la atmósfera. Esto se debe a que la mesosfera recibe menos radiación solar (luz solar) que las capas superiores, y el aire es menos denso que las capas inferiores.



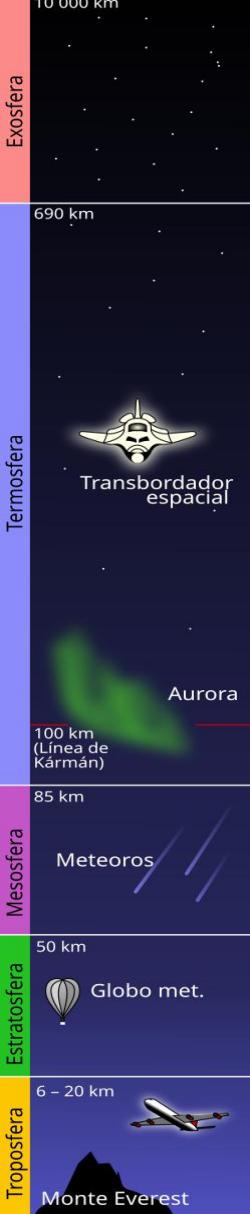


## Termosfera

La termosfera se encuentra por encima de la mesosfera. Esta capa es muy activa, expandiéndose y contrayéndose en respuesta a los niveles variables de radiación solar. La termosfera puede alcanzar temperaturas de hasta 2000 °C o superiores. Esta capa es conocida por albergar la Estación Espacial Internacional y otros satélites de órbita baja terrestre.

Dentro de partes de la mesosfera y la termosfera hay extensiones de electrones de alta energía y átomos ionizados, conocidas como la ionosfera (se trata de grupos de partículas dentro de las mesosferas y termosferas). "Los rayos X y la radiación UV de muy alta energía del Sol inciden en las moléculas [de gas] y arrancan electrones de sus átomos originales, una gran cantidad de iones. Por eso la llamamos ionosfera", Cuando estas partículas se excitan, colisionan para crear las auroras, también conocidas como las luces del norte y del sur.

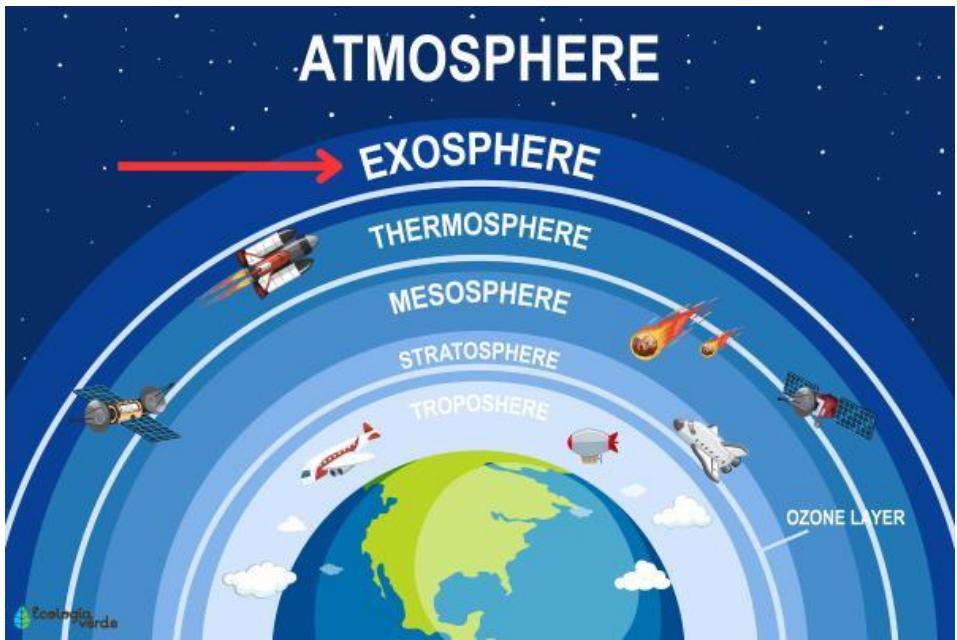




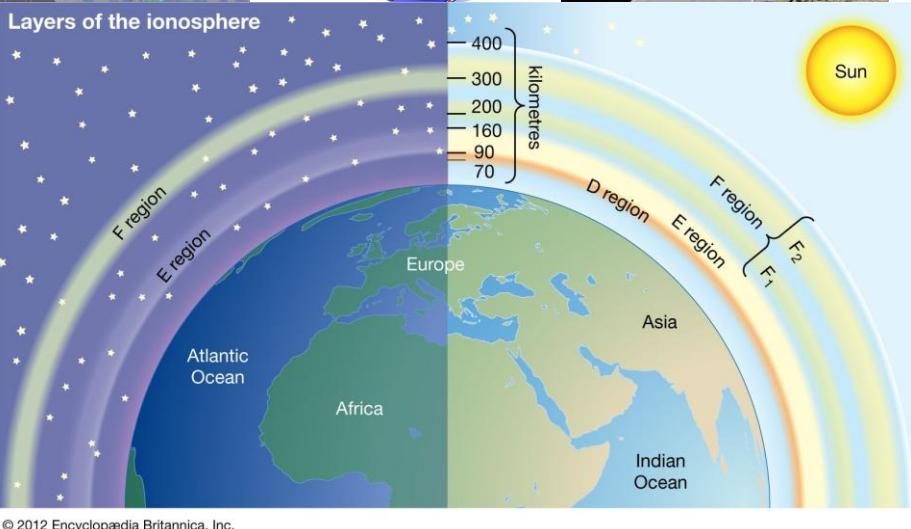
## Exosfera

La exosfera es la capa más externa de la atmósfera terrestre, donde orbitan la mayoría de los satélites. La exosfera marca el final de nuestra atmósfera y el comienzo del espacio exterior, aunque no existe una altitud máxima definitiva donde termina. "Es como si las moléculas de aire se escaparan de la atmósfera terrestre".

Su límite inferior se localiza a una altitud generalmente de 650 km, aproximadamente. Su límite con el espacio llega en promedio a los 10 000 km por lo que la exosfera está contenida en la magnetosfera (el campo magnético de la tierra) (500-60 000 km).



En la exosfera, el concepto popular de temperatura desaparece, ya que la densidad del aire es casi despreciable



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

## Ozonosfera

Es la región de la atmósfera donde se concentra la mayor parte del ozono. Está situada en la estratosfera, entre los 15 y 32 km, aproximadamente. Esta capa protege a la Tierra de la radiación ultravioleta del Sol.



## Regiones atmosféricas

## Ionosfera

Es la región ionizada por el bombardeo producido por la radiación solar. La ionización de esta capa produce la reflexión de las ondas de radio emitidas desde la superficie terrestre, lo que permite su recepción a grandes distancias. Se corresponde aproximadamente con la termosfera.

## Magnetosfera

Es la región exterior a la Tierra donde el campo magnético, generado por el núcleo terrestre, actúa como protector de los vientos solares.

El descubrimiento de la ionosfera se extendió a lo largo de casi un siglo. Ya en 1839, el matemático alemán Carl Friedrich Gauss especuló que una región eléctricamente conductora de la atmósfera podría explicar las variaciones observadas en el campo magnético terrestre.



## Circulación atmosférica

La **circulación atmosférica** es el movimiento del aire a gran escala que ocurre en la atmósfera terrestre y que sirve para distribuir el calor desde las zonas cálidas (como el ecuador) hacia las zonas frías (como los polos).

Este movimiento es fundamental para el **clima y el tiempo meteorológico** en todo el planeta.

### ¿Por qué ocurre?

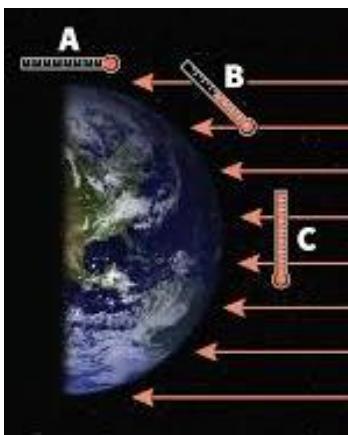
Porque **el Sol calienta la Tierra de forma desigual**:

- El **ecuador** recibe más energía solar → se calienta más.
- Los **polos** reciben menos energía solar → se enfrian más.

Este desequilibrio genera **diferencias de temperatura y presión**, que hacen que el aire se mueva para tratar de equilibrar el sistema.

### para el **clima y el tiempo**

El aire caliente sube y el aire frío baja. Estos principios significan que el aire se mueve alrededor del planeta. El calor se desplaza alrededor del globo de ciertas maneras. Esto determina la forma en que la atmósfera se mueve.





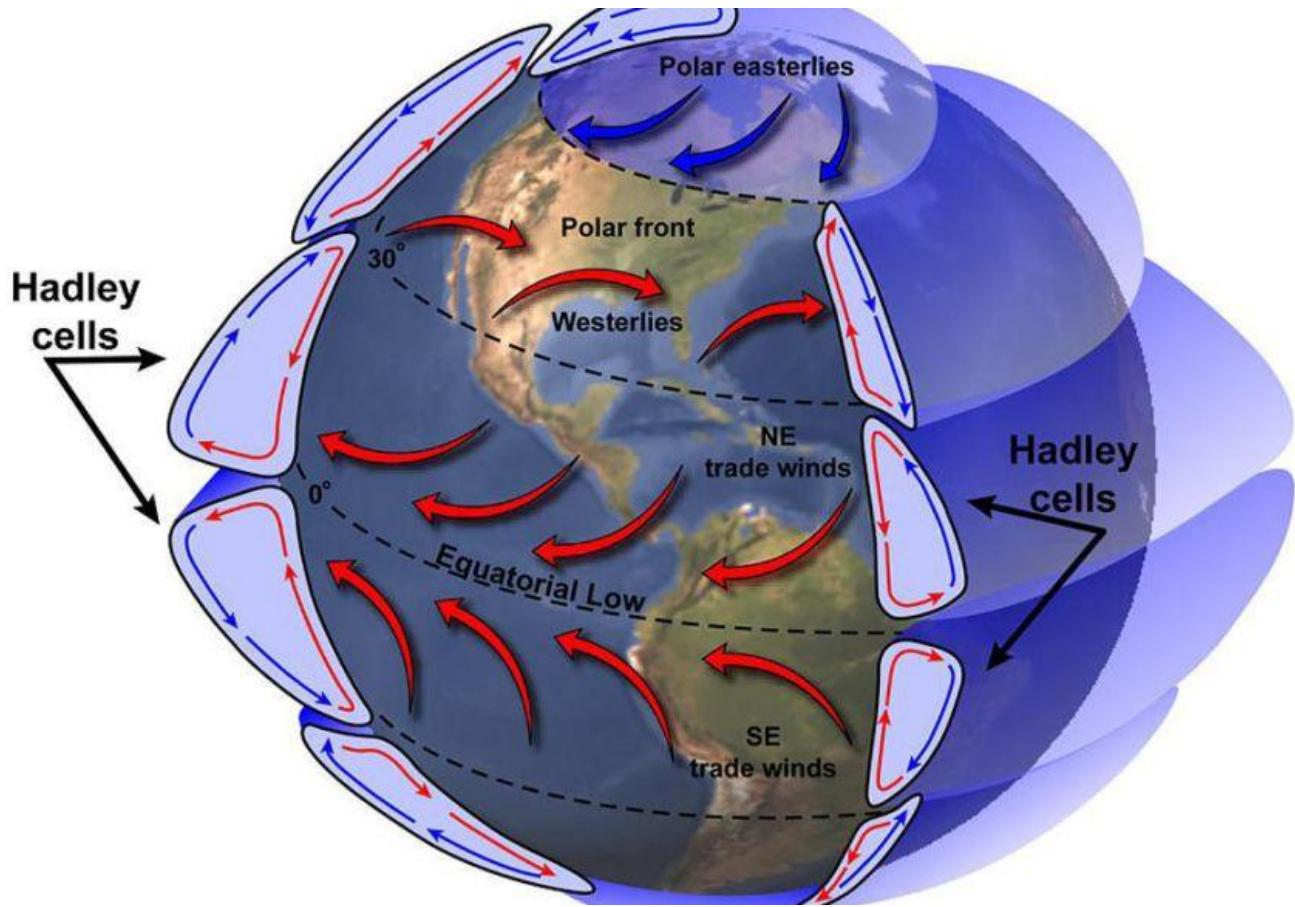
## Convección

Para comprender el tiempo, los meteorólogos estudian los patrones atmosféricos. El patrón atmosférico más conocido que determina el tiempo y el clima es la convección, el proceso por el cual el aire más cálido asciende y el aire más frío y denso desciende. La convección produce una transferencia de energía, calor y humedad, los componentes básicos del tiempo. La convección global está impulsada principalmente por las células de Hadley. Las células de Hadley son patrones de convección tropicales y ecuatoriales.

### ¿Cómo se mueve el aire?

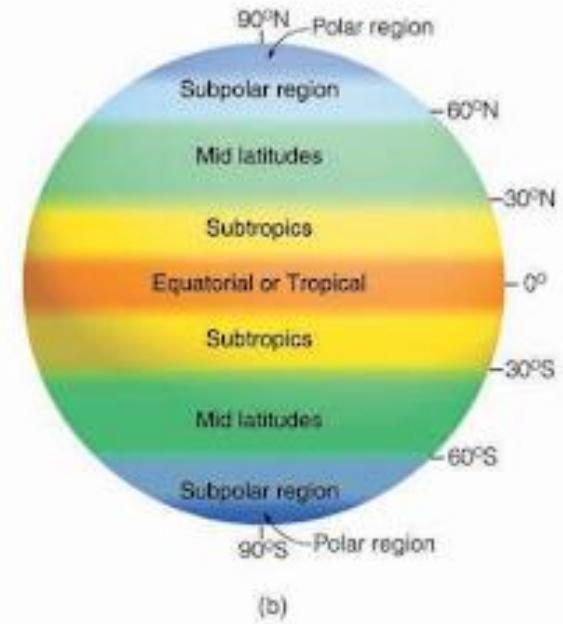
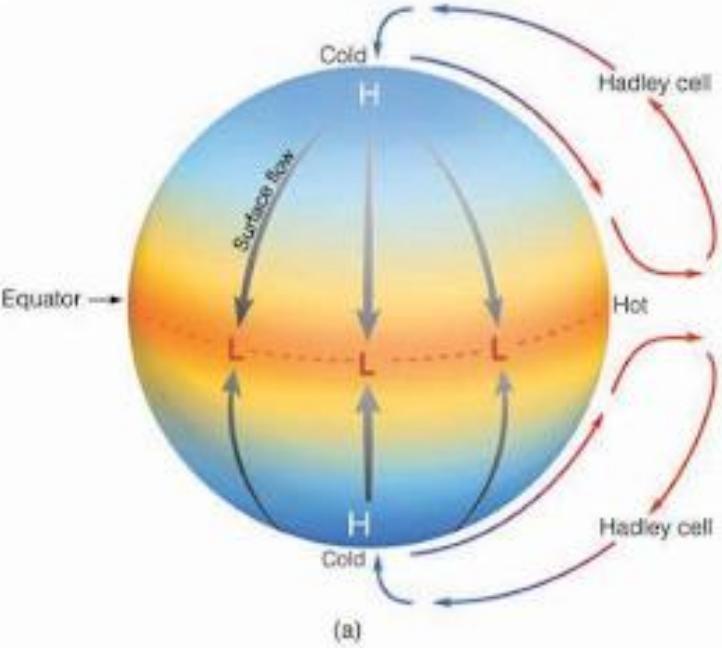
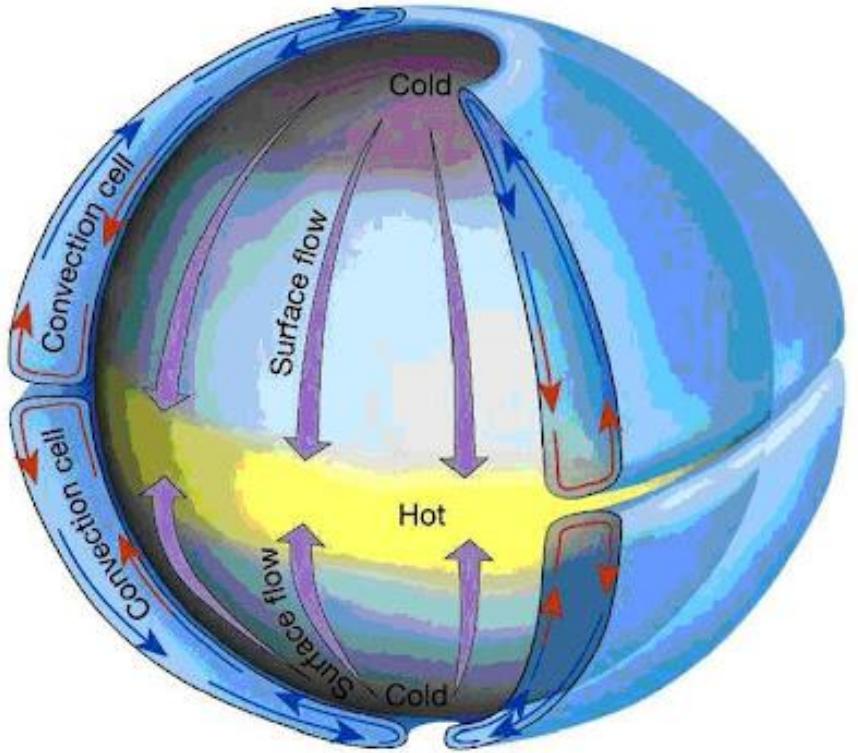
El aire:

1. **Sube** en las zonas cálidas (porque está caliente y es más liviano).
2. **Baja** en las zonas frías (porque está frío y es más denso).
3. Se **desvía** por efecto de la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis).

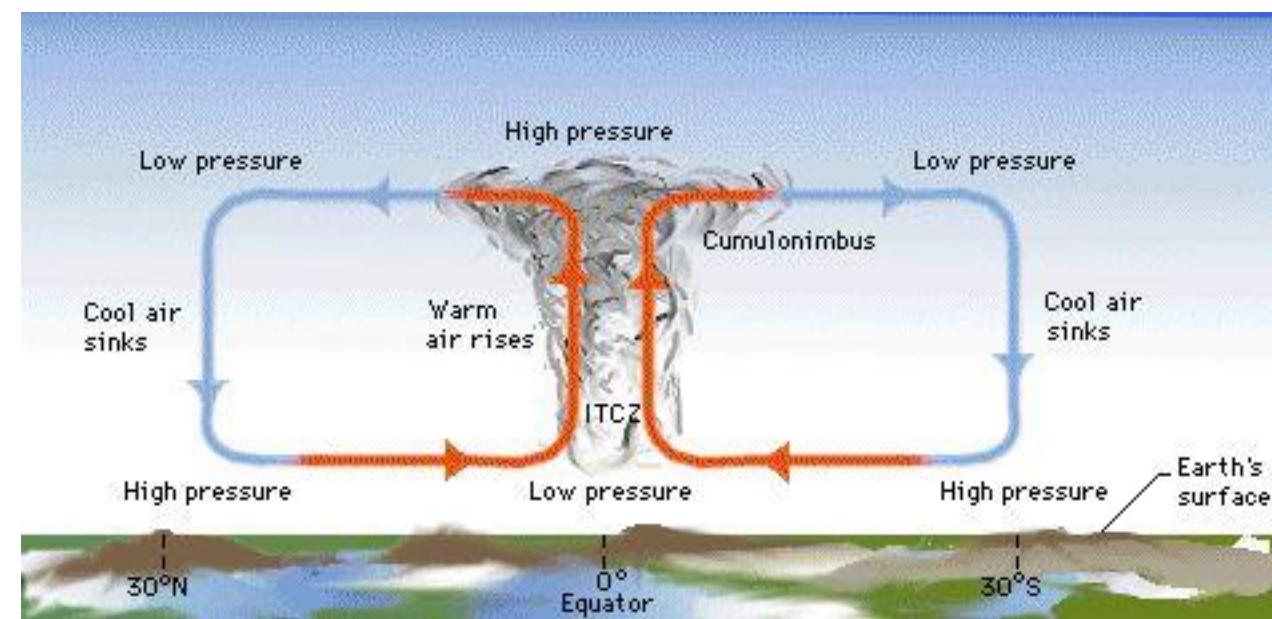
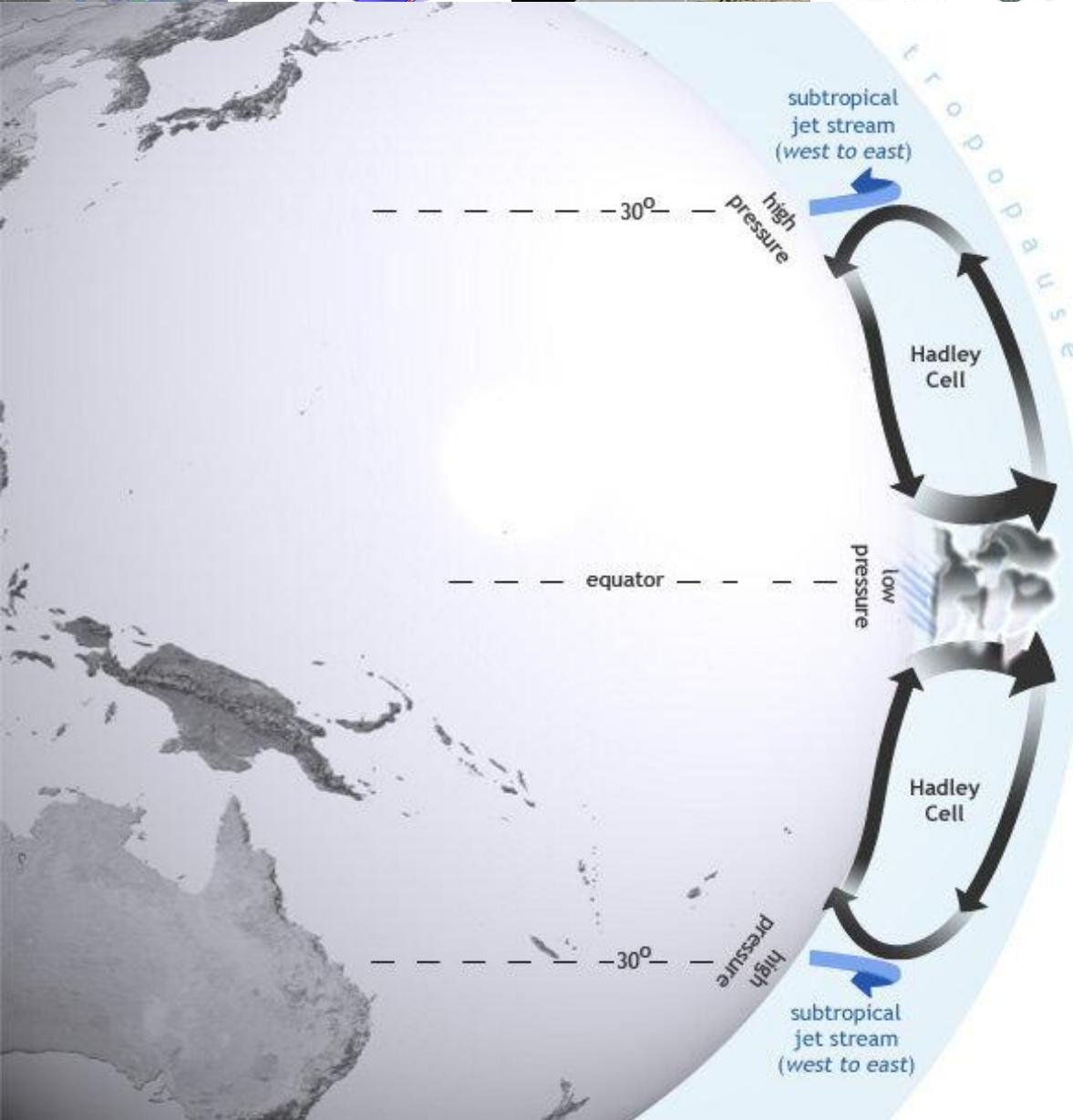


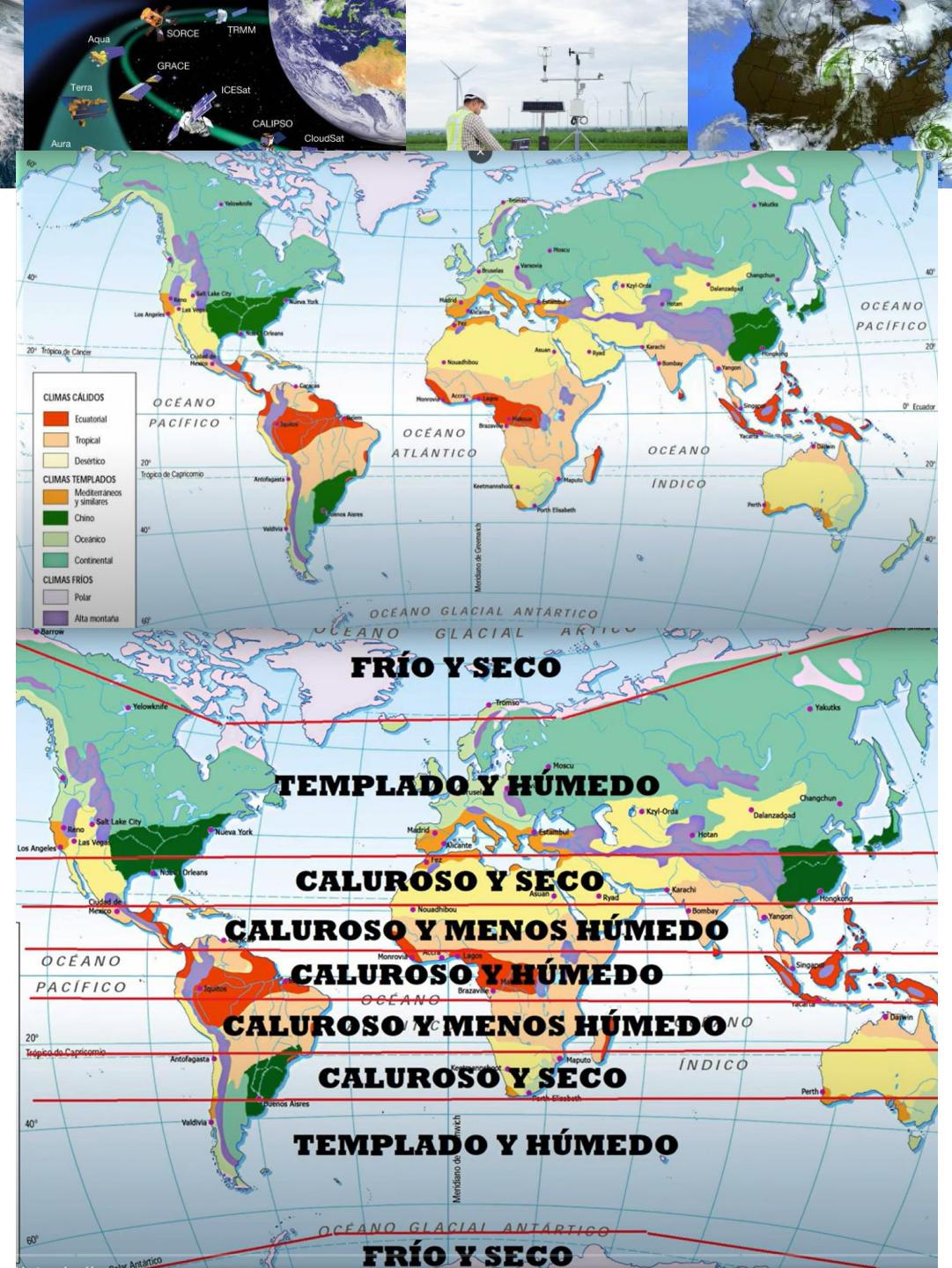
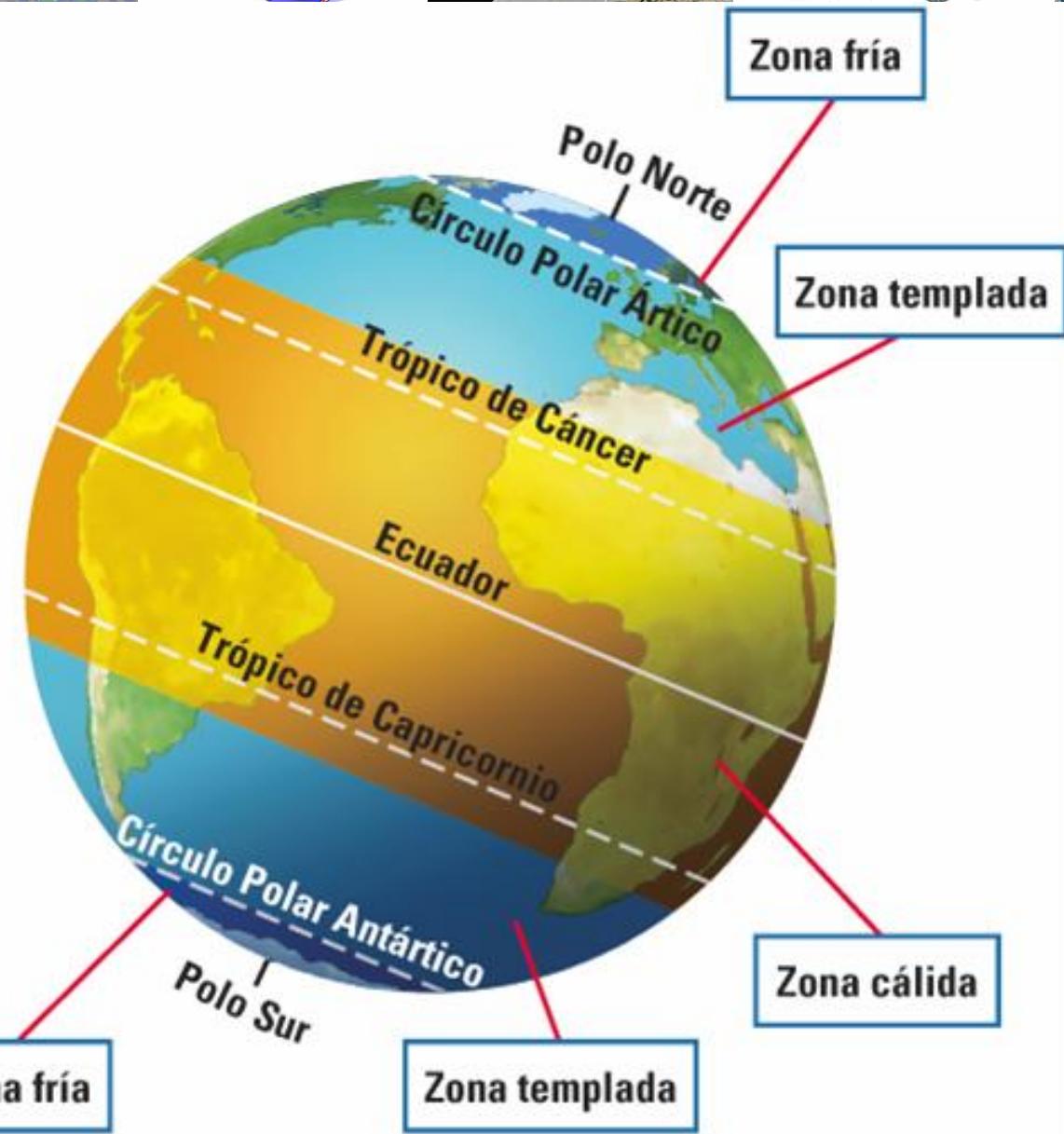


## Modelo Unicelular de Hadley



El modelo primitivo mas elemental de circulación global sugiere la existencia de una sola celda de circulación vertical llamada Celda de Hadley, en honor a George Hadley (1795 – 1868), quien fue el primero en desarrollar este modelo clásico. Hadley pensaba que solo la energía solar conducía los vientos y propuso que las mayores temperaturas del ecuador respecto a los polos deberían crear una circulación térmica, con movimiento en superficie de aire frío desde los polos hacia el ecuador. En el ecuador el aire cálido y menos denso debe ascender, durante el ascenso el aire se va enfriando, por lo que en las capas superiores se comienza a mover hacia los polos, donde el aire frío y mas pesado debe descender sobre los polos, como se muestra en el esquema de la figura; pero esto no es así.







## Vientos planetarios y circulación atmosférica – Vientos Alisios, del Oeste y Polares.

son aquellos que tienen grandes recorridos sobre el planeta (cientos o miles de kilómetros), y son los responsables de transportar una gran cantidad de energía térmica. Los principales grupos de vientos globales son los Alisios del noreste (Hemisferio Norte), los vientos Alisios del sureste (Hemisferio Sur), los vientos del Oeste (en ambos hemisferios), y los vientos circumpolares (que son los que se producen entre las latitudes de los círculos polares y su polo correspondiente).

Latitud	Viento predominante	Dirección
0° a 30°	Alisios	Este → Oeste
30° a 60°	Vientos del oeste	Oeste → Este
60° a 90°	Vientos polares	Este → Oeste

### ¿Qué efectos tiene?

- 1. Forma zonas climáticas:** ecuatorial, tropical, templada, polar.
- 2. Determina patrones de precipitación:** lluvias en el ecuador, sequías en zonas subtropicales.
- 3. Influye en fenómenos como El Niño, huracanes y monzones.**
- 4. Transporta humedad y contaminantes.**

## SIGLO XVIII

JOHN HADLEY



## SIGLO XX

CARL ROSSBY





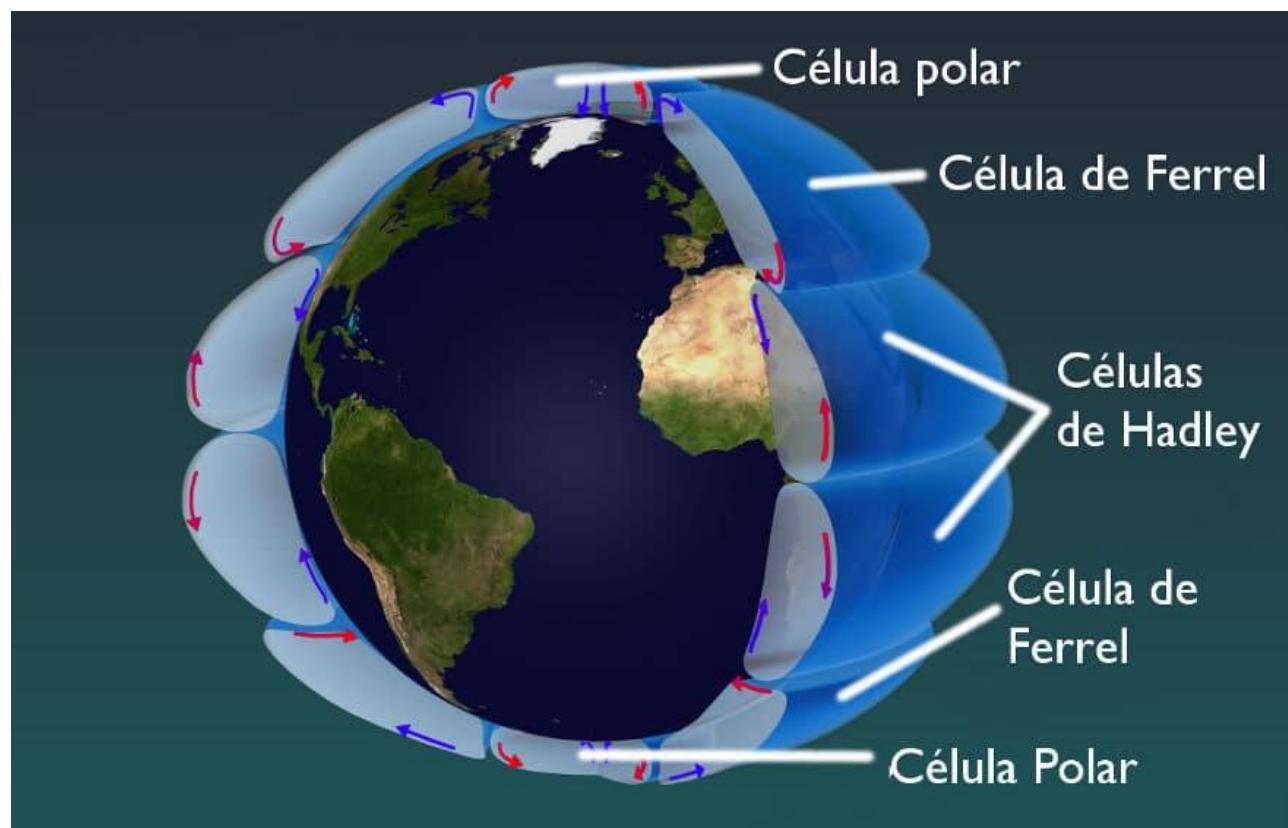
¿Cómo se organiza ese movimiento?

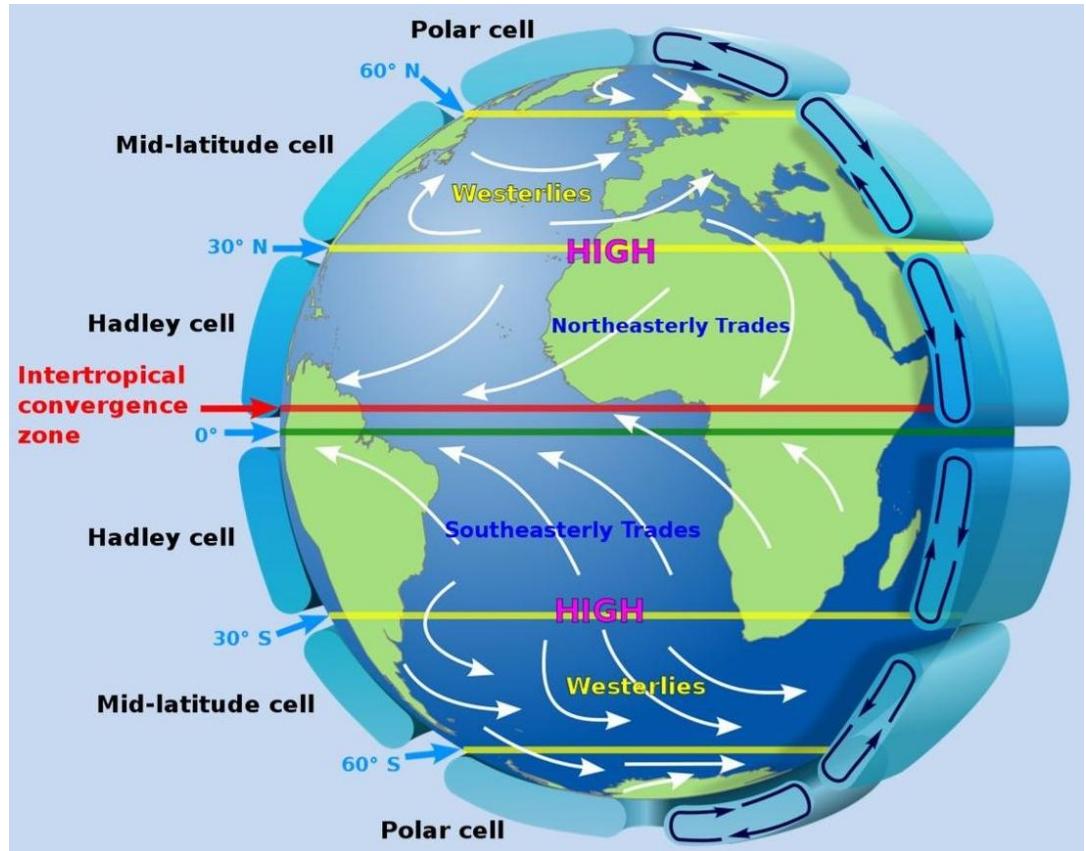
La circulación general de la atmósfera se divide en

**3 grandes celdas por hemisferio:**

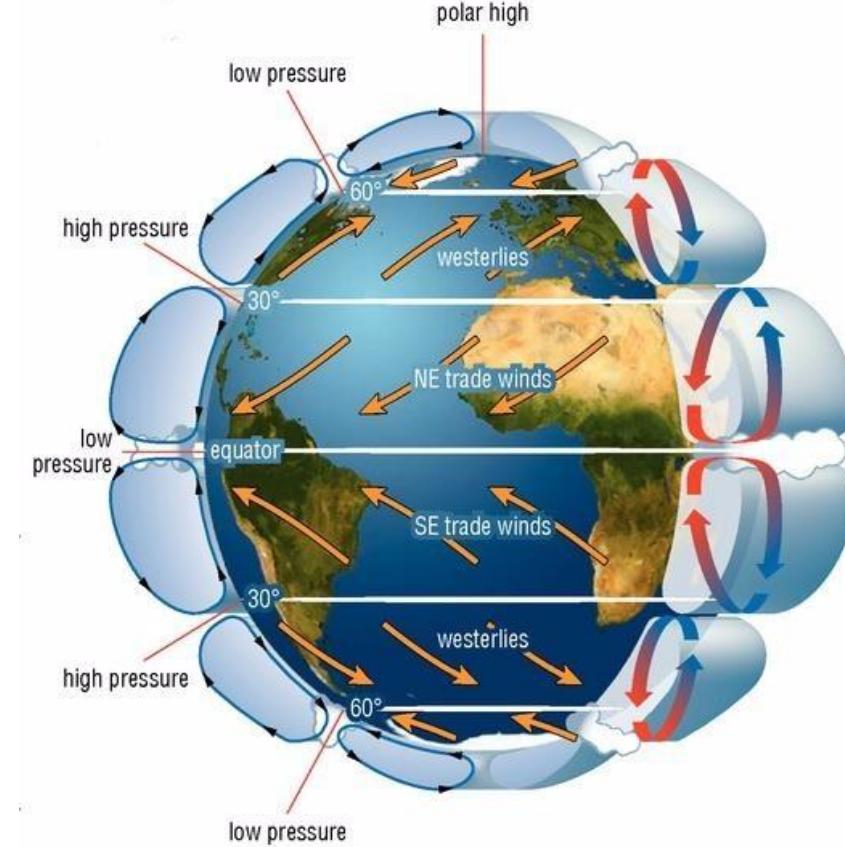
Celda	Latitud aproximada	Movimiento del aire	Características
Hadley	0° a 30°	Aire sube en el ecuador y baja en los trópicos	Zona ecuatorial lluviosa; desiertos en 30°
Ferrel	30° a 60°	Aire sube en 60° y baja en 30°	Climas templados, inestables
Polar	60° a 90°	Aire baja en los polos y sube en 60°	Aire frío y seco; alta presión

## Modelo tricelular de Rossby





En el ecuador, la presión atmosférica tiende a ser baja debido al intenso calor solar que recibe. Este calor hace que el aire se eleve, creando una zona de baja presión en la superficie terrestre.

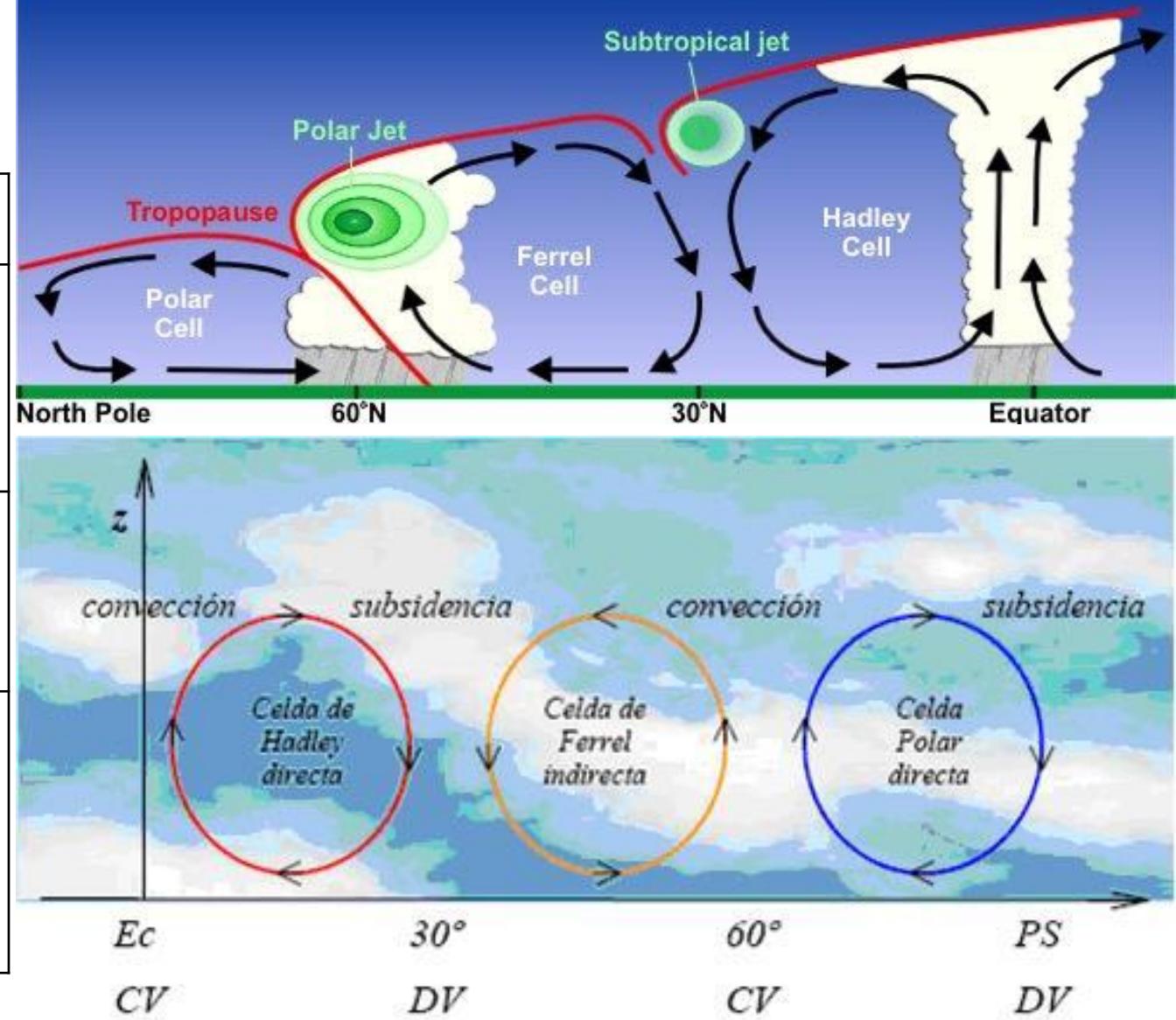


El aire cálido y húmedo asciende en la zona ecuatorial, creando una zona de baja presión. Al ascender, este aire se enfriá y se desplaza hacia latitudes más altas, donde desciende y se comprime, generando zonas de alta presión en las regiones subtropicales



## Corte vertical de la circulación general – Modelo tricelular

Celda	Latitud	Movimientos del aire	Vientos en superficie	Zonas climáticas asociadas
Hadley	0° – 30°	- Aire <b>asciende</b> en el ecuador (ITCZ)- <b>Se desplaza en altura</b> hacia 30°- <b>Desciende</b> en subtropicales	Alisios (Este → Oeste)	Selvas ecuatoriales (lluviosas) Desiertos subtropicales (secos)
Ferrel	30° – 60°	- Aire <b>desciende</b> en 30°- <b>Se mueve en superficie</b> hacia 60°- <b>Asciende</b> en el frente polar	Vientos del oeste (Oeste → Este)	Clima templado y variable en latitudes medias
Polar	60° – 90°	- Aire <b>desciende</b> sobre los polos- <b>Se mueve en superficie</b> hacia 60°- <b>Asciende</b> al encontrar aire templado	Vientos polares del este (Este → Oeste)	Regiones polares frías y secas



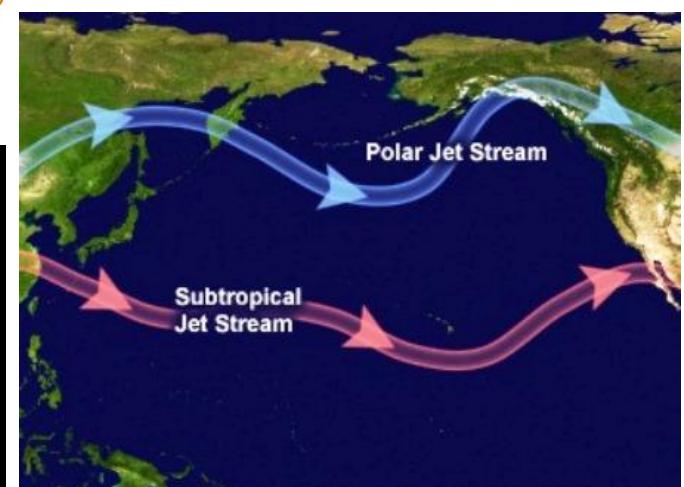
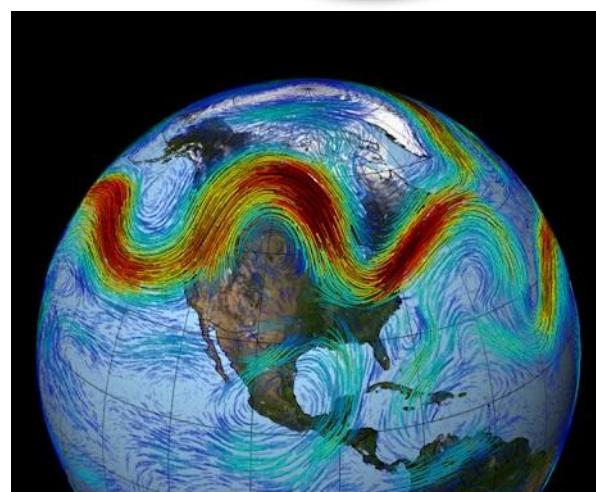
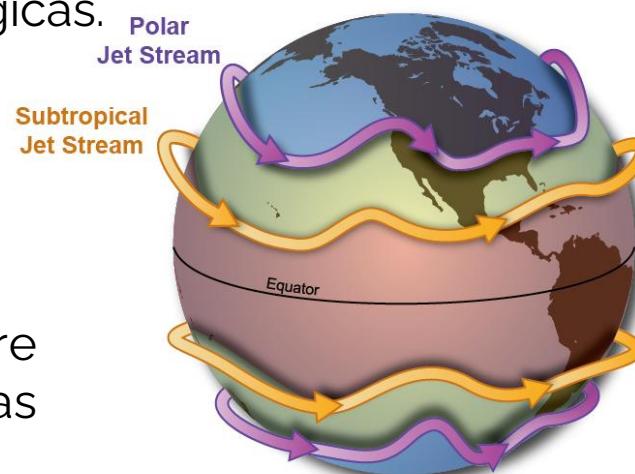


La "jet propulsion" en meteorología se refiere a las corrientes en chorro, también conocidas como jet streams. Son bandas estrechas de fuertes vientos que se encuentran en la atmósfera superior, a grandes altitudes, y que se desplazan principalmente de oeste a este. Estas corrientes tienen un impacto significativo en el clima y las condiciones meteorológicas.

Esta corriente, que fluye de oeste a este, puede alcanzar velocidades de más de 300 km/h

Se forma debido a la diferencia de temperatura entre las zonas cálidas cercanas al ecuador y las zonas frías cercanas a los polos.

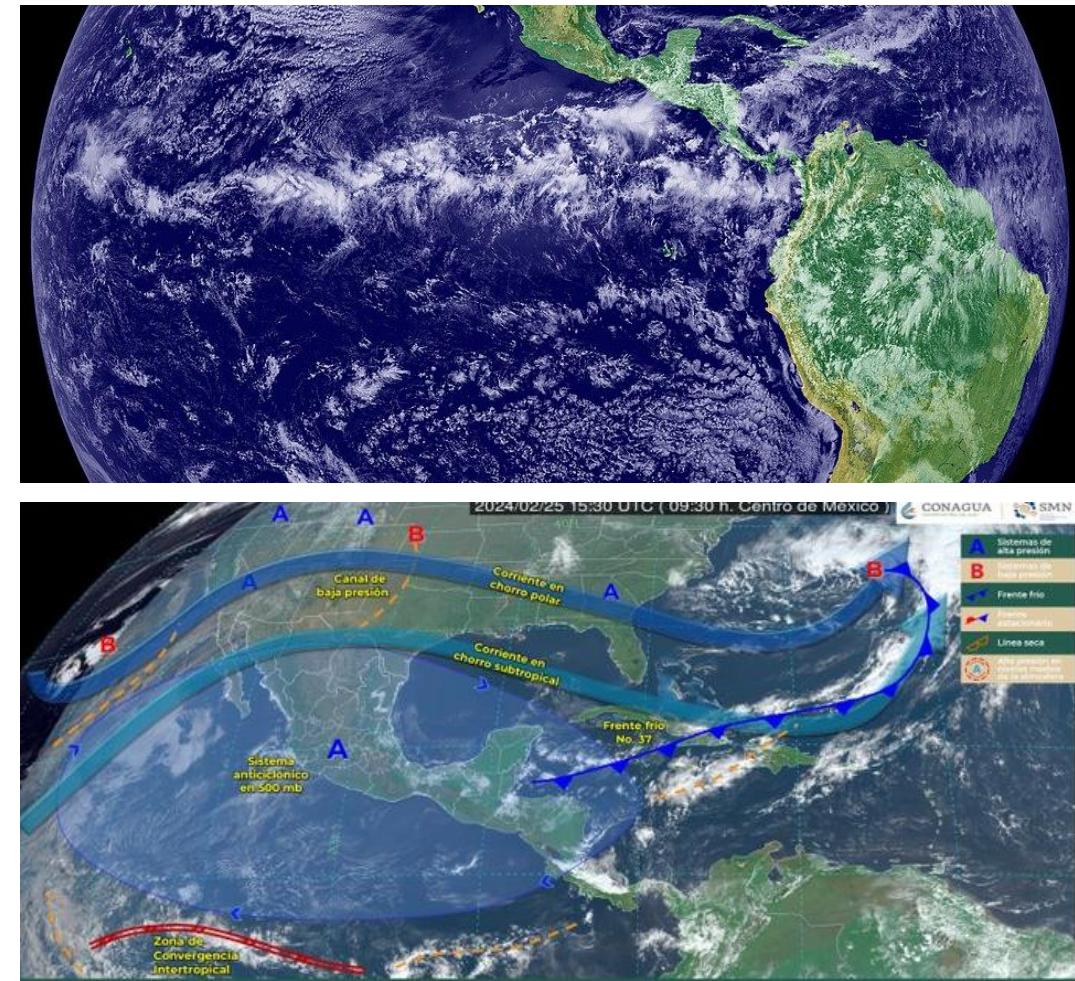
Las principales corrientes en chorro de la Tierra están localizadas cerca de la tropopausa, la transición entre la troposfera (donde la temperatura decrece con la altitud) y la estratosfera (donde la temperatura crece)





# Fundamentos atmosféricos de la climatología regional y local

De acuerdo con Salas et al. (2020), los patrones de circulación atmosférica estacional que interactúan en la variación de los hidroclimáticos en Colombia son: la oscilación meridional de la **zona de convergencia intertropical** (Poveda, 2004; Hurtado y Mesa, 2015), la **actividad de los vientos alisios del Este** (Montealegre y Pabón, 2000), el **Niño-oscilación del Sur** (Poveda y Mesa, 1997; Poveda et al., 2001), los **chorros de viento de bajo nivel del Choco, Orinoco, Caribe** (Poveda et al., 2014; Salas et al., 2020), **oscilación Madden-Julian** (Pabón y Dorado, 2008; Torres-Pineda y Pabón, 2017) y finalmente el **flujo transecuatorial** (Wang y Fu, 2002), como posible mecanismo físico de transporte de humedad desde el noroeste de la Amazonía hacia el territorio Colombiano.

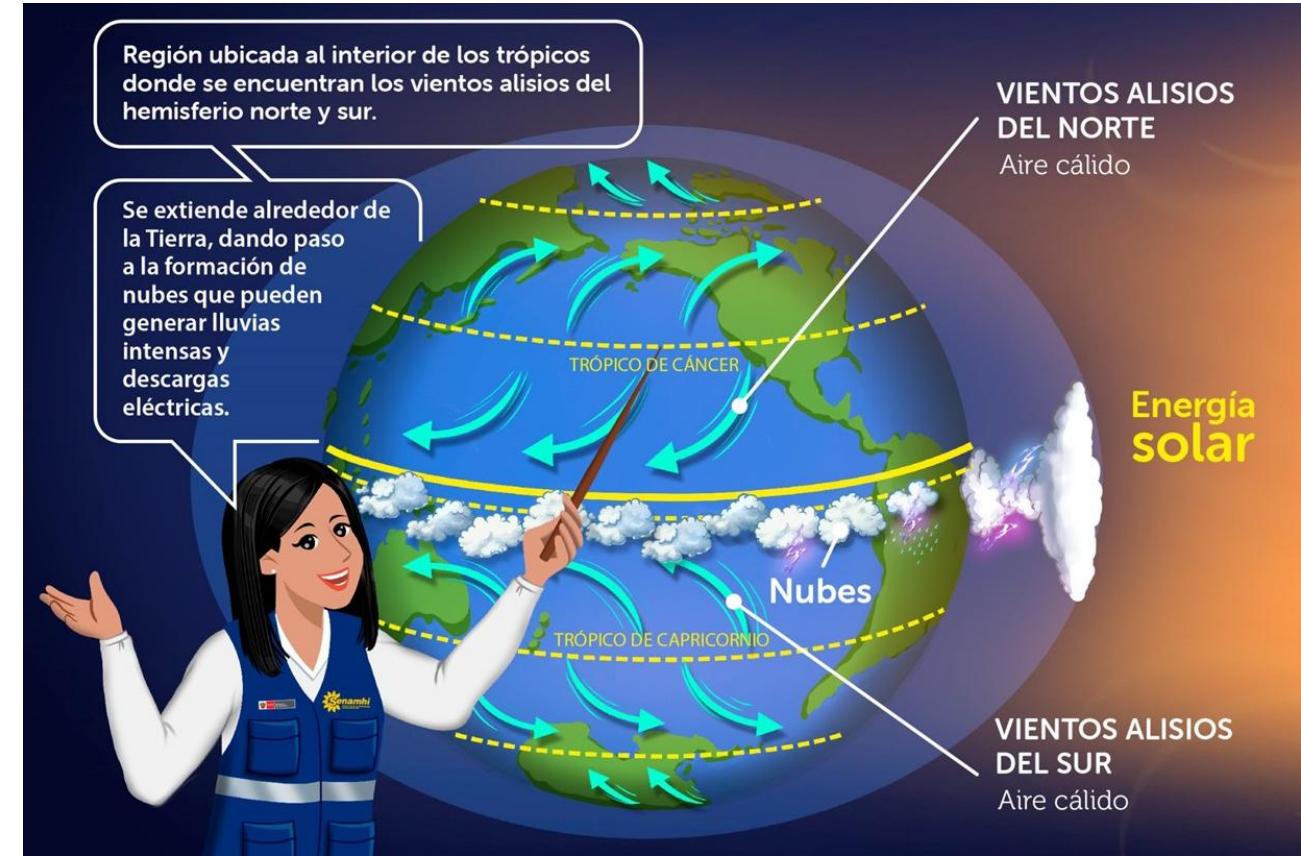




# Zona de convergencia intertropical (ZCIT)

Es una banda de bajas presiones cerca del ecuador donde los vientos alisios del norte y sur chocan, calientan el aire y provocan el ascenso de masa de aire húmedo, generando alta nubosidad y fuertes precipitaciones. Su posición varía geográficamente a lo largo del año, moviéndose al norte y al sur del ecuador, y es la principal causa de los períodos lluviosos y secos en zonas tropicales como la región andina de Colombia.

La zona intertropical, donde se encuentra la ZCIT, es muy rica en biomasa debido a la intensa fotosíntesis, la cual es favorecida por el clima cálido y húmedo. En Colombia



Estaciones lluviosas: La ZCIT es el factor principal que define las estaciones lluviosas en la región andina de Colombia, que ocurren aproximadamente de marzo a mayo y de septiembre a noviembre.

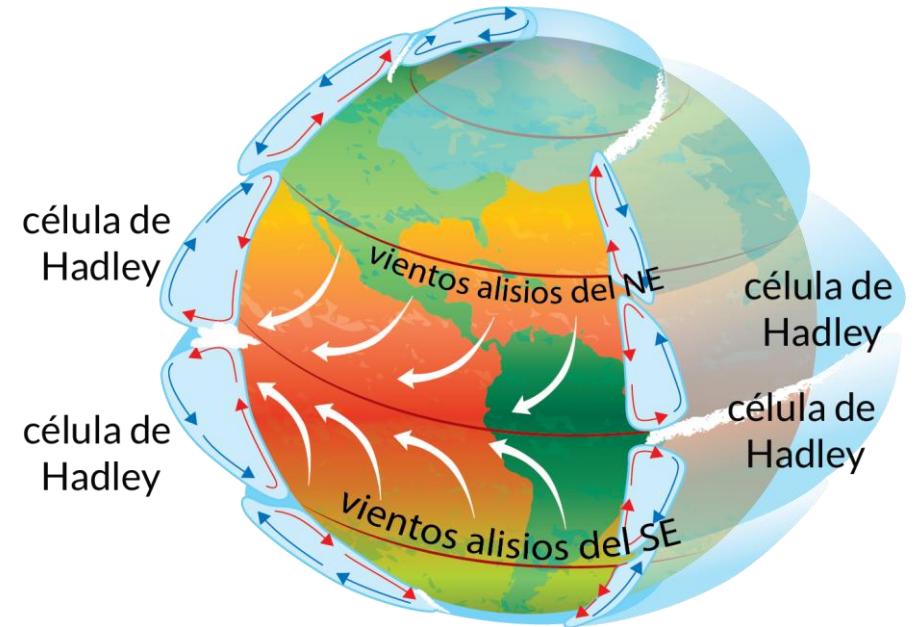


# Actividad de los vientos alisios del Este

Los vientos alisios del Este son vientos planetarios constantes que soplan desde los trópicos de Cáncer y Capricornio (aproximadamente 30° de latitud norte y sur) hacia el ecuador, en dirección de oeste a este, pero desviados por el efecto Coriolis para ser predominantemente del este. Su actividad es fundamental para la navegación a vela histórica, el comercio entre continentes y el transporte de humedad que genera precipitaciones en zonas tropicales.

**Origen:** Se originan en las zonas de alta presión subtropical.

**Movimiento:** El aire cálido asciende en el ecuador, mientras que el aire más frío se desplaza para sustituirlo, creando un ciclo de circulación conocido como la célula de Hadley.



**Tormentas:** Actúan como una "corriente conductora" para las tormentas tropicales y huracanes, influyendo en su trayectoria.

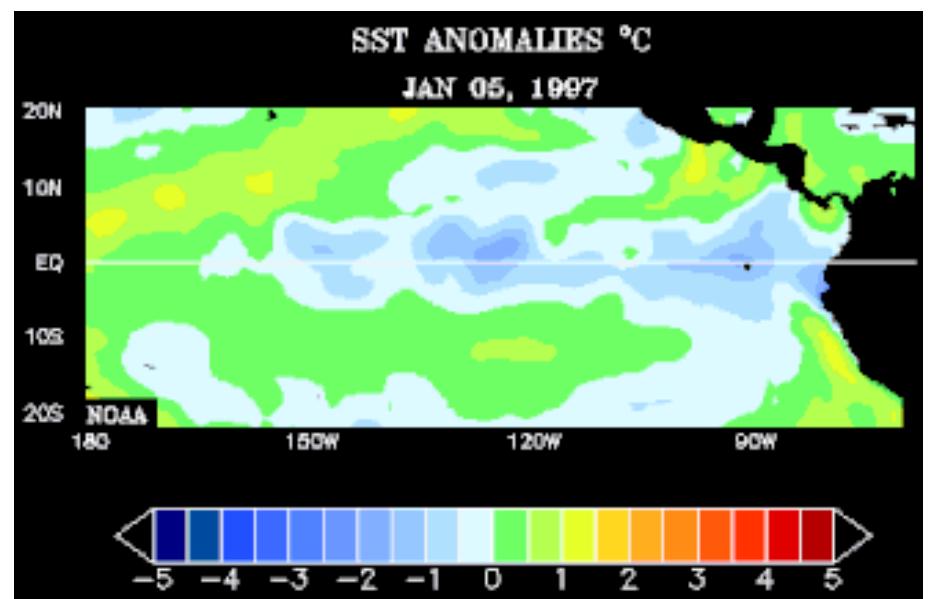
**Transporte de polvo:** En regiones como el Atlántico, los alisios transportan polvo sahariano hacia Latinoamérica y el Caribe, lo cual puede afectar la calidad del aire y suprimir las lluvias en esas zonas.

**Fenómenos climáticos:** Los vientos alisios también juegan un papel fundamental en grandes fenómenos climáticos como El Niño y La Niña.

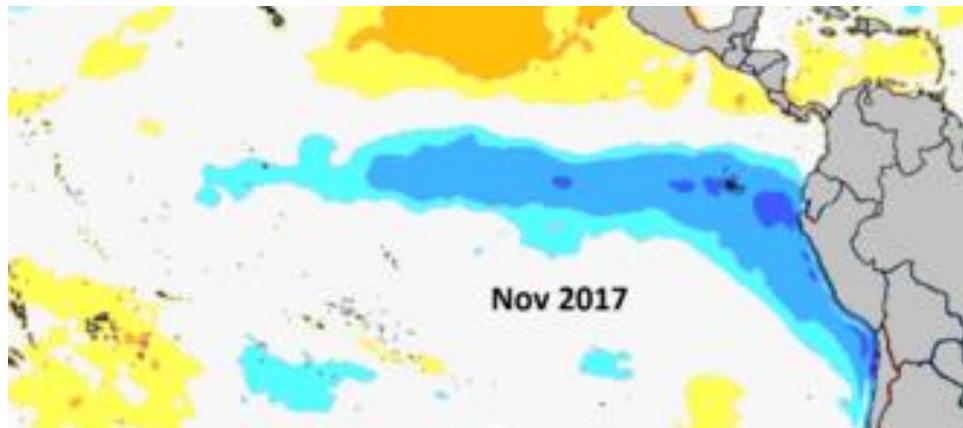
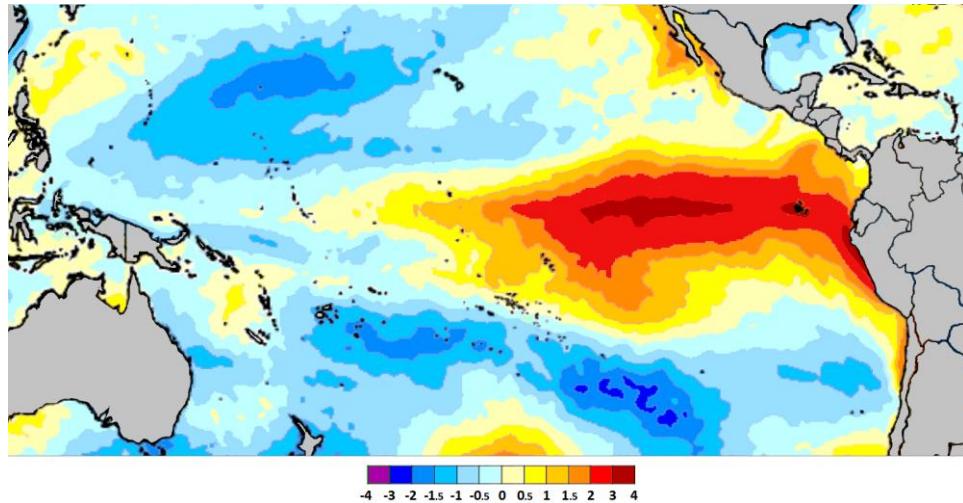


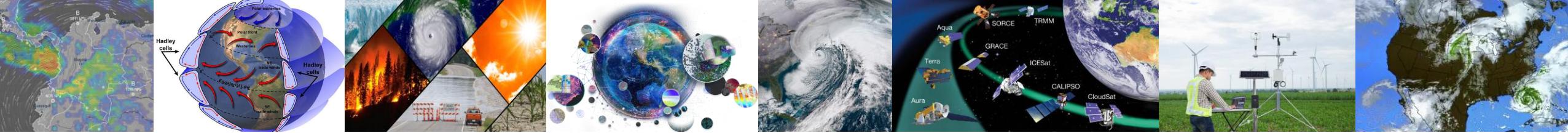
# Niño-Oscilación del Sur

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es un patrón climático natural que incluye cambios en la temperatura del océano Pacífico ecuatorial y la presión atmosférica. Se trata de una fluctuación periódica que afecta al clima global, alternando entre tres fases: El Niño (cálida), La Niña (fría) y una fase neutra. El nombre "El Niño" proviene de la corriente cálida que se observa cerca de la costa de Perú alrededor de diciembre,



**Oscilación del Sur:** El componente atmosférico asociado con El Niño y La Niña, que se refiere a los cambios en la presión atmosférica sobre el Pacífico tropical.





## El Niño

Durante El Niño, las aguas superficiales del Pacífico ecuatorial central y oriental se calientan anormalmente. Esto ocurre cuando los vientos alisios del este se debilitan o incluso pueden invertir su dirección. Normalmente, estos vientos empujan las aguas cálidas hacia el oeste (Asia), pero cuando se debilitan, las aguas cálidas se extienden hacia el este, llegando hasta las costas de Perú y Ecuador.

### Características principales:

- Temperatura del agua superficial  $0.5^{\circ}\text{C}$  o más por encima del promedio
- Debilitamiento de los vientos alisios
- Reducción de la surgencia de aguas frías en la costa occidental de Sudamérica
- Desplazamiento hacia el este de las zonas de convección y lluvia

Estos patrones oceánicos y atmosféricos varían en un ciclo irregular de 2 a 7 años, lo que puede causar cambios predecibles en los patrones de viento y lluvia a nivel mundial.

## La Niña

La Niña representa la fase opuesta, con un enfriamiento anormal de las aguas superficiales del Pacífico ecuatorial central y oriental. Los vientos alisios se intensifican más de lo normal, empujando con mayor fuerza las aguas cálidas hacia el oeste y provocando una mayor surgencia de aguas frías en el este.

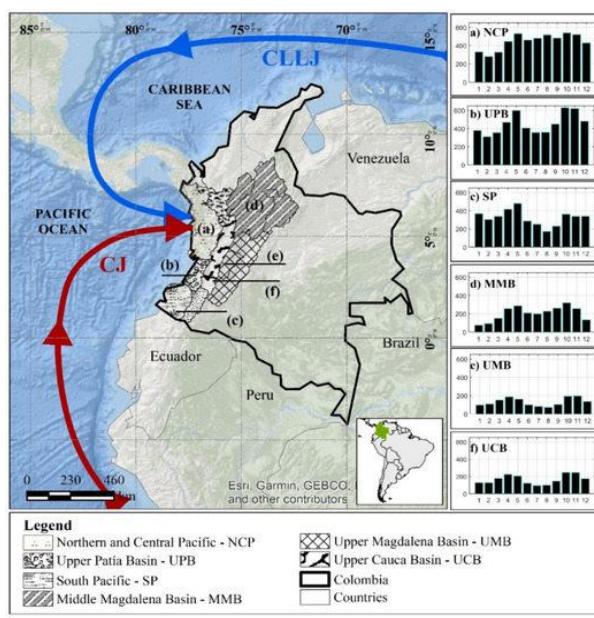
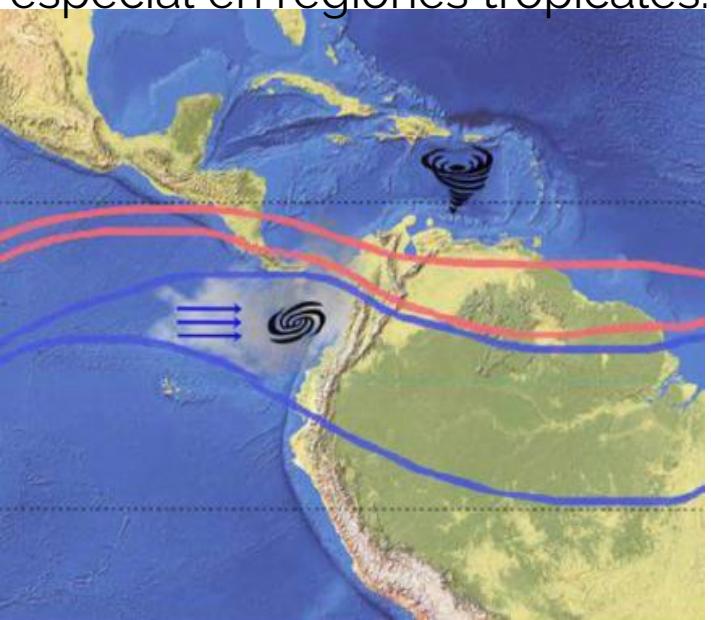
### Características principales:

- Temperatura del agua superficial  $0.5^{\circ}\text{C}$  o más por debajo del promedio
- Intensificación de los vientos alisios
- Mayor surgencia de aguas frías en la costa occidental de Sudamérica
- Concentración de aguas cálidas en el Pacífico occidental



# Los chorros de viento de bajo nivel del Choco, Orinoco, Caribe

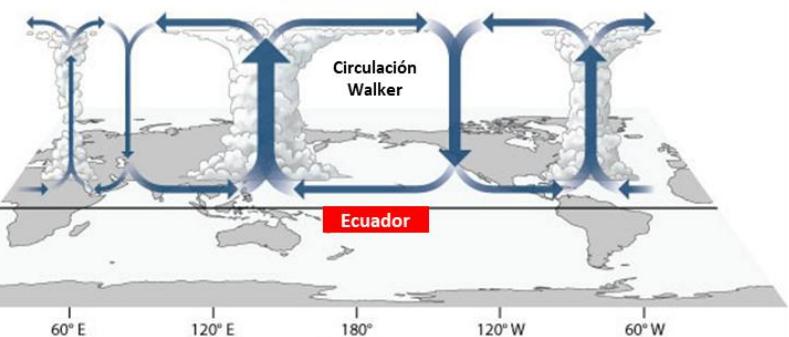
Los chorros de viento de bajo nivel en Colombia son corrientes de aire intensas y persistentes que se presentan a alturas bajas de la troposfera (aproximadamente entre 1 km y 3 km sobre el nivel del suelo). Son mecanismos atmosféricicos clave porque transportan humedad desde los océanos hacia el continente y modulan los ciclos de precipitación, en especial en regiones tropicales.



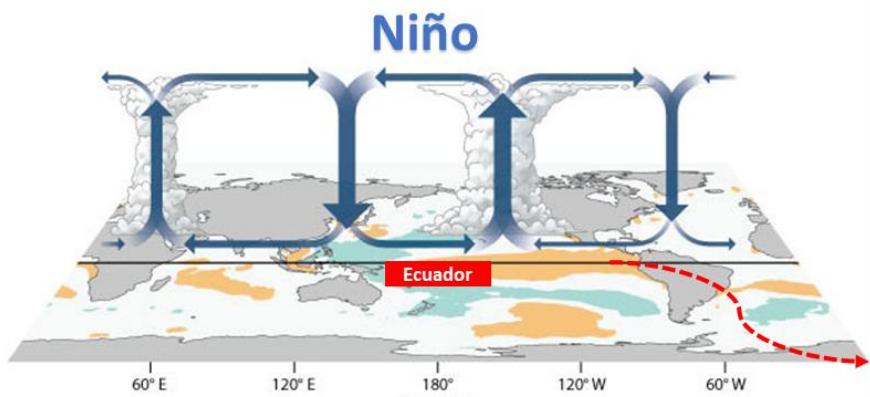
Chorro	Origen	Dirección principal	Velocidad típica	Relevancia climática
<b>Chocó</b>	Costa pacífica de Colombia	Pacífico → interior	~10 – 15 m/s (20 – 30 kt)	Genera humedad intensa que alimenta lluvias en el oeste colombiano
<b>Caribe (CLLJ)</b>	Mar Caribe	Mar → interior	Similares escalas	Transporta humedad al norte del país; modula lluvias y ciclones
<b>Orinoco (OLLJ)</b>	Llanos Orientales	Orinoco → occidente	8 – 17 m/s	Aporta humedad y favorece convergencia en la región amazónica y andina



## Neutro

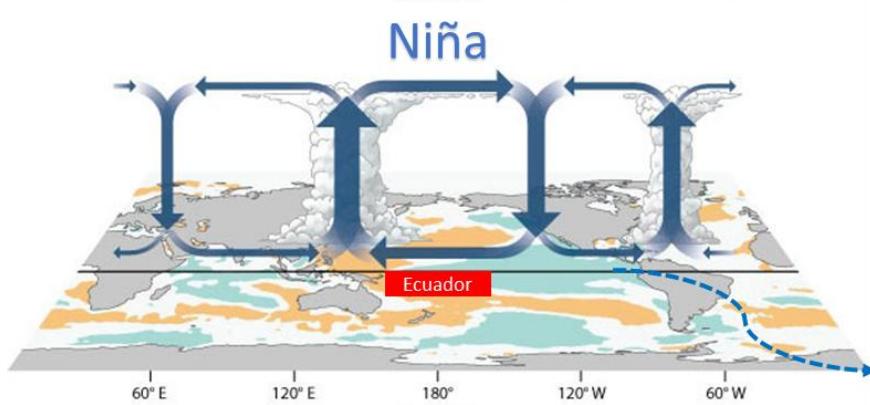


## Fenómeno del Niño



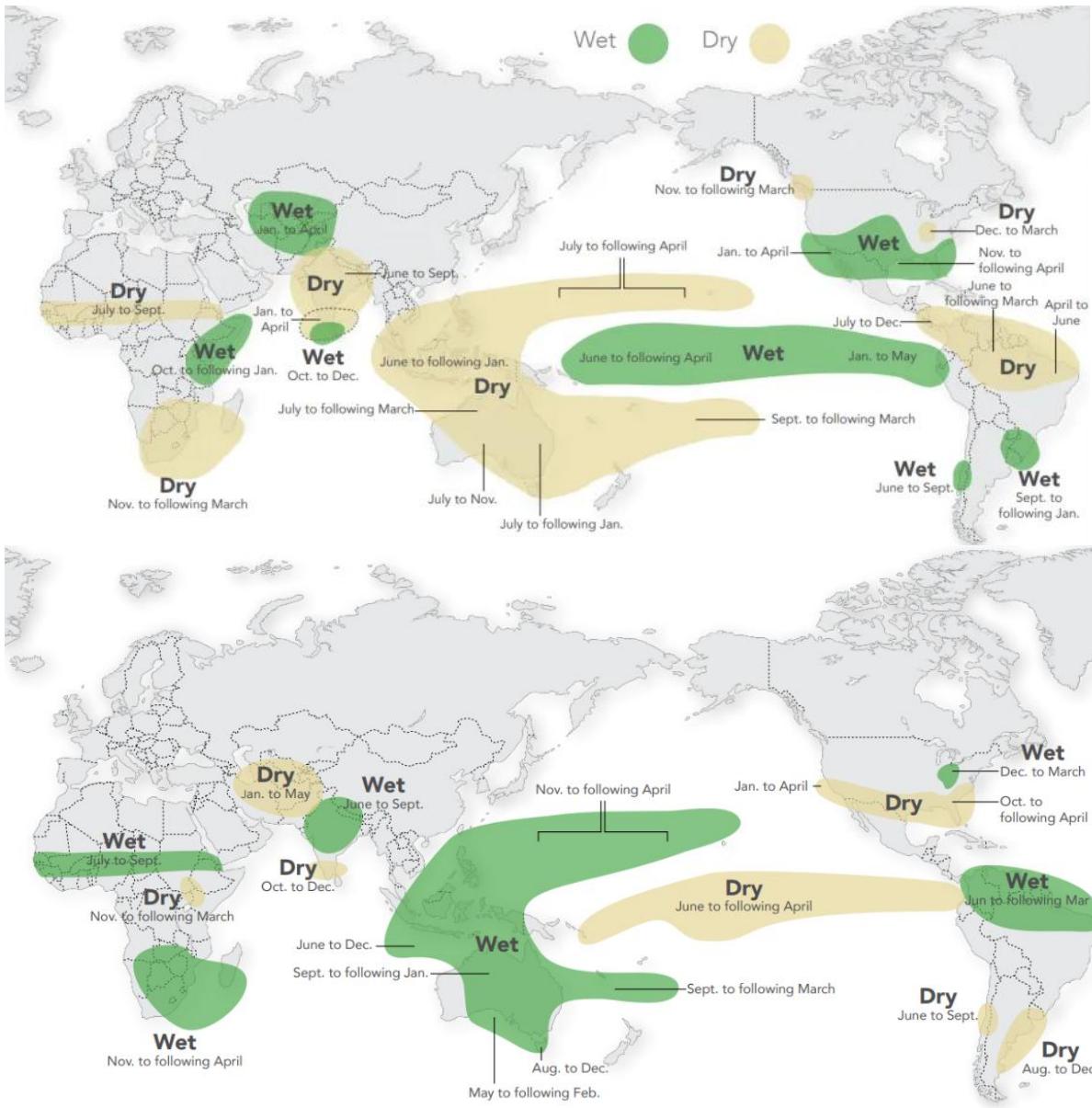
SST Más caliente que el promedio

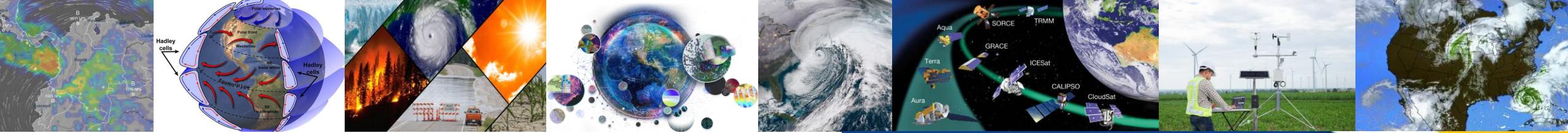
## Niña



SST Más frío que el promedio

## Fenómeno de la Niña





# Oscilación Madden-Julian

La OMJ es un patrón climático que consiste en una perturbación atmosférica de gran escala que se desplaza hacia el este a través del océano Índico y el Pacífico tropical. Fue descubierta en los años 70 por Roland Madden y Paul Julian, de ahí su nombre.

**Duración y movimiento:** Tiene un ciclo de aproximadamente 30-60 días y se mueve lentamente hacia el este a una velocidad de unos 5 metros por segundo.

## Impactos globales

La OMJ influye significativamente en:

- Monzones:** Puede intensificar o debilitar los monzones asiáticos y australianos.
- Ciclones tropicales:** Modula la actividad de huracanes y tifones
- El Niño y La Niña:** Puede facilitar el desarrollo de estos fenómenos
- Clima regional:** Afecta las precipitaciones en regiones tropicales y subtropicales

► **La oscilación Madden-Julian (MJO)**

Es una perturbación en la atmósfera que tiene dos fases, una favorable a lluvias y otra no favorable a lluvias.

Se ubica en los trópicos y se desplaza al este, y rodea la Tierra usualmente entre 30 a 60 días.

Fase favorable a lluvias

Fase no favorable a lluvias

Importante:  
Si su fase favorable a lluvias se posiciona sobre Perú, intensifica las lluvias en la zona norte durante el periodo lluvioso (setiembre - abril)

Si la MJO (fase favorable a lluvias) coincide con el periodo lluvioso, un mar cálido y condiciones atmosféricas favorables, se configura un escenario de lluvias extremas en la costa norte del Perú, como lo ocurrido entre marzo-abril del 2023.



# Flujo transecuatorial amazónico

## Origen y Trayectoria

- **Fuente:** Evapotranspiración de la selva amazónica brasileña y peruana
- **Dirección:** Desde el hemisferio sur hacia el norte
- **Ruta:** A través de la cuenca amazónica hacia los Andes orientales
- **Altitud:** Principalmente en capas bajas (superficie a 3000m)

## Mecanismo de Transporte

- **Reciclaje de humedad:** La selva amazónica evapora agua que se condensa y vuelve a evaporar
- **Jets de capas bajas:** Corrientes de aire que canalizan la humedad
- **Efecto orográfico:** Los Andes levantan el aire húmedo generando precipitación

Las masas de nubes sobre la selva amazónica contienen más agua que el mismo río Amazonas.





# Caso práctico

## Real

