# Tema 4: CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA

**Introducción**

A partir de este tema se vuelve a situar la asignatura dentro de las Ciencias Naturales, y para ello, se abre el bloque dedicado a la dinámica de la atmósfera. Ahora ya no se trata solo de saber cómo se calienta o enfría el aire, sino de entender cómo se mueve.

La pregunta central del tema es esta: ¿por qué la atmósfera organiza sus vientos y circulaciones del modo en que lo hace a escala planetaria?

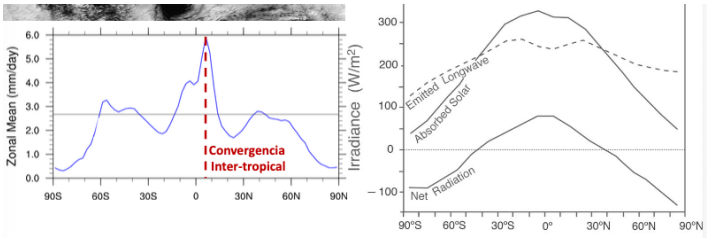
Para ello, este es el esquema general del bloque:

- Dinámica de la atmósfera
  - Leyes de movimiento aplicadas a un fluido
  - Circulación General de la Atmósfera
  - Células de Hadley y Zona de Convergencia Intertropical

De esta manera, vamos a pasar de ideas físicas básicas, como fuerzas y movimientos, a estructuras atmosféricas enormes que abarcan todo el planeta.

**Circulación General**

**⇒ RADIACIÓN NETA Y CONVERGENCIA INTERTROPICAL**

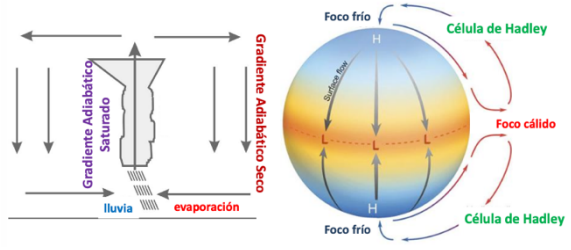



Esta diapositiva enlaza directamente con el final del tema anterior. La radiación neta no es igual en todas las latitudes: el ecuador recibe más energía neta que las regiones polares. Ese desequilibrio es una de las causas más profundas de la circulación general de la atmósfera.

La convergencia intertropical aparece aquí como una consecuencia del fuerte calentamiento ecuatorial y del ascenso del aire cálido y húmedo.

**⇒ CÉLULA DE HADLEY COMO RESPUESTA AL DESEQUILIBRIO TÉRMICO**

La célula de Hadley es el gran esquema de circulación tropical. El aire se calienta intensamente cerca del ecuador, asciende, produce nubosidad y lluvia, y luego se desplaza en altura hacia latitudes subtropicales, donde acaba descendiendo.

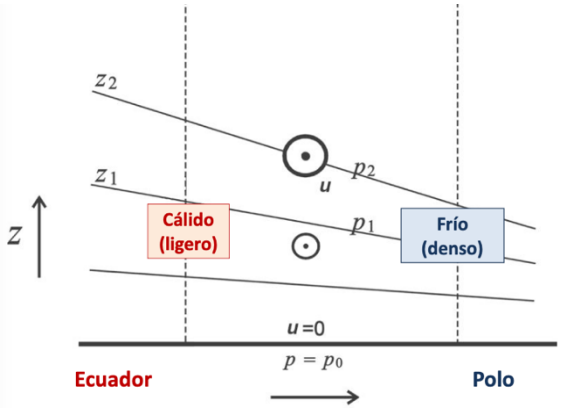



En esta diapositiva vemos como se unen las ideas termodinámicas vistas en el tema 3 (**evaporación**, **condensación** y **gradientes adiabáticos**), con el gran movimiento global del aire.

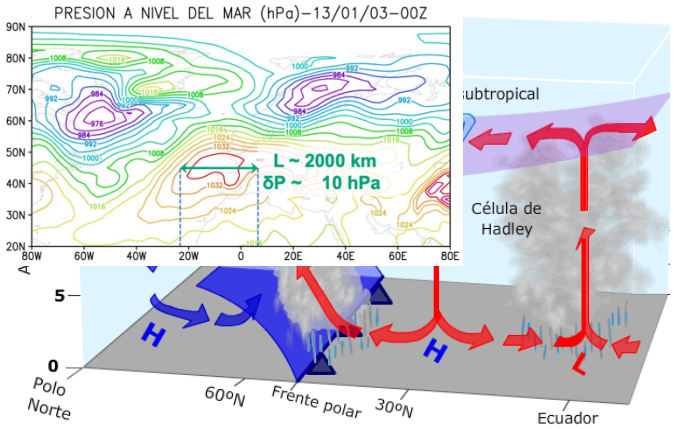
**⇒ CONTRASTE ENTRE ECUADOR Y POLOS**

Aquí se resume una idea muy sencilla pero decisiva: el aire cálido es menos denso y el aire frío es más denso. Como el ecuador recibe más energía que los polos, la atmósfera tiende continuamente a compensar ese contraste térmico.

Toda la circulación general puede verse, en el fondo, como un intento permanente de redistribuir energía desde las regiones cálidas hacia las frías.

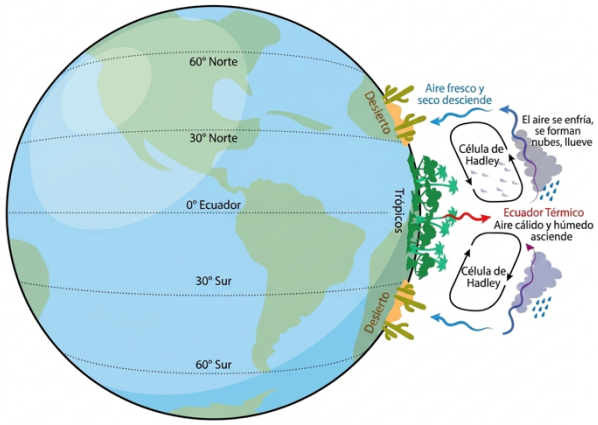


## ⇒ PRIMER ESQUEMA RESUMIDO DE LA CÉLULA DE HADLEY




Aquí podemos ver sintetizado visualmente el circuito tropical del aire. Conviene quedarse con tres etapas: **ascenso en la zona cálida ecuatorial, transporte en altura y subsidencia o descenso en las latitudes subtropicales**.

Ese descenso ayuda a explicar por qué muchas zonas subtropicales son secas y desérticas.

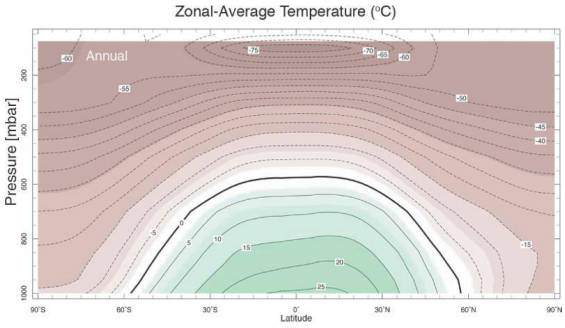



## ⇒ SEGUNDO ESQUEMA DE LA CÉLULA DE HADLEY

Aquí se hace hincapié con otro esquema porque la célula de Hadley es un concepto central. No es un simple dibujo: es el patrón básico que organiza gran parte de los vientos tropicales y subtropicales.

La repetición es útil para fijar bien la lógica del ascenso húmedo y el descenso seco.

## ⇒ TEMPERATURA MEDIA POR LATITUD Y ALTURA




Este gráfico muestra cómo cambia la temperatura media con la latitud y con la altura. Sirve para ver que la atmósfera no es térmicamente uniforme y que los mayores contrastes horizontales aparecen en ciertas zonas.

Esos contrastes son el combustible de la circulación atmosférica, porque donde hay diferencias térmicas intensas suele haber también gradientes de presión y viento.

Comprender esa desigualdad térmica es imprescindible para entender por qué la atmósfera se mueve.

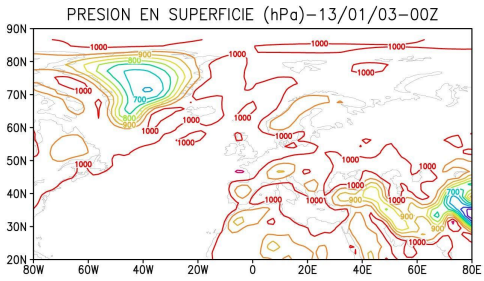
### Presión y Viento

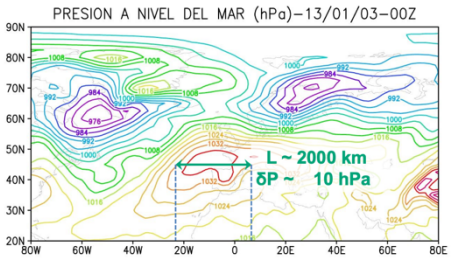
## ⇒ NO CONFUNDIR PRESIÓN AL NIVEL DEL MAR CON PRESIÓN EN SUPERFICIE

Vamos a ver la relación entre presión y movimiento del aire.

La advertencia del titulare es muy importante. La presión al nivel del mar es una presión reducida a una referencia común para poder comparar lugares de distinta altitud. La presión en superficie, en cambio, es la presión real donde está el observador.

Si no se distingue esto bien, se interpretan mal muchos mapas meteorológicos.

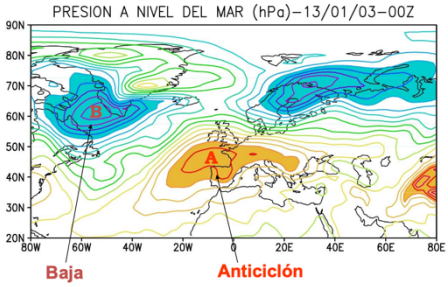



## ⇒ ESCALA HORIZONTAL Y DIFERENCIAS DE PRESIÓN

Aquí se introduce una escala espacial típica, del orden de 2000 km, y una diferencia de presión relativamente pequeña, de unos 10 hPa. Parece poco, pero en Meteorología basta para generar vientos importantes.

La idea clave es que el viento nace de gradientes de presión, no de la presión aislada en un punto.

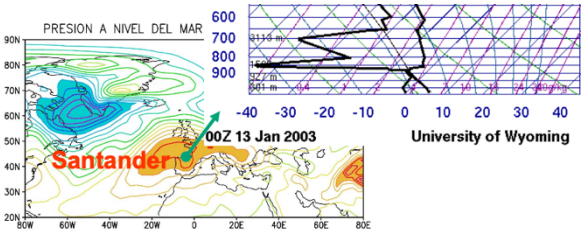



### ⇒ ANTICICLÓN Y BAJA PRESIÓN

La distinción entre anticiclón y baja es fundamental. Un anticiclón es una región de presión relativamente alta; una baja, es una región de presión relativamente baja.

Pero el tema quiere llevarnos más lejos que la etiqueta: lo importante es entender cómo esas distribuciones de presión hacen moverse al aire.

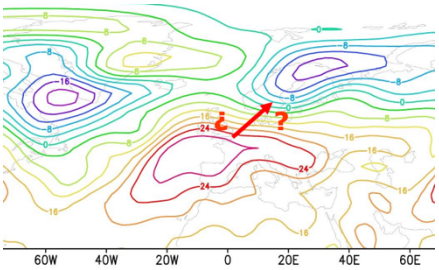
### ⇒ EJEMPLO LOCAL: SANTANDER




La mención a Santander sirve para situar la explicación en un caso real o cercano. Los ejemplos locales ayudan a que la dinámica atmosférica no se vea como algo abstracto y lejano.

Meteorología y geografía se encuentran aquí: el tiempo que observamos en un lugar concreto depende de movimientos a muchas escalas.

Pero, las dos preguntas verdaderamente importantes son:



1. ¿cómo se orienta el viento respecto al gradiente de presión?
2. ¿sopla el viento de mayor a menor presión?

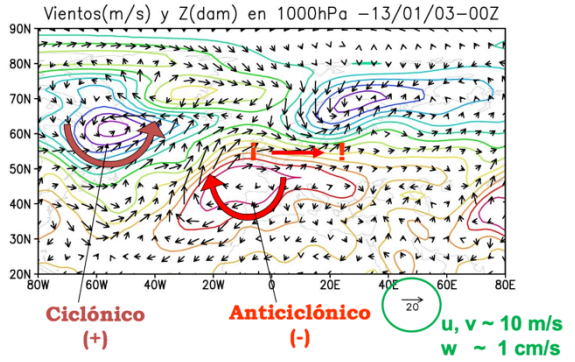
La intuición inmediata sería decir que sí: que el aire va simplemente de donde hay más presión a donde hay menos. Pero la atmósfera real es más complicada.

Esto está muy bien planteado porque obliga a abandonar una visión demasiado simple del viento.

### ⇒ POR QUÉ EL VIENTO REAL NO SIGUE SOLO EL GRADIENTE

La diapositiva señala que los movimientos horizontales del aire suelen ser mucho más intensos que los verticales. También introduce la circulación ciclónica y anticiclónica, que muestran que el viento tiende a curvarse alrededor de las bajas y las altas.

Esto ocurre porque, además de la fuerza debida al gradiente de presión, interviene otra fuerza decisiva: la de **Coriolis**.




### ⇒ QUÉ ES LA FUERZA DE CORIOLIS

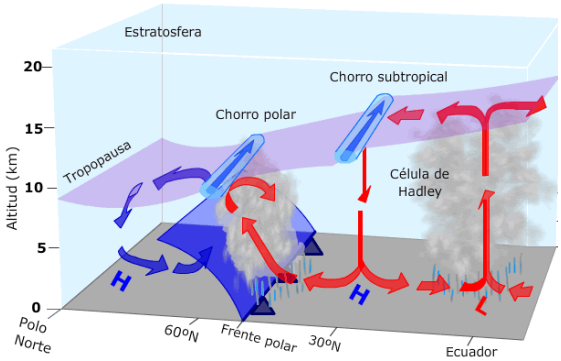
La fuerza de Coriolis es una fuerza aparente o ficticia que aparece cuando describimos el movimiento desde un sistema de referencia en rotación, como la Tierra. No empuja por sí misma como una mano o un motor, sino que surge por usar un sistema no inercial.

En el hemisferio norte desvía los movimientos hacia la derecha y en el sur hacia la izquierda. Esa desviación es esencial para entender la circulación atmosférica.

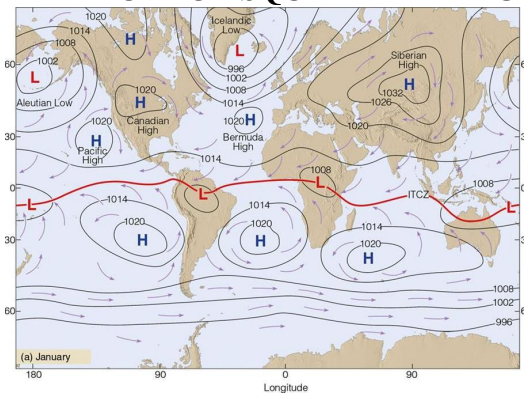
### ⇒ CÉLULA DE HADLEY BAJO EL EFECTO DE LA ROTACIÓN

Al recuperar la célula de Hadley después de introducir Coriolis, el tema sugiere que la circulación global no puede entenderse solo por diferencias térmicas. La rotación terrestre modifica profundamente los trayectos del aire.

Por eso los vientos reales no van directamente del ecuador al polo.



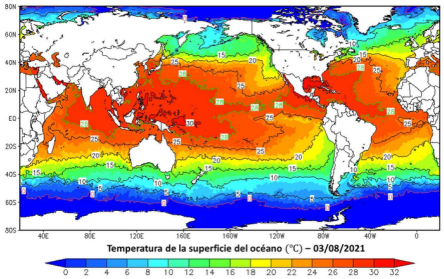
## ⇒ OTRO ESQUEMA DE LA CIRCULACIÓN TROPICAL




Esta segunda imagen sirve para insistir en que la rotación terrestre rompe la simple célula meridiana ideal y obliga a pensar en trayectorias desviadas.

La circulación general surge de combinar desigualdad térmica y rotación.

## ⇒ V. W. EKMAN

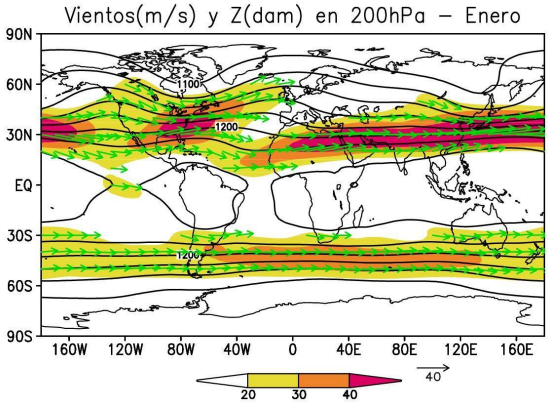



La aparición del oceanógrafo **Vagn Walfrid Ekman** (1874-1954) prepara la relación entre viento, rozamiento y desvío en fluidos geofísicos.

Su nombre está asociado a soluciones importantes sobre cómo la rotación modifica el movimiento de océanos y atmósfera.

Esta diapositiva funciona como referencia histórica antes de seguir con la circulación a gran escala.

## ⇒ MAPA GLOBAL DE VIENTOS EN ALTURA




Aquí se muestran vientos y altura geopotencial en un nivel alto, probablemente 200 hPa.

Esto ayuda a visualizar que la circulación en altura está organizada en bandas y corredores intensos, no repartida al azar.

Aquí ya se ve insinuada la corriente en chorro, uno de los protagonistas de la dinámica atmosférica.

La corriente en chorro es una banda de vientos muy intensos en altura, generalmente cerca de la **tropopausa**. La **tropopausa** es la fina capa de transición atmosférica que separa la **troposfera** (donde ocurren la mayoría de los fenómenos meteorológicos) de la **estratosfera**.

Tiene enorme importancia porque guía sistemas meteorológicos y separa masas de aire con propiedades térmicas distintas.

No es un viento cualquiera, sino una estructura global muy organizada.

## ⇒ APOYO VISUAL DEL JET Y LA AVIACIÓN



La imagen sugiere el aprovechamiento o el efecto de la corriente en chorro en vuelos de largo recorrido. La aviación conoce bien estas corrientes porque pueden acelerar o frenar mucho un trayecto.

Las corrientes en chorro (*jet streams*) son tubos estrechos de vientos intensos (de 100 a >250 km/h) que fluyen a gran altitud (10-12 km). Los aviones vuelan en ellas para ahorrar combustible y tiempo al ir a favor del viento, pero también pueden causar turbulencias severas si las aeronaves entran y salen de ellas.

Es un ejemplo excelente de cómo una estructura atmosférica global tiene efectos prácticos muy concretos.

## ⇒ MÁXIMO CONTRASTE TÉRMICO Y JET POLAR

La corriente en chorro se asocia a regiones donde el contraste térmico horizontal es mayor. Cuanto más fuerte es ese contraste, más marcada puede ser la variación de presión en altura y, con ella, el viento geostrófico.

Por eso el jet polar está tan ligado a la frontera entre aire frío y aire más templado.

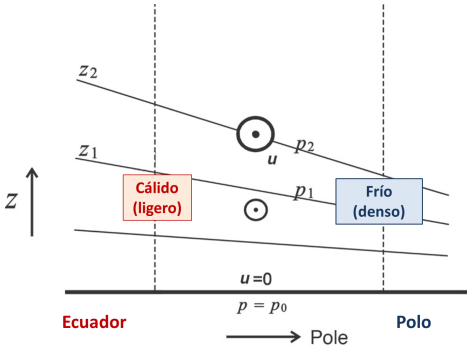
### ⇒ ROTACIÓN Y MOMENTO ANGULAR

Aquí el tema introduce otra idea física profunda: el momento angular. Cuando un cuerpo o un sistema gira, la distribución de su masa y su velocidad de rotación determinan cuánto momento angular tiene.

En atmósfera y océanos, pensar en momento angular ayuda a entender por qué ciertos movimientos se conservan o se reorganizan cuando cambia la geometría del flujo.

**https://www.youtube.com/watch?v=ty9QSiVC2g0**

### ⇒ TRANSICIÓN HACIA EFECTOS ROTACIONALES




Esta diapositiva funciona como puente entre la explicación general del momento angular y ejemplos más visuales de fluidos en rotación.

Es una pausa útil antes de entrar en las llamadas columnas de Taylor.

### ⇒ COLUMNAS DE TAYLOR

Las columnas de Taylor son una consecuencia sorprendente de la rotación en fluidos. Cuando la rotación domina, el movimiento tiende a organizarse en estructuras coherentes a lo largo del eje de giro.

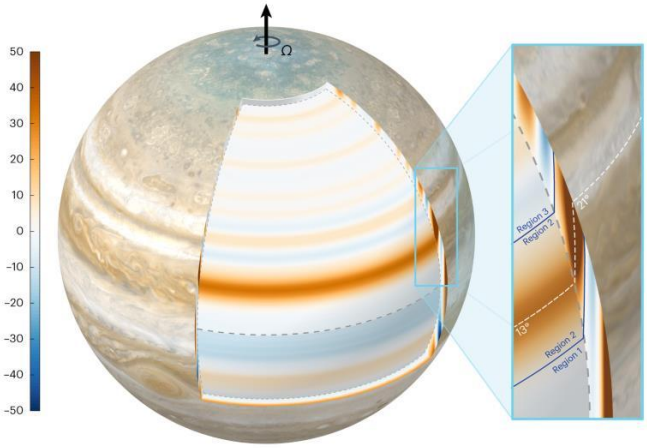
No se trata de columnas materiales rígidas, sino de una tendencia dinámica del fluido a comportarse de forma casi columnar bajo fuerte rotación.

Esto ayuda a entender por qué, en fluidos planetarios, ciertas perturbaciones no se comportan como lo harían en un sistema sin rotación. Es una intuición valiosa para pensar atmósferas planetarias.

**https://www.youtube.com/watch?v=DPN2CaUXyI0**

**https://www.youtube.com/watch?v=18HwEHyks9M**

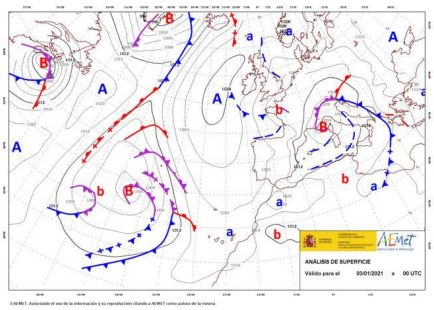
### ⇒ JÚPITER Y ESTRUCTURAS CILÍNDRICAS




Júpiter aparece aquí como ejemplo magnífico de atmósfera dominada por rotación y flujo zonal. Sus bandas muestran una organización mucho más marcada que la terrestre.

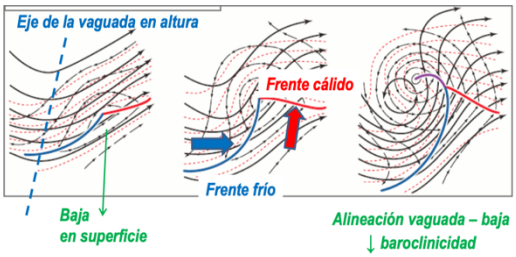
La relación con las estructuras cilíndricas nos recuerda que la dinámica de fluidos geofísicos no es exclusiva de la Tierra.

### ⇒ LA INESTABILIDAD BAROCLÍNICA



Aquí se marca el paso hacia uno de los conceptos más importantes de la meteorología de latitudes medias: la **baroclinicidad**.

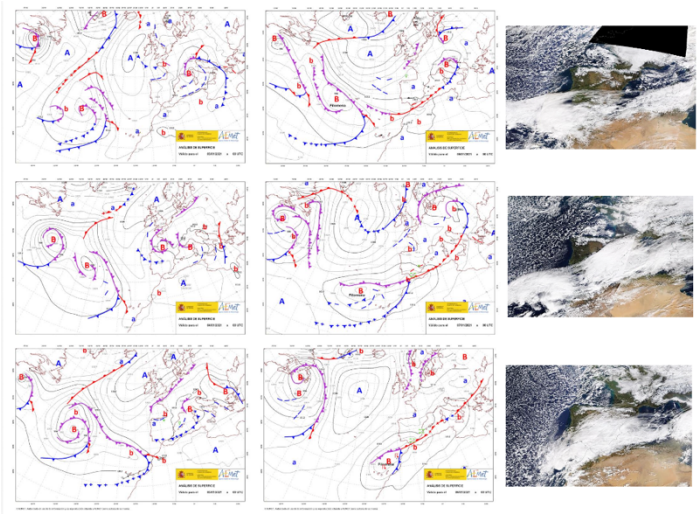
Es el punto en que el tema pasa de la circulación general ideal a la generación de borrascas y frentes.




La inestabilidad **baroclínica** es el mecanismo por el que un fuerte contraste horizontal de temperatura puede transformarse en ondulaciones, bajas presiones, vaguadas y frentes. Es uno de los motores básicos del tiempo en latitudes medias.

La alineación entre una vaguada en altura y una baja en superficie es una señal muy importante para entender el desarrollo de sistemas depresionarios.

### ⇒ SECUENCIA DE EVOLUCIÓN DE UNA BAJA



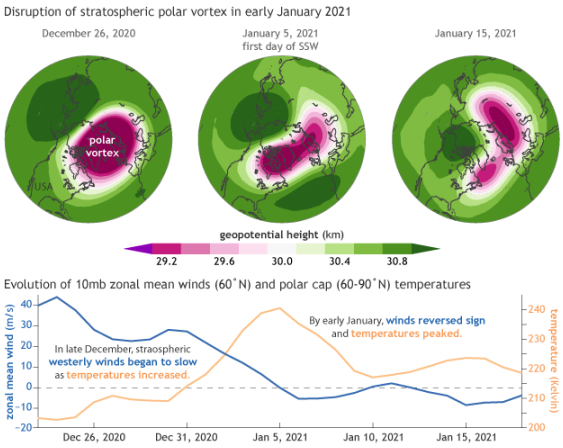
Estas imágenes muestran distintas fases o variantes de una estructura **depresionaria**. Con esto podemos ver cómo evoluciona una baja o una vaguada.

En meteorología, seguir la evolución temporal es esencial, porque las estructuras atmosféricas cambian continuamente.

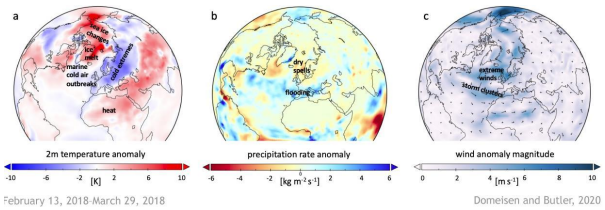
### ⇒ CALENTAMIENTO ESTRATOSFÉRICO SÚBITO: ENERO DE 2021

Los calentamientos estratosféricos súbitos son fenómenos espectaculares en los que la estratosfera polar se calienta rápidamente y se altera la circulación habitual del **vórtice polar** (El **vórtice polar** es una gran masa de aire gélido y de bajas presiones que gira en forma de remolino sobre los polos de la Tierra en la alta atmósfera (estratosfera y troposfera). Su función principal es mantener el aire ártico o antártico confinado en las regiones polares durante el invierno).

Aunque ocurren en altura, sus efectos pueden propagarse hacia abajo y modificar el tiempo en superficie algunas semanas después.




La referencia a "Emma, la hermana mayor de Filomena" ayuda a conectar el fenómeno con episodios conocidos de tiempo invernal extremo. La idea clave es que la estratosfera y la troposfera no están completamente separadas.




Lo que pasa muy arriba puede influir notablemente en lo que vivimos en superficie.

## Predicción Meteorológica

### ⇒ LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO

La cita y la imagen funcionan como una entrada más humana e histórica al problema de la predicción meteorológica de los famosos "hombres del tiempo": **Mariano Medina** y **Eugenio Martin Rubio**. Pronosticar el tiempo siempre ha tenido una mezcla de ciencia, experiencia y riesgo.



El tema empieza a girar aquí desde la dinámica atmosférica hacia el problema de la predictibilidad y sus "dificultades".

Eugenio Martín Rubio dijo en el año 1967:
"si mañana no llueve, me afeito el bigote". Y se lo cortó.

### ⇒ PÉNDULO DOBLE Y CAOS

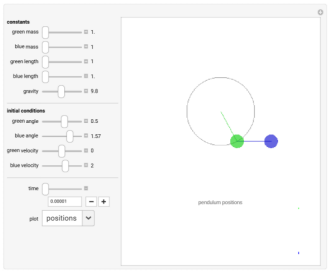
El péndulo doble se usa como ejemplo clásico de sistema determinista pero muy sensible a las condiciones iniciales. Sus ecuaciones son exactas, pero su evolución práctica se hace rápidamente difícil de predecir.

La Meteorología se parece a esto más de lo que parece a primera vista, ya que pequeños cambios al inicio pueden acabar produciendo trayectorias muy distintas.

Eso prepara muy bien la entrada al concepto de caos determinista en la atmósfera.

**https://www.youtube.com/watch?v=HcKJT2pGlUE**

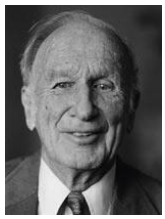
### ⇒ DIVERGENCIA DE TRAYECTORIAS CON EL TIEMPO



La secuencia temporal muestra cómo dos evoluciones inicialmente muy parecidas pueden separarse claramente tras cierto tiempo. Esa divergencia es la esencia de la sensibilidad a las condiciones iniciales.

Es un modo visual muy bueno de entender por qué las predicciones tienen un horizonte limitado.

### ⇒ CAOS DETERMINISTA Y EDWARD LORENZ

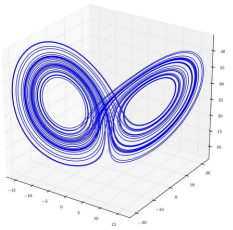


Lorenz mostró que un sistema puede ser completamente determinista y, sin embargo, ser muy difícil de predecir a largo plazo por su sensibilidad extrema a pequeños errores iniciales.

El movimiento del péndulo doble es predecible solo si conocemos exactamente su posición y su velocidad en un instante dado.

La frase de la diapositiva resume muy bien la idea: conocer aproximadamente el presente no garantiza conocer aproximadamente el futuro.

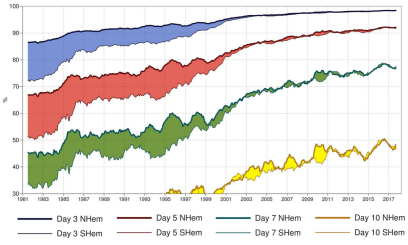
### ⇒ EFECTO MARIPOSA Y ATRACTOR DE LORENZ



El llamado efecto mariposa es una forma popular de expresar esa sensibilidad extrema a las condiciones iniciales. No significa que cualquier cosa cause cualquier cosa, sino que pequeñas diferencias pueden amplificarse mucho en sistemas complejos.

El **atractor de Lorenz** se ha convertido en el símbolo matemático más famoso de esta idea.

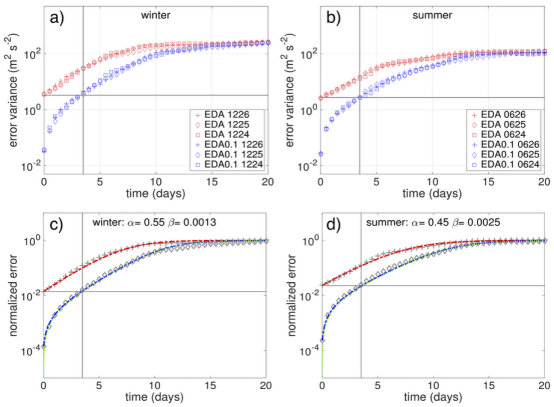
### ⇒ CÓMO EVOLUCIONA LA CORRELACIÓN ENTRE PREDICCIÓN Y OBSERVACIÓN




Este gráfico muestra cómo la calidad de una predicción va degradándose con el tiempo. Al principio la predicción y la observación se parecen mucho, pero esa correlación disminuye a medida que pasan los días.

Es una forma cuantitativa de mostrar el límite práctico de la predictibilidad atmosférica.

### ⇒ ERROR CON CONDICIONES INICIALES MEJORADAS




Aquí se compara la evolución del error en experimentos realistas y en otros con condiciones iniciales mejoradas.

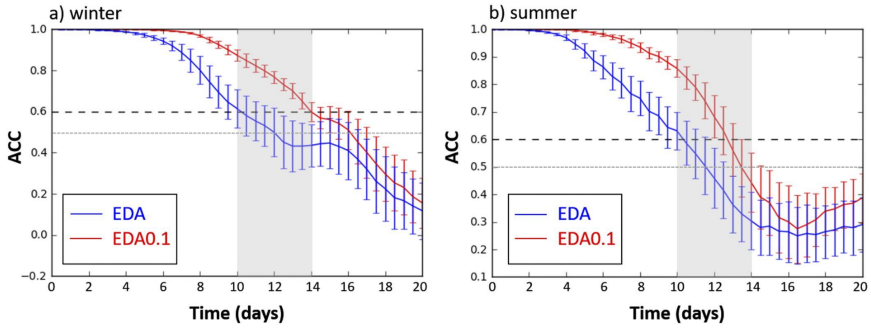
Mejorar el punto de partida ayuda, pero no elimina el crecimiento del error indefinidamente.

Esto refleja una verdad fundamental de la Meteorología moderna: **medir mejor el estado inicial mejora el pronóstico, pero no rompe la barrera del caos.**

**⇒ CORRELACIÓN EN EXPERIMENTOS REALISTAS Y MEJORADOS**

Esta última diapositiva del tema cierra el recorrido mostrando que incluso con mejoras técnicas la predictibilidad sigue teniendo un límite.

La atmósfera es físicamente gobernable por ecuaciones, pero no infinitamente predecible.




El tema termina así con una idea muy profunda y moderna:

- **Comprender la atmósfera no significa poder conocer su futuro exacto sin límite, sino saber hasta dónde puede llegar razonablemente nuestra predicción.**