

# Onda de montaña

Por: Román López Ríos

- **Una onda de montaña es una onda de gravedad interna.**
- **Vayamos por partes, ¿qué es una onda de gravedad?**
- Una onda de gravedad es una perturbación cuya fuerza restauradora es el empuje hidrostático, que está relacionado con la gravedad. El termino onda de gravedad es un poco inexacto, pero muy utilizado.
- **¿Qué significa eso de “interna”?**
- La denominación “interna”, hace referencia a que está confinada en un fluido “homogéneo”, no hay interfase con otro fluido de características diferentes.

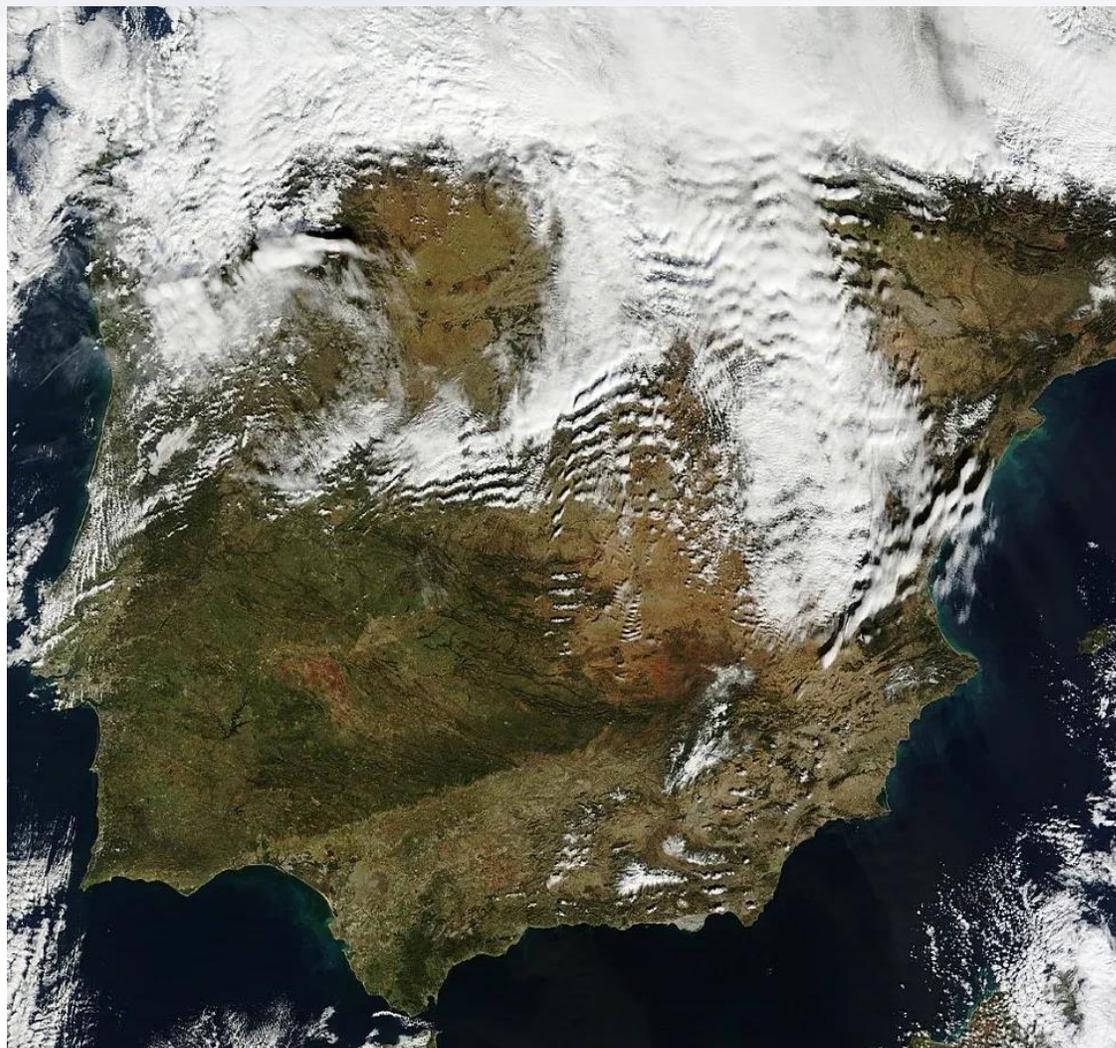
- La definición de la onda de montaña se puede resumir de forma sencilla como: una onda de gravedad formada a sotavento de una barrera montañosa, y en un ambiente estable.
- Para resumir: una onda de montaña es una onda de gravedad interna que se propaga en la vertical cuando hay un ambiente “estable”, cuando la temperatura potencial aumenta con la altura.



GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**AEMet**  
Agencia Estatal de Meteorología



- Aquí va una pequeña historia: Tarde del 5 de Marzo de 1966, un Boeing 707 de British Airways sobrevuela Japón, el piloto decide pasar cerca del monte Fuji para que lo vean los pasajeros. El avión encuentra una fuerte zona de turbulencia y se hace pedazos en vuelo.
- En la base del volcán se registraron 60 a 70 kt de viento.

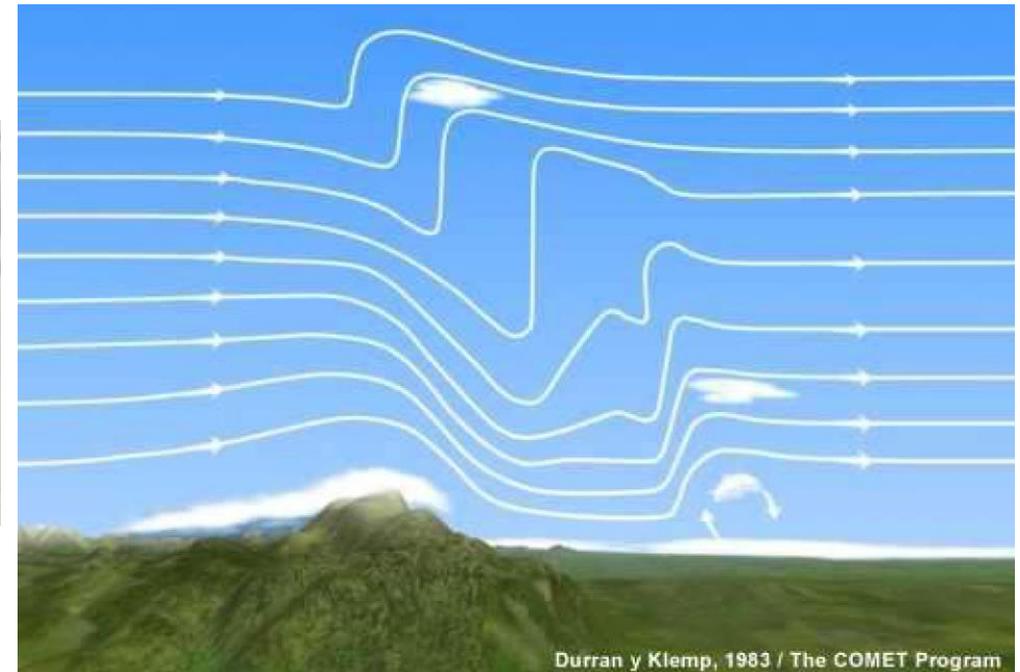


- Una atmosfera estable intenta restaurar el equilibrio después de ser perturbada, pero la fuerza restauradora se excede y no se alcanza inmediatamente el equilibrio. **Oscila alrededor del punto de equilibrio.**
- Las ondas de gravedad se propagan largas distancias hasta que el aire se vuelve menos estable o la fuerza de fricción amortigua finalmente la onda.
- $N = \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}}$  Frecuencia de Brunt-Väisälä
- Velocidad de onda de gravedad:  $c = U \pm \sqrt{gH}$
- U: Velocidad del viento
- H: altura correspondiente a la atmosfera homogénea ( $\rho = \text{cte}$ ) equivalente.

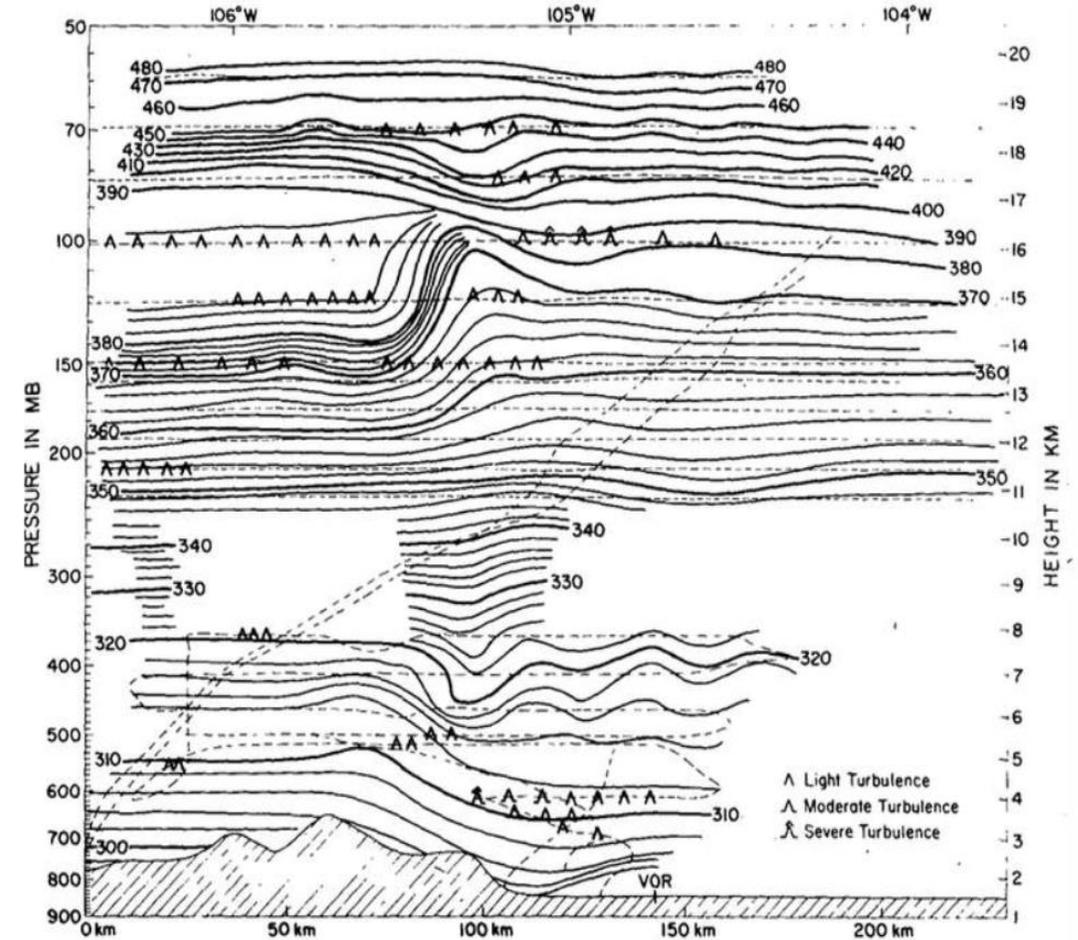
- Oscilación de parcela de aire alrededor del nivel de equilibrio.
- Cuanto más fuerte sea el viento horizontal, mayor longitud de onda.
- Cuanta más estabilidad tenga la atmosfera, mayor frecuencia de la onda y por tanto menor longitud de onda.



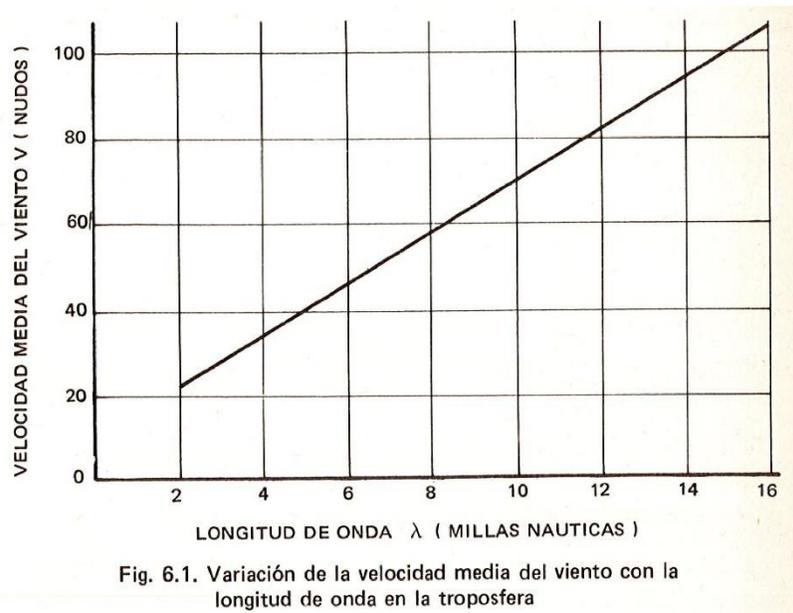
- Los rápidos son la propagación vertical de una perturbación generada en el agua por la presencia de un obstáculo en el fondo.
- Las ondas se forman a sotavento del obstáculo.



- El objetivo de las ondas de montaña es el transporte de momento de las capas bajas de la atmósfera hasta las capas altas (estratosfera y mesosfera).
- A mayor longitud de onda, mayor riesgo de turbulencia severa asociada a la onda.
- Cálculo estimado de la longitud de onda:  $\lambda = v \text{ viento medio troposfera} / 7$ .
- Esquema perfil vertical del O de Denver 17 Feb 1970.

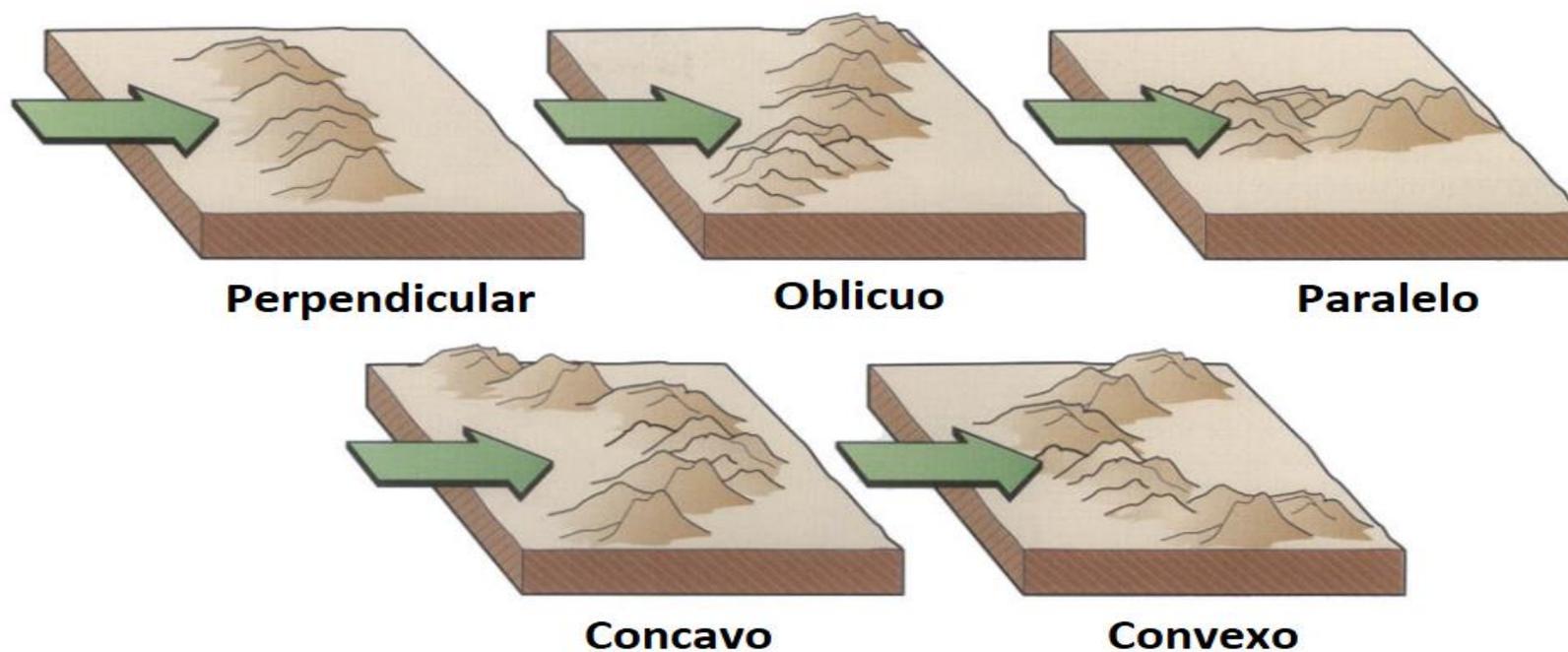


- Moderadas: van acompañadas de una corriente descendente de 1,75-3 m/s. (350-600 ft/min) y/o de turbulencia moderada.
- Fuertes: van acompañadas de una corriente descendente de 3 m/s. (600 ft/min) y/o de turbulencia fuerte.

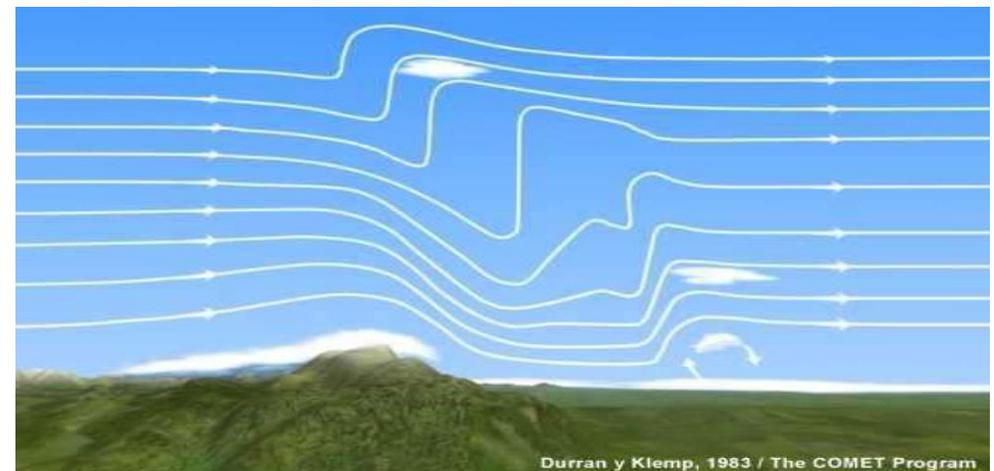
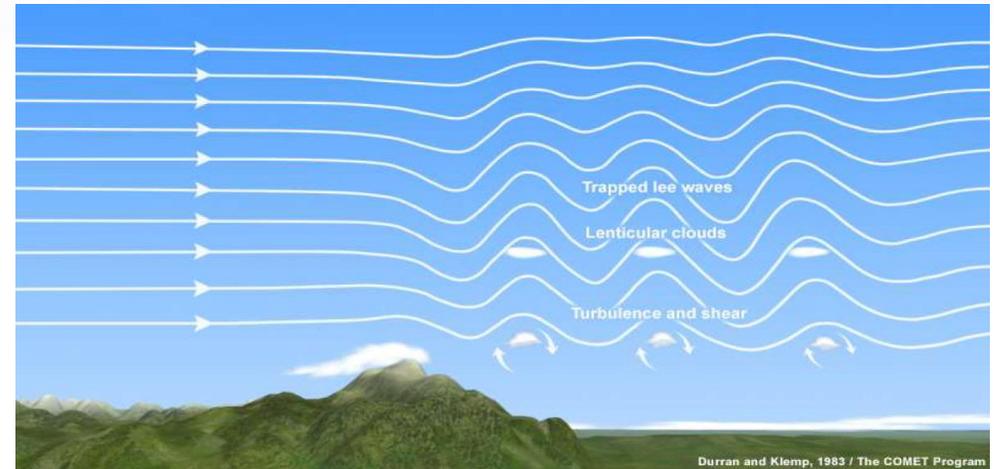


Tipo	$\lambda$ (km)	A (ft)	w (ft/min)	Vm (kt)
O.M débil	3 a 7	500 a 2.000	200 a 400	25 a 35
O.M moderada	7 a 11	2.000 a 4.000	400 a 600	35 a 45
O.M fuerte	11 a 30	4.00 a 8.000	600 a 5.000	> 45
O.M extrema			> 5.000	

- Los flujos que dan como resultado unos vientos más intensos de ladera son los perpendiculares y los cóncavos.



- Ondas atrapadas
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Ondas que rompen



- Las ondas atrapadas son el caso más habitual de onda de montaña.

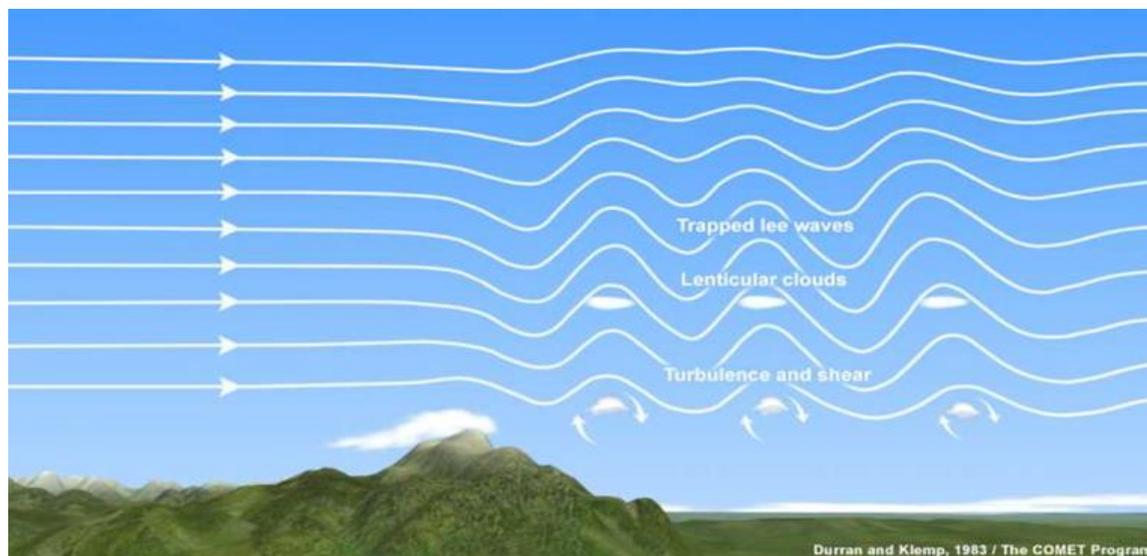
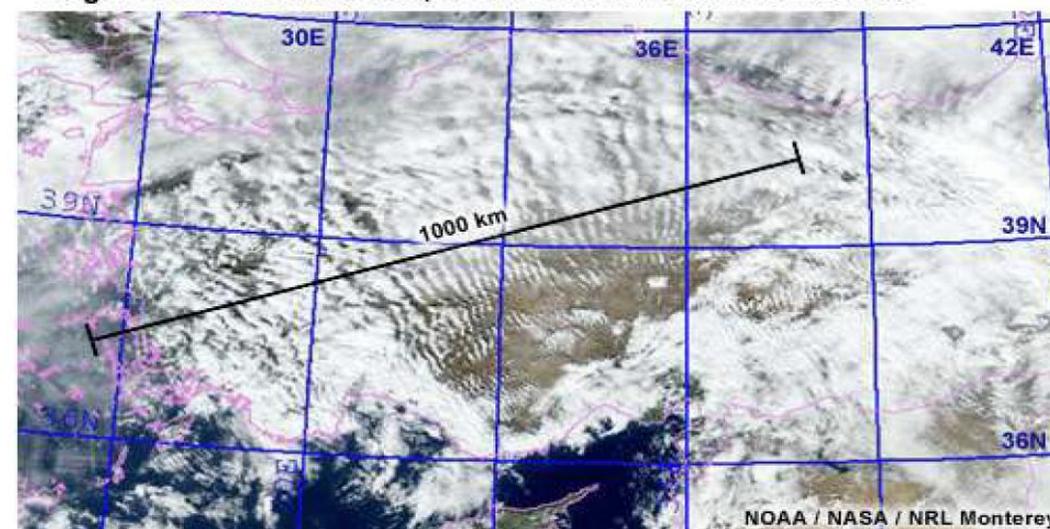
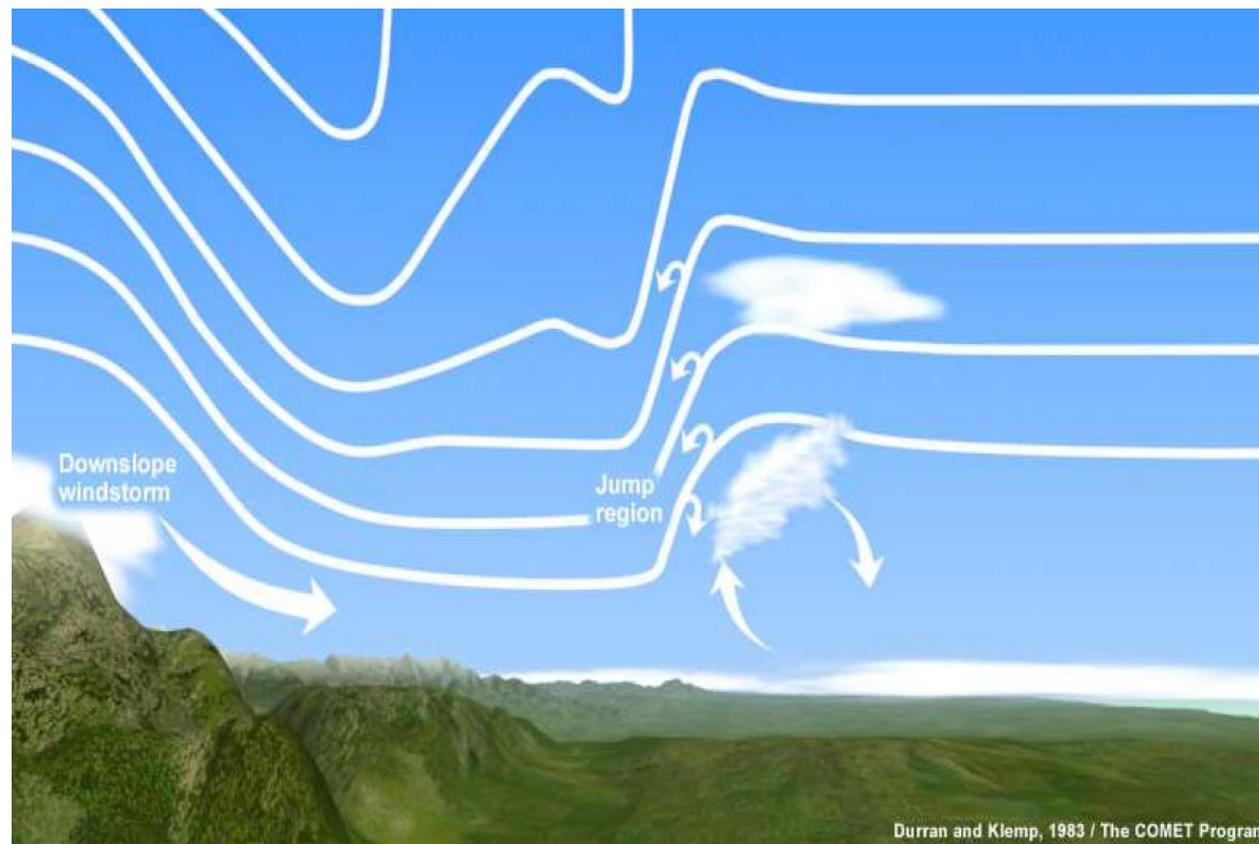
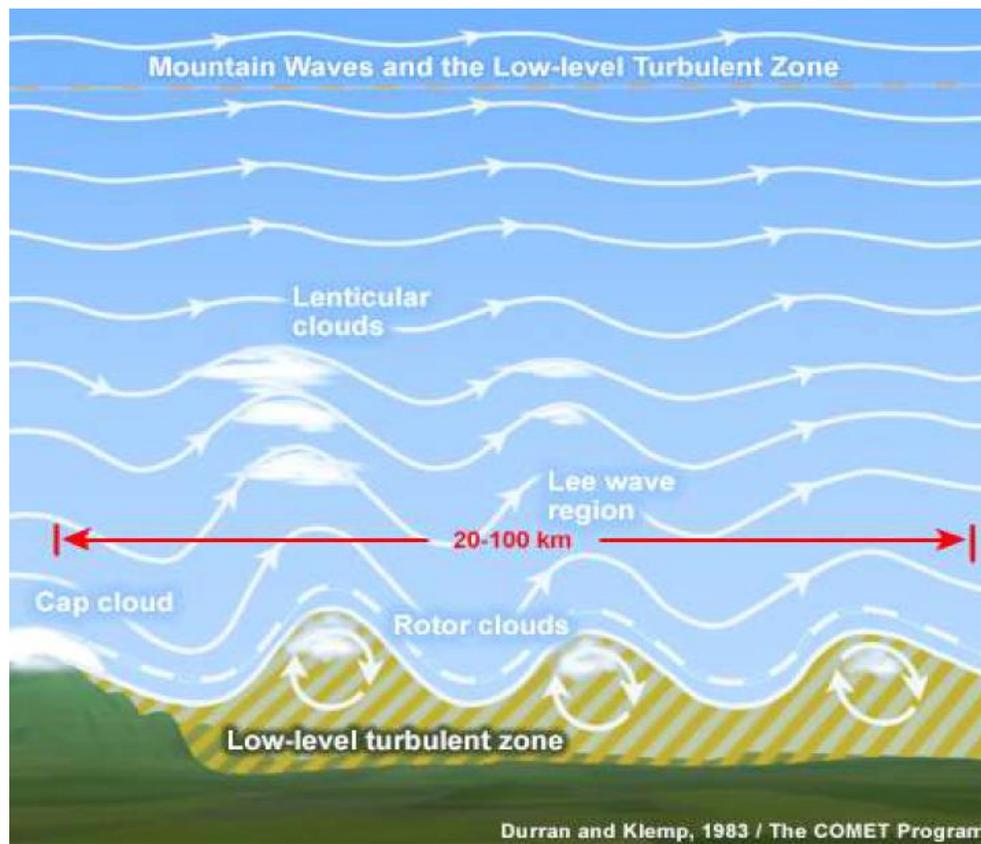


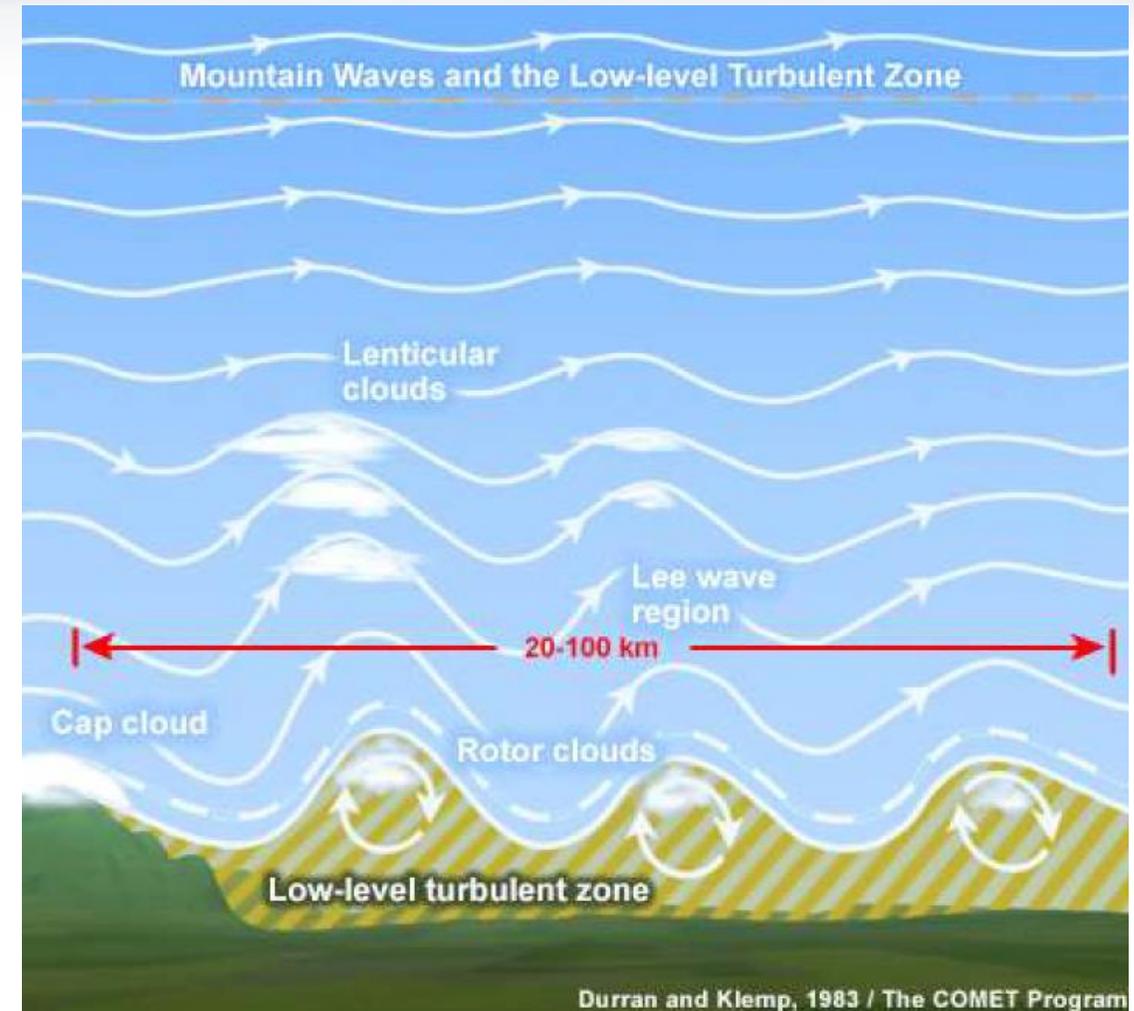
Imagen MODIS en color real, 1050 UTC del 30 de enero de 2003



- Las ondas atrapadas pueden desarrollar turbulencia en niveles bajos.



- En la zona de los rotadores, los ascensos y descensos son abruptos.
- En el resto de la onda, los ascensos y descensos son mucho más pausados.
- Es en estas zonas de la onda donde suelen volar los planeadores.





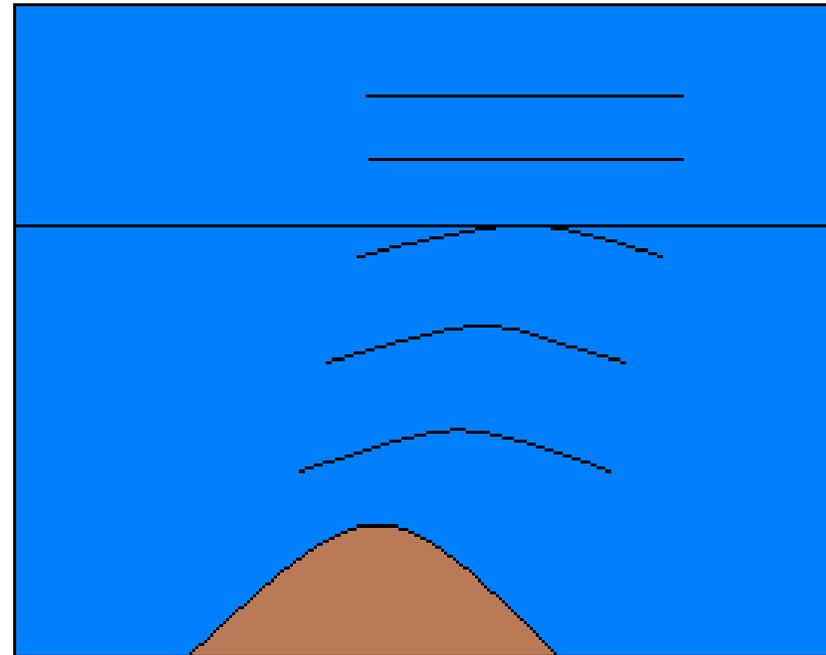
- Cuando haya falta de estabilidad en altura.
- Cuando la velocidad del viento aumente marcadamente con la altura (aumento de cizalladura).
- Cuando haya una fuerte inversión térmica en altura.
- Cuando haya un nivel crítico que lo permita.

- El caso más típico de ondas atrapadas consiste en una capa estable profunda, con viento que aumenta con la altura.
- Regla empírica del 1,6: Si la velocidad del viento a 2000m sobre la cima de la montaña es 1,6 veces superior a la velocidad del viento en la cima, entonces cabe esperar ondas de sotavento atrapadas.
- Ejemplo: Tenemos una montaña de 1500m de altura, en la cima, hay 15kt de viento sostenido. A 3500m de altura tenemos un viento de 20kt. ¿Habrá ondas atrapadas?

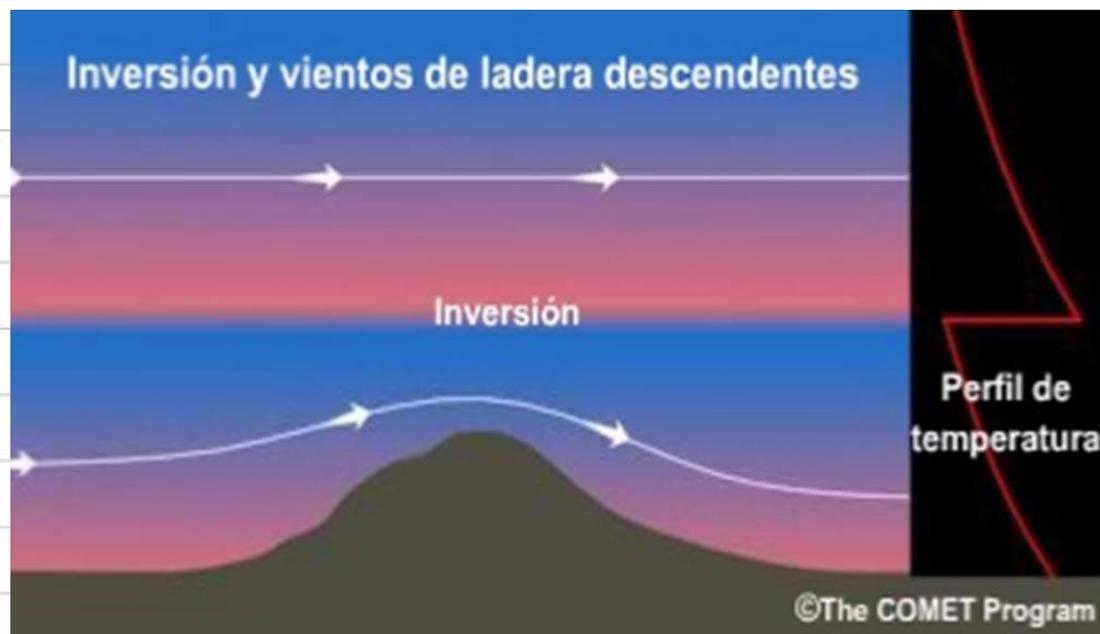


- Respuesta: No, no las habrá de acuerdo a la regla del 1,6. Ya que se necesitarían unos 24kt para que se produjese.
- Viento a 1500m = 15kt. Viento a 3500m = 20kt
- $15\text{kt} * 1,6 = 24\text{kt}$ .  $20 \ll 24\text{kt}$ .

- Si tenemos un perfil vertical en el que la estabilidad disminuye con la altura estaremos antes un caso en que las ondas se podrán propagar en la capa baja (estable), mientras que al llegar a la capa alta (inestable), no serán capaces de propagarse más.



- Inversiones de temperatura (no siempre).
- Niveles críticos.

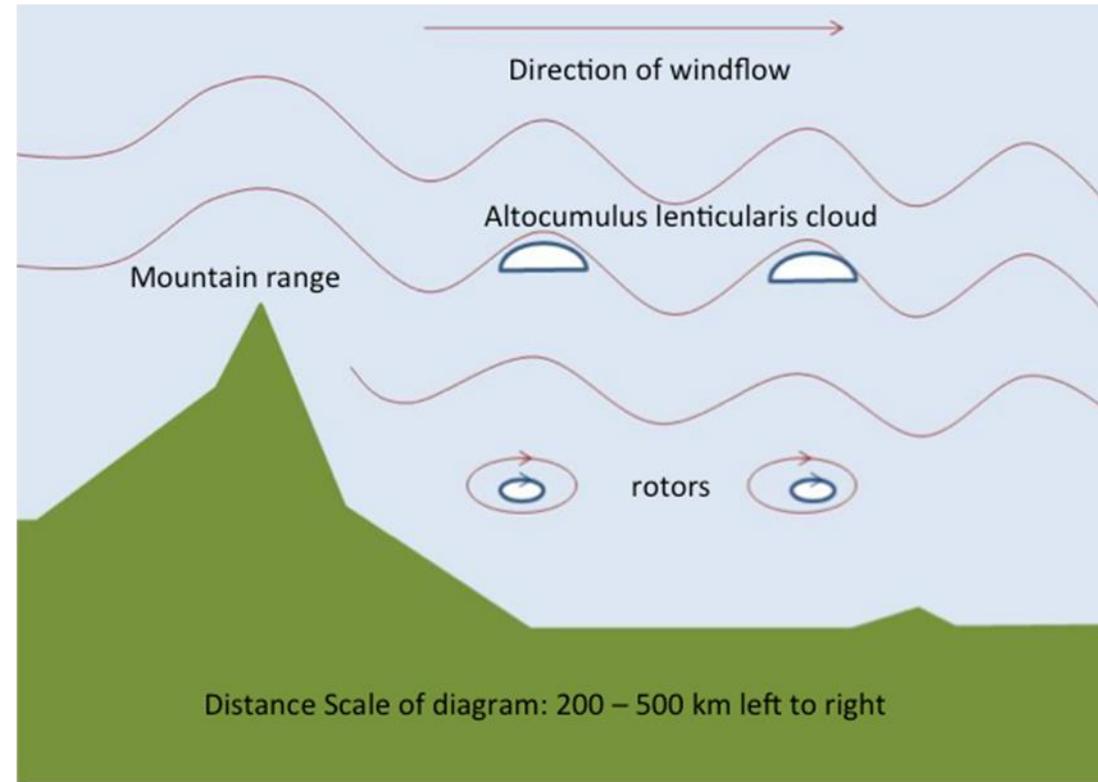
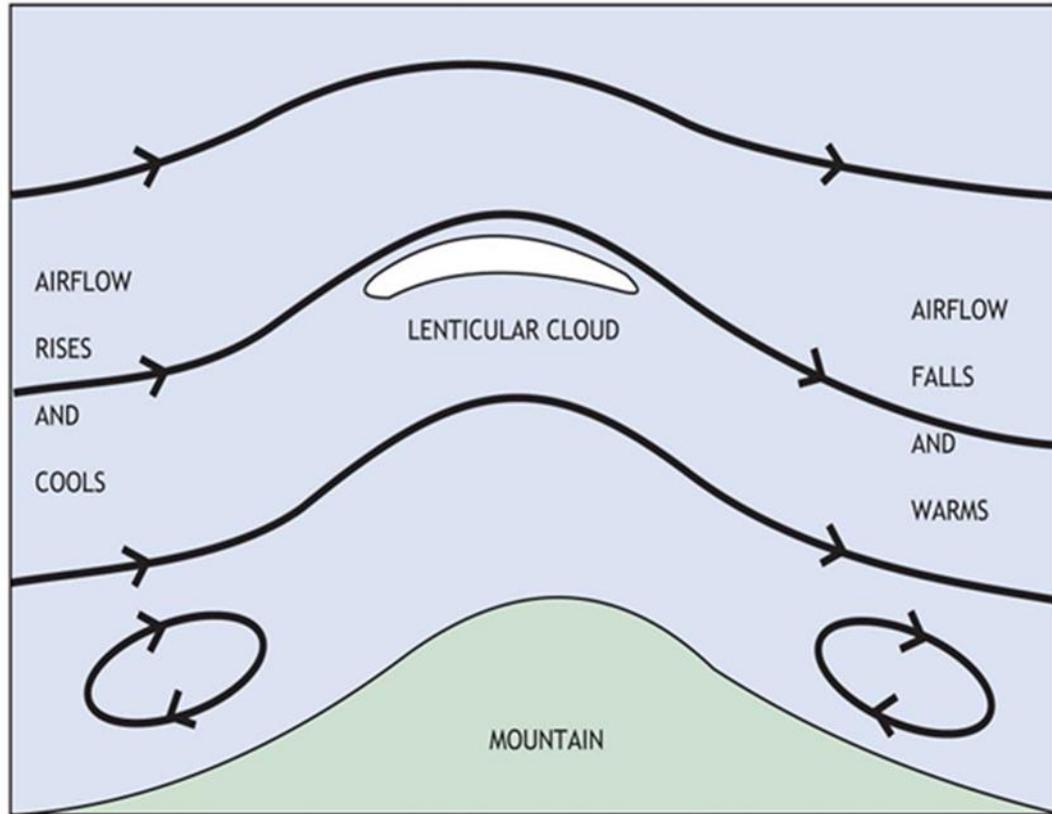




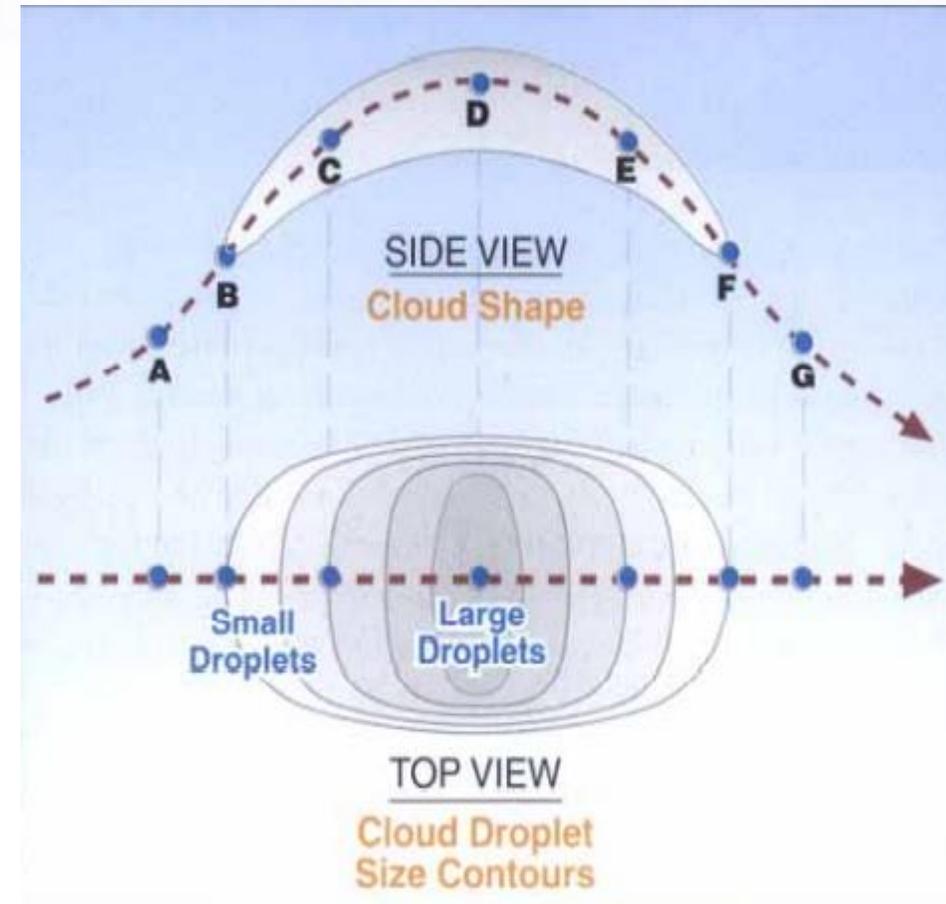
- No siempre es necesario un cambio de sentido del flujo (180°) para que haya un nivel crítico. En ocasiones basta con un cambio de 90°.





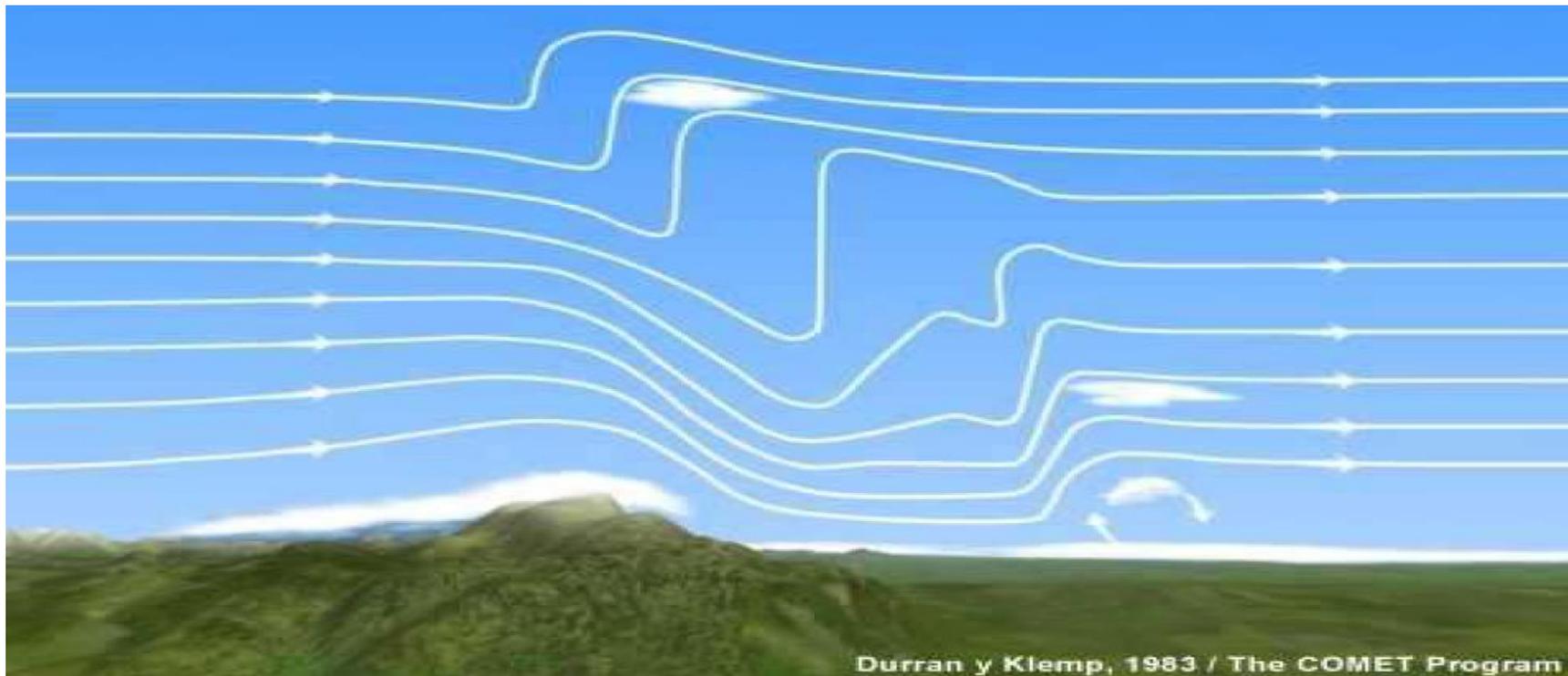


- Inicialmente el aire va ascendiendo de A a G.
- A medida que asciende se va enfriando y condensando (B).
- Las gotas son inicialmente pequeñas, pero a medida que asciende, hay más humedad disponible y van creciendo (D).
- A medida que la parcela desciende, se calienta, por tanto el agua se evapora y desaparece la nube (F).
- En apariencia la nube está estacionaria, pero se va generando y evaporando continuamente.





- Las ondas se propagan desde el obstáculo hasta que son detenidas, generalmente por la tropopausa o por una capa de inversión de temperatura o fuerte cambio de viento.



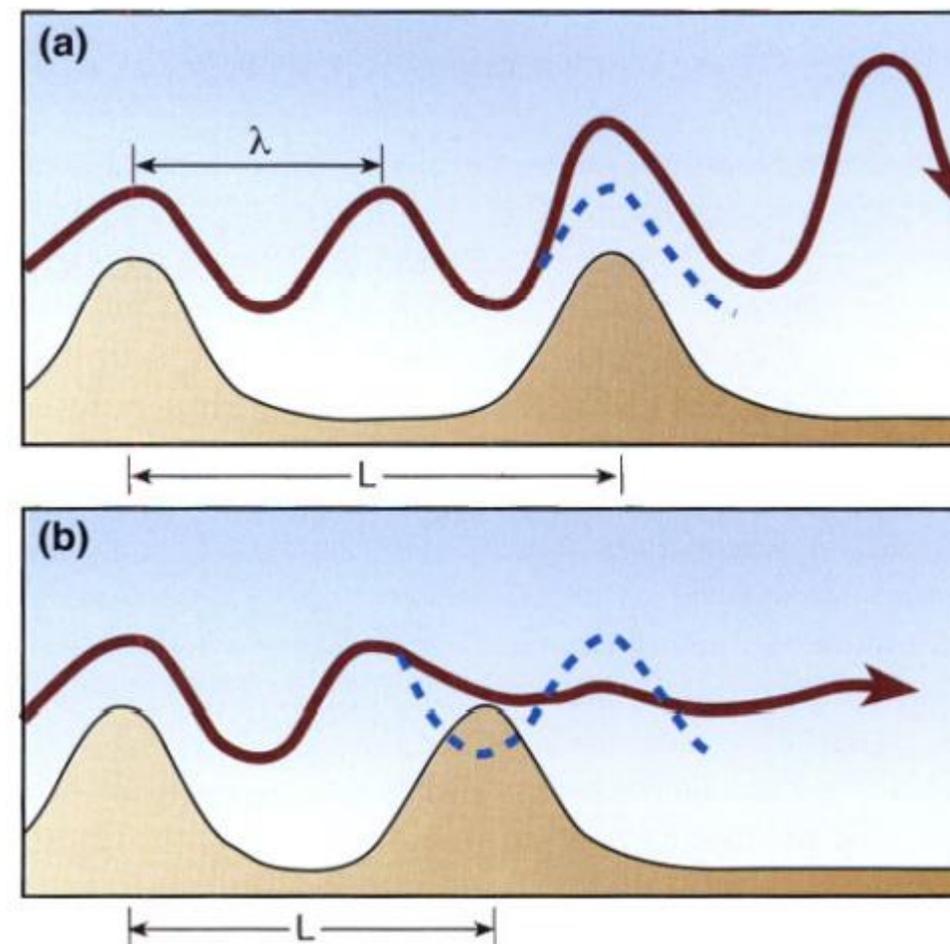


GOBIERNO  
DE ESPAÑA

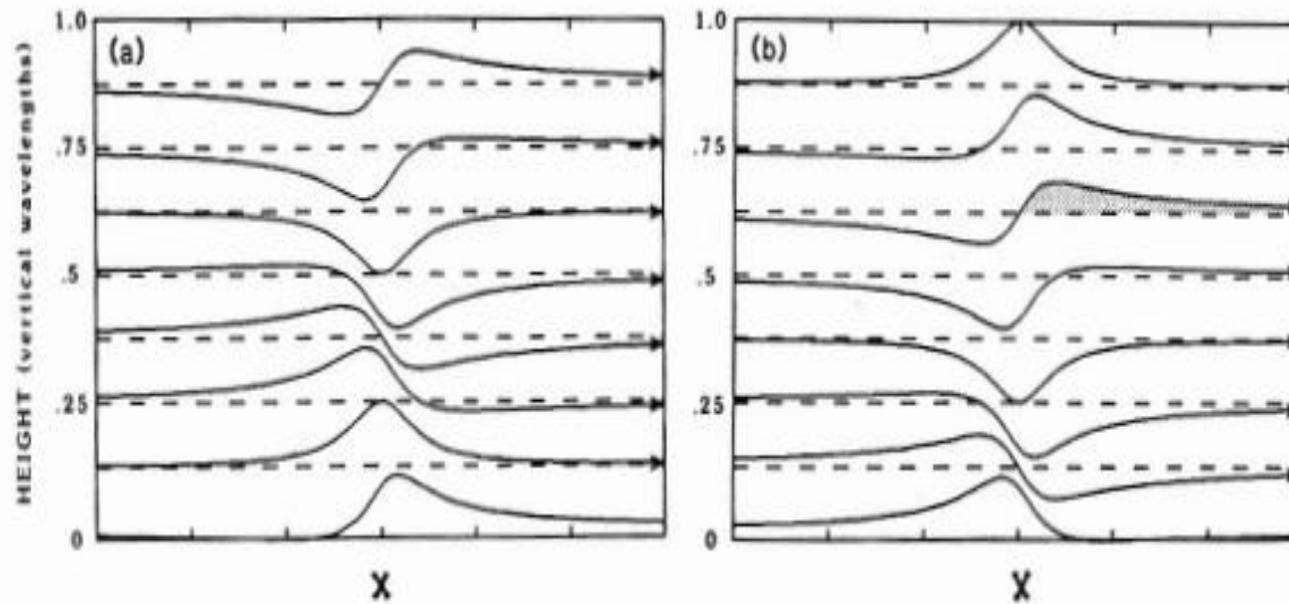
VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**Aemet**  
Agencia Estatal de Meteorología

- Normalmente las cordilleras no están aisladas, hay varias cordilleras una detrás de otra.
- En el caso (a) podemos ver lo que sucede cuando las cordilleras están en fase y la onda resuena con ellas.
- En el caso (b) podemos ver lo que sucede cuando el flujo no está en fase con las cordilleras, da origen a una interferencia destructiva.



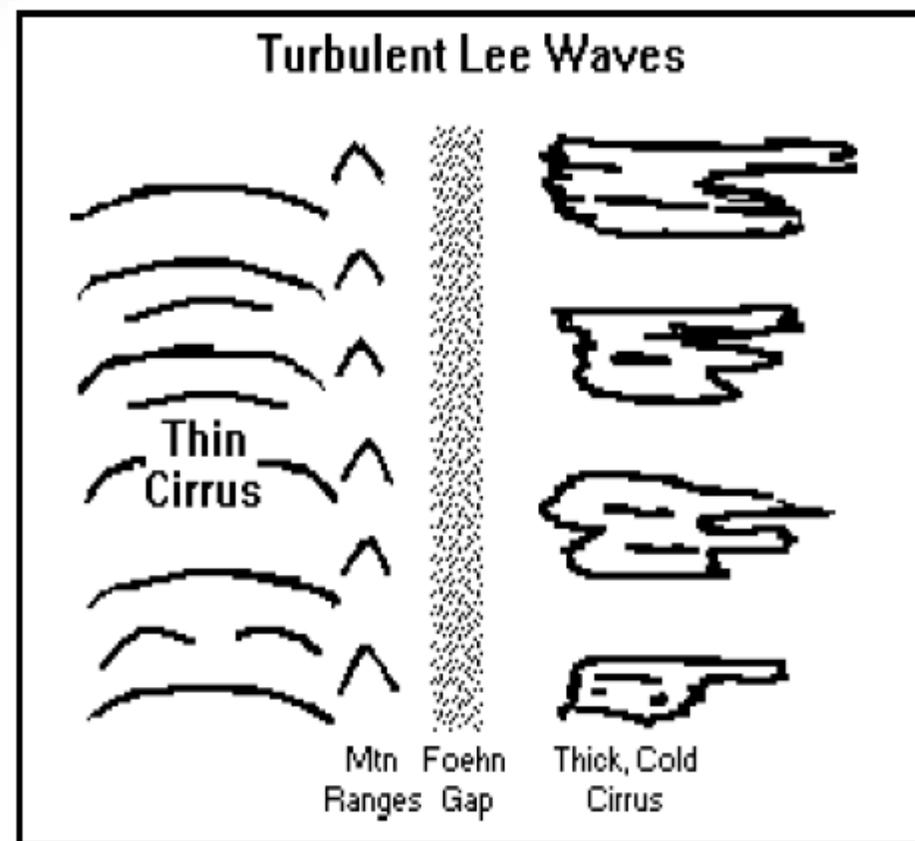
- Las montañas con pendientes abruptas a sotavento, tienen mayor posibilidad de presentar vientos descendentes de ladera fuertes.
- Las montañas con pendientes abruptas a barlovento suelen presentar más turbulencia por encima de la cima de la montaña.



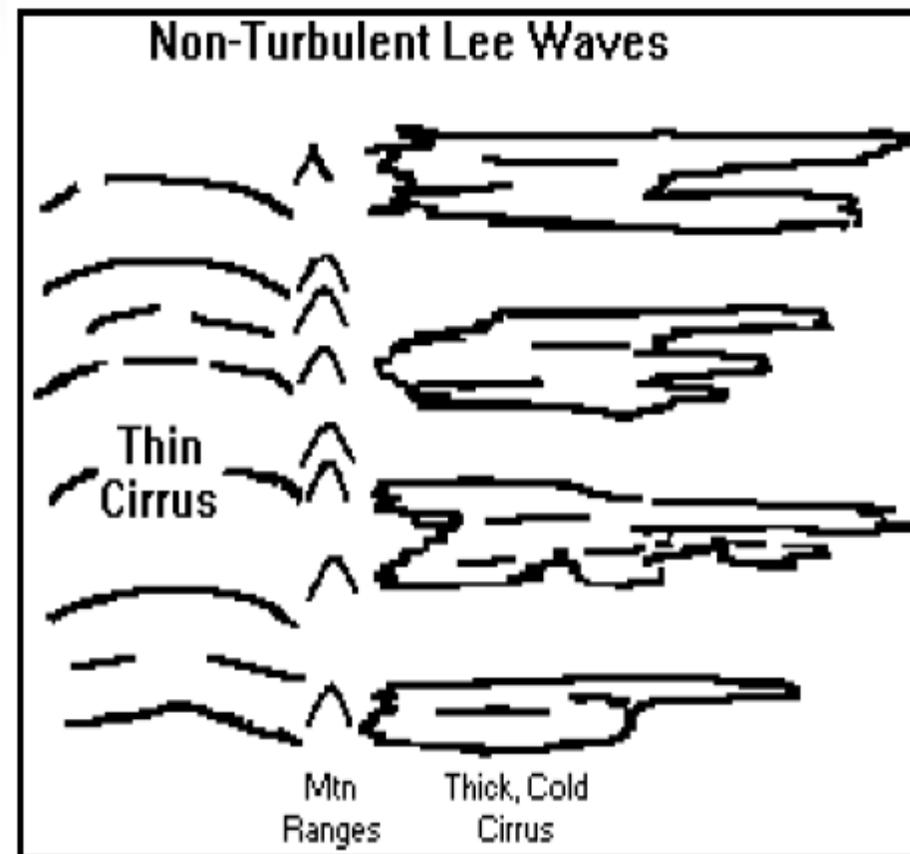


- Si tenemos una zona oscura en la imagen de satélite (foehn gap), seguida de la aparición de cirros espesos, podemos concluir la presencia de onda de montaña con turbulencia fuerte.
- La turbulencia más fuerte suele estar debajo de la tropopausa y entre la zona del salto hidráulico y la superficie.
- La zona oscura (foehn gap) puede tener de 1 a 50km de ancho.

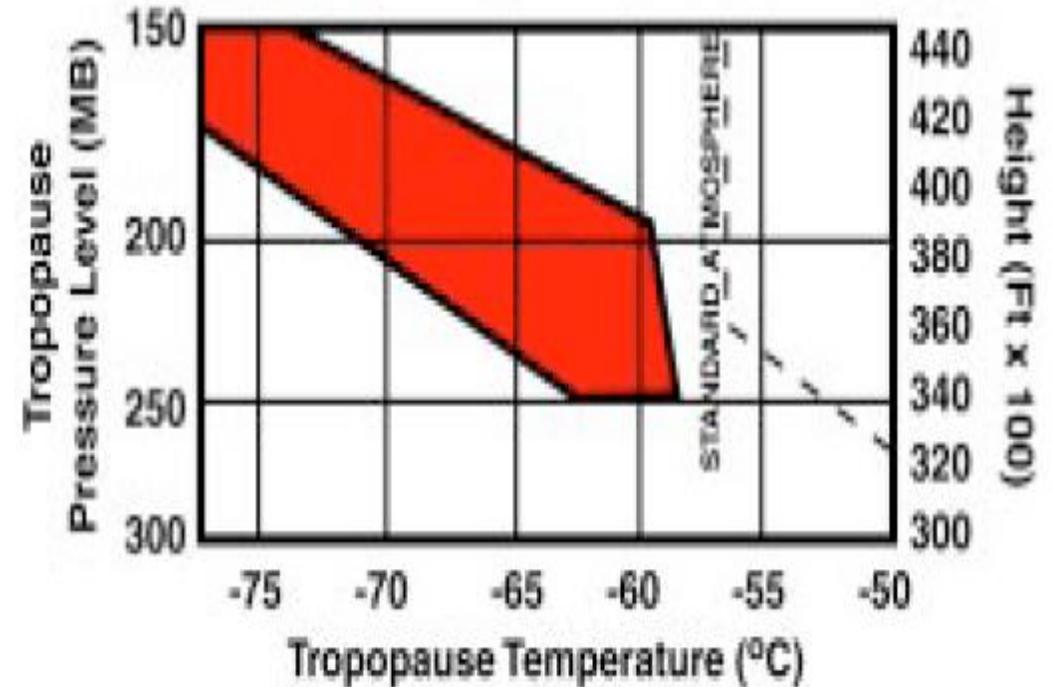
- Si tenemos una zona oscura en la imagen de satélite (foehn gap), seguida de la aparición de cirros espesos, podemos concluir la presencia de onda de montaña con turbulencia fuerte.
- La turbulencia más fuerte suele estar debajo de la tropopausa y entre la zona del salto hidráulico y la superficie.
- La zona oscura (foehn gap) puede tener de 1 a 50km de ancho.



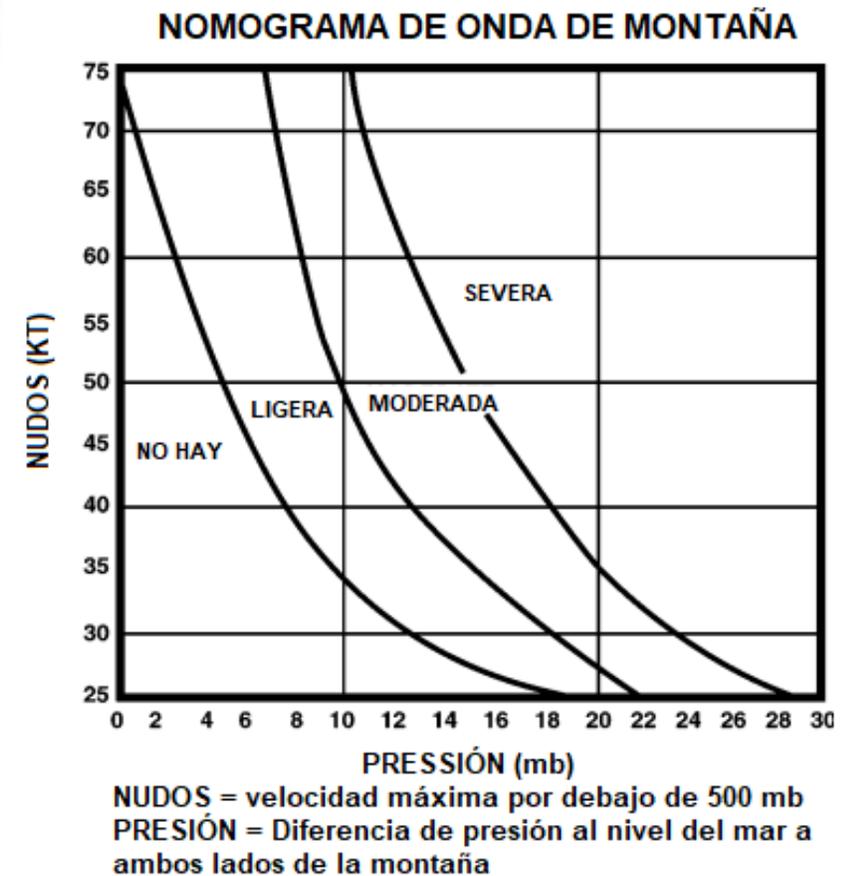
- Si no tenemos zona oscura en la imagen de satélite a sotavento de la cordillera, pero aún así tenemos cirros espesos, podemos concluir la presencia de onda de montaña pero sin turbulencia fuerte.



- Caída brusca de la presión a sotavento.
- Altocúmulos lenticulares sobre la cordillera o a sotavento.
- Fuertes rachas de viento a sotavento.
- Polvo levantado a alturas a alturas iguales o superiores a 20.000 ft.
- Temperaturas inferiores a  $-60^{\circ}\text{C}$  en niveles altos y sobre la montaña (área roja del diagrama).



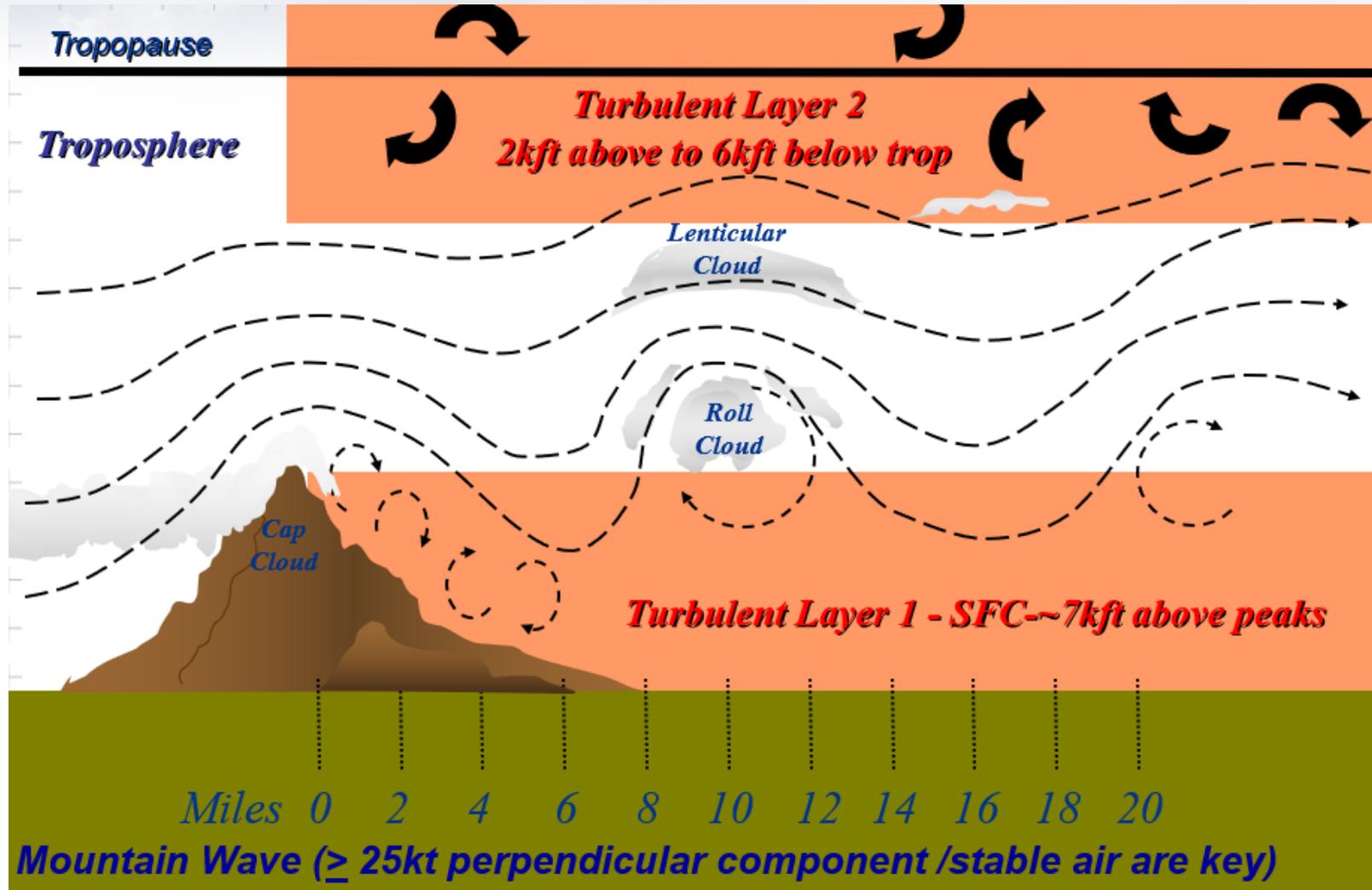
- El nomograma de la AFWA de la derecha sirve para la intensidad de la onda de montaña si conocemos los vientos entre SFC y 500 mb, y la diferencia de presión a ambos lados de la montaña.



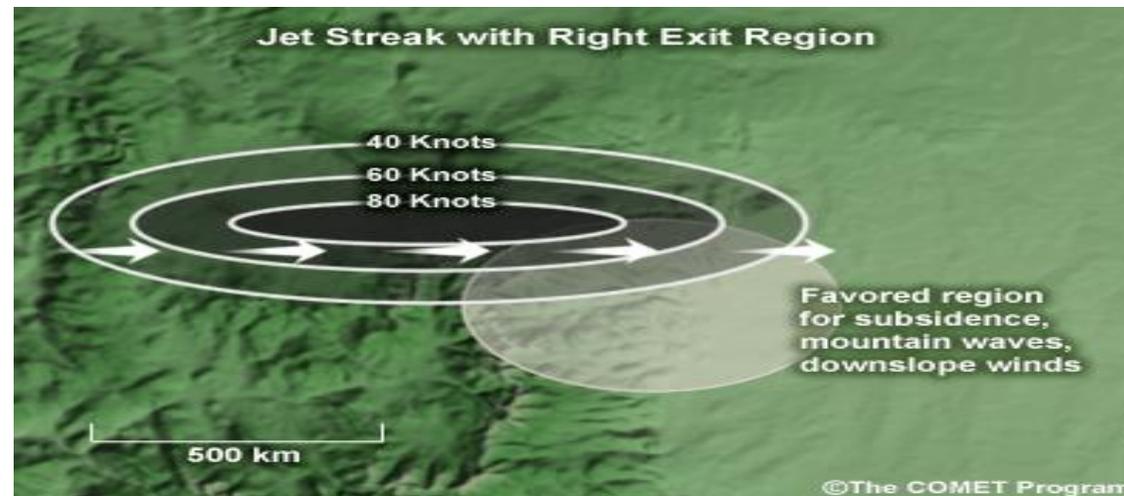
- Turbulencia en niveles bajos provocada por la onda de montaña.

Low-Level Mountain-Wave Turbulence (Surface To 5,000 Ft Above Ridge Line)			
Low-Level Feature Wind Component Normal to Mountain Range at Mountain Top and > 24 kt <b>and</b>	Turbulence Intensity		
	Light	Moderate	Severe
dP Across Mountain at Surface is	See Figure 2-48	See Figure 2-48	See Figure 2-48
dT  Across Mountain at 850 mb is	< 6°C	6°C - 9°C	> 9°C
dT/dX  Along Mountain Range at 850 mb is	<4°C/60 NM	4-6°C/60 NM	>6°C/60 NM
Lee-Side Surface Gusts	< 25 kt	25 - 50 kt	> 50 kt
Winds Below 500 mb > 50 kt	Increase the Turbulence found by one degree of intensity (i.e., Moderate to Severe)		

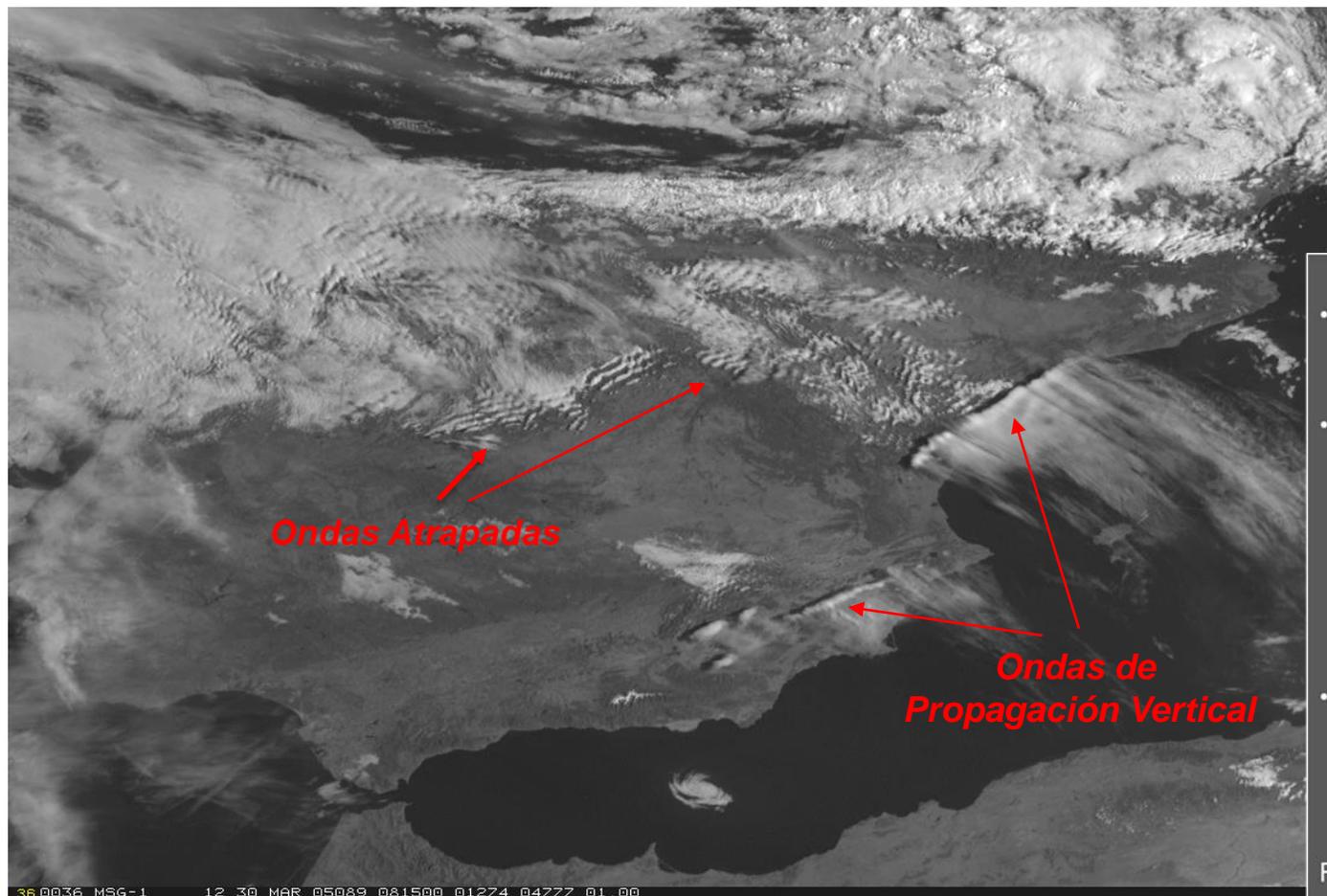
- Notes:**
- (1) dP is the change in surface pressure across the range.
  - (2) |dT| is the absolute value of the 850-mb temperature difference across the range.
  - (3) |dT/dX| is the absolute value of the 850-mb temperature gradient along mountain range.
  - (4) Turbulence category forecast is the worst category obtained from each of the four parameters.



- Cuando tenemos una corriente en Chorro sobre una cordillera y se dan las condiciones para la aparición de onda de montaña (estabilidad, velocidad del viento, etc), podemos observar turbulencia más intensa en la zona cálida del Chorro.
- Mientras que si no tuviésemos la cordillera, la turbulencia más intensa, es habitual observarla sobre el lado frío de la corriente en Chorro.



## • Identificación de ondas de montaña

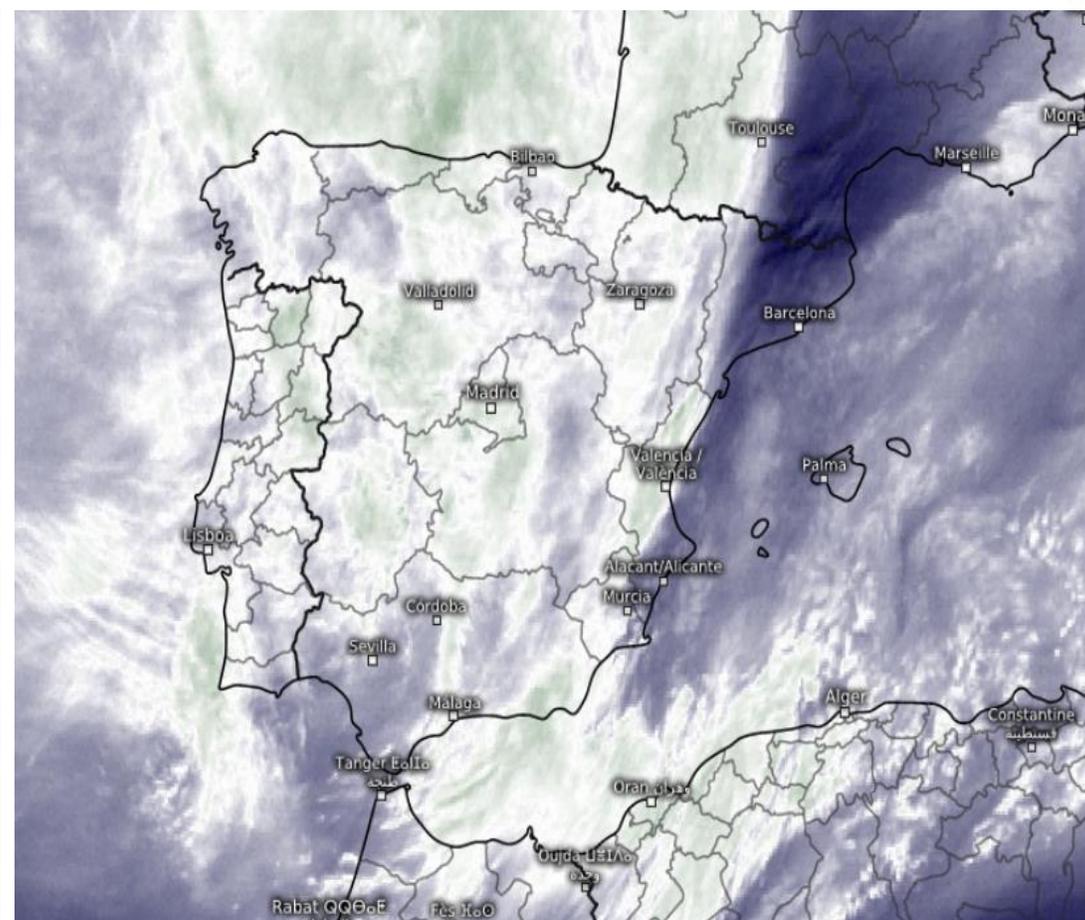
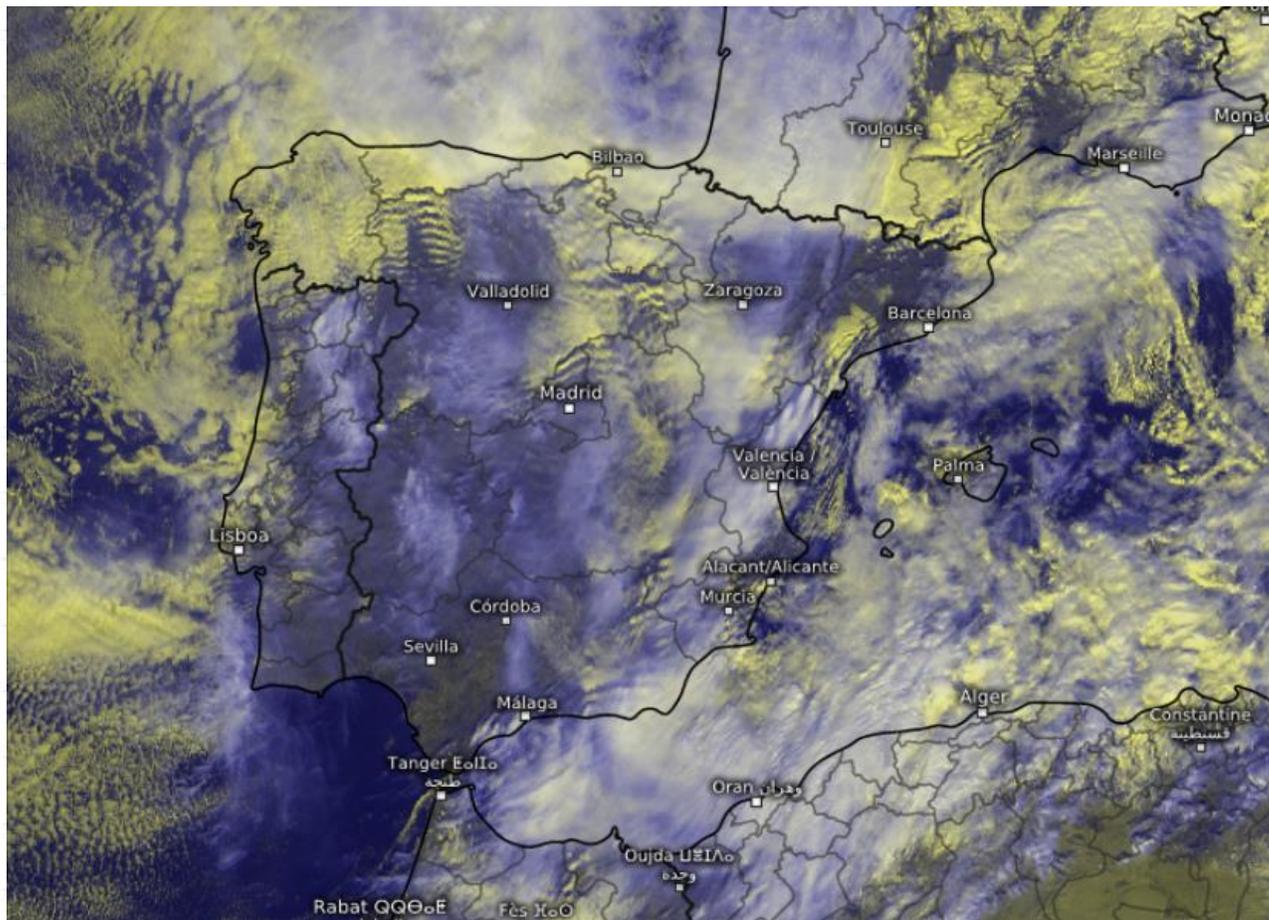


- Los cirros orográficos indican ascensos de aire a sotavento de la montaña
- Si en la cima había condiciones de onda de montaña, se tratará de ondas de propagación vertical y habrá que tener en cuenta la turbulencia que generan cerca de la tropopausa (además de la que puedan generar en niveles inferiores)
- Si en la cima no había condiciones de onda de montaña se tratará de ascensos forzados por ella en situación de inestabilidad

Fuente: Feliciano Jiménez ATAP



- Identificación de ondas de montaña.



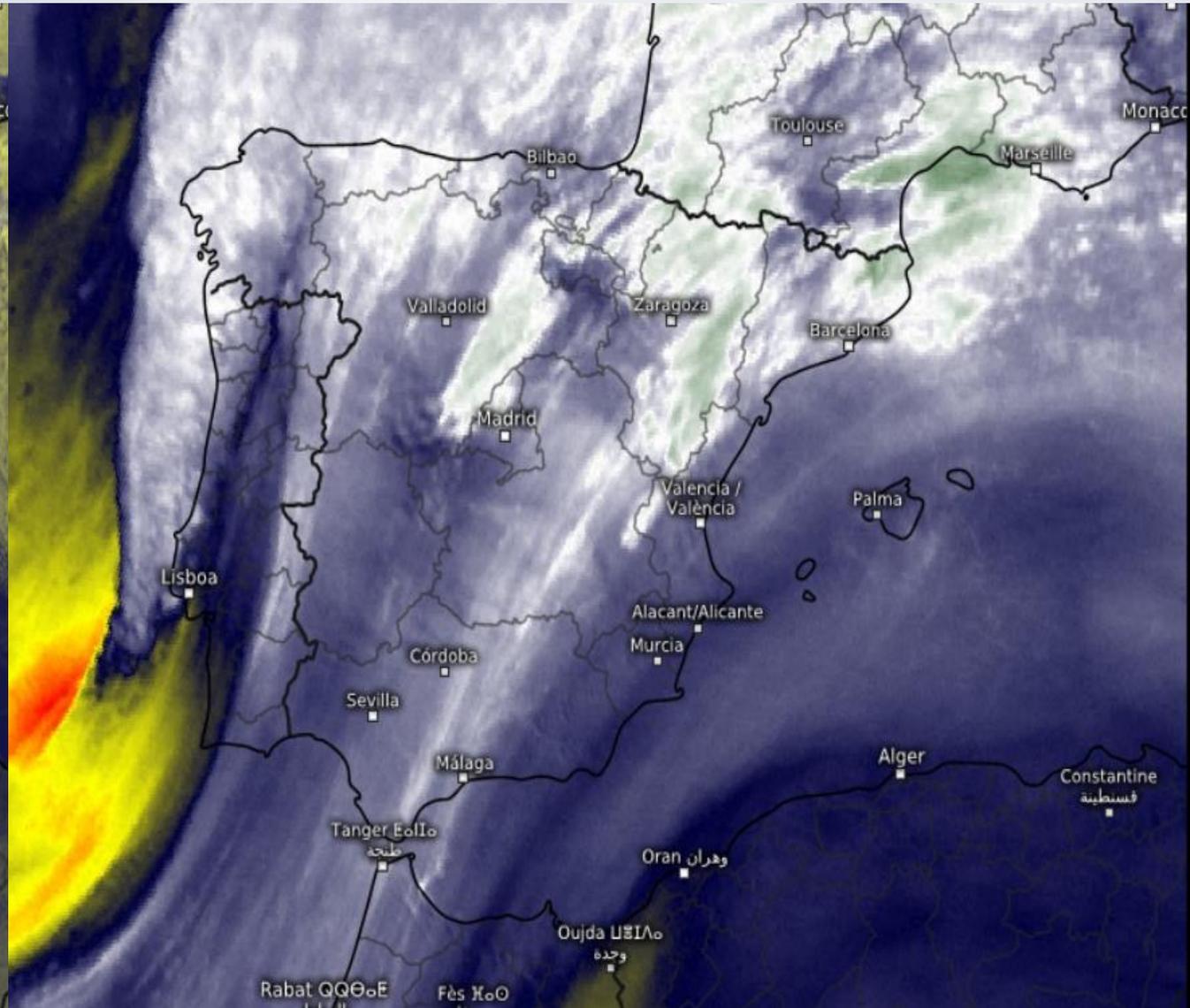
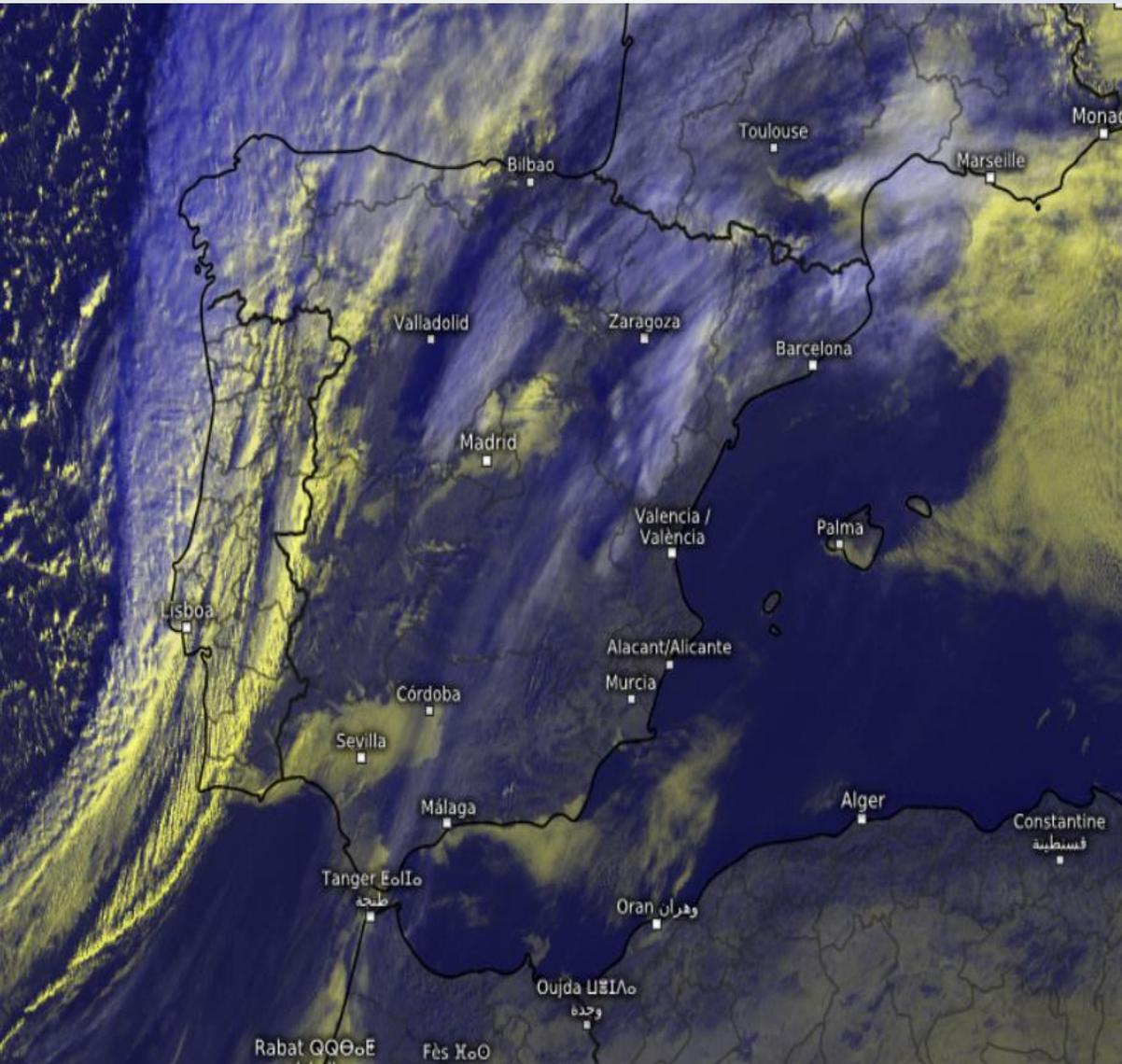




GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Aemet  
Agencia Estatal de Meteorología



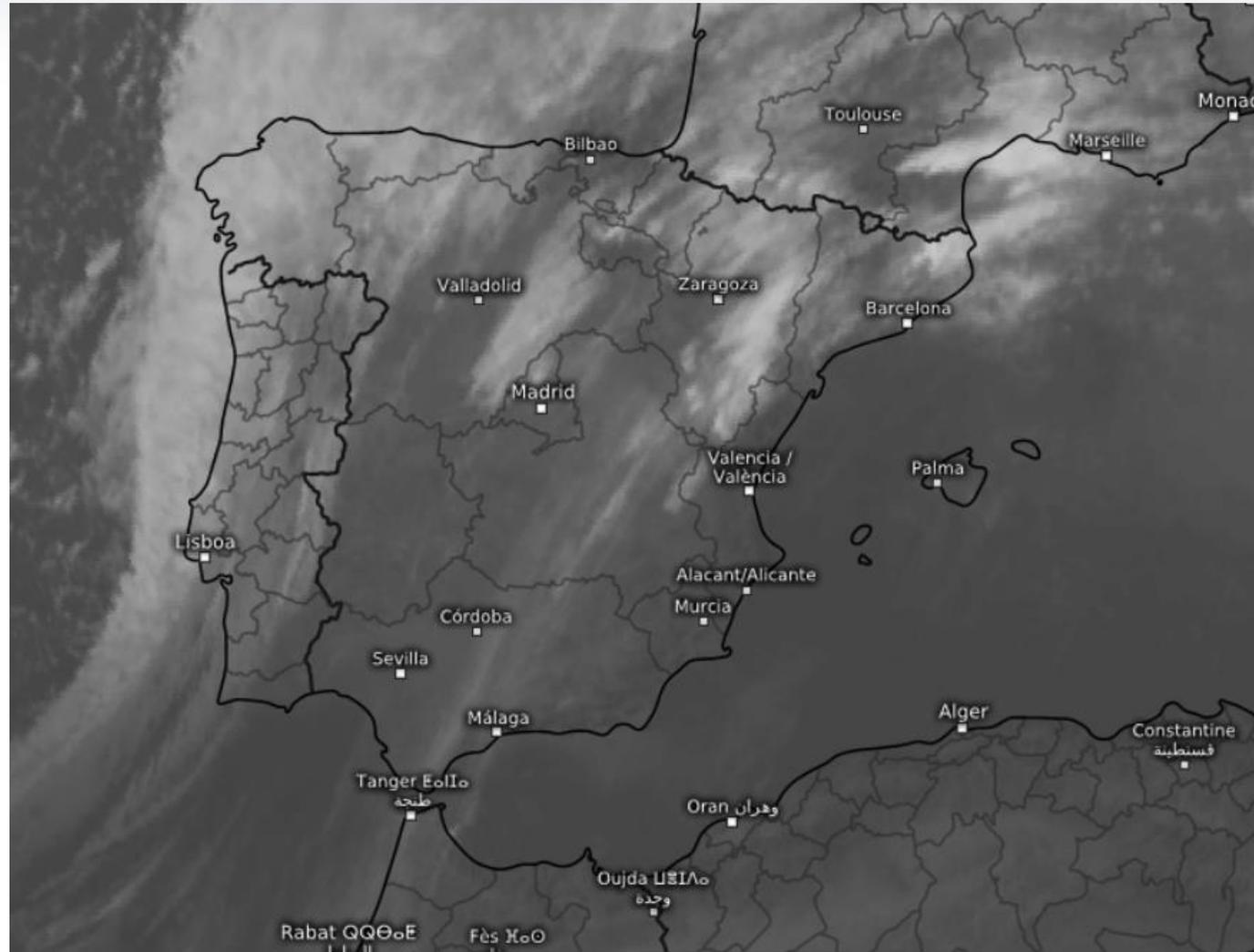
PIB-2022 Onda de montaña



GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

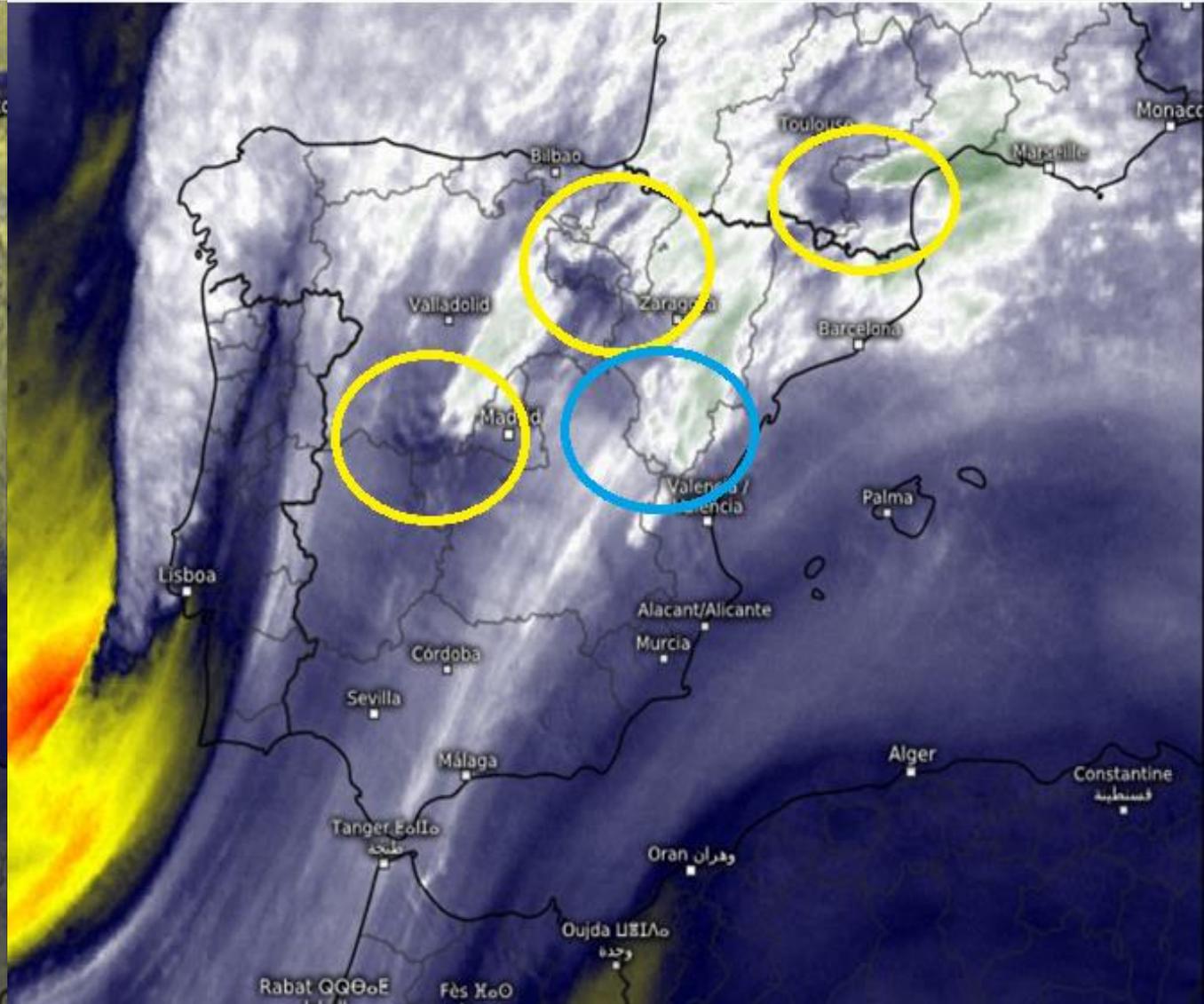
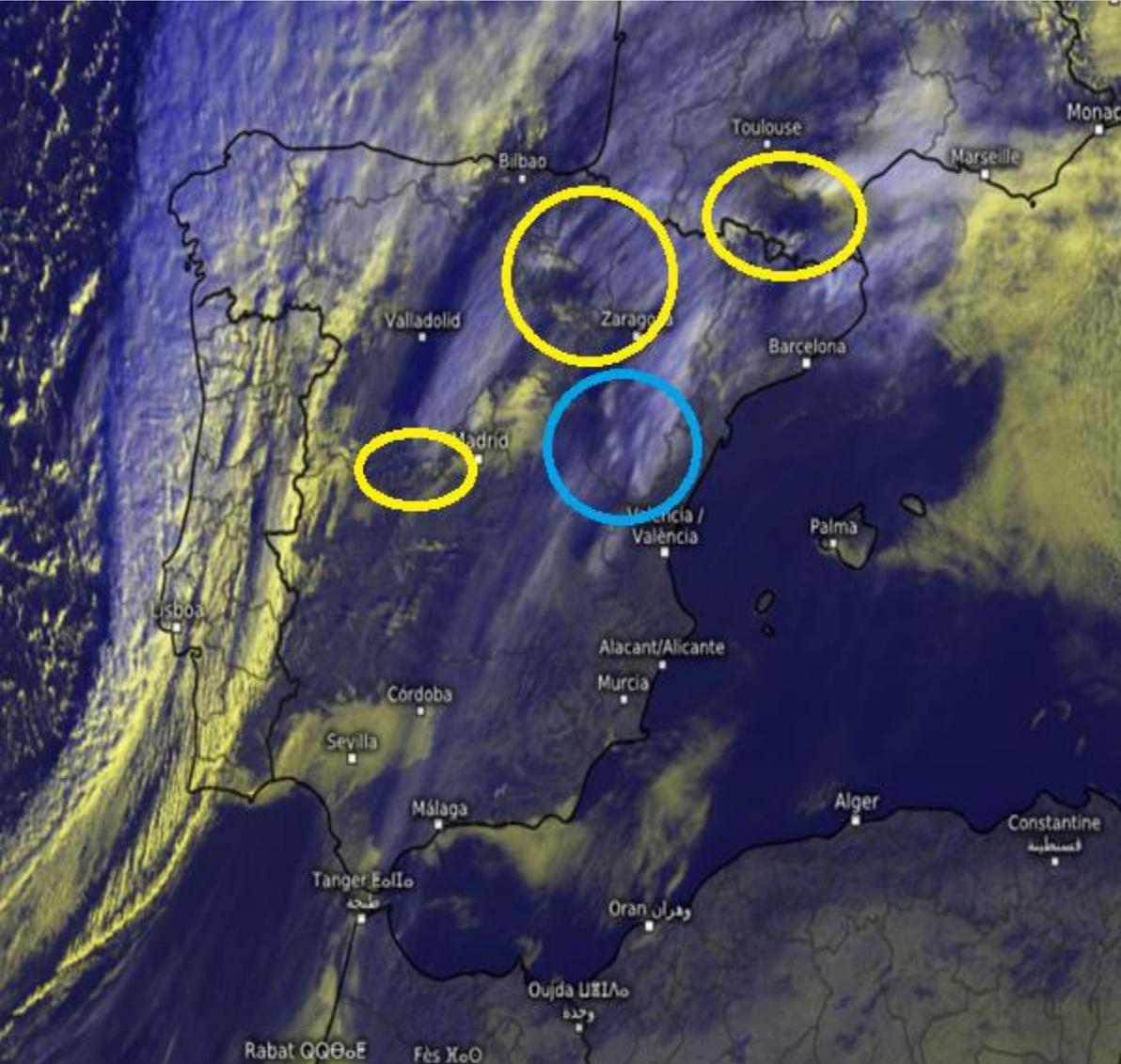




GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Aemet  
Agencia Estatal de Meteorología

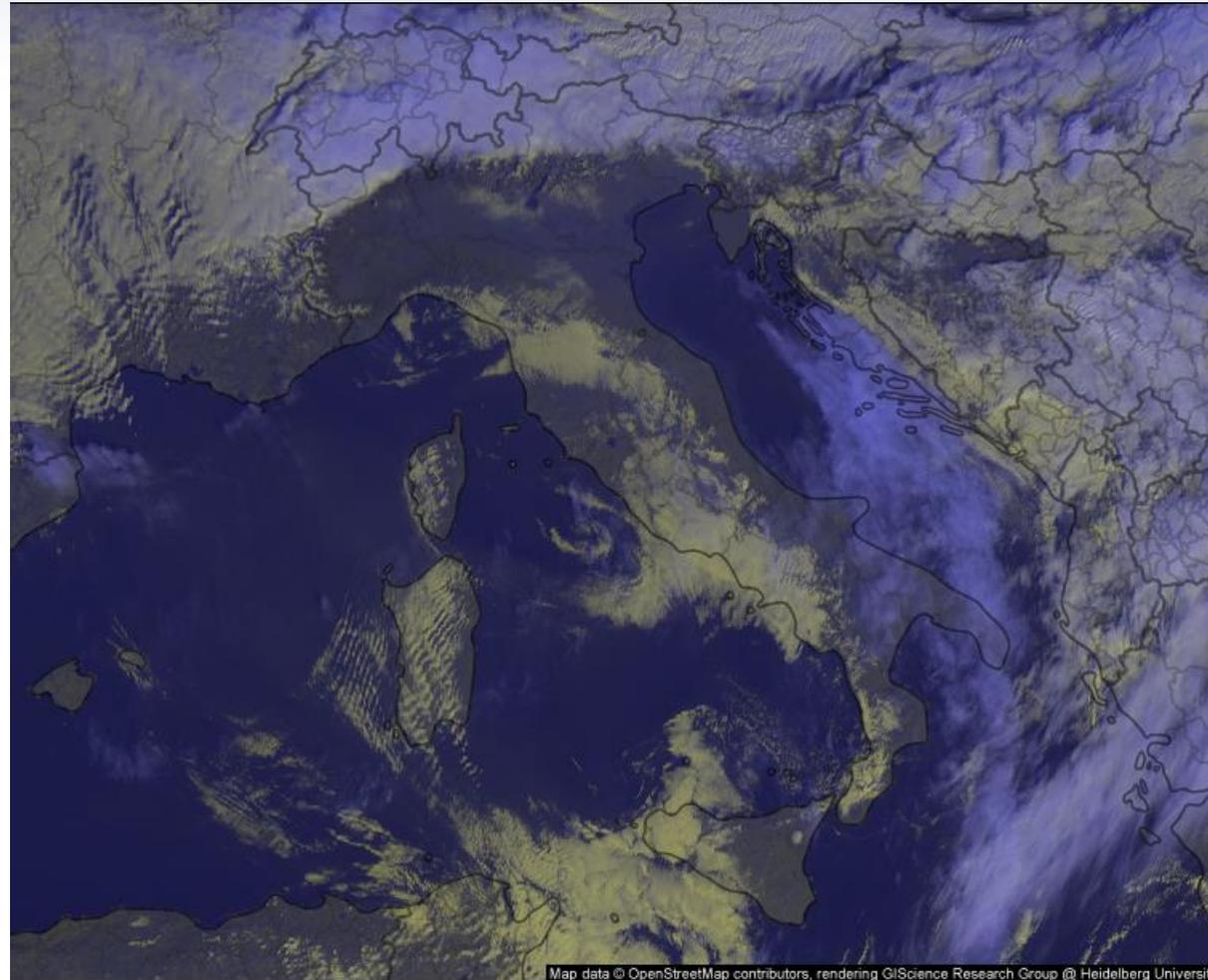




GOBIERNO DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

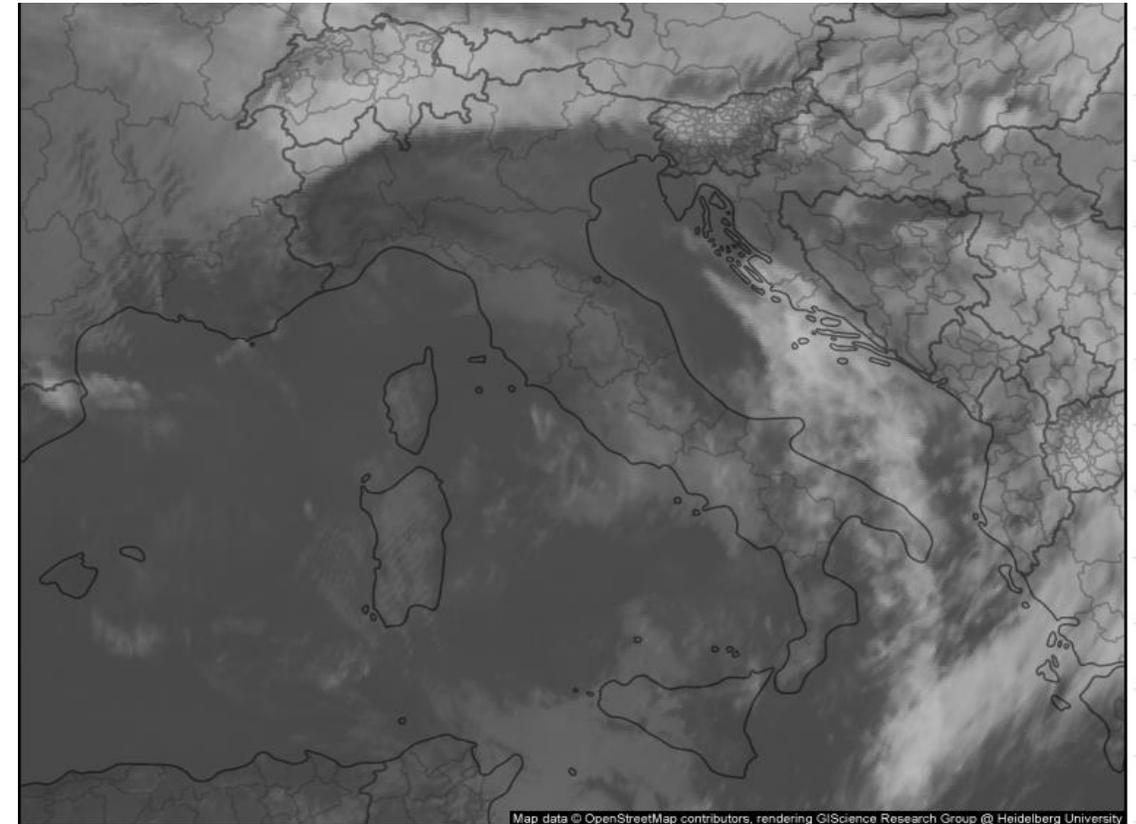
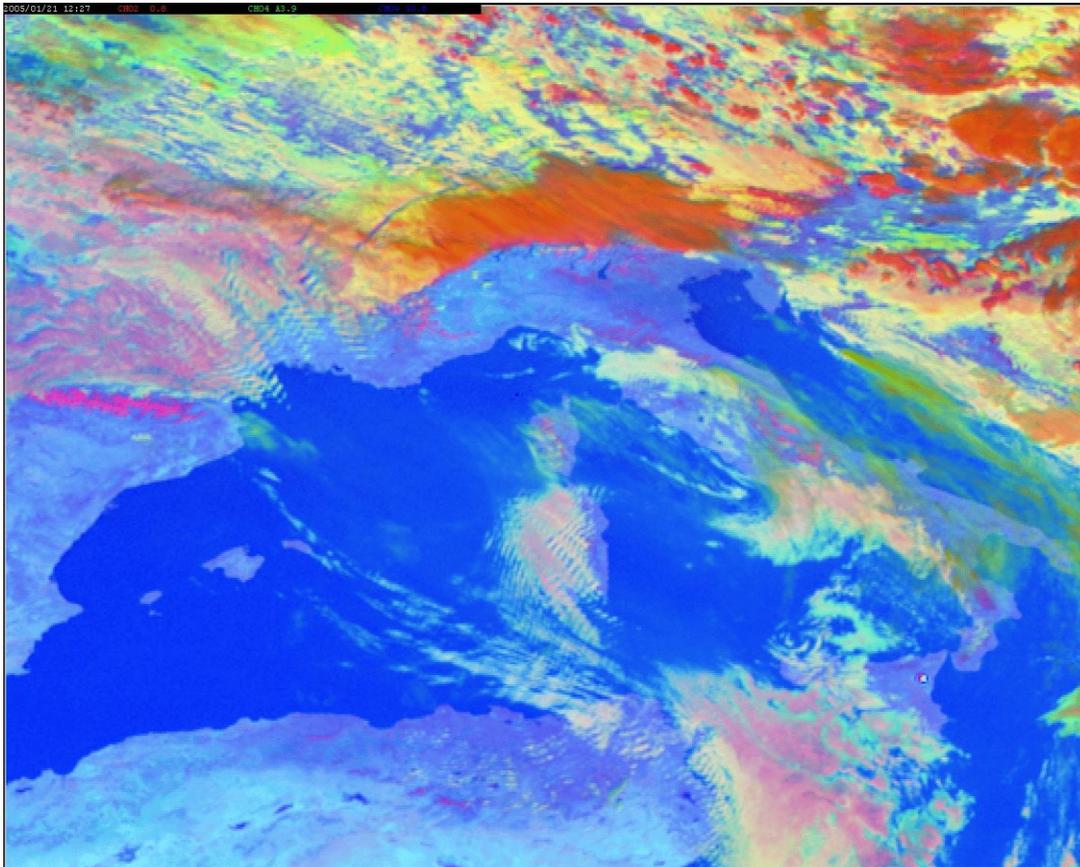
**AEMet**  
Agencia Estatal de Meteorología



**Satellite HD**

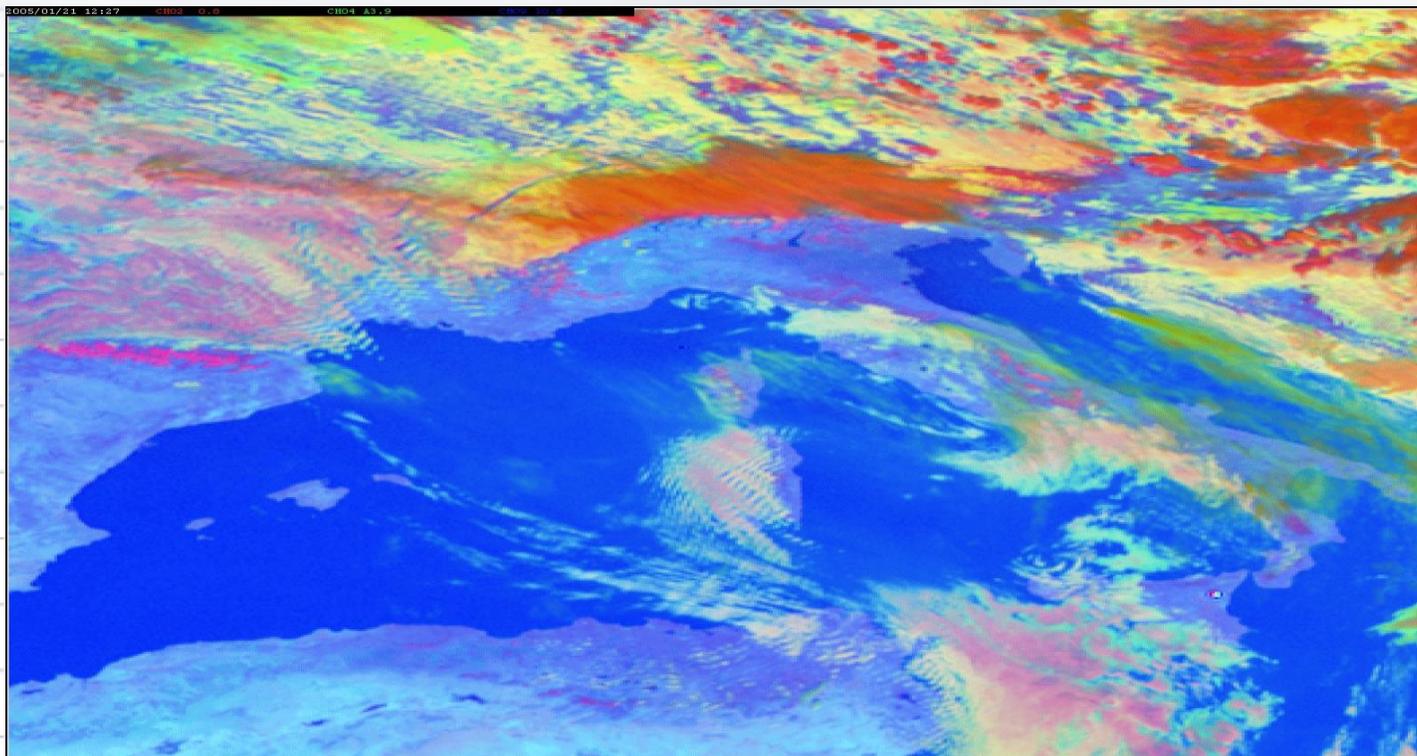
Fri 01/21/2005, 11:00am CET

- Las imágenes RGB de microfísica de nubes y las imágenes infrarrojas nos pueden ayudar a hacernos una idea de qué está ocurriendo.



Satellite infrared

Fri 01/21/2005, 11:00am CET

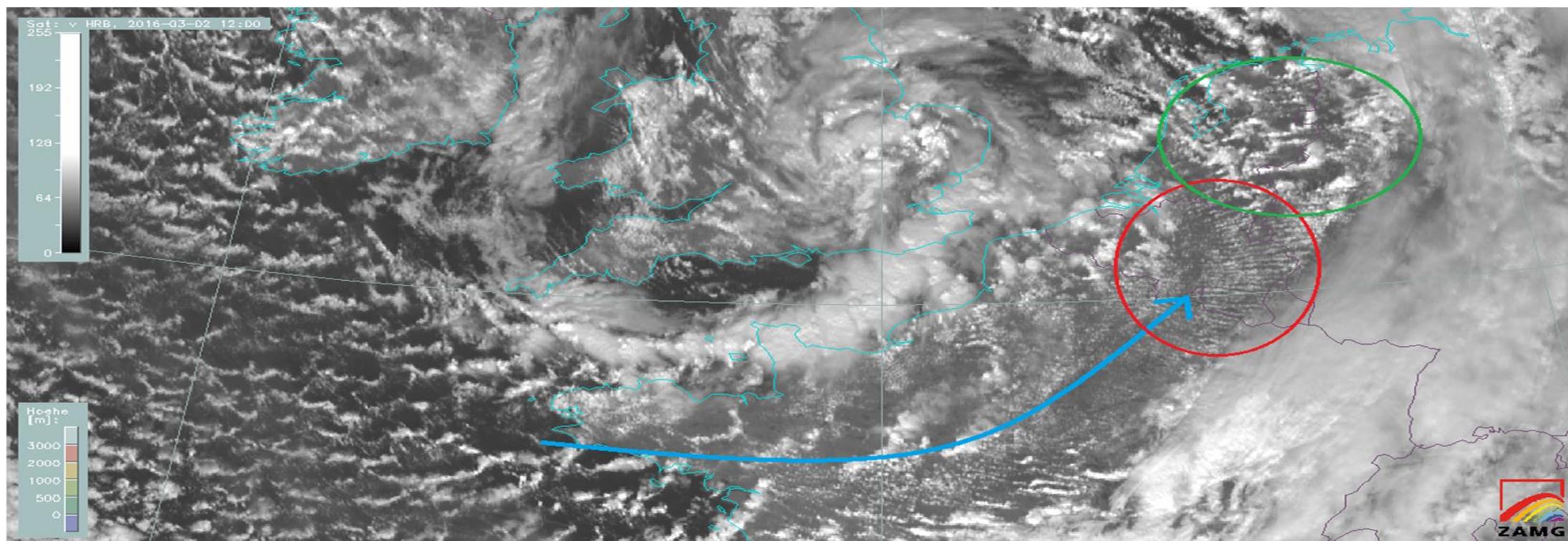


- 1 Thick ice clouds with large ice particles.
- 2 Thick ice clouds with small ice crystals on top.
- 3 Snow and ice on the ground.
- 4 Semi-transparent ice clouds. \*
- 5 Low to mid-level **thick** water clouds with large particles.
- 6 Low to mid-level **thick** water clouds with smaller particles.
- 7 Cloud-free land.
- 8 Oceans and lakes.

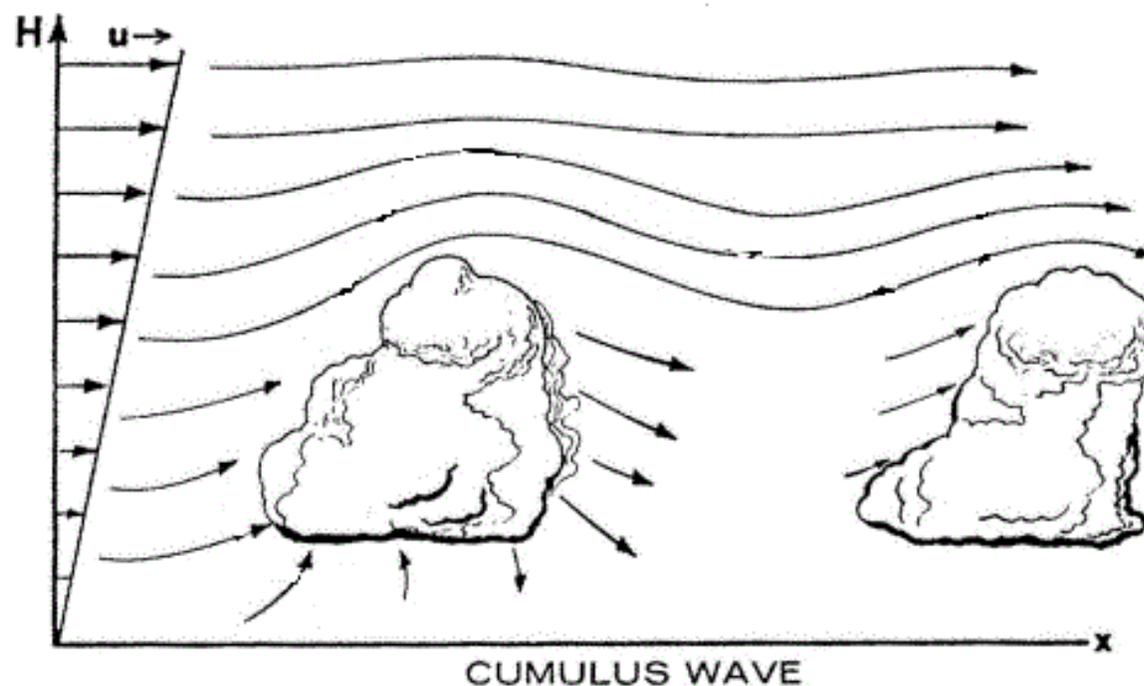
Colour	Channel [µm]	Physically relates to	Smaller contribution to the signal of	Larger contribution to the signal of
Red	<b>VIS0.8</b>	Cloud optical thickness	Thin clouds	Thick clouds
Green	<b>IR3.9refl</b>	Cloud microphysical properties	<b>Ice clouds Large particles</b>	<b>Water clouds Small particles</b>
Blue	<b>IR10.8</b>	Temperature	Cold thick clouds	Warm land/sea Warm Clouds

- Las imágenes RGB de microfísica de nubes nos dan información sobre la fase de las gotas que forman la nube.
- Rojo: indica nubes frías y espesas con cristales de hielo grandes.
- Naranja: nubes frías y espesas con cristales de hielo pequeños.
- Magenta: nubes relativamente cálidas y espesas
- Verde-marronoso: nubes medias espesas agua/hielo con gotas/cristales grandes.

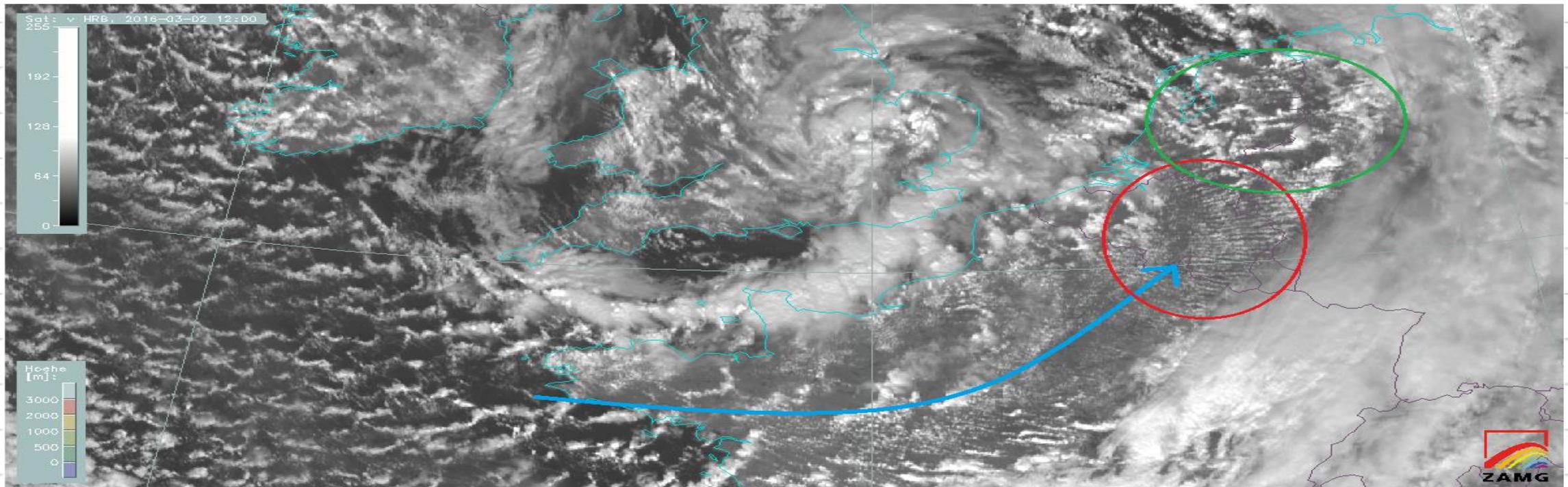
- ¿Qué está ocurriendo aquí? Hay onda de montaña en una llanura y en presencia de convección.



- Los cúmulos generados por convección pueden generar las llamadas ondas térmicas, son ondas de gravedad basadas en la actuación de los propios cúmulos como obstáculos orográficos.



- El efecto de las ondas térmicas se ve sobre todo en zonas llanas y cálidas, se ve como en presencia de cúmulos, se desarrollan patrones ondulantes, que desaparecen al profundizarse la convección.





GOBIERNO  
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**AEMet**  
Agencia Estatal de Meteorología

# CAFÉ PARA LOS MUY CAFETEROS

- Es una variable que relaciona la energía cinética y la energía potencial.
- Es una magnitud adimensional.
- Depende del gradiente de la atmosfera y de su estabilidad.
- Depende directamente de la velocidad del fluido.
- Depende de la altura del obstáculo.
- Un número de Froude ( $Fr$ )  $> 1$  indica que pasa la cordillera montañosa.

- $Fr = \frac{U}{Nh}$        $N^2 = \frac{g}{T} (\gamma - \alpha)$

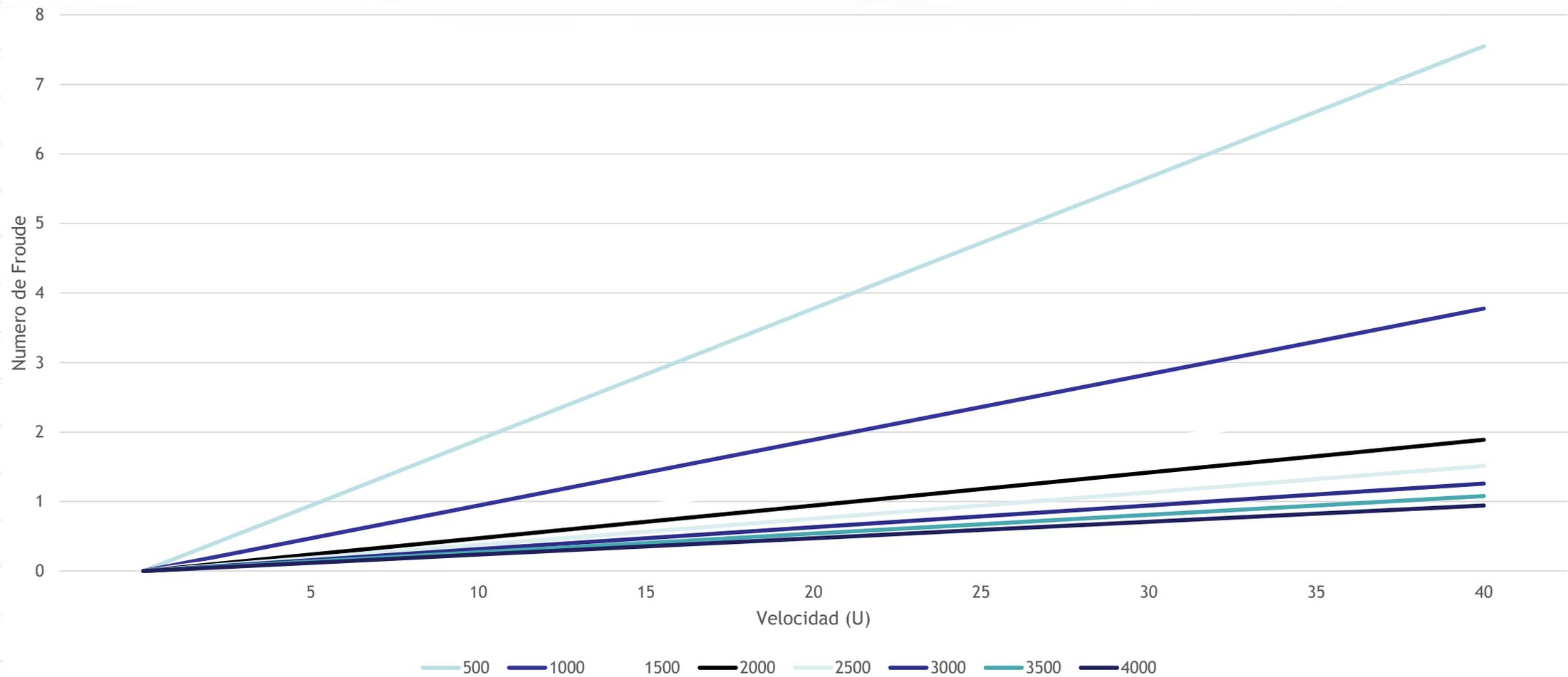


GOBIERNO DE ESPAÑA

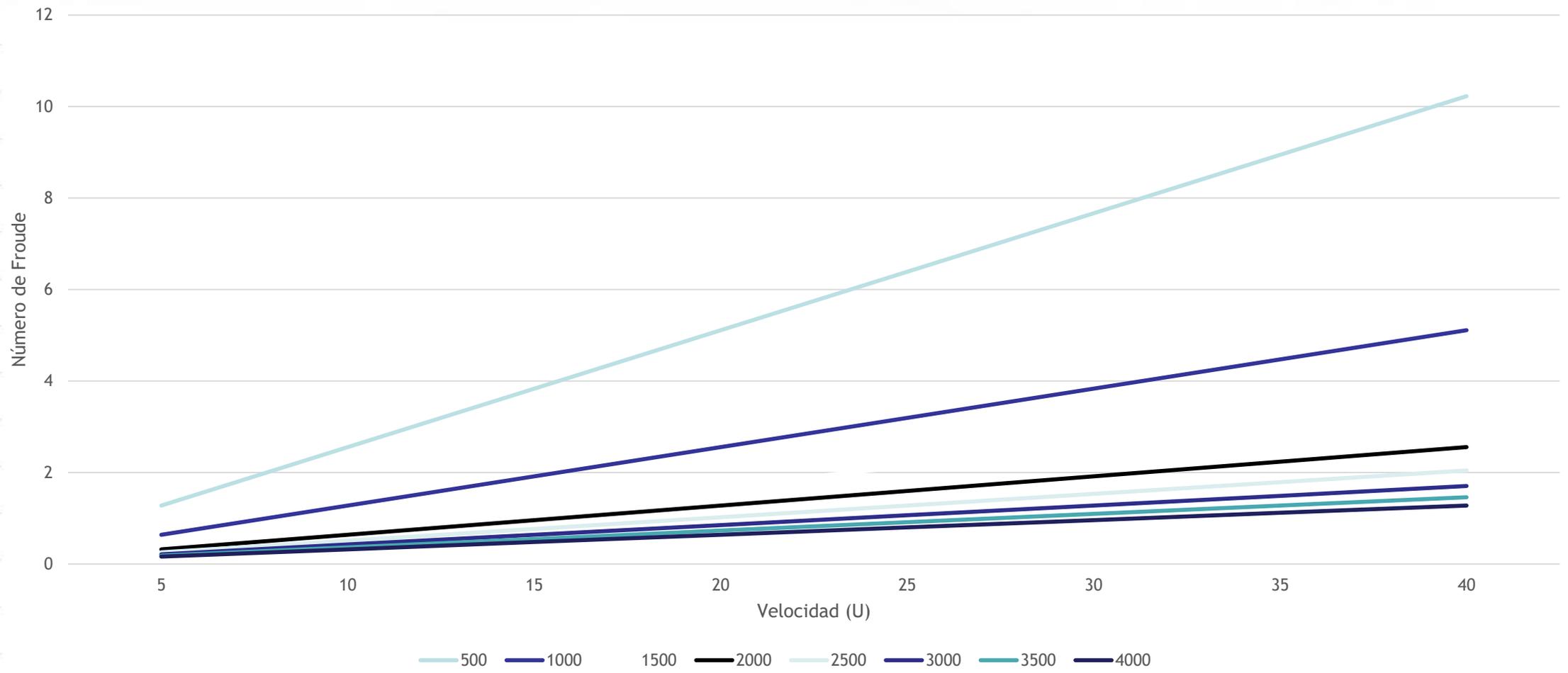
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Número de Froude según la velocidad y la altura  $\alpha=6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$

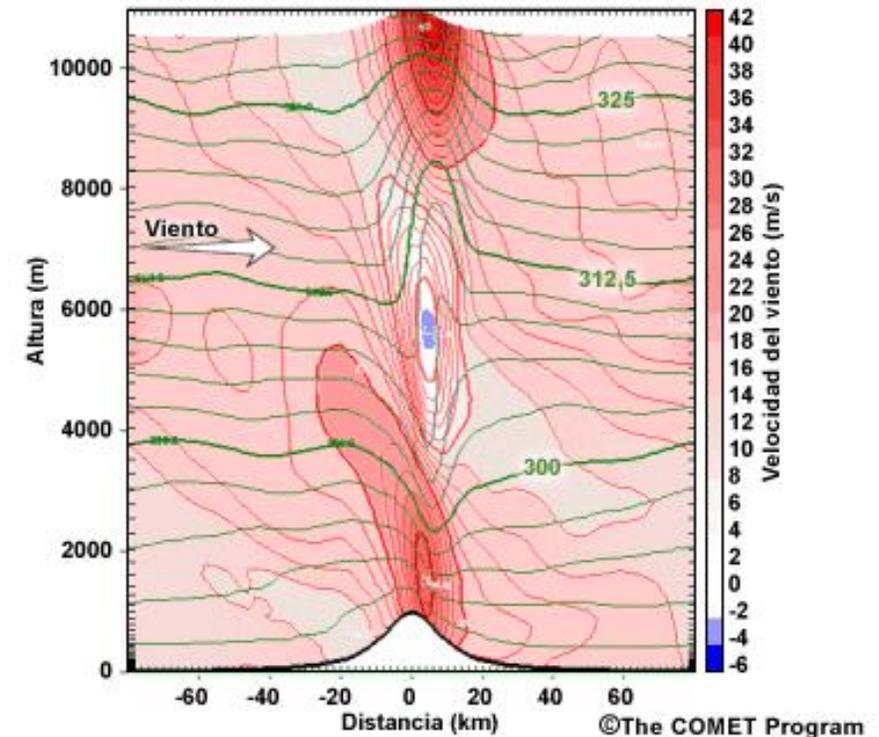


Número de Froude según la velocidad y la altura  $\alpha=8^{\circ}\text{C}/\text{km}$



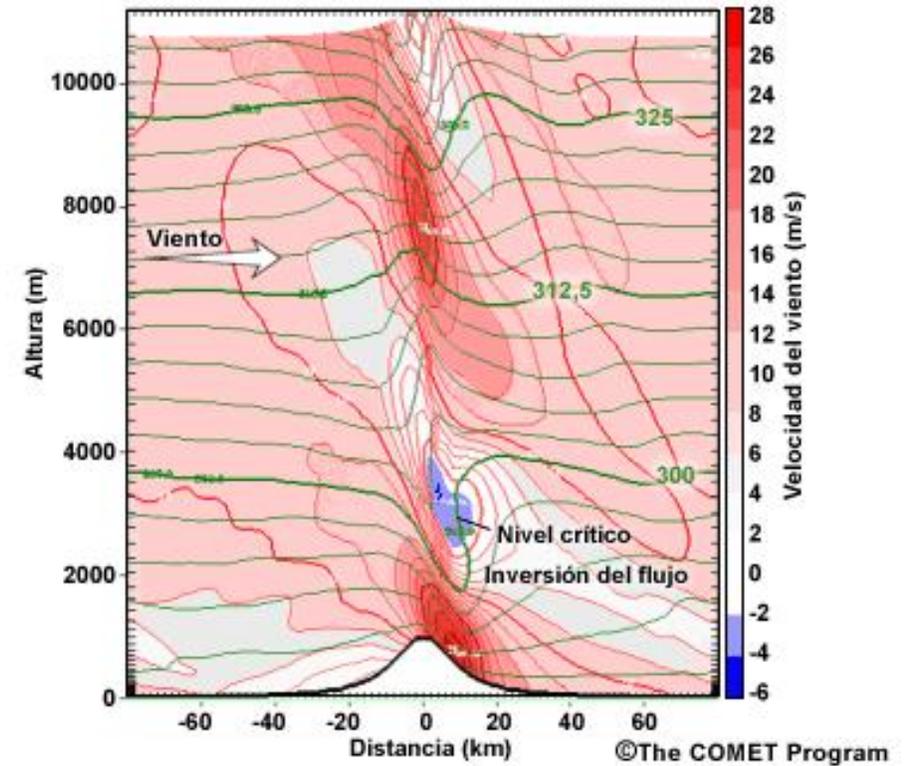
- Las líneas representan isoentropas, igual entropía de la masa de aire.
- Al descender por sotavento en superficie hay el doble de velocidad que a barlovento.
- La verticalidad de las isoentropas da una idea de la estabilidad.
- La ruptura de la onda (isoentropas) provoca la formación de un nivel crítico (6000 m).
- La turbulencia más intensa está debajo de la ruptura del nivel crítico.

Simulación del modelo RAMS, núm. de Froude = 1,5  
Isoentropas en verde (intervalo = 2,5 K)  
Velocidad del viento en rojo (intervalo = 2 m/s)



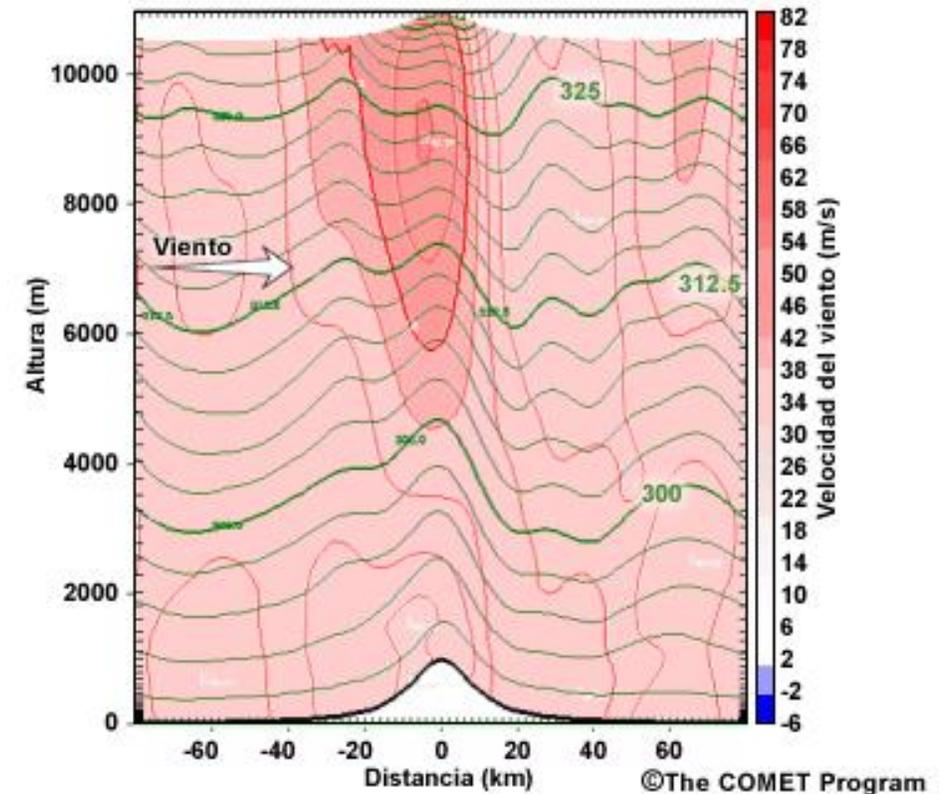
- Los vientos de ladera son otro de los fenómenos a tener en cuenta cuando el número de Froude es aproximadamente igual a 1.
- En este caso el nivel crítico está más bajo que cuando  $Fr = 1,5$ , por lo tanto los vientos descendentes de ladera serán más intensos (26m/s).
- Los vientos de ladera a sotavento, son 4 veces más intensos que a barlovento.

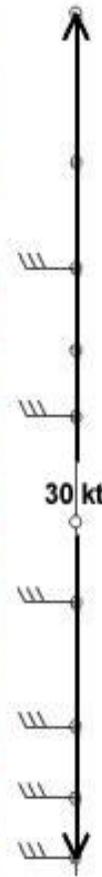
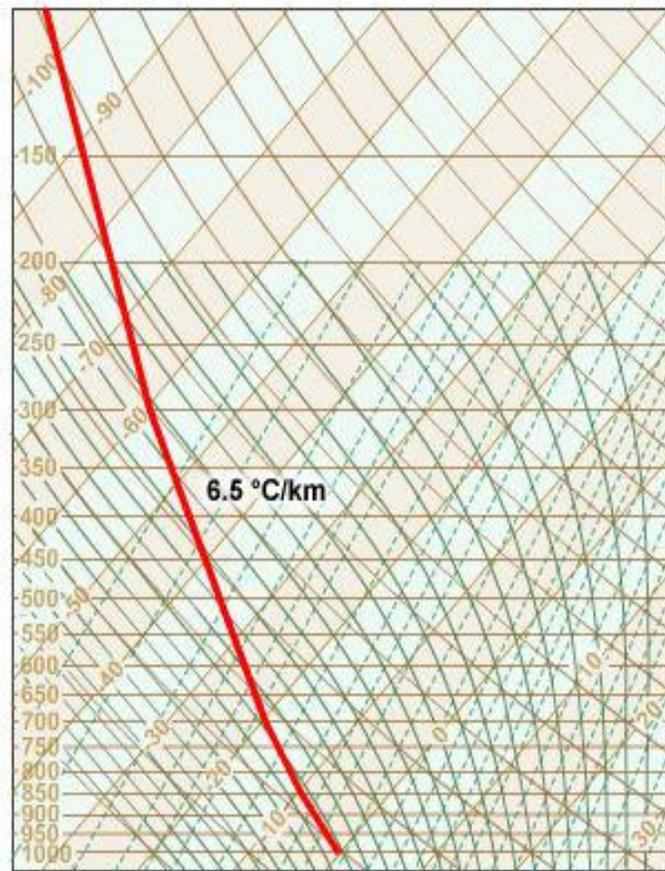
Simulación del modelo RAMS, núm. de Froude = 1  
Isentropas en verde (intervalo = 2,5 K)  
Velocidad del viento en rojo (intervalo = 2 m/s)



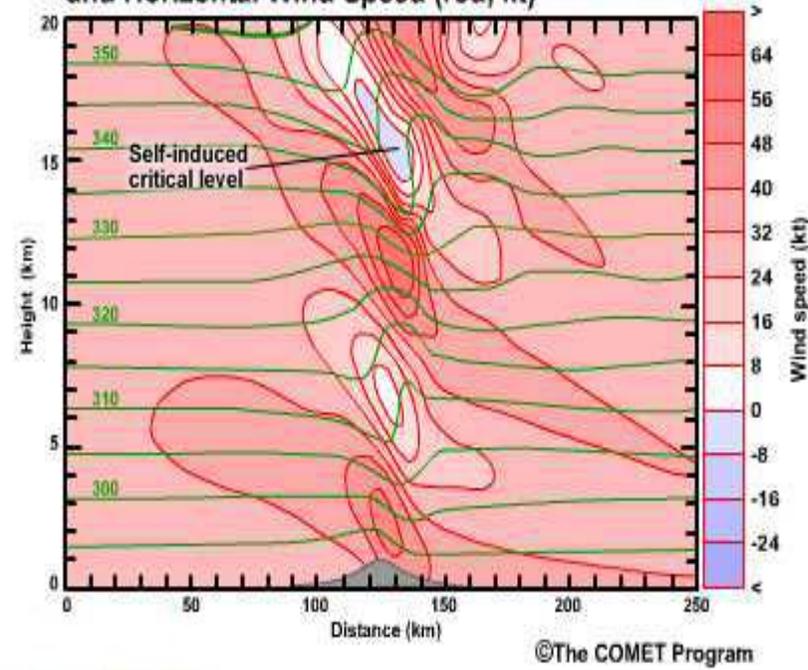
- A medida que el número de Froude  $> 1$ , encontramos menos turbulencia ocasionada por la onda de montaña.

Simulación del modelo RAMS, núm. de Froude = 3  
Isentropas en verde (intervalo = 2,5 K)  
Velocidad del viento en rojo (intervalo = 4 m/s)

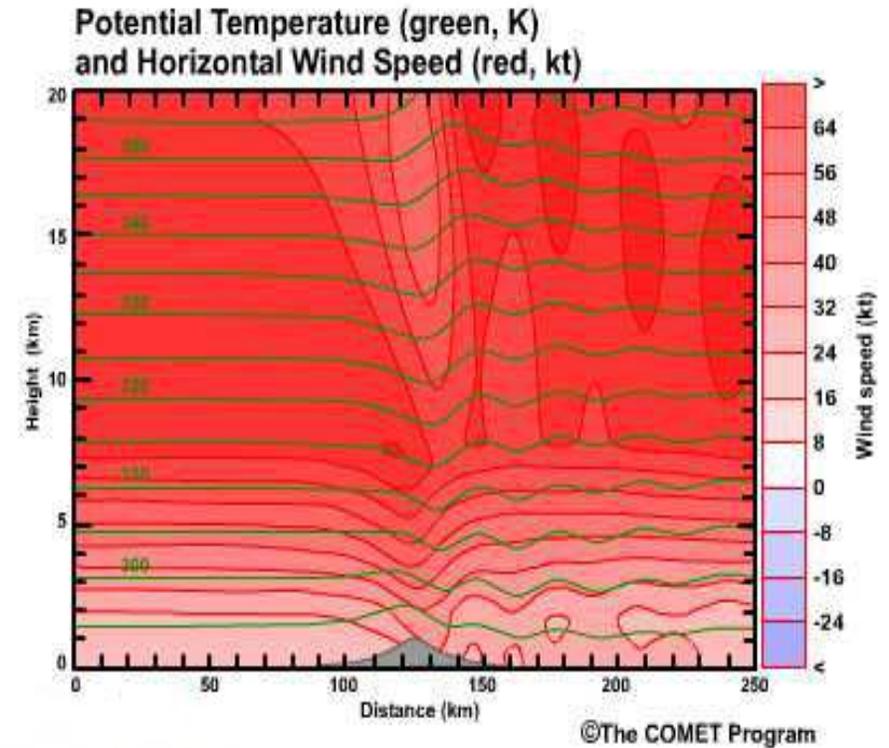
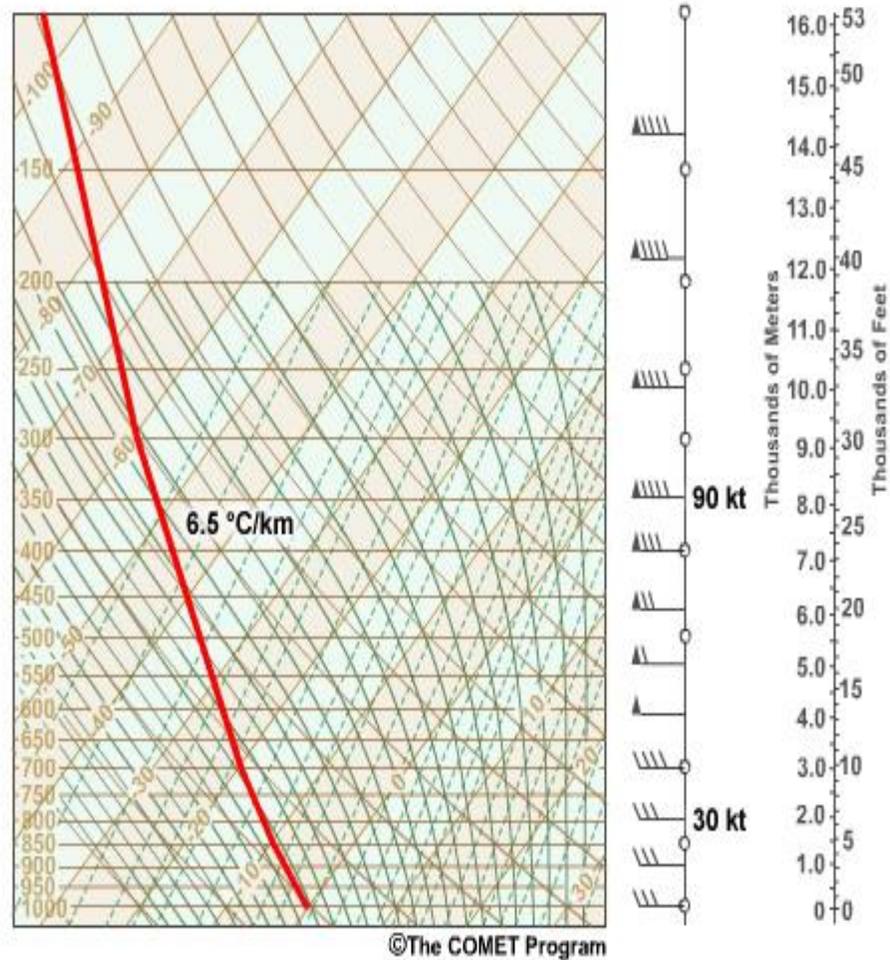




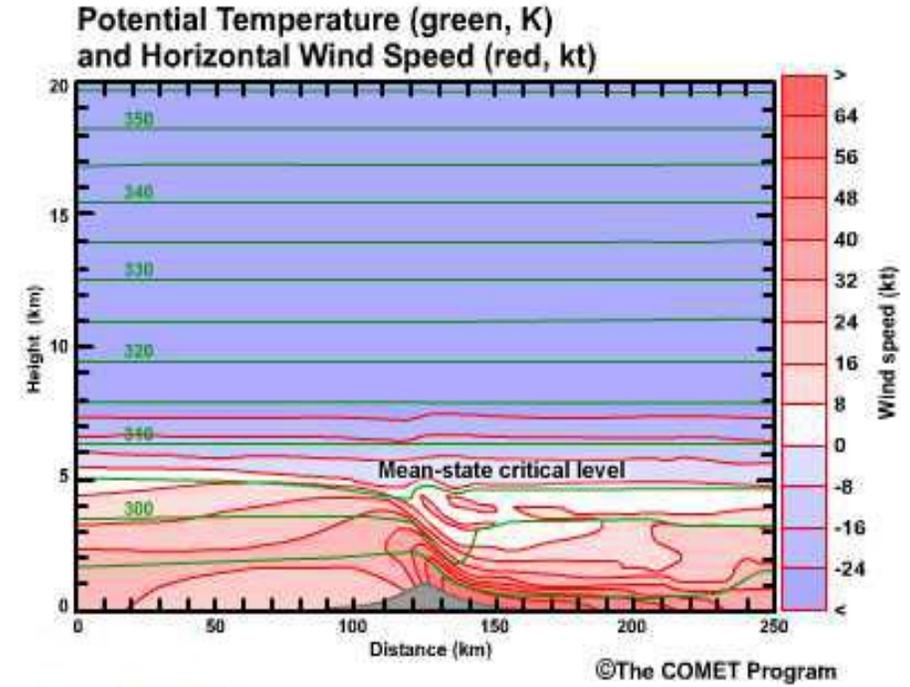
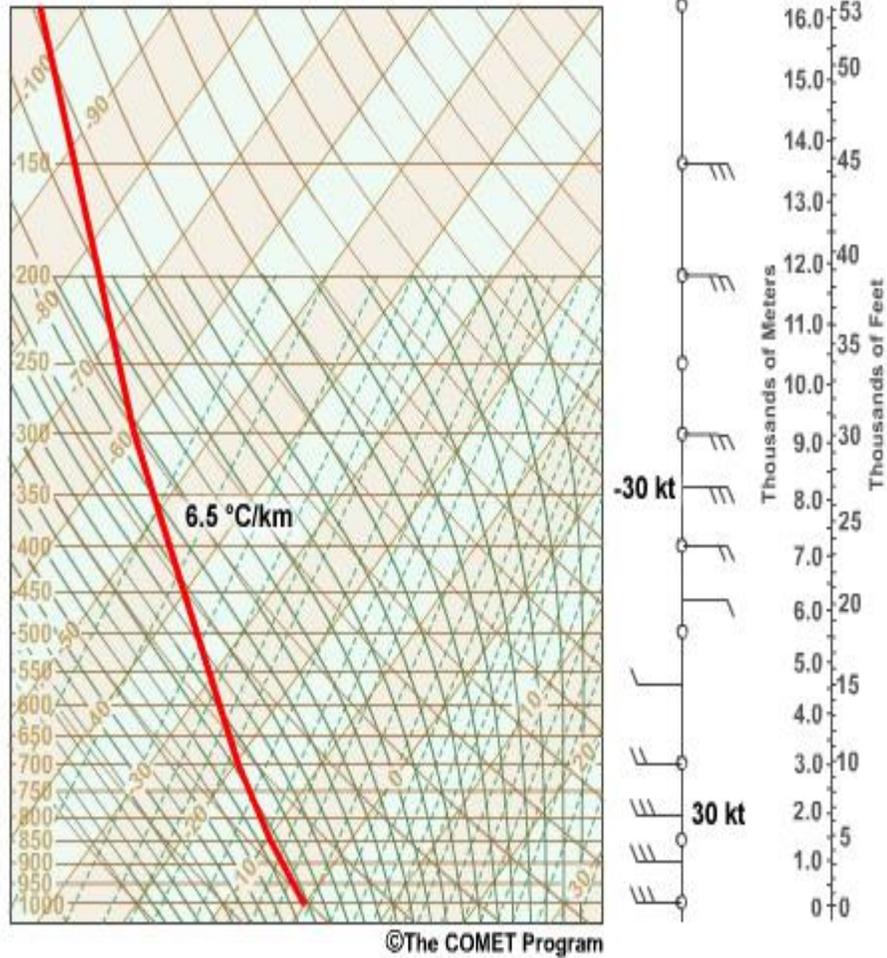
Potential Temperature (green, K)  
and Horizontal Wind Speed (red, kt)



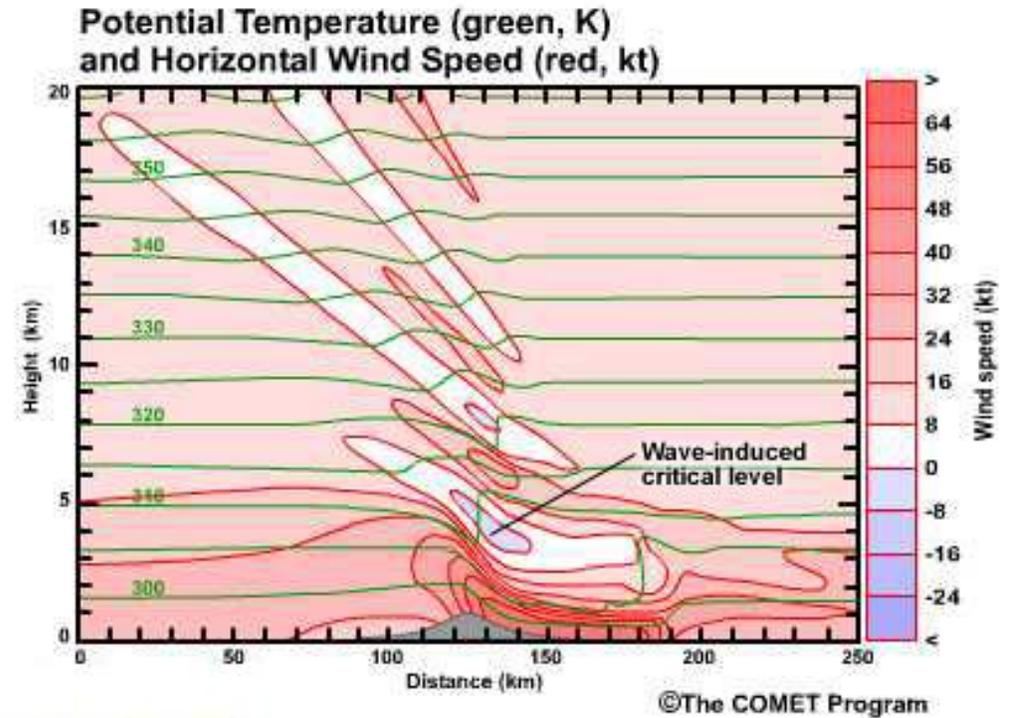
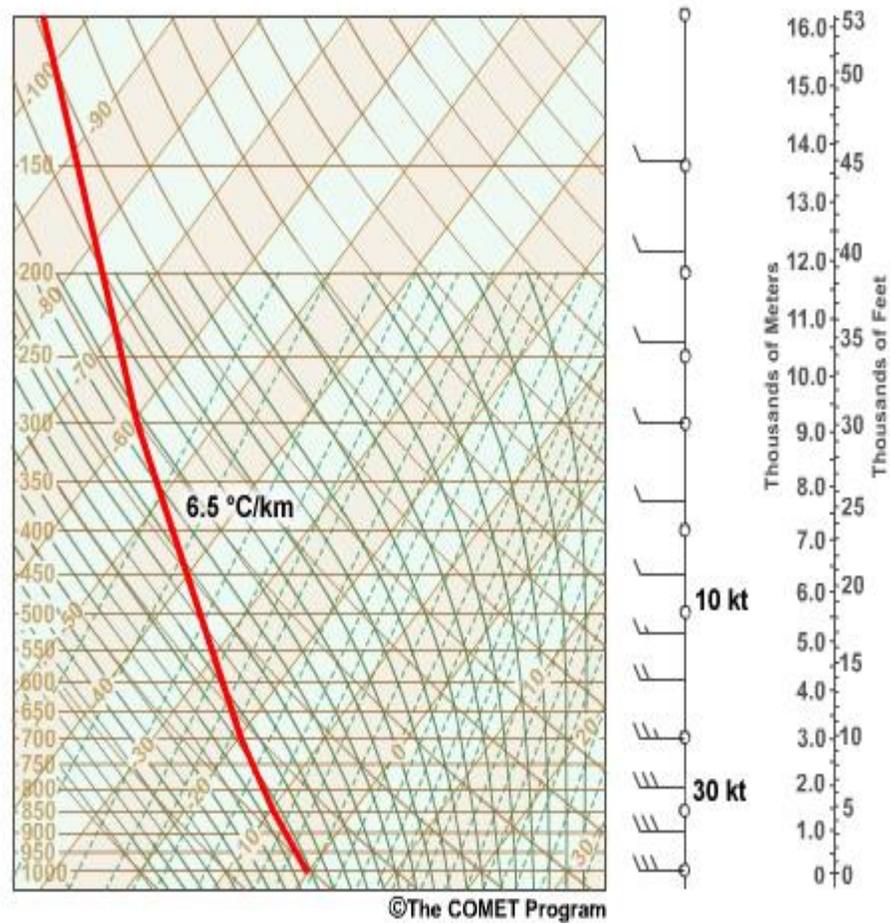
F constante con la altura.  
Ondas que se propagan verticalmente  
Nivel critico inducido a 15 km.



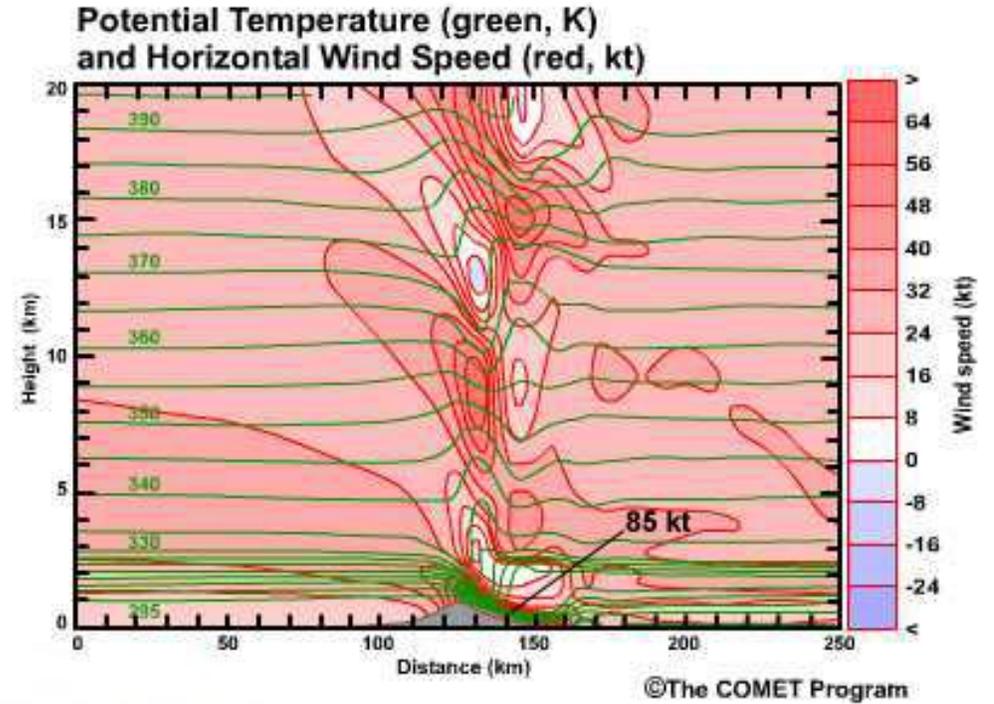
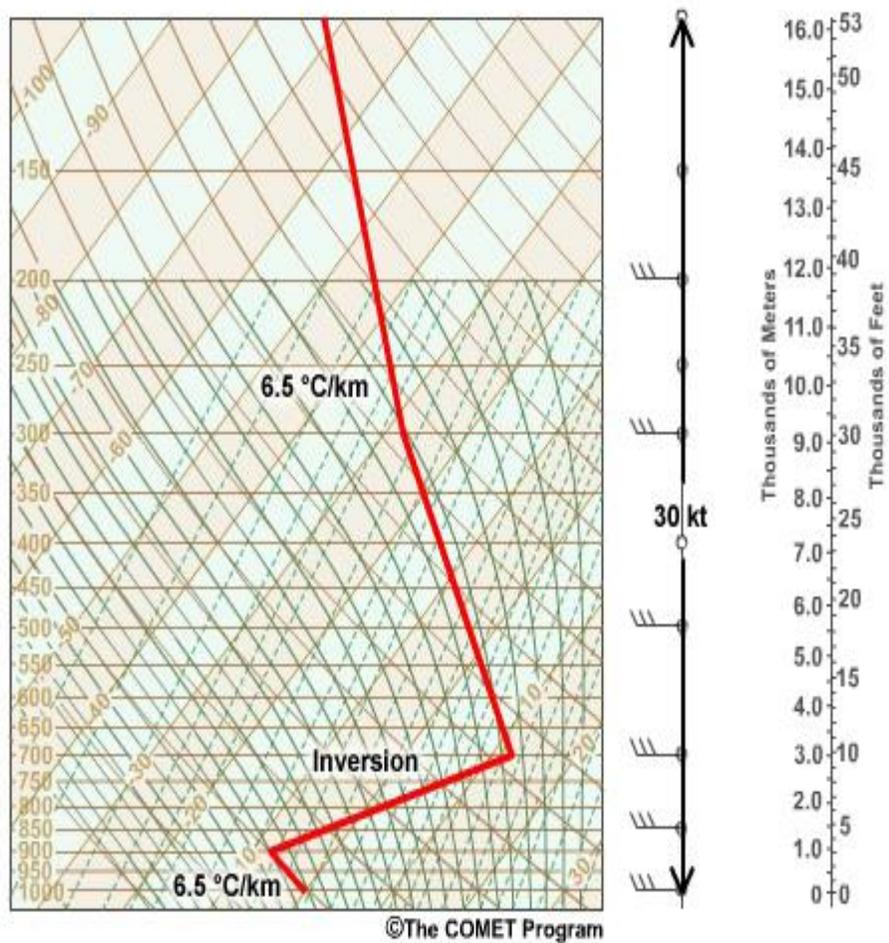
F aumenta con la altura. Ondas atrapadas  
El añadir la fuerte  $C_v$  suprime la propagación vertical y la formación de un NC. Viento en SFC a barlovento 40 kt.



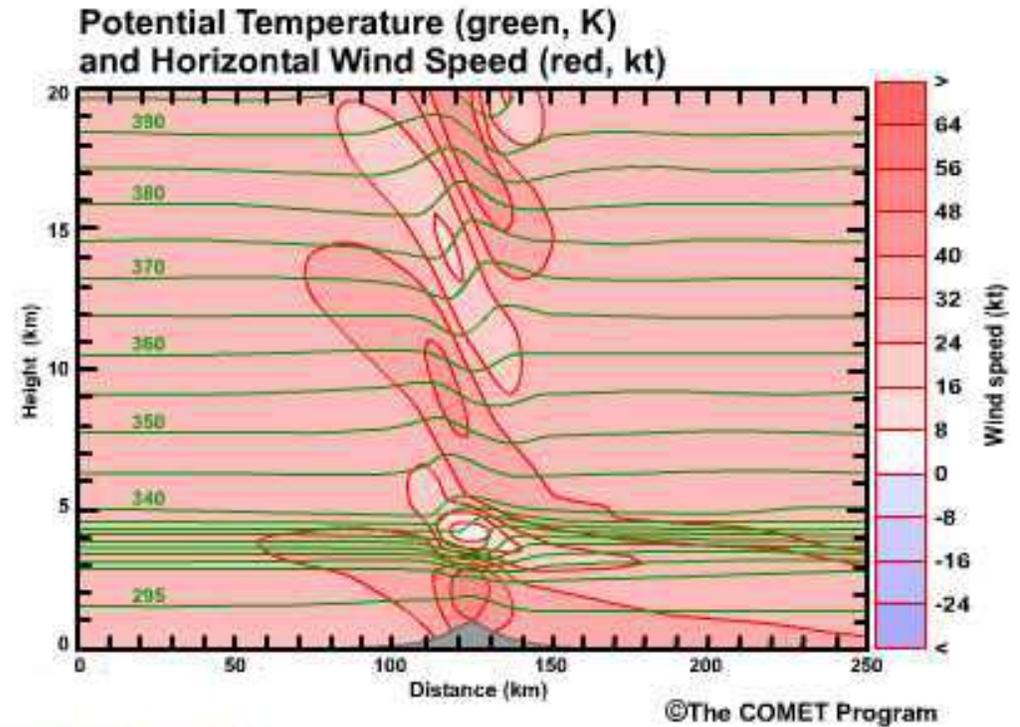
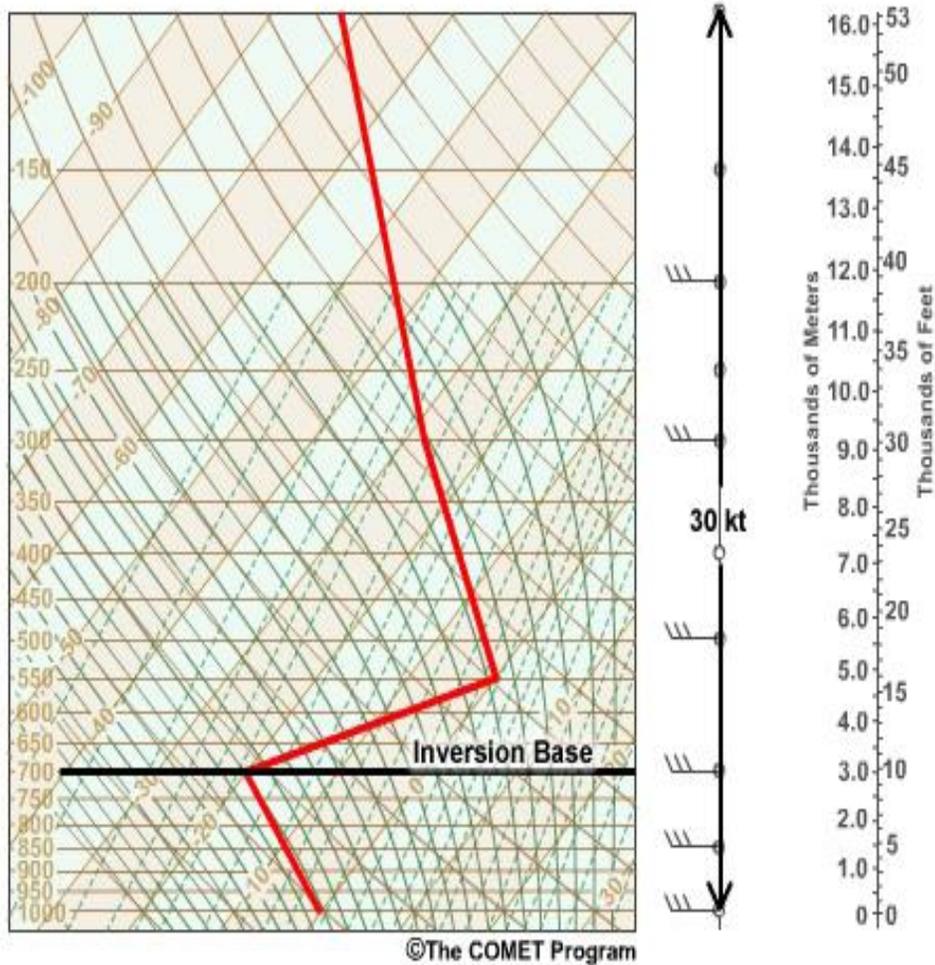
F varía con la altura  
Salto hidráulico con VLS fuertes (> 60 kt).  
Nivel crítico a 5 km.  
Inhibe la propagación por encima.



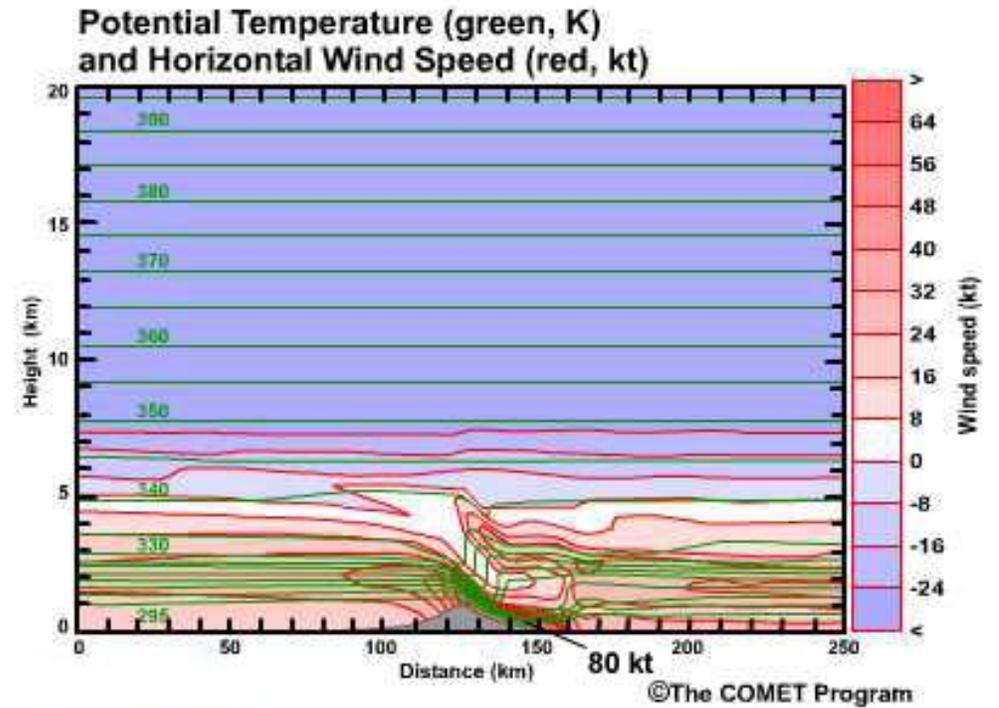
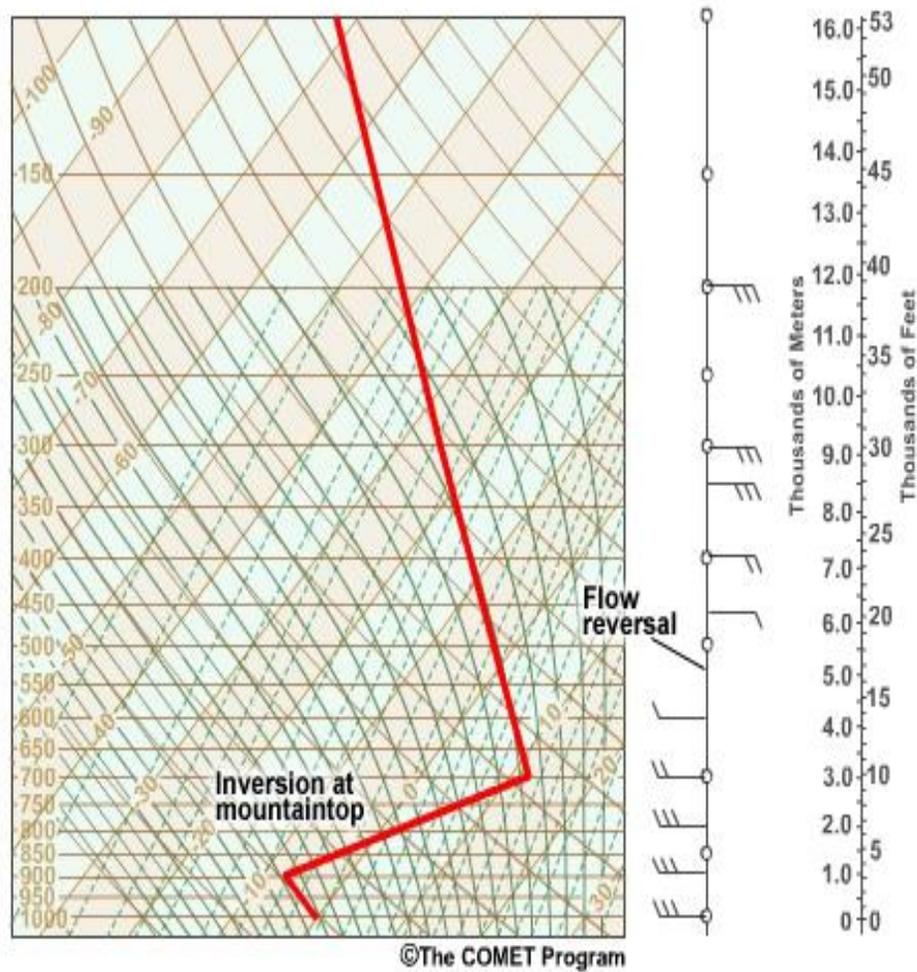
Vientos fuertes en superficie (> 63 kt)  
Nivel critico autoinducido entre 3 y 5 km  
Poca propagación vertical.



Inversión al nivel de la cima  
Esta amplifica el viento en niveles bajos.  
*Vientos descendentes de ladera* fuertes en SFC de 85 kt.



Inversión 2 km por encima de la cima.  
No inhibe la propagación vertical.  
No hay apenas aceleración del viento en SFC a sotavento 30 kt → 40 kt.



Inversión al nivel de la cima  
Fuertes *vientos de ladera*. Aumentan hasta 80 kt.

- Las ondas atrapadas se consiguen con viento fuerte aumentando con la altura.
- Hay propagación vertical excepto cuando hay ondas atrapadas o viento de sentido opuesto por encima del nivel de la montaña.
- Los vientos de ladera de sotavento son muy fuertes con cizalla. Si además hay inversión apenas los refuerzan.
- Los vientos de ladera con un pequeño incremento (30 kt a 40 kt) se consiguen con ondas atrapadas o inversión alta y viento constante con la altura.

- Si consideramos un flujo de Boussinesq bidimensional, adiabático, incompresible e irrotacional sobre unas montañas pequeñas.
- Todo queda resumido en la ecuación y el parámetro de Scorer.

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + U \frac{\partial u'}{\partial x} + V \frac{\partial u'}{\partial y} + U_z w' - f v' + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + U \frac{\partial v'}{\partial x} + V \frac{\partial v'}{\partial y} + V_z w' + f u' + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial w'}{\partial t} + U \frac{\partial w'}{\partial x} + V \frac{\partial w'}{\partial y} - g \frac{\theta'}{\bar{\theta}} + \frac{p'}{\bar{\rho} H} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p'}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{1}{c_s^2} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + U \frac{\partial p'}{\partial x} + V \frac{\partial p'}{\partial y} + \bar{\rho} f (V u' - U v') \right) - \frac{\bar{\rho}}{H} w' + \bar{\rho} \nabla \cdot \mathbf{V}' = \frac{\bar{\rho}}{c_p \bar{T}} q',$$

$$\left( \frac{\partial \theta'}{\partial t} + U \frac{\partial \theta'}{\partial x} + V \frac{\partial \theta'}{\partial y} \right) + \frac{f \bar{\theta}}{g} (V_z u' - U_z v') + \frac{N^2 \bar{\theta}}{g} w' = \frac{\bar{\theta}}{c_p \bar{T}} q',$$

$$\nabla^2 w' + l^2(z) w' = 0$$

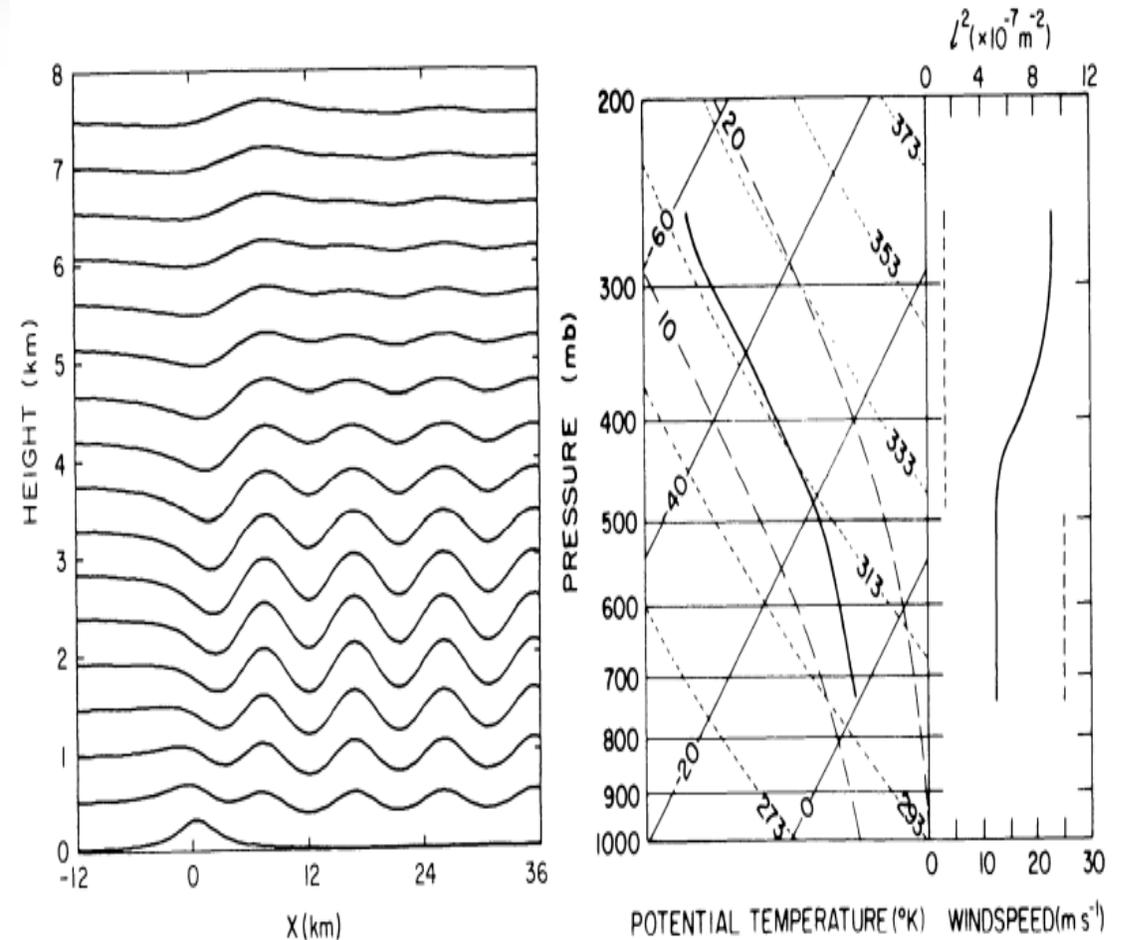
$$l^2(z) = \frac{N^2}{U^2} - \frac{U_{zz}}{U}$$

- Es la transmisividad de las ondas en la atmosfera cuando se consideran solo procesos hidrostáticos. O en otras palabras, un numero de Scorer alto indica que la onda se transmite por la atmosfera mientras que un numero bajo indica baja transmisibilidad.

- $$l^2(z) = \left( \frac{N^2}{U^2} - \left( \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \right) / U$$

- Si tenemos ondas atrapadas, el número de Scorer disminuirá a medida que aumenta la altura.
- **Esto implica:**
  - 1) La estabilidad disminuye con la altura
  - 2) El viento aumenta con la altura
  - 3) Cizalladura aumenta con la altura
- **Fenómenos que produce:**
  - 1) Probable viento fuerte en altura
  - 2) Probable cizalladura y turbulencia entre el suelo y las nubes lenticulares.

- A la izquierda vemos las líneas de corriente al atravesar una montaña con forma de campana aislada.
- A la derecha un sondeo idealizado y una representación del viento y del parámetro de Scorer (líneas a trazos).
- El resultado es un seguido de ondas atrapadas, ya que el parámetro de Scorer disminuye con la altura.





- Si el parámetro de Scorer se mantiene aproximadamente constante con la altura, tenemos propagación vertical de las ondas de montaña.
- Si el parámetro de Scorer aumenta muy ligeramente con la altura, también tenemos propagación vertical de las ondas de montaña con la altura.



- Si el parámetro de Scorer aumenta drásticamente con la altura, indica que la onda no es transmisible en la vertical, no hay suficiente estabilidad, por tanto no habrá propagación de las ondas de gravedad.



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**AEMet**  
Agencia Estatal de Meteorología

- Gracias por su atención