



GOBIERNO
DE ESPAÑA

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

Aemet
Agencia Estatal de Meteorología

PIB-M 2022



METEOROLOGÍA AERONÁUTICA 02 TURBULENCIA

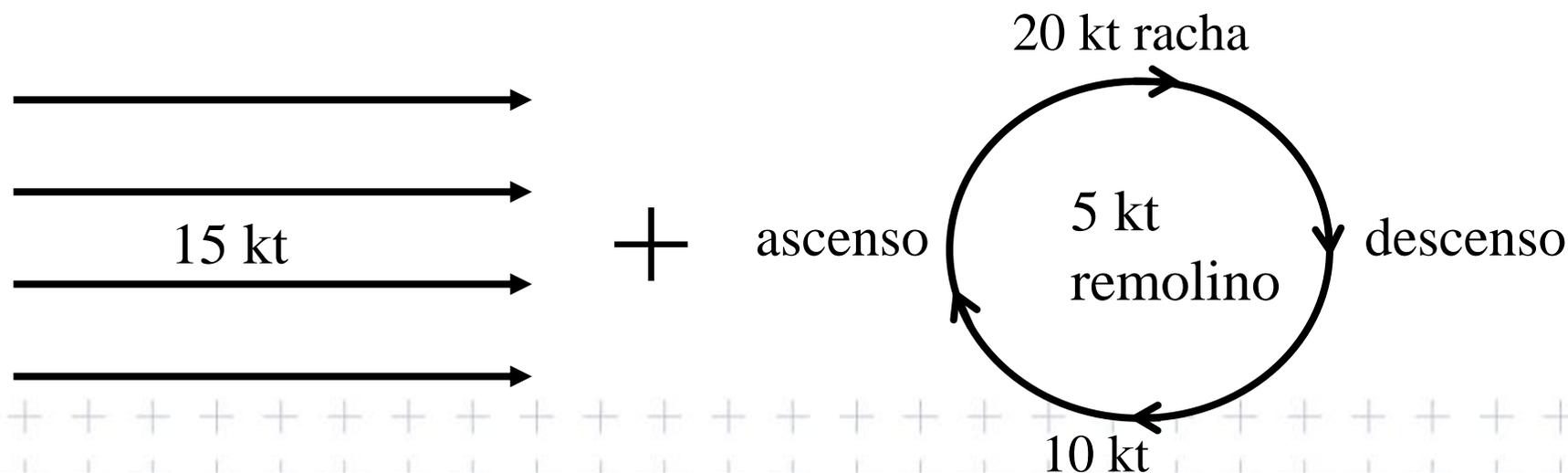
J. Manuel López Pérez
joloopezp@aemet.es

1. Objetivos
2. Introducción
3. Efectos sobre las aeronaves
4. Intensidad y sensibilidad de las aeronaves
5. Origen, mecanismos de generación y factores
6. Clasificación
7. Turbulencia de estela
8. LLT (turbulencia mecánica, orográfica y térmica)
9. Turbulencia en capas estables, frentes y circulaciones
10. Turbulencia en aire claro. Diagnóstico
11. Estimación del potencial de la TAC
12. Ondas de gravedad

- El objetivo es conocer:
 - Las diferencias entre cizalladura y turbulencia
 - Cómo evaluar la intensidad de la turbulencia
 - Los diferentes tipos de turbulencia y sus causas.
 - Qué es la turbulencia en aire claro, dónde es más probable encontrarla y que características tiene.
 - Detectar e identificar zonas probables de TAC utilizando imágenes de satélite
 - Como estimar el potencial de la turbulencia
 - Turbulencia asociada a la convección
 - Conocer las ondas gravitatorias, como identificarlas, sus orígenes y su relación con la turbulencia.

2.- INTRODUCCIÓN: turbulencia

- El régimen turbulento, contrapuesto al régimen laminar, es aquel en que la velocidad del fluido es caótica y aparentemente aleatoria.
- En la atmosfera hay ondas y remolinos aleatorios embebidos en el flujo lineal. Las componentes del remolino se añaden al flujo dando lugar a ascensos, descensos y rachas que percibimos como **turbulencia**.
- Los remolinos están inmersos en circulaciones atmosféricas de muy variadas escalas, desde la microescala (TAC, ondas de gravedad cizalladura), mesoescala (convección, onda de montaña, frentes) hasta la macroescala (corrientes en chorro, circulación general).



2.- Cizalladura y turbulencia

- La **cizalladura** se puede definir como ‘capas o columnas de aire, que fluyen con diferentes velocidades (es decir, velocidad y/o dirección) con respecto a capas o columnas adyacentes’.
- La cizalladura del viento es un peligro importante para la aviación, especialmente cuando se opera a niveles bajos. Incluso cuando se vuela dentro de una capa con un flujo laminar y el vuelo es suave y sin incidentes, el cruce repentino de los límites entre las diferentes corrientes laminares acelerará el avión en mayor o menor grado.
- Dependiendo de la dirección de vuelo en relación con los cambios de velocidad, la cizalladura puede sentirse como una turbulencia, pero también como un viento súbito de cola o de cara.
- Además de la convección, la cizalladura es la segunda fuente principal de turbulencia. La dinámica básica de fluidos nos dice que cualquier fluido, como la atmósfera, puede soportar solo un máximo de cizalladura entre las capas de flujo laminar antes de descomponerse en flujo turbulento. Algunos aviones son más susceptibles a los efectos de las turbulencias que otros.
- La **turbulencia** es uno de los fenómenos meteorológicos más difíciles de predecir y de mayor importancia para los pilotos. Es un movimiento irregular del aire que resulta de remolinos y corrientes verticales.

2.- Turbulencia aeronáutica

- **Turbulencia aeronáutica:** es parte del espectro de la turbulencia atmosférica que puede afectar al comportamiento de la aeronave (por tanto, aquella que podemos apreciar) y solo la consideramos si tiene intensidad moderada o fuerte.
- Depende del tamaño de la aeronave, ya que los remolinos que más le afectan son los de un tamaño similar al de la aeronave, (entre 15 y 100 m), de la velocidad del avión (cuanto mayor es la velocidad, más remolinos atraviesa) y del tipo de aeronave. Si los remolinos son regulares (solo en niveles altos) puede producirse resonancia.
- Se define como cualquier variación en la dirección o intensidad del viento capaz de modificar los parámetros de vuelo y generar aceleración vertical u horizontal de la aeronave. Luego, estaría causada por marcados cambios en la velocidad y/o dirección del viento, tanto en la horizontal como en la vertical, es decir, por **cizalladura intensa**.

Frecuentemente, la turbulencia se presenta en áreas sin nubes de manera que los pilotos pueden estar desprevenidos.

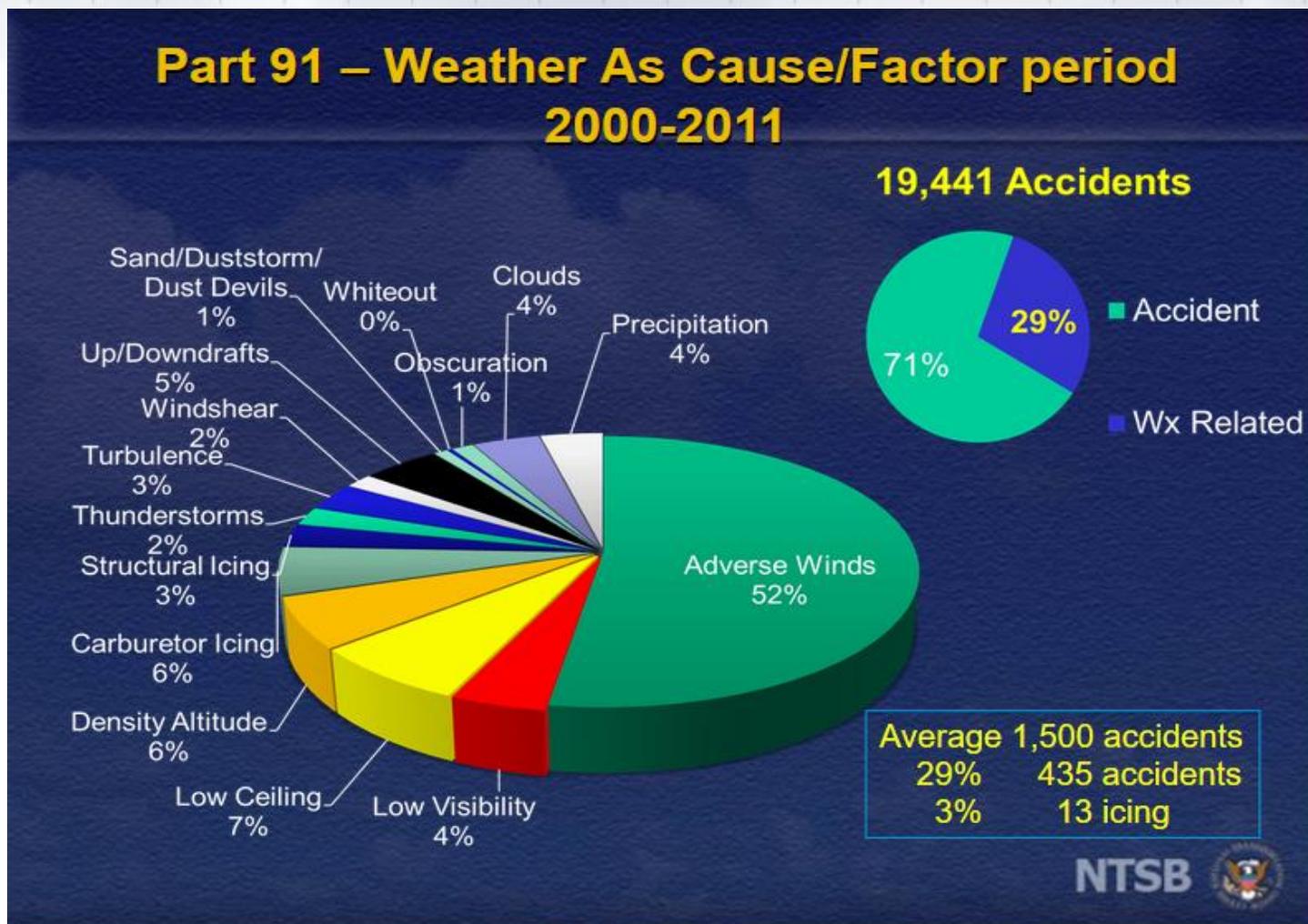
Pilotos:

- Confort de los pasajeros y tripulación
- Lesiones en la tripulación y los pasajeros (10.000 heridos media anual)
- Aumento del consumo de combustible: tratando de mantener el nivel de vuelo y/o evitando las regiones de turbulencia.
- Potenciales daños estructurales de la aeronave.
- Preocupación del impacto durante el aterrizaje.
- Pérdida de control de la aeronave.

Controladores aéreos:

- Incremento de la distancia entre los aviones
- Congestión en las pistas del aeropuerto.

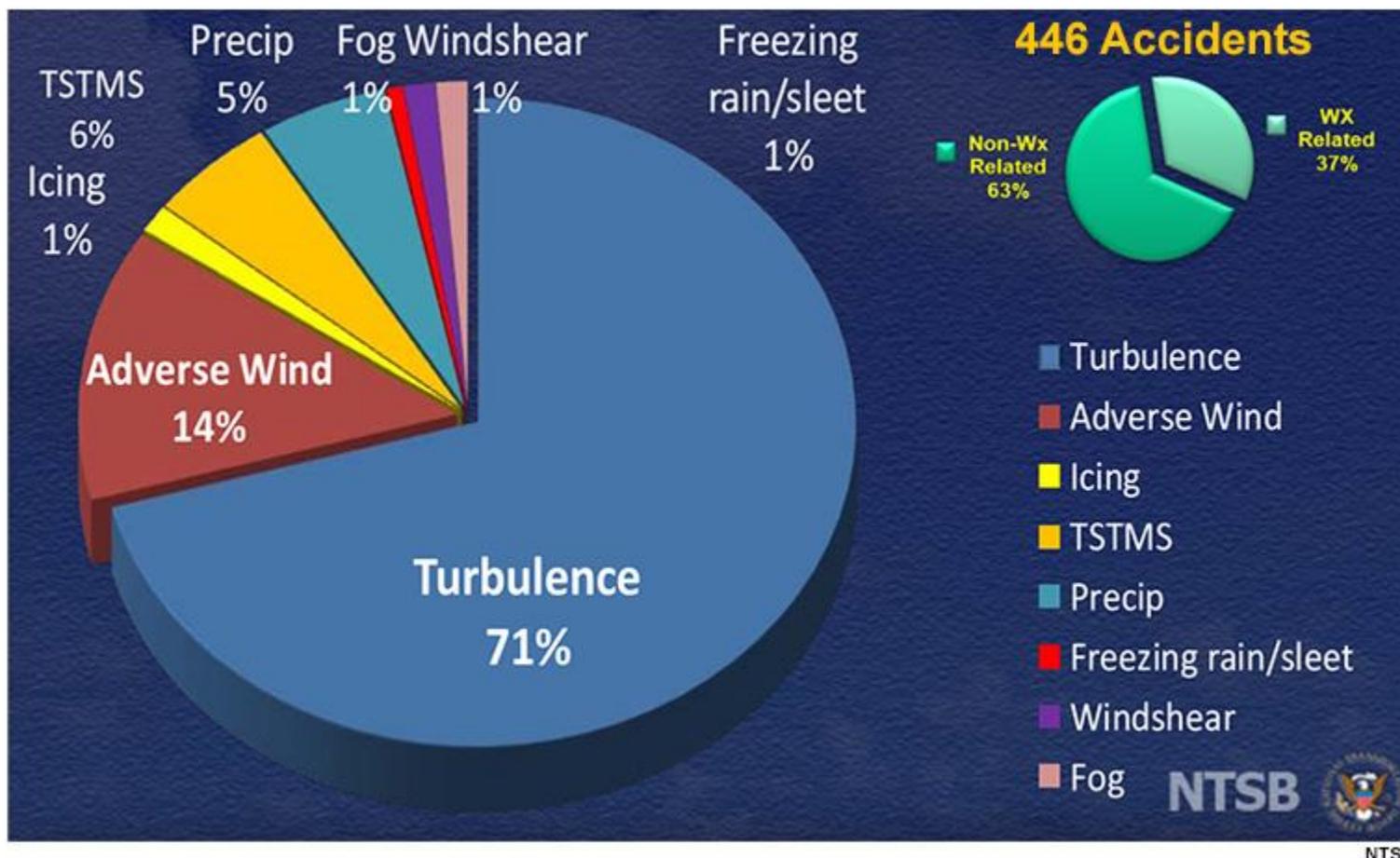
3.- EFECTOS SOBRE LAS AERONAVES



La aviación general acumula el 51 % del tiempo de vuelo y el 97 % de los accidentes con fallecidos. La mayoría de estos accidentes ocurren volando en condiciones de vuelo instrumental (IFR). La tasa de accidentalidad es de 6,78 para 100.000 horas de vuelo. Causas de accidente en la Aviación General. Fuente: NTSB Turbulence Related accidents & incidents

3.- EFECTOS SOBRE LAS AERONAVES

Weather-Related Cause/Factors of U.S. Airline Accidents 2000-2011



En cambio en la aviación comercial (Part 121), que incluye tanto aerolíneas comerciales como regionales, en el período 2000-2011 el 37 % de los accidentes estuvo relacionado con la meteorología y la principal causa meteorológica de accidentes fue la turbulencia con el 71 % del total. Causas de accidente en la Aviación Comercial. Fuente: NTSB Turbulence Related accidents & incidents

4.- INTENSIDAD Y SENSIBILIDAD

ESCALA OACI

TIPO	FAS (kt)	AV (g)	VV	n	EDR	EFEKTOS
Ligera (Light)	5 a 14	0,05 a 0,2	200-600 ft/m 1 a 3 m/s	0,8 a 1,2	0,1 a 0,4	Avión: sin cambios de altitud Objetos: desplazados ligeramente Pasajeros: sin molestias.
Moderada (Moderate) 	15 a 25	0,2 a 0,5	600-2000 ft/m 3 a 10 m/s	0,5 a 1,5	0,4 a 0,7	Avión: cambios bruscos controlados Objetos: se desplazan Pasajeros: presión contra cinturones
Fuerte (Severe) 	➤ 25	0,5 a 1,5	2000-5000 ft/m 10 a 25 m/s	0 a 2	> 0,7	Avión: cambios bruscos de altitud Objetos: lanzados violentamente Pasajeros: zarandeados violentamente
Extrema (Extreme)	➤ 25	> 1,5	> 5000 ft/min 20 a 65 m/s			Avión: muy difícil mantener el control Puede sufrir daños estructurales

FAS	Fluctuación velocidad del aire. $AS=GS+SPD$ (donde GS es la velocidad respecto al suelo y SPD el viento)
AV	Aceleración vertical.
VV	Velocidad Vertical
n	Factor de carga $n = L/W$, relación entre la sustentación y el peso del avión. Si está equilibrado es $n=1$.
EDR	EDDY DISSIPATION RATE ($m^{2/3}s^{-1}$): tasa de disipación de la energía cinética de la turbulencia. Es independiente del tipo de avión y de su velocidad. Solo depende de la atmosfera.

Turbulencia ligera: AS de 5 a 14 kt con una racha vertical de 5 a 19 pies/s.

Aparece en las siguientes situaciones:

- En niveles bajos, en terrenos accidentados cuando el viento > 15 kt
- En zonas montañosas, aparece incluso con vientos débiles
- En y cerca de los cúmulos
- Cerca de la tropopausa

Turbulencia moderada: AS de 15 a 24 kt con una racha vertical de 20 a 35 pies/s

Aparece en las siguientes situaciones:

- En niveles bajos, en terrenos accidentados cuando el viento > 25 kt.
- En ondas de montaña, hasta 500 km a sotavento de la cresta con vientos perpendiculares a la barrera montañosa > 50 kt.
- En onda de montaña, hasta 250 km a sotavento de la cresta y a 5000 pies sobre la tropopausa cuando el viento perpendicular está entre 25 y 50 kt.
- En torrecúmulos -TCU- y cumulonimbos.
- A 200 km del eje de la corriente en chorro, en el lado frío (izquierdo).
- En áreas de ciclogénesis, cuando la baja se profundiza a < 1 hPa/h.

¿Dónde suele aparecer la turbulencia?



GOBIERNO
DE ESPAÑA

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

AEMET
Agencia Estatal de Meteorología

Turbulencia fuerte o severa: $AS \geq 25$ kt con una racha vertical de 36 a 49 pies/s.

Aparece en las siguientes situaciones:

- En onda de montaña, hasta 200 km a sotavento de la cresta y en los 5000 pies en torno a la tropopausa cuando el viento \perp a la cordillera excede los 50 kt.
- En ondas de montaña, hasta 100 km a sotavento de la cresta si los vientos perpendiculares a la barrera montañosa son de 25 a 50 kt.
- En y cerca de las tormentas maduras.
- En las corrientes en chorro, de 100 a 200 km de distancia del eje en el lado frío
- En áreas de ciclogénesis rápidas cuando la baja se profundiza > 1 hPa/h.

Turbulencia extrema: $AS \geq 25$ kt con una racha vertical > 50 pies/s .

Aparece en las siguientes situaciones:

- En tormentas severas, especialmente en líneas de turbonada.
- En onda de montaña, cerca de la nube rotor.

Los niveles de intensidad de la turbulencia varían según el tipo de aeronave. Se dividen en 4 categorías, donde la más habitual es la segunda. Los factores relacionados con las aeronaves que contribuyen a la turbulencia son:

- Es **directamente** proporcional a la **velocidad** de la aeronave.
- Es **inversamente** proporcional al **peso** de la aeronave.
- Es **directamente** proporcional a la **longitud de las alas**.
- **Ángulo de las alas** en relación con el fuselaje. Configuración “Delta” es menos susceptible.

Los valores de la turbulencia se incrementan con el aumento de la velocidad del aire y el área del ala y disminuye al aumentar el peso del avión y con la densidad del aire (incremento de altitud). En aviones como el Airbus 380, su peso lo protege de la turbulencia, pero la longitud de las alas lo puede hacer susceptible.

6.- CLASIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA



GOBIERNO DE ESPAÑA

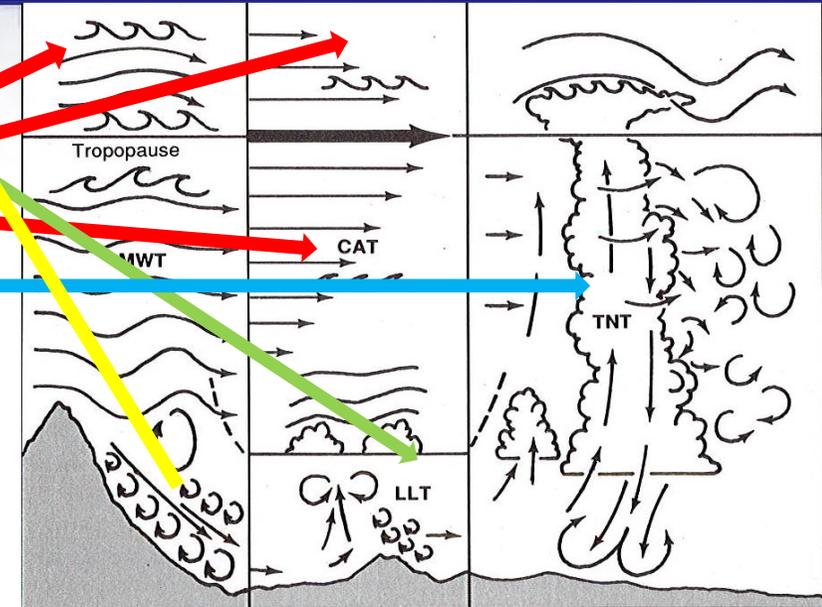
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

AEMET
Agencia Estatal de Meteorología

1. Turbulencia de niveles bajos (LLT).
2. Turbulencia de onda de montaña (MWT).
3. Turbulencia en aire claro (CAT).
4. Turbulencia asociada a tormentas (TNT)

En la turbulencia de niveles bajos, según la causa, podemos distinguir varios tipos:

1. Turbulencia de estela
2. Turbulencia mecánica
3. Turbulencia orográfica
4. Convección seca. Térmicas.
5. Capas estables
 - a. Inversión nocturna
 - b. Capas estables elevadas (brisa/valle)
 - c. Frentes.
6. Circulaciones de mesoescala:
 - a. Chorros de niveles bajos (LLJ)
 - b. Frentes costeros y de brisa.



De P. Lester, "Turbulence – A new perspective for pilots,"



Turbulencia, KH

Factores que aumentan la probabilidad de turbulencia:

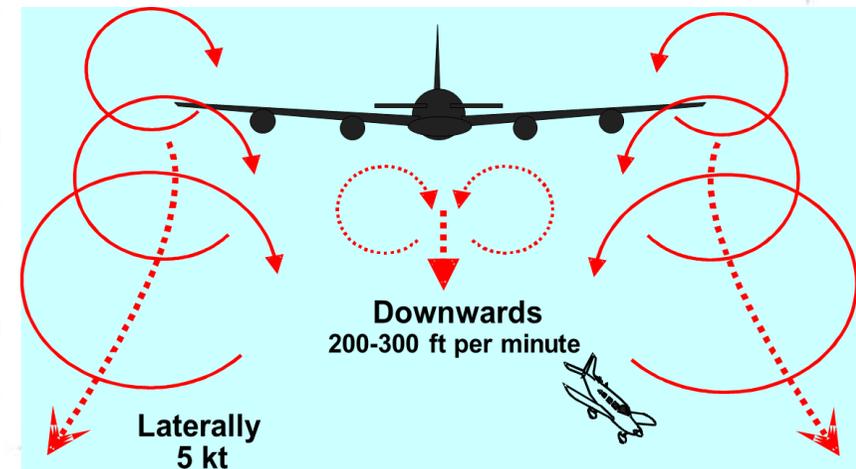
- *Corrientes en chorro en altura.*
- *Gradiente de temperatura horizontal y vertical.*
- *Cizalladura horizontal y vertical (C_H y C_V)*
- *Ondas de gravedad*
- *Terreno abrupto*

Áreas donde se puede esperar turbulencia:

- *Zonas con cizalladura horizontal y vertical.*
- *Áreas con advección de temperatura.*
- *Corrientes en chorro confluentes.*
- *Áreas de divergencia en altura.*
- *Bajas cerradas.*
- *Áreas con ciclogénesis.*
- *Dorsales/vaguadas estrechas.*
- *Dorsales/vaguadas inclinadas.*
- *En niveles bajos, cerca de o sobre las montañas.*

7.- TURBULENCIA DE ESTELA

- Es el único tipo de turbulencia que no tiene un origen meteorológico.
- Se produce cuando un avión encuentra vórtices de otro avión que le precede.
- Cada avión genera dos vórtices contrarotantes en las puntas de las alas que permanecen en la estela de la aeronave.
- Las estelas que se forman a la salida de los motores se incorporarán a los vórtices de las puntas de las alas. Por lo tanto, detrás del avión, a partir de cuatro estelas de los motores y puntas de ala, solo quedan dos.
- Los helicópteros también producen turbulencia de estela, con vórtices generados a partir de las palas del rotor principal.
- Los controladores tienen que tenerla muy en cuenta a la hora de ordenar los vuelos y los aterrizajes en los aeropuertos.

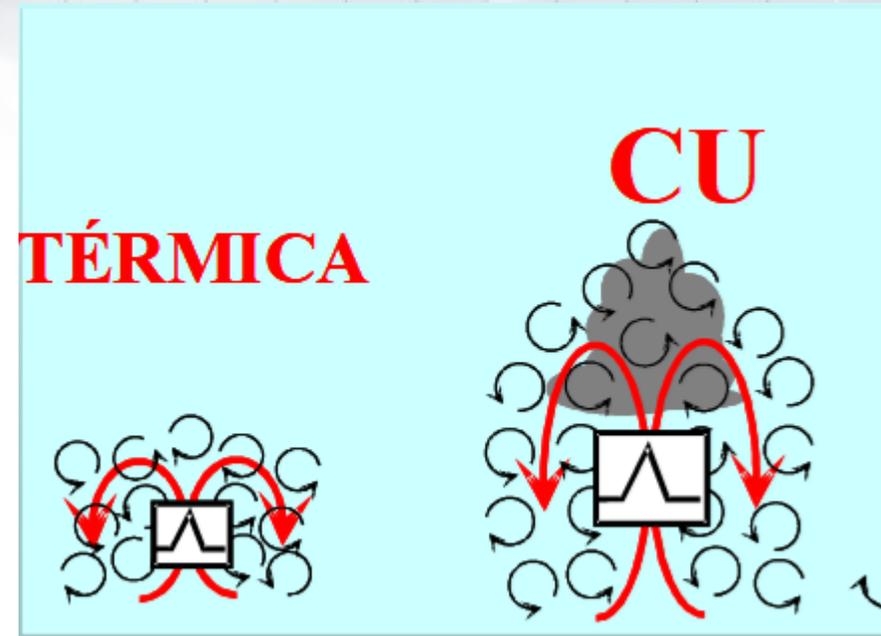


- Se origina por el rozamiento entre el viento y la superficie terrestre.
- Es una colección de remolinos los cuales producen rachas verticales y horizontales de viento.
- Tanto la intensidad de las rachas como el espesor de la capa turbulenta están relacionados con la velocidad del viento y la estabilidad.
- Con vientos fuertes, en llano, la racha máxima suele ser 1.4 veces el viento. Al factor **1.4** se le denomina **factor de racha** y aumenta con vientos débiles.
- En terreno montañoso el factor más habitual es **2.0**.
- El espesor de la capa turbulenta aumenta con la velocidad del viento y es máxima en SFC y mínima en el tope de la capa.

Racha del viento en superficie (kt)	Espesor de la capa turbulenta (pies AGL)
30 a 39 kt	Superficie a 2000 pies
40 a 49 kt	Superficie a 2000-3000 pies
Superior a 49 kt	Superficie a 3000-5000 pies

*Estimación del espesor de la capa de turbulencia basada en el valor de las rachas en superficie sobre terreno llano.
Fuente: Lester.*

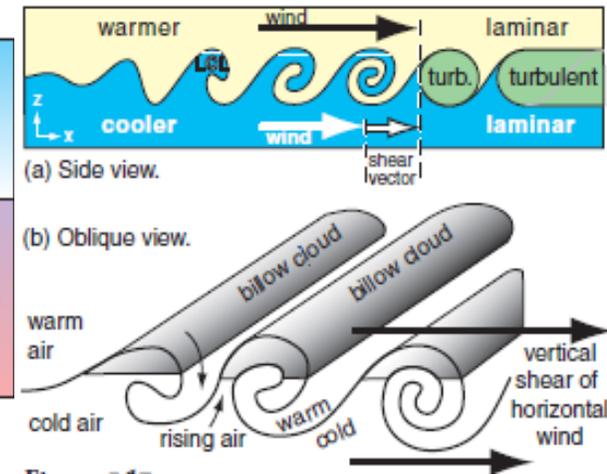
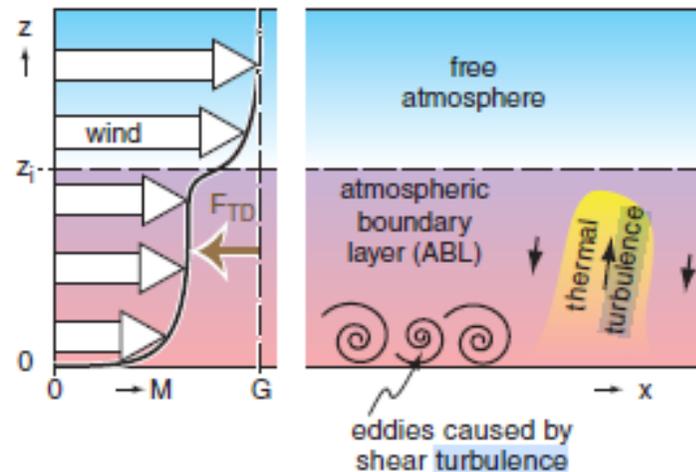
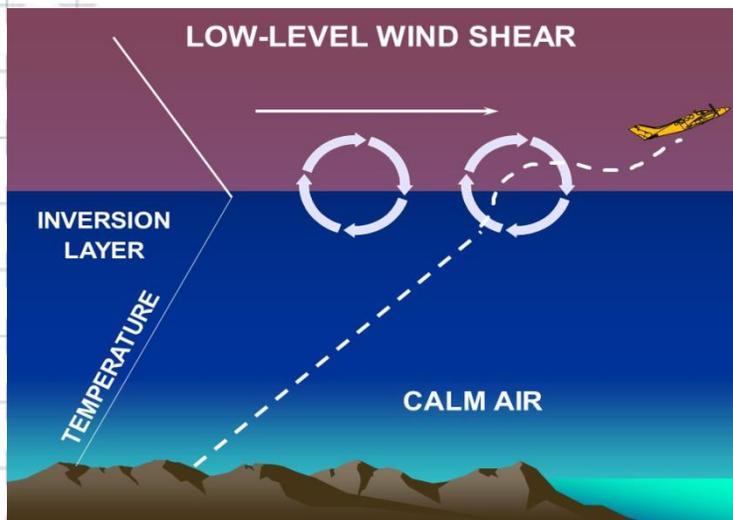
- La convección seca (con cielo despejado o cúmulos de buen tiempo) se desarrolla en la capa límite (ABL).
- Los cúmulos se forman en las zonas de ascenso de las burbujas de aire calentado en contacto con el suelo (térmicas).
- Las térmicas se forman en la capa superficial de la ABL, crecen y se desarrollan en la capa adiabática y finalizan en la capa estable superior.
- Se forman líneas de nubes conocidas como “**calles de nubes**” separadas por una distancia de 3 a 5 km. La **turbulencia térmica sobre tierra tiene una marcada variación diurna, con un máximo durante la tarde y noche y un mínimo por la mañana.**



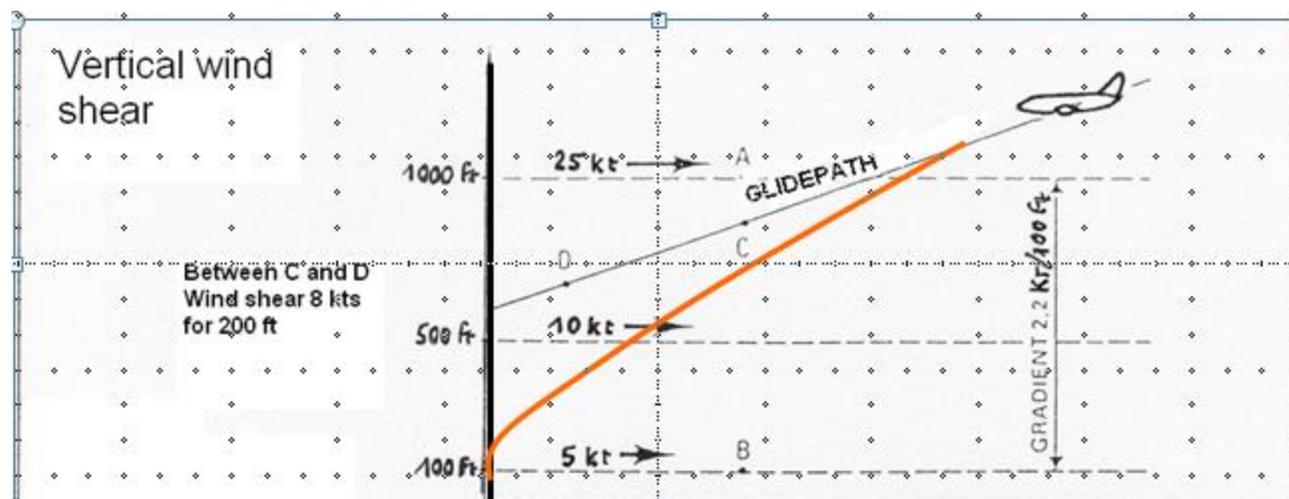
En general, la intensidad de la turbulencia en la capa adiabática va desde débil a débil a moderada con rachas verticales de 200 a 400 pies por minuto y valores extremos de 1000 a 2000 pies por minuto.

Capas estables: inversión nocturna

- Una **capa estable**, como la capa límite ABL, proporciona un entorno favorable para el desarrollo de **cizalladura vertical** ya que resiste la mezcla vertical.
- La ABL se estabiliza cuando el suelo se enfría más que la capa de aire situada encima (enfriamiento radiativo nocturno). Un importante **efecto de la extrema estabilidad de la inversión nocturna** es la tendencia general de la **cizalladura vertical a incrementarse**.
- Los vientos en el tope de la inversión se aceleran y a la vez los vientos en superficie disminuyen (al no transmitirse verticalmente el rozamiento) → aumenta la C_V .
- Si la C_V es suficientemente grande se pueden desarrollar **ondas de gravedad-cizalladura**.
- Parecen similares a ondas oceánicas rompiendo en la playa. La C_V causa que la cresta se adelante y superponga al surco de la onda volcando. En la atmosfera el proceso dura unos minutos y genera turbulencia intermitente en la capa estable.



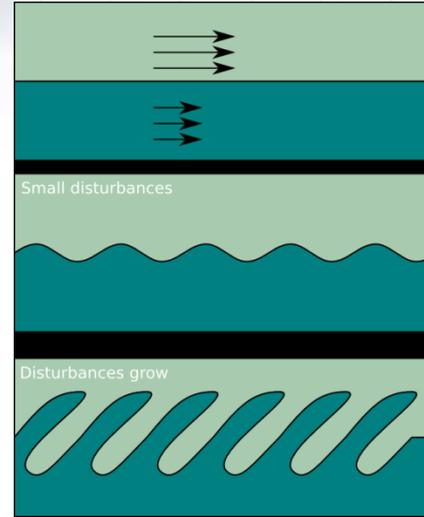
- La cizalladura en la capa límite tiene dos importantes impactos en el vuelo:
- Causar turbulencia esporádica en parches por amplificación y rotura de ondas de g-c.
- Originar cizalladura de niveles bajos (LLWS) que es crítica en los despegues y aterrizajes en la senda de aproximación a menos de 1600 pies del suelo. Si el piloto encuentra cizalladura en la aproximación y falla en ajustar la rápida:
 - disminución del viento de cara (o incremento de cola) → velocidad respecto al aire disminuye → el avión se quedará corto en el aterrizaje
 - aumento del viento de cara (o disminución de cola) → velocidad respecto al aire aumenta → el avión excederá la pista.



Aproximación con C_V que origina disminución del viento de cara y desvío de la senda de aproximación (aterrizaje corto) . Fuente: EUMETCAL

Inestabilidad de K-H

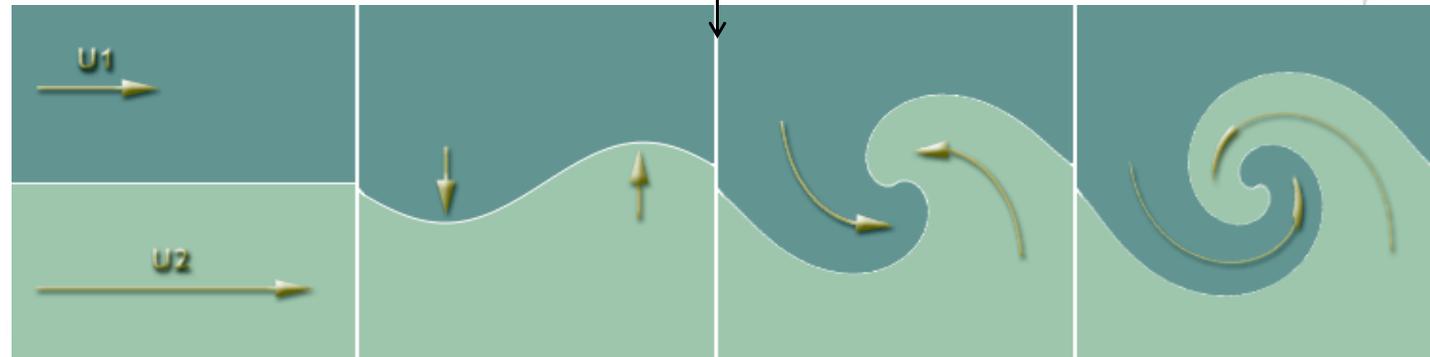
- La inestabilidad de Kelvin-Hemholtz (K-H) ocurre cuando existe C_V en la interfaz de dos fluidos o dentro de un fluido continuo.
- Aparecen los “billows” o nubes de marea.



$$\leftarrow \frac{\partial v}{\partial z} > 0$$



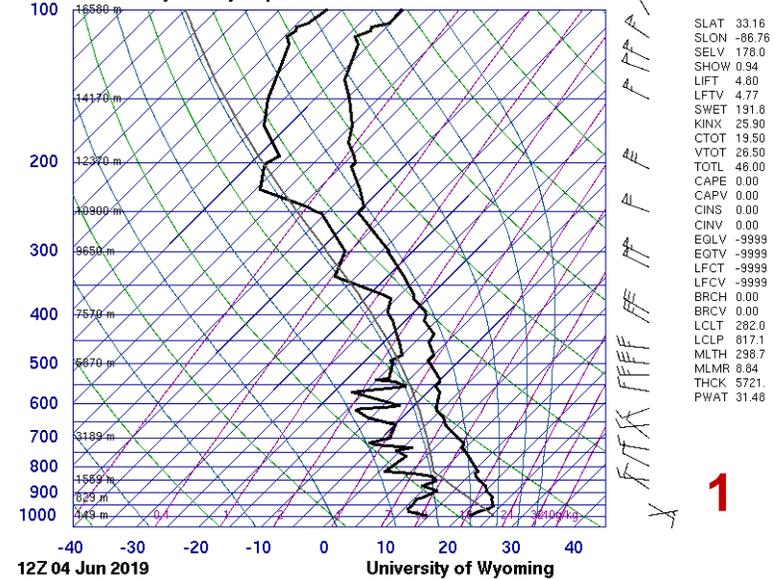
$$\frac{\partial v}{\partial z} < 0$$



Inestabilidad KH-billows

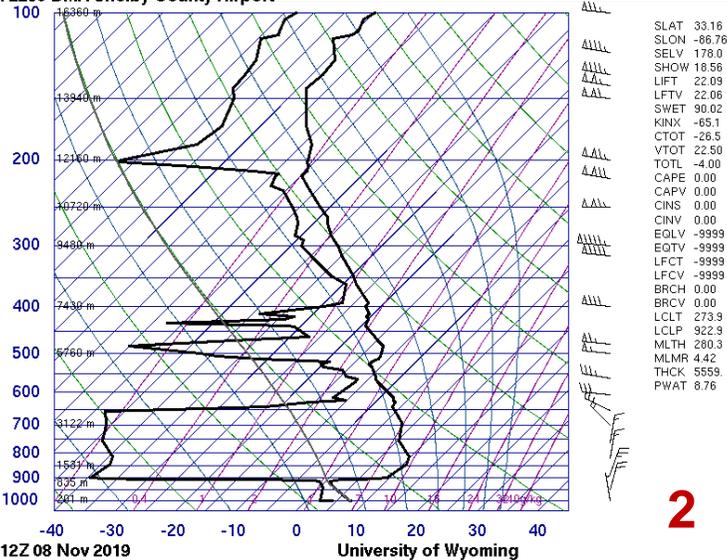


72230 BMX Shelby County Airport



12Z 04 Jun 2019

University of Wyoming

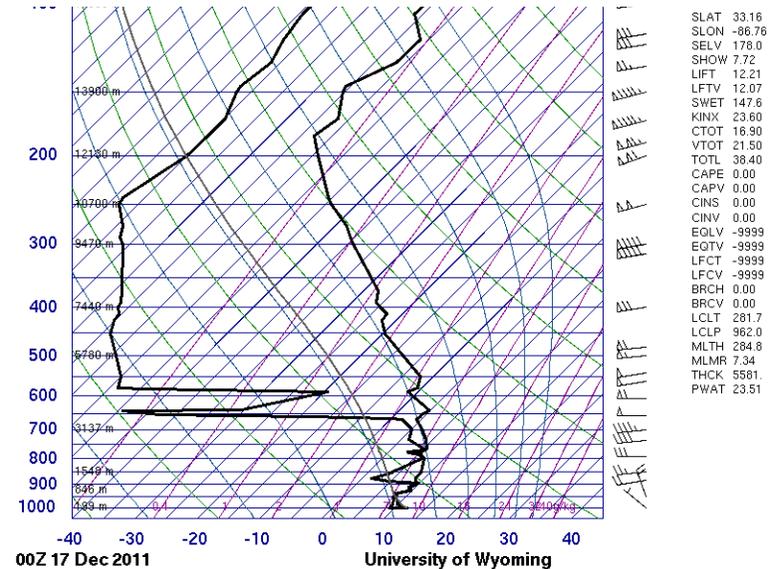


12Z 08 Nov 2019

University of Wyoming

00Z 17 Dec 2011

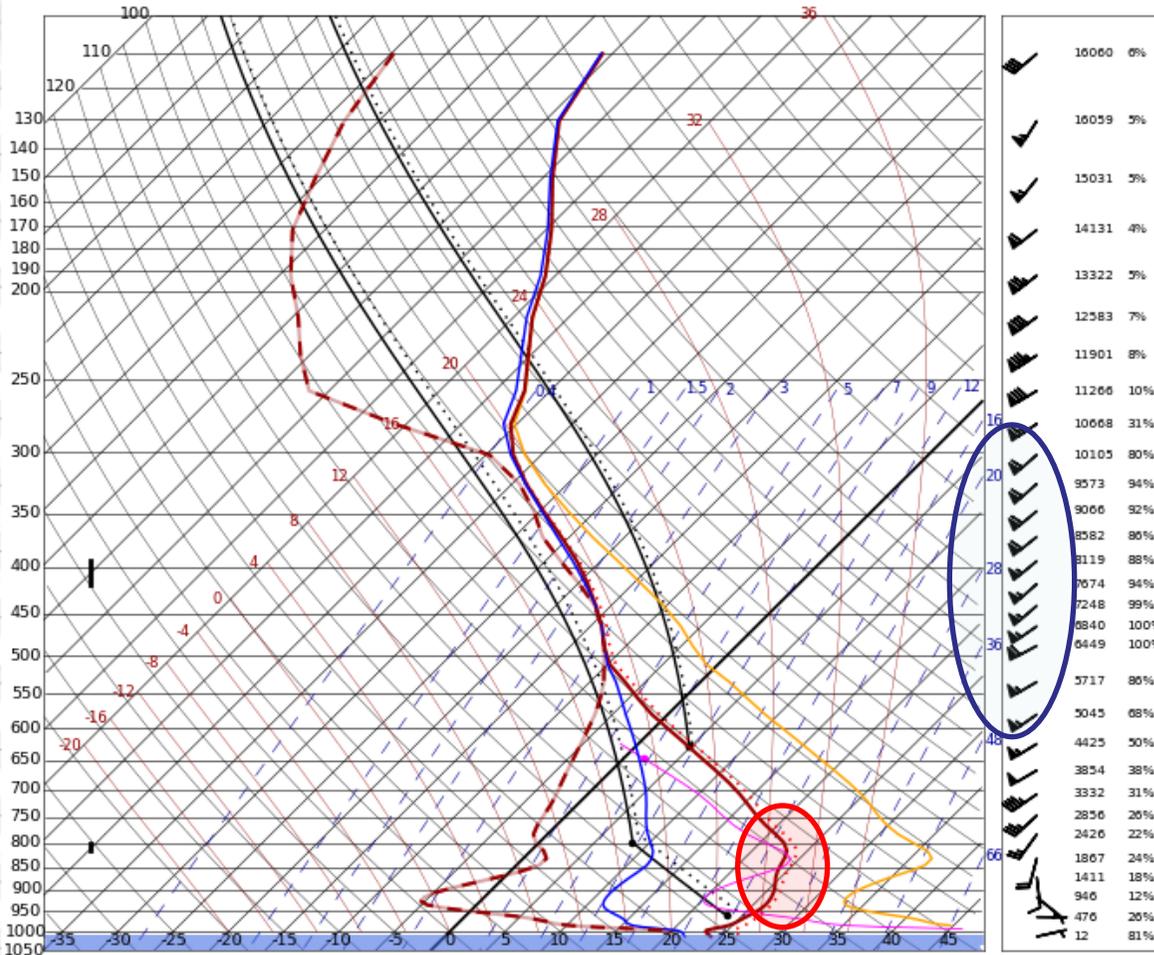
University of Wyoming



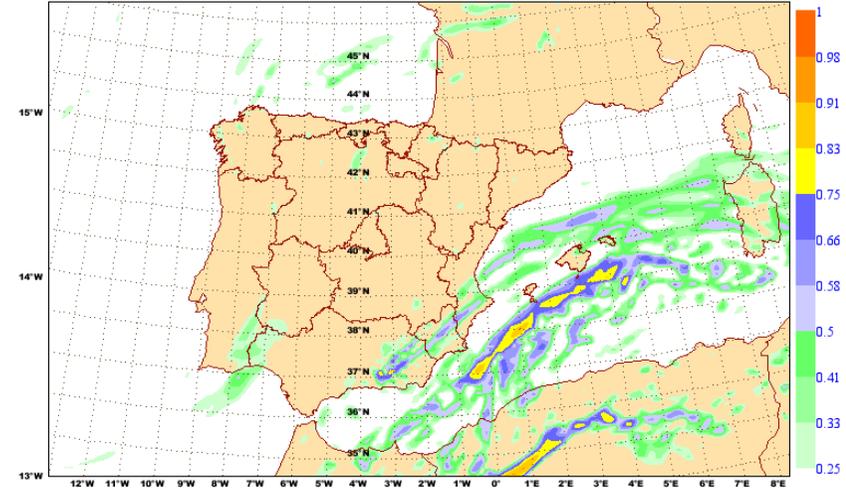
00Z 17 Dec 2011

University of Wyoming

Capas estables elevadas



CE (0.125°) 20180704 a 00 UTC. H+006. Validez: miércoles, 04 de julio de 2018, a 06 UTC.
 TURBULENCIA NORMALIZADA DEBIDA AL INDICE T11
 Nivel FL090



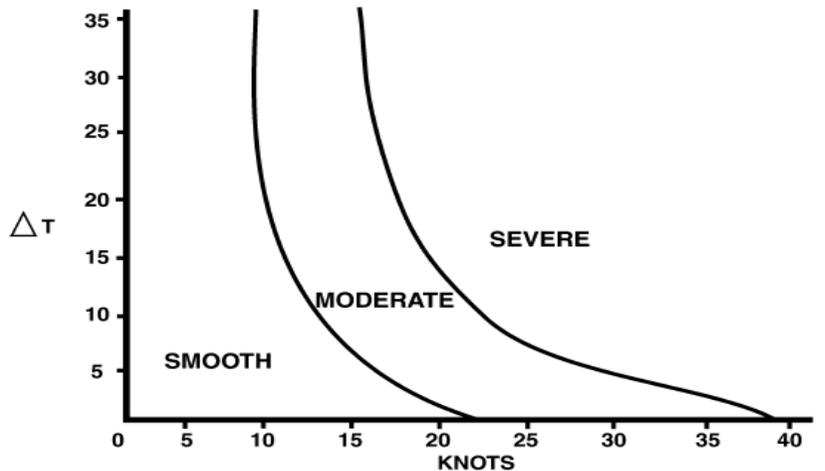
CAPES
 CAPE 860.9
 CIN 852.2
 SBCAPE 860.9
 SBCIN 852.2
 Temperatura virtual
 NE
 NCL
 NCA 782.6
 TNCA 8.2
 NCC 623.2
 TCC 4.8
 TDIS 46.2
 CAPE3
 CAPE
 CIN

T₀
 T₁₀₀
 T₂₀₀
 T₃₀₀
 T₅₀₀
 T₈₅₀

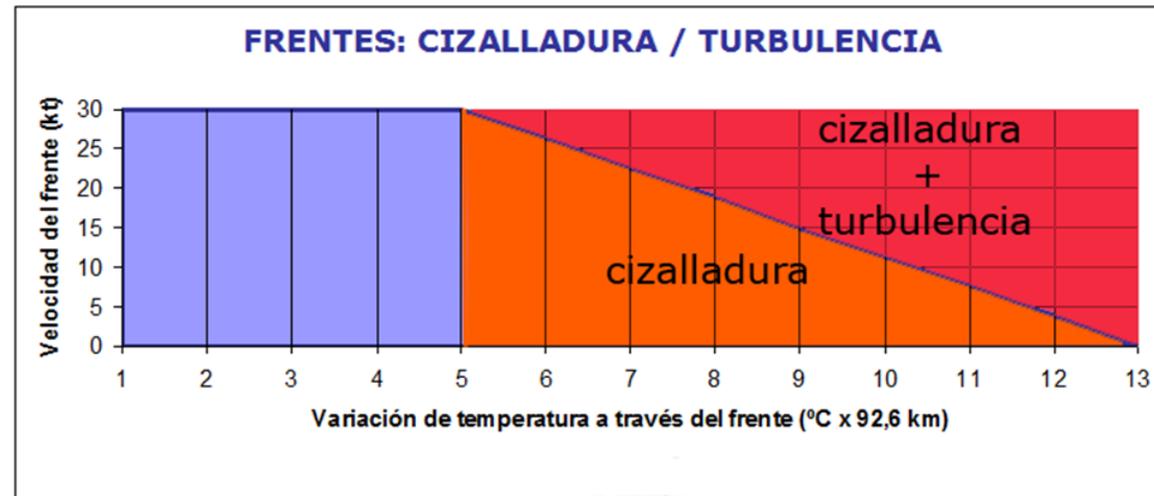
Se encuentran justo por encima de la capa límite. El ascenso o descenso a través de estas capas expone a turbulencia y cizalladura inesperadas. Los efectos son, a menudo, breves y sin consecuencias pero ocasionalmente contribuyen a serios problemas en vuelo.

Las reglas más comunes son:

- Un frente moviéndose a 30 kt o más tendrá LLT moderada o fuerte.
- Un frente moviéndose sobre terreno abrupto generará LLT moderada o fuerte.
- Un frente asociado con un gradiente de temperatura de al menos 10° F por 50 millas ($\sim 5^{\circ}$ C/100 km) llevará asociada LLT moderada o fuerte.

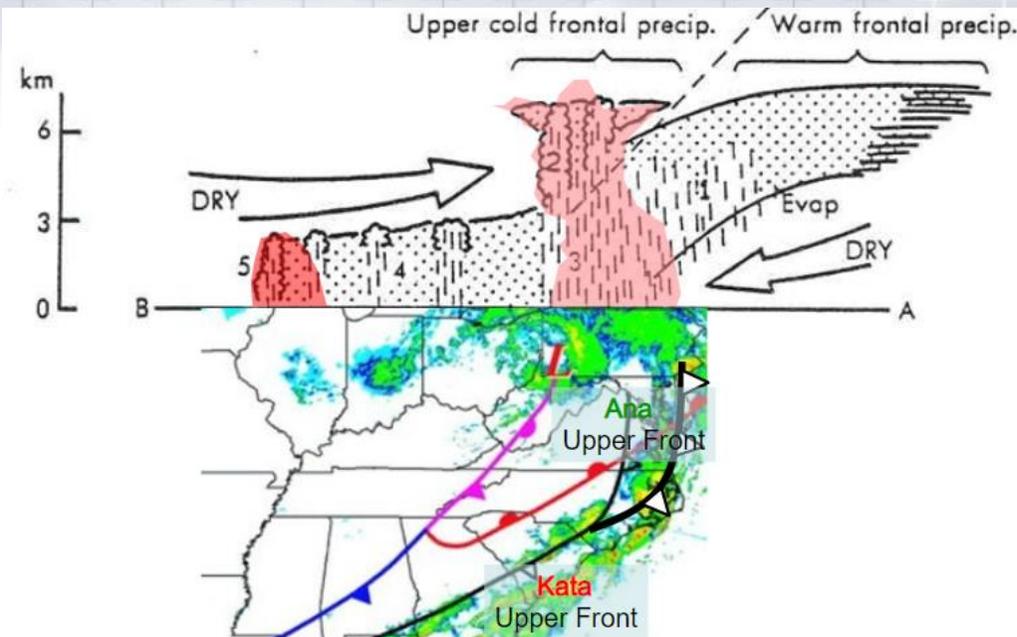
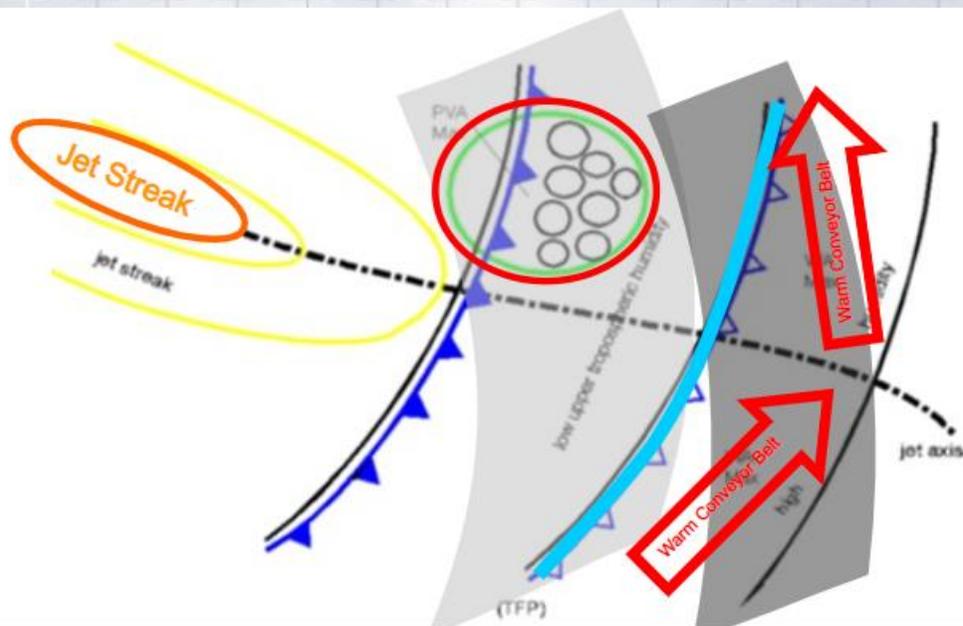


ΔT = Temperature difference across front at surface. (Deg F/50nm)
KNOTS = Sustained surface wind speed, forecast or observed



*Turbulencia asociada al paso de un frente.
Fuente: AFWA (1998).*

*Turbulencia y cizalladura en los frentes en función de su gradiente de temperatura y velocidad
Nomograma de Northwest Airlines. Adaptado de Lester.*

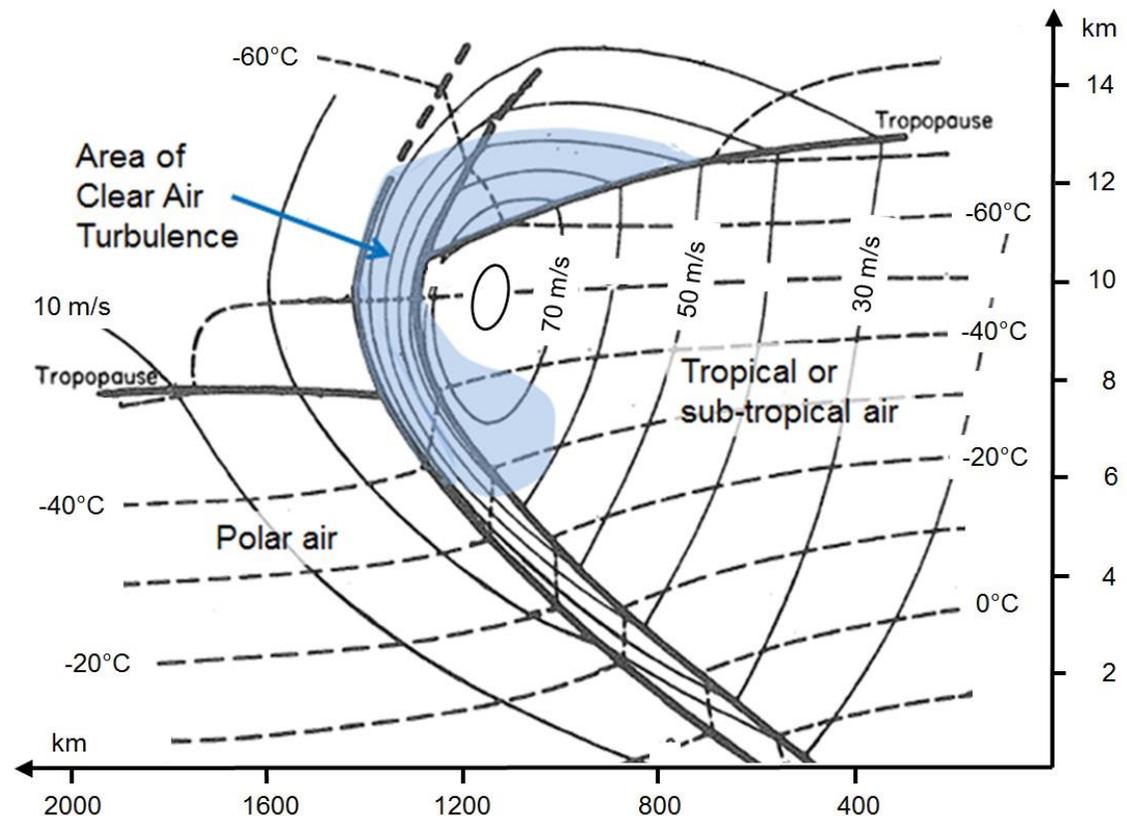


Vista en planta y perfil vertical con imagen radar del frente dividido y la corriente en chorro. Adaptado EUMeTrain-ZAMG.

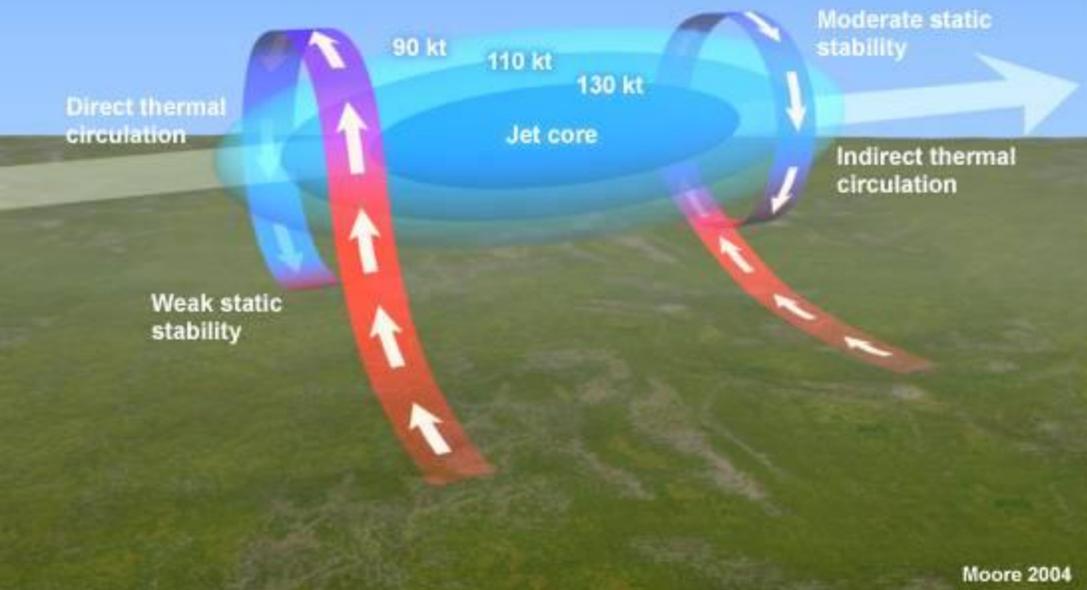
- La **LLT** asociada a un frente frío sobre terreno llano se extiende unas **200 millas náuticas** por delante del frente. Hay LLT en ambos lados del frente. El período crítico de peligro de **LLWS** es de **1 a 3 horas** después del paso del frente frío y hasta **6 horas** antes del paso del cálido (su pendiente es menor y su desplazamiento más lento).
- Uno de los tipos de frentes fríos que es más probable que presenten **turbulencia moderada a fuerte** es el **frente dividido (Split front)**. Su imagen de satélite muestra una estructura de doble banda con temperaturas frías delante y temperaturas más cálidas detrás.

- Turbulencia en aire claro (TAC) es la turbulencia que ocurre en atmósfera libre lejos de actividad convectiva visible. El hecho de se produzca en cielo despejado la hace más peligrosa. El 45 % de las notificaciones de turbulencia de las compañías aéreas es de TAC.
- Cuando capas de aire adyacentes se mueven a distintas velocidades, se produce fuerte cizalladura. Si las ondas que se forman en el flujo rompen, se forman remolinos que viajan en el viento medio generando TAC.
- La probabilidad de encontrar TAC en un vuelo al azar en la alta troposfera y baja estratosfera de 170 km de longitud es del 15 %. Si la TAC es moderada o mayor se reduce al 6 % y al 1 % el que sea fuerte o extrema.
- En un vuelo sobre el Atlántico norte, aproximadamente, transcurre un: 10 % con TAC ligera, 1 % con moderada y 0,01 % con TAC fuerte.

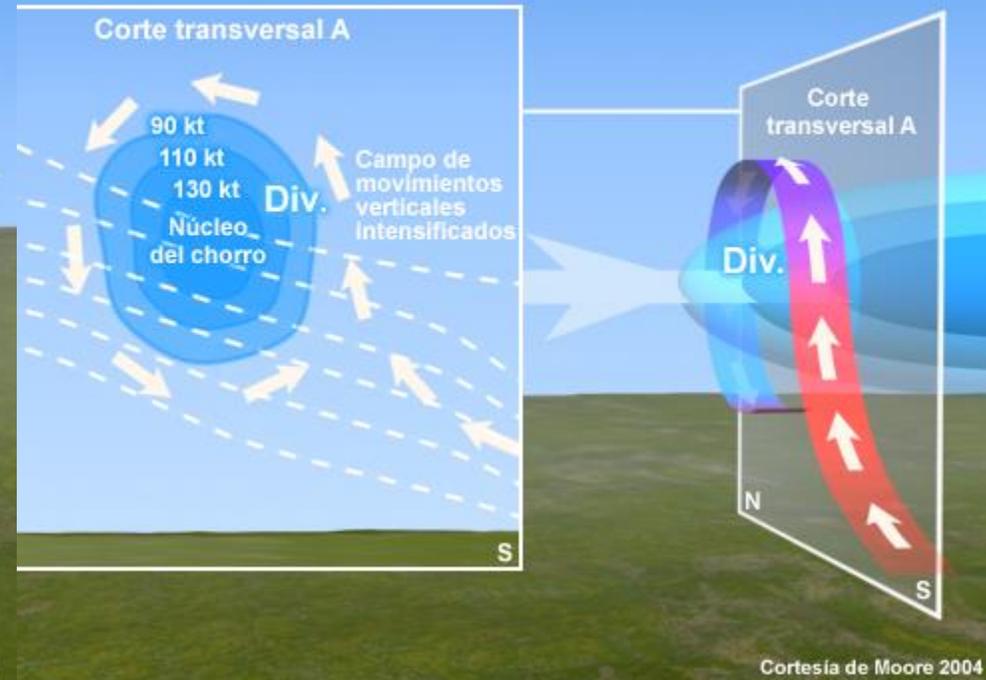
- Chorro polar (40-70° N) y subtropical (25-40° N).
- Topografías de 300 hPa (30.000 p) y 200 hPa (40.000 pies).
- Dimensiones: longitud (miles kms), ancho (cientos kms) y espesor (1 a 3 km). Frente del chorro (100 a 300 km ancho).
- Estructura: tropopausas, frente del chorro.
- “Jet streaks”: segmentos del eje del chorro donde la velocidad del viento es mayor. De cientos de kms de longitud se desplazan a lo largo del eje a unos 25 kt.
- Esquema de zonas con mayor probabilidad e intensidad de TAC.



Circulations in the Exit and Entrance Regions of an Upper-Level Jet Streak

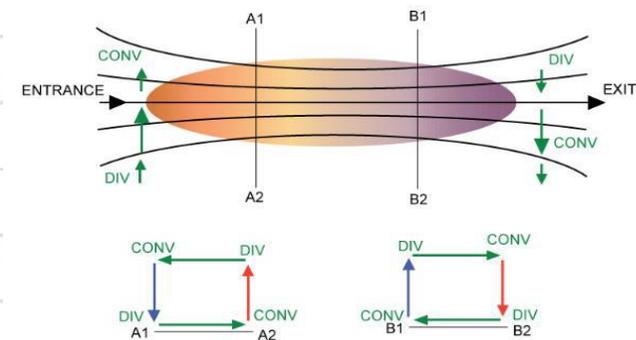


Dinámica de la zona de entrada de la corriente en chorro



Moore 2004

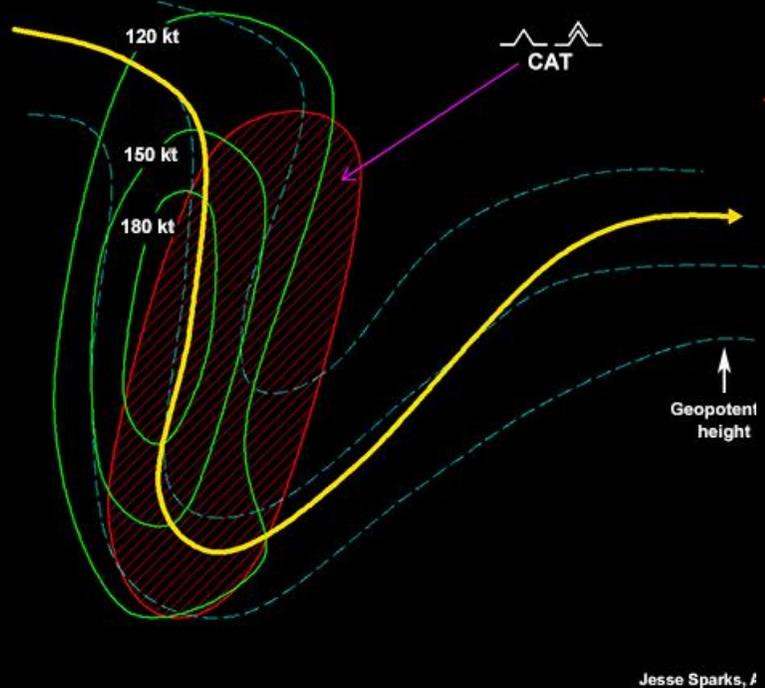
Cortesía de Moore 2004



- Máximos de viento (jet streak) en un chorro (ULJ).
- Zonas de entrada y salida de una corriente en chorro.
- Circulaciones ageostróficas indirecta (anterior-salida) y directa (posterior-entrada).
- Directa: ascensos en el lado cálido y descensos en el frío

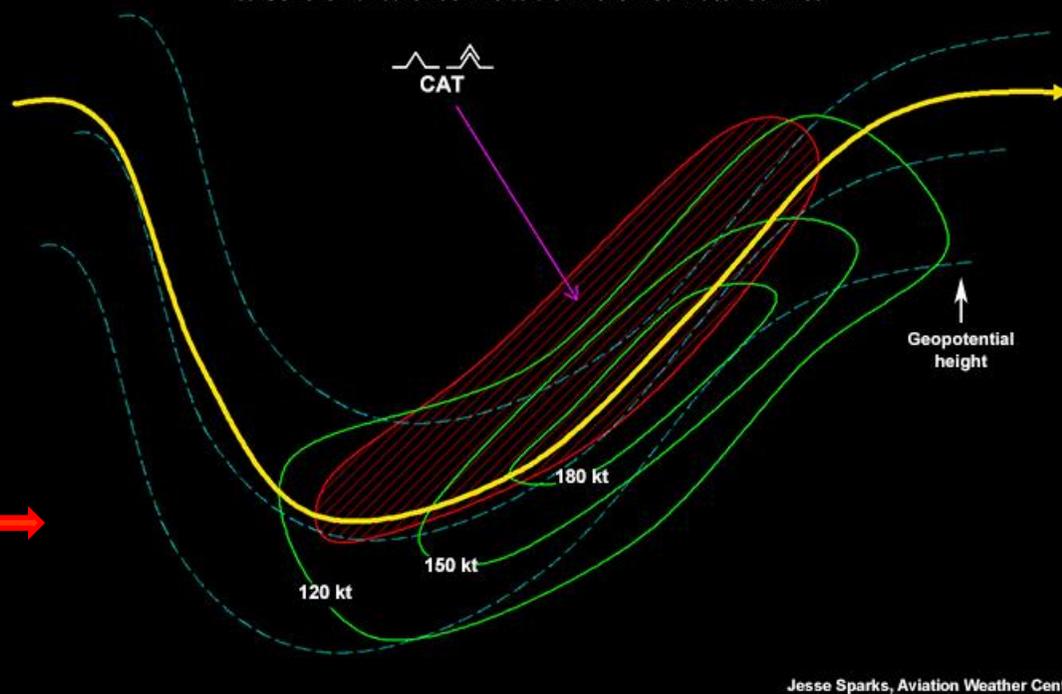
TAC: calculando su potencial

Jet Stream Maximum Upstream of a Deepening Trough With Moderate to Severe Turbulence Probable in the Red Hatched Area

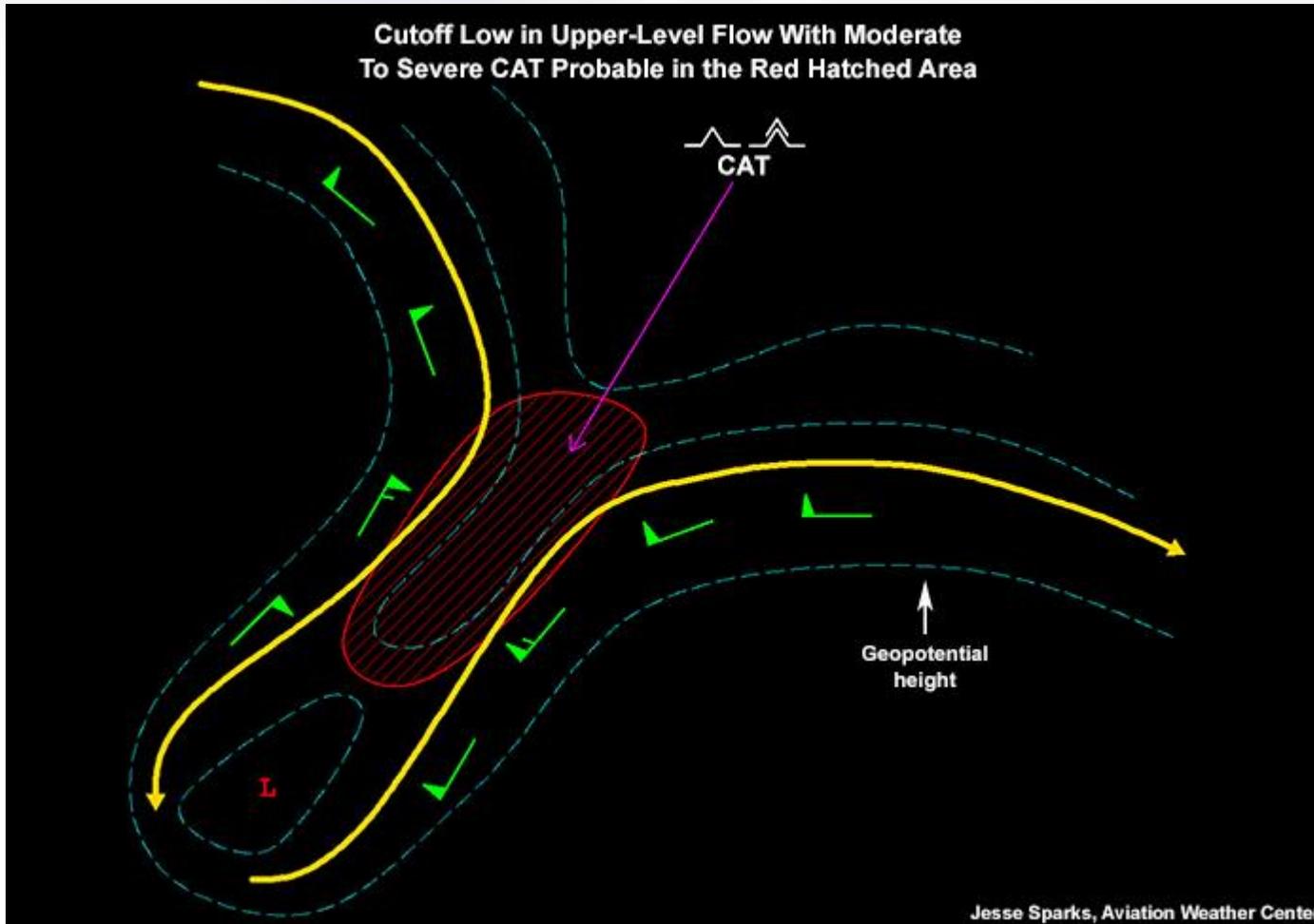


Patrón de TAC en una vaguada estrecha. COMET Program

Jet Streak Downstream of the Trough With Moderate to Severe Turbulence Probable in the Red Hatched Area

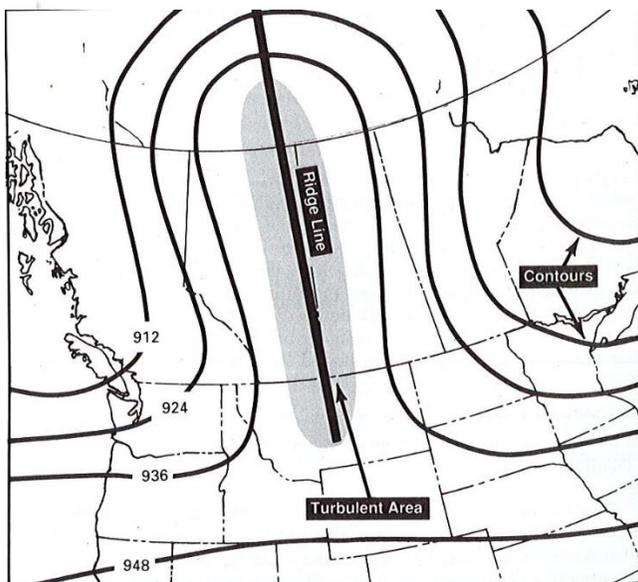


Patrón de TAC en una vaguada ancha. COMET Program



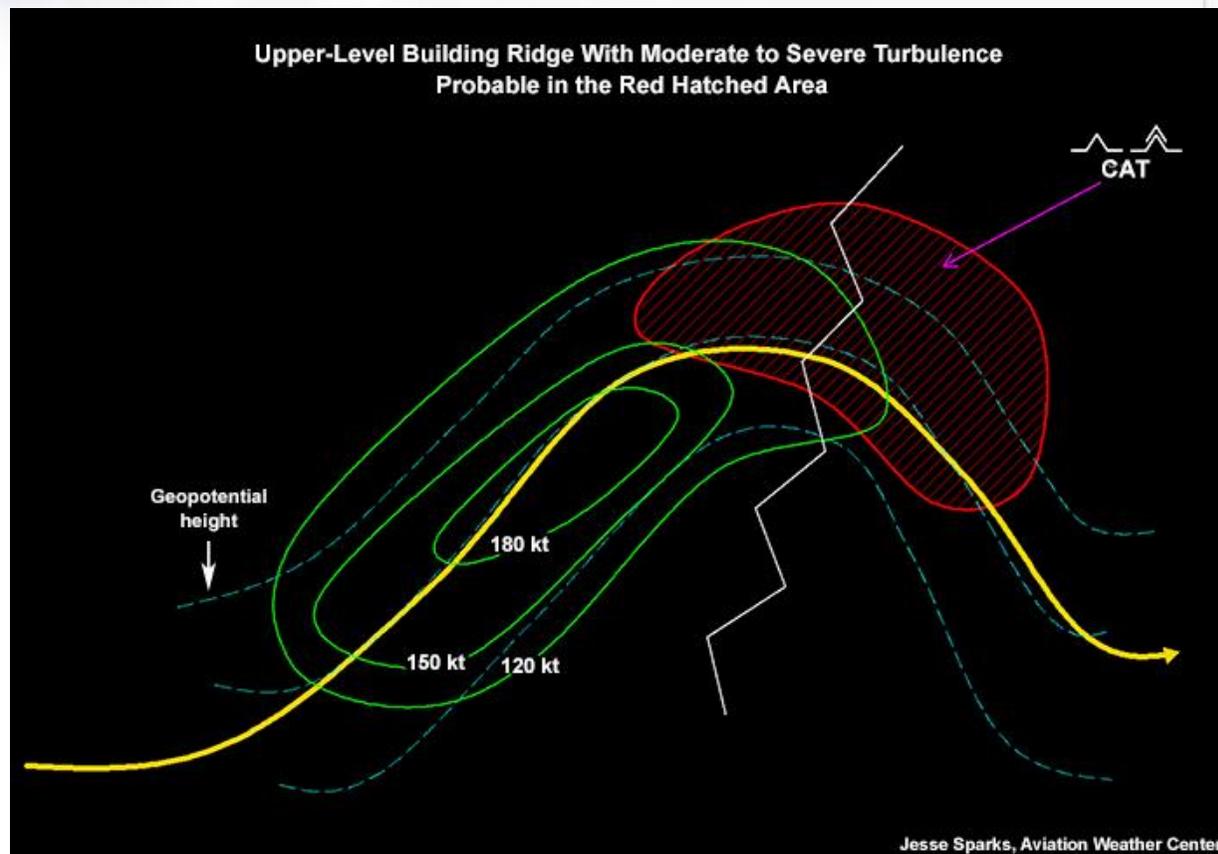
COMET Program

En la zona de ruptura (cut off) de la formación de DANA's.

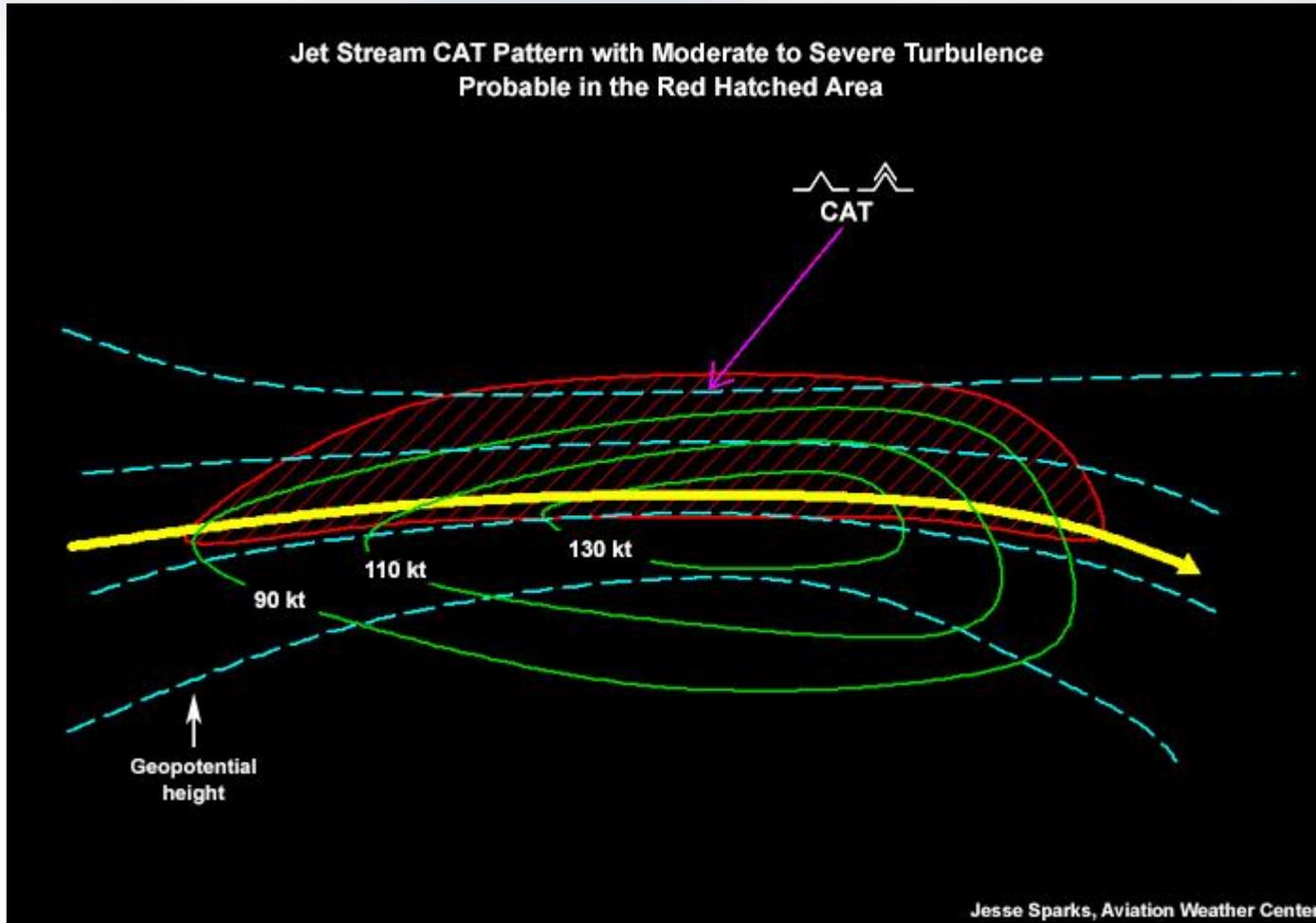


TAC en una dorsal estrecha

Turbulence. Peter F. Lester. Jeppesen

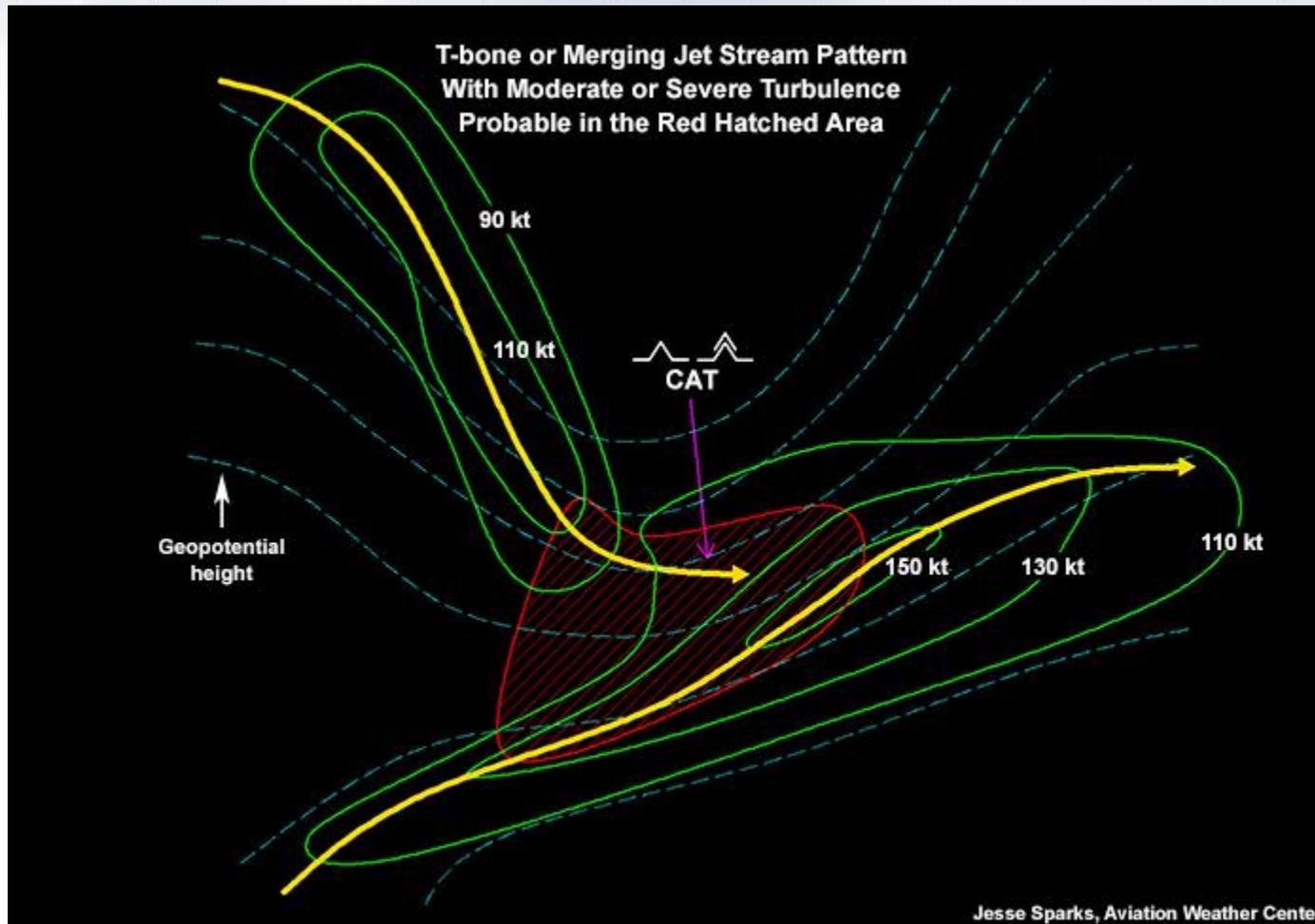


TAC en una dorsal ancha. COMET Program



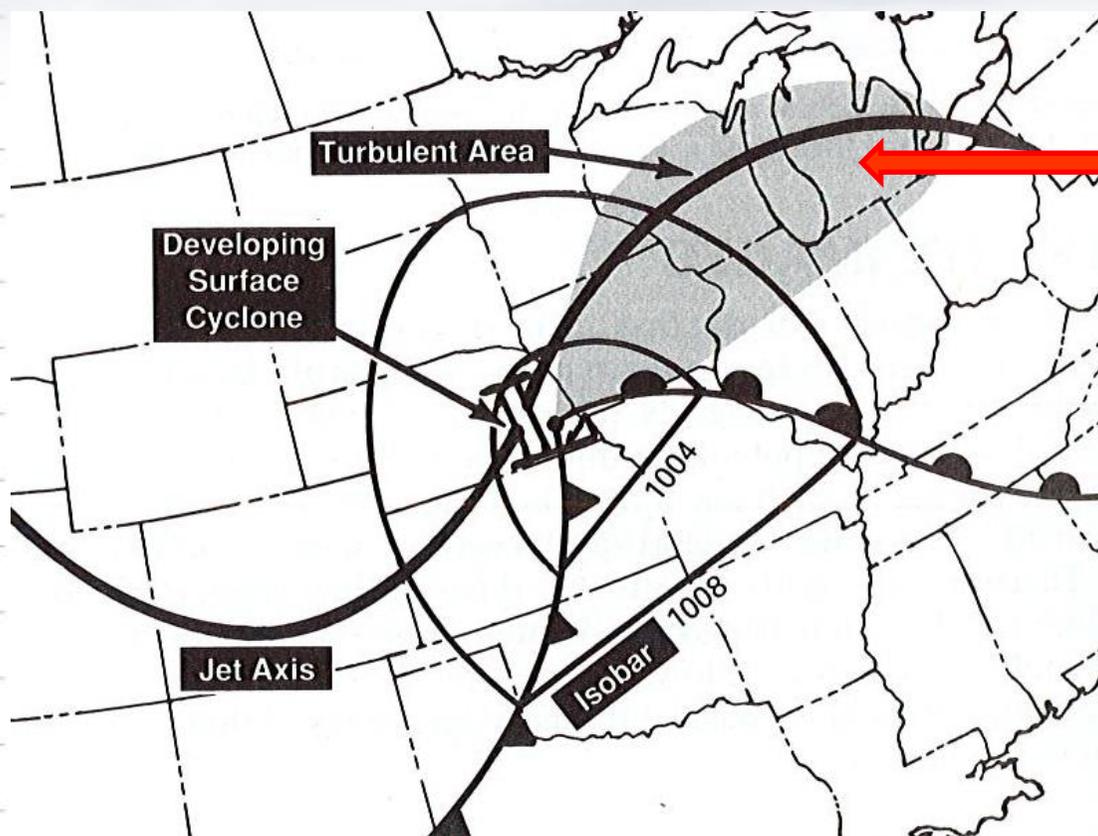
COMET Program

Corriente en chorro rectilíneo..Lado izquierdo (máxima cizalladura horizontal y máximos gradientes de temperatura)



COMET Program

- En la zona de confluencia entre dos corrientes en chorro (< 500 km).



Baja con sistema frontal.
Es más probable la turbulencia por delante del frente cálido en las proximidades de la corriente en chorro.

Turbulence. Peter F. Lester. Jeppesen

INTENSIDAD DE LA TURBULENCIA EN RELACIÓN CON LA CIZALLADURA DEL VIENTO. NIVELES MEDIO-ALTOS (TAC)

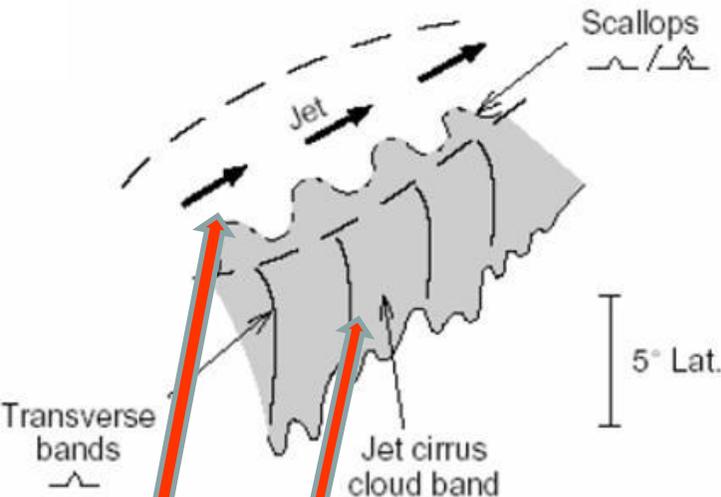
	TAC mod.	TAC mod. a fuerte	TAC fuerte
Cizalladura vertical	$\geq 6\text{kt}/1000\text{ ft}$		$\geq 9\text{kt}/1000\text{ ft}$
Cizalladura horizontal	$\geq 20\text{kt}/1^\circ\text{ lat.}$		$\geq 30\text{kt}/1^\circ\text{ lat.}$
Desaceleración de la velocidad del viento	$> 40\text{kt}/10^\circ\text{ lat.}$	$> 60\text{kt} /10^\circ\text{ latitud}$	$> 125\text{kt} /10^\circ\text{ lat.}$
Variación en la dirección del viento		75° de giro cerca del gradiente de T.	

WMO/TD-No. 1390. Education and training program ETR-20. 1° de latitud = 111 km.

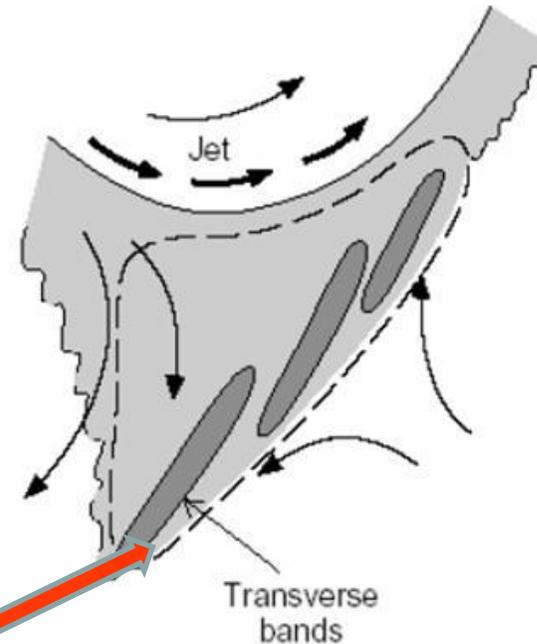
Zonas de cirros asociadas a corrientes en chorro

Adaptada de Ellrod, G.P. 1985: *Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data*. NOAA Techn. Memo. NESDIS 10, 30 pp.

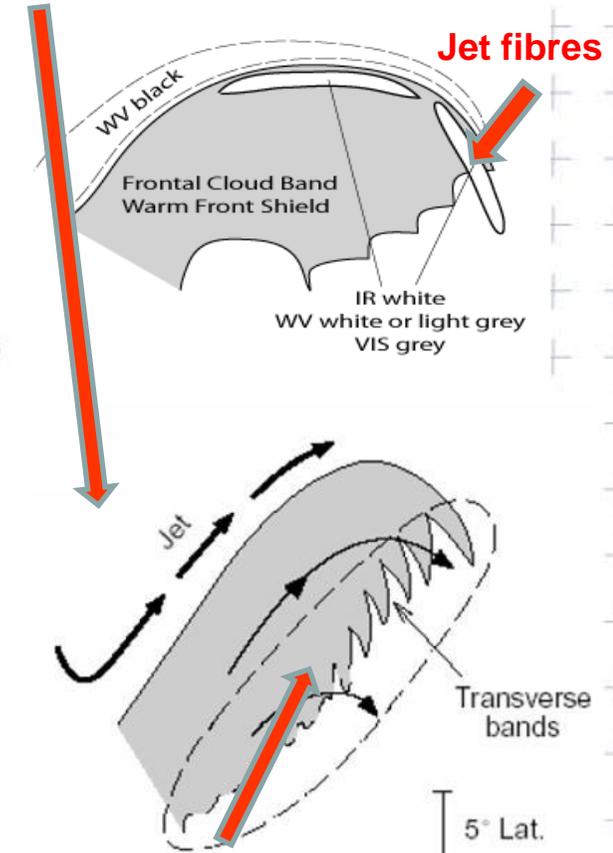
Chorros rectilíneos



Chorros en surco o difluentes



Chorros con curvatura anticiclónica



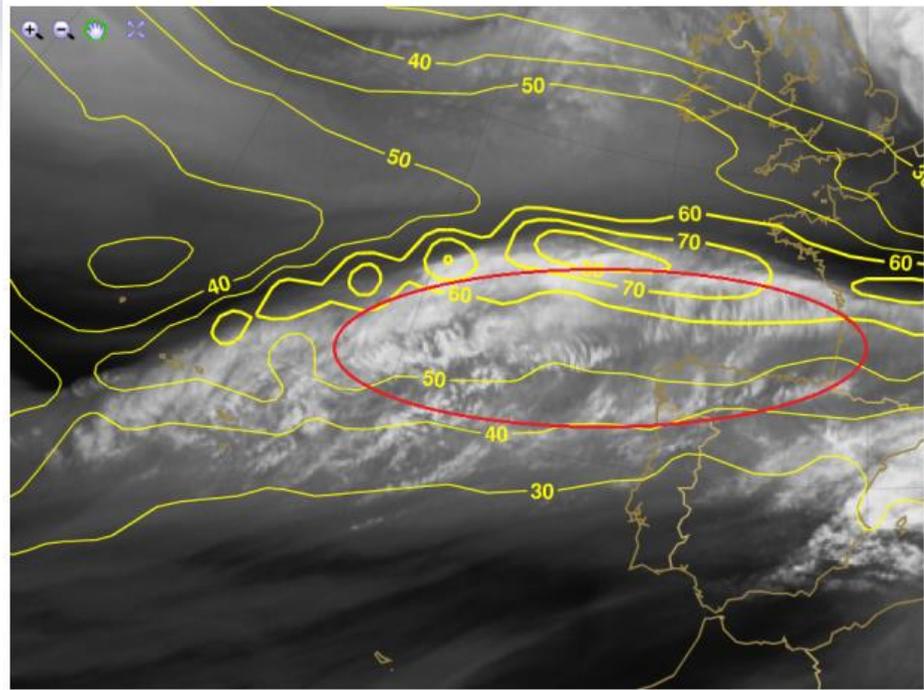
Scallops: abultamientos en las bandas de cirros (lado polar). Relación con CH.

Bandas transversales: perpendiculares al viento.

Jet fibres: franjas muy largas y estrechas de nubes altas y frías.

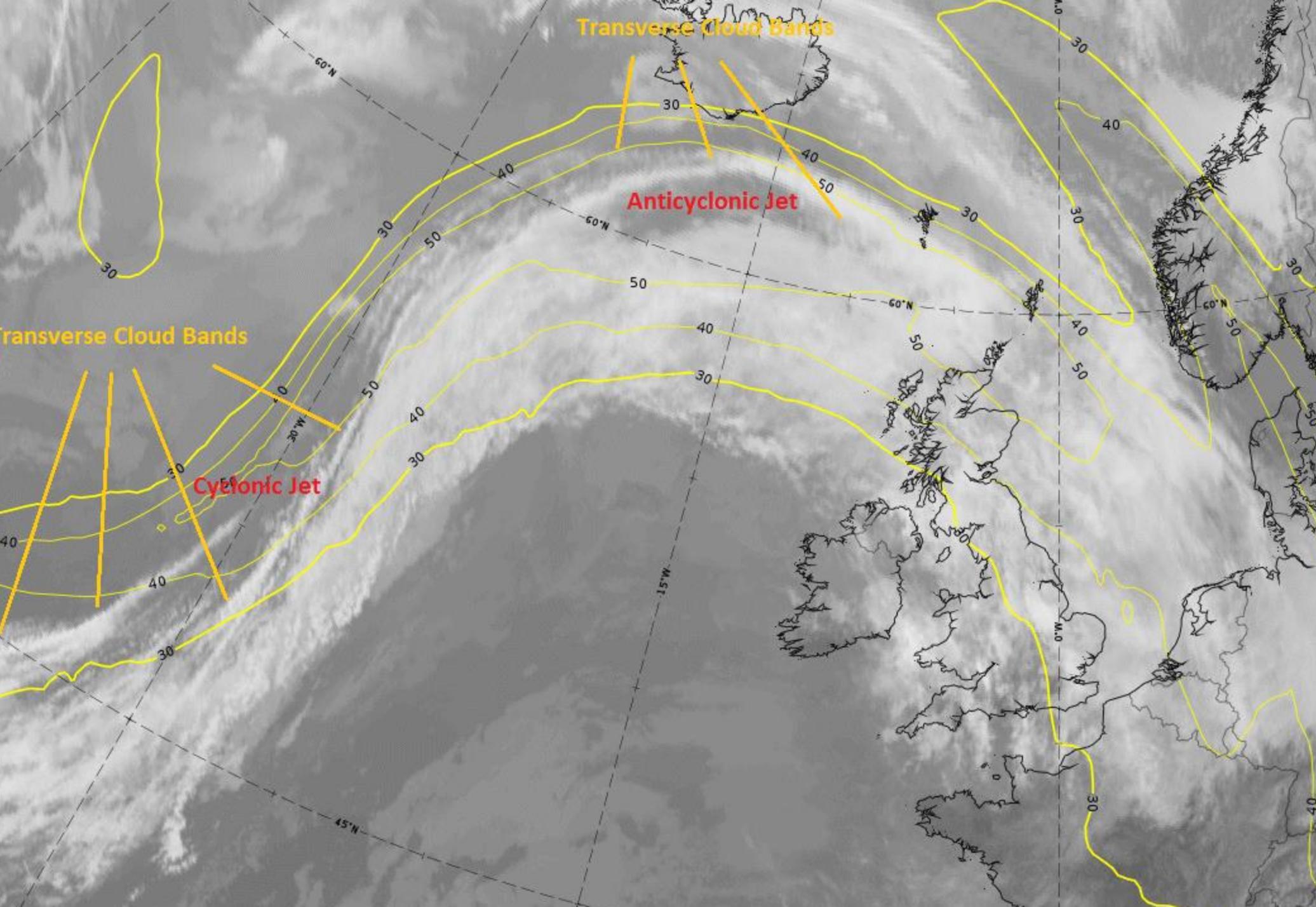
Billows: aspecto similar a las bandas transversales pero más pequeños y alargados.

Bordes deshilachados



Son cirros alineados en forma de banda:

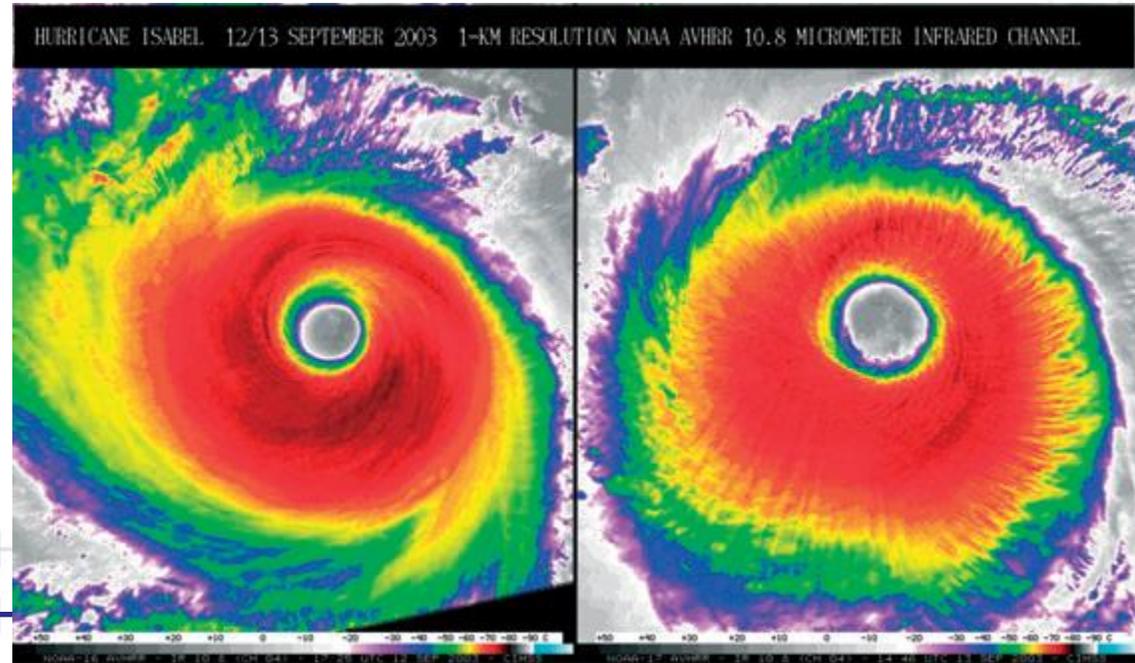
- Aparecen en la nubosidad alta asociada al chorro, en el lado ecuatorial
- Bandas irregularmente espaciadas y alineados perpendicularmente al eje
- Suelen ser visibles en los sectores más fuertes del chorro
- *La conexión entre bandas transversales (especialmente las más anchas y más gruesas) y la TAC es una regla general de pronóstico de aviación (Ellrod, 1989)*
- Son muy persistentes y pueden permanecer varias horas e incluso días.



Bandas transversales & huracanes

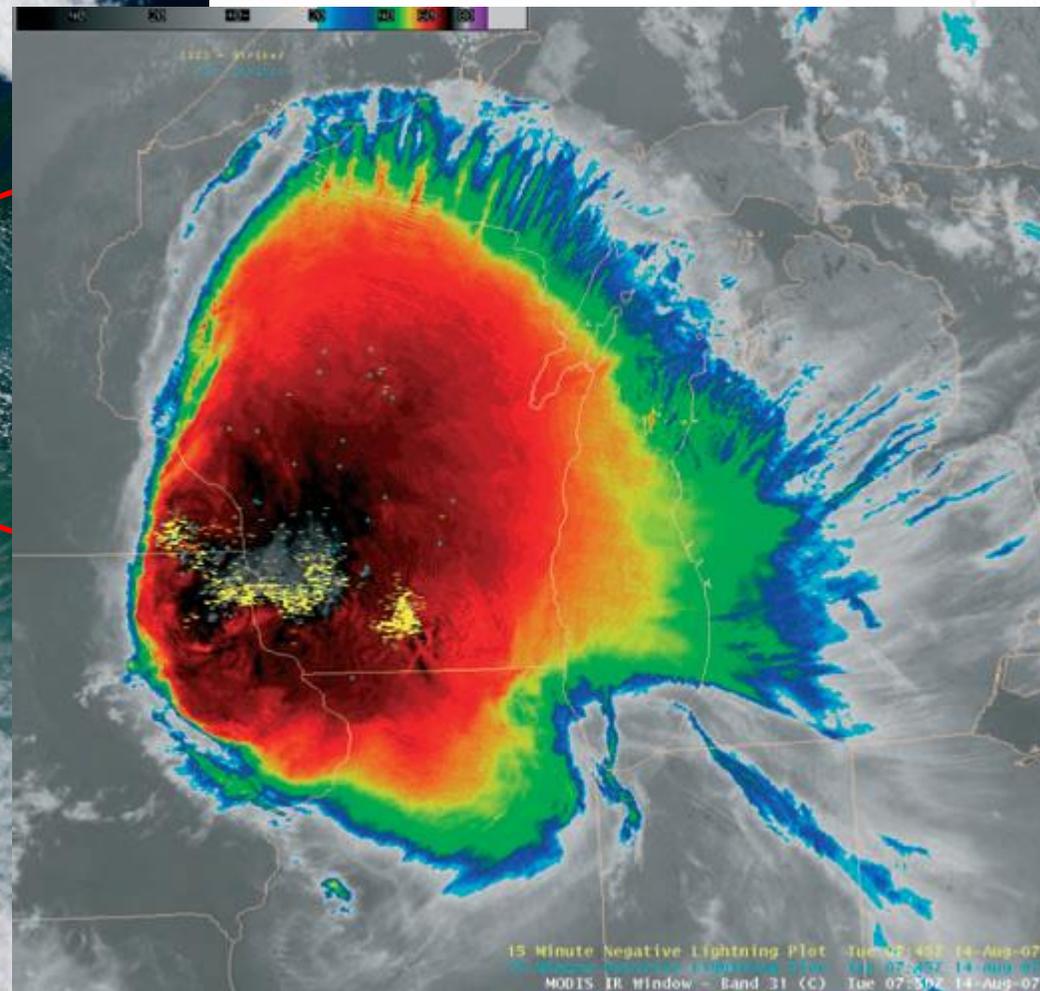
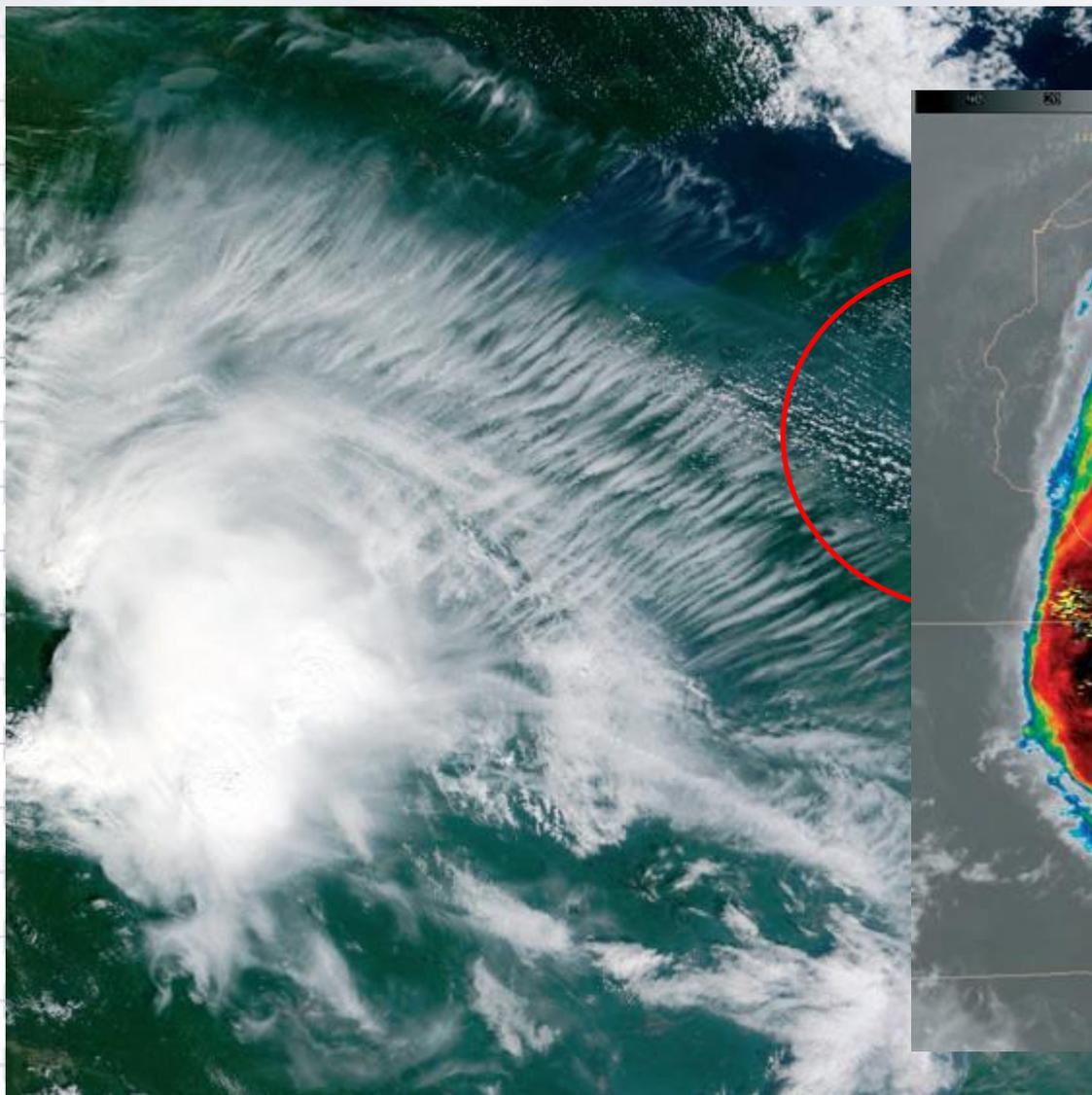
Tormentas tropicales y huracanes en los que podemos distinguir bandas transversales de cirros en su periferia, especialmente en el sector norte. ¿Por qué?

NOAA AVHRR 1 km resolution infrared images of Hurricane



MODIS infrared image of transverse bands associated with Tropical Storm Fay at 1558 UTC

Bandas transversales y SCM



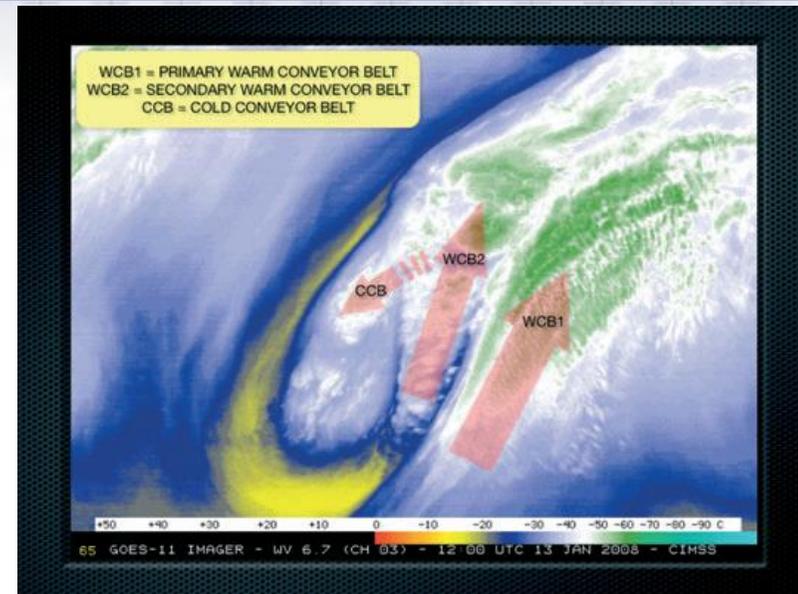
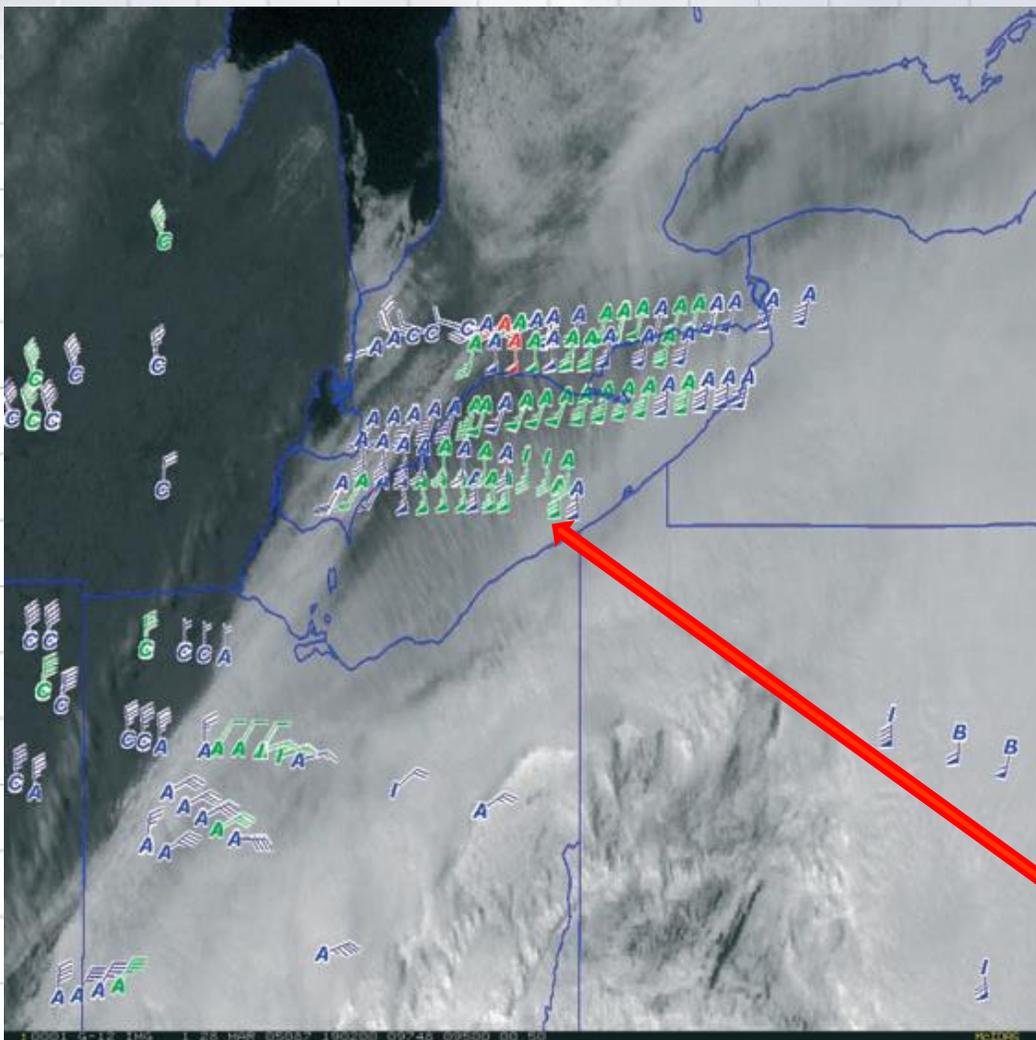
Turbulencia y bandas transversales



GOBIERNO DE ESPAÑA

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

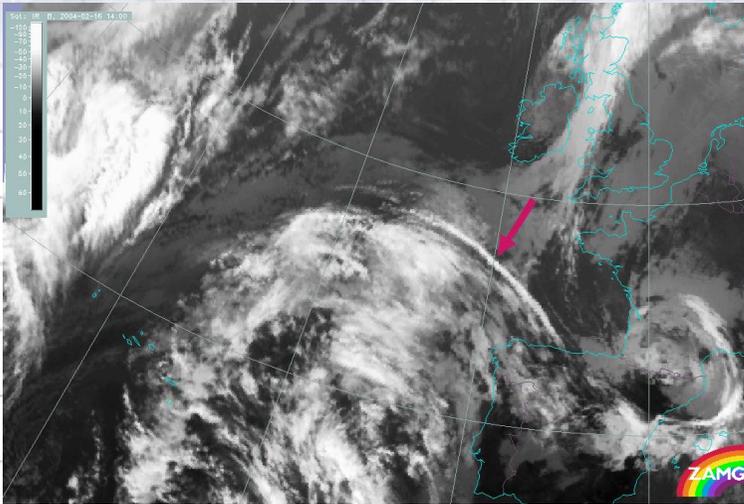
AEMet
Agencia Estatal de Meteorología



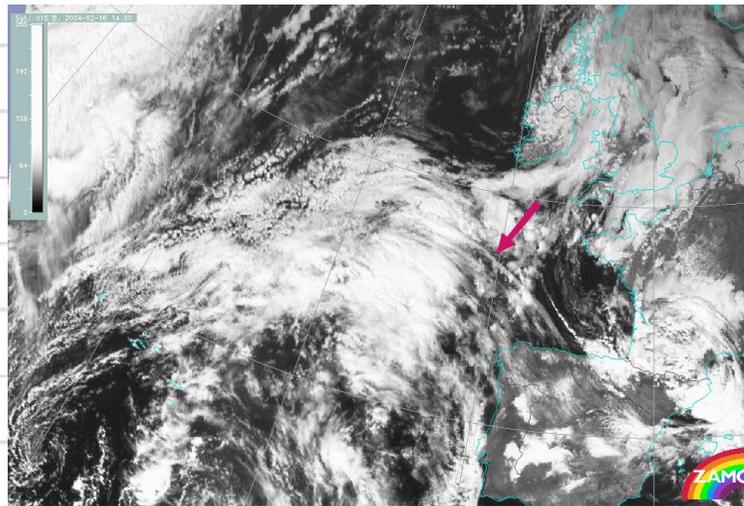
Arriba: GOES-11 Imagen del WV de un ciclón extra-tropical a las 1200 UTC con bandas transversales en el WCB. Adaptado de: http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/wp-content/uploads/2008/01/conveyor_belts.070.png

(Figura izq. courtesy Kris Bedka, University of Wisconsin; EDR data courtesy Bob Sharman, National Center for Atmospheric Research.)

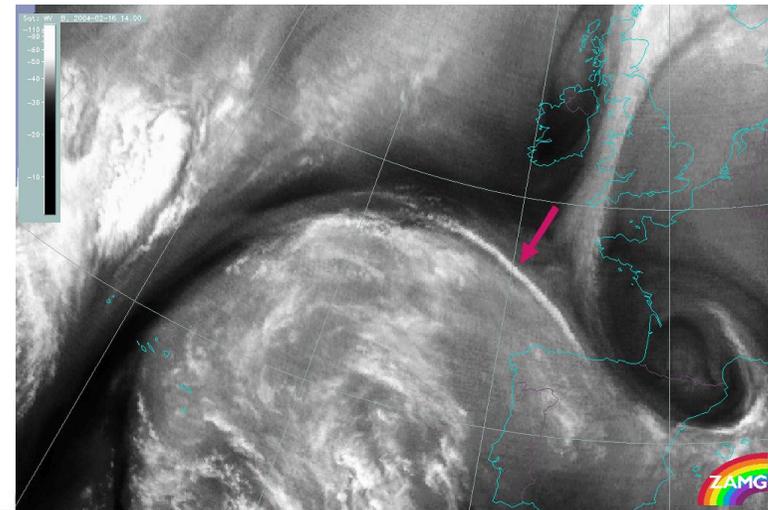
Relación entre bandas transversales y turbulencia. **Colores:** Rojo= fuerte; Verde= moderada; Azul= débil
Traectoria del vuelo: A= encima de las nubes; I= dentro; B= debajo; C = cielos despejado. **Vientos en kt**



16 February 2004/14.00 UTC - Meteosat IR

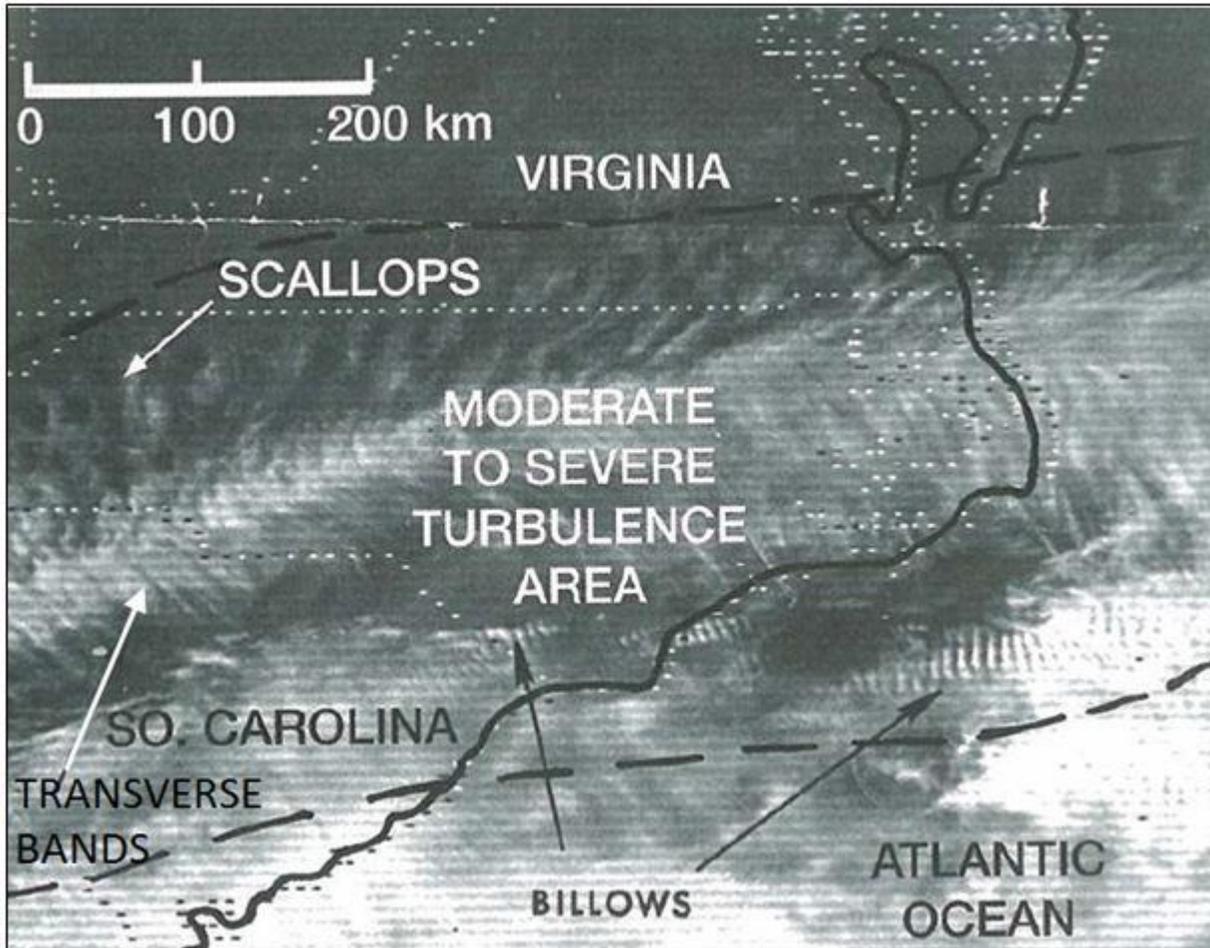


16 February 2004/14.00 UTC - Meteosat VIS



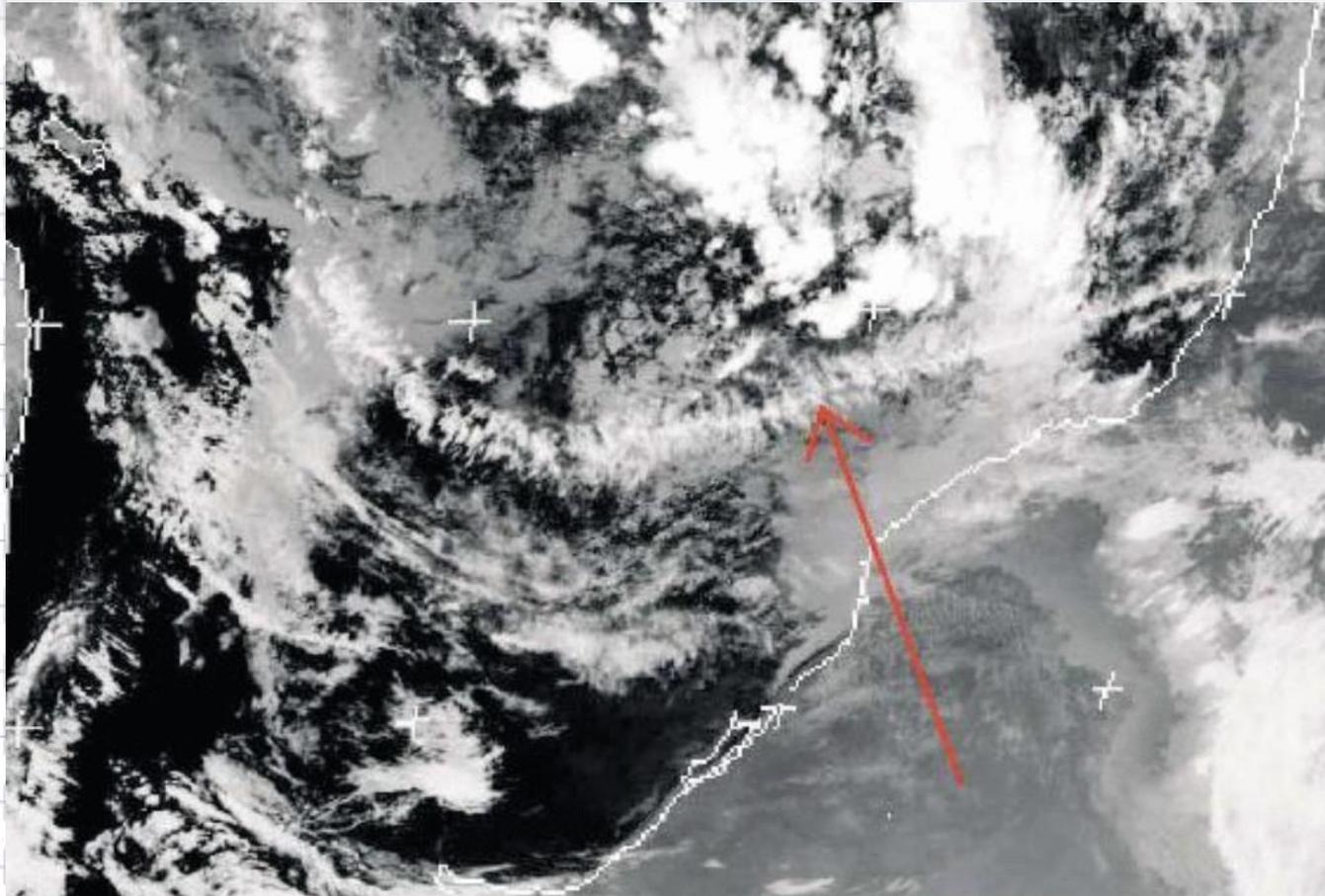
16 February 2004/14.00 UTC - Meteosat WV

- Las fibras del chorro son franjas largas y estrechas de nubes altas y frías. Persisten unas 8 a 12 horas.
- Indican la posición del eje del chorro y TAC
- En **IR** y **WV** aparecen en **blanco** (o gris muy claro), con estructura fibrosa pronunciada. En WV, casi siempre van acompañadas de rayas negras en el lado ciclónico.
- En **VIS**, son **casi transparentes**, con colores que varían de **gris claro a gris**.



- Son más cortas y estrechas que las bandas transversales
- Aparentemente asociadas con ondas de gravedad.
- Están orientados \perp a las bandas
- Tienen menor extensión espacial
- En niveles más bajos
- Formados por agua líquida y no por cristales de hielo.
- Los más pequeñas asociadas con inestabilidad KH y no se pueden resolver en imágenes de satélite
- Algunas veces son el resultado de la inestabilidad de KH, y otras son el resultado de ondas de gravedad.

- Solo se forman cuando hay suficiente humedad en el movimiento ascendente de las ondas. Las ondas formadas a partir de ondas de gravedad exhiben líneas de nubes anchas, casi paralelas, orientadas de manera perpendicular a la dirección del viento, con las bases de las nubes cerca de una inversión.



- En algunos casos, un Jet Fibre puede tener un adorno (ribbons).
 - Cintas de cirros, perpendiculares a la fibra de chorro.
 - Esto ocurre en el entorno sinóptico de un surco de niveles altos asociado con un frente frío.
-
- La nube frontal se disuelve, pero las cintas pueden persistir durante días si la velocidad del viento no excede los 40 m/s y hay una gran cizalladura horizontal del viento.

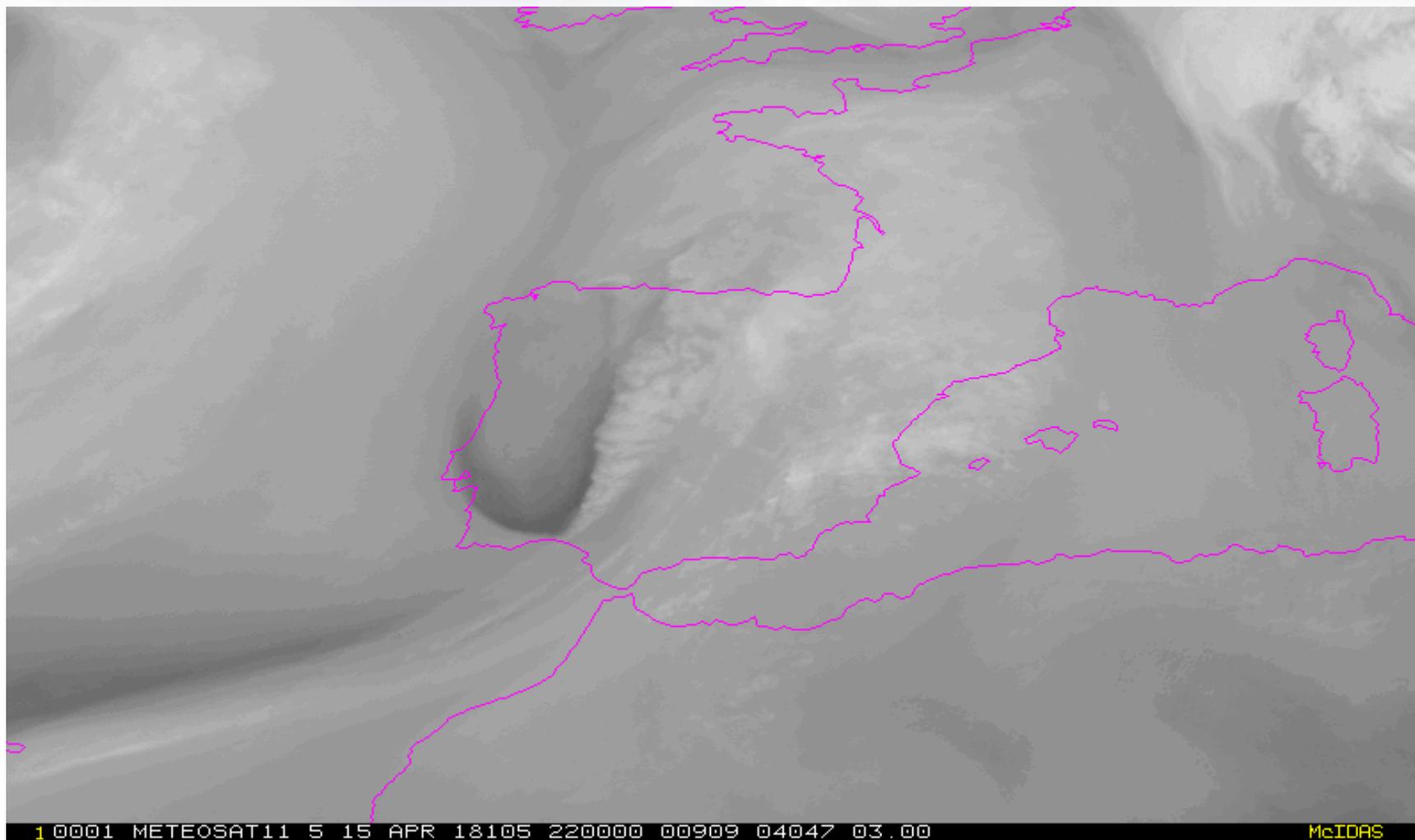
TAC: rasgos turbulentos en imágenes



GOBIERNO DE ESPAÑA

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

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología



Convergencia, gradientes térmicos y velocidad de desplazamiento

- *En general, la intensidad de la turbulencia es directamente proporcional a la convergencia.*
- *Puede haber mucha convergencia sin turbulencia, si los gradientes térmicos son pequeños.*
- *Las zonas de chorro advectivo, en los modelos numéricos, son zonas de posible turbulencia (la convergencia se obtiene por advección de vorticidad negativa).*
- *Excepto en la deformación las estructuras nubosas con turbulencia tienen velocidades altas o muy altas (> 30 kt).*

Rasgos nubosos turbulentos y no turbulentos en las imágenes de satélite (IR, WV):

- Los rasgos nubosos turbulentos van asociados a bordes nubosos muy definidos.*
- La excepción son los bordes deshilachados de los cirros de tipo 5 en la anterior clasificación de rasgos turbulentos.*
- La aparición de ondulaciones, empedrados, etc son signos de turbulencia.*
- El progresivo oscurecimiento de bandas oscuras en WV (máximos de viento y zonas de deformación) denota una profunda subsidencia que usualmente está asociada a TAC (pliegues de la tropopausa con entrada de aire troposférico con alta vorticidad potencial y alta concentración de ozono). **La turbulencia es más frecuente en las zonas que se oscurecen más rápidamente.***

Ellrod, G.P. 1985: Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data. NOAA NESDIS 10.

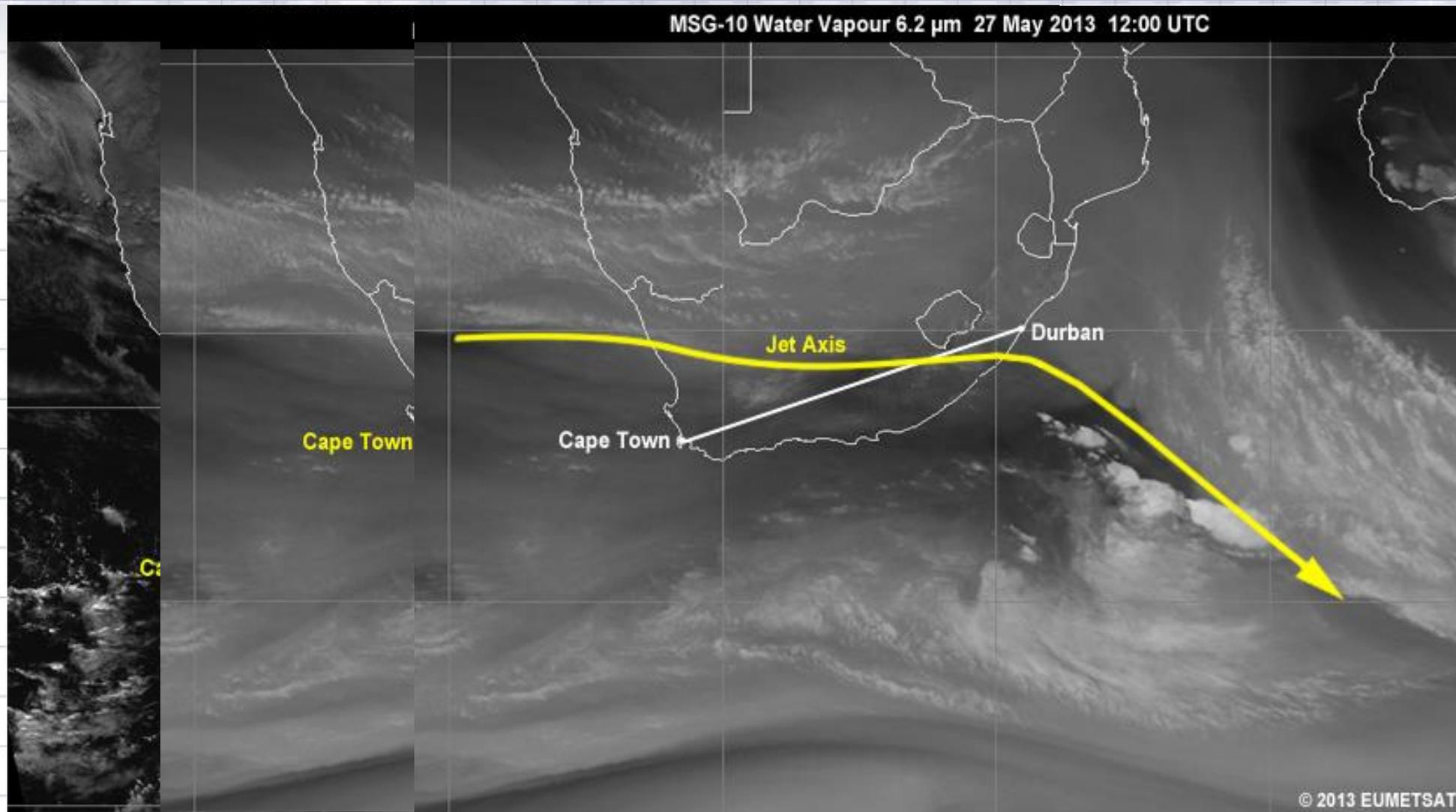
TAC: rasgos turbulentos en imágenes



GOBIERNO DE ESPAÑA

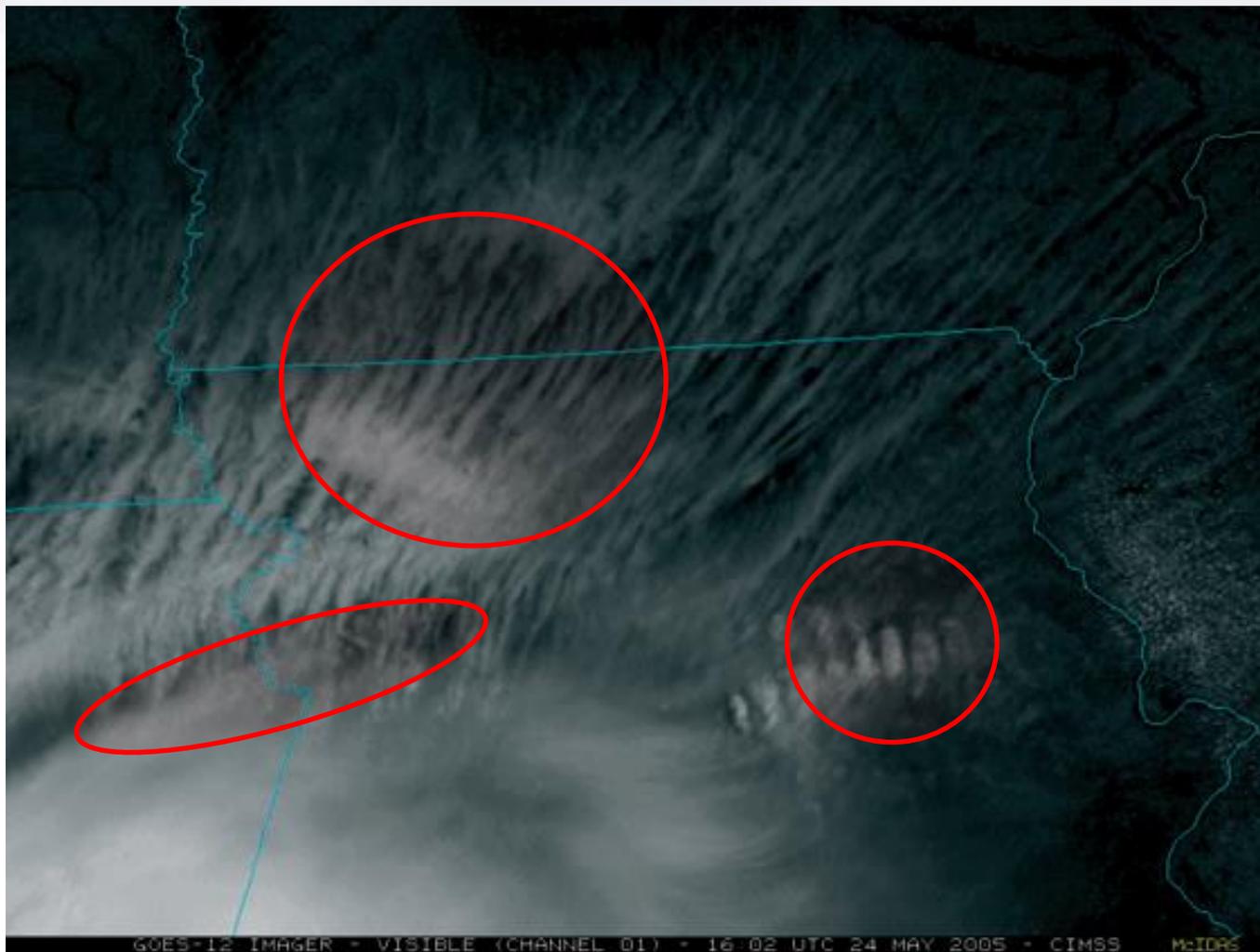
VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

AEMET
Agencia Estatal de Meteorología

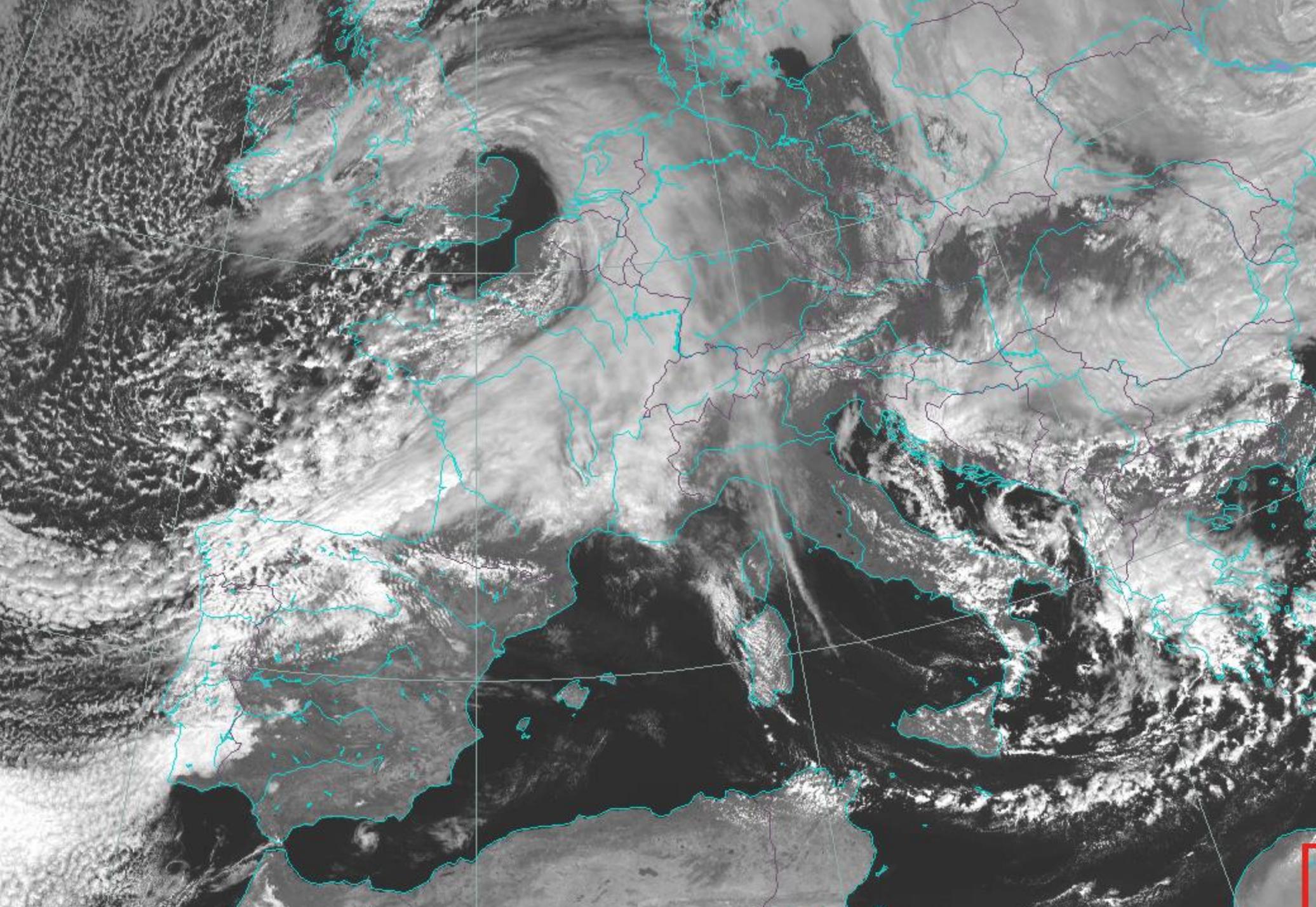


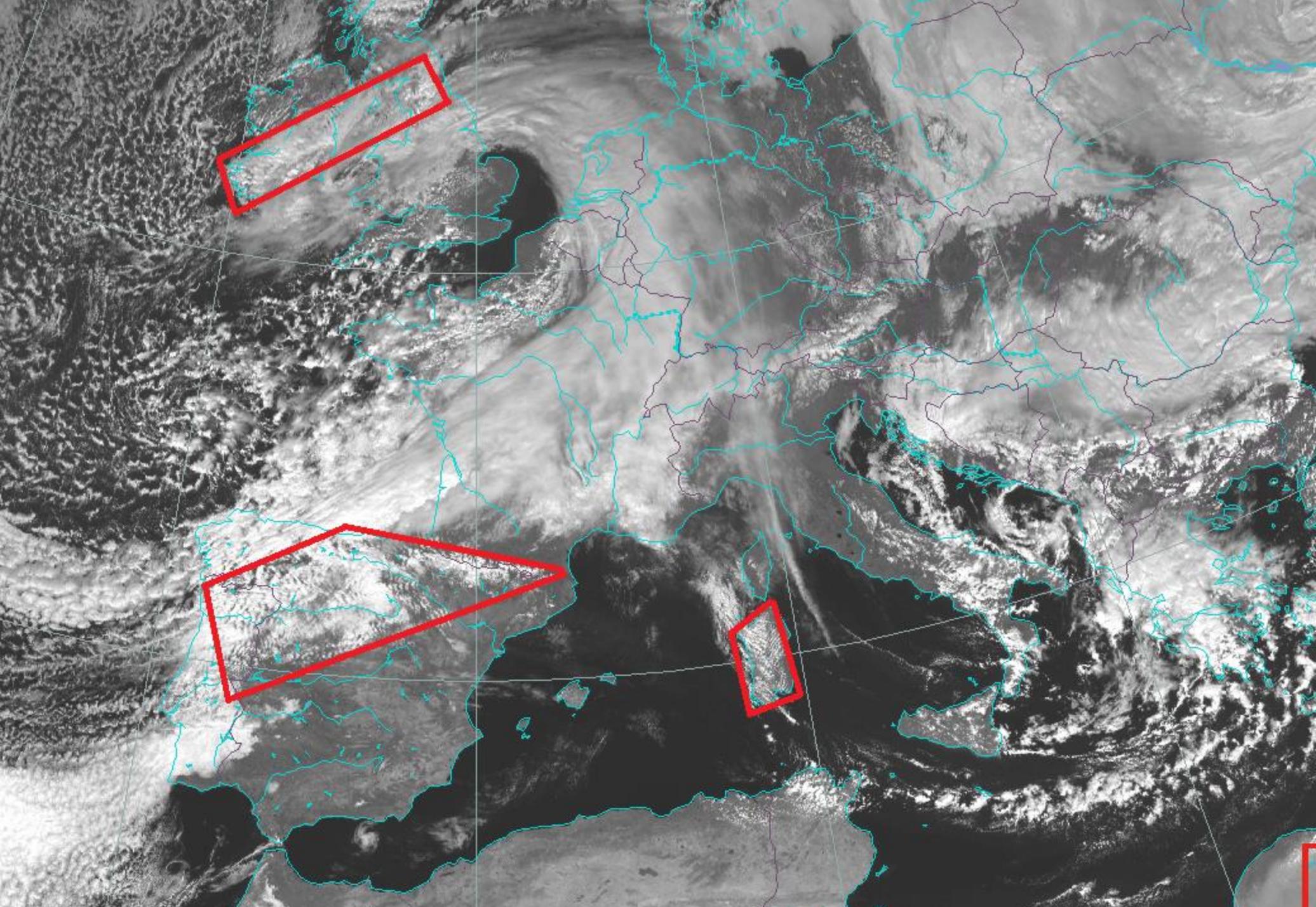
Adaptada del módulo COMET "CAT in southern Africa"

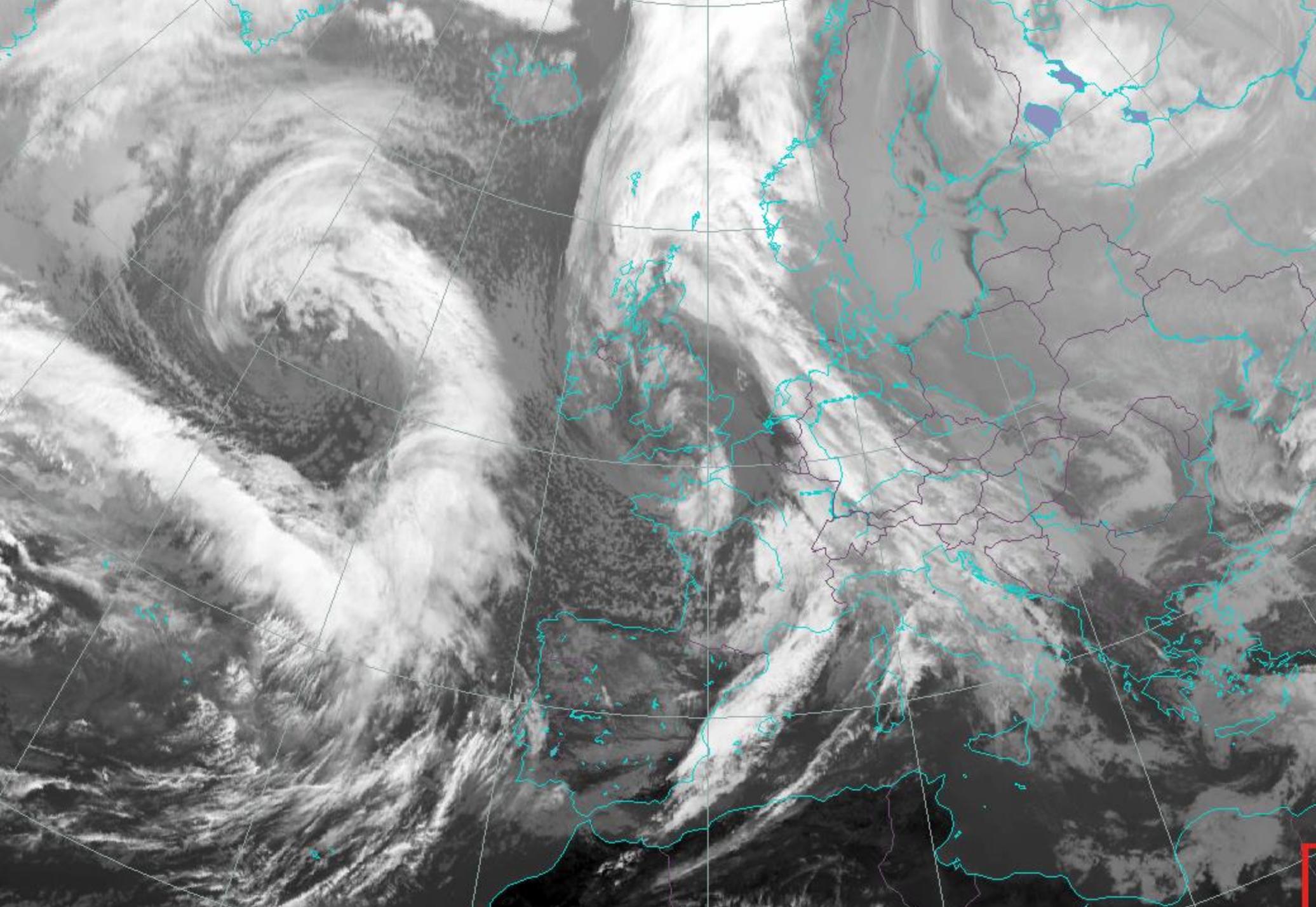
VIS

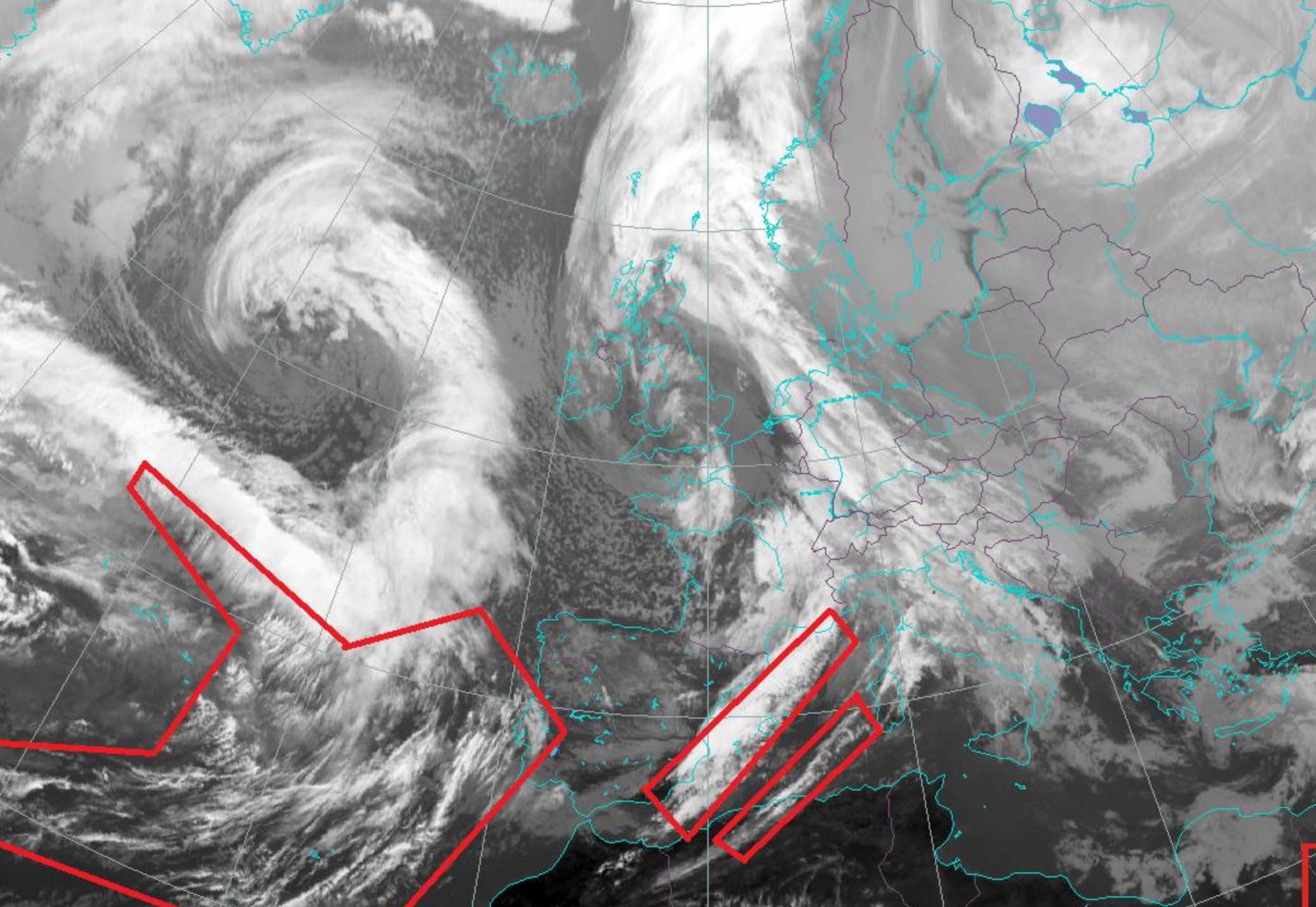


Encontrar donde hay bandas transversales, billows, scallops y jet fibres









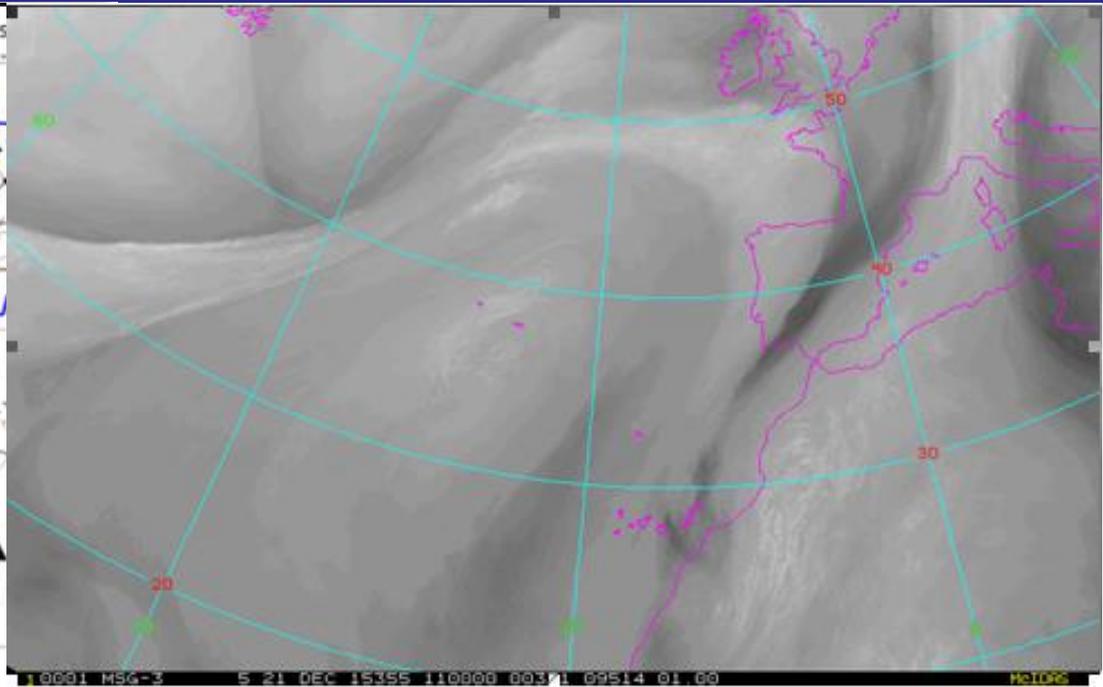
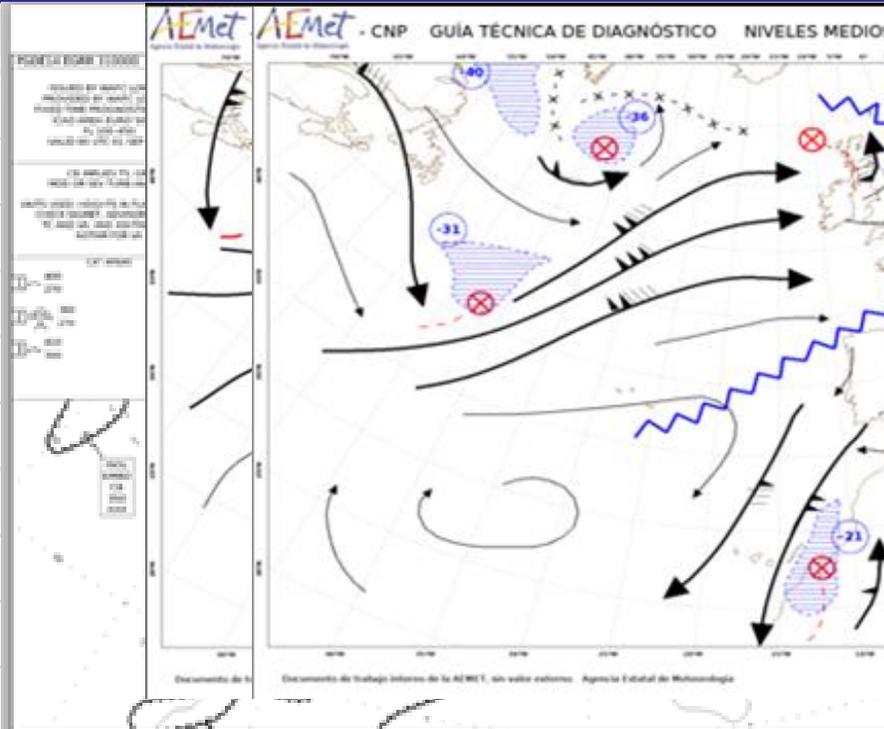
Ejemplo: zona de deformación 1



GOBIERNO DE ESPAÑA

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

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología

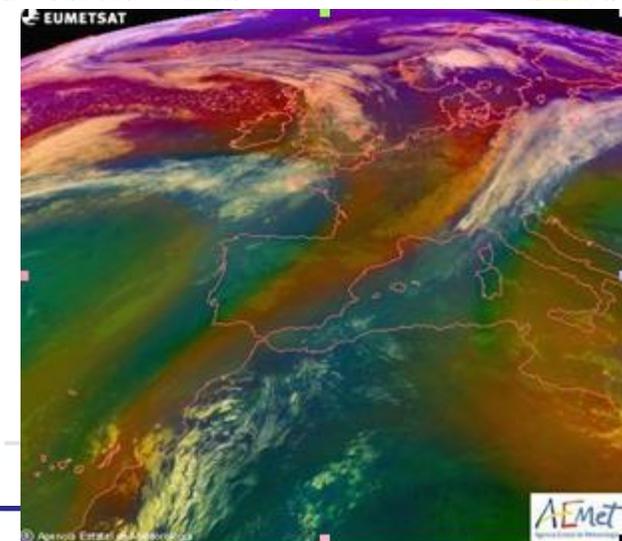


AN fuerte cerca del VOR de Calles a las 10:50Z

En el mapa Wafc no se observa ningún fenómeno en esa zona.

21/12/2015LECB AEA3060 CLS 10:50 FL310 SEV 11:09

No hay TAC en el SIGWX del WAFC
Zona de deformación en la guía 12 UTC
Hay ARS de TAC fuerte en Valencia



Índice T1 (Ellrod): es una técnica objetiva para pronosticar TAC. Se calcula a partir de la salida del modelo numérico utilizando el producto de la deformación horizontal (DEF) y la cizalladura vertical del viento (VWS) derivada de los vientos pronosticados en altura. **$T1 = VWS \times DEF$**

Índice T2 (Ellrod): se utiliza el producto de la deformación horizontal (DEF) más la convergencia atmosférica (CVG) y la cizalladura vertical del viento (VWS). **$T1 = VWS \times (DEF + CVG)$**

Son muy útiles para determinar la presencia de turbulencia, pero tienen una habilidad limitada para determinar su intensidad. No tiene en cuenta la estabilidad estática en la atmósfera, que puede desempeñar un papel importante en la determinación de la intensidad. Por lo tanto, se necesitan índices e indicadores adicionales para predecir la intensidad de TAC.

Al usar el producto, se buscan áreas de máximos relativos, que muestren dónde se producen la cizalladura vertical del viento más fuerte y la deformación (estiramiento).

- En los próximos años, se espera un importante incremento del tráfico aéreo como consecuencia del incremento de la demanda. Aproximadamente la mitad de los accidentes son causados por la turbulencia. Por tanto el pronóstico de turbulencia preciso es necesario para reducir el riesgo de turbulencia y mantener o incrementar la seguridad del transporte aéreo.
- Índices de pronóstico de turbulencia muestran una similar precisión:
 - Cizalladura vertical del viento (VWS)
 - Índices de Ellrod (TI1, TI2) (Ellrod y Knapp 1992)
 - índice empírico de Dutton (DI) (Dutton 1980)
 - Número de Richardson (Ri),
 - Cizalladura del viento horizontal (HWS)
 - Gradiente de temperatura horizontal (TEMPG).
- Sin embargo, la precisión sigue siendo insuficiente.

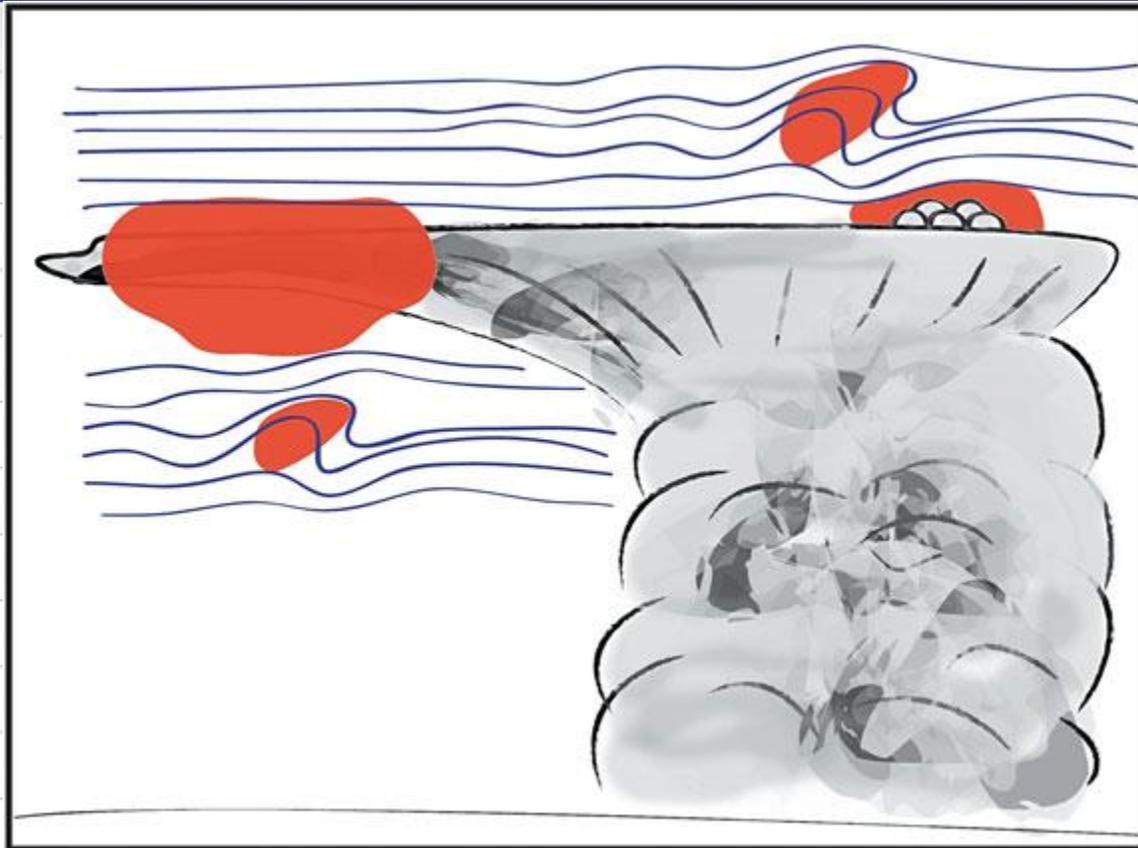
10. Turbulencia en y cerca de tormentas



GOBIERNO DE ESPAÑA

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

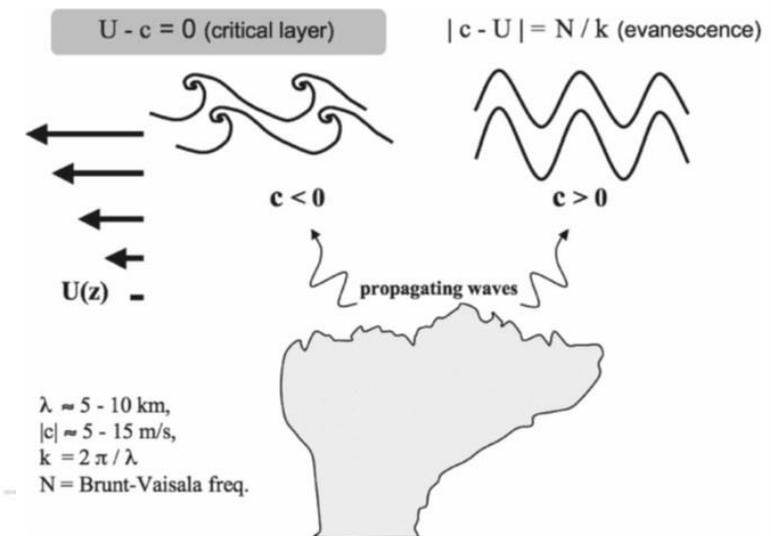
AEMET
Agencia Estatal de Meteorología



Esquema mostrando regiones de turbulencia en el entorno de nubes convectivas (sombreadas en rojo). Las zonas sombreadas en gris representan la nube convectiva y las líneas azules son las isentrópicas.

La TNT se considera responsable del 60 % de la turbulencia que origina los accidentes aéreos. (Cornman and Carmichael 1993). En otro estudio de Kaplan et al. (2005), 86 % de 44 accidentes de aviación ocurrieron dentro de los 100 km entorno a la convección.

Figura inferior: Esquema de propagación y ruptura de ondas de gravedad asociada a una cizalladura vertical del viento intensa sobre el tope de la convección profunda. Fuente: Lane y Sharman, 2008.



Turbulencia en y cerca de tormentas



GOBIERNO DE ESPAÑA

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

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología

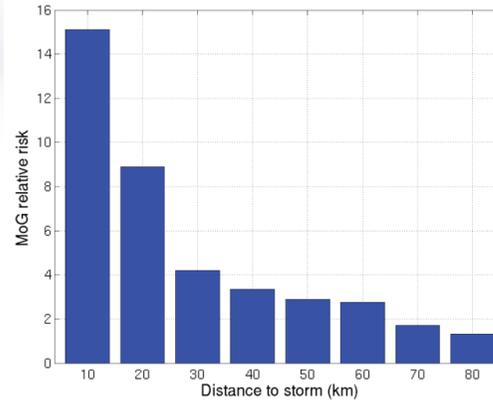
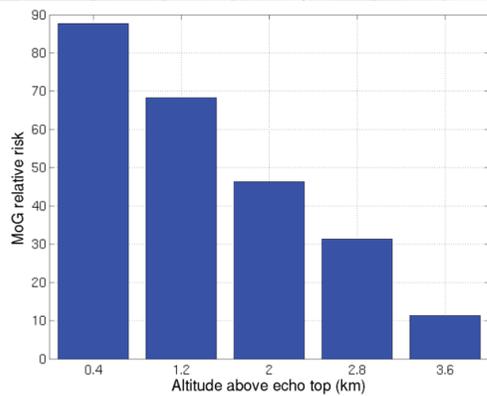
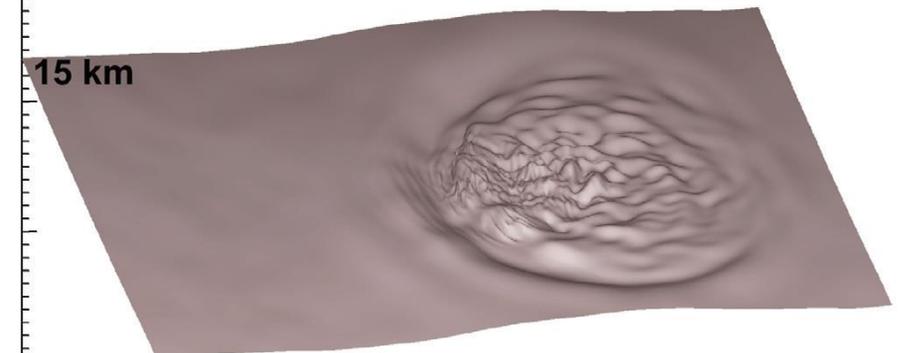


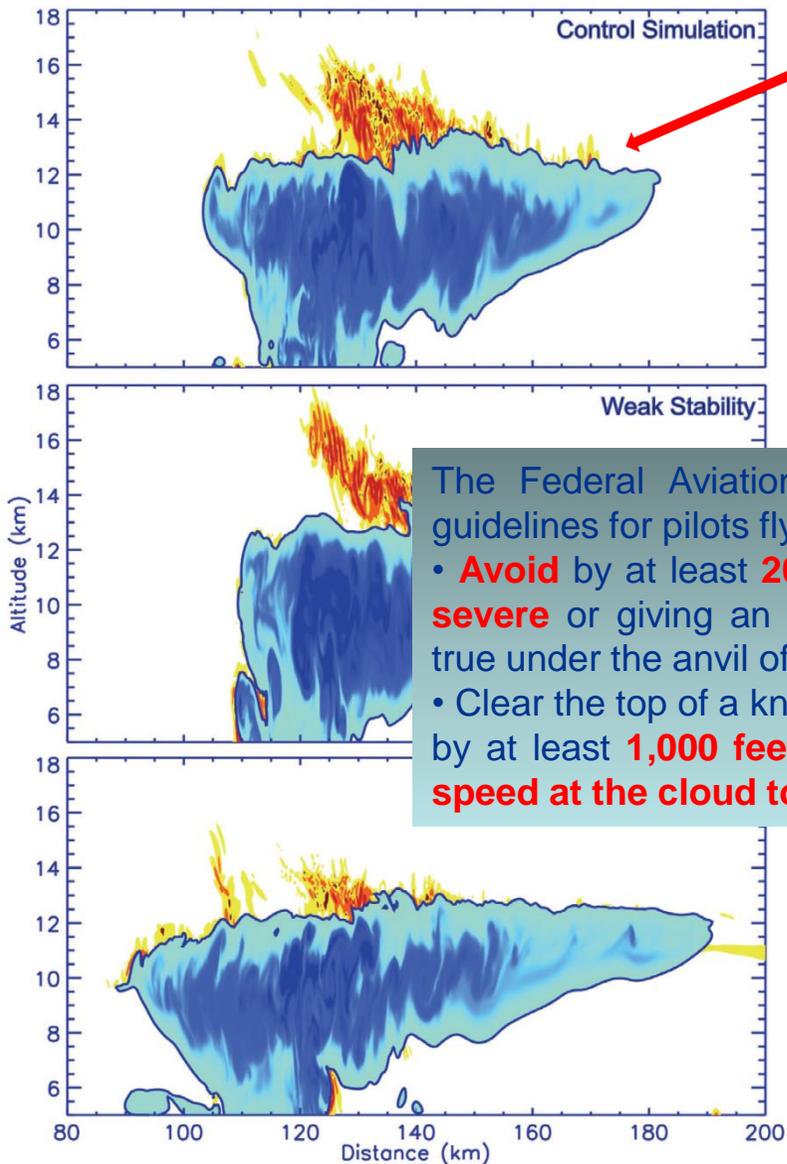
Fig. superior: Distribuciones de riesgo de encontrar turbulencia **moderada a fuerte** en función de la distancia vertical al tope del Cb (izq.) y la distancia lateral a la convección (der.). La distribución está basada en informes de turbulencia entre 7.6 y 12.8 km de altitud (25.000 a 42.000 pies) de mayo de 2004 a octubre de 2005.

Figura derecha: resultados de una simulación numérica tri-dimensional de una tormenta. Podemos ver el volumen de la nube que excede los 10 km de altitud y las superficies de temperatura potencial a 15 km y 20 km visualizándose las ondas de gravedad. Las dimensiones horizontales son 100 km x 50 km y el espaciado de malla es de 150 m.

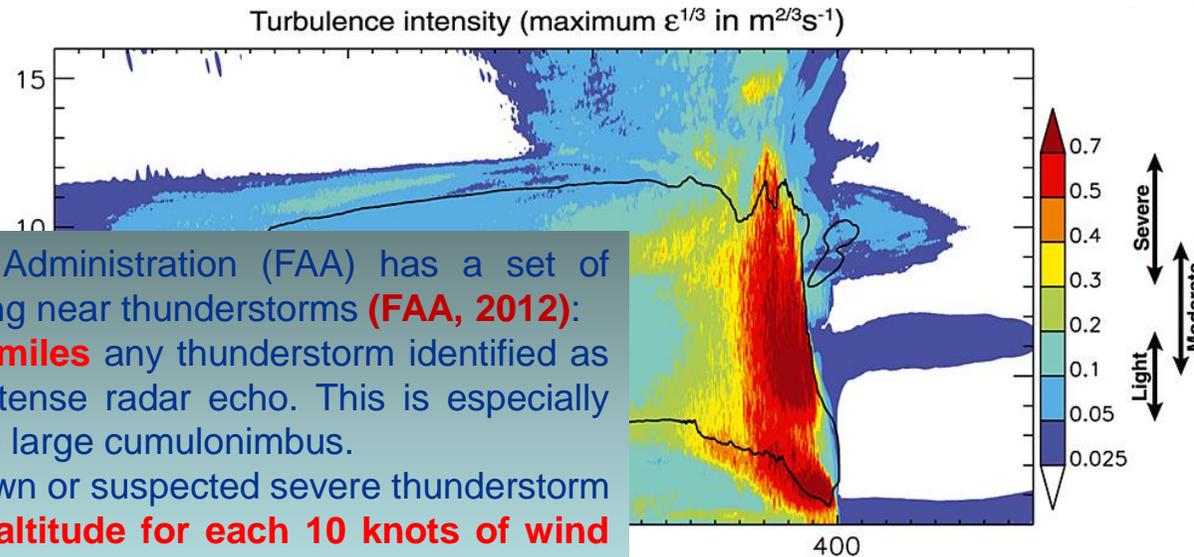


Las olas que emanan de la región activa de la tormenta se parecen mucho a las ondulaciones en un estanque. Su longitud de onda es demasiado grande (mayor de 10 km) para provocar una respuesta de turbulencia de un avión (100 m.). Sin embargo, estas ondas pueden romper y generar turbulencia.

Turbulencia en y cerca de tormentas



Resultados de tres simulaciones diferentes de turbulencia por encima de las tormentas. En tonos azules se representa la nubosidad y los tonos naranjas representan la intensidad de la turbulencia.



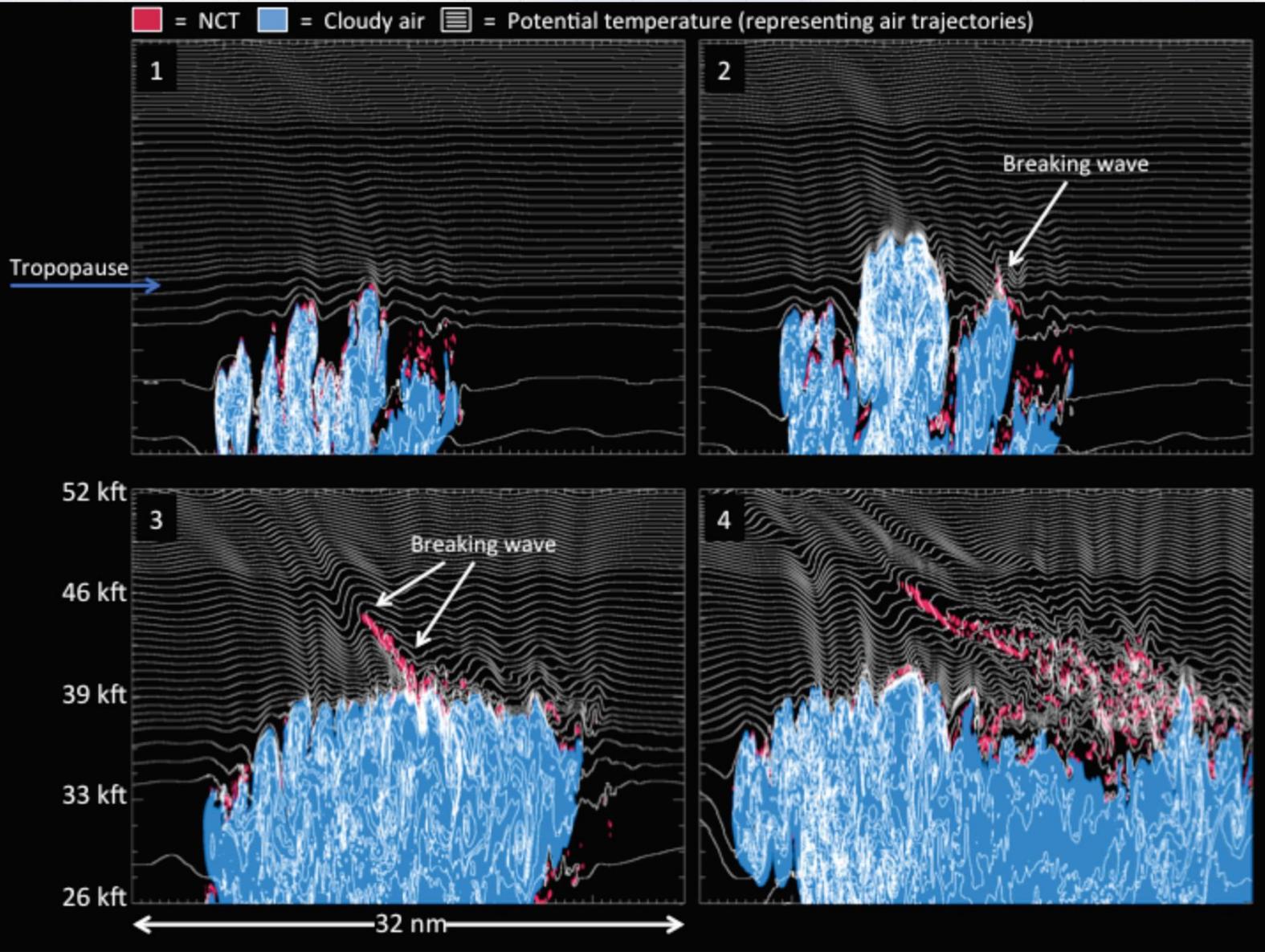
The Federal Aviation Administration (FAA) has a set of guidelines for pilots flying near thunderstorms (FAA, 2012):

- **Avoid** by at least **20 miles** any thunderstorm identified as **severe** or giving an intense radar echo. This is especially true under the anvil of a large cumulonimbus.
- Clear the top of a known or suspected severe thunderstorm by at least **1,000 feet altitude for each 10 knots of wind speed at the cloud top.**

Se identifican ubicaciones fuera de la nube que son más turbulentas que algunas ubicaciones dentro de la nube.

Hay una **distribución asimétrica lateral** de la turbulencia anisotrópica tridimensional que se extiende a más de 50 km desde el límite de la nube y al menos 5 km por encima de la tormenta, mucho más allá de las pautas de la industria de la aviación [FAA, 2012].

Turbulencia en y cerca de tormentas



Simulación 2-D con ondas de gravedad que se desarrollan pronto. Un avión volando al nivel de la tropopausa FL390 asume un elevado riesgo de encontrar turbulencia.

En 2 podemos ver como las ondas se propagan hacia arriba y rompen generando turbulencia incluso a 47.000 pies de altitud.

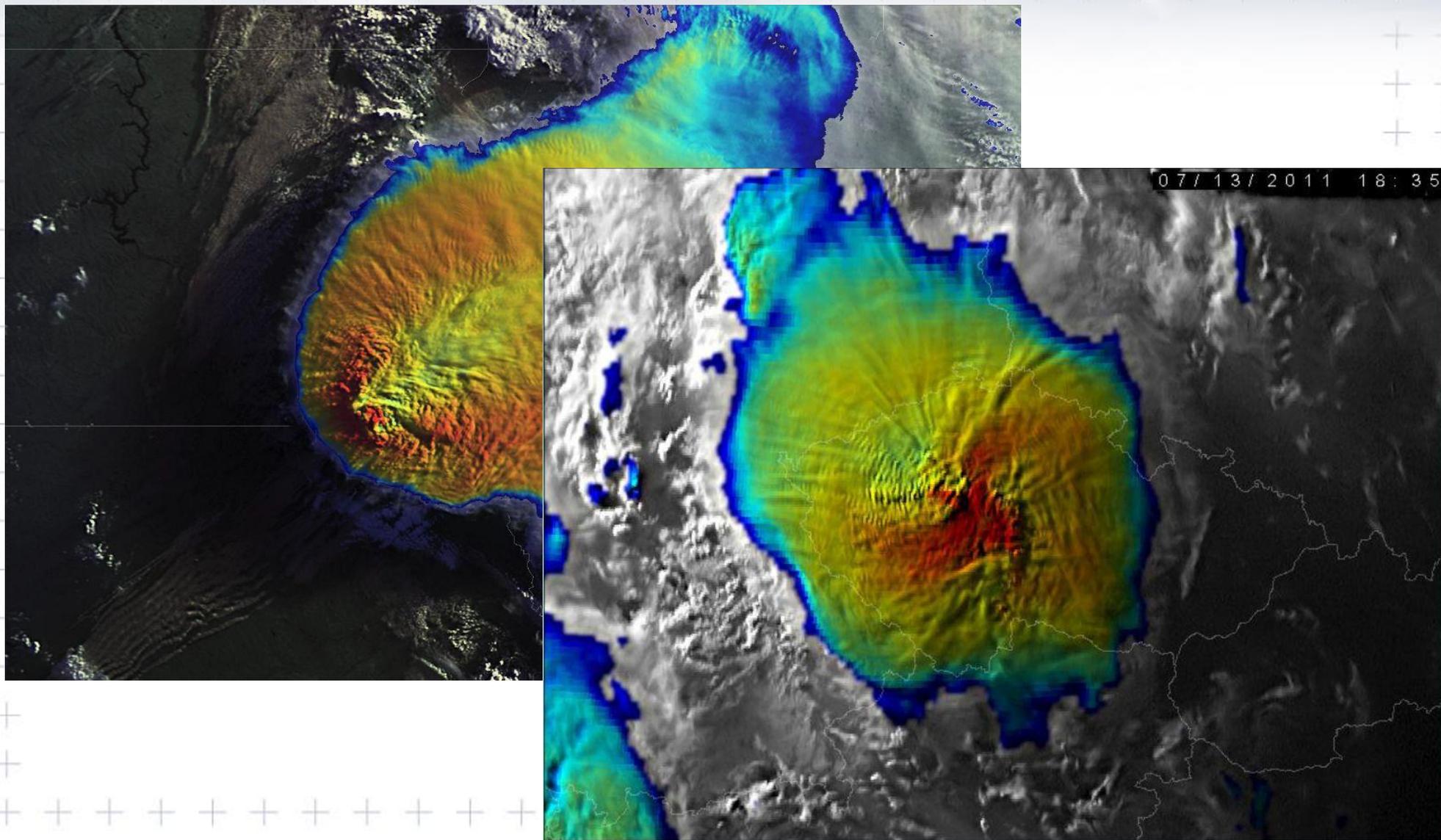
Ondas de gravedad en el tope de SCM



GOBIERNO DE ESPAÑA

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

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología



Ejemplo de propagación de ondas-I

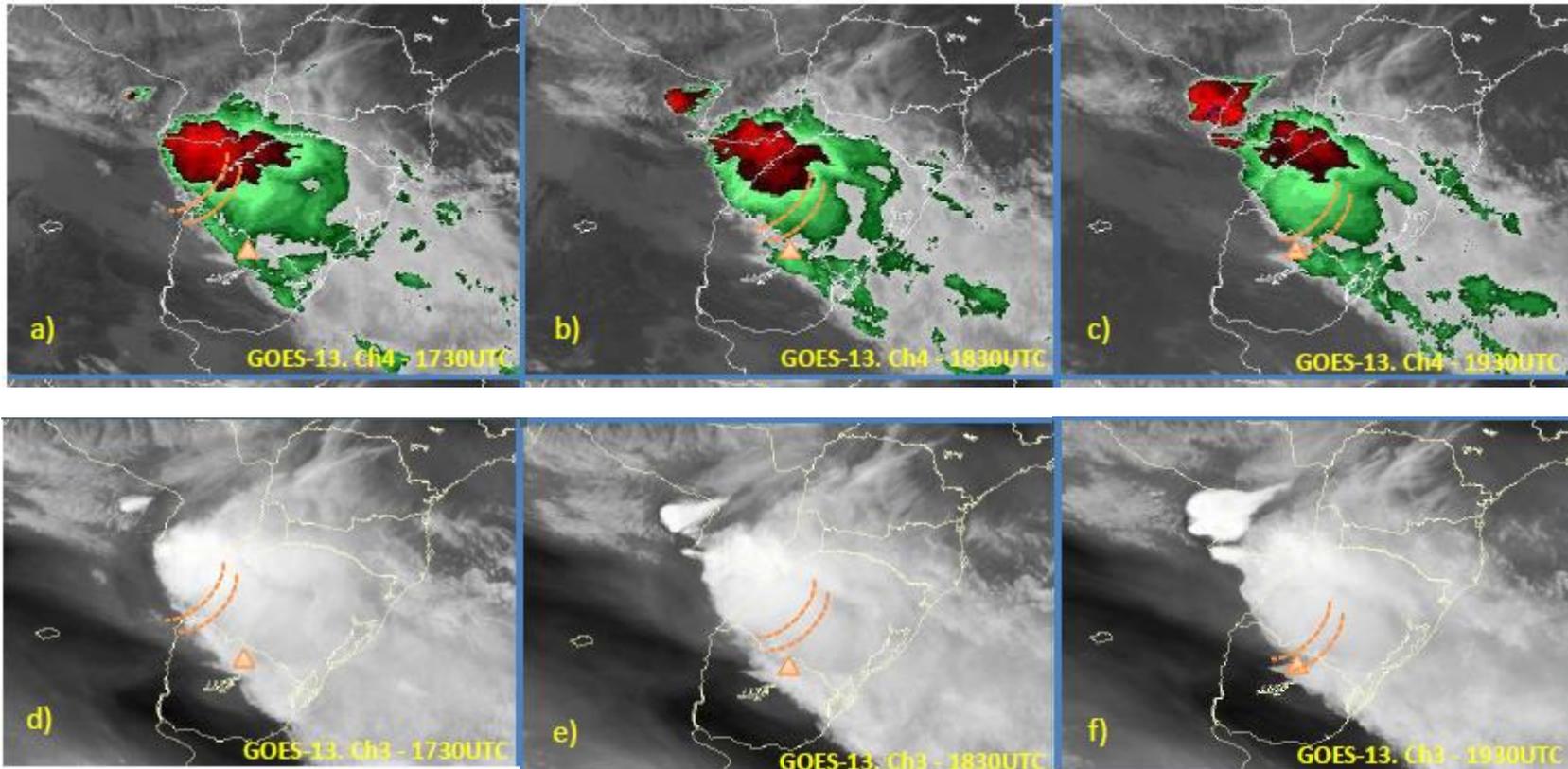


GOBIERNO DE ESPAÑA

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

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología

ARS: vuelo AR1219 del día 04/05/2014 en la ruta Porto Alegre – Aeroparque registró **turbulencia severa** a las 19:40 UTC en FL380 con variaciones de viento de 300/110 KT a 300/55 KT y temperatura de -28°C a -33°C en 10s (B737-700) sobre 31°24'12"S-055°09'40"W.



ANÁLISIS DEL ENTORNO SINÓPTICO ASOCIADO A TURBULENCIA EN AIRE CLARO INDUCIDA SOBRE EL VUELO AR1219 Nicolás Rivaben^{1,2} - Claudia M. Campetella^{1,2} ¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN-UBA) – ²Servicio Meteorológico Nacional (SMN) – Min. Defensa de la Nación nrivaben@smn.gov.ar

- *Turbulence: A new perspective for pilots. Peter F. Lester. Jeppesen.*
- *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes P. Markowski, Y. Richardson, Wiley-Blackwell, 2010*
- *Images in Weather Forecasting M.J. Bader, Cambridge University Press, 1995*
- *Manual of Synoptic Satellite Meteorology Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)*
- *Clear Air Turbulence (CAT) Tutorial de Eumetrain, 2013*
- *Meteorological Techniques Air Force Weather Agency, 1998*
- *Aviation Hazards (WMO N°1390) World Meteorological Organization, 2018*

Gracias por su atención