



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

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

Aemet  
Agencia Estatal de Meteorología



# TURBULENCIA

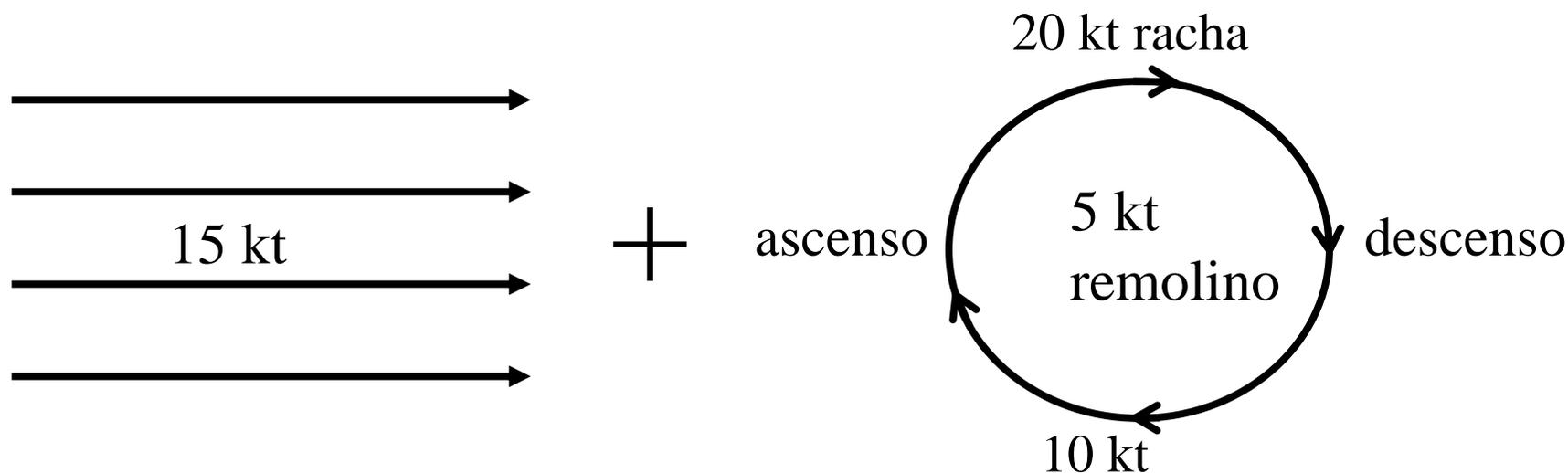
J. Manuel López Pérez  
jolopezp@aemet.es

# ÍNDICE

- Intensidad de la turbulencia
- ¿Dónde suele aparecer la turbulencia?
- Clasificación de la turbulencia
- Factores y áreas donde es más probable.
- Turbulencia mecánica
- Turbulencia orográfica
- Capas estables. Inversión nocturna.
- Cizalladura en la capa límite.
- Inestabilidad de K-H.
- Capas estables elevadas
- Turbulencia en superficies frontales
- Turbulencia en un frente dividido
- Mecanismos causantes de la TAC
- Corrientes en chorro
- TAC, calculando su potencial
- Intensidad de la turbulencia en relación con la cizalladura en niveles medio-altos
- TAC: rasgos turbulentos en imágenes: bandas, scallops, jet fibres, billows.
- Predicción: mapas WAFs,  $C_H$ ,  $C_V$ , deformación, hodógrafo e índices (TI1, TI2).
- Resumen de predicción.

## 2.- INTRODUCCIÓN: turbulencia atmosférica

- 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.- INTRODUCCIÓN: 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.- INTRODUCCIÓN: 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**.

### 3.- EFECTOS SOBRE LAS AERONAVES

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

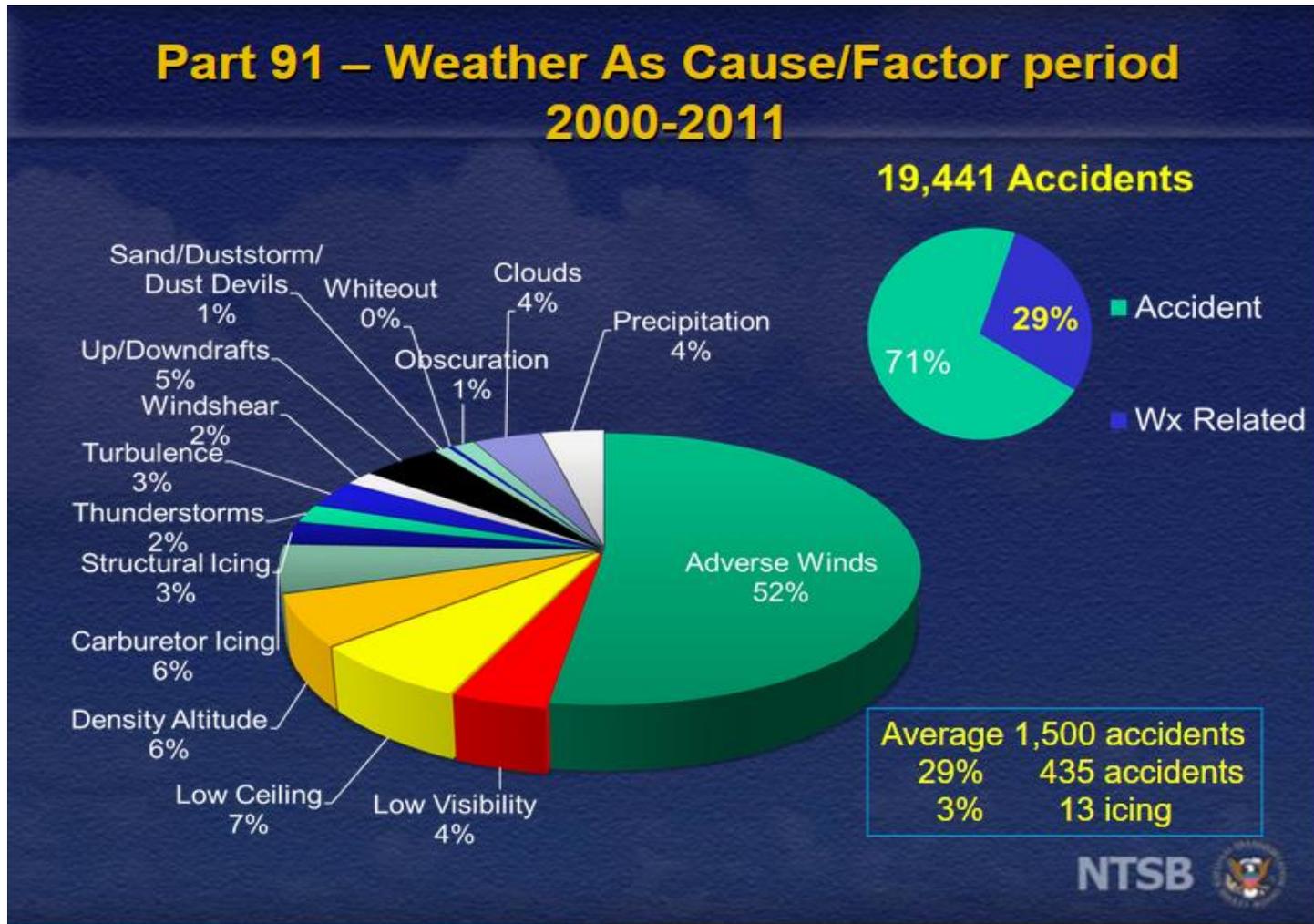
#### **Pilotos:**

- 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.

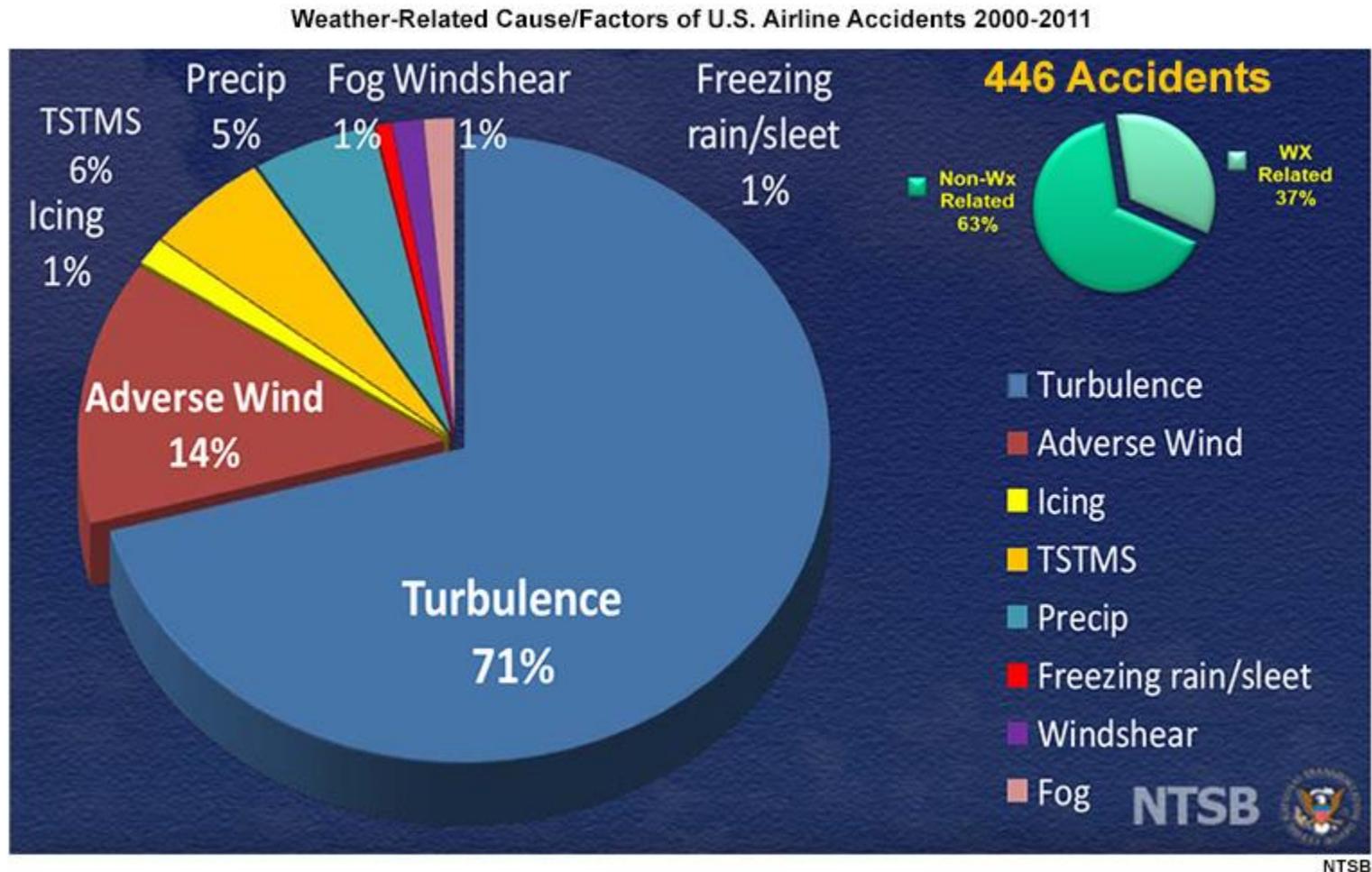
### 3.- EFECTOS SOBRE LAS AERONAVES



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

<https://youtu.be/-q1qtaOP6hE>

### 3.- EFECTOS SOBRE LAS AERONAVES



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	EFFECTOS
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.

## ¿Dónde suele aparecer la turbulencia ...?

**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 ...?

**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  $> 1\text{hPa/h}$ .

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

Aparece en las siguientes situaciones:

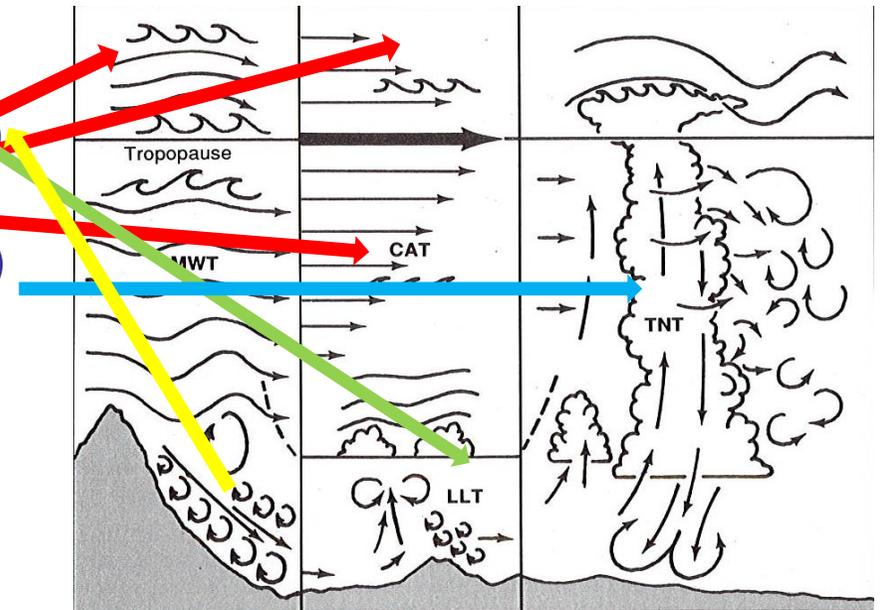
- En tormentas severas, especialmente en líneas de turbonada.
- En onda de montaña, cerca de la nube rotor.

## 6.- CLASIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA

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 y áreas donde es más probable

### **Factores que acentúan la probabilidad de turbulencia:**

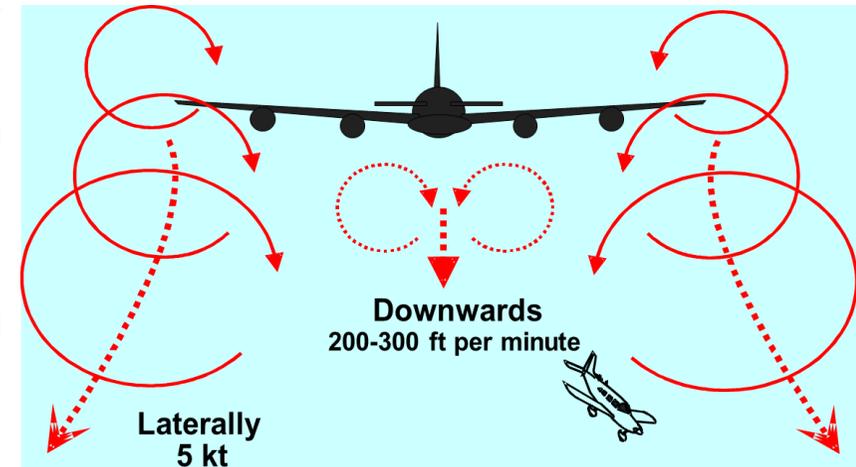
- *Corrientes en chorro en altura.*
- *Gradiente de temperatura horizontal y vertical.*
- *Cizalladura horizontal y vertical ( $C_H$  y  $C_V$ )*
- *Ondas de gravedad*
- *Terreno abrupto*

### **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.*

# TURBULENCIA DE ESTELA

- Es el único tipo de turbulencia que no tiene un origen meteorológico.
- Cada avión genera dos vórtices contrarotantes en las puntas de las alas que permanecen en la estela de la aeronave.
- Se produce cuando un avión encuentra vórtices de otro avión que le precede.
- 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.



## Turbulencia mecánica

- 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 terreno llano, la racha máxima es 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.*

# Turbulencia mecánica

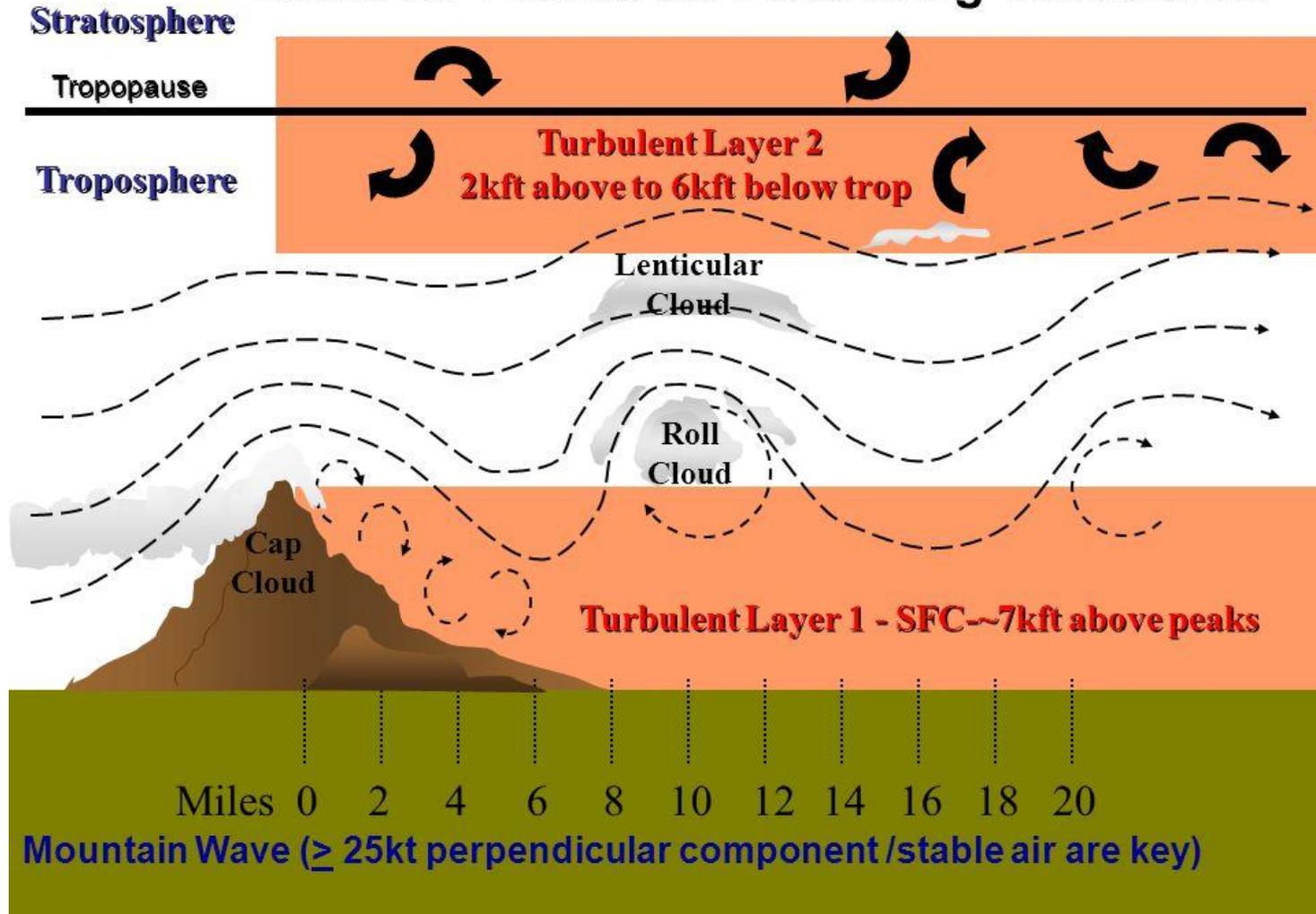
## *Criterios de turbulencia mecánica en superficie (GPV Valencia)*

Turbulencia moderada en superficie			
Superficie	Mar	Terreno llano	Montaña
Viento medio	<b>30kt</b>	<b>20kt</b>	<b>15kt</b>
Viento medio y rachas	<b>25kt racha&gt;35kt</b>	<b>15kt racha&gt;25kt</b>	<b>10kt racha&gt;20kt</b>

Turbulencia severa en superficie			
Superficie	Mar	Terreno llano	Montaña
Viento medio	<b>40kt</b>	<b>35kt</b>	<b>30kt</b>
Viento medio y rachas	<b>35kt racha&gt;45kt</b>	<b>30kt racha&gt;40kt</b>	<b>25kt racha&gt;35kt</b>

# Turbulencia orográfica

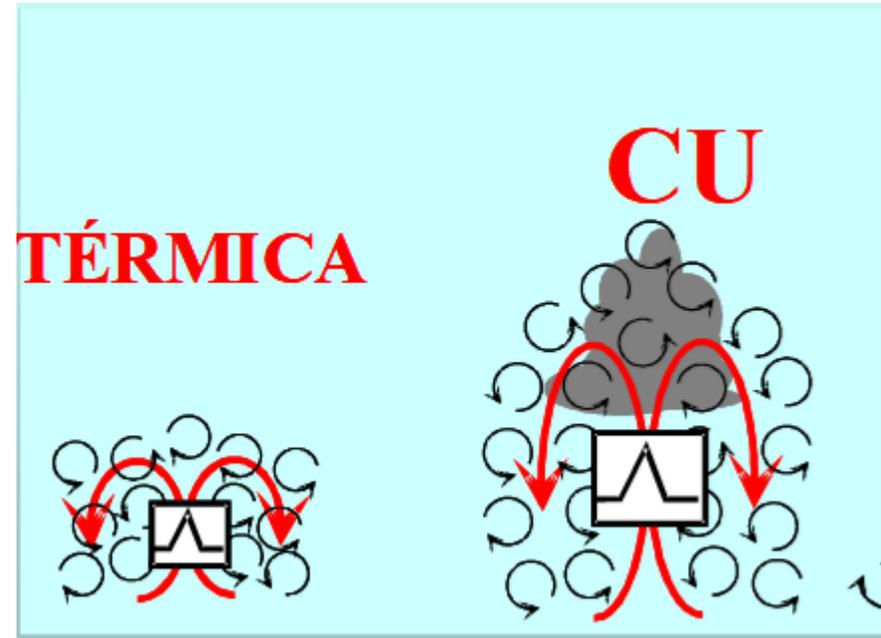
## Rules of Thumb for Predicting Turbulence



Zonas turbulentas en situaciones de onda de montaña. Fuente: The COMET Program.

# Turbulencia térmica: convección seca

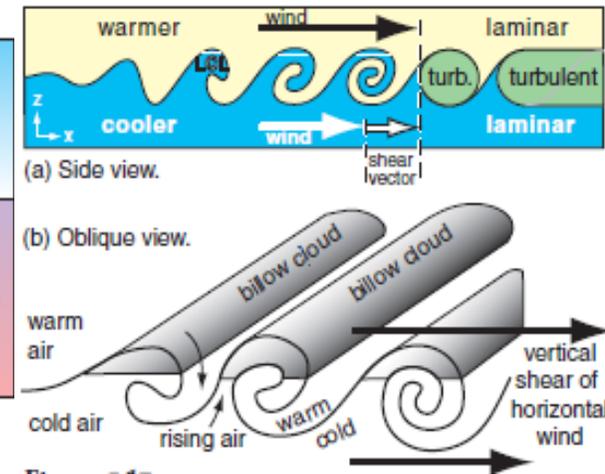
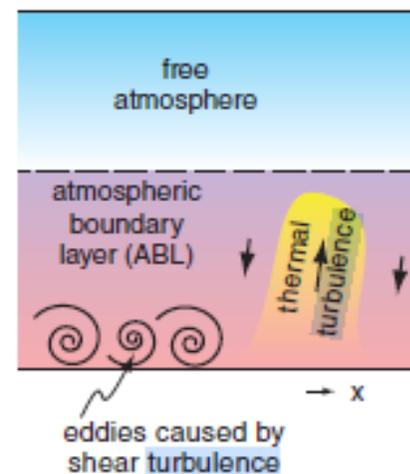
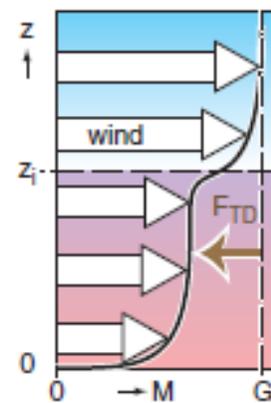
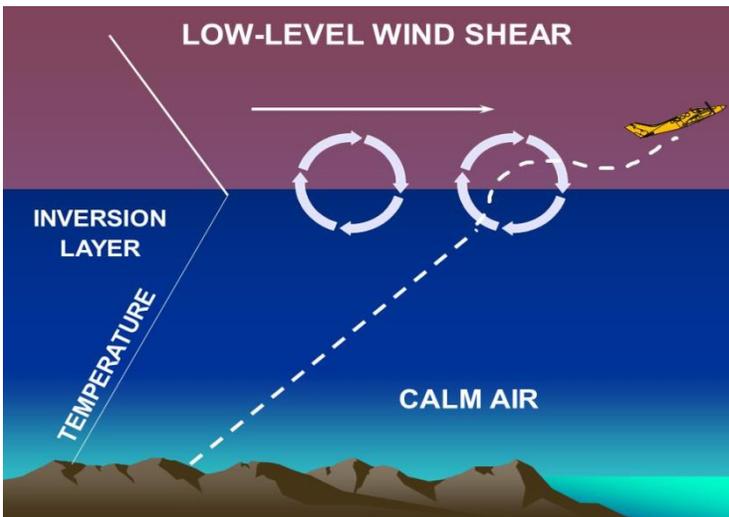
- La convección seca (con cielo despejado o cúmulos de buen tiempo) se desarrolla en la capa límite (ABL).
- Los cúmulos se forman en las zonas de ascenso de las burbujas de aire calentado en contacto con el suelo (térmicas).
- Las térmicas se forman en la capa superficial de la ABL, crecen y se desarrollan 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.

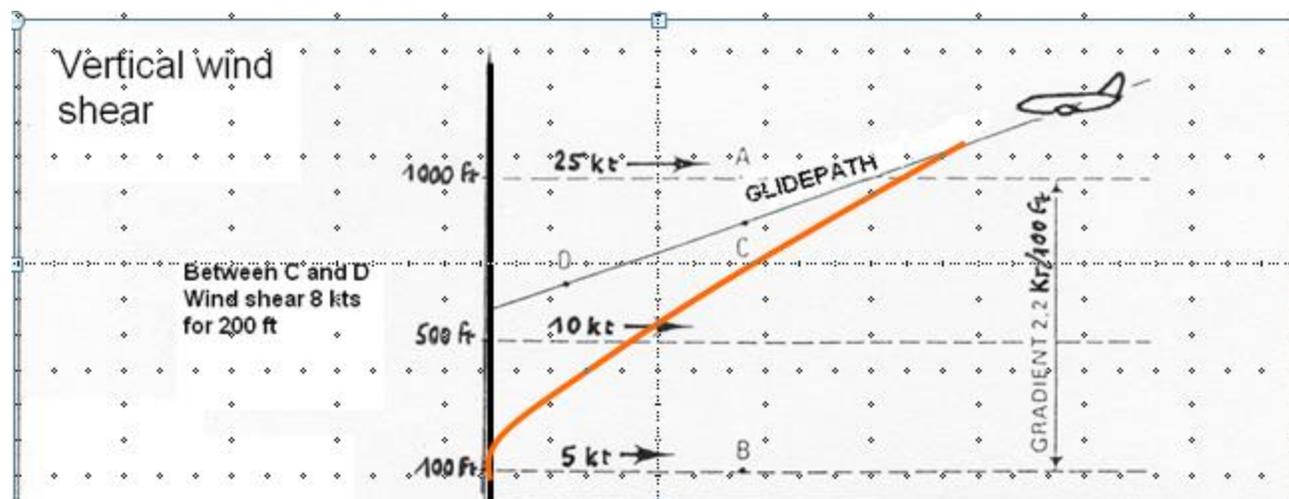
# Capas estables: inversión nocturna

- 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.



# Cizalladura en la capa límite

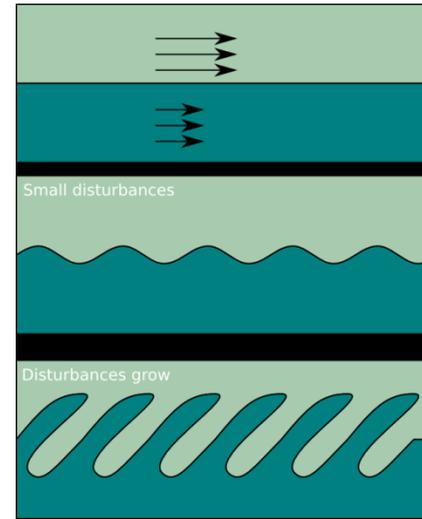
- La cizalladura en la capa límite tiene dos importantes impactos en el vuelo:
- Causar turbulencia esporádica en parches por amplificación y rotura de ondas de g-c.
- Originar cizalladura de niveles bajos (LLWS) que es crítica en los despegues y aterrizajes en la senda de aproximación a menos de 1600 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

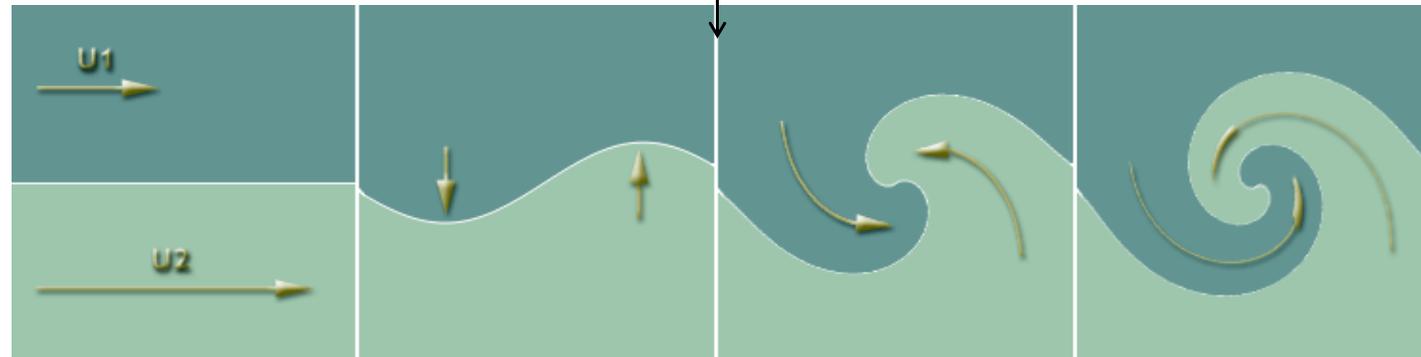
- La inestabilidad de Kelvin-Hemholtz (K-H) ocurre cuando existe  $C_V$  en la interfaz de dos fluidos o dentro de un fluido continuo.
- Aparecen los “billows” o nubes de marea.



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



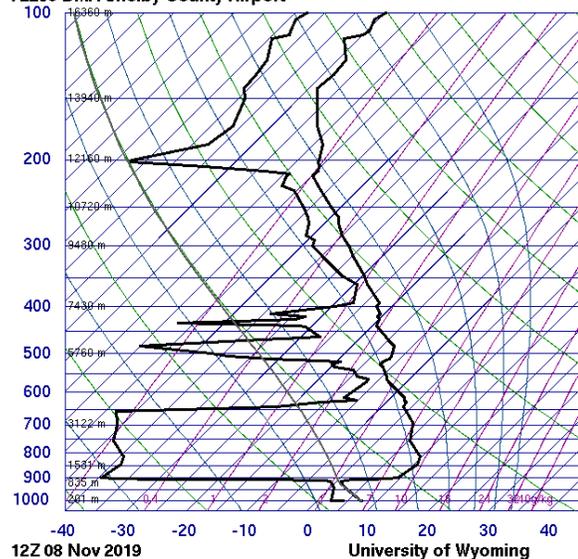
$$\frac{\partial v}{\partial z} < 0$$



# Inestabilidad KH-billows



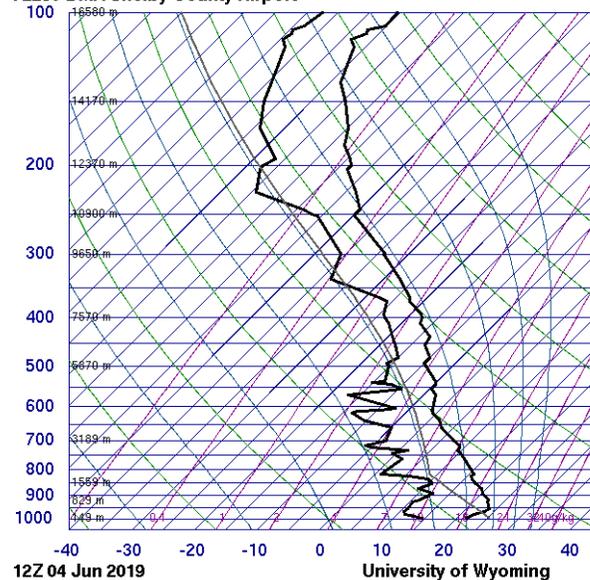
72230 BMX Shelby County Airport



SLAT	33.16
SLON	-86.76
SELV	178.0
SHOW	18.56
LIFT	22.09
LFTV	22.06
SWET	90.02
KINX	-65.1
CTOT	-28.5
VTOT	22.50
TOTL	-4.00
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EGLV	-9999
EGTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	273.9
LCLP	322.9
MLTH	280.3
MLMR	4.42
THCK	5559
PWAT	8.76

2

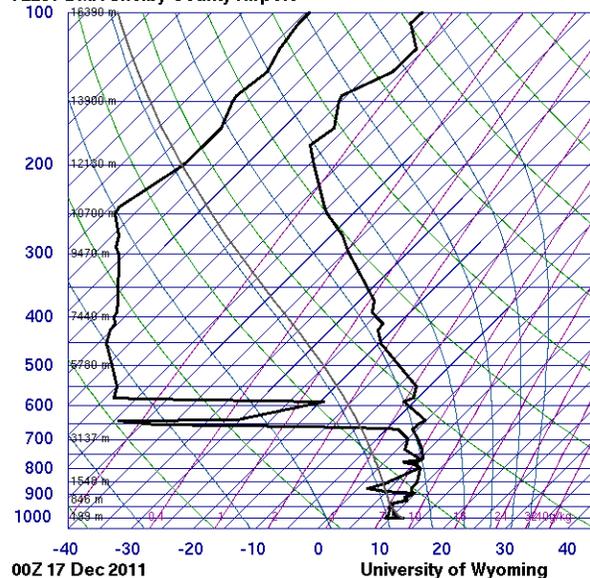
72230 BMX Shelby County Airport



SLAT	33.16
SLON	-86.76
SELV	178.0
SHOW	0.94
LIFT	4.80
LFTV	4.77
SWET	191.8
KINX	25.90
CTOT	19.50
VTOT	28.50
TOTL	46.00
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EGLV	-9999
EGTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	282.0
LCLP	817.1
MLTH	298.7
MLMR	8.84
THCK	5721
PWAT	31.48

1

72230 BMX Shelby County Airport

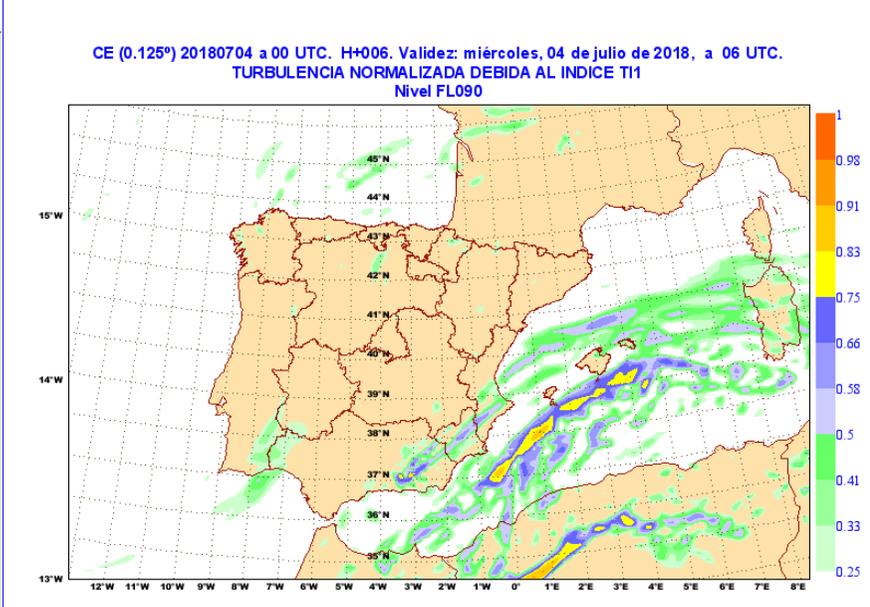
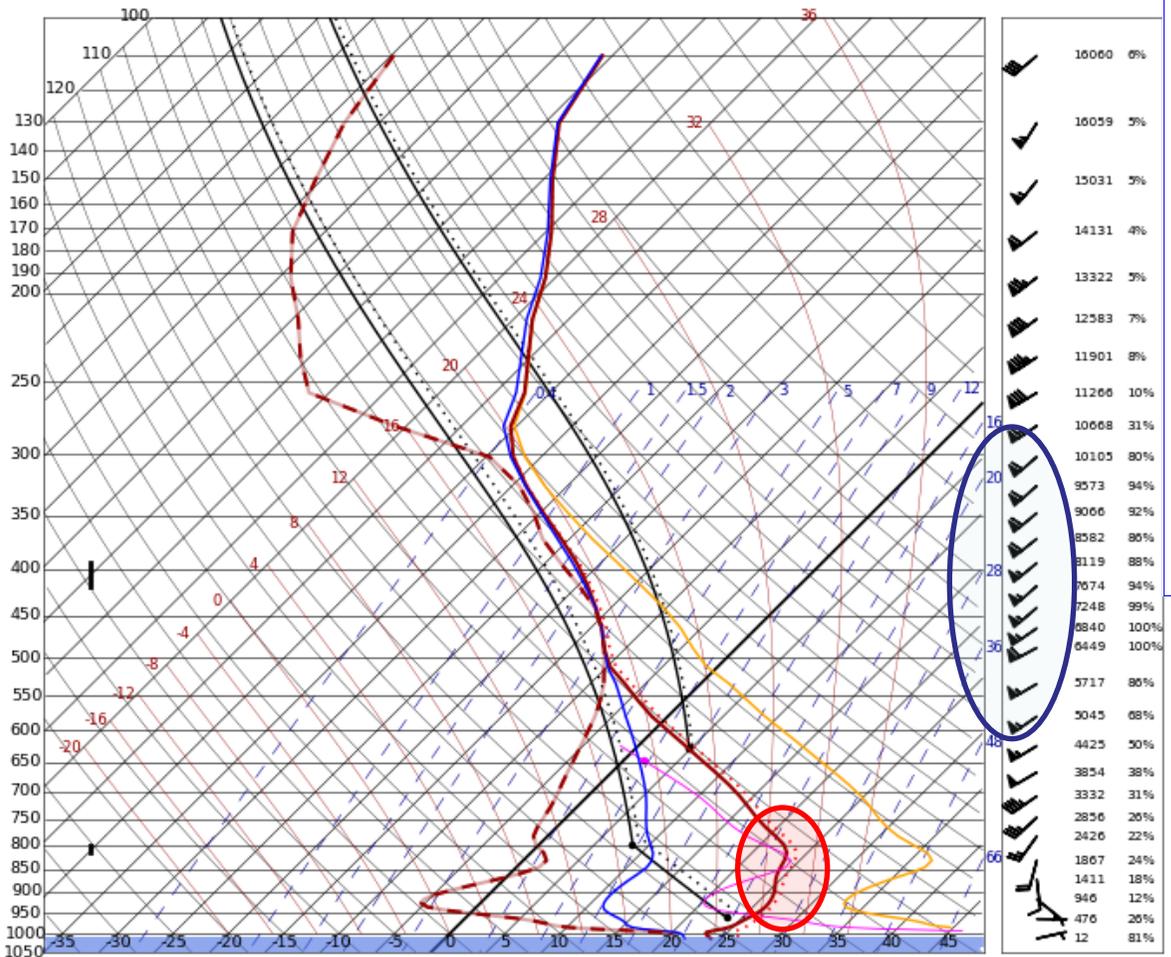


SLAT	33.16
SLON	-86.76
SELV	178.0
SHOW	7.72
LIFT	12.21
LFTV	12.07
SWET	147.6
KINX	23.60
CTOT	18.90
VTOT	21.50
TOTL	38.40
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EGLV	-9999
EGTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	281.7
LCLP	962.0
MLTH	284.8
MLMR	7.34
THCK	5581
PWAT	23.51

3

Elegir el sondeo representativo de la imagen

# 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

CAPE	
CIN	
SBCAPE	860.9
SBCIN	852.2
Temperatura virtual	
NE	
NCL <sub>0</sub>	
NCA <sub>0</sub>	782.6
TNCA <sub>0</sub>	8.2
NCC <sub>0</sub>	623.2
TCC <sub>0</sub>	4.8
TDIS <sub>0</sub>	46.2
CAPE <sub>0</sub>	
CAPE <sub>1</sub>	
CIN <sub>0</sub>	

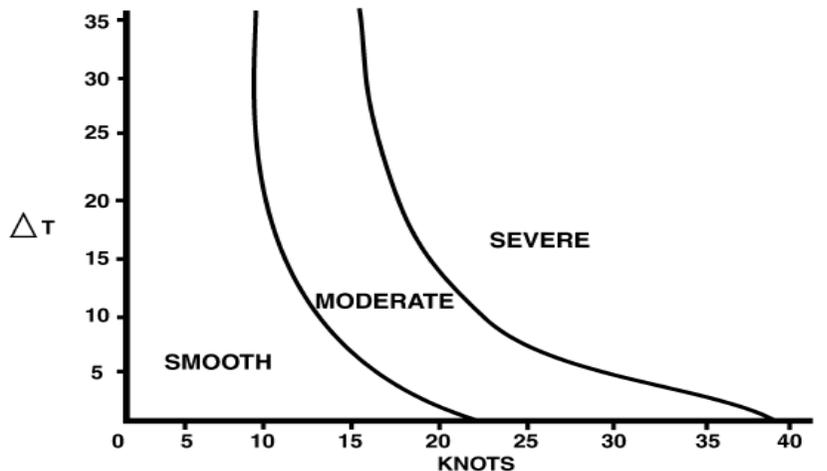
— Z<sub>0</sub>  
— Z<sub>10</sub>  
— Z<sub>20</sub>  
- - - Z<sub>30</sub>  
- - - Z<sub>40</sub>  
- - - Z<sub>50</sub>  
- - - Z<sub>60</sub>

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.

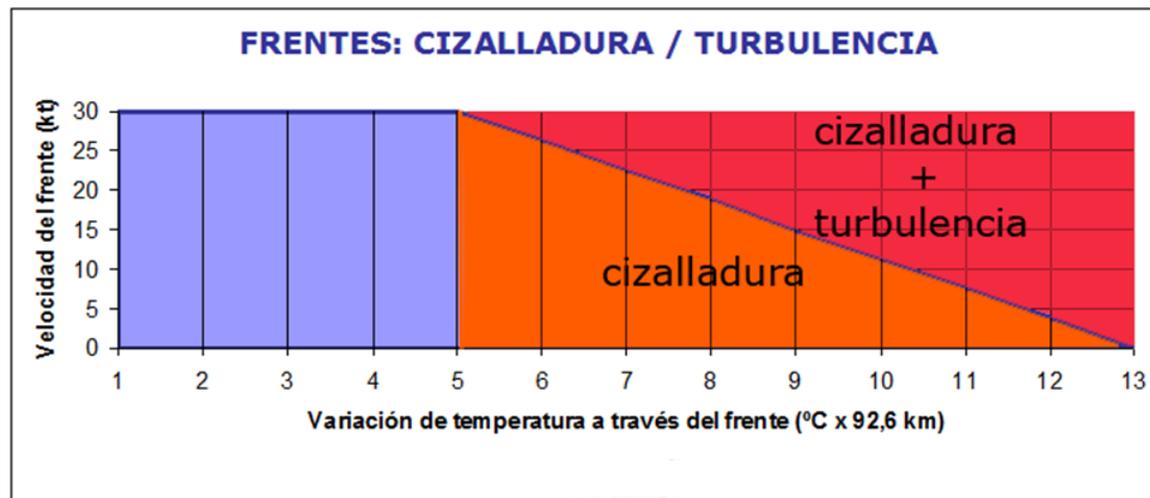
# Turbulencia en superficies frontales

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  $10^{\circ}$  F por 50 millas ( $\sim 5^{\circ}$  C/100 km) llevará asociada LLT moderada o fuerte.



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



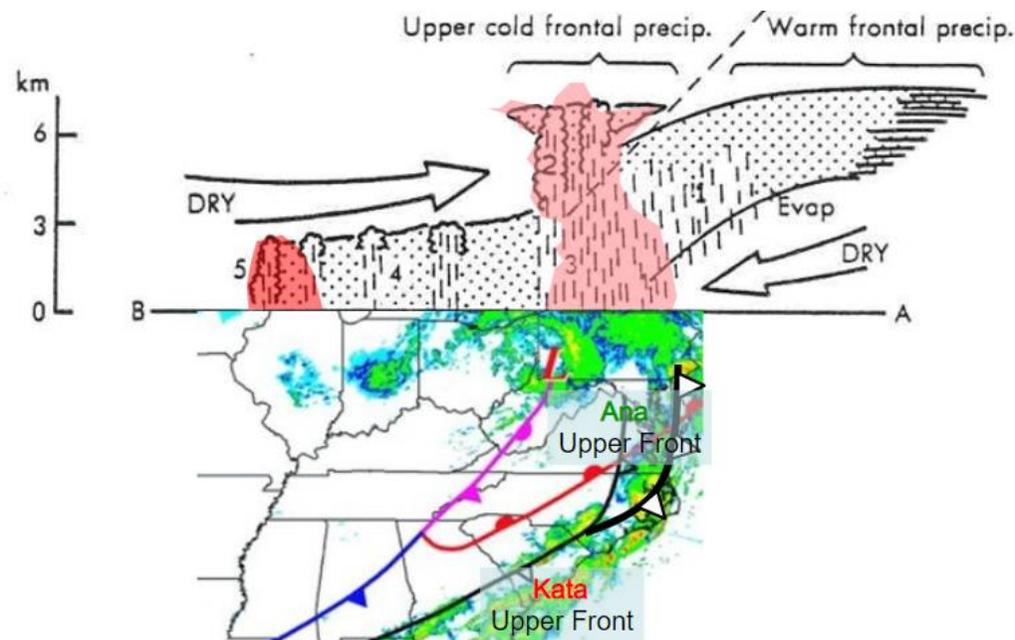
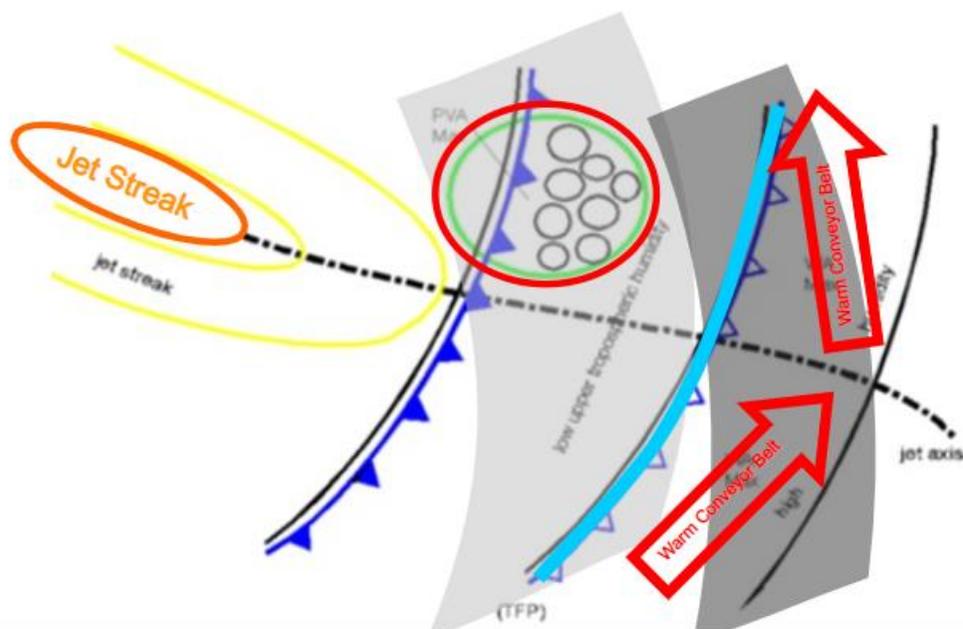
*Turbulencia asociada al paso de un frente.*

*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.*

# Turbulencia en un split front



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

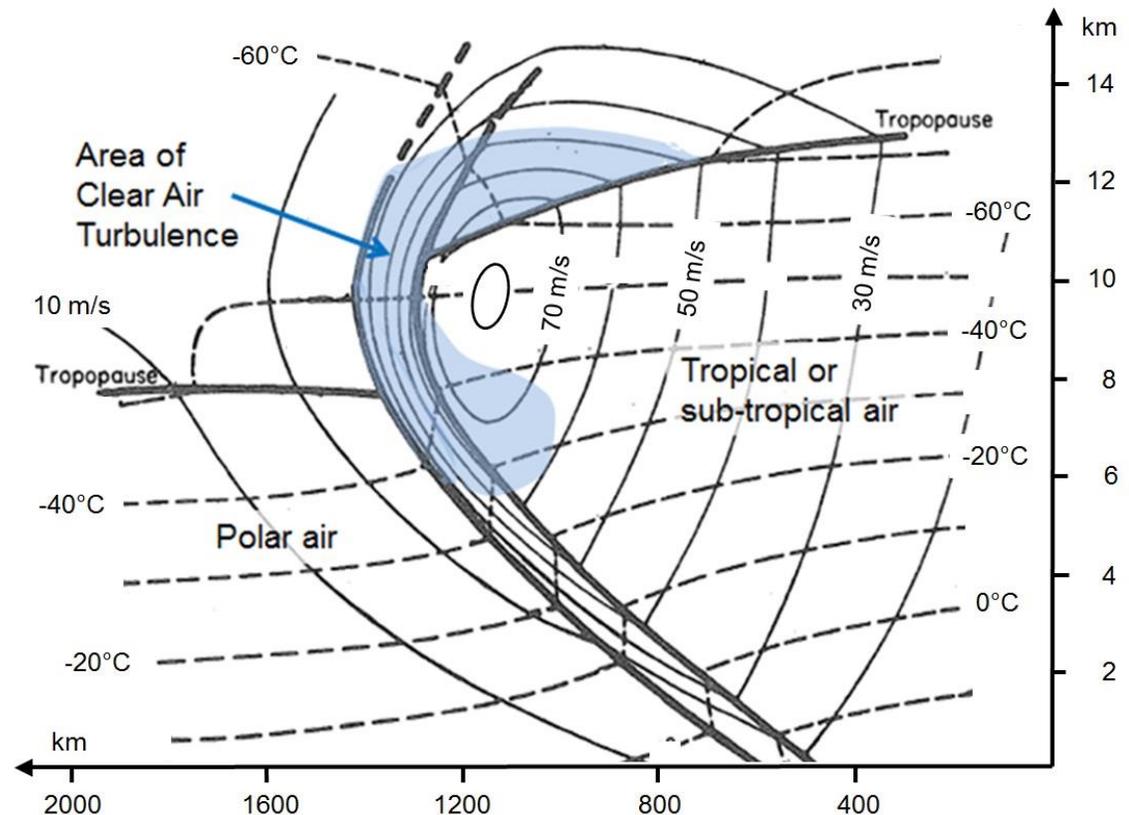
- La **LLT** asociada a un frente frío sobre terreno llano se extiende unas **200 millas náuticas por delante del frente**. Hay LLT en ambos lados del frente. El período crítico de peligro de **LLWS** es de **1 a 3 horas después del paso del frente frío** y hasta **6 horas antes del paso del cálido** (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.

## Mecanismos causantes de la TAC

- **Forzamiento a escala sinóptica:** principalmente se observan en zonas de viento máximo (jet streaks), en las corrientes en chorro. Un 60 % de casos de TAC están ligadas a él.  
Es más frecuente en zonas con marcada **deformación** y **convergencia** que originan un aumento de los gradientes térmicos horizontales y por tanto incrementan la  $C_V$ .
- **Mesoescala:** las ondas cortas (< 2000 km) y móviles en altura con pronunciados giros de viento cerca del eje de la vaguada y con marcadas advecciones térmicas.
- **Microescala:** torbellinos de pequeña escala (< 100 m) como resultado de **ondas de gravedad-cizalladura**, que se vuelven inestables al aumentar la amplitud y rompen.

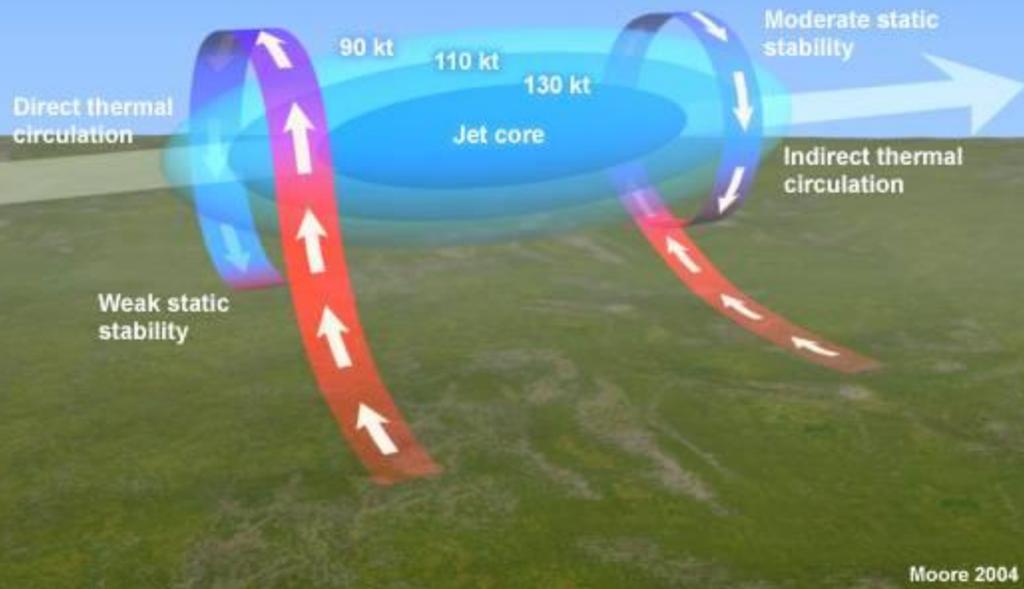
# Corrientes en chorro

- 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.

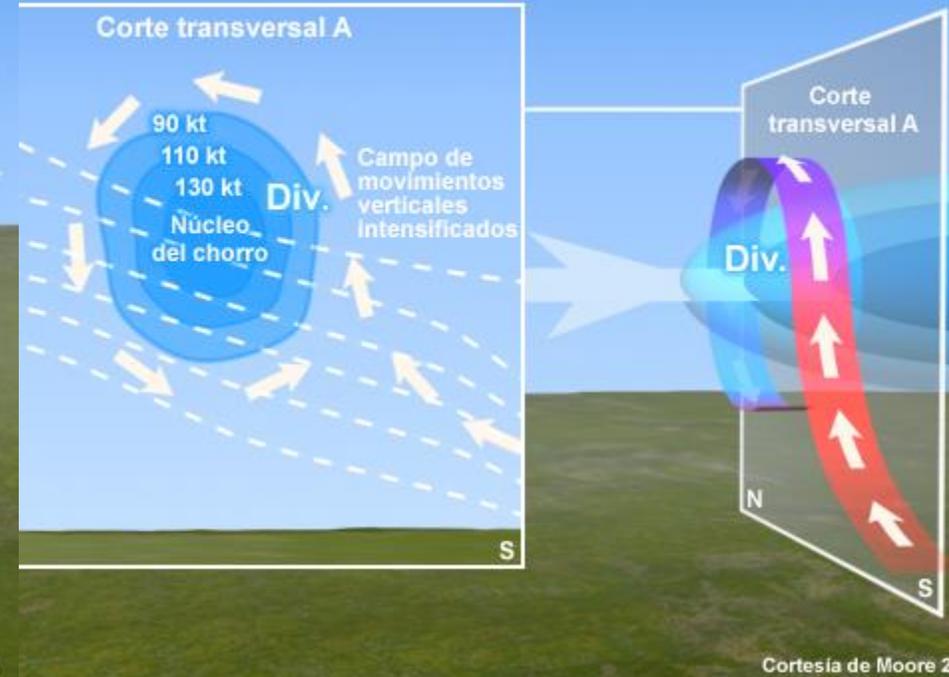


# Teoría de los cuatro cuadrantes

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

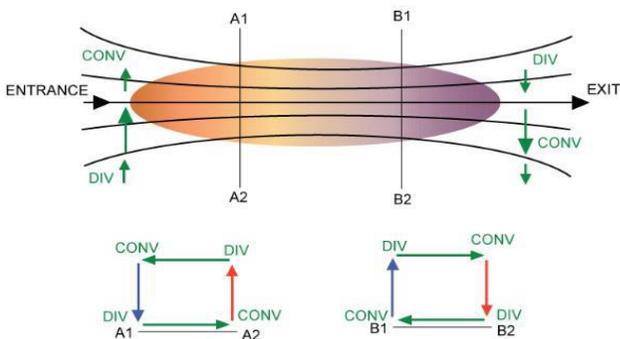


Dinámica de la zona de entrada de la corriente en chorro



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

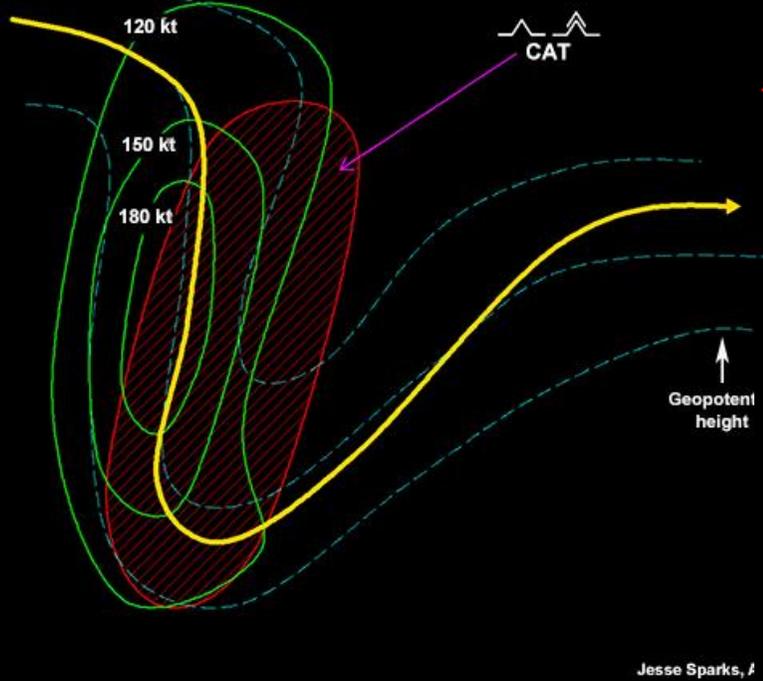
## 11.- TAC: calculando su potencial

### Corrientes en chorro y tropopausas:

- Máximos de viento en el chorro superiores a 110 kt son candidatos a tener áreas de TAC significativa, especialmente:
  - Sobre la tropopausa subtropical
  - En el frente del chorro (1/3 de la distancia eje-superficie).
  - En los máximos de viento, especialmente delante y a la derecha (zona de desaceleración con circulación indirecta).
- TAC es mínima en el eje del chorro.
- La probabilidad de TAC moderada a fuerte es mayor con la tropopausa alta (> 34.000 pies).
- Mayor probabilidad de TAC en el sector NE de un ciclón en desarrollo en superficie (por delante del frente cálido).

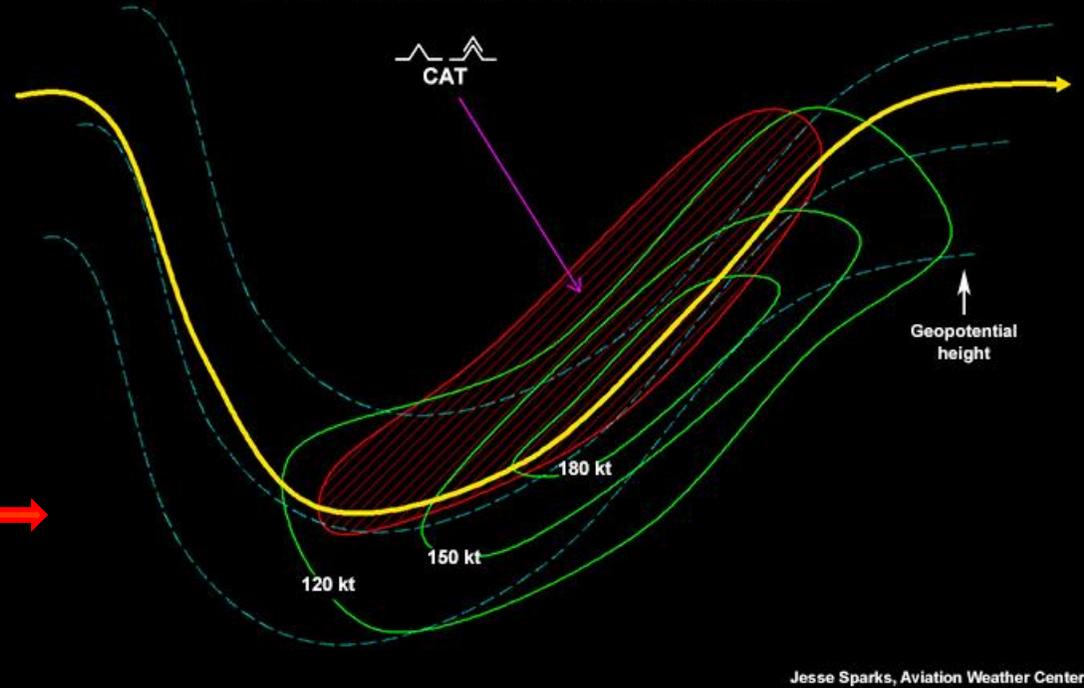
# TAC: calculando su potencial

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



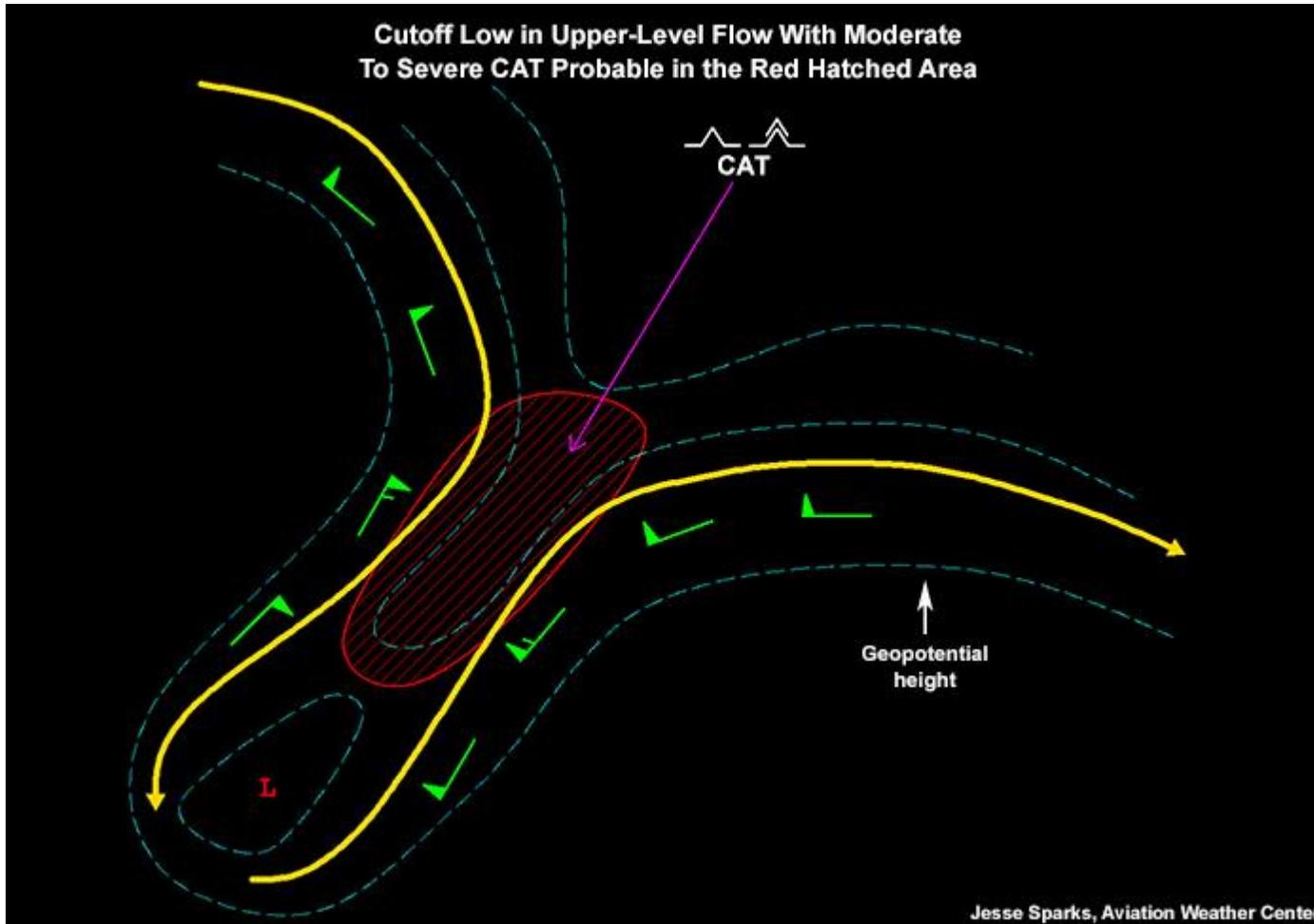
Patrón de TAC en una vaguada estrecha. COMET Program

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



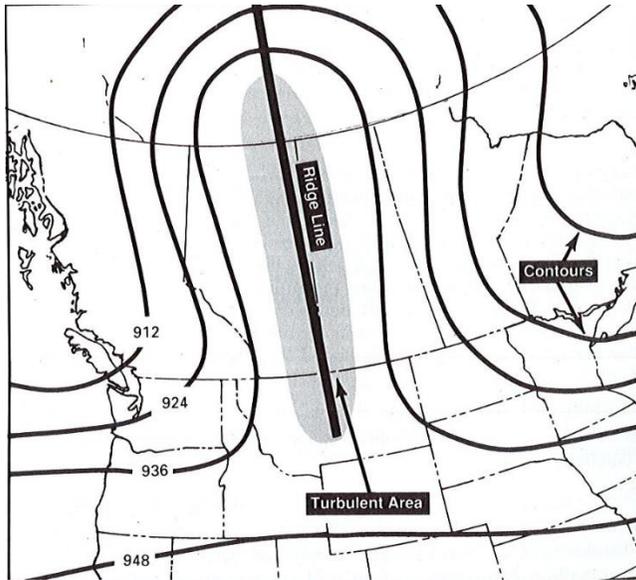
Patrón de TAC en una vaguada ancha. COMET Program

# TAC: calculando su potencial



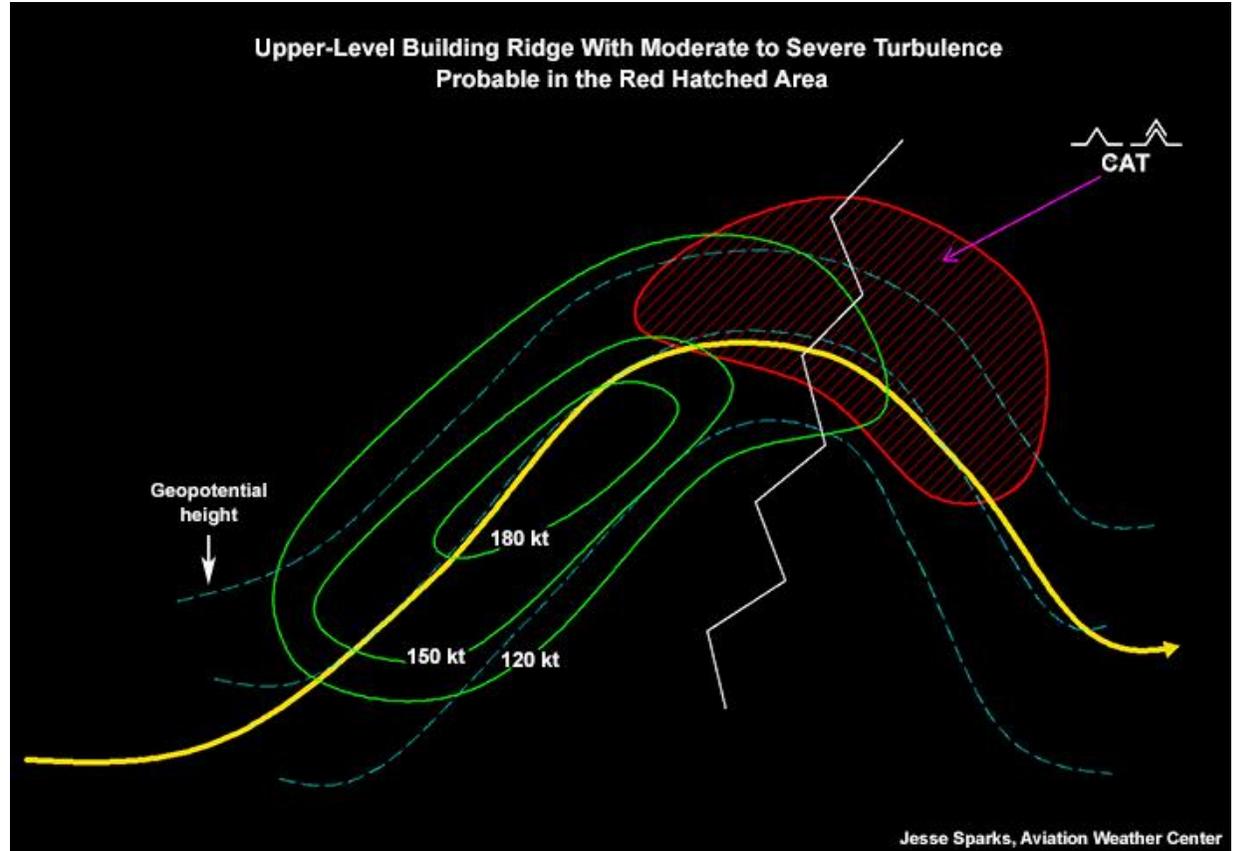
En la zona de ruptura (cut off) de la formación de DANA's.

# TAC: calculando su potencial



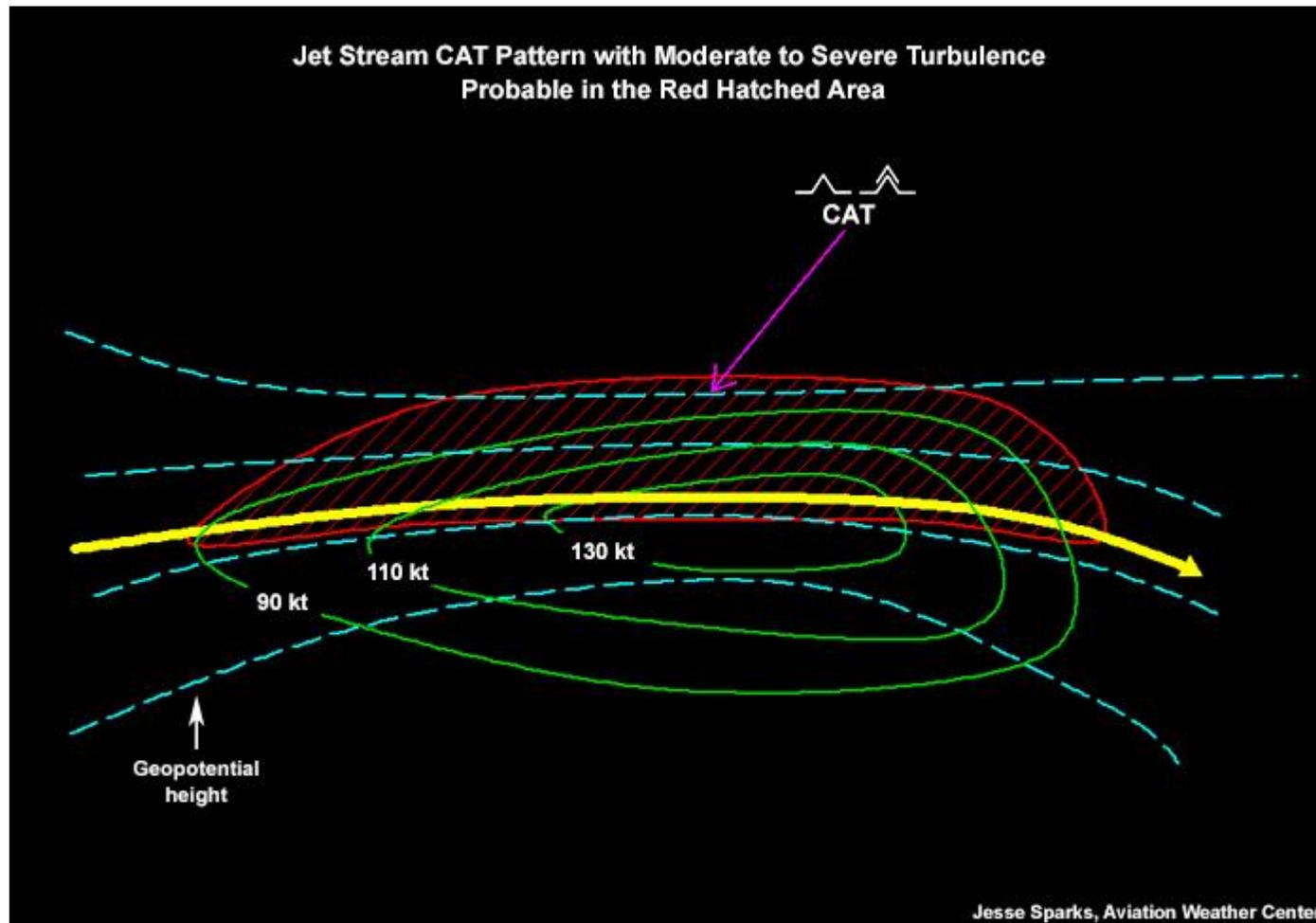
TAC en una dorsal estrecha

*Turbulence. Peter F. Lester. Jeppesen*



TAC en una dorsal ancha. COMET Program

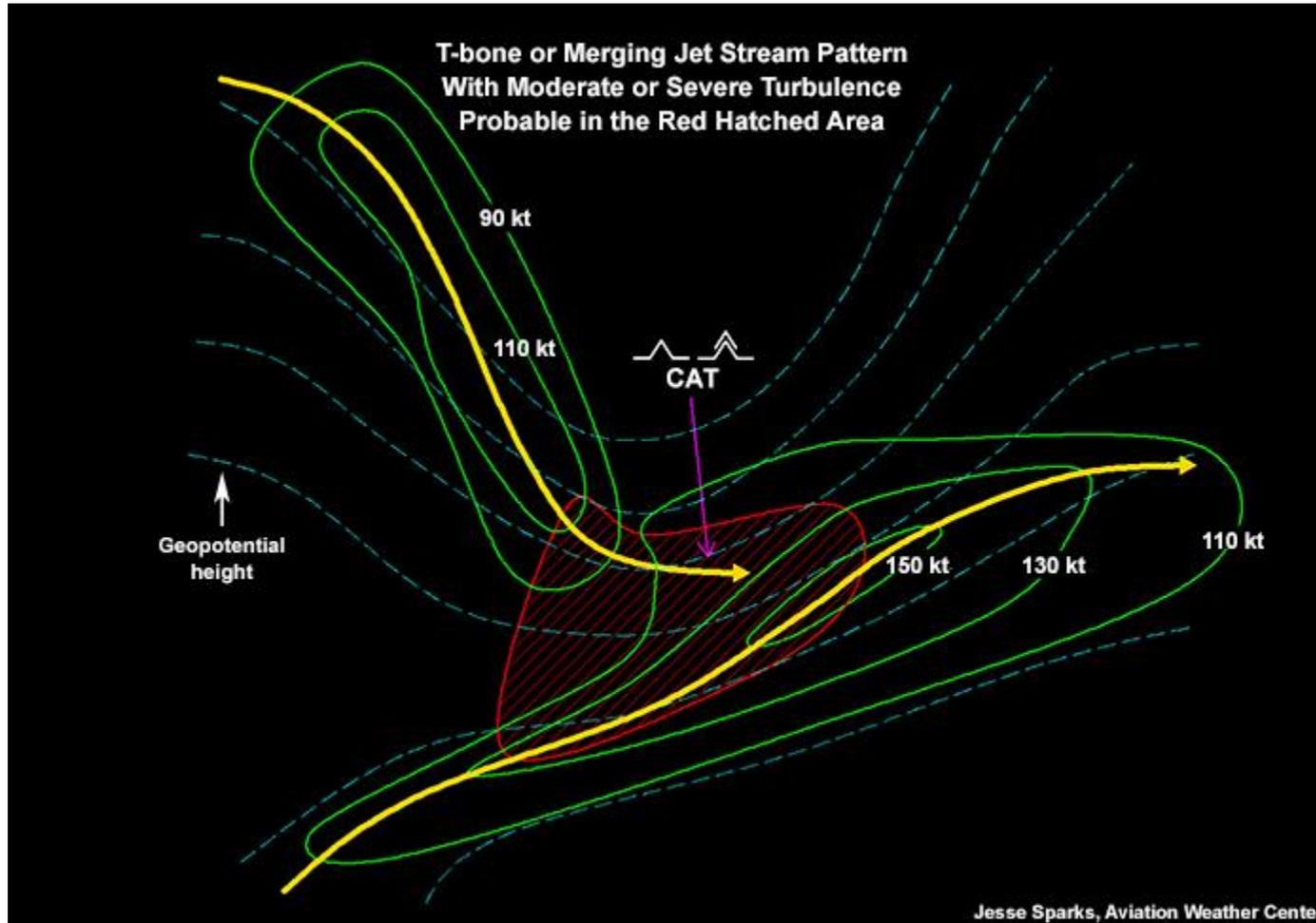
# TAC: calculando su potencial



COMET Program

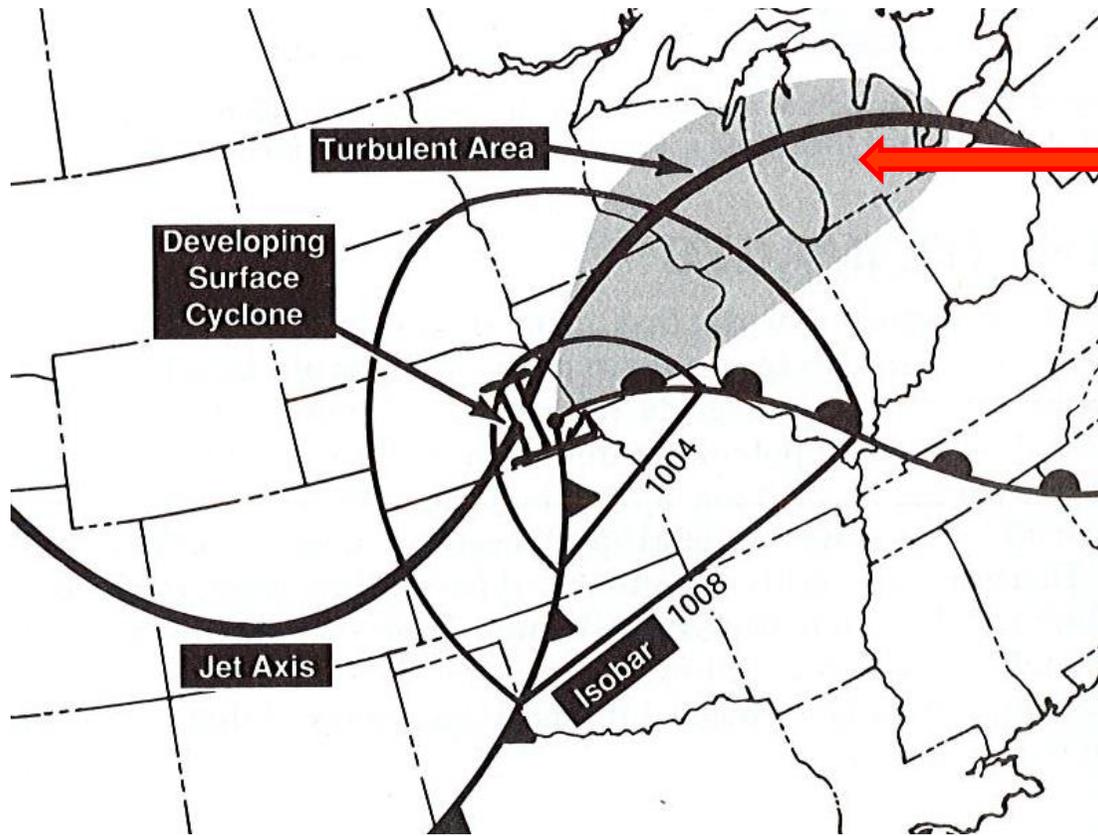
Corriente en chorro rectilíneo..Lado izquierdo (máxima cizalladura horizontal y máximos gradientes de temperatura)

# TAC: calculando su potencial



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

# TAC: calculando su potencial



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*

## Turbulencia - cizalladura

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

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

*WMO/TD-No. 1390. Detecting Clear Air Turbulence: South African Case of Study (COMET)*

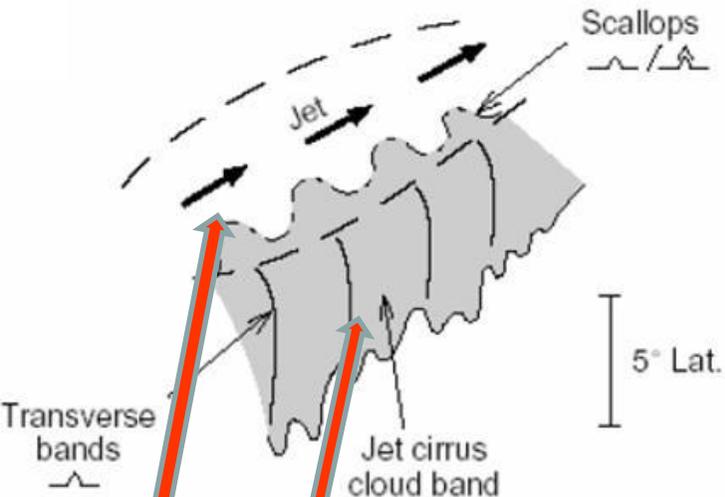
*1° de latitud = 111 km.*

# TAC: rasgos turbulentos en imágenes

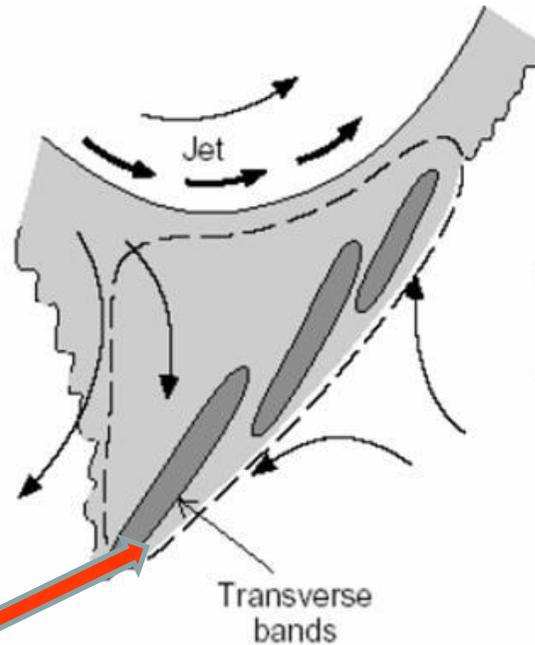
## ☐ Zonas de cirros asociadas a corrientes en chorro

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.

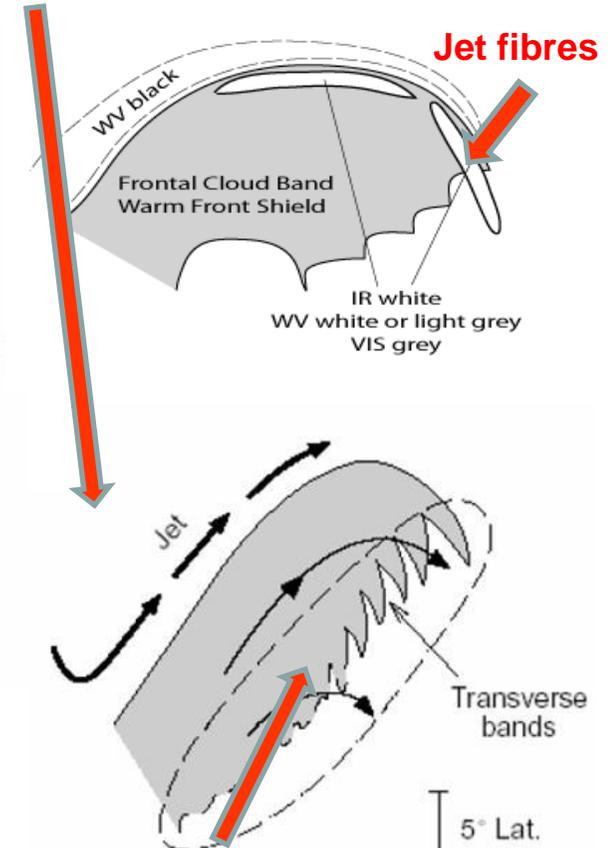
### Chorros rectilíneos



### Chorros en surco o difluentes



### Chorros con curvatura anticiclónica



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

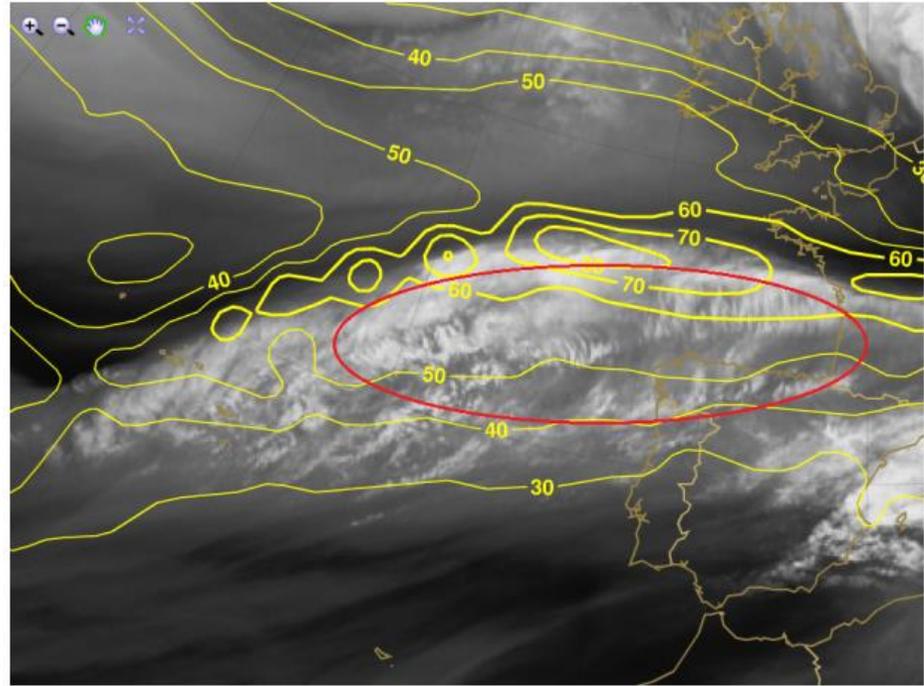
**Bandas transversales:** perpendiculares al viento.

**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**

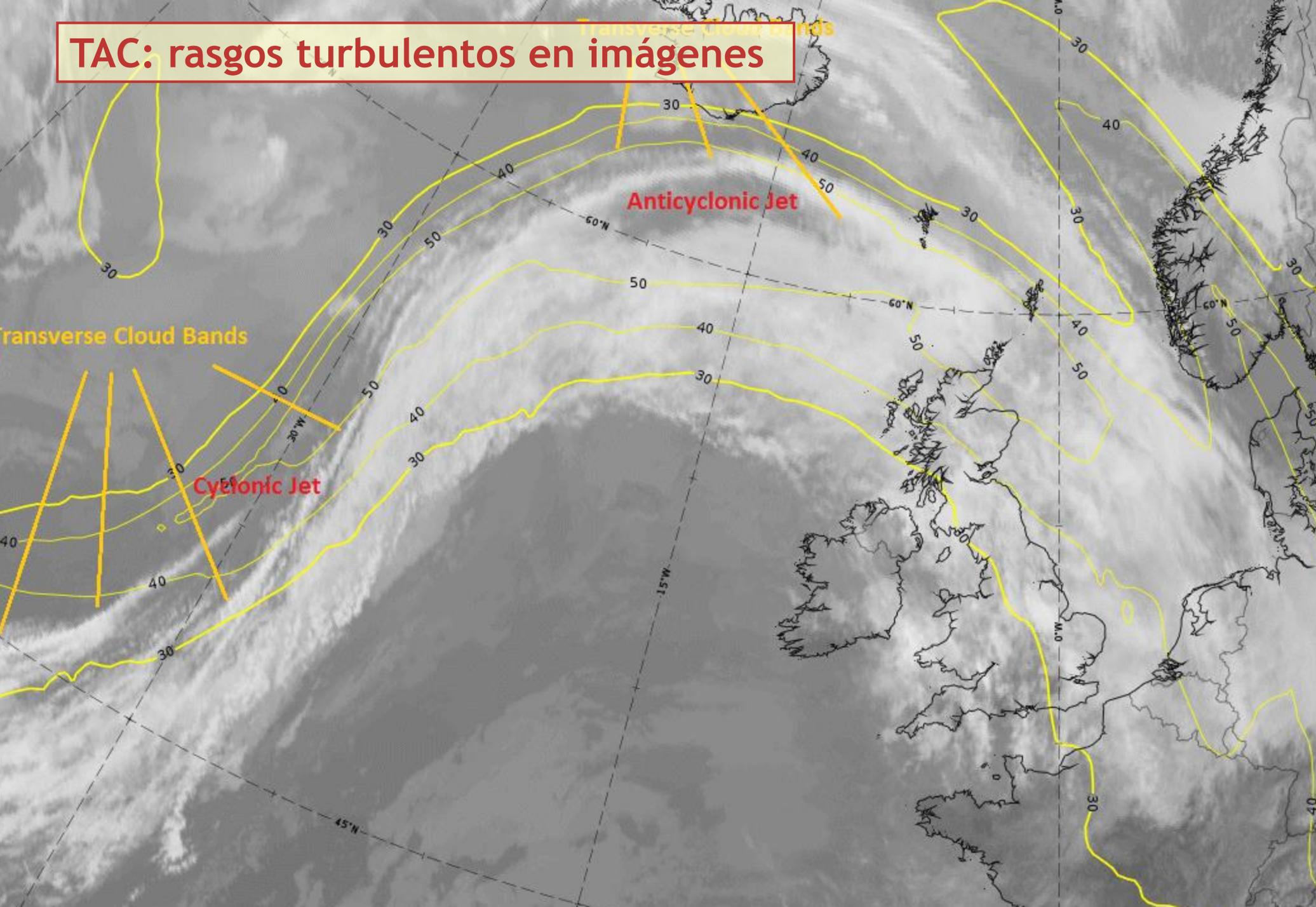
# Bandas transversales



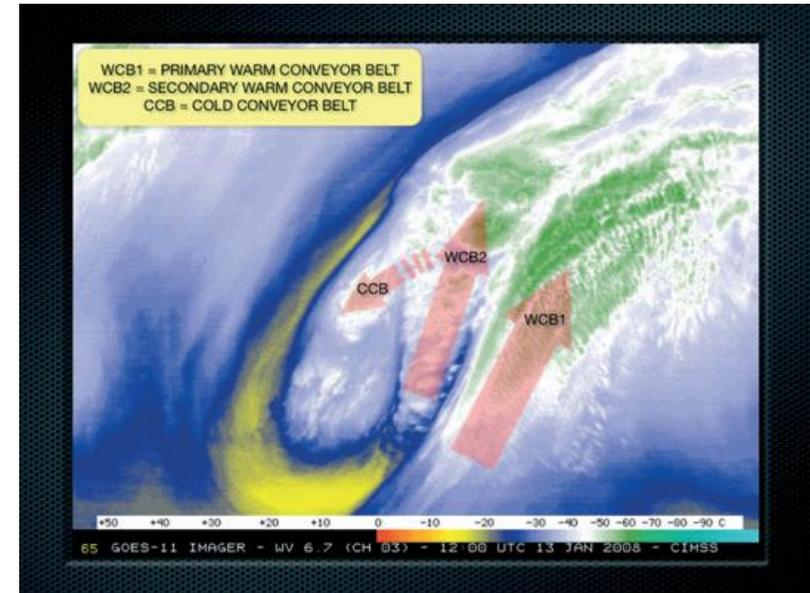
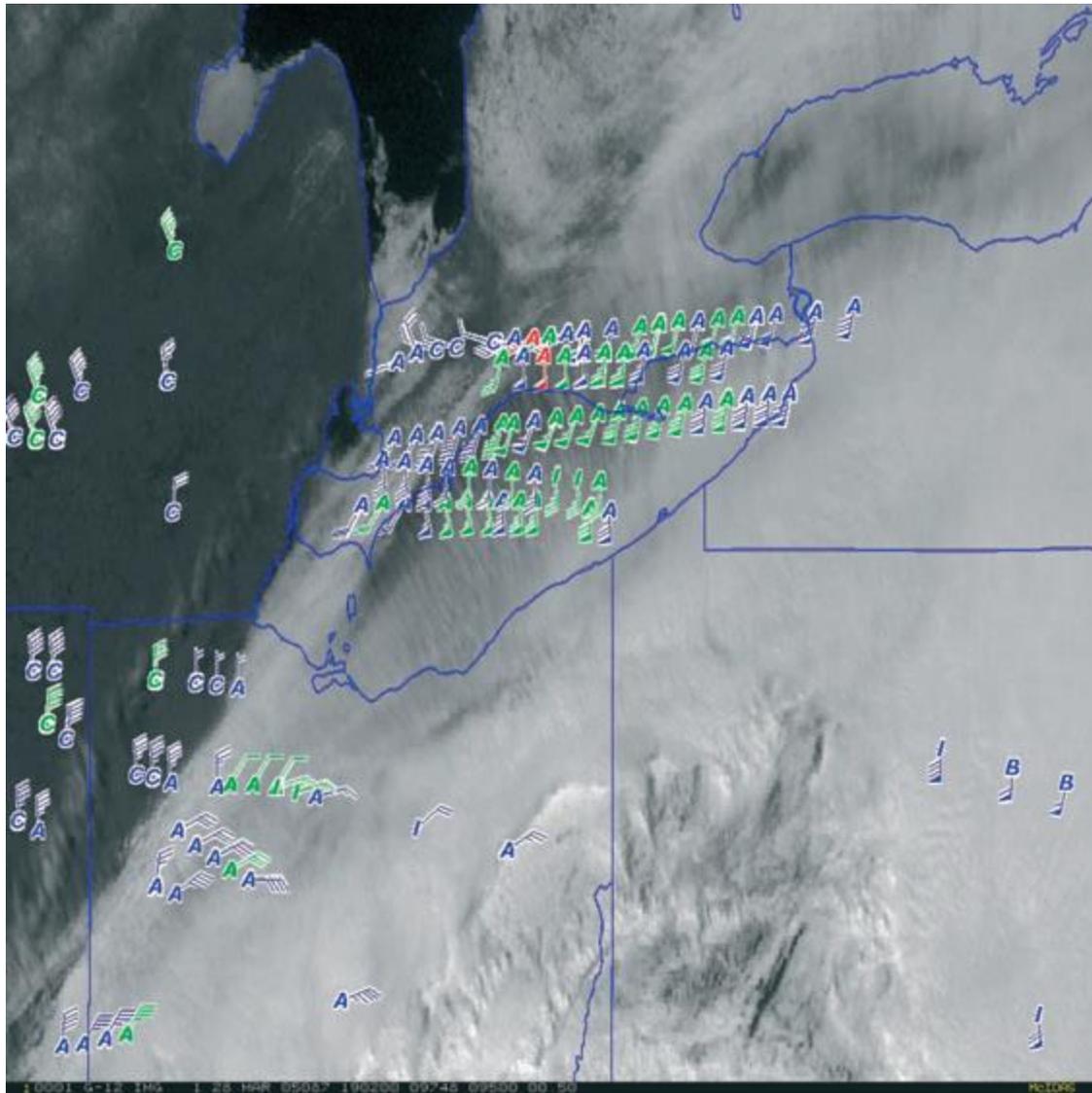
Son cirros alineados en forma de banda:

- 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.

# TAC: rasgos turbulentos en imágenes



# Turbulencia y bandas transversales

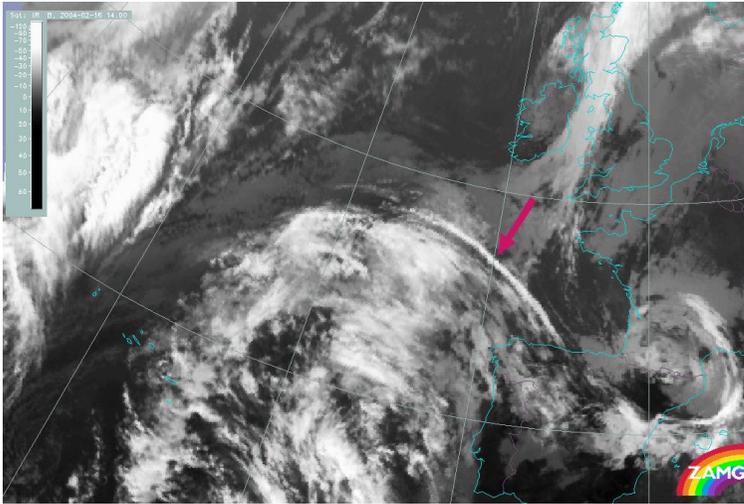


Arriba: GOES-11 Imagen del WV de un ciclón extra-tropical a las 1200 UTC con bandas transversales en el WCB. Adaptado de: [http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/wp-content/uploads/2008/01/conveyor\\_belts.070.png](http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/wp-content/uploads/2008/01/conveyor_belts.070.png)

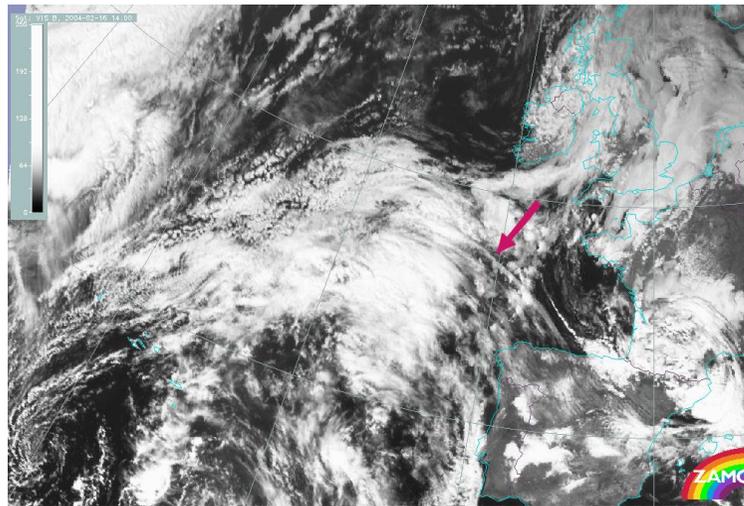
(Figura izq. courtesy Kris Bedka, University of Wisconsin; EDR data courtesy Bob Sharman, National Center for Atmospheric Research.)

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**

# JET FIBRES

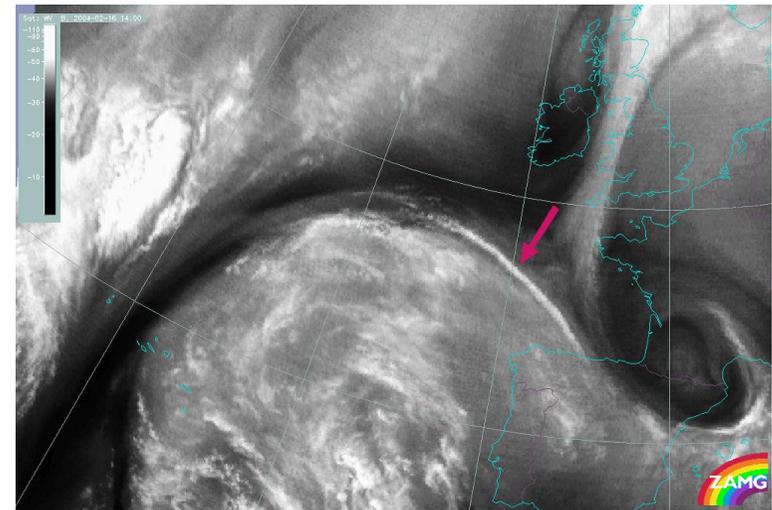


16 February 2004/14.00 UTC - Meteosat IR



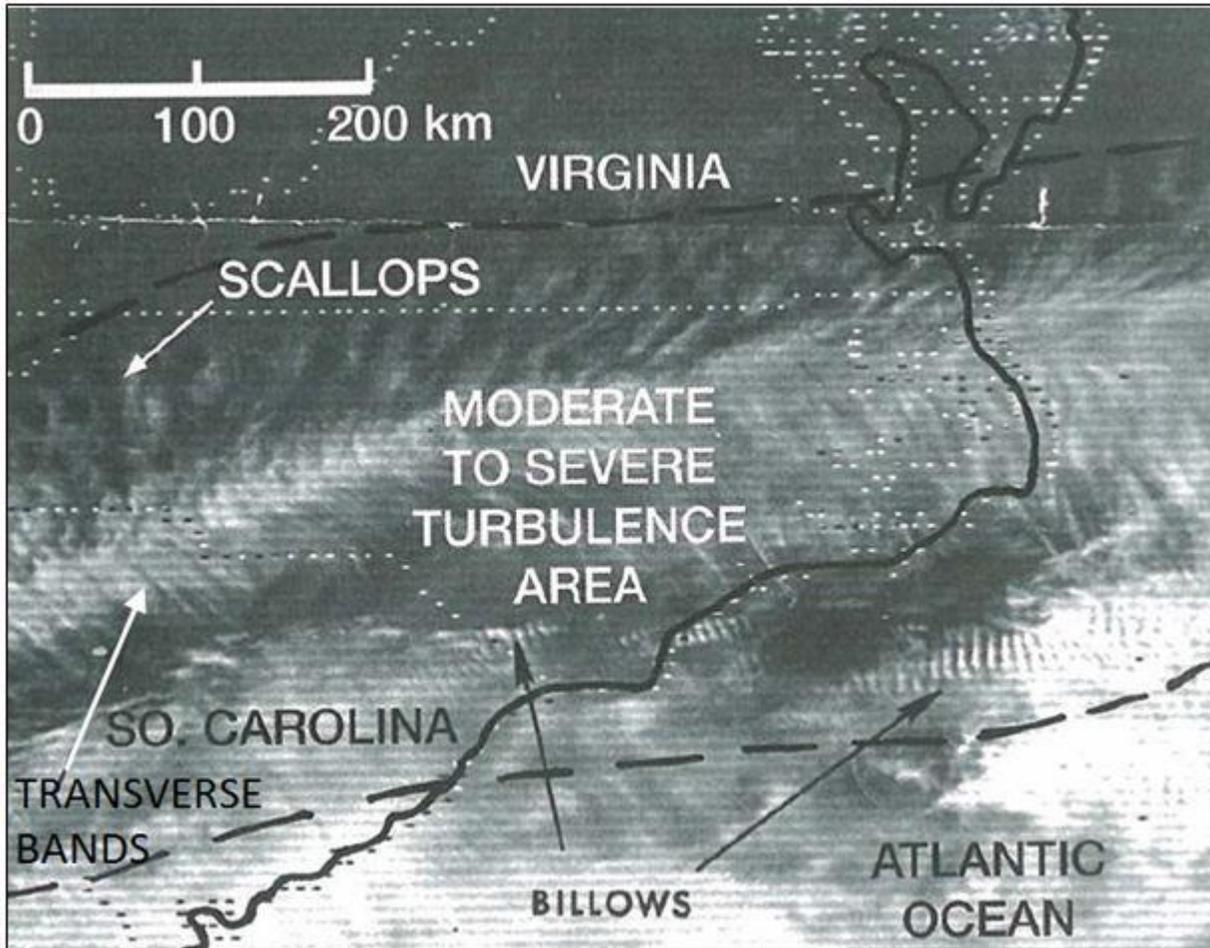
16 February 2004/14.00 UTC - Meteosat VIS

- 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**.



16 February 2004/14.00 UTC - Meteosat WV

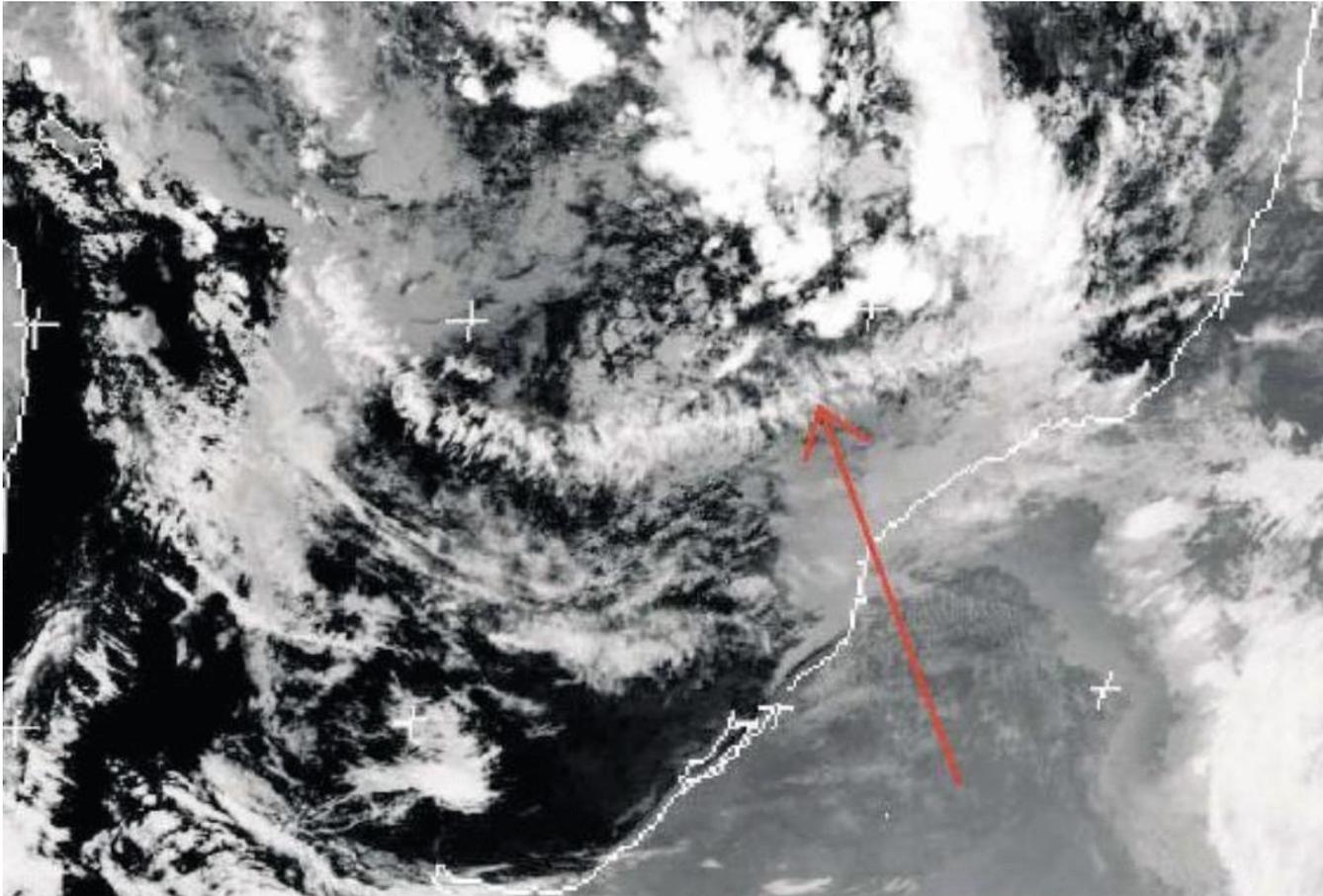
## Billows (nubes en ola)



- 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.
- Las 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.

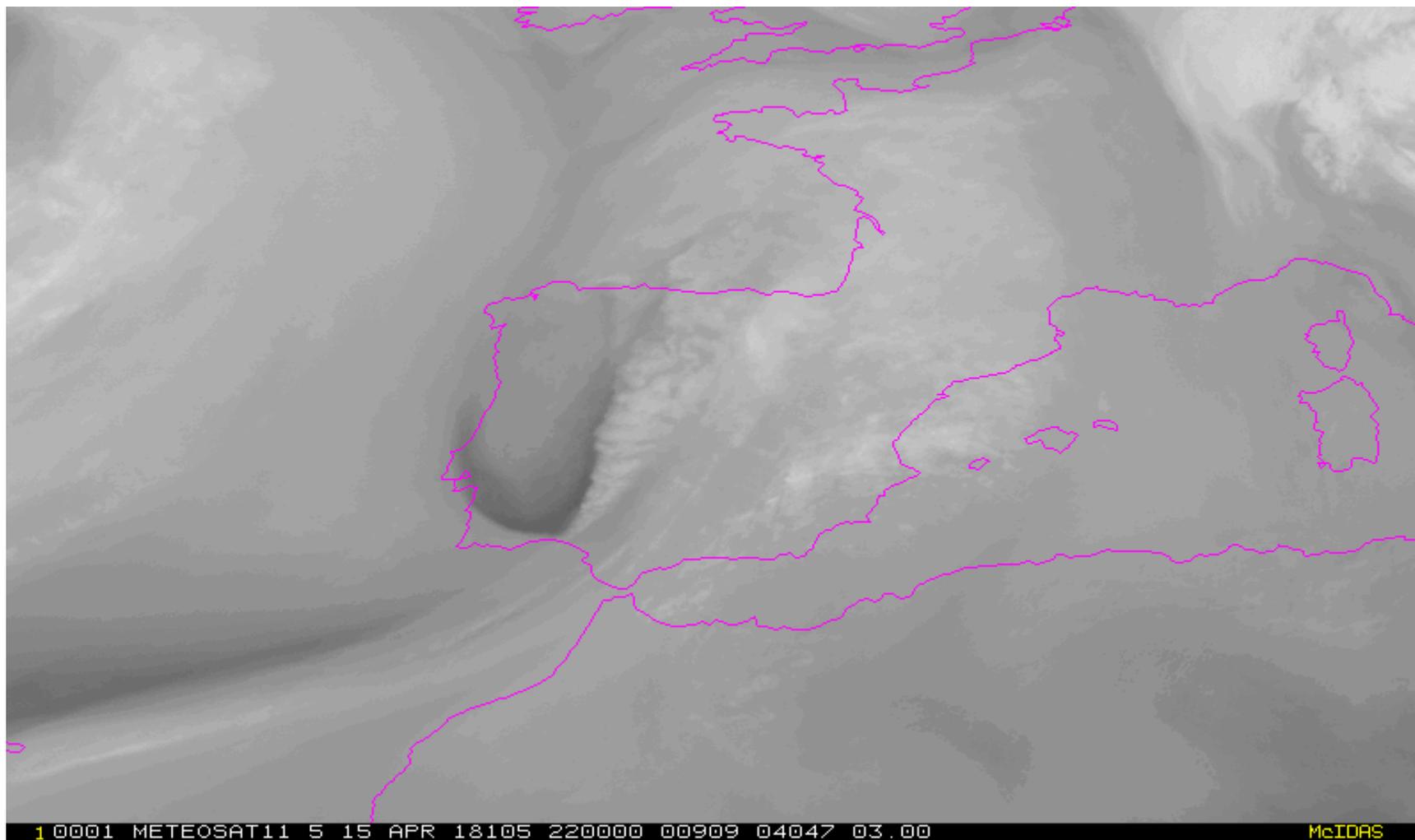
- Solo se forman cuando hay suficiente humedad en el movimiento ascendente de las ondas. Las ondas formadas a partir de ondas de gravedad exhiben líneas de nubes anchas, casi paralelas, orientadas de manera perpendicular a la dirección del viento, con las bases de las nubes cerca de una inversión.

# Ribbons



- 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



## Características de las zonas turbulentas

### *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 en imágenes

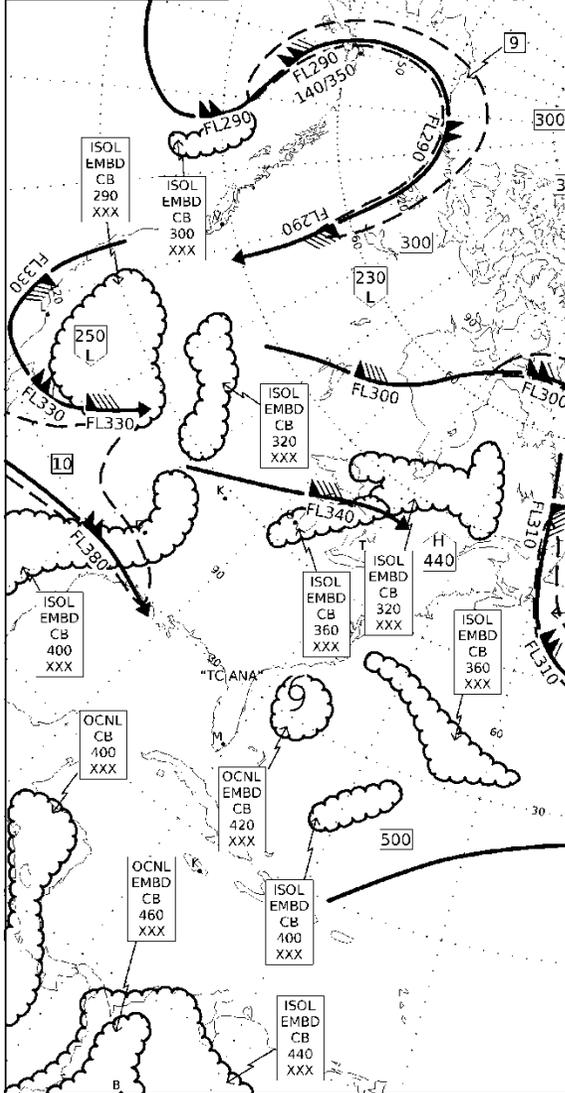
*Rasgos nubosos turbulentos y no turbulentos en las imágenes de satélite (IR, WV):*

- ❑ *Los rasgos nubosos turbulentos van asociados a bordes nubosos muy definidos.*
- ❑ *La excepción son los bordes deshilachados de los cirros.*
- ❑ *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.

# WAFS: SIGWX EURO FL100-450 y H FL250-630

PGAE05 EGRR 080000



PGDE14 EGRR 180000

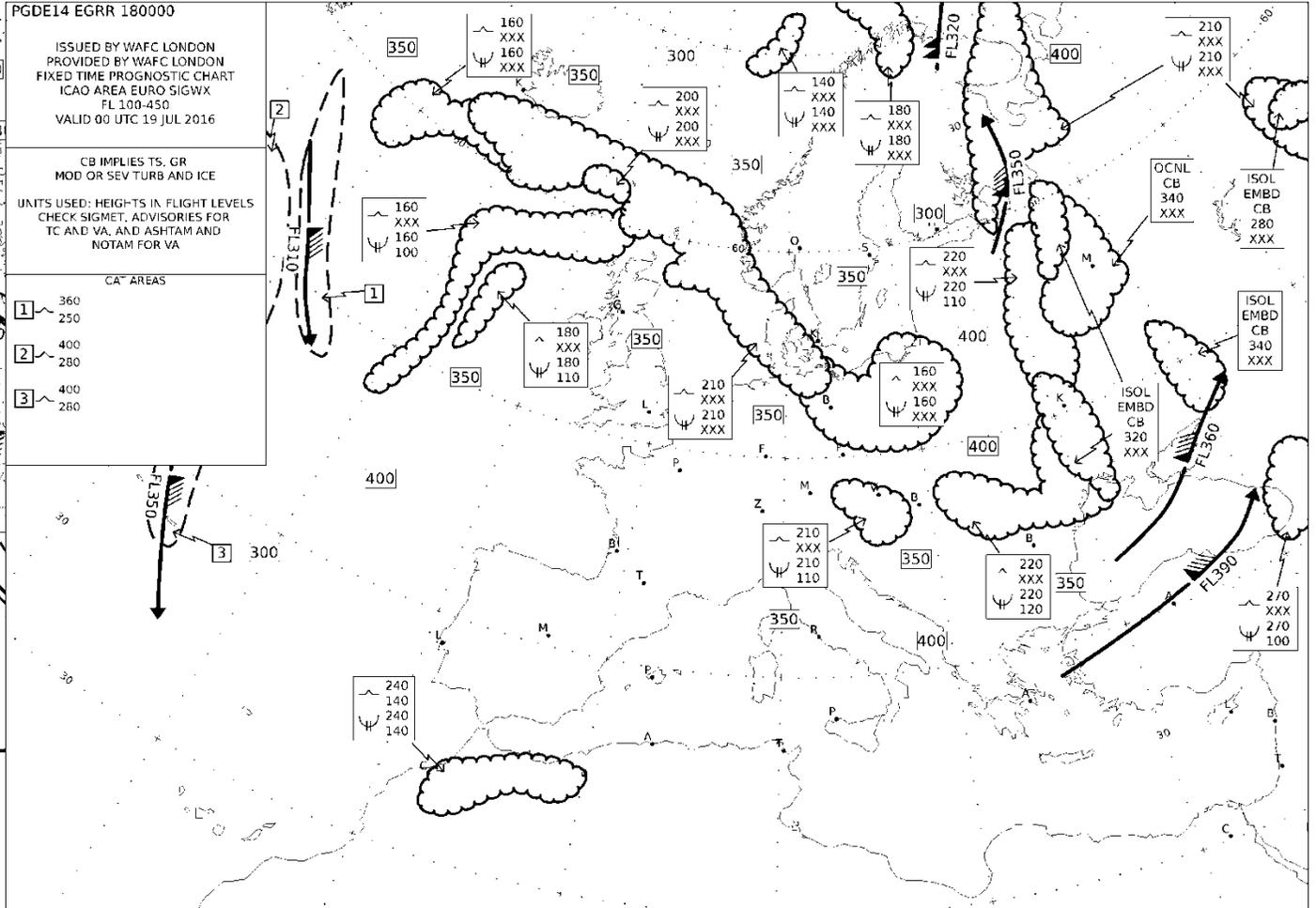
ISSUED BY WAFS LONDON  
 PROVIDED BY WAFS LONDON  
 FIXED TIME PROGNOSTIC CHART  
 ICAO AREA EURO SIGWX  
 FL 100-450  
 VALID 00 UTC 19 JUL 2016

CB IMPLIES TS, GR  
 MOD OR SEV TURB AND ICE

UNITS USED: HEIGHTS IN FLIGHT LEVELS  
 CHECK SIGMET, ADVISORIES FOR  
 TC AND VA, AND ASHTAM AND  
 NOTAM FOR VA

CA\* AREAS

- 1 360  
250
- 2 400  
280
- 3 400  
260



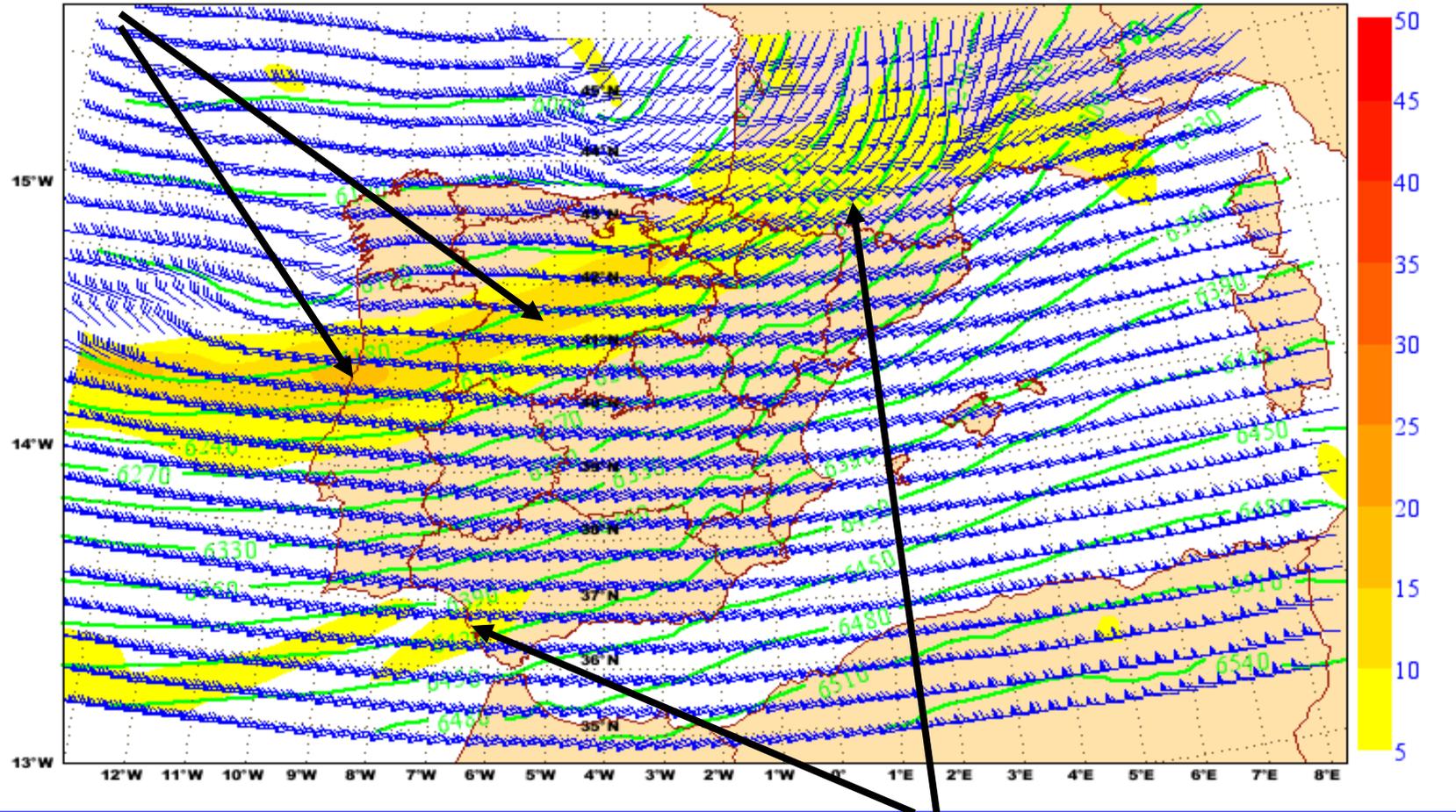
• Zona H FL250-630

• Europa FL100-450

# TURBULENCIA POR $C_H$

HBR (0.160°) 20180314 a 12 UTC. H+018. Validez: jueves, 15 de marzo de 2018, a 06 UTC.  
CIZALLADURA VERTICAL (Sombreado. Unidades: Kt / 1000 ft)  
VIENTO (barbas). Z (Isohipsas contorneadas). Nivel FL210

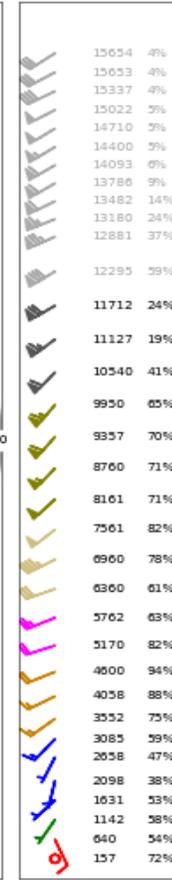
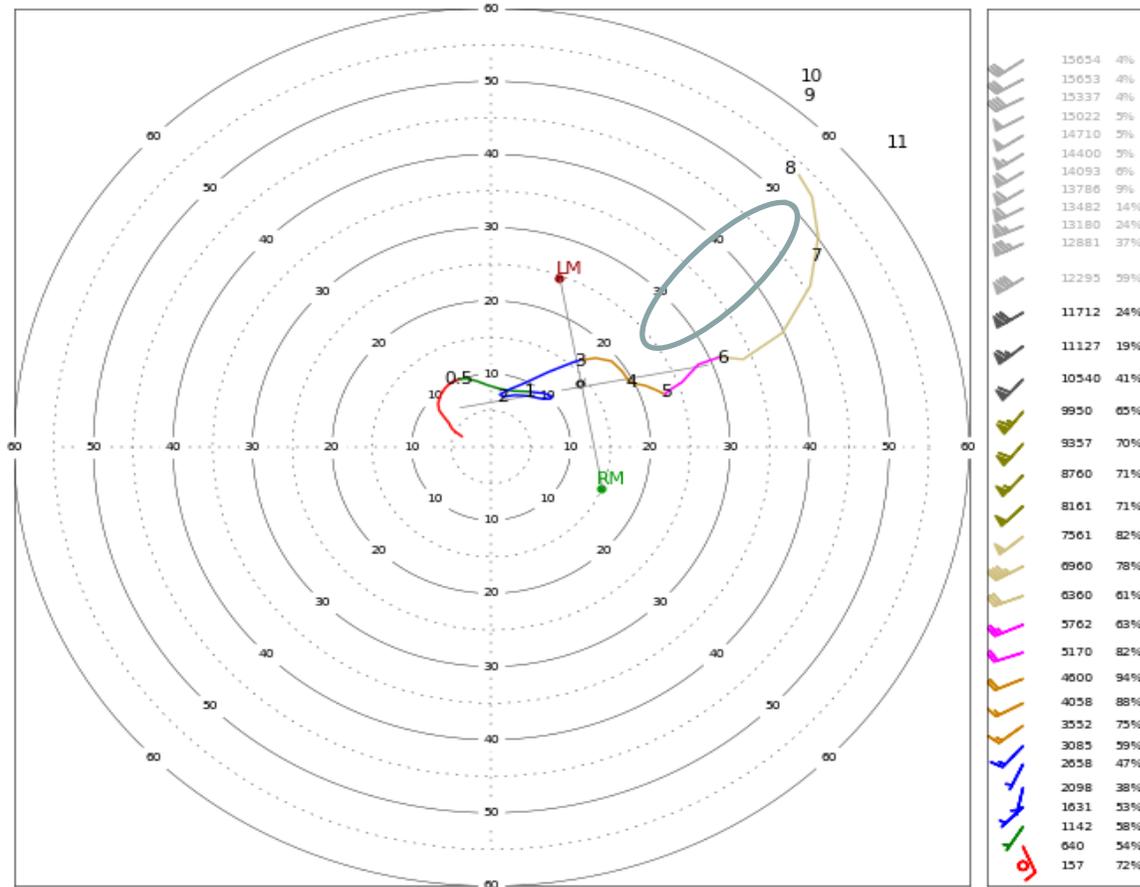
SEV



# BUSCANDO CAT EN LA HODÓGRAFA

Moderada:  $CV=6-9kt/1000ft = 20-30kt/km$

Severa:  $10kt/1000ft = 32,8kt/km$



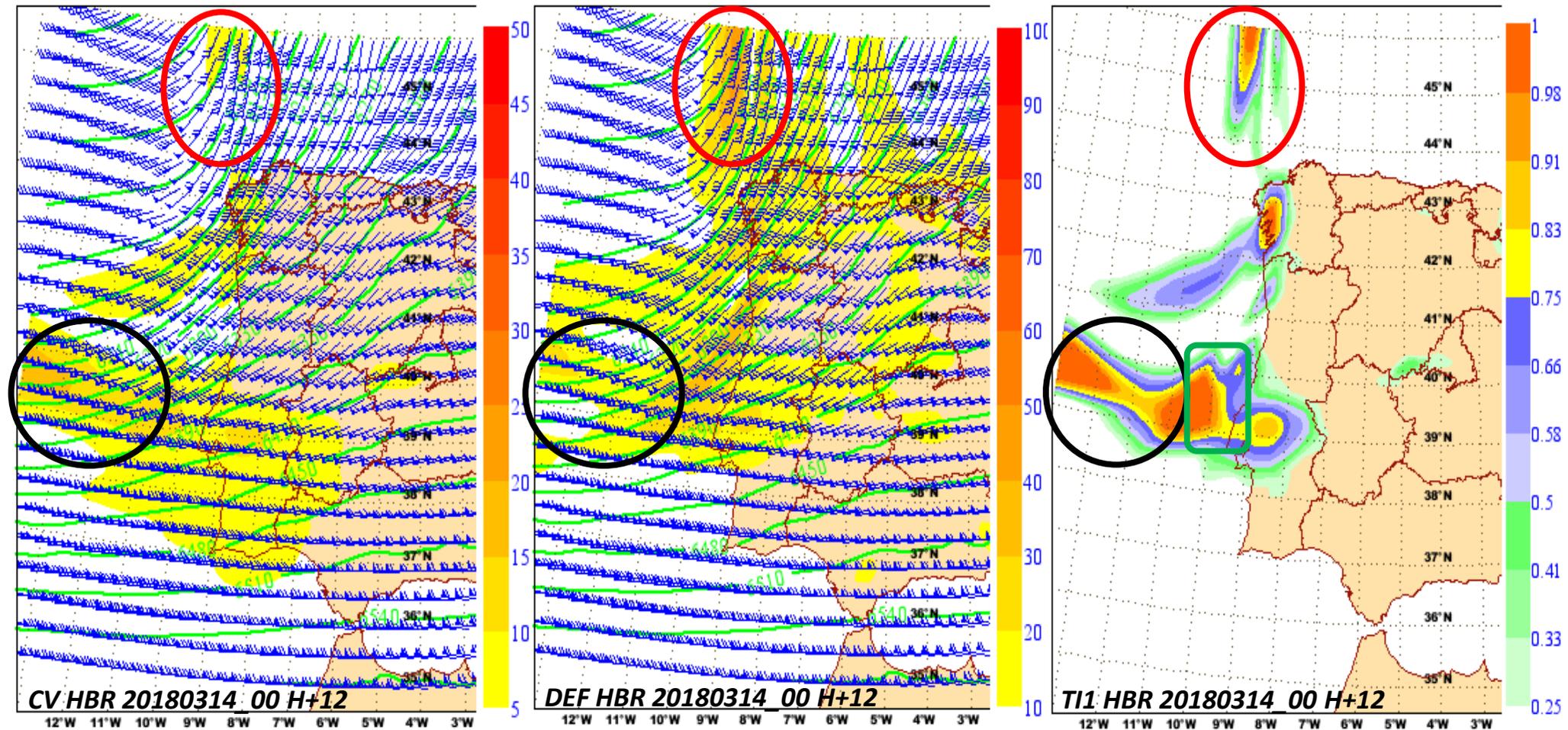
MELILLA  
35°18' -2°60' zMod 146 m  
06/09/2018 12 UTC H+015  
07/09/2018 03 UTC - IFS

Indices  
CI208 55.0  
CI206 34.5  
CI203 18.1  
CI201 10.6  
MEAN WS06 14.3  
MEAN WD06 52.5  
BUNKERS WSL 24.6  
BUNKERS WDL 20.6  
BUNKERS WSR 15.1  
BUNKERS WDR 112.0  
SRH L1 -3.6  
SRH R1 70.4  
SRH L3 -18.4  
SRH R3 108.6  
SRH L6 -89.6  
SRH R6 174.5  
ESRH L  
ESRH R

Analisis de burbuja 100 hPa  
BRN  
VGP  
SCP L  
SCP R  
EHI L1  
EHI R1  
EHI L3  
EHI R3

valores en nudos

# ÍNDICE DE ELLROD TI1

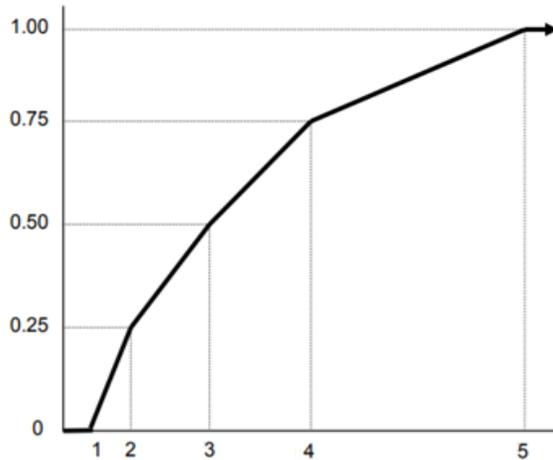


Rojo: DEF alta (CAT SEV), CV baja (CAT LIG/MOD), RI alto (CAT SEV)

Negro: DEF baja (no CAT), CV alta (CAT SEV), RI alto (CAT SEV)

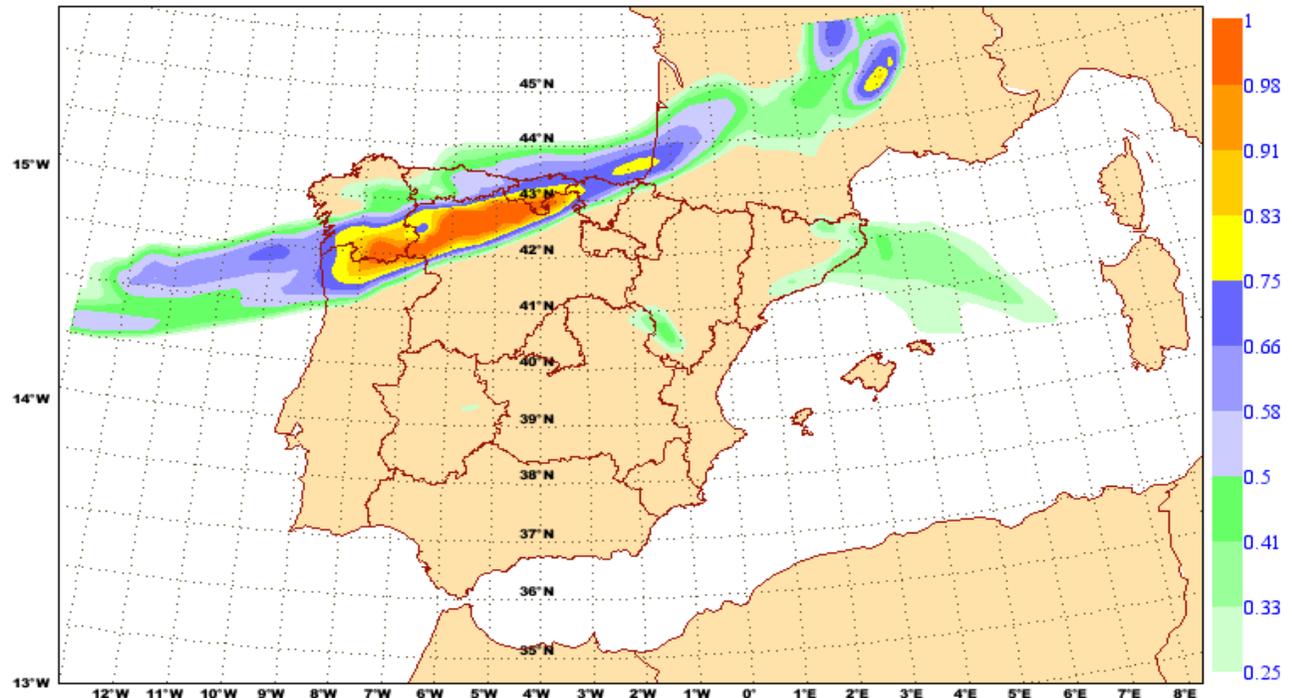
Verde: DEF y CV mods/altas (CAT MOD), RI alto (CAT SEV)

# ÍNDICE DE ELLROD TI1



Presentación del ATAP:  
Se escalan los valores del índice a valores entre 0 y 1 pero no de forma lineal sino en varios intervalos, que se considera corresponden a: no turbulencia(1), turbulencia ligera (2), moderada (3), fuerte (4) y extrema (5).

HBR (0.160°) 20180314 a 12 UTC. H+018. Validez: jueves, 15 de marzo de 2018, a 06 UTC.  
TURBULENCIA NORMALIZADA DEBIDA AL INDICE TI1  
Nivel FL270



## ÍNDICE DE ELLROD TI2

Combina la cizalladura vertical, la deformación horizontal y la convergencia (divergencia negativa).

$$TI2 = CV \times (DIV + CONV)$$

Tiene en cuenta que las situaciones de convergencia en niveles altos (tormentas muy fuertes, intrusiones secas desde la estratosfera) dan lugar a oscilaciones verticales que aumentan la turbulencia y no eran tenidas en cuenta en el anterior índice.

Su valor es ligeramente mayor a TI1

Se recomienda que se use como complemento a TI1 y no como sustituto

## PREDICCIÓN DE LA TAC (RESUMEN)

- ❑ Revisar el mapa SIGWX del WAFS para Europa: corrientes en chorro. Máximos de viento.
- ❑ Comparar con la guía técnica de niveles altos. Prestar especial atención a las zonas de deformación.
- ❑ Comparar con los análisis de 300 hPa, sondeos y datos de sondeos de aviones.
- ❑ Revisar las imágenes de satélite buscando rasgos nubosos turbulentos. En WV zonas que se oscurecen rápidamente, estructuras con movimiento muy rápido.
- ❑ Comparar con los campos del NWP (Z y viento en 300 hPa y 200 hPa). Evolución a 24 horas.
- ❑ Previsión de turbulencia del NWP: índice T1 Ellrod.



Gracias por su atención