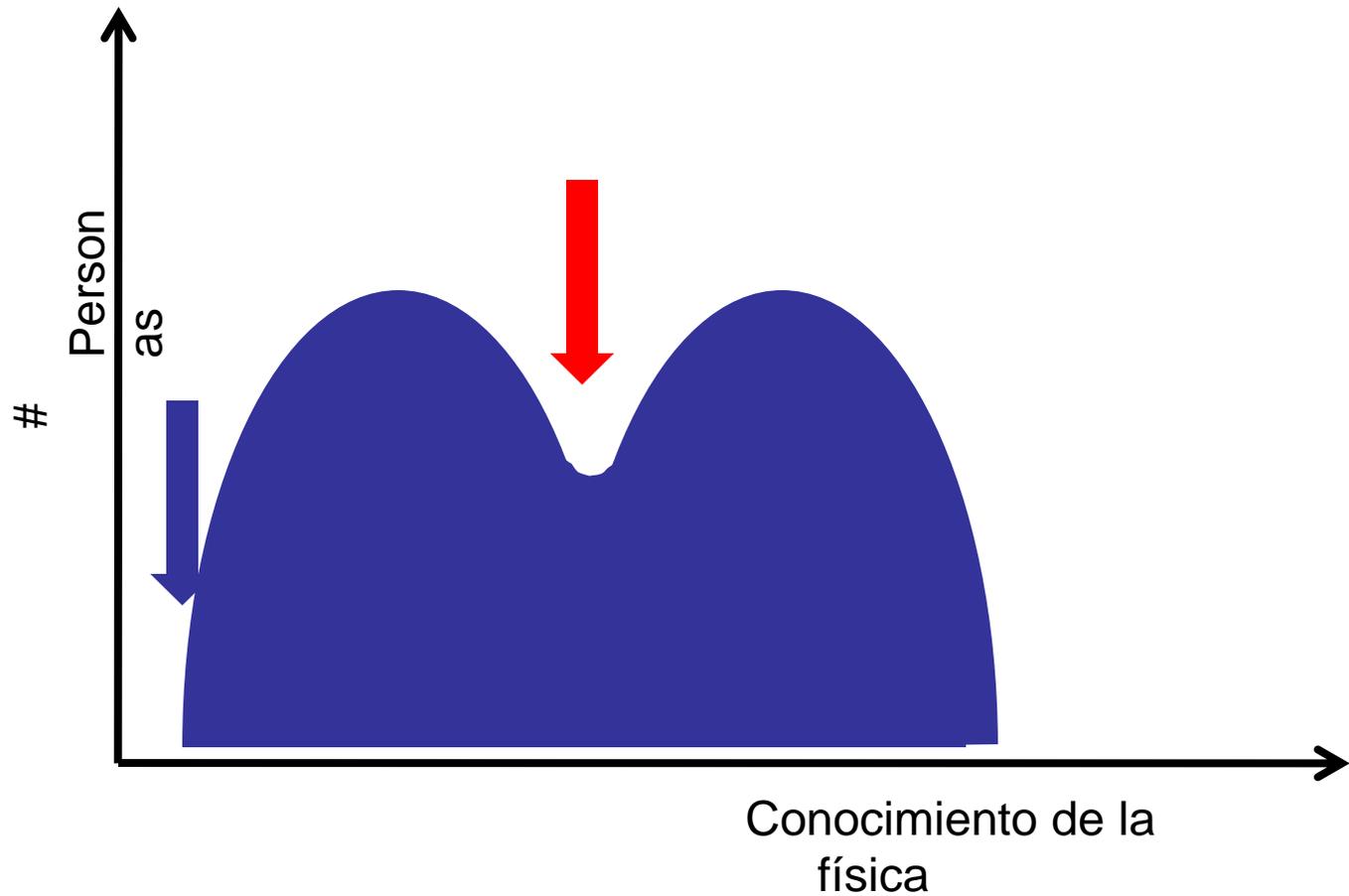


# Dinámica e intensificación de Ciclones Tropicales

De los aspectos básicos  
a los retos contemporáneos

Sergio Abarca  
Marzo de 2010  
La Paz, Baja California,  
México

# Una plática para todos



# Guía\*

- ¿Por qué hablar hoy de CT?
- ¿Cómo se generan?
- ¿Cuál es su estructura?
- ¿Cómo se ha explicado su dinámica?
  - El CT, la pared del ojo y las bandas de lluvia

\*Conceptos básicos mostrados conforme se necesiten

# Guía

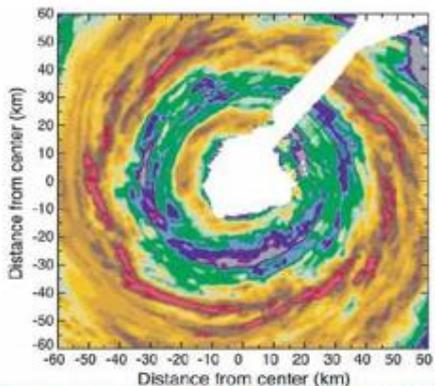
- **¿Qué es la intensidad de CT (IntCT)?**
- **¿Cómo se estima?**
- **¿Qué sabemos de la IntCT?**
- **¿Cómo se pronostica la IntCT?**
- **¿Qué tan buenos son los pronósticos?**

# ¿Por qué hablar de esto hoy?

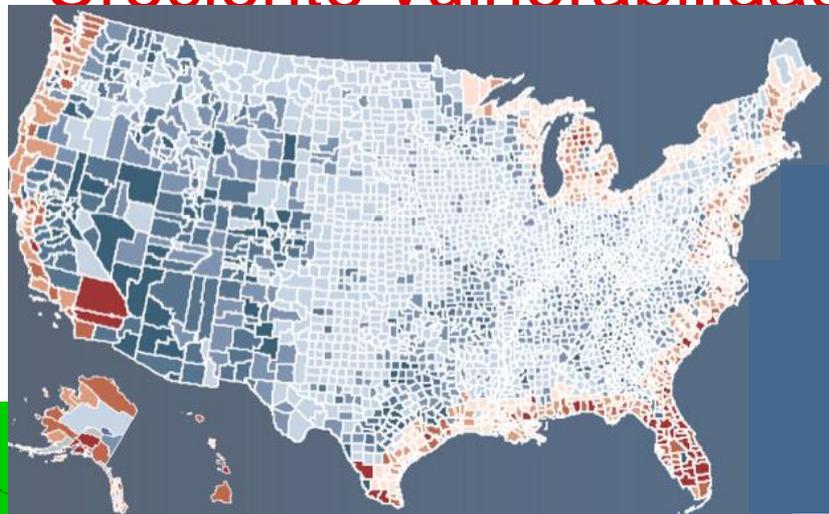
Creciente vulnerabilidad

Creciente capacidad computacional

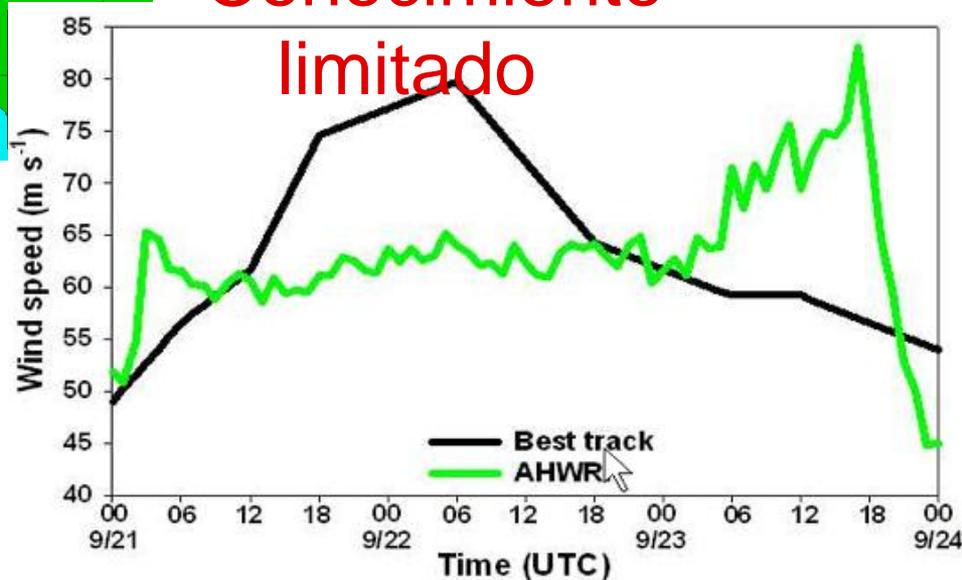
Reflectividad del radar ELDORA



Houze et al. (2006)



Conocimiento limitado



THE WEATHER RESEARCH & FORECASTING MODEL

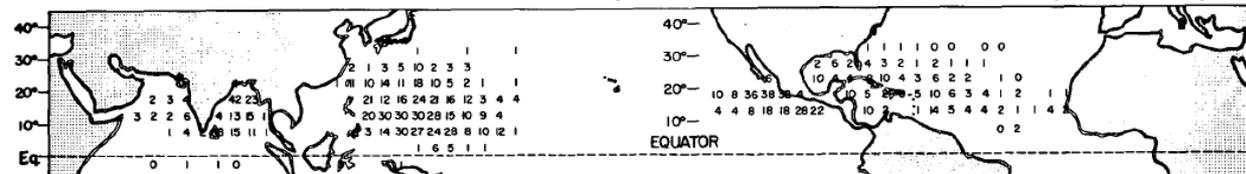


Agua precipitable 1.33 km AHWRF

# ~~¿Cómo se genera a un CT?~~

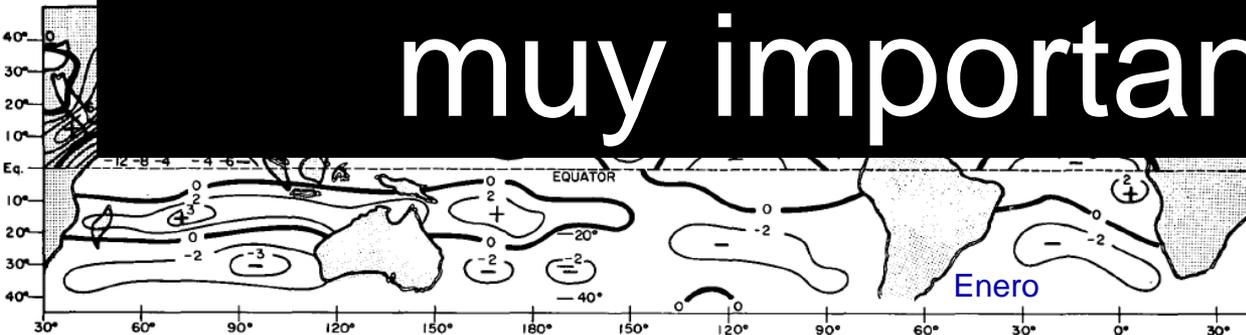
## ¿En qué condiciones se genera a un CT?

Ubicación inicial de disturbios que se convirtieron en CT (25 años)



- 26.5 °C
- $f \neq 0$

**¡ Las observaciones son muy importantes!**



óptica  
preexistente  
**CISK!**

Gray (1968)

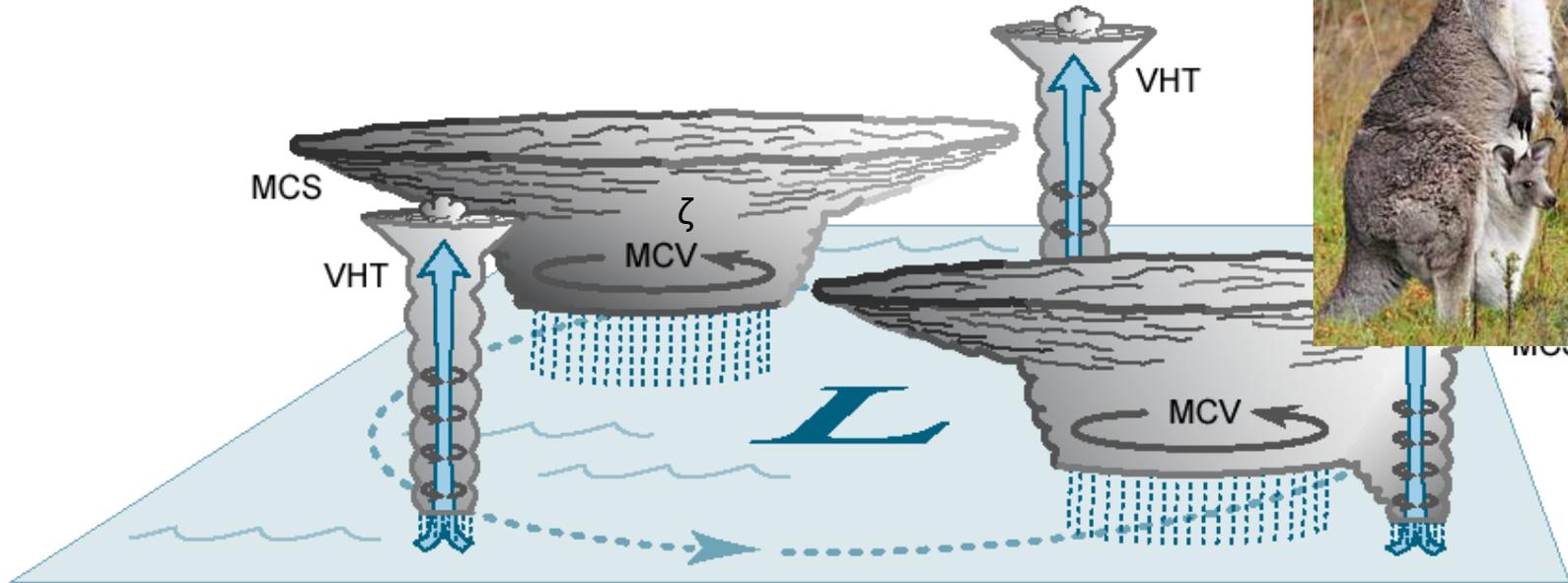
**MONTHLY WEATHER REVIEW**

VOLUME 96, NUMBER 10

OCTOBER 1968

# ¿Cómo se genera a un CT?

## Proceso escala arriba ¿?



Houze 2009

### “Torres calientes vortiginosas” (TCV)

- Estiran  $\zeta_s$
- Inclinan  $\zeta_s$



### Sistema convectivos de mesoescala

# Evidencia empírica

## TCV

## Radar Doppler

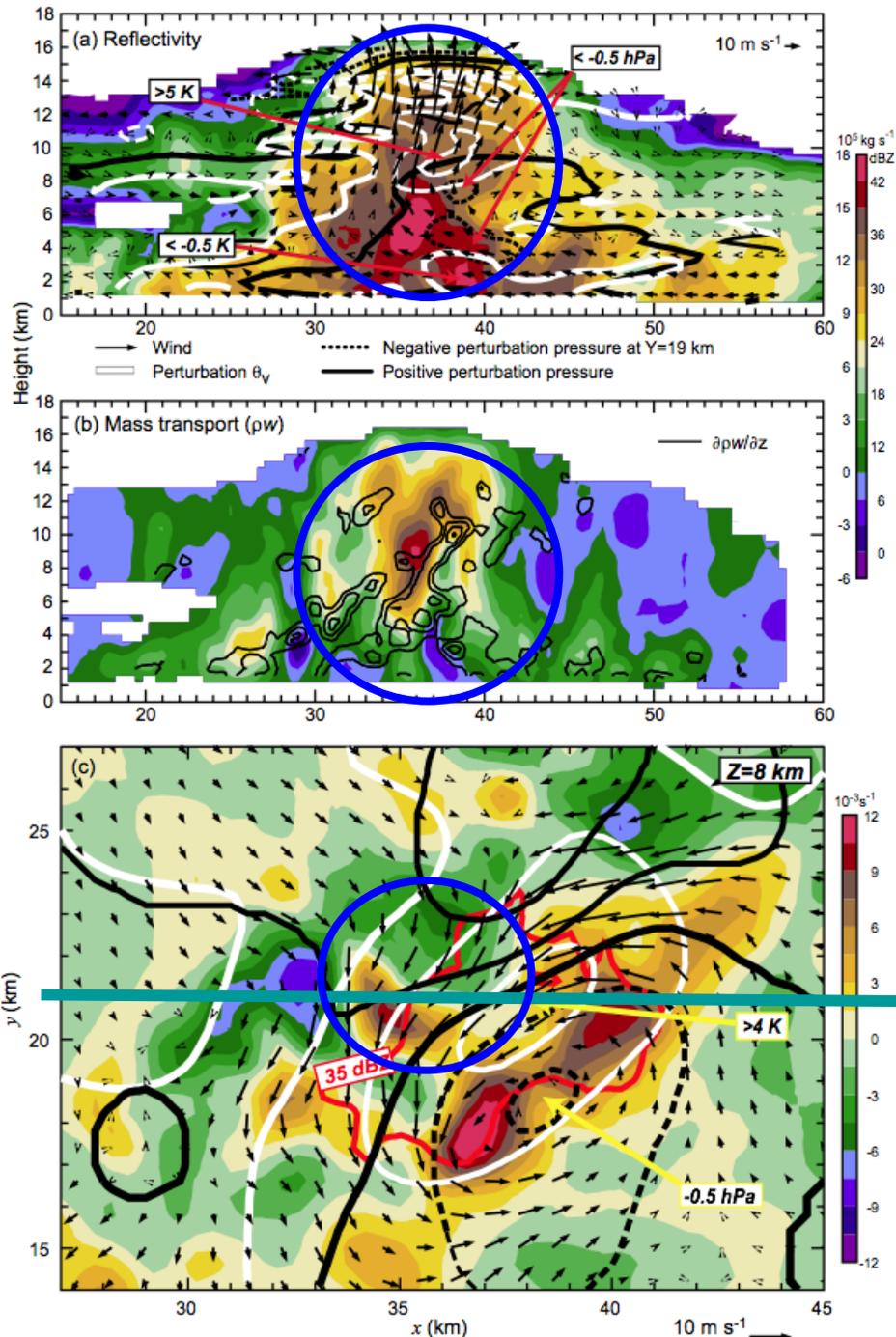
## Ofelia (2005)

ráfagas ascendentes:

10km ancho

17km alto

10-20ms<sup>-1</sup>



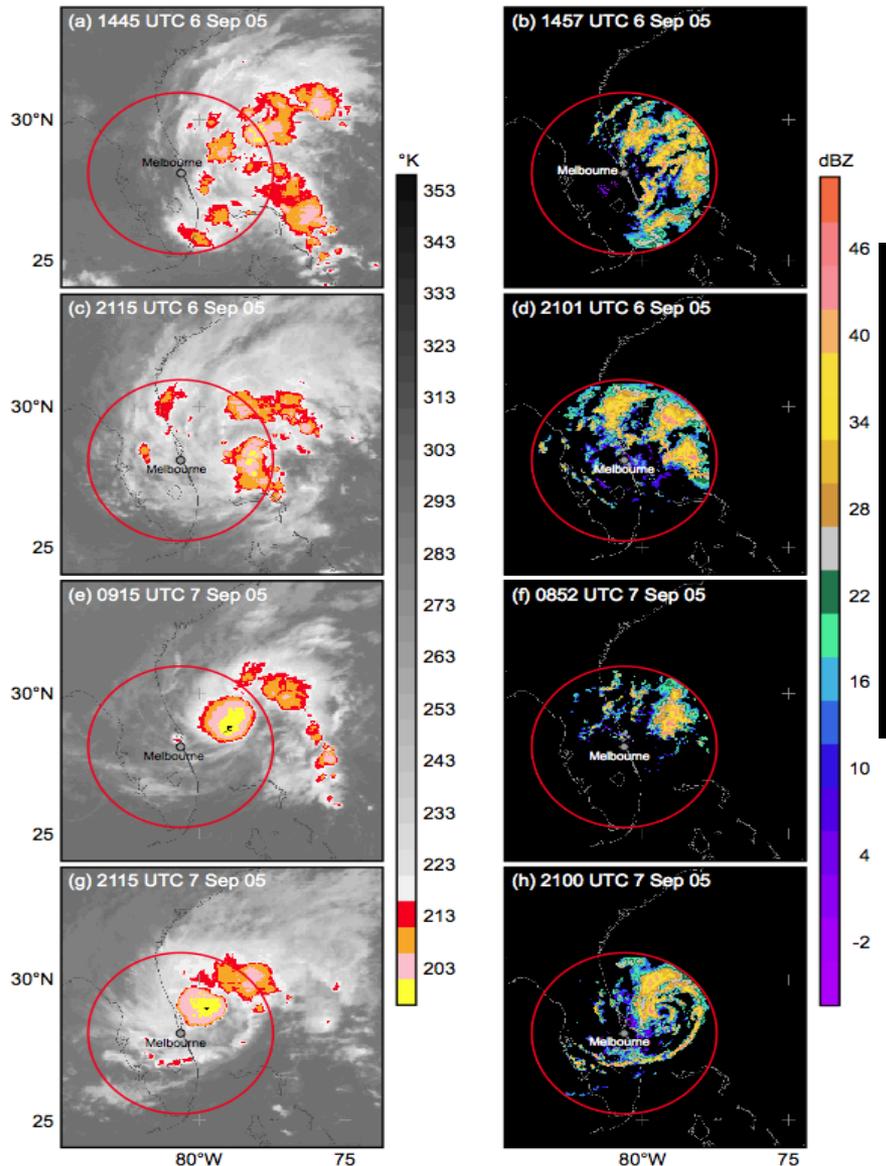
Máximo de vorticidad y la ráfaga ascendente están **en el mismo lugar**

Vorticidad anticiclónica tiende a ser expulsada del vórtice

No hay fuertes ráfagas hacia abajo, pero se forman ráfagas hacia arriba (sin la ayuda de la corriente de gravedad)

Houze et al. (2009)

# Ensamble de nubes DT-TT



Satélite

Radar

Ophelia (2005),

La CG no es una  
cuestión de  
intensificación de un  
vórtice preexistente  
¡El conjunto de nubes

Cómo un conjunto de nubes  
se convierte en un CT?

Axisimetrización?

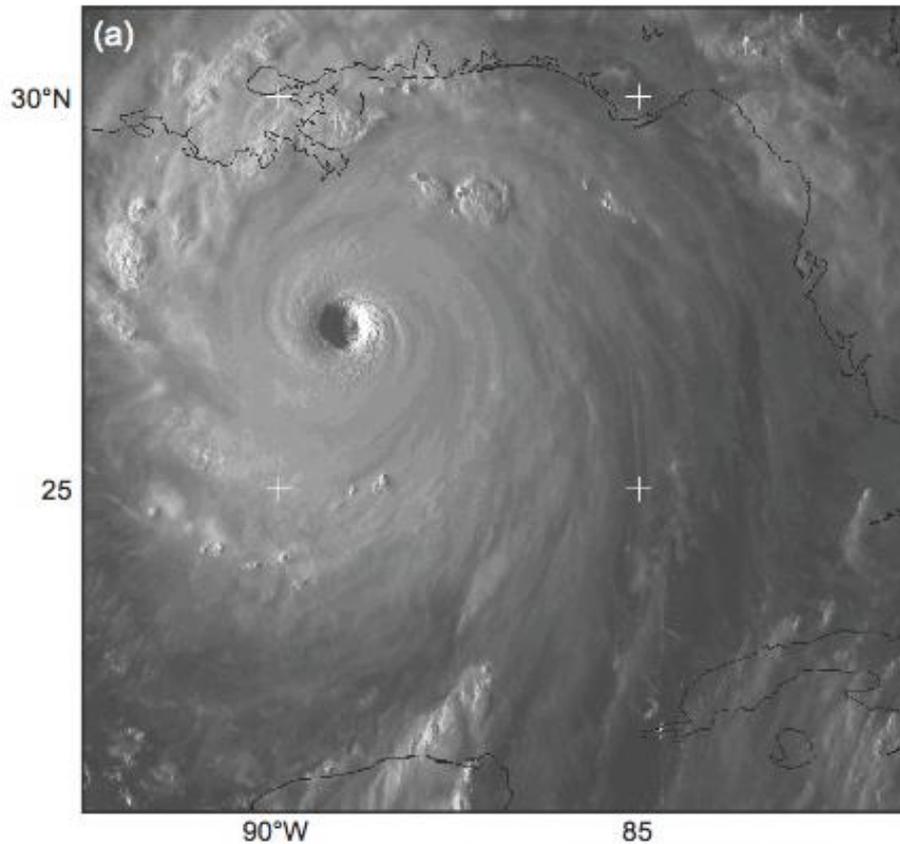
# Conclusiones

**Evidencia de observaciones operativas y experimentos de campo han revelado:**

- Los factores ambientales necesarios para la CG**
- CG está vinculada a la reorganización de vorticidad a través de la convección**

**Falta esclarecer los papeles relativos de las diferentes escalas y la interacción entre ellas**

**\*Comunidad operativa e investigadores tienen que trabajar juntos!!**

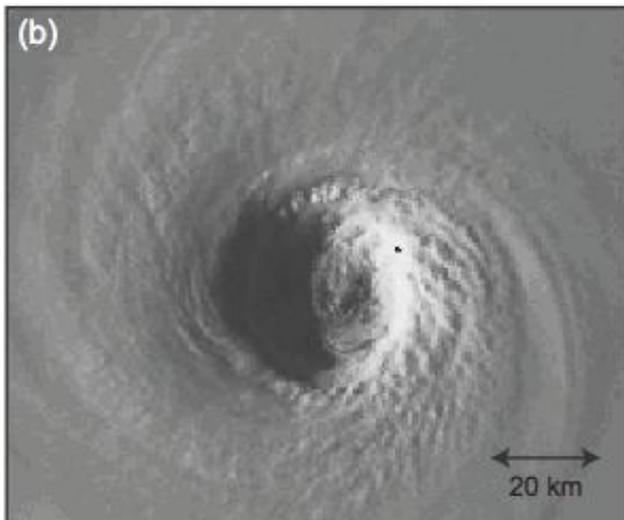


¿Cuál es la estructura de un CT?

**Circulación CT, 3D**  
**Ojo**

**Pared del ojo**

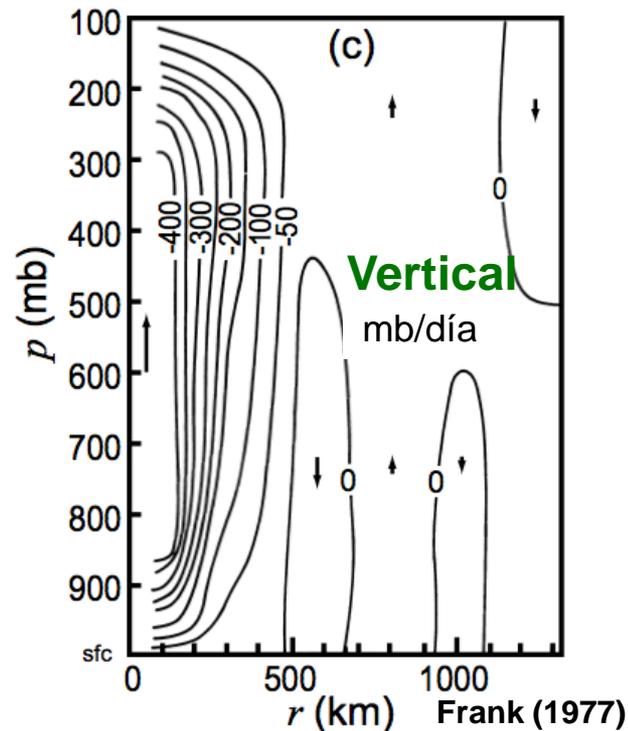
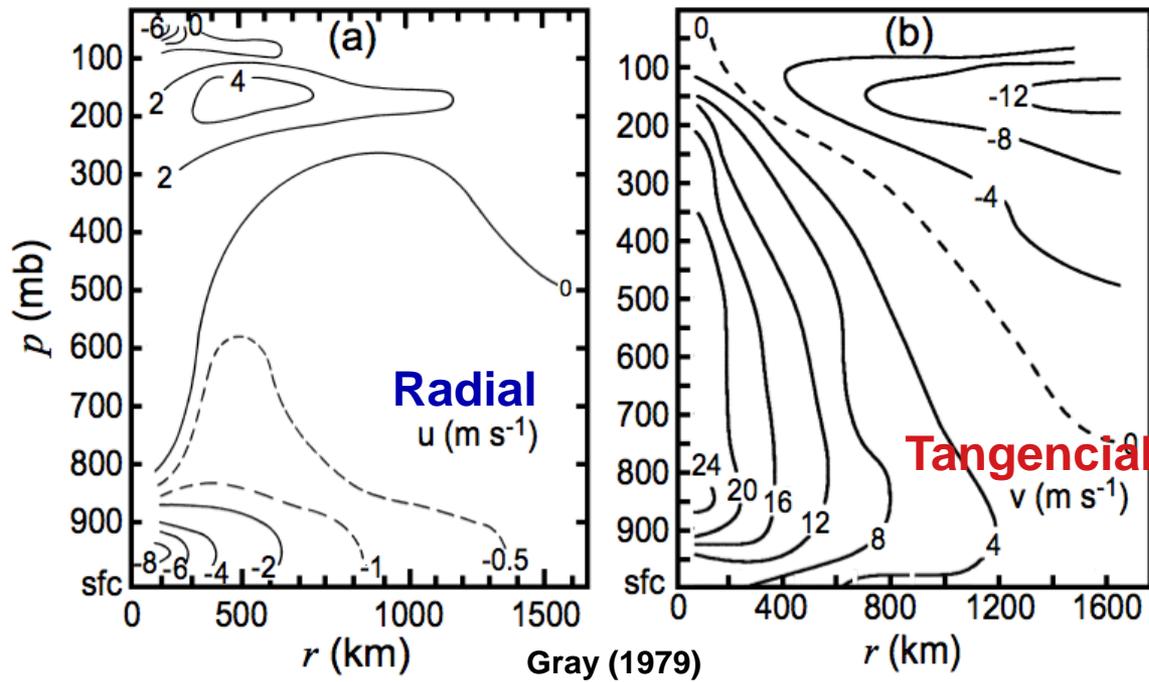
**Bandas de precipitación**



Katrina (2005)

# Corte vertical “climatológico” del CT

Los máximos de las 3  
componentes están en  
la pared del ojo



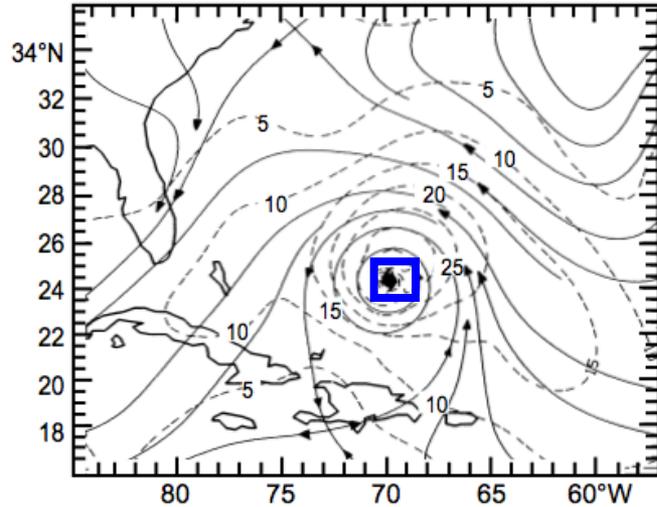
Circulación primaria  
>0 excepto en la  
parte exterior del flujo hacia  
fuera

Circulación secundaria  
<0, niveles bajos  
>0, niveles altos

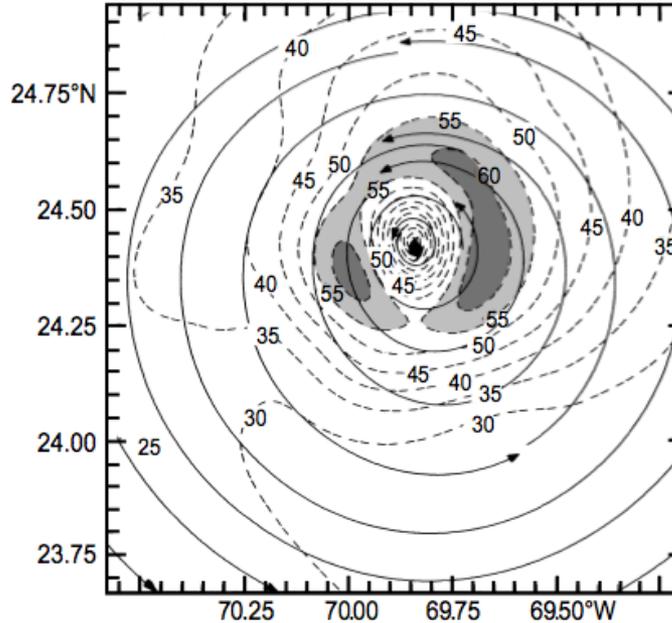
Movimientos verticales  
asociados

# Gloria (1985)

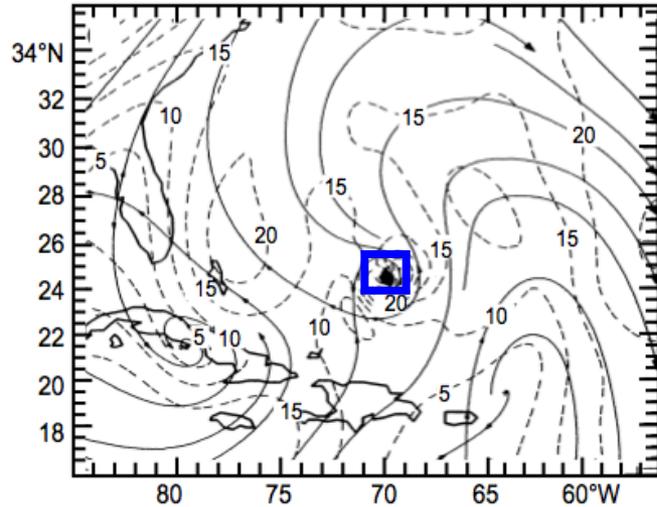
(a) 900 hPa



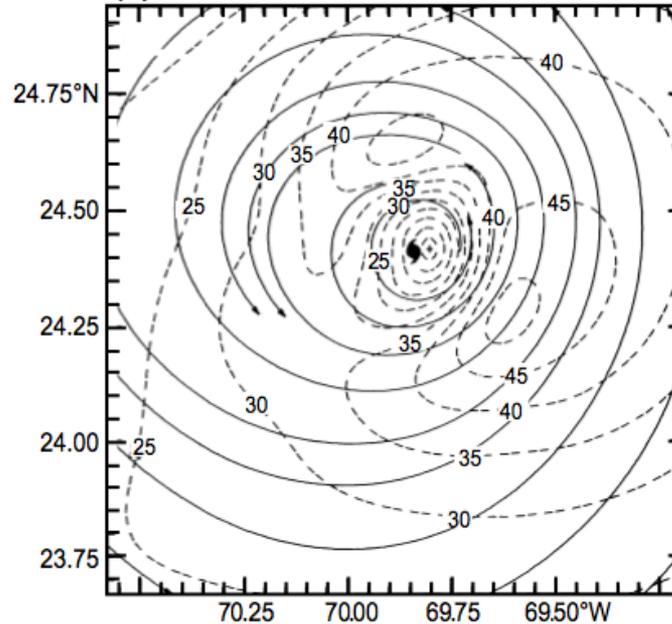
(b) 900 hPa detail



(c) 200 hPa



(d) 200 hPa detail



Campo de viento en 3D

En la CL el aire se mueve hacia adentro en una espiral ciclónica

En la troposfera alta el aire se mueve hacia fuera en una espiral ciclónica - >anticiclónica

Houze et al. (2010)

--Isotacas  $\text{m s}^{-1}$   
- Líneas de corriente

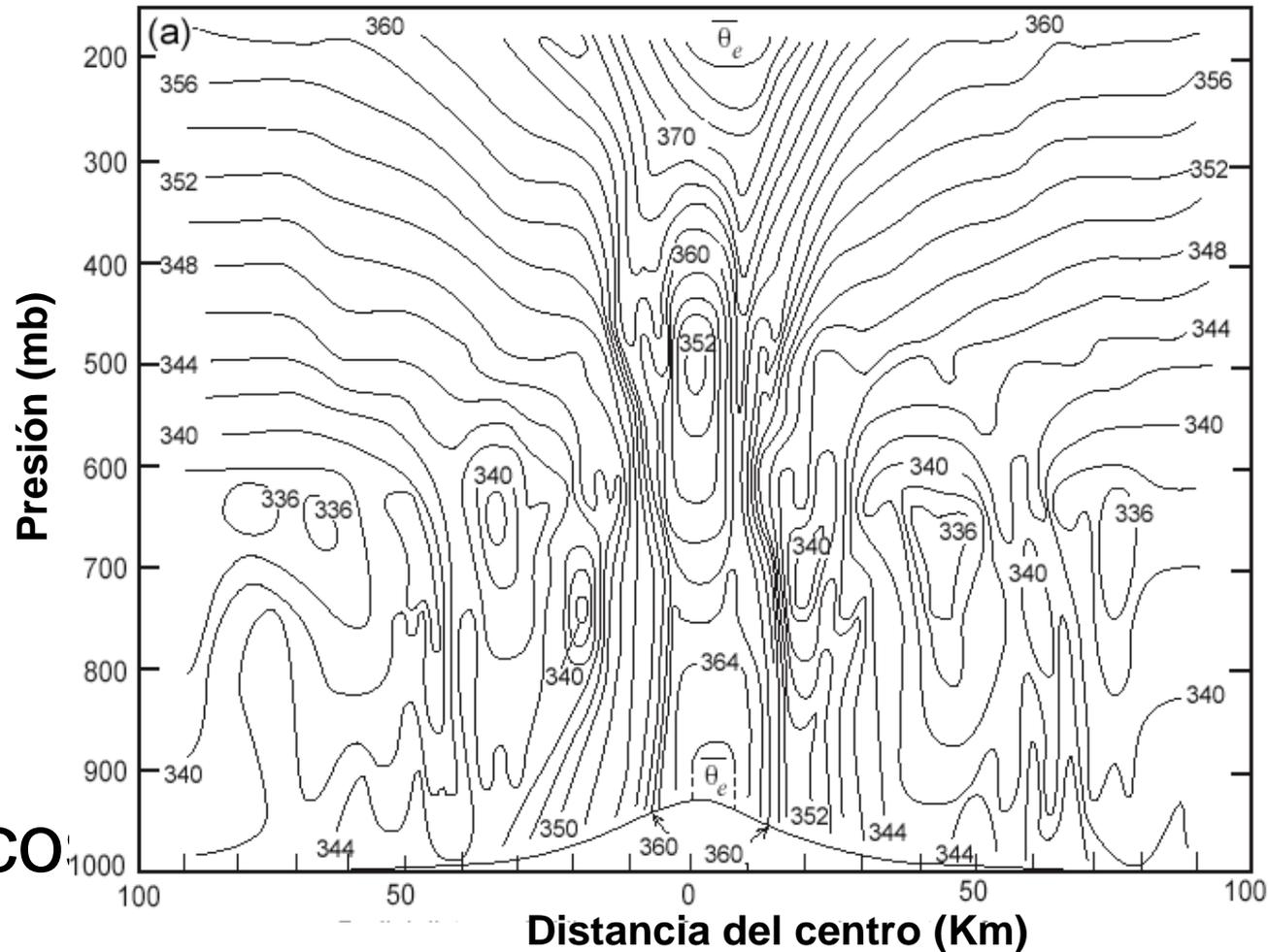
$\theta_e$

$\theta_e$  en los trópico

Vs

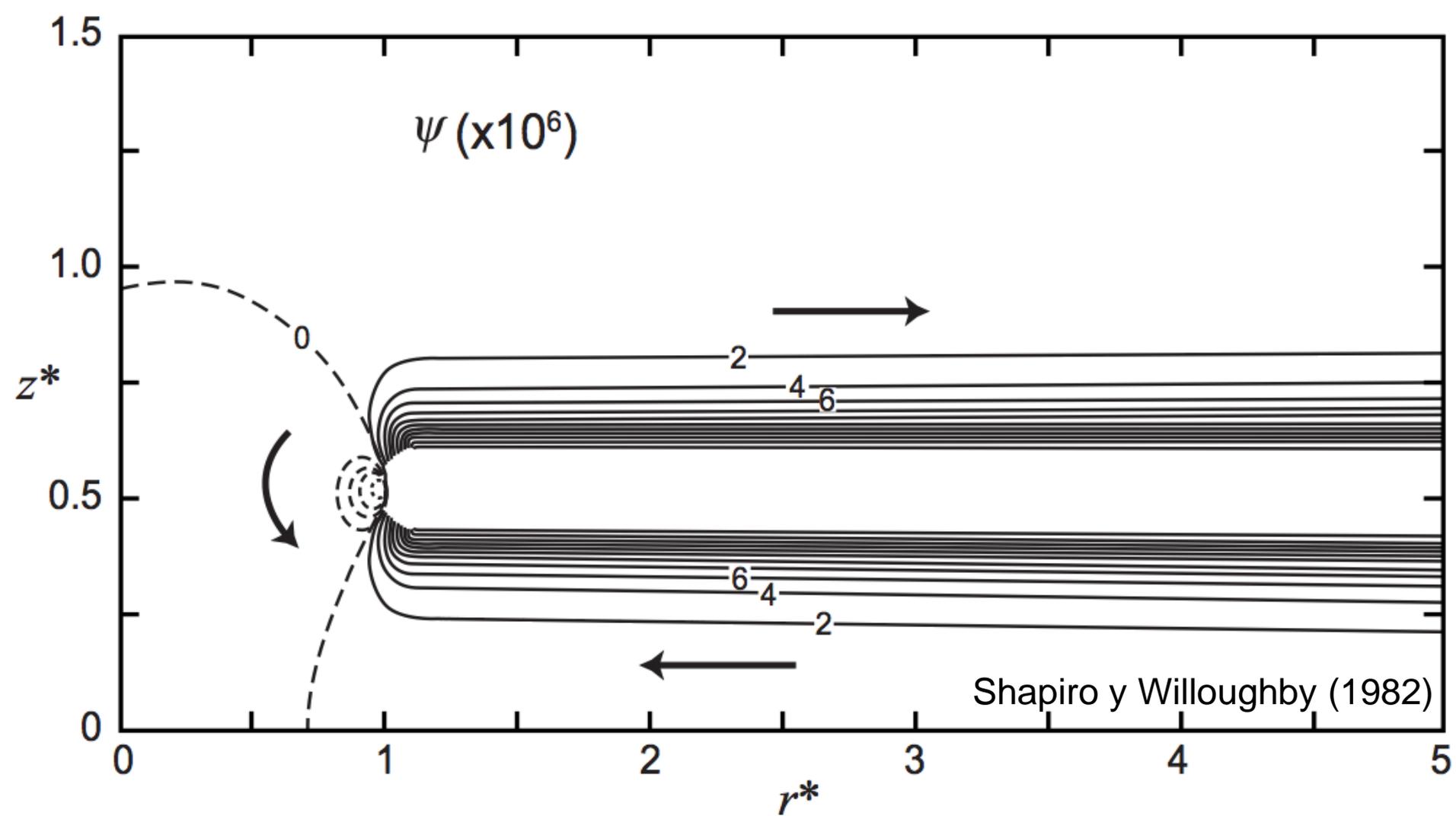
$\theta_e$  en el CT

- Crece hacia adentro en niveles bajos
- Constante arriba de la CL



# Conclusiones

- **Los CT tienen una estructura común:**
  - **Viento (3D)**
    - Flujo hacia adentro (afuera) en niveles bajos (altos)
    - Flujo ciclónico (ciclónico/anticiclónico) en niveles bajos(altos)
    - Fuertes ráfagas verticales en la pared del ojo
  - **Termodinámica**
    - $\theta_e$  diferente que en el resto de los trópicos



Circulación secundaria es la respuesta de un vórtice a una **fente de calor**

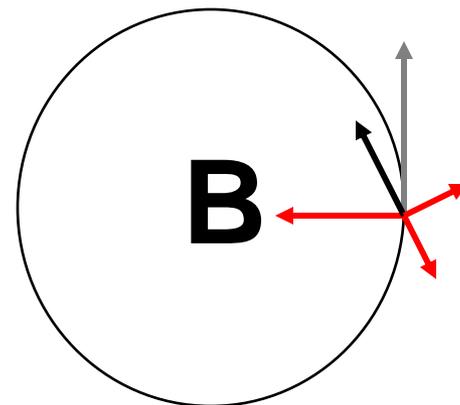
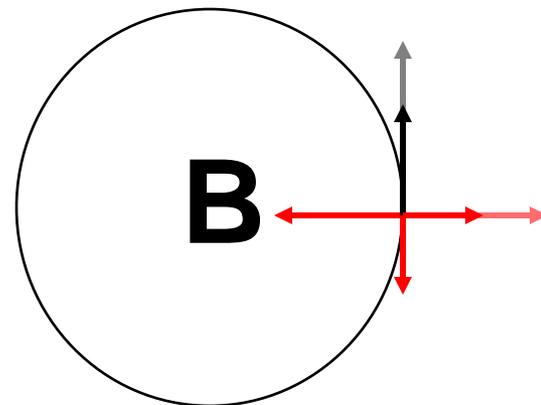
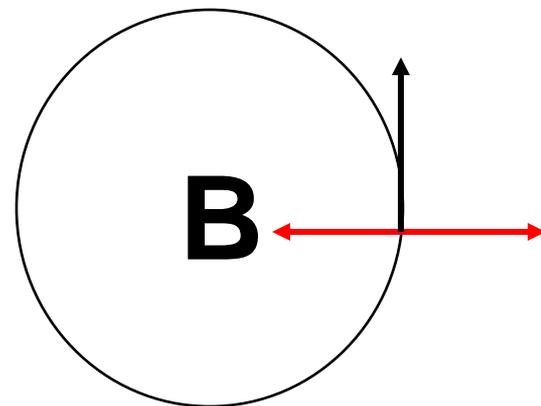
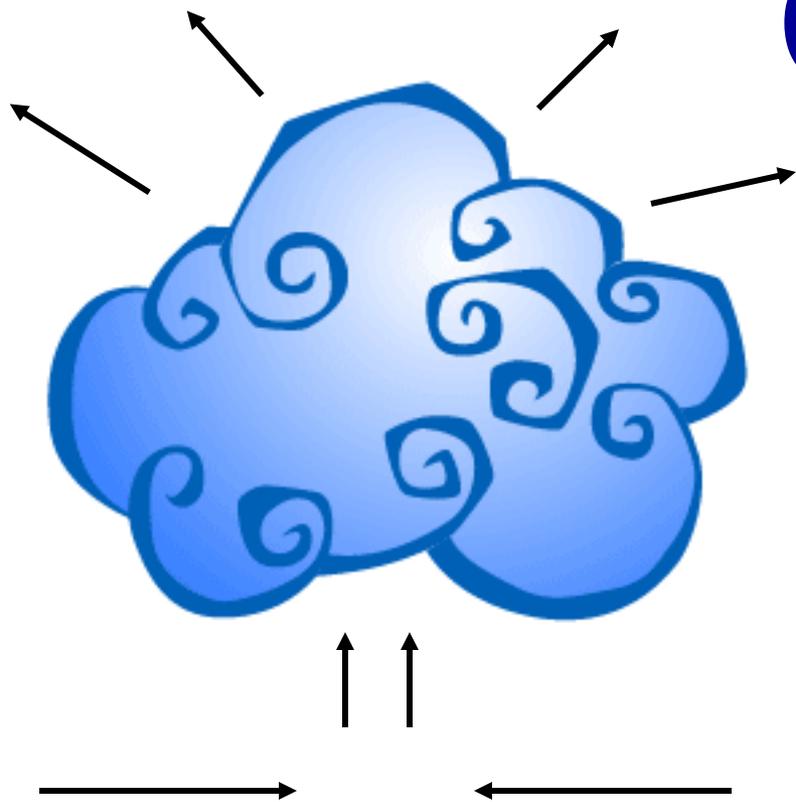
- No en estado estacionario

- Evidencia empírica (Willoughby et al.; 1982, Willoughby 1990, 1998; Houze et al. 2006, 2007)

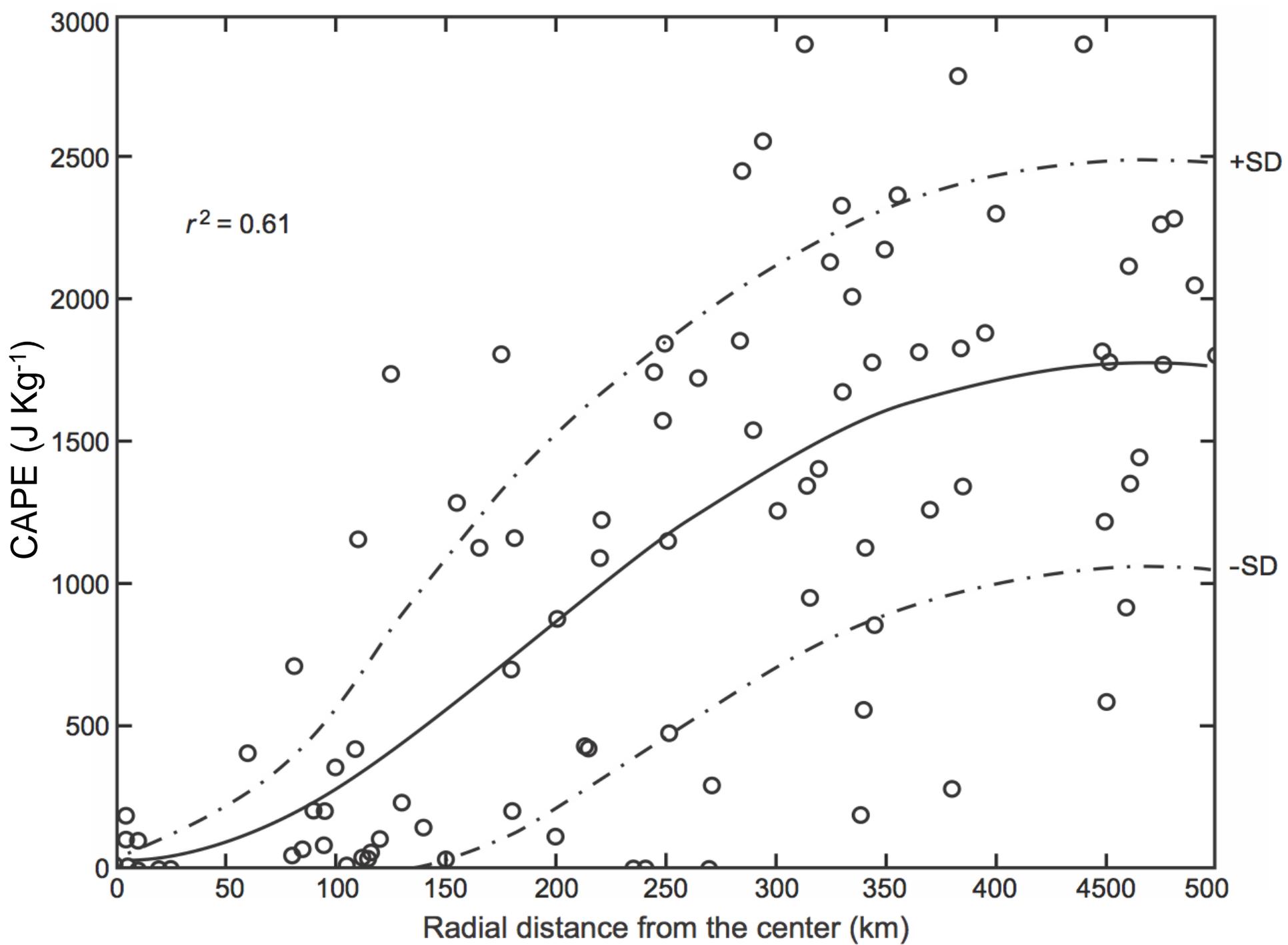
# Inestabilidad Condicional del Segundo Tipo:

## Segundo Tipo:

# CISK



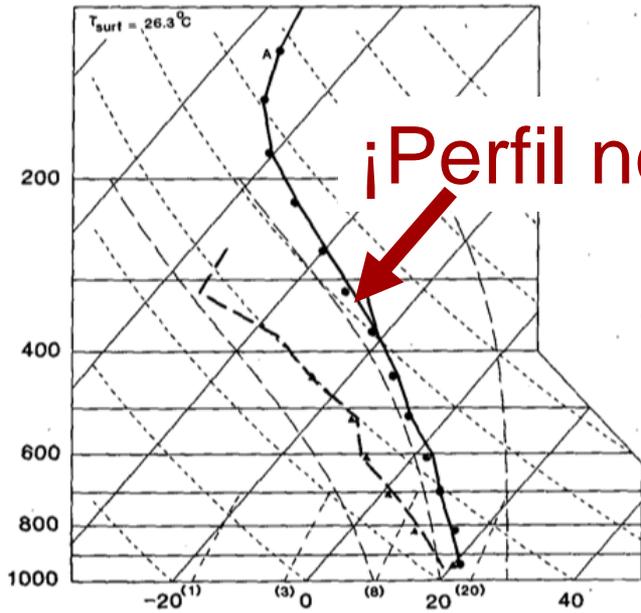
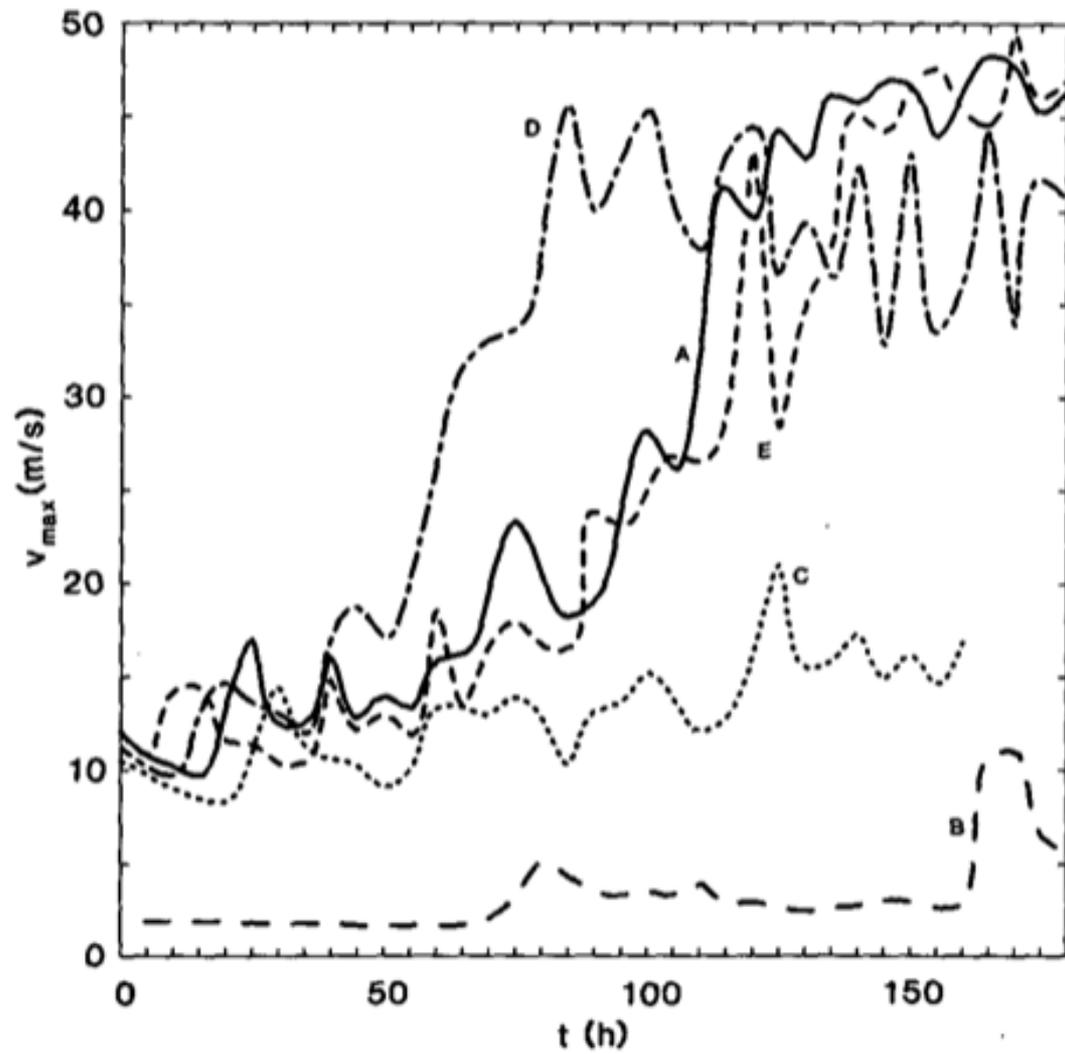
Convergencia por fricción



# Rotundo y Emanuel, 1986

$$\frac{dV}{dt} = -c_p \theta_v \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_w$$

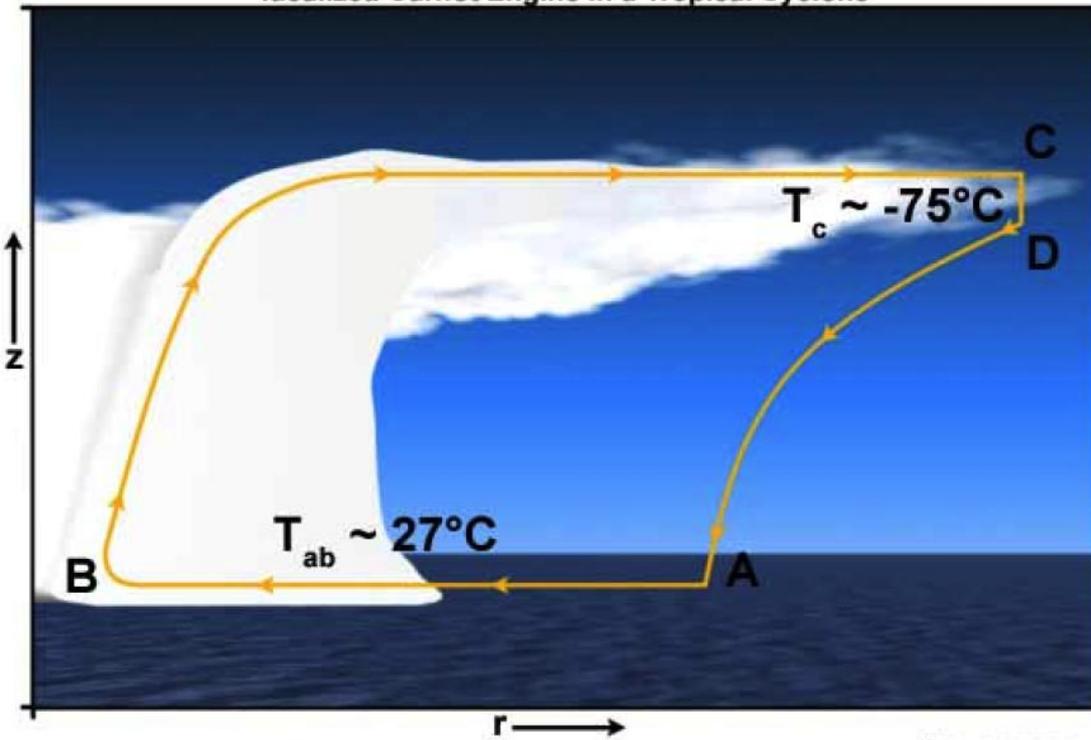
$$+ g \left\{ \frac{\theta - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} + 0.61(q_v - \bar{q}_v) - q_l \right\}$$



▲ ● Jordan, 1958

**Inestabilidad condicional innecesaria para generar CTs**

## Idealized Carnot Engine in a Tropical Cyclone



Flujo de calor en la superficie inducido por el viento

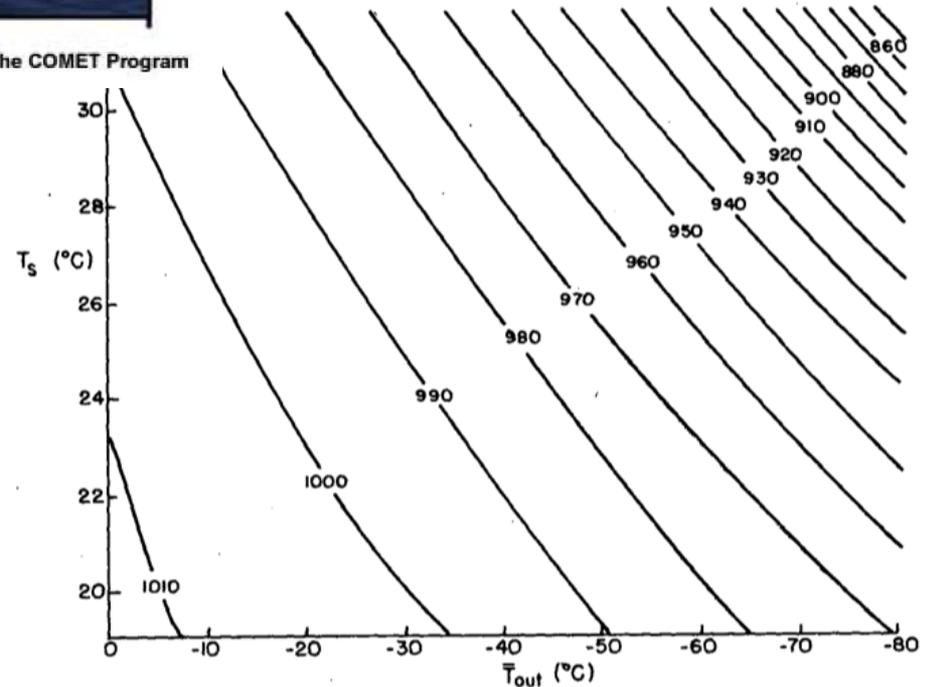
# WISHE

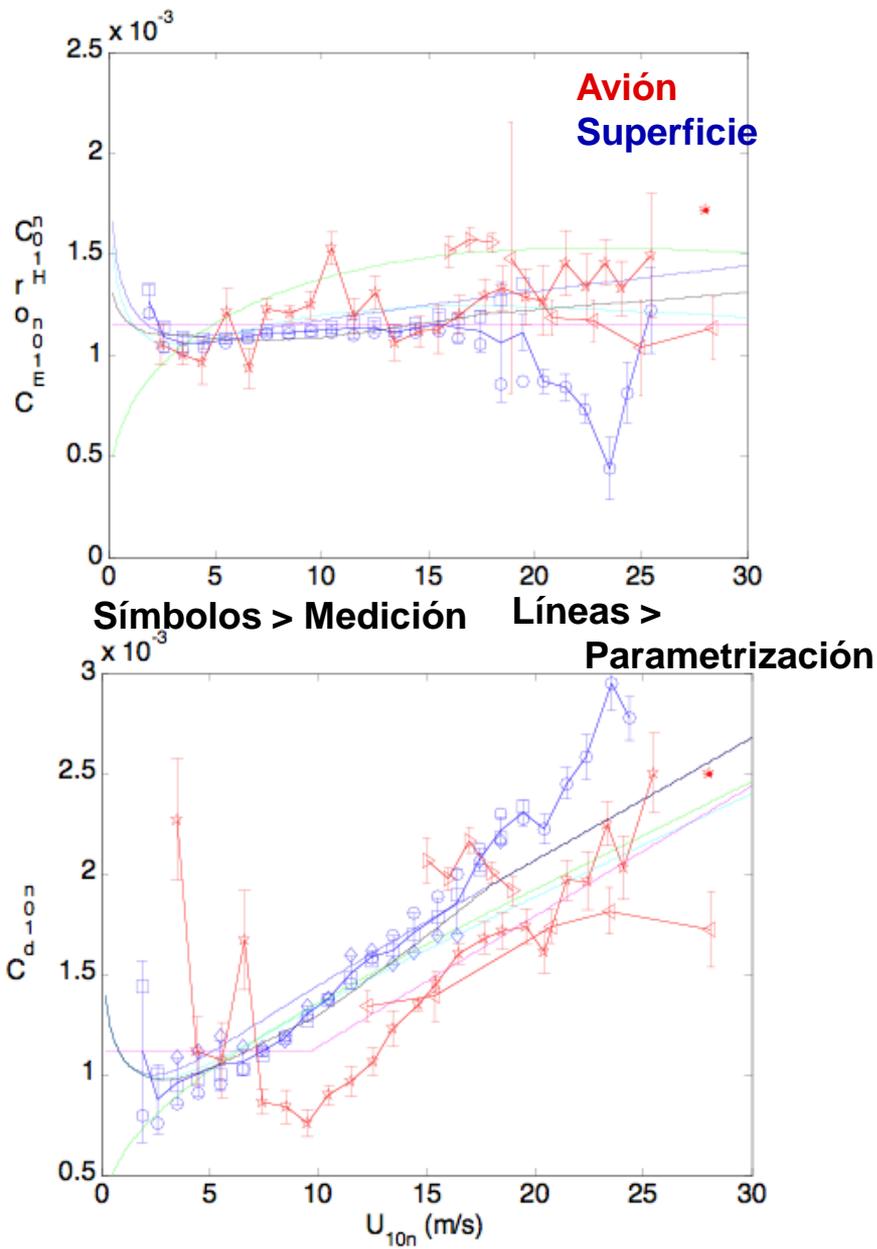
Los CT son resultado de una inestabilidad océano-atmósfera

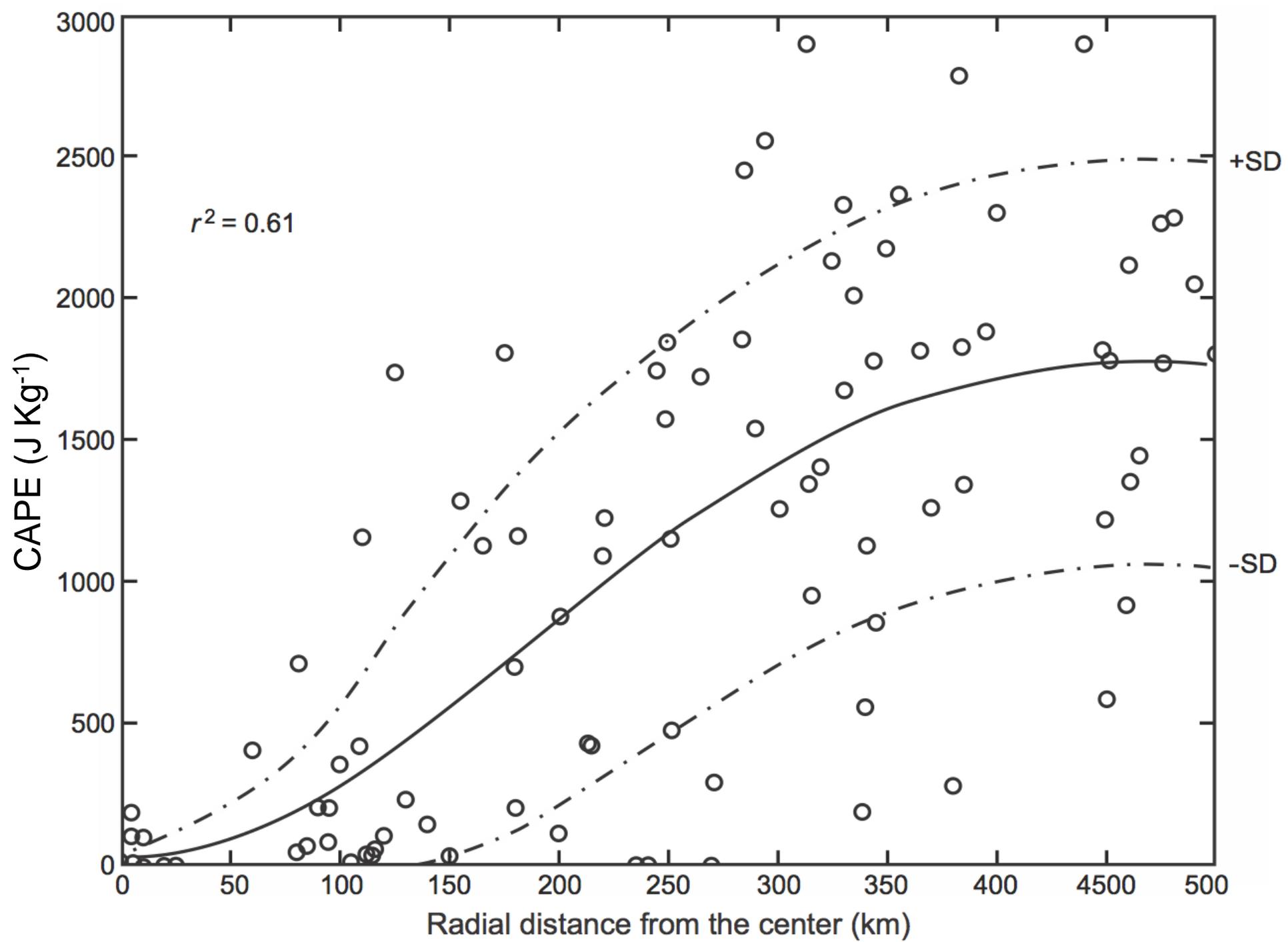
$$\varepsilon = \left( \frac{300 - 200}{300} \right) = \frac{1}{3}$$

$$V^2 = \left( \frac{T_s - T_o}{T_s} \right) \frac{C_E}{C_k} (K^* - K)$$

©The COMET Program







# Conclusiones

- **La circulación de un CT maduro es esencialmente la respuesta de un vórtice a una fuente de calor**
- **CISK ve a los CT como el resultado de una inestabilidad condicional “de segundo tipo”**
- **WISHE ve a los CT como el resultado de una inestabilidad del sistema océano-atmósfera**
- **Hay gran incertidumbre en la medición de variables esenciales**

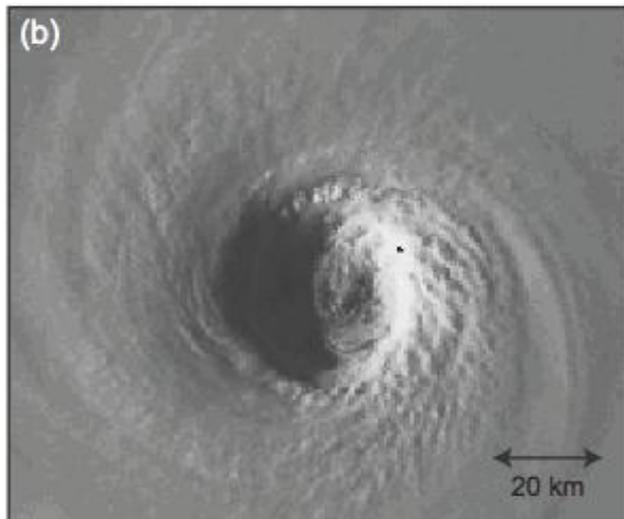
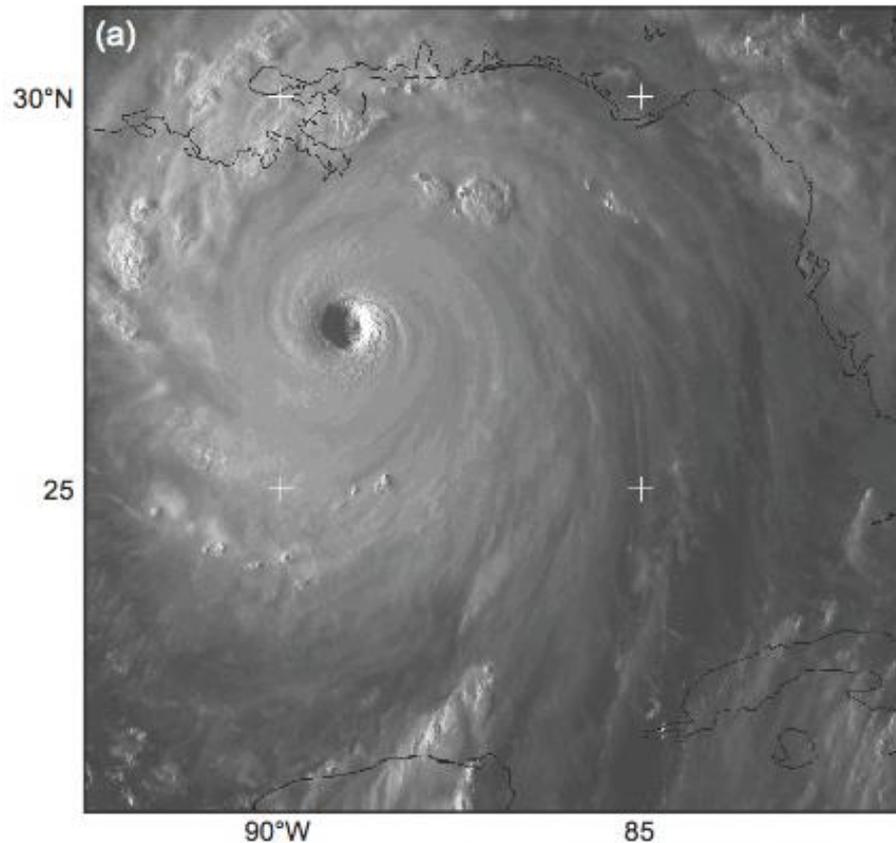
# ¿Cual es la estructura de un CT?

**Circulación CT, 3D**

**Ojo**

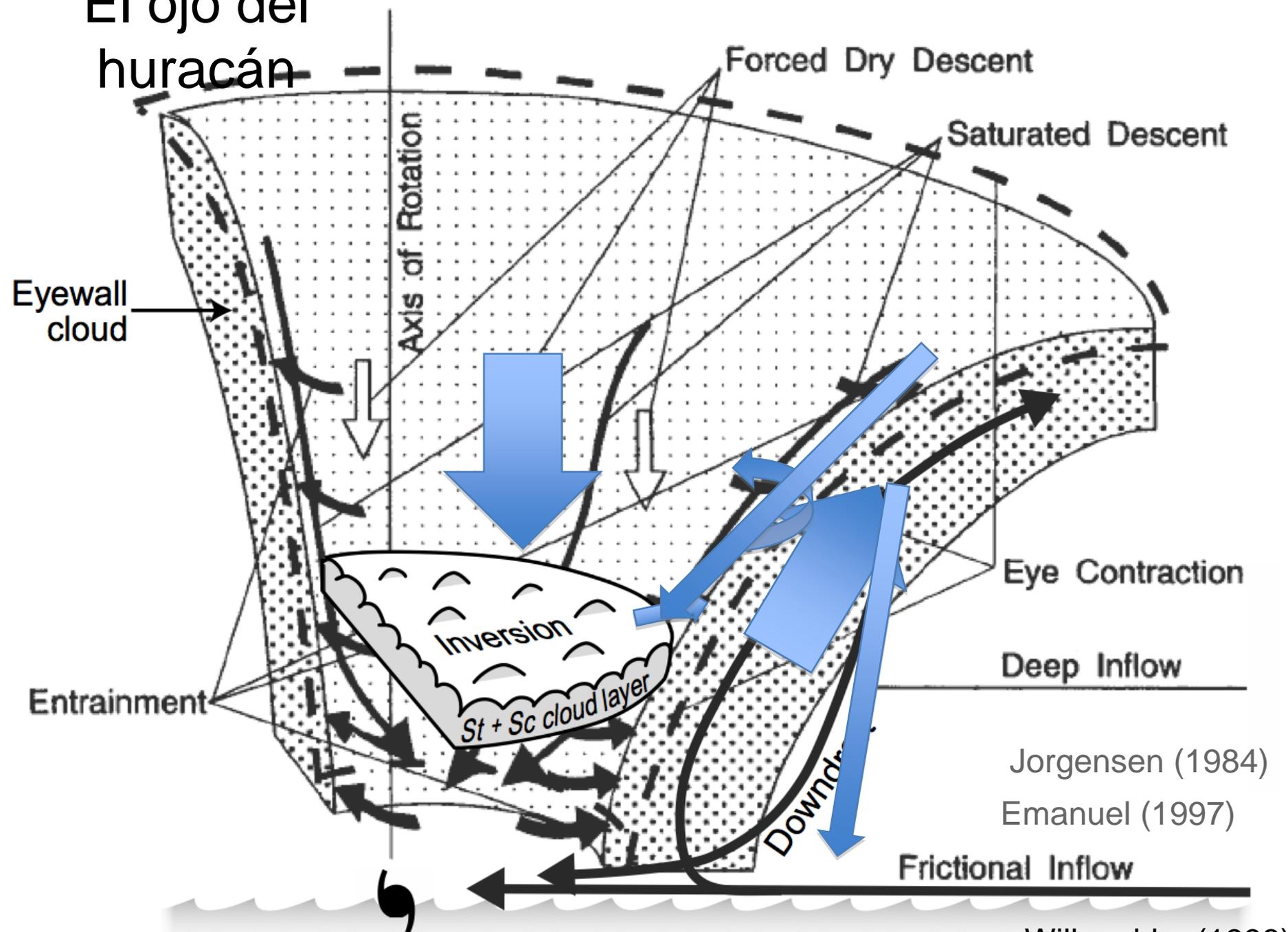
**Pared del ojo**

**Bandas de precipitación**



Katrina (2005)

# El ojo del huracán



Jorgensen (1984)

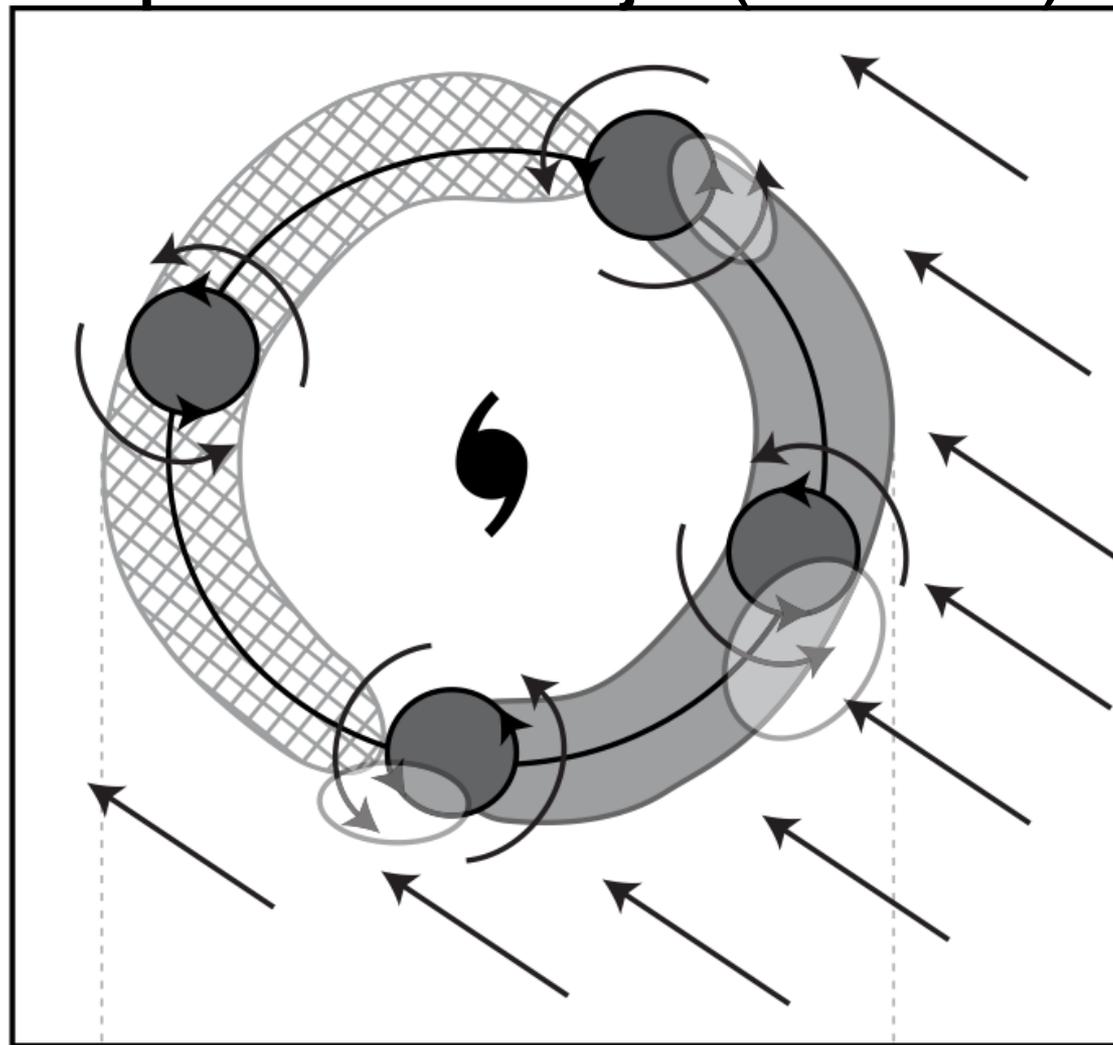
Emanuel (1997)

Willoughby (1998)



Huracán Olivia, 25 Sep de  
1993 Willoughby (1998)

# Máximos de vorticidad en la pared del ojo (MVPO)



Simulación  
realista de  
Bonnie (1998)

•2D vs 3D

•Ráfagas verticales asociadas con **vórtices pequeños** en el campo de viento horizontal

•Permanecen erguidas y coherentes mientras son advectadas alrededor del ojo

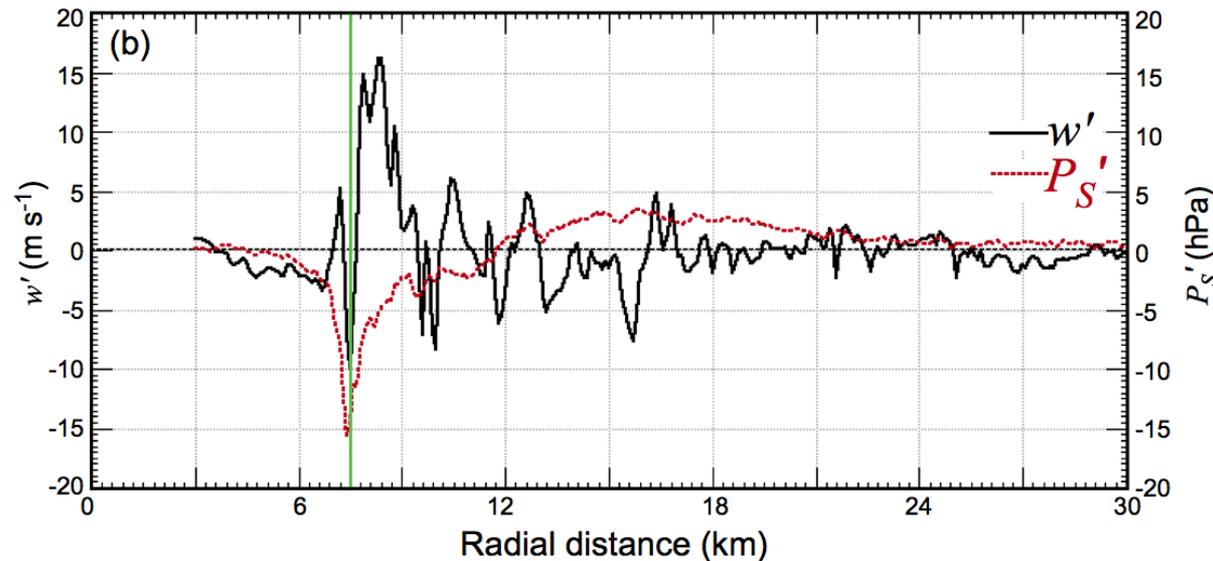
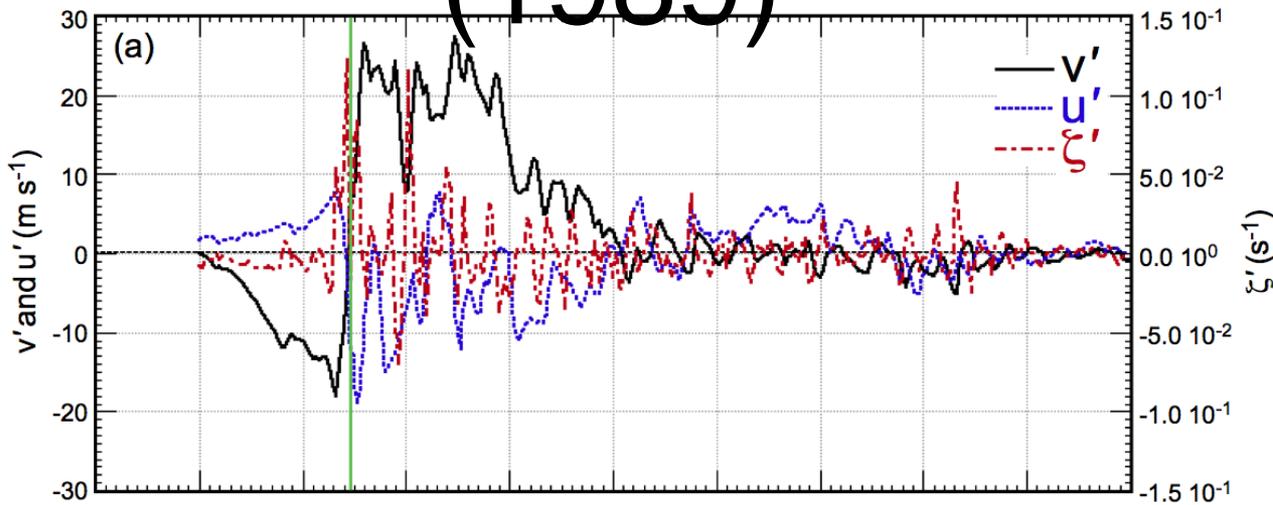
~ 100 km

Braun et al. (2006)

**¡Sobreviven la cizalla!**

# MVPO Hugo (1989)

Vórtice, CT  $r \sim 30\text{km}$   
MVPO  $r \sim 7\text{km}$



Marks et al. (2008)

## MVPO

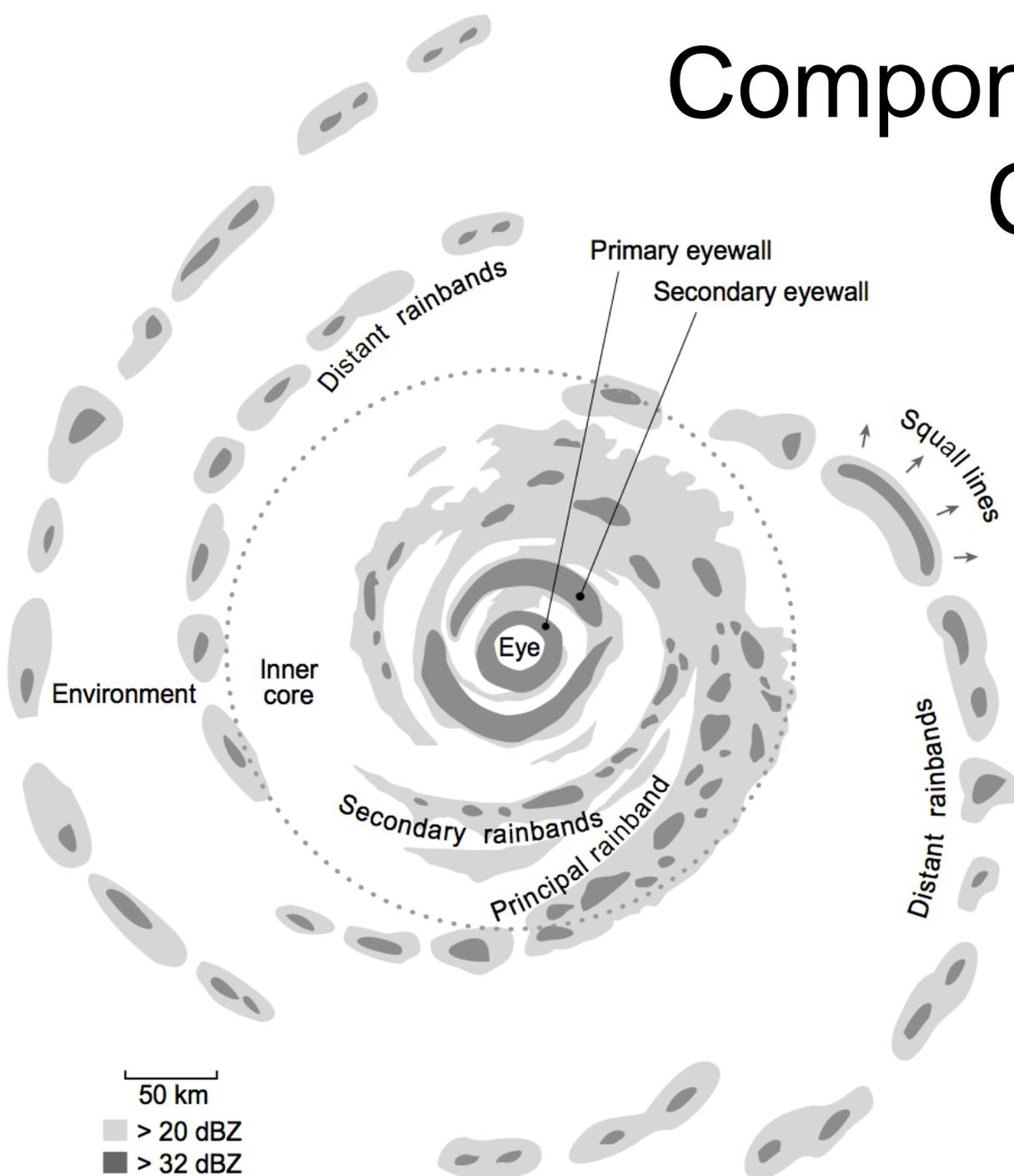
- Obtienen la rotación de la  $\zeta$  en la pared del ojo

≠

## TCV

- De Obtienen la rotación de:
  - CLP
  - Inclinación de la cizalla
- Ocurren durante la CG

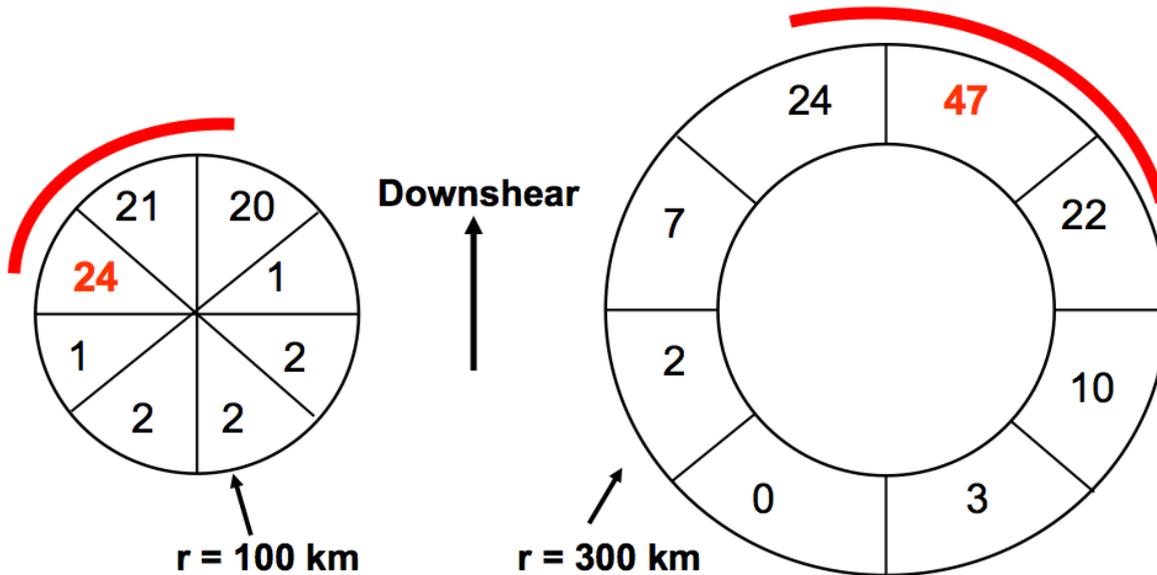
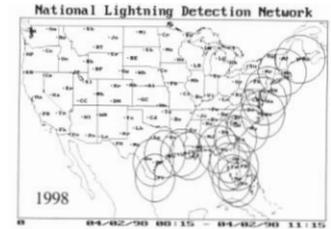
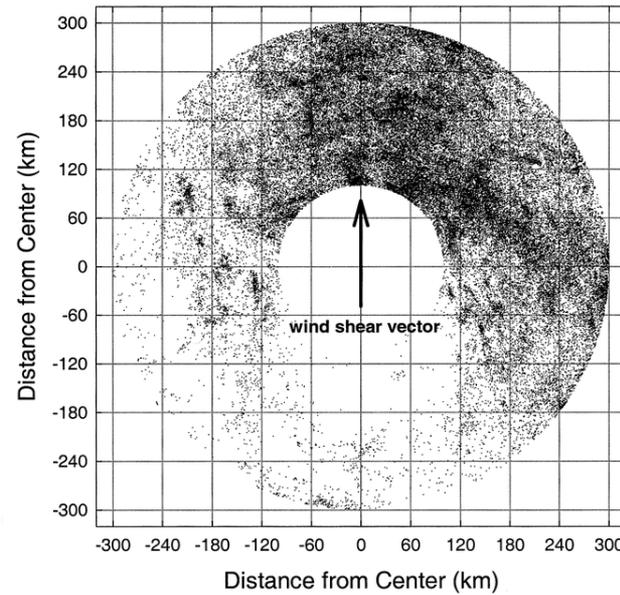
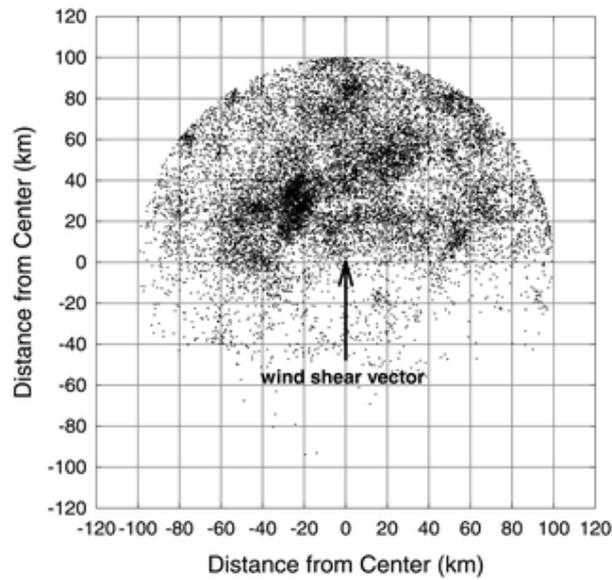
# Componentes del CT



Asimetrías en la convección

Paredes secundarias

# Asimetrías reveladas por rayos



Región central  
Izquierda de cizalla abajo

Región externa  
Derecha de cizalla abajo

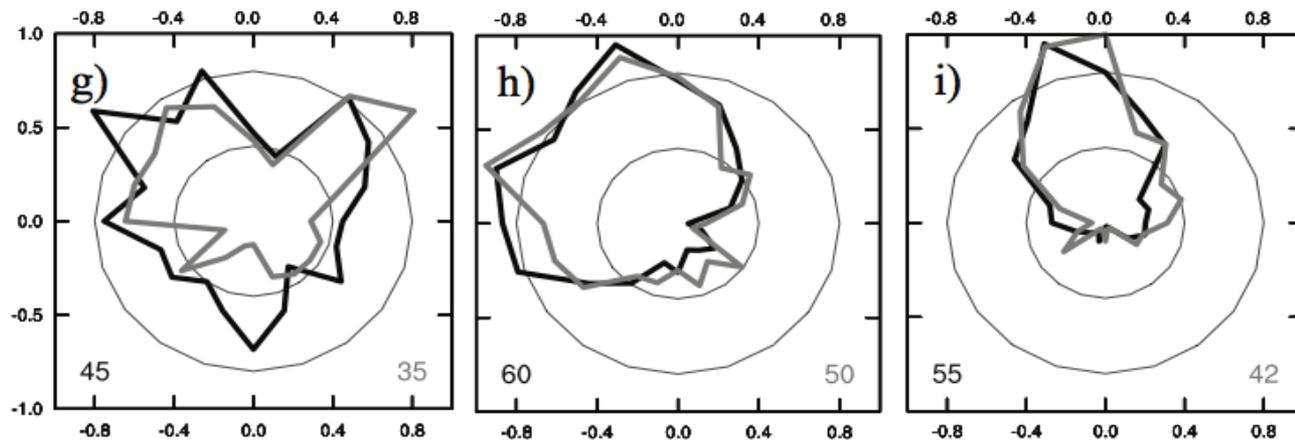
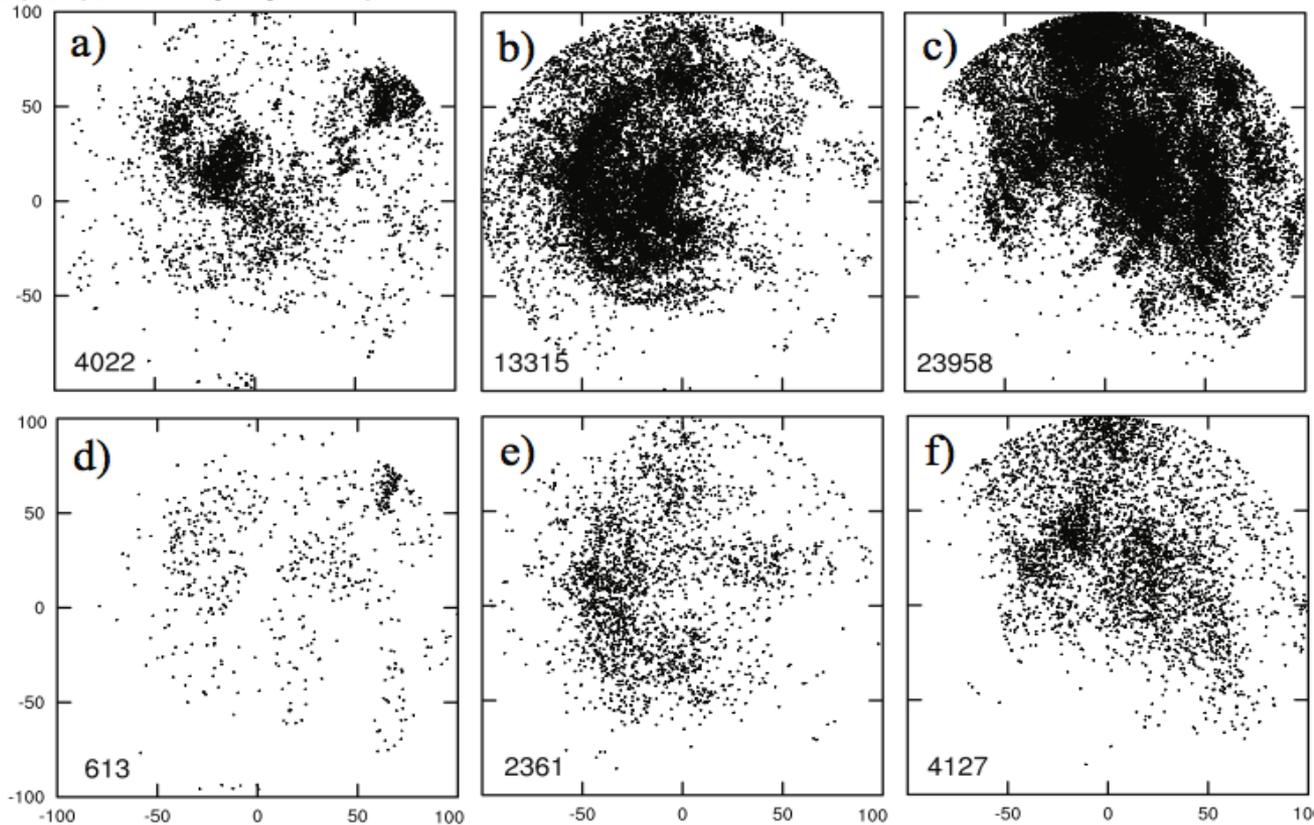
Cizalla

0-5  $\text{ms}^{-1}$

5-10  $\text{ms}^{-1}$

>10  $\text{ms}^{-1}$

Distancia del centro

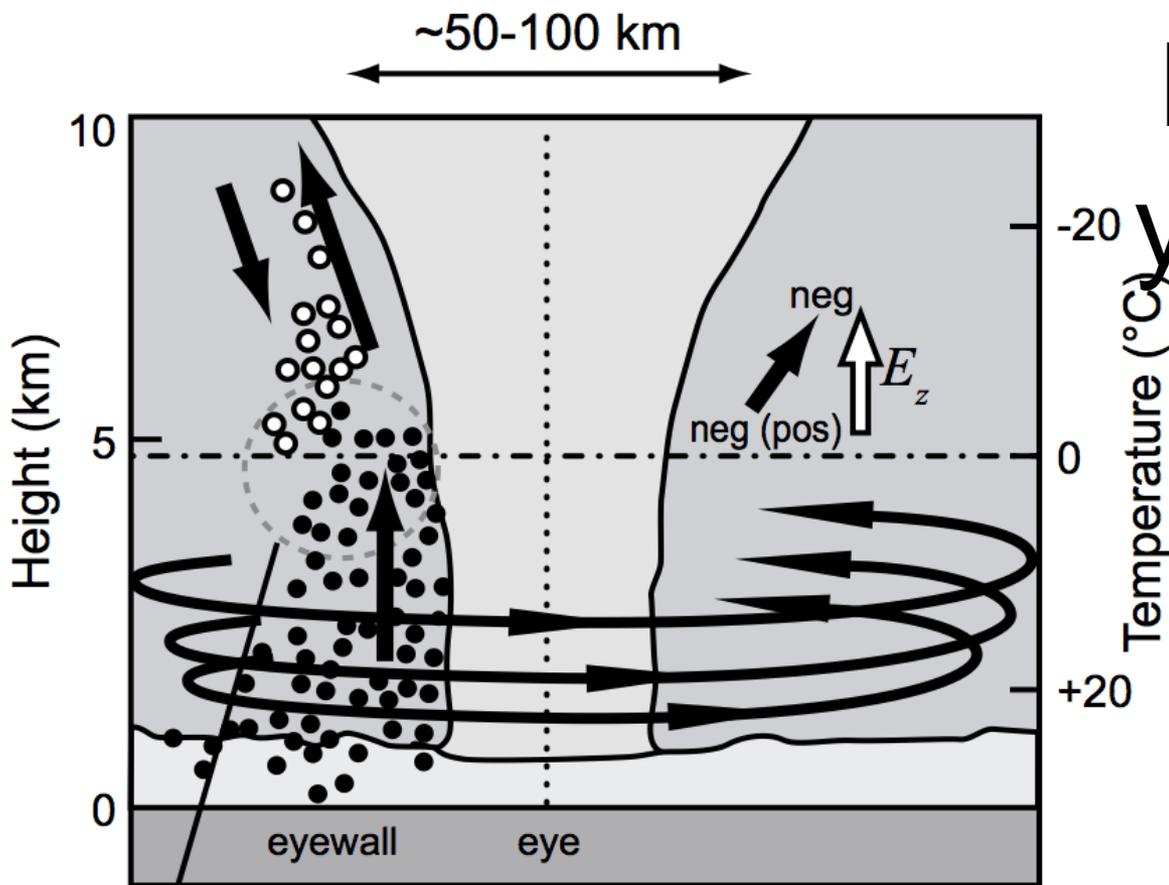


# WWLLN

Estrechamiento de la región azimutal donde ocurre la convección cuando la cizalla es más fuerte

¡Expandir el estudio a las cuencas del mundo!

Abarca et al. (2010)

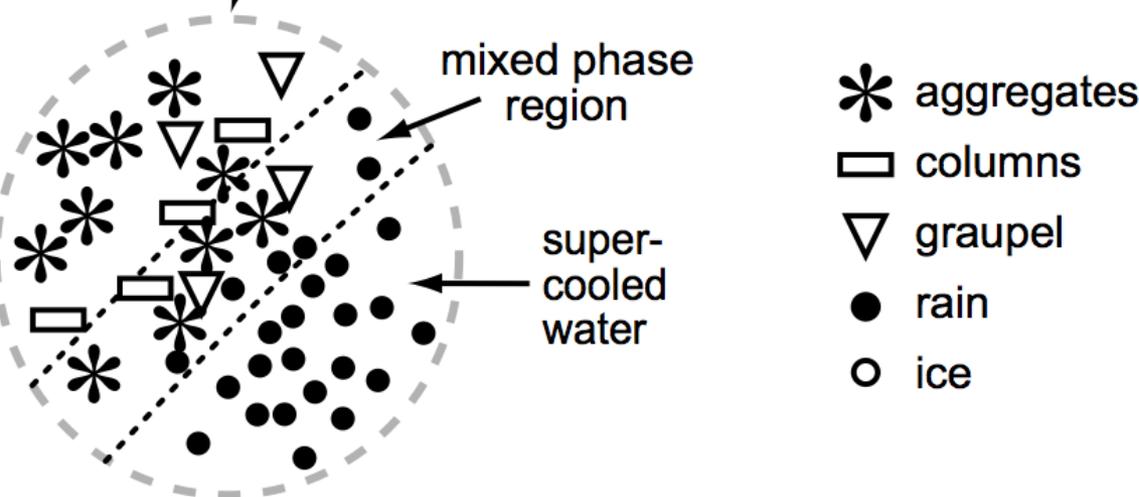


# Electricidad y microfísica en el CT

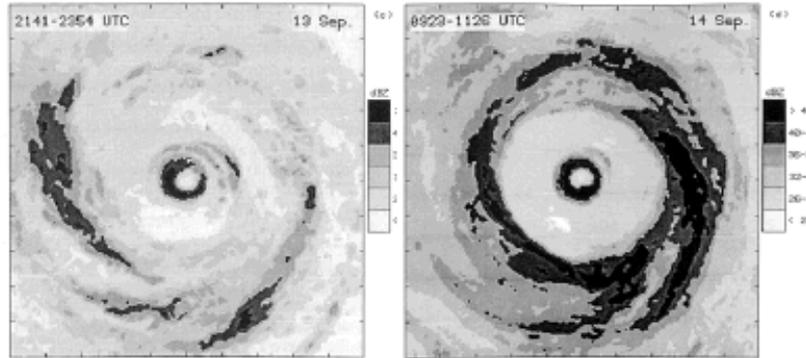
- Capa somera de agua sobre-enfriada y partículas de hielo

- Agua sobre-enfriada en la región interna

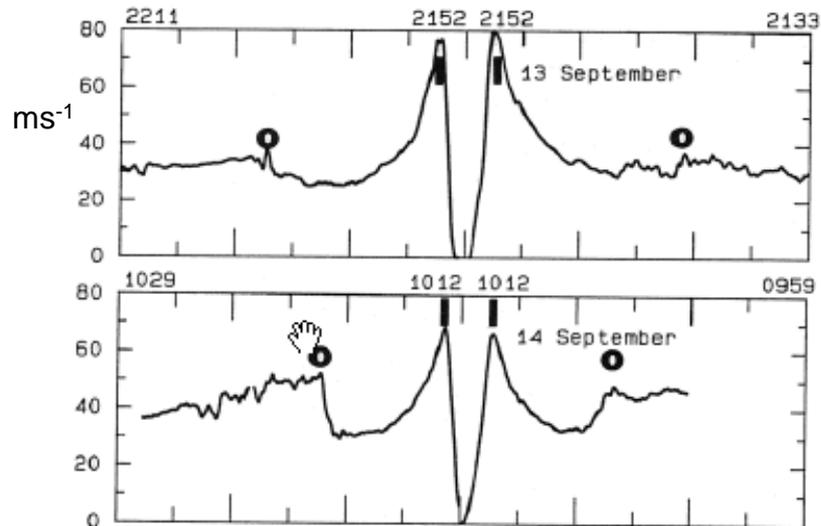
- Nubes glaciadas en la región externa



# Formación de Paredes Concéntricas (FPC)

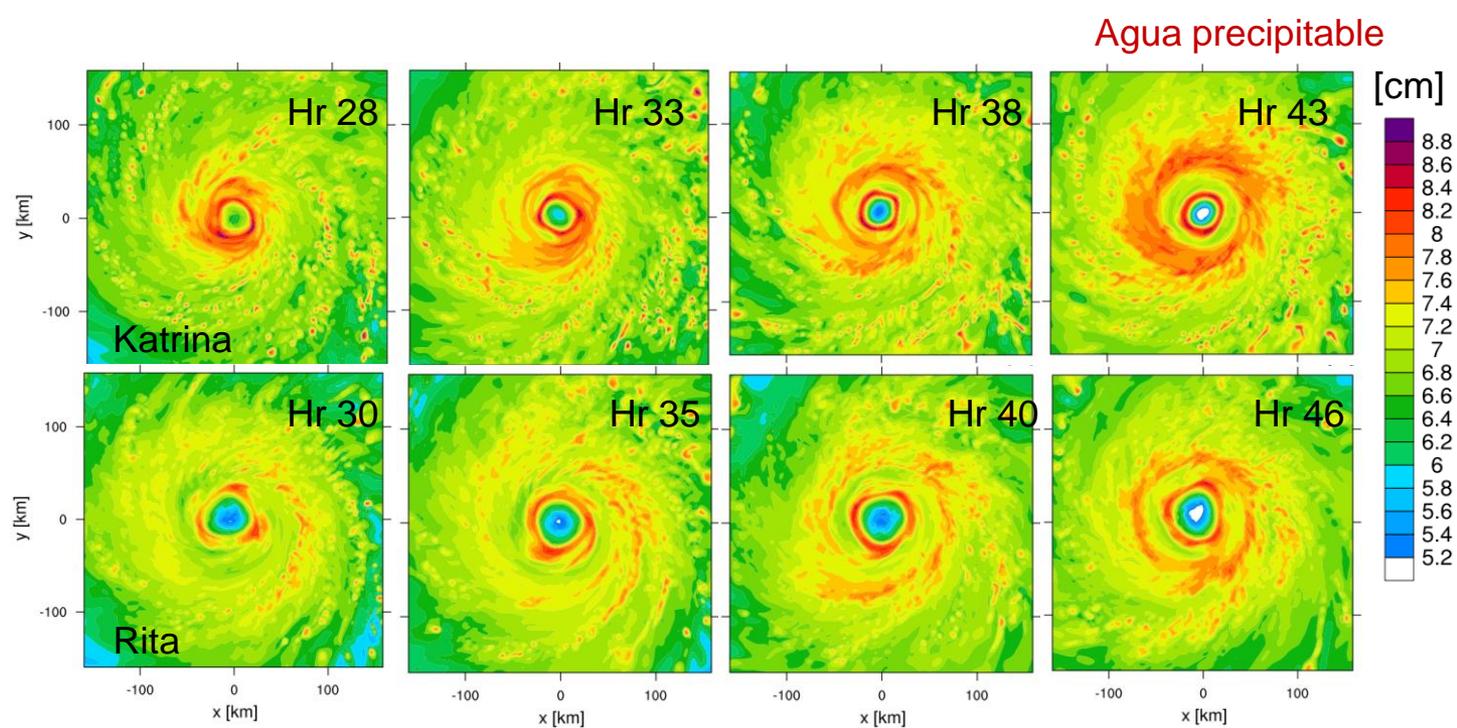


Gilberto (1988)



Black and Willoughby (1992)

# 72 hrs Simulación



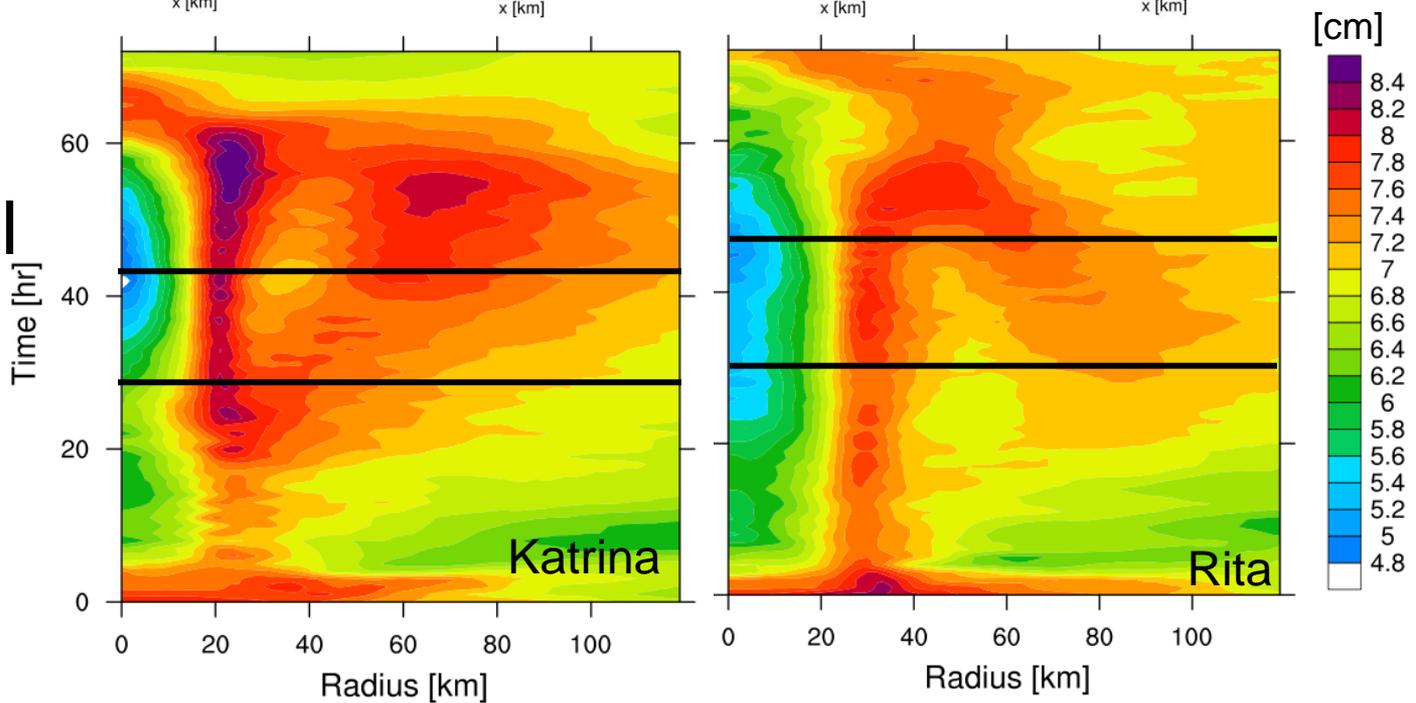
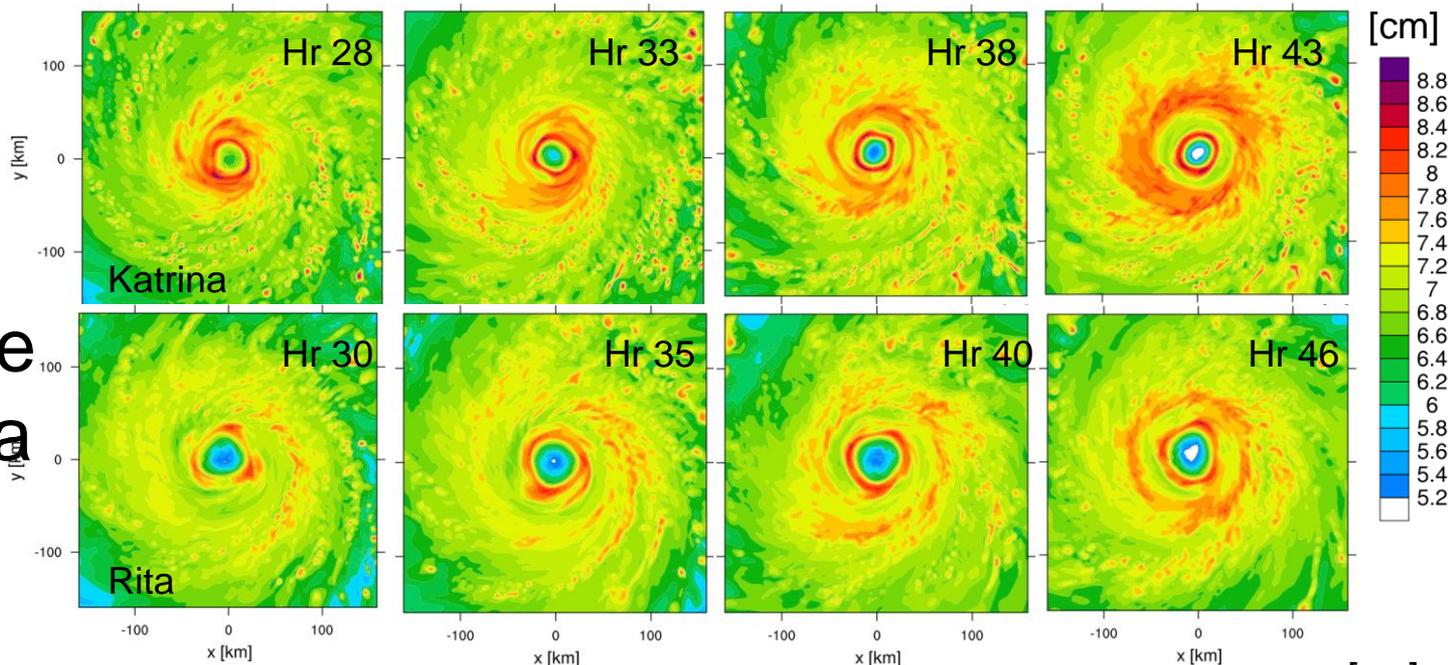
## •Katrina

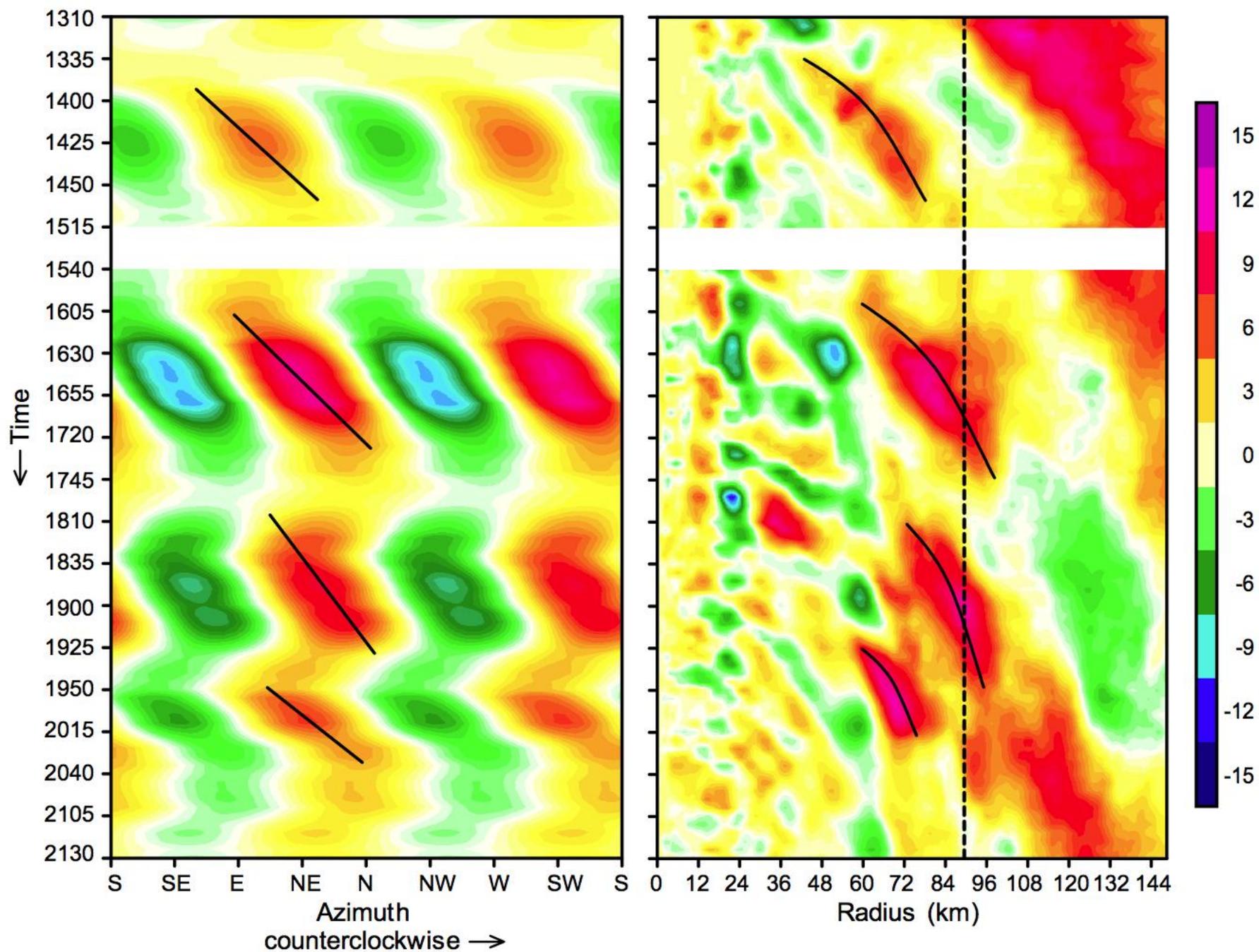
- Las bandas parecen emanar hacia fuera
- La estructura concéntrica se identifica inicialmente a la hr 43

## •Rita

- Las bandas parecen evolucionar en dirección azimutal hasta completar la estructura concéntrica
- Estructura concéntrica se identifica inicialmente a la hr

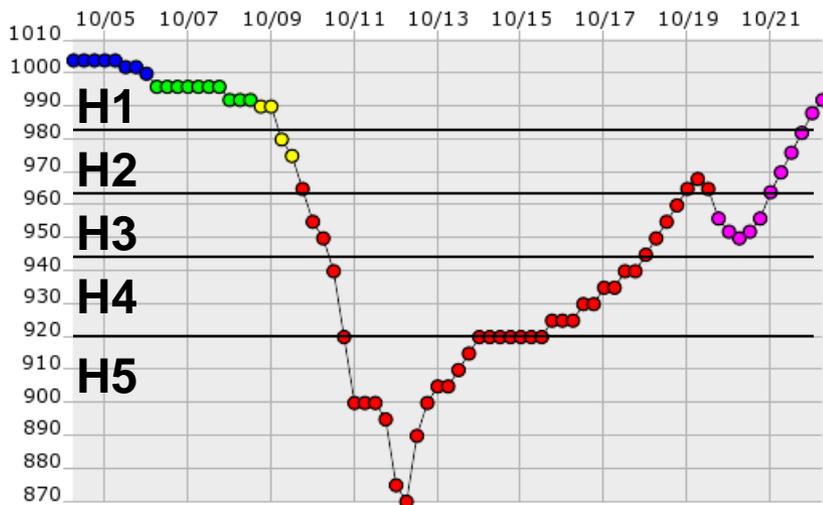
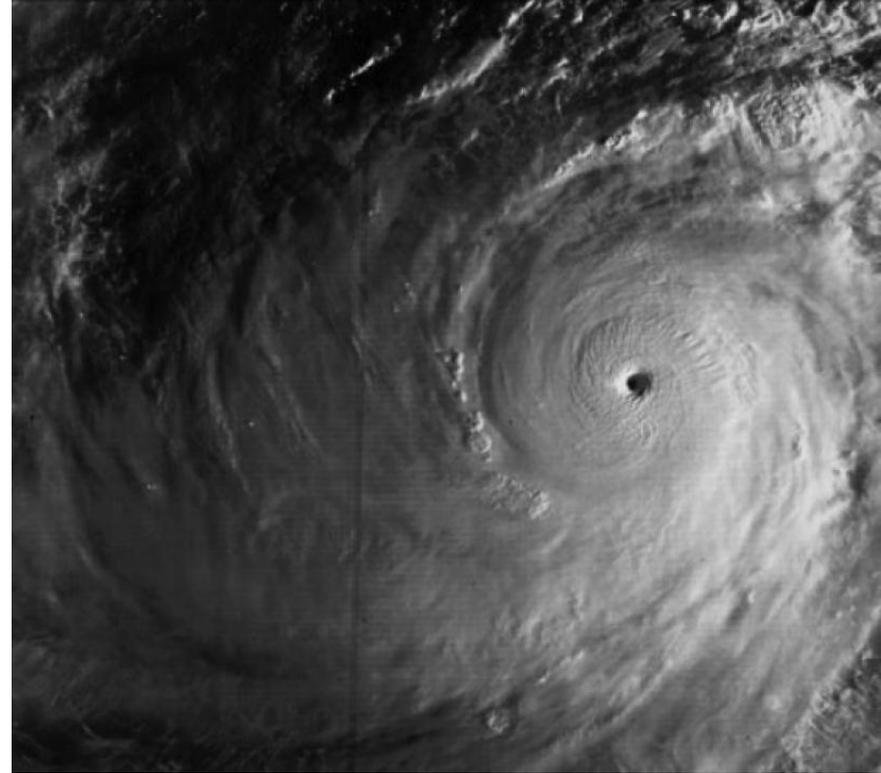
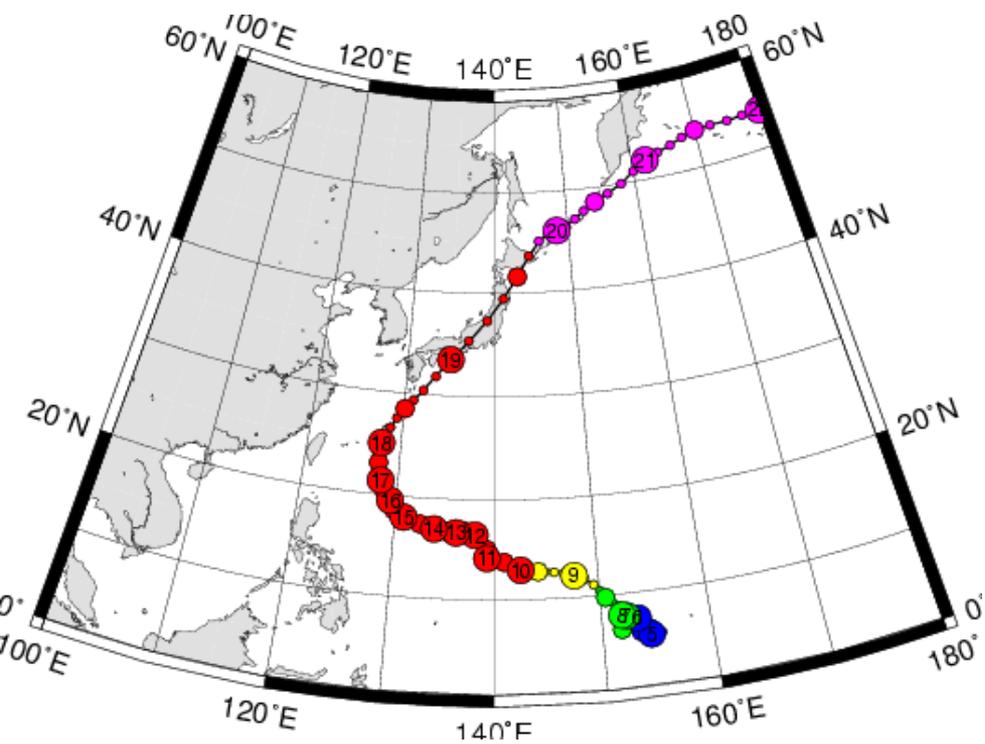
Procesos que resultan en la FPC comienzan antes de que su señal aparezca en el promedio azimuthal





# Conclusiones

- **El CT exhibe una variedad de procesos con efectos en la intCT en:**
  - **La pared del ojo**
    - **Ráfagas verticales (hacia arriba y hacia abajo)**
    - **MVPO**
  - **Bandas nubosas**
    - **FPC**
- **Los CT también exhiben asimetrías asociadas a factores ambientales**

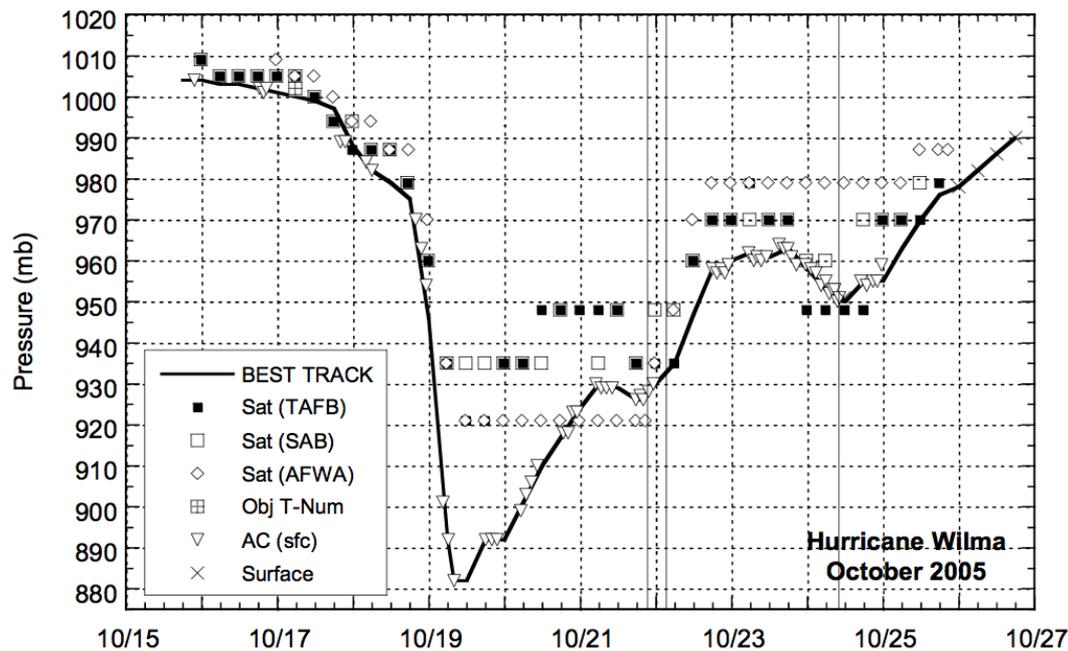
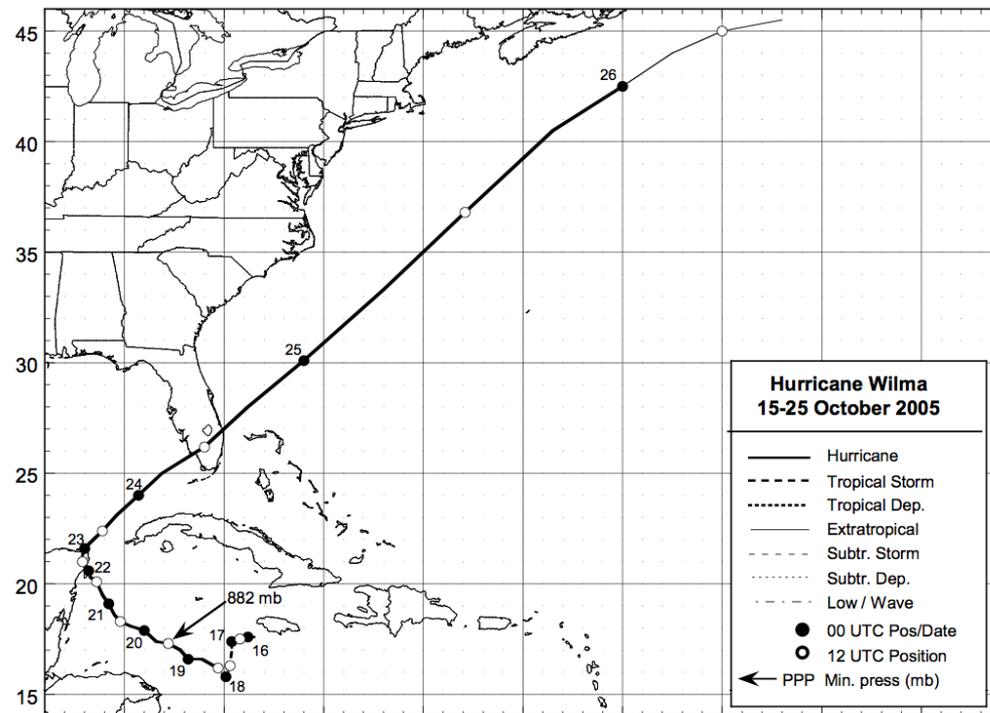
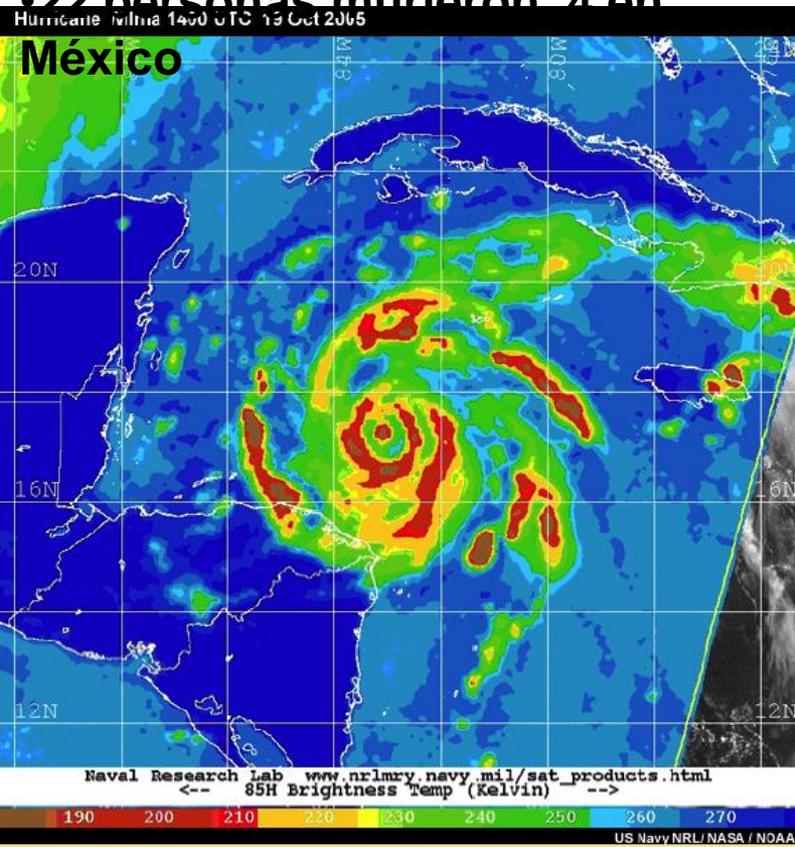


## Tip, 1979

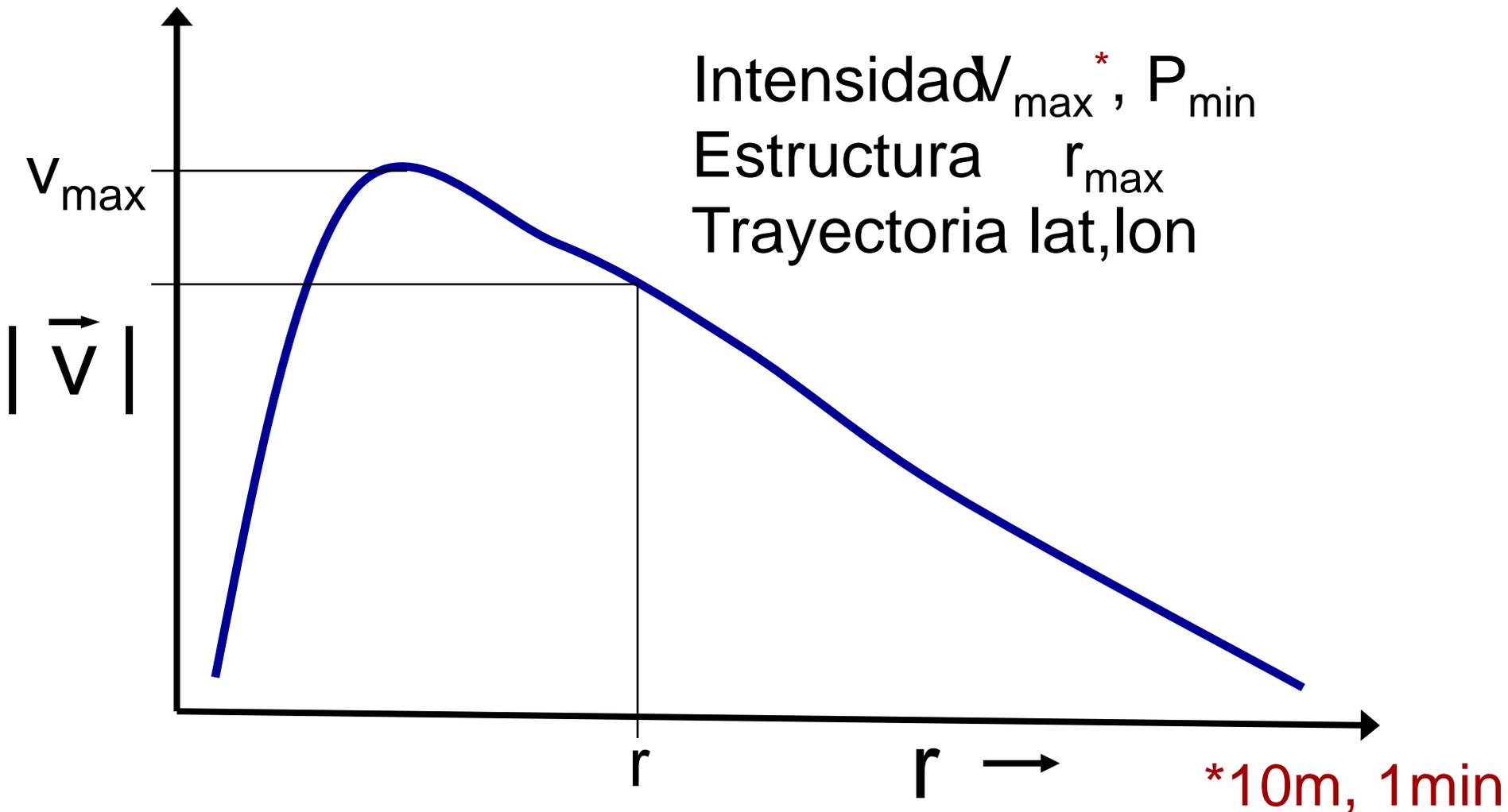
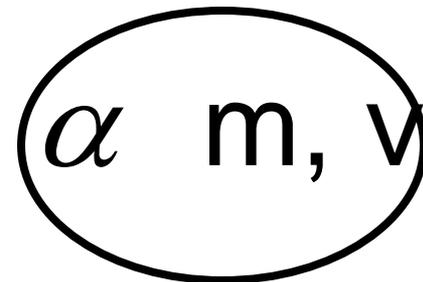
- CT más intenso
- Octubre, 1979
- 880 hPa, H5-50hPa!  
rango H4, ~24hPa  
H3, ~20hPa
- $V_{max}=305 \text{ Km h}^{-1}$  ( $85 \text{ m s}^{-1}$ )

# Wilma, 2005

- CT más intenso en el Hemisferio Oeste
- 882 hPa (6hPa menos que Gilbert 1988)
- Intensificación sin precedente 10hPa h<sup>-1</sup>
- Diámetro del ojo 3.7 km, record
- 22 personas murieron, 4 en



**Intensidad**



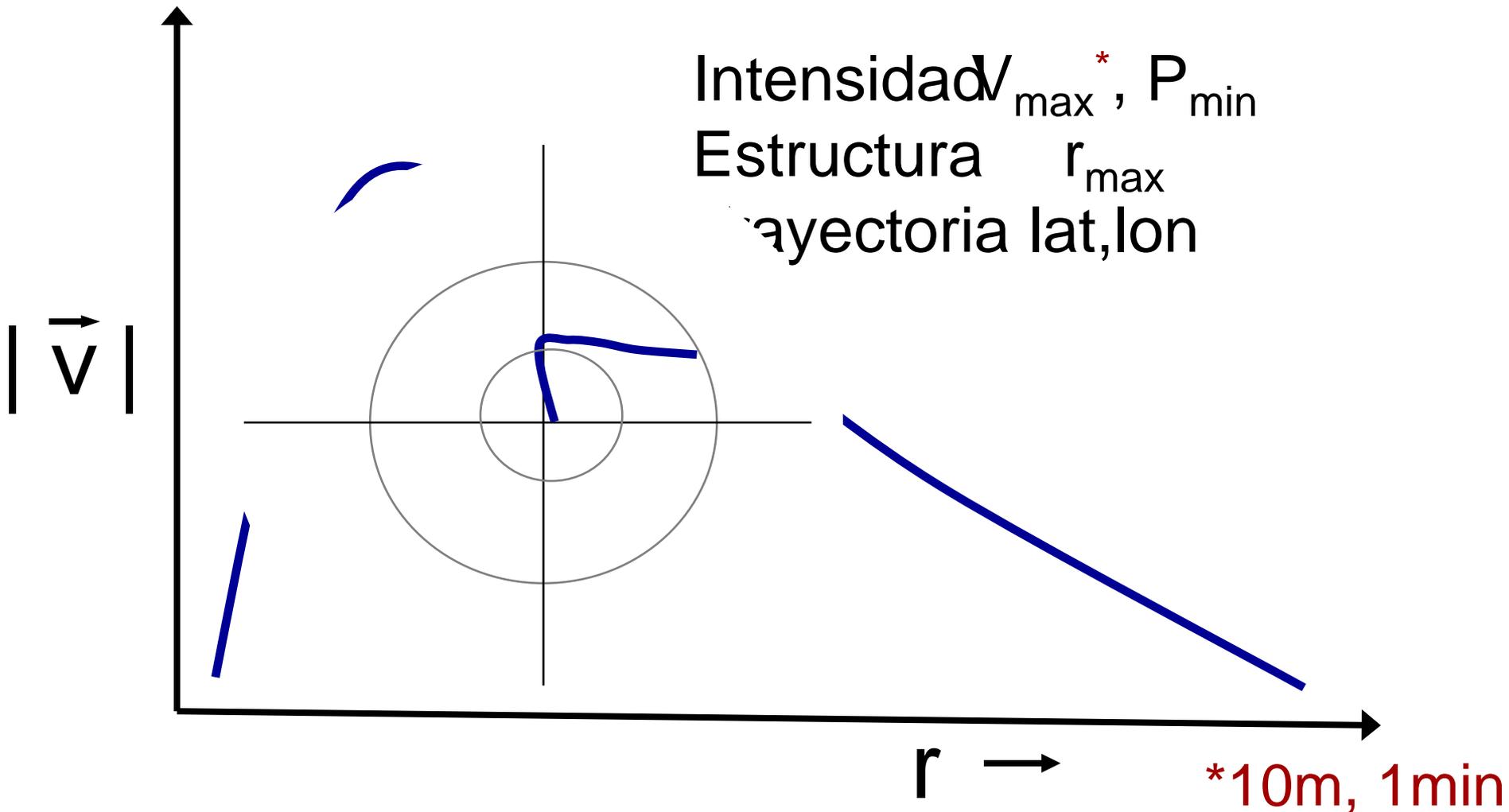
**Intensidad**



medida de la  
Energía Cinética

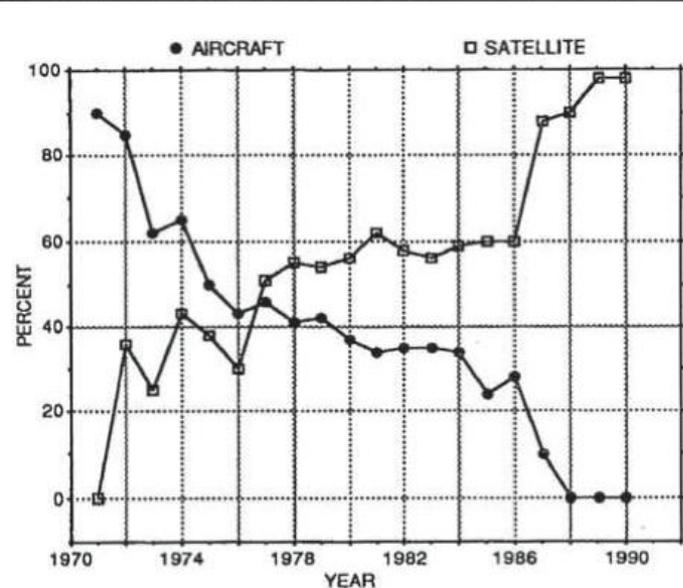
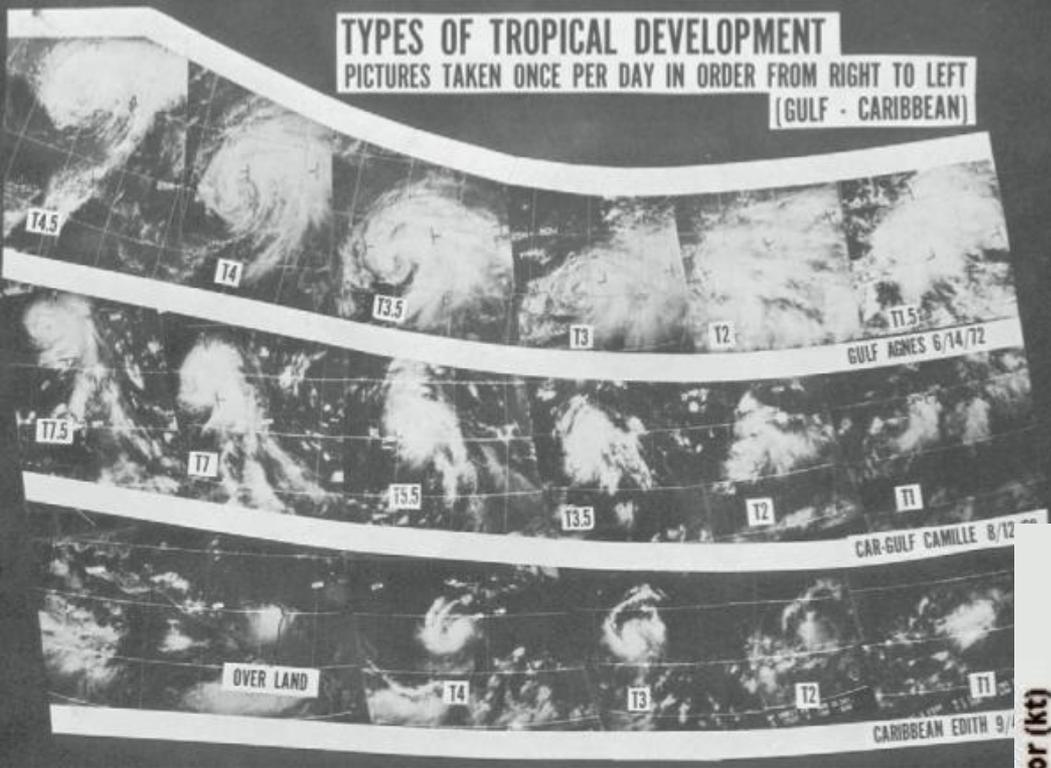


$\alpha$  m, v

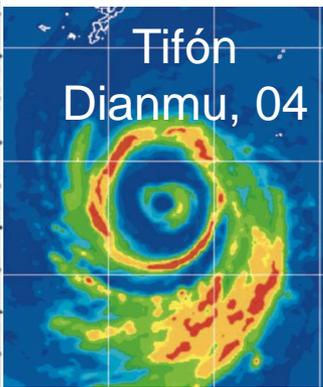


# Técnica de Dvorak

Velden et al. 2006

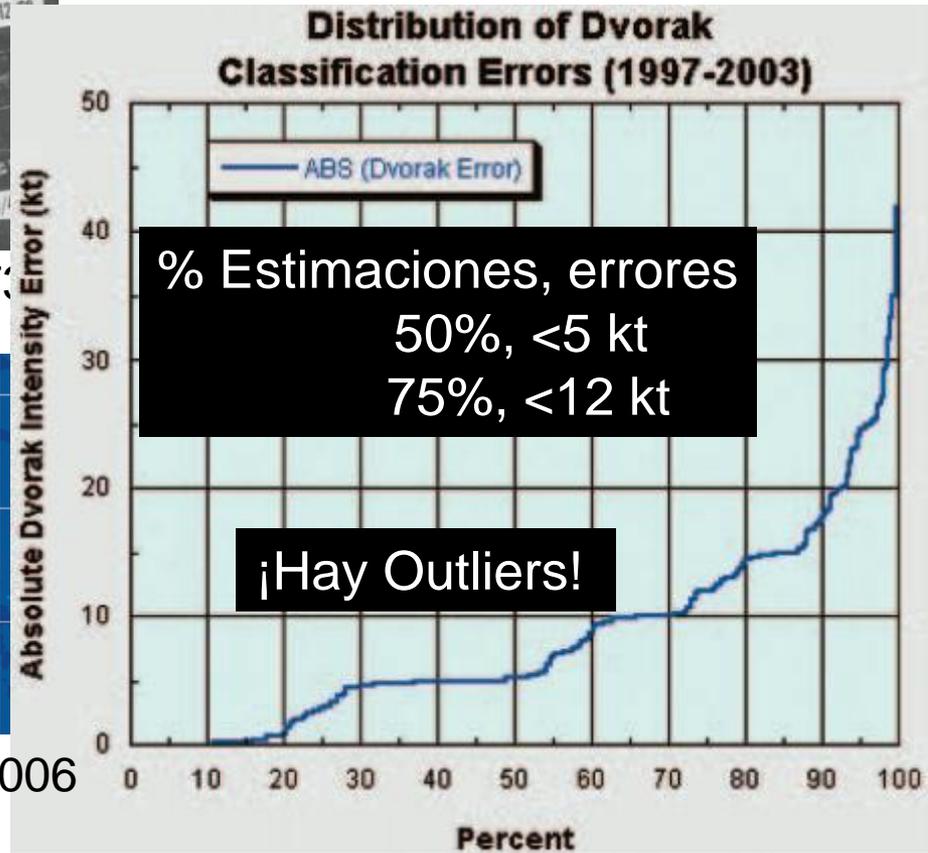


Guard et al. 1992



Velden et al. 2006

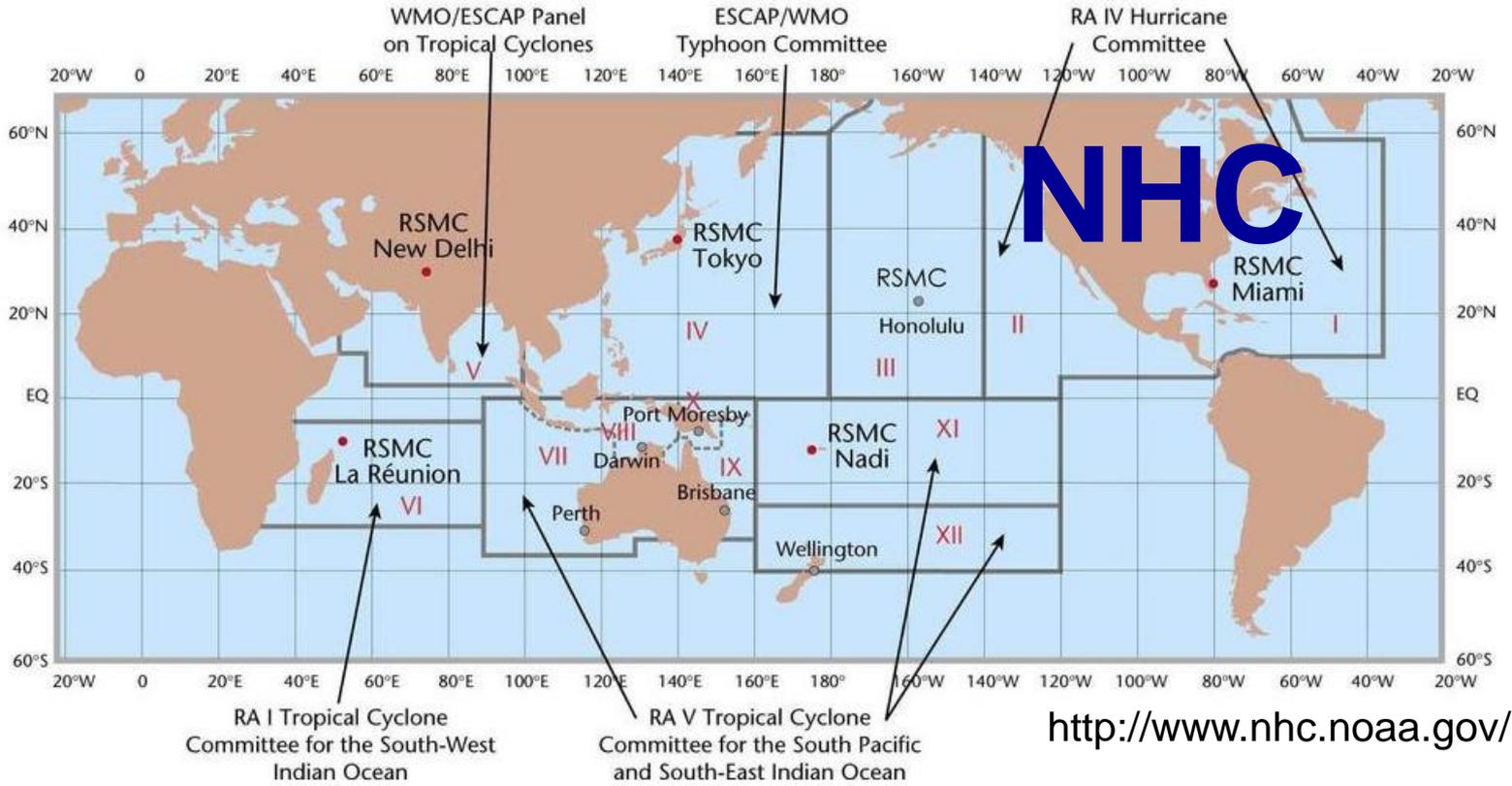
Dvorak 1972



Brown and Franklin

# Recursos en línea de la técnica de Dvorak

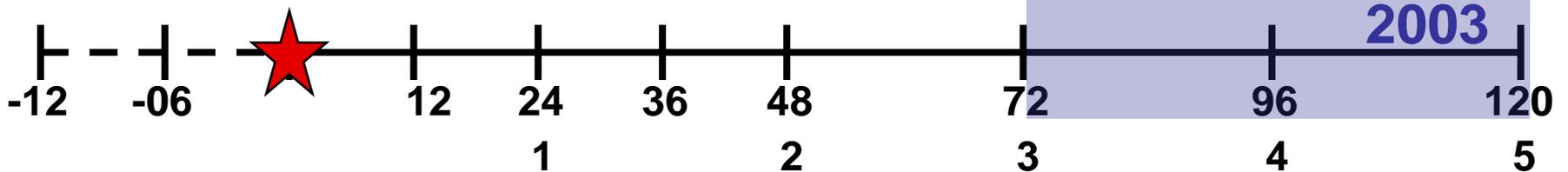
- Tutorial, University of Wisconsin
  - <http://cimss.ssec.wisc.edu/tropic2/misc/adt/info.html>
- NOAA, carta de intensidad:
  - <http://www.ssd.noaa.gov/PS/TROP/CI-chart.html>
- AMS, La técnica a través del tiempo, Jack Beven (NHC), 2004
  - <https://confex.webex.com/cmp03051/webcomponents/docshow/docshow.do?isPluginInstalled=yes&siteurl=confex&rnd=0.03242080379277468>



0000 UTC  
 0600 UTC  
 1200 UTC  
 1800 UTC

Modelos  
 Guía  
*Early / Late*

Dinámicos  
 Estadísticos  
 Estadístico-dinámicos  
 Consenso



# **Modelos estadísticos: ¡mejores que los dinámicos!**

**~1980**

**Los modelos estadístico/dinámicos son los más  
confiables**

**~1990**

**Los modelos dinámicos se convierten en los más  
confiables prediciendo trayectorias**

**Hoy**

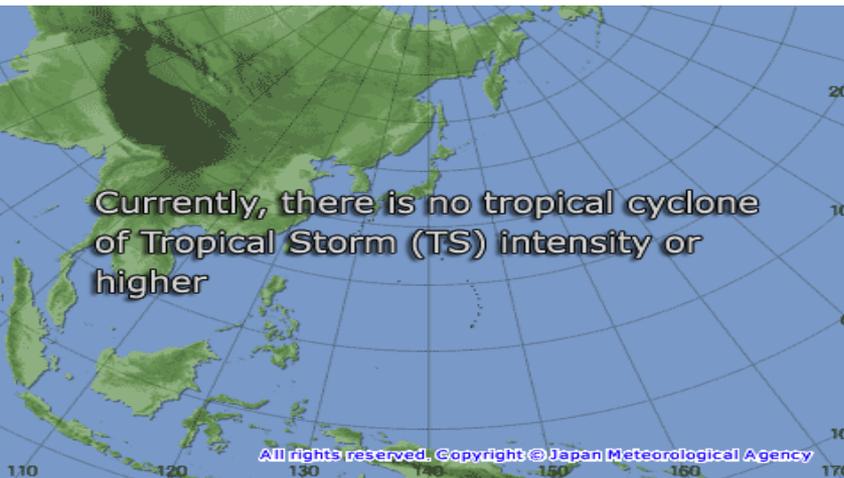
**¡Los modelos estadístico/dinámicos siguen siendo los  
más confiables en el pronóstico de intensidad!**

# Modelos Dinámicos

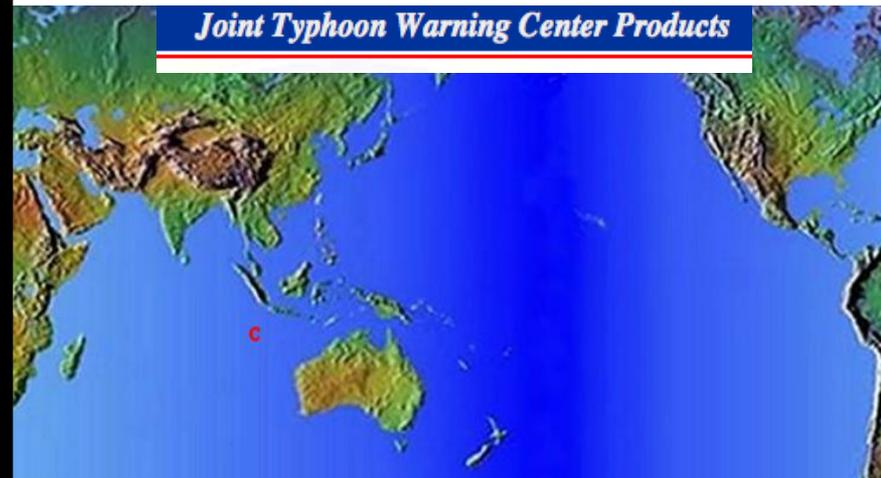
| Modelo    | Sitio web   | Ecuaciones                          | $\sim \Delta x$ km, # niveles | Océano                                    |
|-----------|---|-------------------------------------|-------------------------------|---|
| GFS       |   | Hidrostático                        | Espectral, 35 km, 64          | -   |
| LBAR      |   | Aguas someras<br>(sólo trayectoria) |                               | -   |
| CMC       | <a href="http://www.smc-msc.ec.gc.ca/cmcc/op_systems/recent_e.html">http://www.smc-msc.ec.gc.ca/cmcc/op_systems/recent_e.html</a> | Hidrostático                        | Espectral, 33 km, 58          | -   |
| ECMWF     | <a href="http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/">http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/</a>                       | Hidrostático                        | Espectral, 25 km, 91          | -   |
| NOGAPS    | <a href="http://www.meted.ucar.edu/nwp/pcu2/nogaps/index.htm">http://www.meted.ucar.edu/nwp/pcu2/nogaps/index.htm</a>             | Hidrostático                        | Espectral, 55 km, 30          |   |
| UKMET     | <a href="http://www.metoffice.gov.uk/research/nwp/">http://www.metoffice.gov.uk/research/nwp/</a>                                 | No-Hidrostático                     | 40 km, 50                     |   |
| GFDL      | <a href="http://www.gfdl.noaa.gov/research/website/hurricane.html">http://www.gfdl.noaa.gov/research/website/hurricane.html</a>   | Hidrostático                        | 30, 15 y 7.5 km; 42           | Princeton Ocean Model (POM)<br>(alta res) |
| HWRF 2007 | <a href="http://www.emc.ncep.noaa.gov/HWRF/index.html">http://www.emc.ncep.noaa.gov/HWRF/index.html</a>                           | No-Hidrostático                     | 27, 9 km; 42                  | POM                                       |

# Pacífico del Oeste

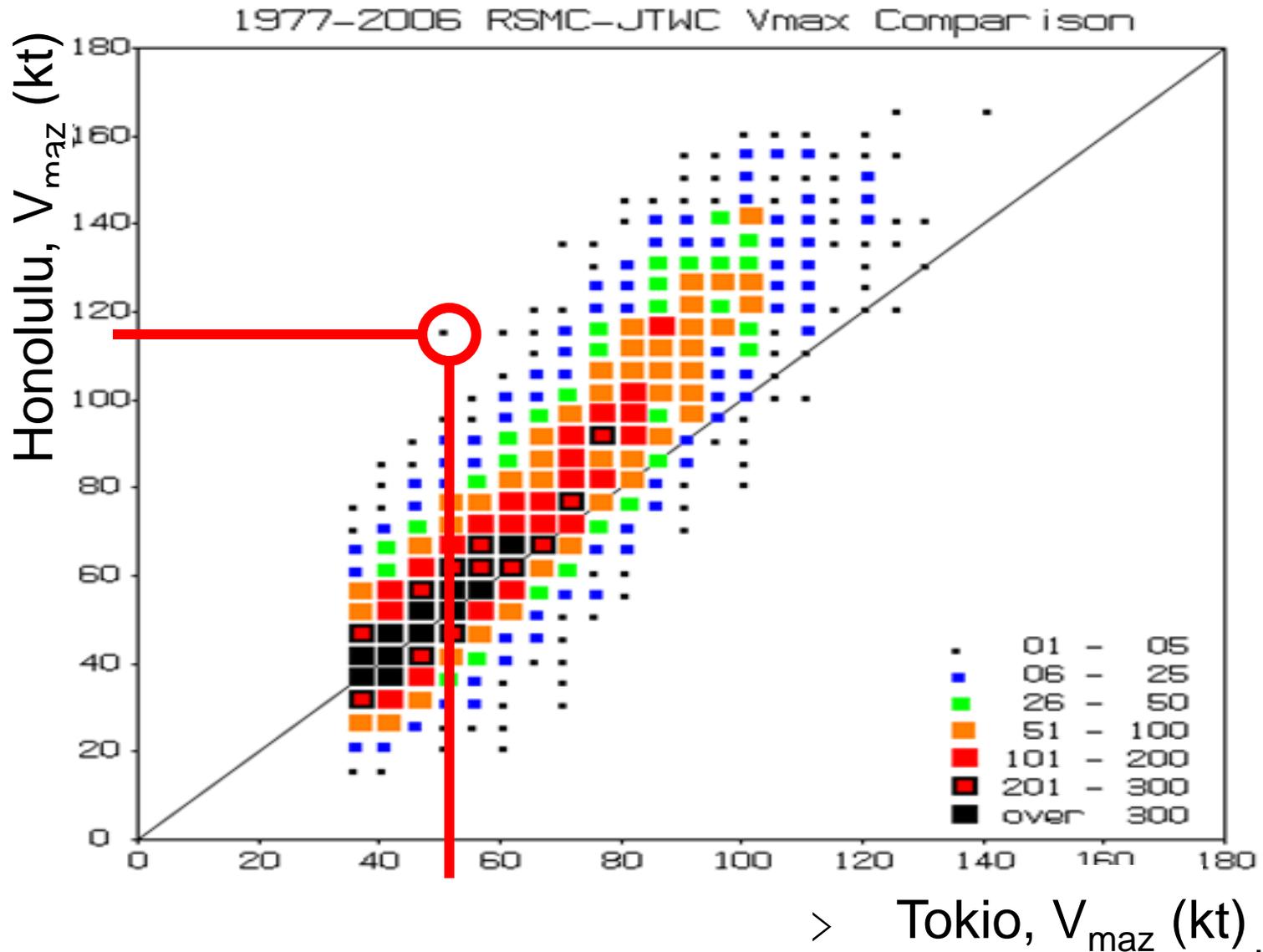
2 agencias oficiales elaboran pronóstico independientemente



Vs



# RSMC Vs JTWC



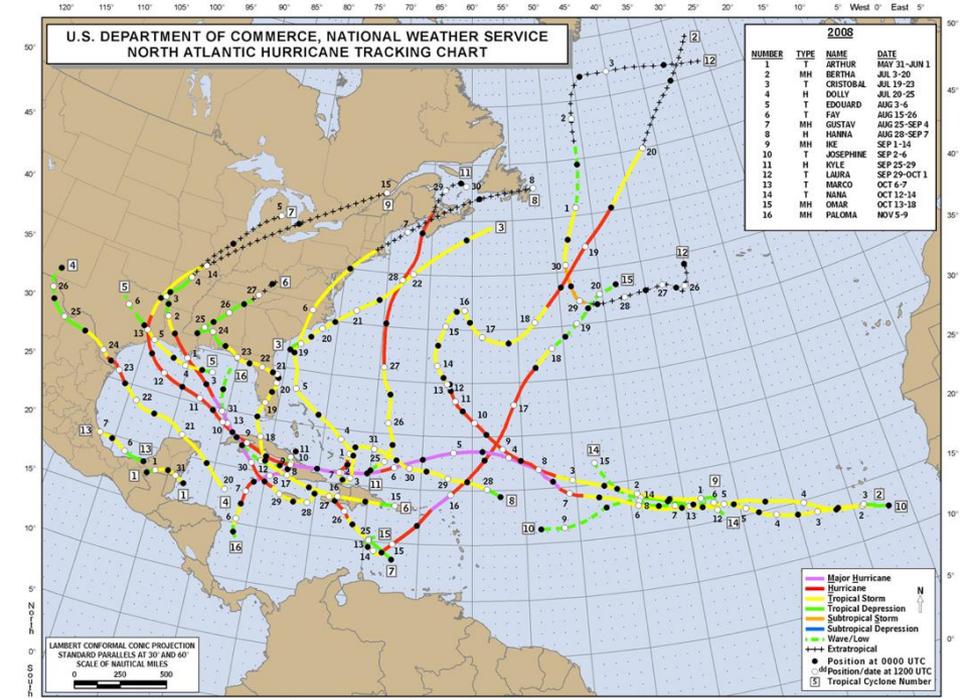
# Conclusiones

- La intensidad es un parámetro con valor práctico pero sin base física
- Se determina por medio de una estimación, no una medición
- Su estimación está sujeta a subjetividad
- El pronóstico de CT combina modelos (estadísticos y dinámicos) y el juicio del pronosticador

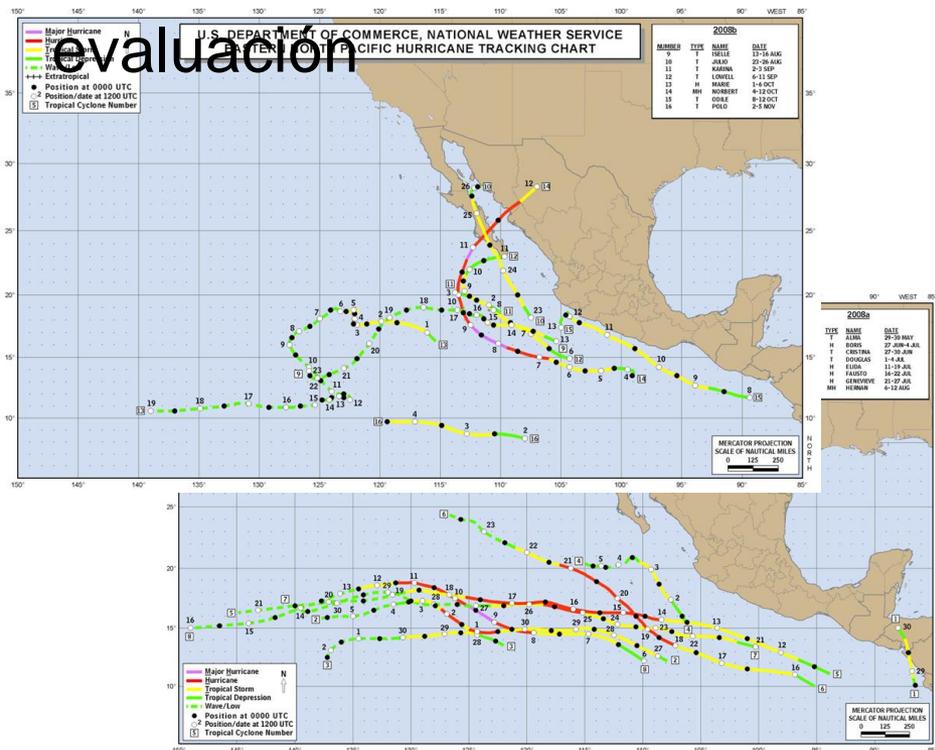
# Evaluación del pronóstico

Diferencia entre el valor del pronóstico y el corroborado por los datos del “Best track” al momento de realizar la

## Evaluación

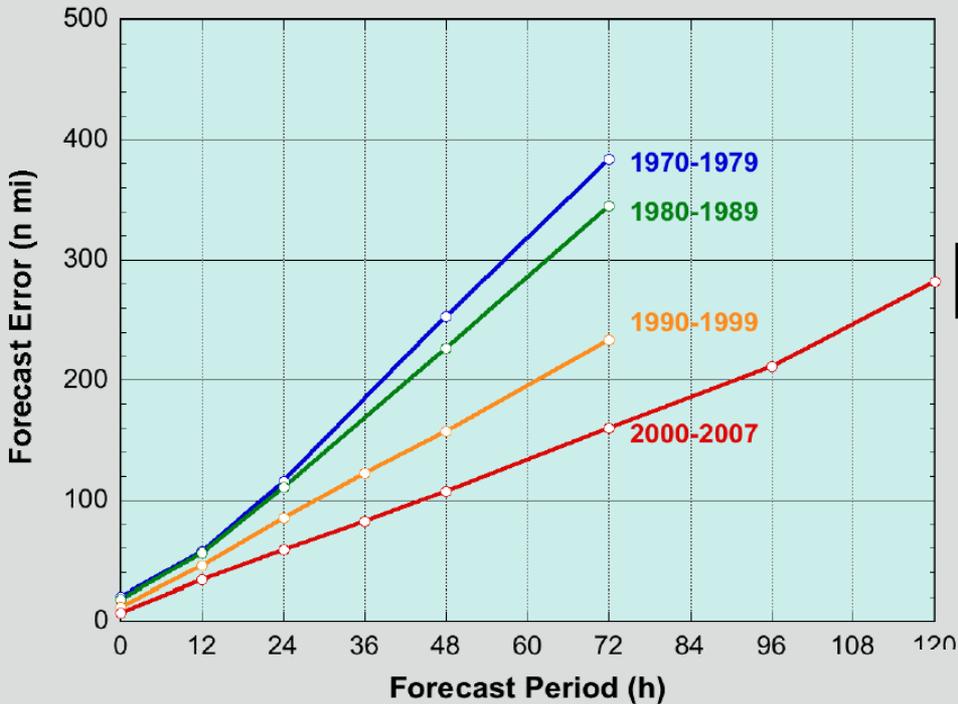


Best track, Atlántico; 2008



Best track, Pacífico del Este; 2008

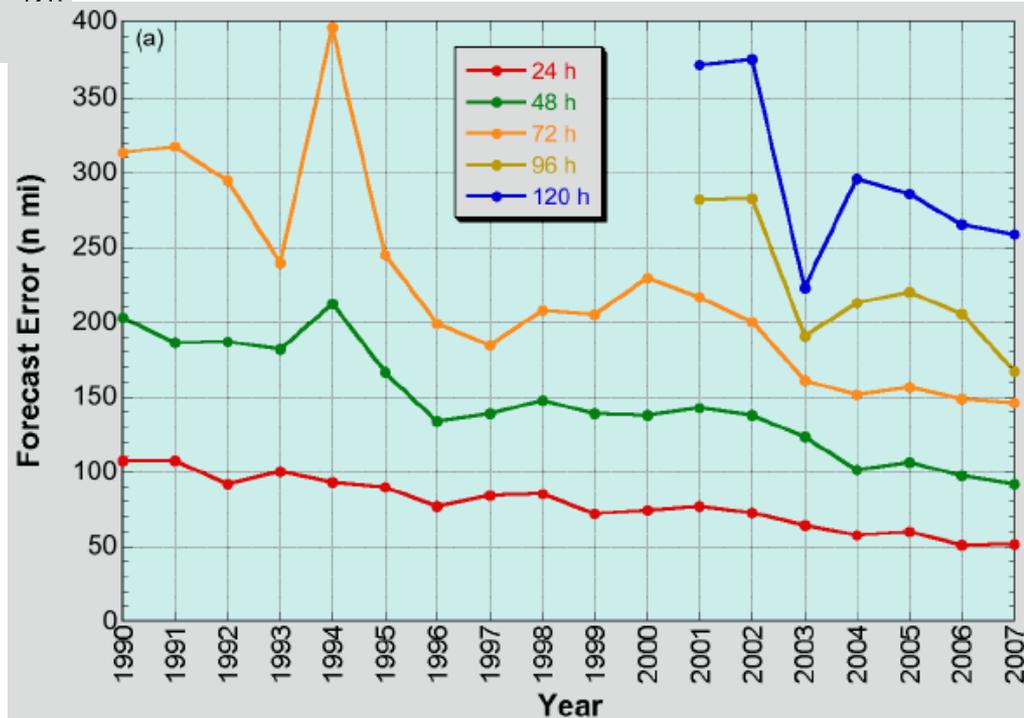
- Error de trayectoria
  - Distancia entre los centros de los CT
- Error de intensidad
  - Valor absoluto de la diferencia entre las velocidades máximas



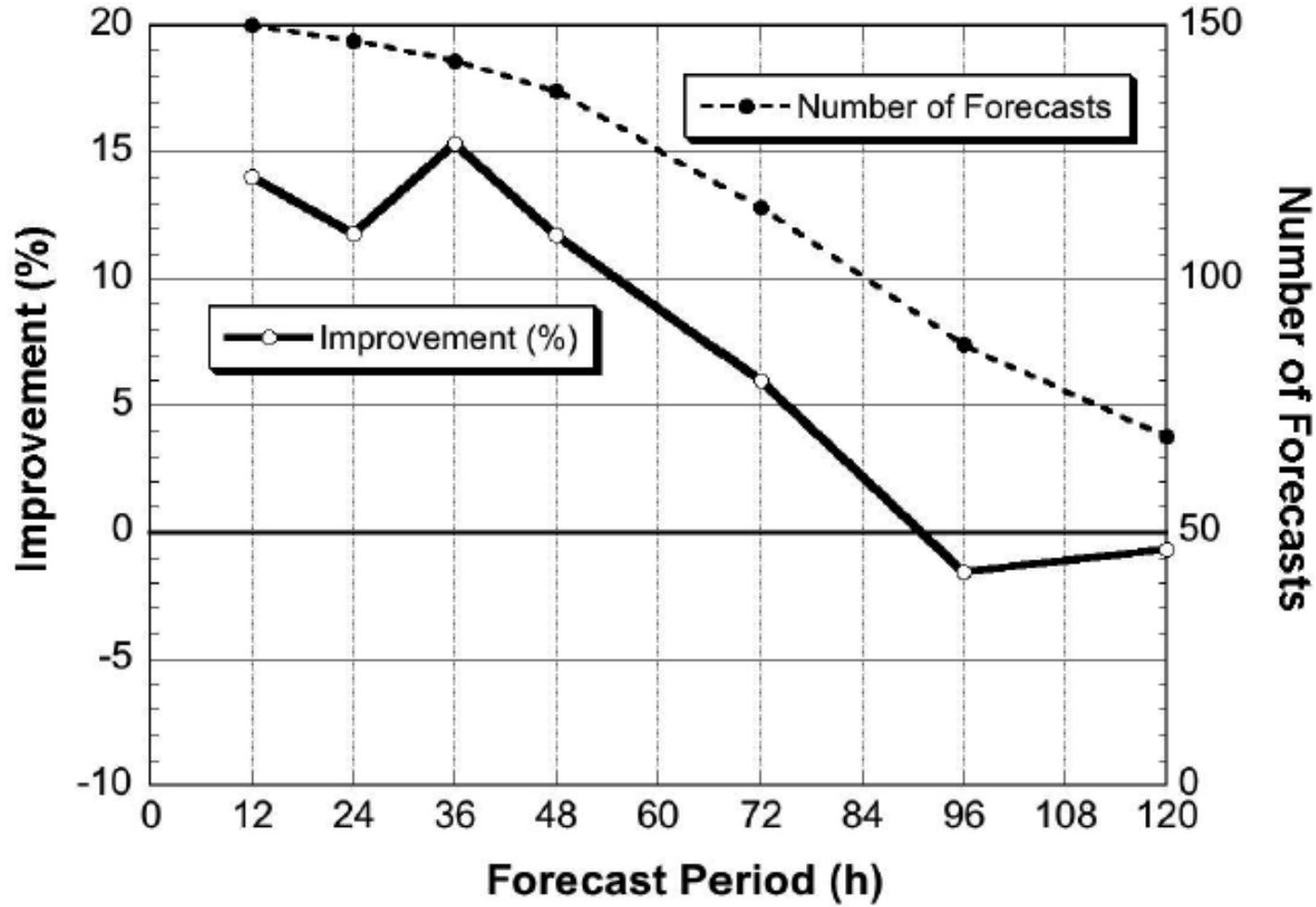
# Década tras década Año tras año

1 n mi = 1.852 Km

**Error de  
trayectoria  
reducido  
sistemáticamente**

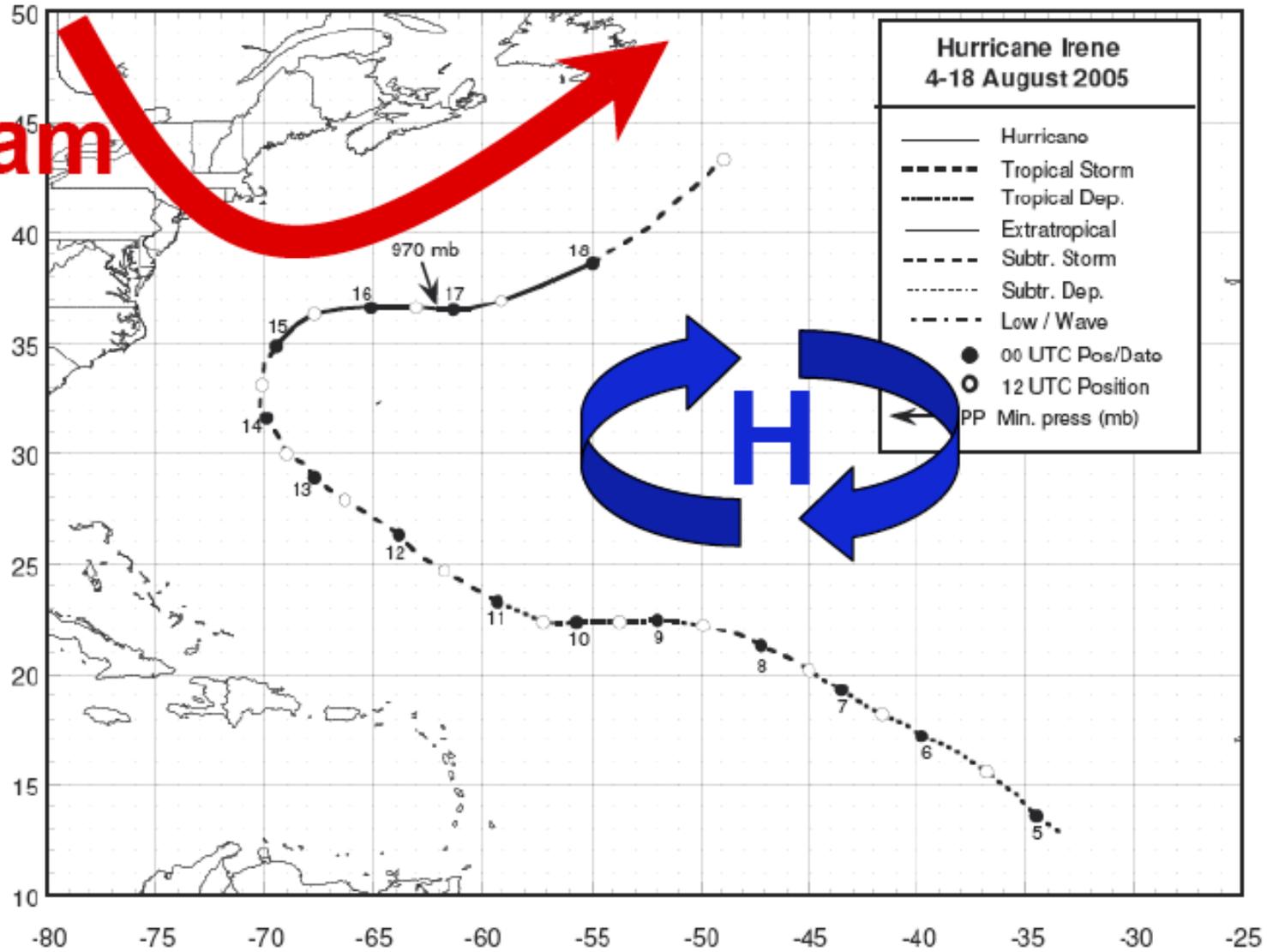


# Mejora asociada a sondas

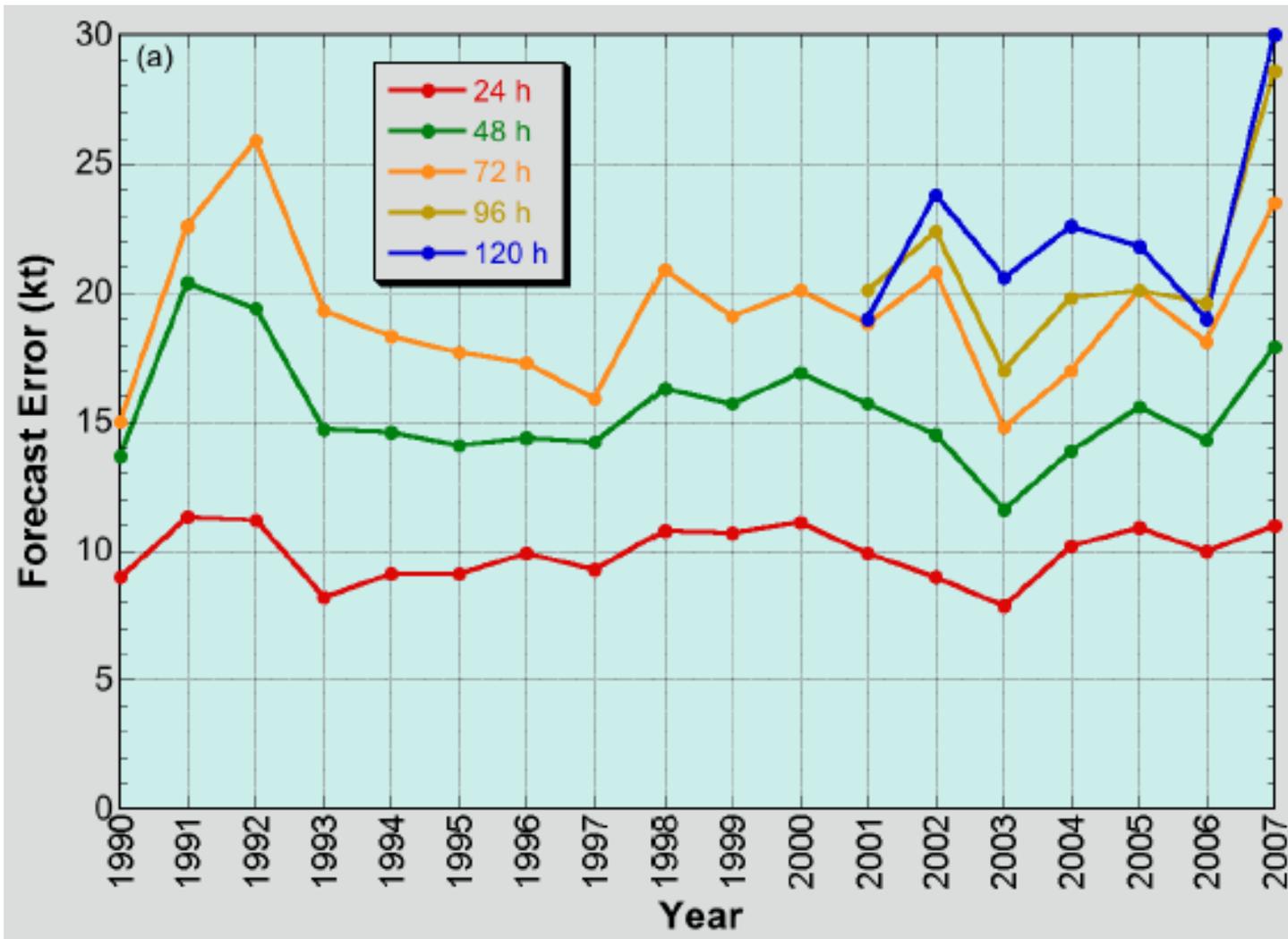


Modelo GFS, 1999-  
2005

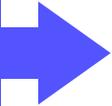
**Jet stream**



1 kt = 0.514 ms<sup>-1</sup>



**Error de intensidad,  
permanece igual**

Trayectoria  
(n mi) 

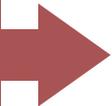
QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.



 Atlántico

 Pacífico del Este

Intensidad  
(kt) 

QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.

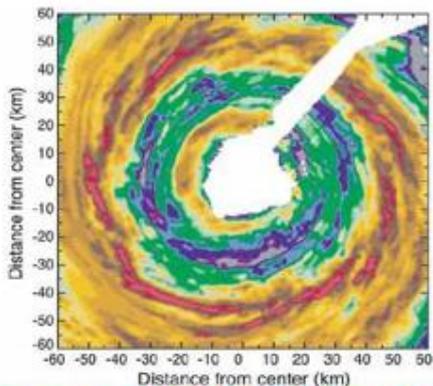
QuickTime™ and a  
TIFF (Uncompressed) decompressor  
are needed to see this picture.

# ¿Por qué hablar de esto hoy?

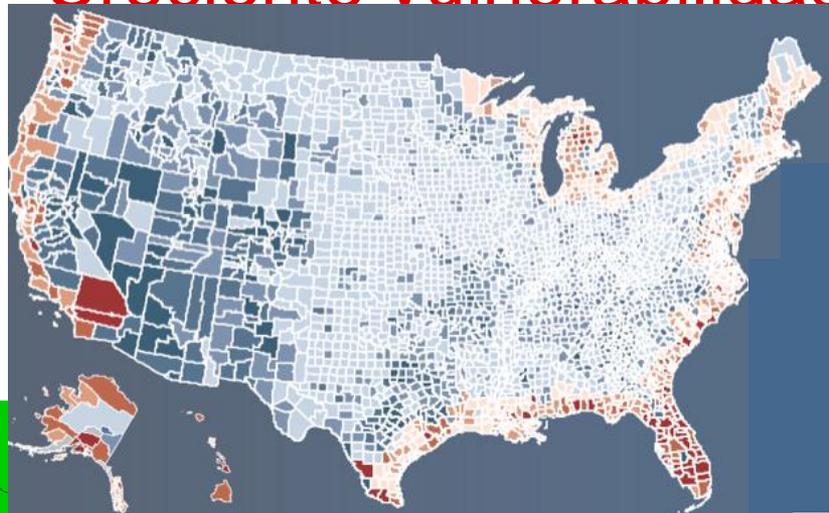
Creciente vulnerabilidad

Creciente capacidad computacional

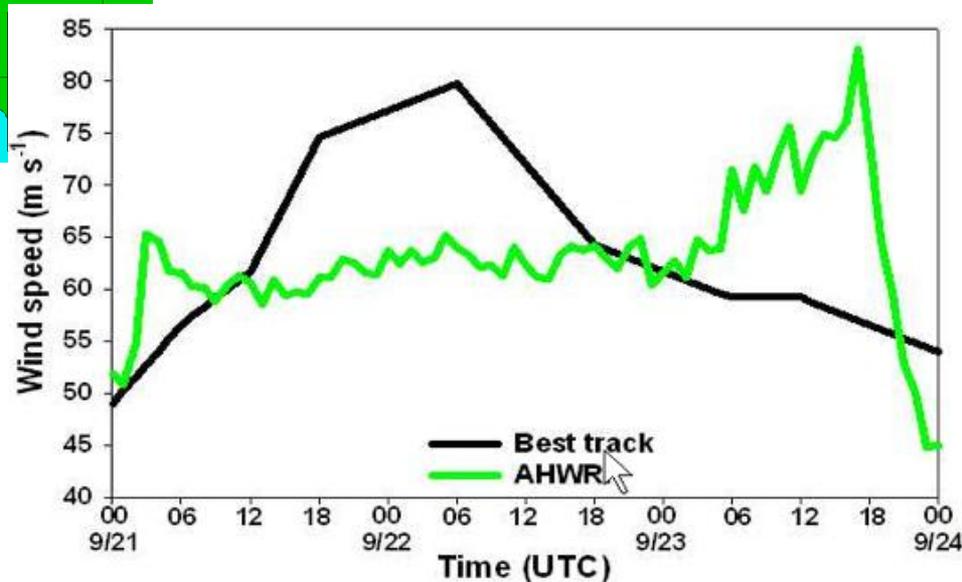
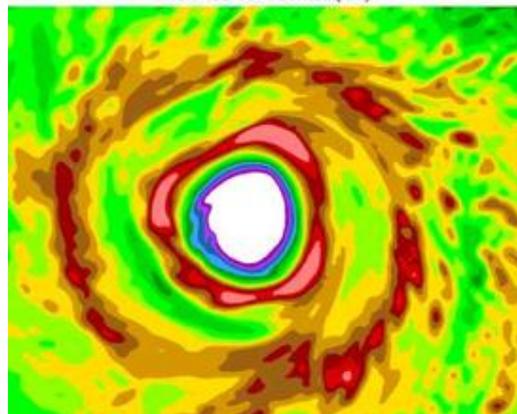
Reflectividad del radar ELDORA



Houze et al. (2006)



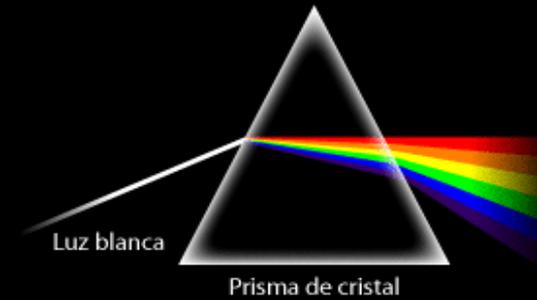
Conocimiento limitado



# **Conclusiones**

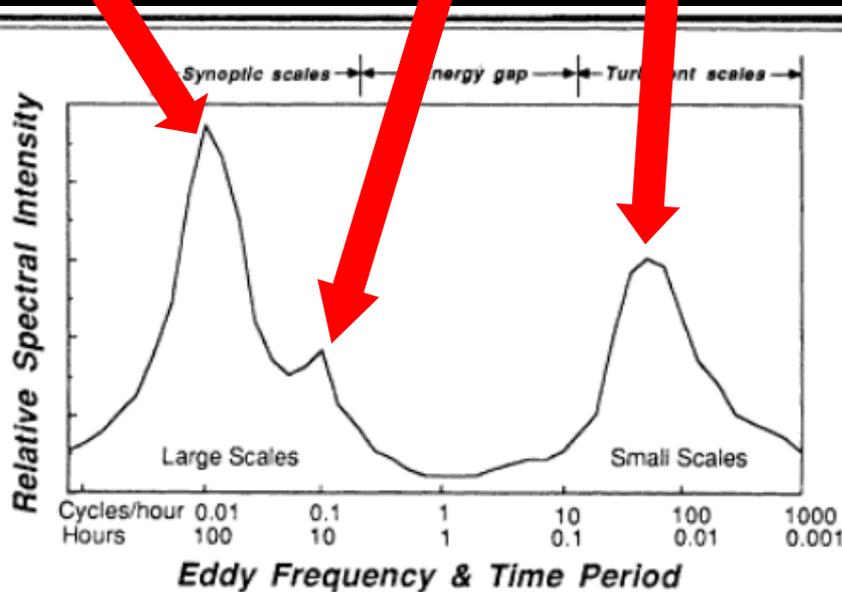
- **El pronóstico de trayectorias ha mejorado de acuerdo a los avances en los modelos dinámicos**
  - **La trayectoria está dada por el flujo sinóptico**
- **El pronóstico de IntCT no ha mejorado**
  - **La intensificación está dictada por procesos de escala menor a la simulada**

# Descomposición espectral



Frentes Ciclo diurno CLP

## Cascada de energía



“Big whorls have little whorls,  
Which feed on their velocity;  
And little whorls have lesser whorls  
And so on to viscosity  
(in the molecular sense)”.  
Richardson, 1922

Fig. 2.2 Schematic spectrum of wind speed near the ground estimated from a study of Van der Hoven (1957).

Stull (2003)

# Asimetrías por cizalla

