

MODELACIÓN DINÁMICA DE LOS CICLONES TROPICALES



Dr. Ricardo Prieto González

Acapulco, Guerrero 10 de marzo de 2009

SEMARNAT

CICLONES TROPICALES DEFINICIONES

DEPRESIÓN TROPICAL: PERTURBACIÓN TROPICAL*. Con
circulación ciclónica.

TORMENTA TROPICAL: $64 \text{ km/h} \leq \text{Viento máximo sostenido} < 119 \text{ km/h}$.

HURACAN: $119 \text{ km/h} \leq \text{Viento máximo sostenido}$.

Escala Saffir-Simpson para huracanes

CATEGORÍA	PRESIÓN (hPa)	VIENTO (km/h)	DAÑO
Uno	> 980	119 a 153	<u>Mínimo</u>
Dos	979 a 965	154 a 177	<u>Moderado</u>
Tres	964 a 945	178 a 209	<u>Extenso</u>
Cuatro	944 a 920	210 a 249	<u>Extremo</u>
Cinco	Menor a 920	Mayor a 249	<u>Catastrófico</u>

* PERTURBACIÓN TROPICAL: Área persistente de tormentas.

HURACÁN CATEGORÍA UNO

Daños a casas móviles, árboles y arbustos. Algunos daños a señalizaciones débiles. Daños menores por inundaciones en carreteras costeras. Daños leves en muelles e insignificativos en edificios.

[Regreso](#)

HURACÁN CATEGORÍA DOS

Daños a puertas, ventanas y algunos techos de construcciones. Daño considerable a arbustos y árboles, con algunos árboles caídos. Daño considerable a casas móviles, a señalizaciones débiles y a muelles. Las zonas costeras se pueden inundar de 2 a 4 horas antes de la llegada del centro del ciclón. Las embarcaciones menores pueden romper sus amarras.

[Regreso](#)

HURACÁN CATEGORÍA TRES

Se puede presentar daño estructural a construcciones. Daño a árboles y arbustos con árboles grandes caídos. Casas móviles y señalizaciones débiles son destruidas. Las zonas costeras se pueden inundar de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del fenómeno. Las inundaciones costeras destruyen estructuras pequeñas y las estructuras grandes son dañadas por el oleaje. Zonas costeras que están hasta 1.5 m sobre el nivel del mar pueden ser inundadas hasta 13 kilómetros o más tierra adentro.

[Regreso](#)

HURACÁN CATEGORÍA CUATRO

Daño estructural más extenso a construcciones, con techos débiles completamente dañados. Arbustos, árboles y señalizaciones totalmente arrancados. Destrucción completa de casas móviles. Daño extenso en puertas y ventanas. Zonas costeras inundadas de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del ciclón. Daño mayor a los pisos bajos de construcciones cercanas a la costa. Zonas costeras que están hasta 3 m sobre el nivel medio del mar inundadas, por lo que se requiere una evacuación mayor de áreas residenciales hasta 10 km tierra adentro.

[Regreso](#)

HURACÁN CATEGORÍA CINCO

Daño total a techos de construcciones. Fallas totales en los suministros de energía. Todos los árboles, arbustos y señalizaciones arrancadas. Destrucción total de casas móviles. Daño severo a puertas y ventanas. Zonas costeras pueden ser inundadas de 3 a 5 horas antes de la llegada del centro del ciclón. Daños mayores a los pisos de construcciones que estén hasta 500 metros de la costa, por lo que se requiere una evacuación mayor de áreas residenciales hasta 16 km tierra adentro.

[Regreso](#)



Montaje del huracán Emily (2005)

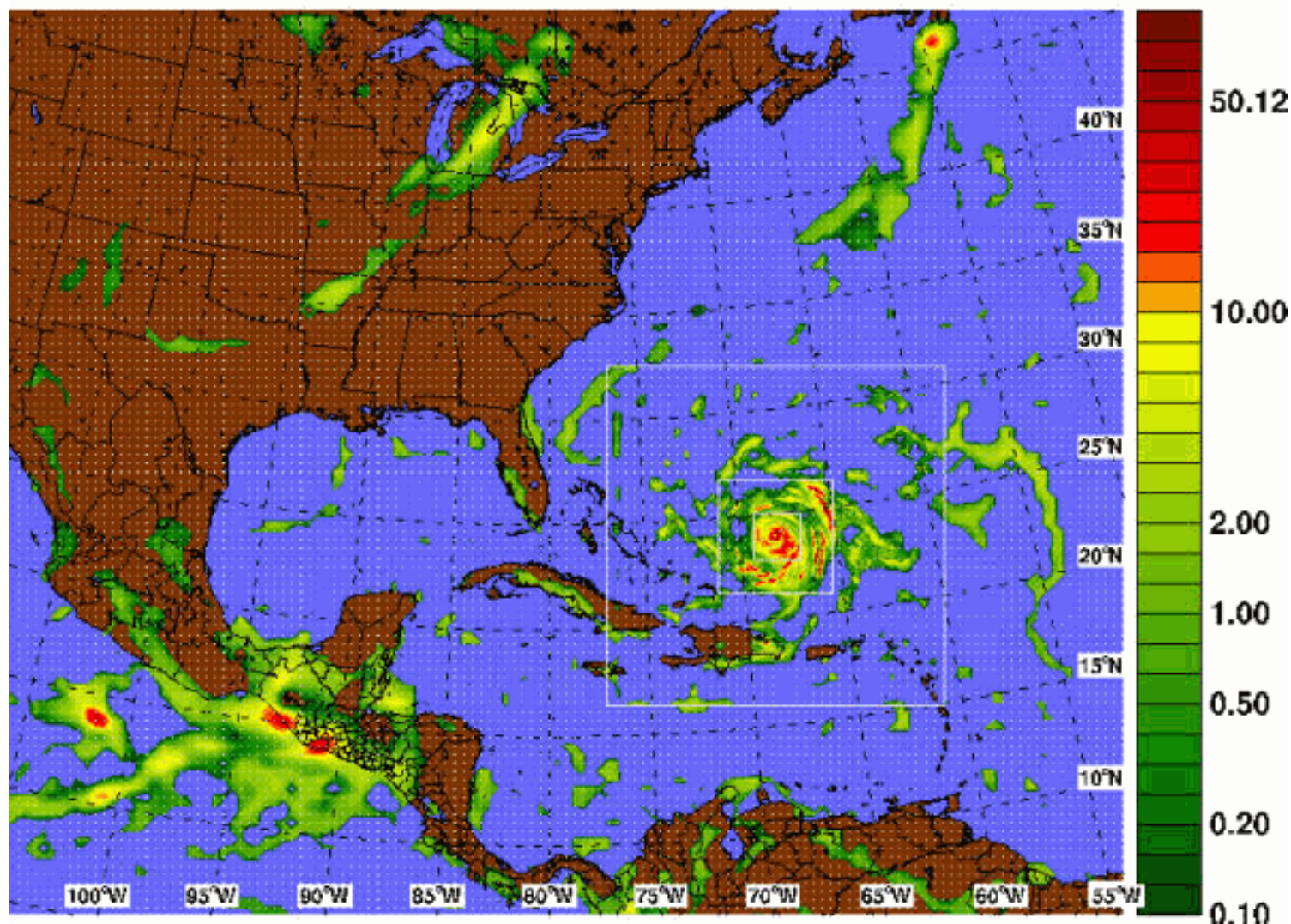
HURACAN EMILY





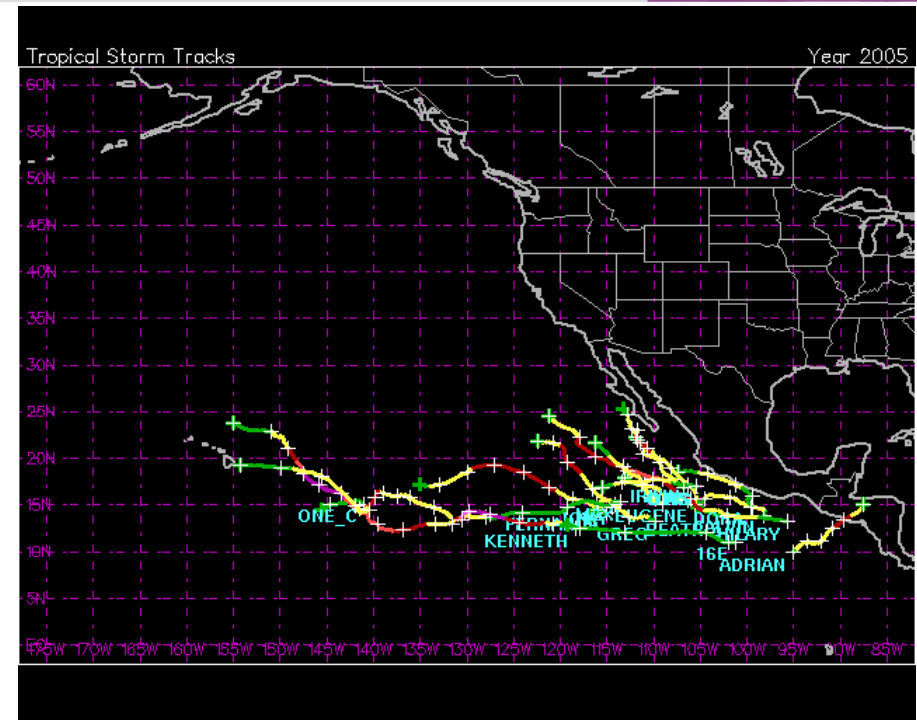
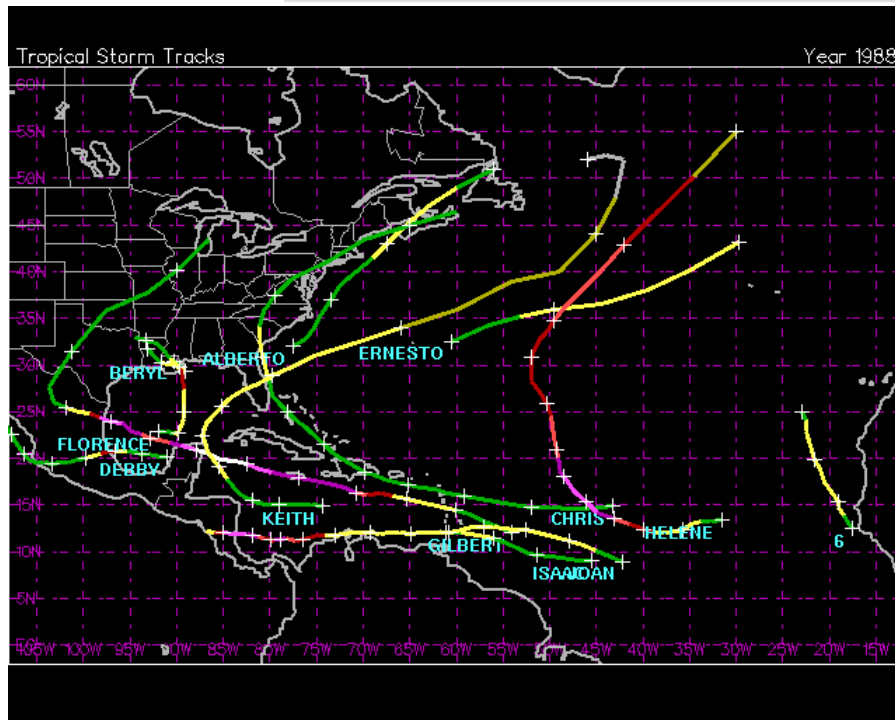
Modelación del huracán Floyd con MM5

Hourly Rainfall Accumulation (mm) for 012 Mon 13 Sep 1999





La formación de los huracanes



En las zonas cercanas a México los ciclones tropicales se desarrollan en el Océano Atlántico, donde se tiene un promedio de unos 11 ciclones tropicales por temporada, de los cuales 6 alcanzan la categoría de huracán; mientras que en el Océano Pacífico del Noreste se tiene un promedio de 15 ciclones tropicales por temporada, de los cuales 8 llegan a la categoría de huracán.



LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN

- El Centro de Huracanes de Miami (NHC) monitorea los Océanos Atlántico y Pacífico del Noroeste y emite, en caso de que exista la presencia de un ciclón tropical, un boletín oficial con el pronóstico de la posición del centro del ciclón y de sus vientos máximos promediados en un minuto.
- Estos pronósticos son emitidos cada seis horas, y cada uno contiene las proyecciones válidas a 9, 21, 33, 45, 69, 93 y 117 horas después del tiempo de publicación del pronóstico (0300, 0900, 1500 ó 2100 UTC). Los boletines se publican en la página de Internet con dirección: [www . nhc . noaa . gov](http://www.nhc.noaa.gov)



Ejemplo del pronóstico oficial para el huracán Emily el 17 de julio de 2005 a las 2100 horas UTC.

ZCZC MIATCMAT5 ALL
TTAA00 KNHC DDHHMM
HURRICANE EMILY FORECAST/ADVISORY NUMBER 28
NWS TPC/NATIONAL HURRICANE CENTER MIAMI FL AL052005
2100Z SUN JUL 17 2005

A HURRICANE WARNING REMAINS IN EFFECT FOR THE YUCATAN PENINSULA FROM CHETUMAL NORTHWARD TO CABO CATOCHE...THEN WESTWARD AND SOUTHWARD TO

CAMPECHE...INCLUDING COZUMEL AND THE ISLAS MUJERES. A HURRICANE WARNING MEANS THAT HURRICANE CONDITIONS ARE EXPECTED WITHIN THE WARNING AREA WITHIN THE NEXT 24 HOURS. PREPARATIONS TO PROTECT LIFE AND PROPERTY SHOULD BE RUSHED TO COMPLETION.

A TROPICAL STORM WARNING IS IN EFFECT FOR THE COAST OF BELIZE FROM BELIZE CITY NORTHWARD TO THE BELIZE-MEXICO BORDER. A TROPICAL STORM WARNING MEANS THAT TROPICAL STORM CONDITIONS ARE EXPECTED WITHIN THE WARNING AREA WITHIN THE NEXT 24 HOURS.

TROPICAL STORM CONDITIONS ARE ALSO POSSIBLE OVER PORTIONS OF EXTREME WESTERN CUBA.

INTERESTS IN THE SOUTHERN AND WESTERN GULF OF MEXICO...AS WELL AS IN SOUTHERN TEXAS...SHOULD MONITOR THE PROGRESS OF EMILY.

HURRICANE CENTER LOCATED NEAR 19.4N 85.2W AT 17/2100Z
POSITION ACCURATE WITHIN 15 NM



**Continuación. Ejemplo
del pronóstico oficial
para el huracán Emily el
17 de julio de 2005 a
las 2100 horas UTC.**

ESTIMATED MINIMUM CENTRAL PRESSURE 948 MB
EYE DIAMETER 10 NM
MAX SUSTAINED WINDS 125 KT WITH GUSTS TO 150 KT.
64 KT..... 50NE 25SE 15SW 30NW.
50 KT..... 90NE 35SE 25SW 60NW.
34 KT.....130NE 80SE 50SW 110NW.
12 FT SEAS..240NE 200SE 100SW 150NW.
WINDS AND SEAS VARY GREATLY IN EACH QUADRANT. RADII IN NAUTICAL
MILES ARE THE LARGEST RADII EXPECTED ANYWHERE IN THAT QUADRANT.

REPEAT...CENTER LOCATED NEAR 19.4N 85.2W AT 17/2100Z
AT 17/1800Z CENTER WAS LOCATED NEAR 19.0N 84.4W

FORECAST VALID 18/0600Z 20.4N 87.5W...INLAND
MAX WIND 125 KT...GUSTS 150 KT.
64 KT... 50NE 25SE 15SW 30NW.
50 KT... 90NE 35SE 25SW 60NW.
34 KT...130NE 80SE 50SW 110NW.
FORECAST VALID 18/1800Z 21.8N 90.4W...OVER WATER
MAX WIND 90 KT...GUSTS 110 KT.
64 KT... 30NE 15SE 15SW 30NW.
50 KT... 75NE 25SE 25SW 60NW.
34 KT...130NE 80SE 50SW 110NW.

FORECAST VALID 19/0600Z 23.0N 93.2W
MAX WIND 100 KT...GUSTS 120 KT.
64 KT... 40NE 20SE 20SW 40NW.
50 KT... 90NE 40SE 40SW 90NW.
34 KT...125NE 75SE 75SW 125NW.

FORECAST VALID 19/1800Z 23.9N 95.7W
MAX WIND 105 KT...GUSTS 130 KT.
50 KT... 90NE 40SE 40SW 90NW.
34 KT...125NE 75SE 75SW 125NW.

FORECAST VALID 20/1800Z 25.0N 100.5W...INLAND
MAX WIND 65 KT...GUSTS 80 KT.
50 KT... 40NE 30SE 30SW 40NW.
34 KT... 80NE 50SE 50SW 80NW.

EXTENDED OUTLOOK. NOTE...ERRORS FOR TRACK HAVE AVERAGED NEAR 250 NM
ON DAY 4 AND 325 NM ON DAY 5...AND FOR INTENSITY NEAR 20 KT EACH DAY

OUTLOOK VALID 21/1800Z 25.5N 105.0W...INLAND DISSIPATING
MAX WIND 20 KT...GUSTS 25 KT.

OUTLOOK VALID 22/1800Z...DISSIPATED

REQUEST FOR 3 HOURLY SHIP REPORTS WITHIN 300 MILES OF 19.4N 85.2W

NEXT ADVISORY AT 18/0300Z

FORECASTER BEVEN



LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN



Pronóstico de la trayectoria del huracán Emily, el 17 de julio de 2005 a las 4:00 PM CDT. Fuente: Centro de Huracanes de Miami.

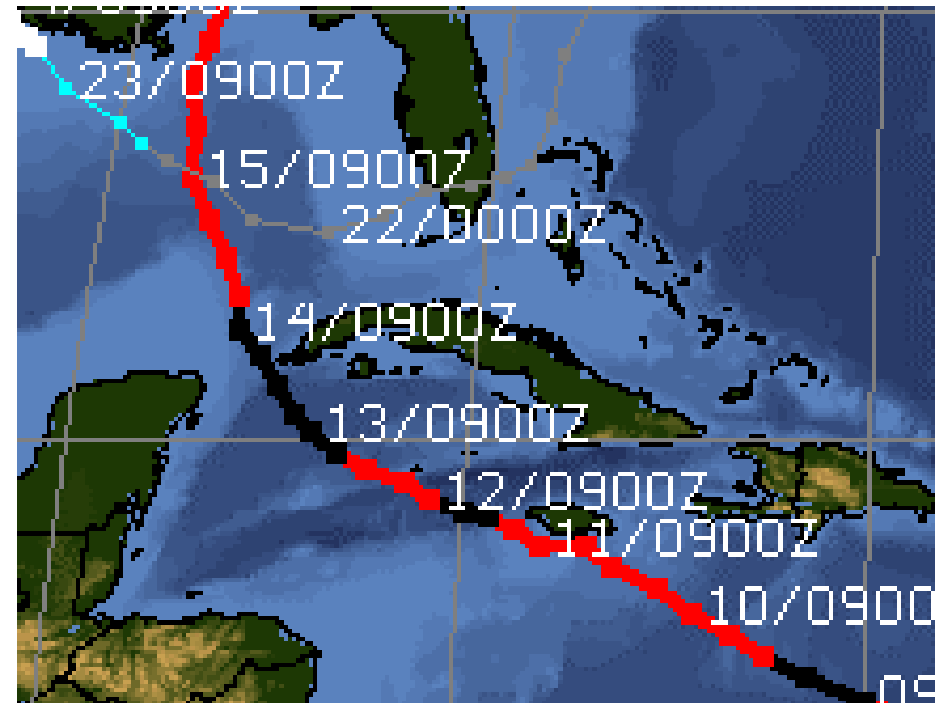
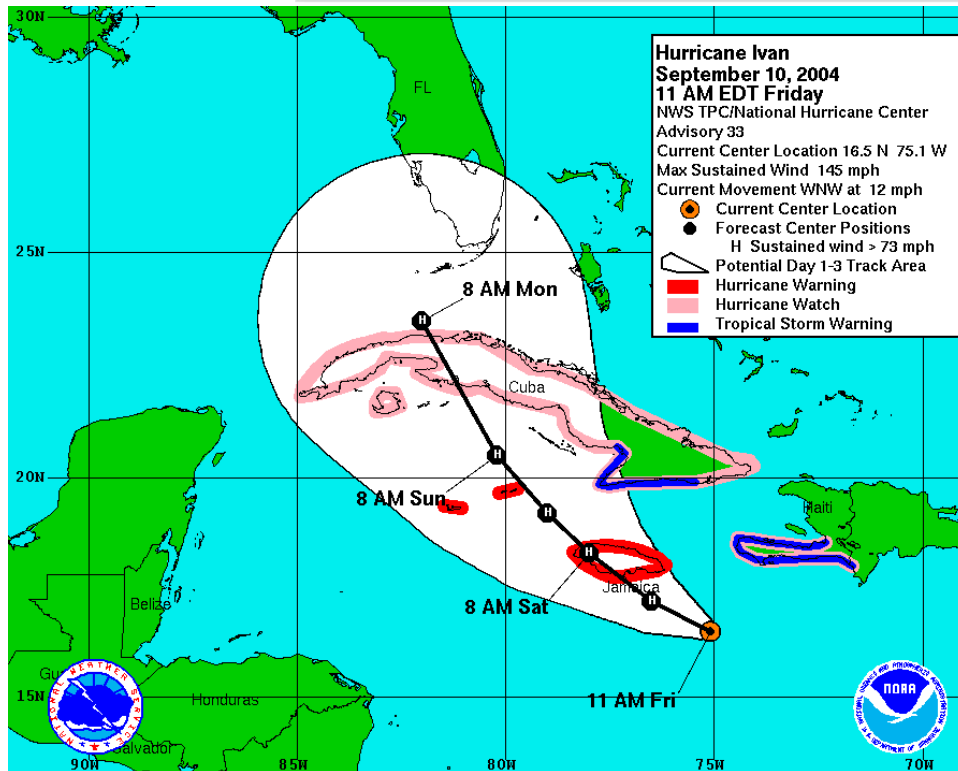


LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN

- Al final de cada temporada, los pronósticos de trayectoria e intensidad son evaluados comparándolos con las trayectorias e intensidades observadas.
- El error de la trayectoria se define como la distancia entre el pronóstico de la posición del ciclón y la mejor estimación del centro del fenómeno, en el tiempo de la verificación del pronóstico.



LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN

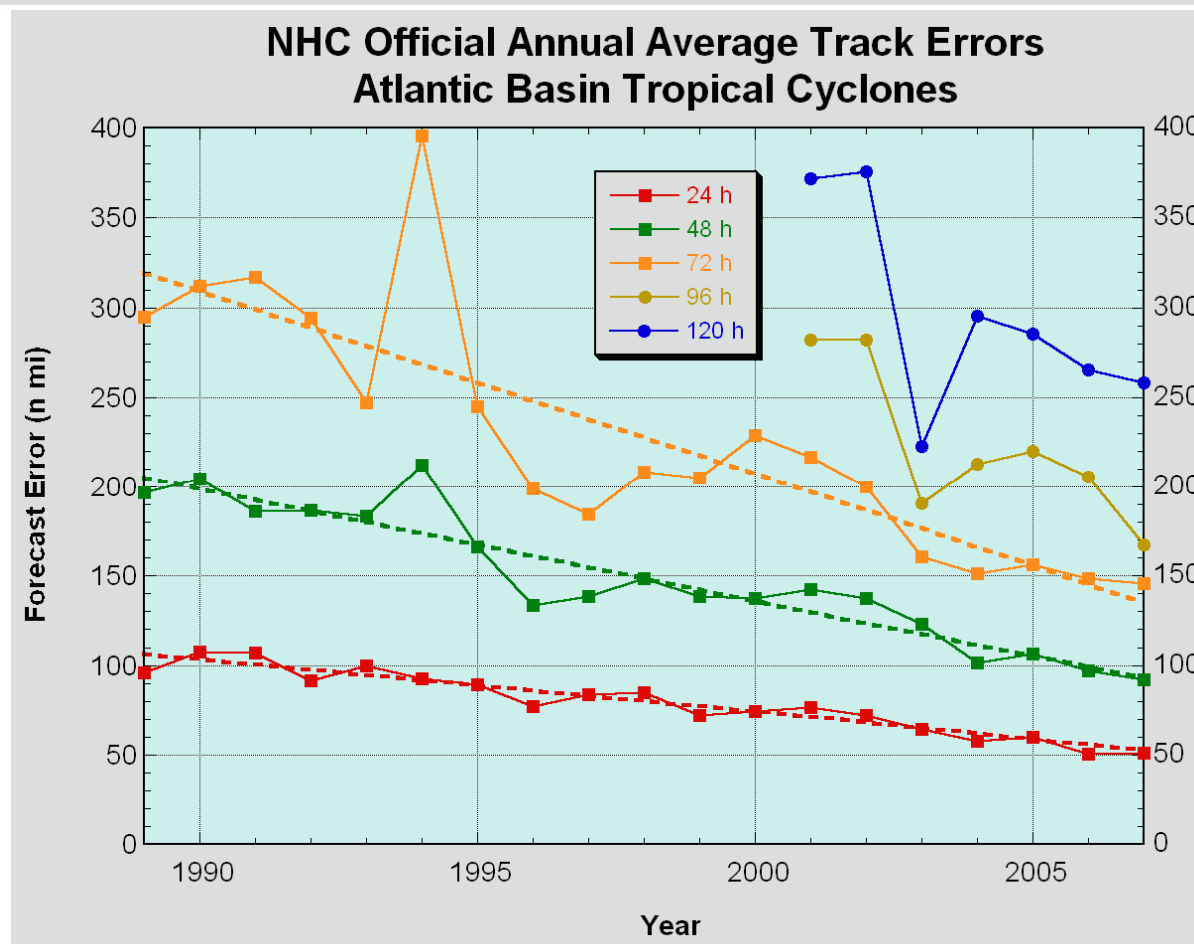


El movimiento real del ciclón puede estar a la izquierda del pronóstico, o a la derecha, o puede ser más rápido o más lento.

Los pronósticos meteorológicos exactos no existen.



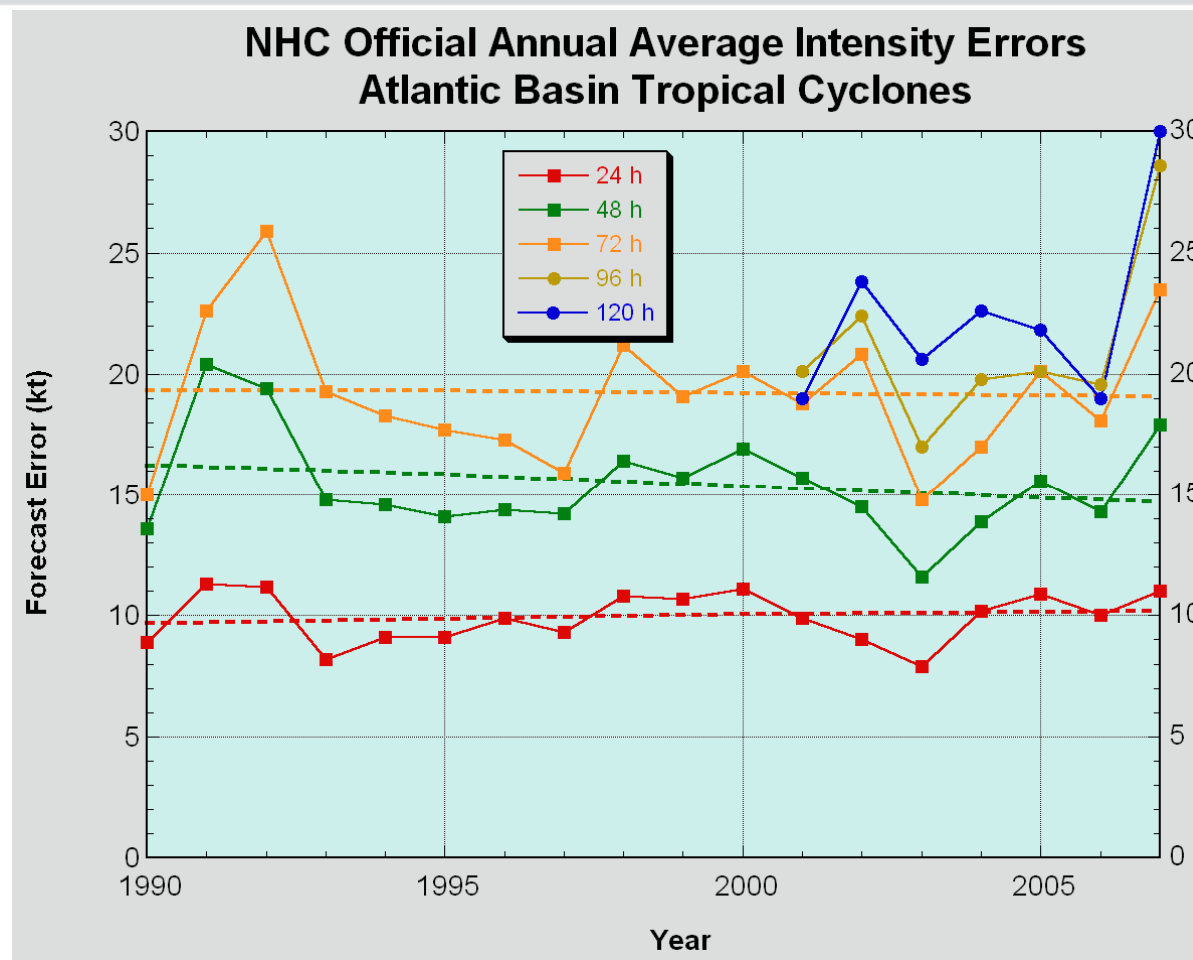
LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN



Error oficial (en millas náuticas) de los pronósticos de trayectoria para las tormentas tropicales y huracanes del Océano Atlántico.



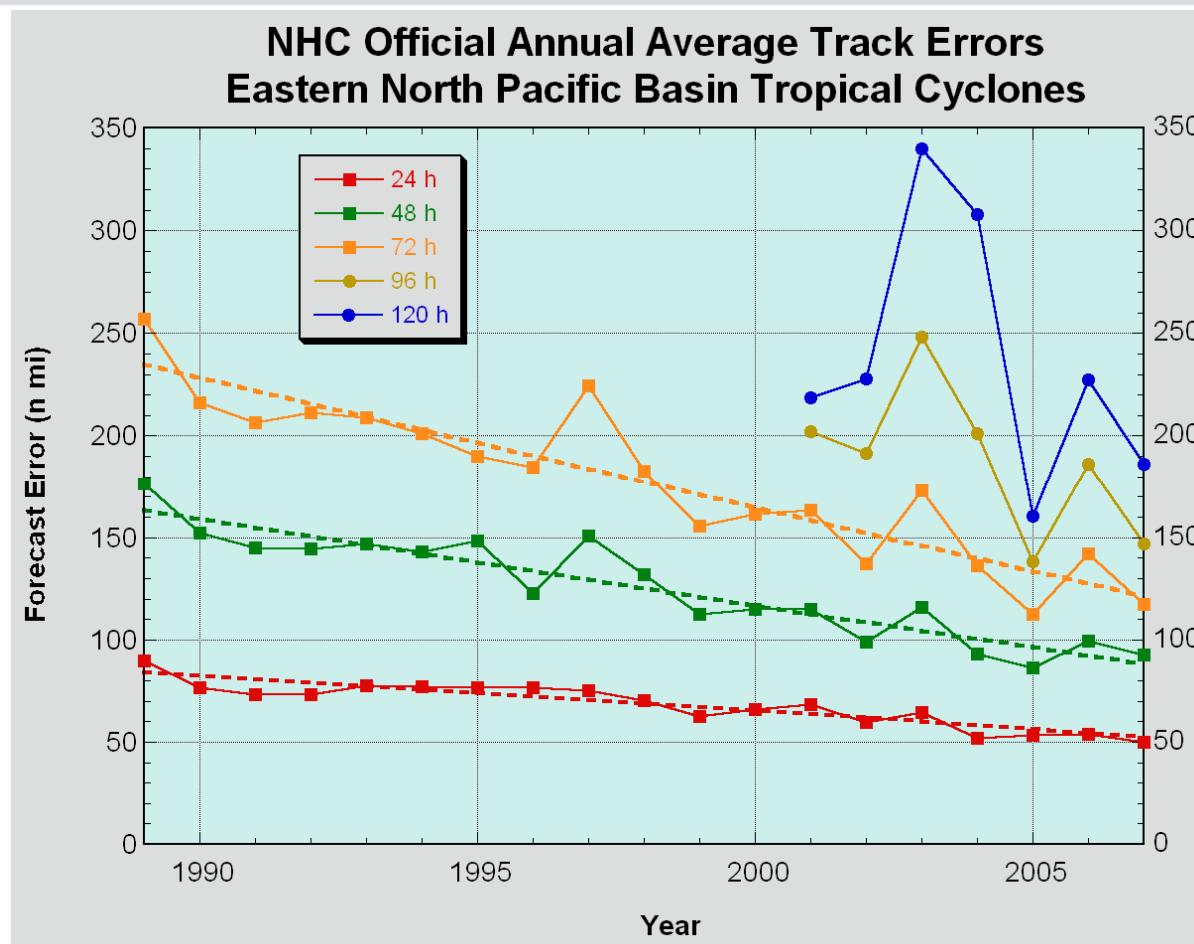
LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN



**Error oficial (en nudos) de los pronósticos de intensidad para los
ciclones del Océano Atlántico.**



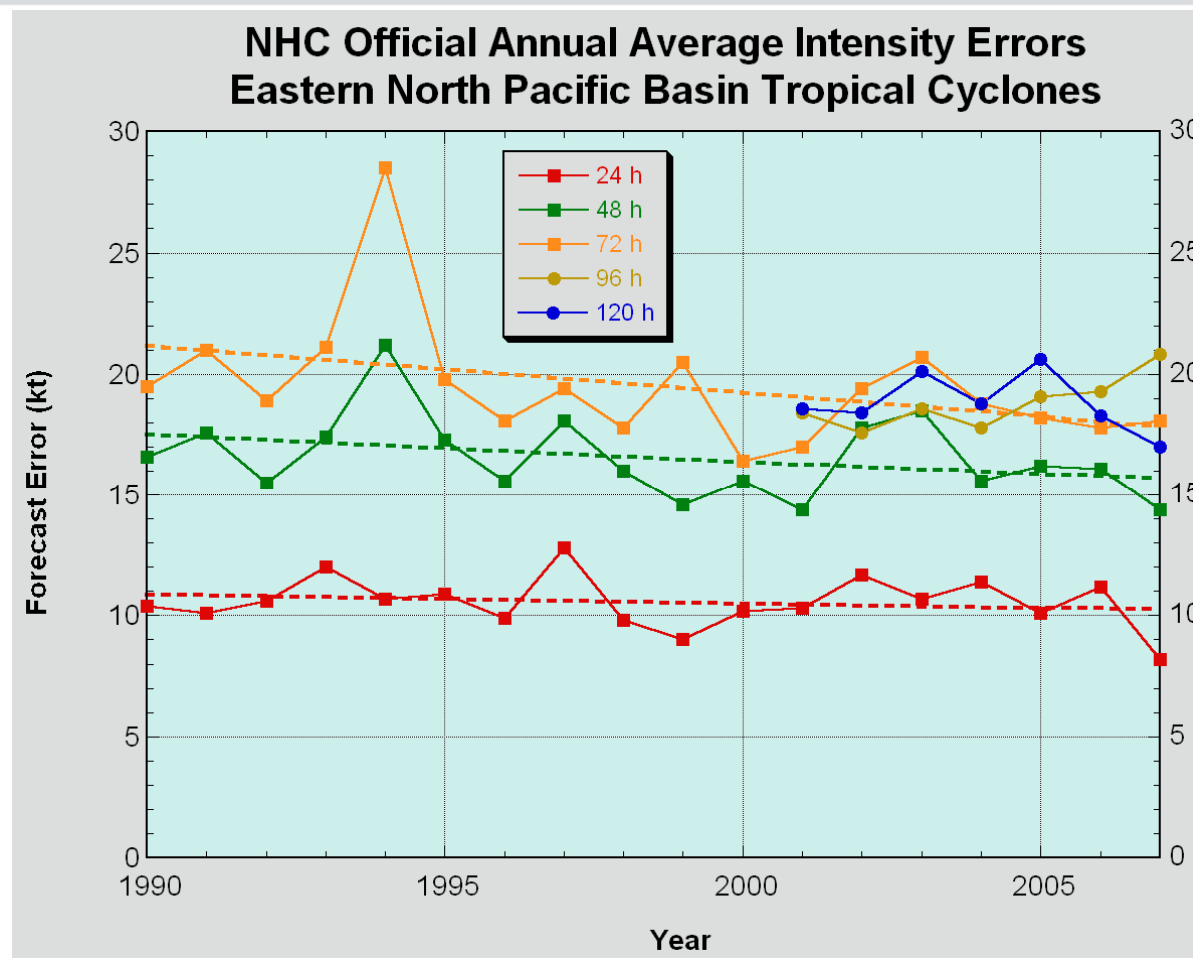
LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN



**Error oficial (en millas náuticas) de los pronósticos de trayectoria
para los ciclones del Océano Pacífico NE.**



LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN



Error oficial (en nudos) de los pronósticos de intensidad para los ciclones tropicales del Océano Pacífico del NE.



LOS PRONÓSTICOS METEOROLÓGICOS Y SU VERIFICACIÓN

Observaciones

- a) Los pronósticos de trayectoria a 96 h y 120 h son relativamente recientes (a partir del 2001), siendo implementados en forma operativa desde 2003.
- b) Los pronósticos de trayectoria son más certeros a menor transcurso de tiempo a partir de su emisión.
- c) Hay una tendencia a mayor precisión en los pronósticos de trayectoria conforme transcurre el tiempo, salvo algunas excepciones (como el año 2005).
- d) Los pronósticos de intensidad se mantienen sin grandes cambios.



MODELOS DINÁMICOS

Los modelos dinámicos son los más complejos y los modelos numéricos más caros computacionalmente utilizados por el NHC. Los modelos dinámicos hacen pronósticos solucionando las ecuaciones físicas que gobiernan la atmósfera, usando una variedad de métodos numéricos y basados en condiciones iniciales de las observaciones disponibles.

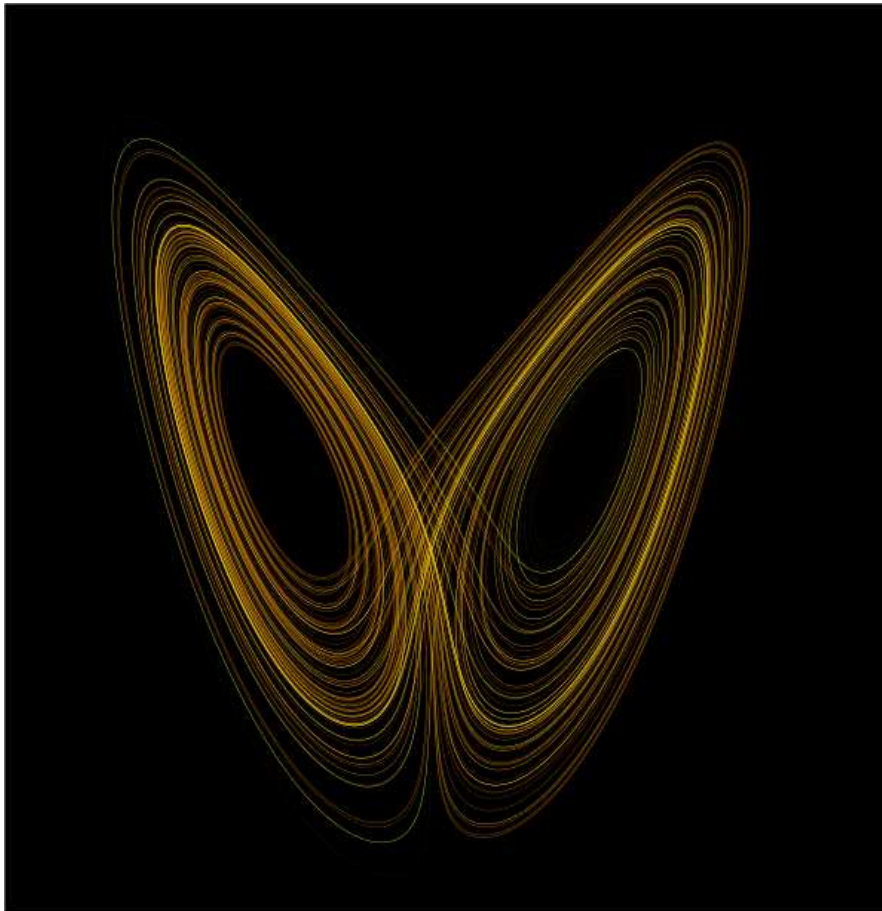
Puesto que las observaciones no se toman en cada localidad alrededor del mundo, la inicialización del modelo puede variar enormemente en la atmósfera, y éste es uno de los errores primarios de incertidumbre y de pronóstico en los modelos dinámicos.

Los errores en el estado inicial del modelo tienden a crecer durante el tiempo de pronóstico; por lo tanto los errores pequeños en el estado inicial pueden llegar a ser muy grandes varios días en el pronóstico. Es en gran parte por esta razón que los pronósticos llegan a ser cada vez más inexactos en tiempo.



MODELOS DINÁMICOS

El estudio de la atmósfera: La “mariposa” de Lorenz.



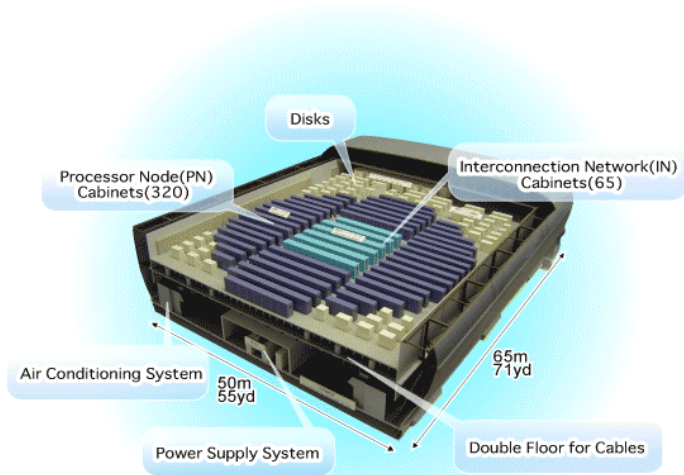
$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z$$

MODELOS DINÁMICOS

Estudio de la atmósfera: La modelación matemática y computacional.



$$\frac{D\rho_a}{Dt} + \rho_a \left(\frac{\partial(ru)}{r\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{D\mu}{Dt} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial(\rho_a \mu_r W + F_m)}{\partial z}, \quad (2.2)$$

$$\frac{D\mu_r}{Dt} = \frac{1}{\rho_a} \left(Q_r - \frac{\partial(\rho_a \mu_r W)}{\partial z} \right), \quad (2.3)$$

$$\frac{Ds}{Dt} = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial(\sigma_r W + \rho_a F_s)}{\partial z}, \quad (2.4)$$

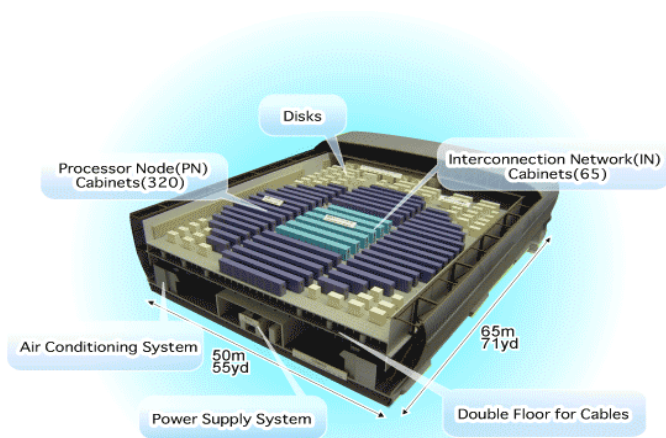
$$\frac{Du}{Dt} - \left(f + \frac{v}{r} \right) v + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = - \left(\frac{\rho_r W + F_m}{\rho} \right) \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho_a F_u)}{\partial z}, \quad (2.5)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + \left(f + \frac{v}{r} \right) u = - \left(\frac{\rho_r W + F_m}{\rho} \right) \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho_a F_v)}{\partial z}, \quad (2.6)$$

$$\frac{Dw}{Dt} + g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = - \left(\frac{\rho_r W + F_m}{\rho} \right) \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (2.7)$$

MODELOS DINÁMICOS

Estudio de la atmósfera: La modelación matemática y computacional.



```

Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
&      iyim(2),id(2),'.txt'
14  format(a,i6.0,a,i1.0,i6.0,i2.0,a)
    endif
C
    if(id(1).ge.10.and.id(2).lt.10) then
    write(outfile,16) 'c:/lluvia/AUTOMATICO/',iyim(1),id(1),
&      iyim(2),'0',id(2),'.txt'
16  format(a,i6.0,i2.0,i6.0,a,i1.0,a)
    endif
C
    if(id(1).ge.10.and.id(2).ge.10) then
    write(outfile,18) 'c:/lluvia/AUTOMATICO/',iyim(1),id(1),
&      iyim(2),id(2),'.txt'
18  format(a,i6.0,i2.0,i6.0,i2.0,a)
    endif
C
C
    OPEN(UNIT=43,FILE=outfile)
    DO n=1, Nev
    do i1=1, istations(1)
    do i2=1, istations(2)
    if(xprec(i1,id(1),1).lt.0.0.or.xprec(i2,id(2),2).lt.0.0)
&      goto 200
    if(abs(xlon(i1,1)-xlon(i2,2)) .le. 0.01) then
    if(abs(xlat(i1,1)-xlat(i2,2)) .le. 0.01) then
    xcorr=sqrt(xprec(i1,id(1),1)*xprec(i2,id(2),2))
    if(xcorr.gt.0.0)then
    write(43,220) xlon(i1,1),xlat(i1,1),xprec(i1,id(1),1),
&      xprec(i2,id(2),2),xcorr
    endif
    endif
    endif
200  enddo
  
```



MODELO GFS DE US NATIONAL WEATHER SERVICE

El término técnico "GFS" se refiere a todo el código que apoya la generación de los productos del modelo global del NWS, incluyendo el sistema global de la asimilación de datos (GDAS). El modelo GFS es un modelo global espectral truncado en el número total T382 de la onda (equivalente a un espacio horizontal 35 kilómetros por cada rejilla) con 64 niveles verticales.

Esta resolución se mantiene con 180 horas de pronóstico. Después de eso, el GFS es truncado a un número de ondas T190 (equivalente alrededor a un espacio de 80 kilómetros) con 64 niveles verticales a 384 horas.

El GFS emplea un sistema coordenado vertical sigma híbrido, con un sencillo esquema de parametrización convectivo de Arakawa-Schubert (SAS), y un método de cerradura de primer orden para representar la capa límite planetaria (PBL). Todas las corridas del GFS obtienen sus condiciones iniciales (3-D VAR) de una interpolación estadística variacional tridimensional, que se actualiza continuamente durante el día.

El GFS corre cuatro veces al día (UTC 00 UTC, 06 UTC, 12, y UTC 18) 384 horas.



MODELO BAROTROPICO DE ÁREA LIMITADA QUE UTILIZA LA TRASFORMADA DEL SENO (LBAR)

Comparado con el GFS, el modelo LBAR es simple, pues es un modelo de predicción dinámica de dos dimensiones. Soluciona las ecuaciones de aguas someras, inicializando con un promedio vertical (850-200 hpa) de los vientos y alturas del modelo global de GFS.

Un vórtice simétrico idealizado y un vector de viento constante (igual al vector inicial del movimiento de traslación de la tormenta) son anexados al análisis del modelo global GFS para representar la circulación de la tormenta. Se solucionan las ecuaciones del modelo usando la técnica espectral de transformación del seno sobre una área cerca del huracán.

Las condiciones de frontera laterales se obtienen del modelo de pronóstico global GFS. LBAR no incluye ningún gradiente horizontal en la temperatura (y como consecuencia, no incluye cizalladura vertical del viento), haciendo que LBAR tenga una habilidad relativamente pobre después de 1 o 2 días o fuera de las zonas tropicales.



SISTEMA ATMOSFÉRICO GLOBAL OPERACIONAL DE LA PREDICCIÓN DE LA MARINA (NOGAPS)

El modelo de NOGAPS es un modelo espectral global con el truncamiento triangular en 239 ondas (aproximadamente 55 kilómetros de distancia horizontal de la malla) con 30 niveles verticales (T239L30). El NOGAPS utiliza un sistema coordinado vertical de presión sigma híbrida. Esta configuración da lugar a aproximadamente seis niveles sigma debajo de 850 mb que siguen al terreno y a los 24 niveles restantes que ocurren sobre 850 mb cerca de las superficies de presión.

El paso de tiempo NOGAPS es de cinco minutos, pero se reduce en caso necesario para prevenir la inestabilidad numérica asociada a sistemas atmosféricos que se mueven rápido. El modelo NOGAPS utiliza un esquema de análisis de 3-D VAR. El modelo funciona hasta 180 horas en cada uno de los tiempos sinópticos (00Z, 06Z, 12Z, 18Z).

El modelo NOGAPS utiliza el esquema de parametrización convectivo de Emanuel basado en el método de Tiedtke. Como otros modelos globales, el modelo NOGAPS no puede proporcionar pronósticos expertos en intensidad pero proporciona buenos pronósticos de trayectoria.



EL MODELO DE HURACANES DEL GFDL (NWS)

El modelo de huracanes del GFDL es de área limitada. El modelo tiene una malla que fue diseñada específicamente para la predicción del CTs. El modelo GFDL consiste de una malla con tres anidamientos. La malla grande tiene un tamaño $75^{\circ} \times 75^{\circ}$ con una resolución horizontal $1/2^{\circ}$ (aproximadamente 30 kilómetros). La malla del centro tiene un tamaño $11^{\circ} \times 11^{\circ}$ con una resolución horizontal $1/6^{\circ}$ (aproximadamente 15 kilómetros). El anidado pequeño la malla tiene un tamaño $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ con una resolución horizontal $1/12^{\circ}$ (aproximadamente 7.5 kilómetros). Esta resolución alta, comparada con la de otros modelos dinámicos, permite que el GFDL resuelva características de escala relativamente pequeña dentro de un ciclón tropical tal como el ojo y la pared del ojo.

No obstante, incluso el GFDL no puede resolver completamente la estructura altamente compleja de un ciclón tropical. El GFDL utiliza un sistema coordinado vertical sigma con 42 niveles verticales. Emplea un esquema de parametrización convectivo simplificado de Arakawa-Schubert y un esquema no local de capa límite planetaria. El esquema de condensación de gran escala contiene un paquete de microfísica de Ferrier, y la parametrización de flujo de momentum océano-atmósfera fue hecha para considerar la presencia de vientos fuertes en la superficie.



EL MODELO DE HURACANES DEL GFDL (NWS) Cont.

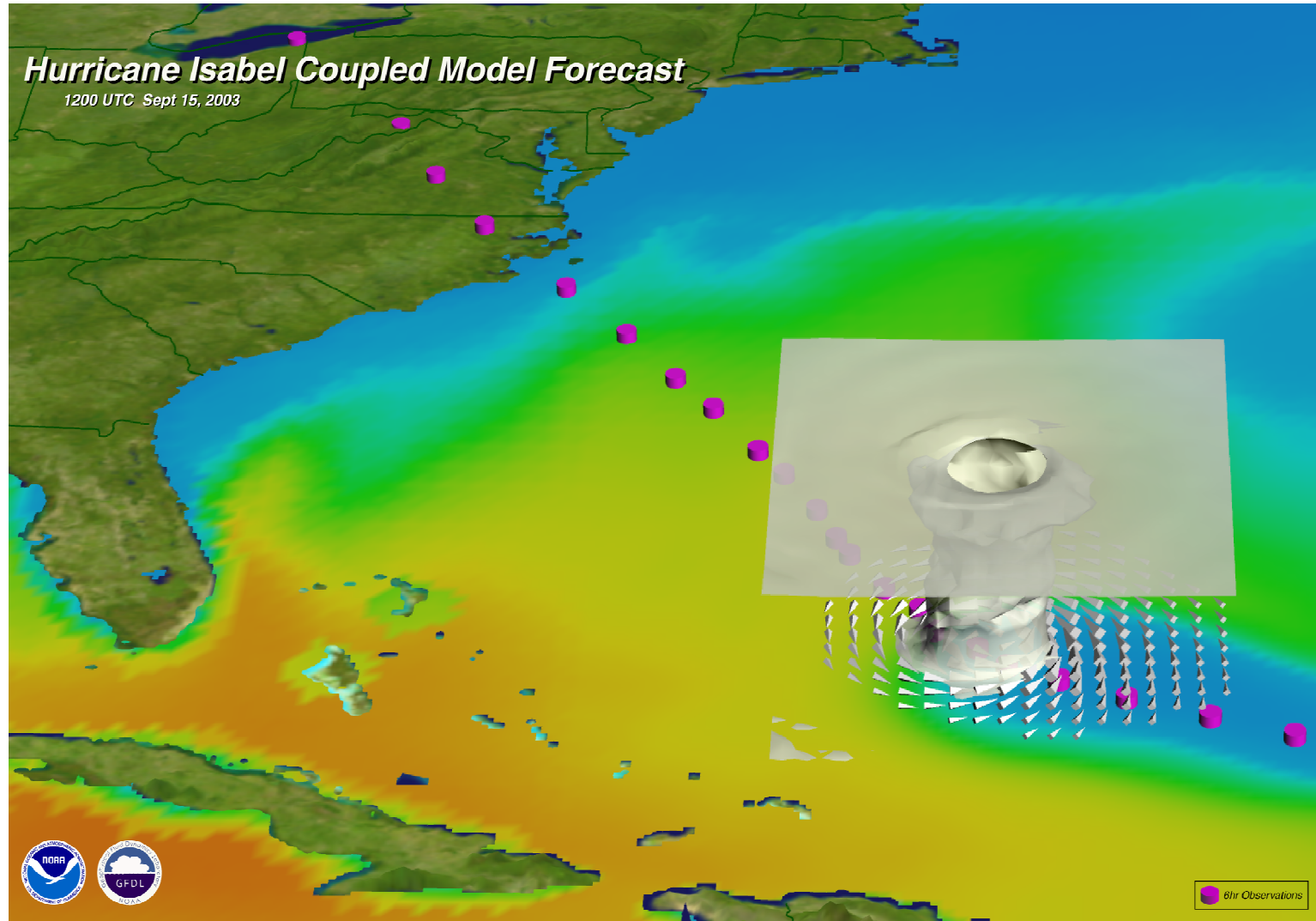
El GFDL está acoplado con una versión del Modelo de Océano de Princeton (POM) de alta resolución, que permite que el ciclón modifique al océano, tal como el enfriamiento de la temperatura de la superficie del mar, y comienza a explicar la retroalimentación del océano modificado en el ciclón tropical. En el Atlántico, el POM se configura con una resolución horizontal $1/6^\circ$ con 23 niveles verticales sigma.

Para la inicialización, el GFDL substituye el vórtice de GFS TC por un vórtice simétrico de una simulación distinta. El vórtice simétrico contiene las características del CT que son determinadas por los pronosticadores del NHC.

Como la resolución horizontal del GFDL es suficientemente alta, simula algo de la estructura interna del ciclón tropical, el modelo GFDL hasta ahora ha sido el único modelo dinámico que puede proporcionar buenos pronósticos de intensidad y de trayectoria. El GFDL operacional corre hasta 4 CTs cada seis horas hasta 126 horas.

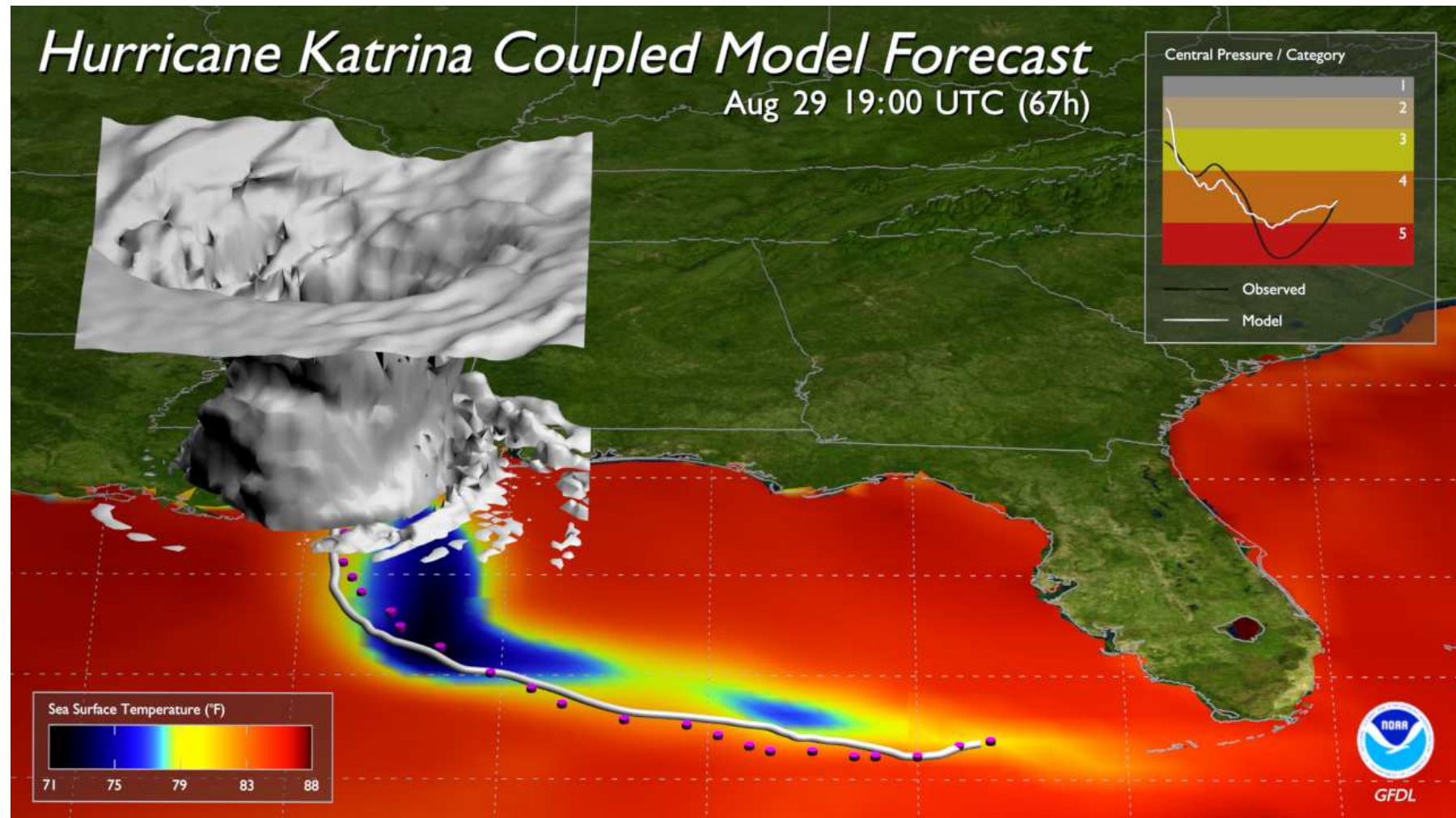


EL MODELO DE HURACANES DEL GFDL (NWS) Cont.





EL MODELO DE HURACANES DEL GFDL (NWS) Cont.





HURACÁN MITCH



MODELO BAROTRÓPICO NO DIVERGENTE

CONSERVACIÓN MATERIAL DE LA VORTICIDAD ABSOLUTA:

$$\frac{D\zeta}{Dt} = 0,$$

DONDE

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{a \cos \phi \partial \lambda} + v \frac{\partial}{a \partial \phi}$$

$$\zeta = 2\Omega \sin \phi + \frac{\partial v}{a \cos \phi \partial \lambda} - \frac{\partial(u \cos \phi)}{a \cos \phi \partial \phi}$$

$$\zeta = 2\Omega \sin \phi + \nabla^2 \psi,$$

VELOCIDAD HORIZONTAL

$$u = -\frac{\partial \psi}{a \partial \phi}, \quad v = \frac{\partial \psi}{a \cos \phi \partial \lambda}$$



MODELO BAROTRÓPICO NO DIVERGENTE

SOLUCIÓN ESPECTRAL

$$\frac{D\zeta}{Dt} = 0,$$

$$\zeta(\lambda, \mu) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^N \zeta_n^m P_n^m(\mu) e^{im\lambda},$$

$$U \equiv u \cos \phi, V \equiv v \cos \phi, A \equiv U\zeta, B \equiv V\zeta, f \equiv 2\Omega\mu,$$

$$A(\lambda_j, \mu_k) = U(\lambda_j, \mu_k) \zeta(\lambda_j, \mu_k),$$

$$B(\lambda_j, \mu_k) = V(\lambda_j, \mu_k) \zeta(\lambda_j, \mu_k).$$

$$A^m(\mu_k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J A(\lambda_j, \mu_k) e^{-im\lambda_j},$$

$$B^m(\mu_k) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J B(\lambda_j, \mu_k) e^{-im\lambda_j},$$

$$\frac{\partial \zeta_n^m}{\partial t} = - \sum_{k=1}^K \left[im A^m(\mu_k) P_n^m(\mu_k) - B^m(\mu_k) (1 - \mu_k^2) \frac{dP_n^m(\mu_k)}{d\mu} \right] \frac{w_k}{a(1 - \mu_k^2)};$$



MODELO BAROTRÓPICO NO DIVERGENTE

SOLUCIÓN ESPECTRAL

$$P_{\ell}^{(m)}(x) = (-1)^m (1 - x^2)^{m/2} \frac{d^m}{dx^m} (P_{\ell}(x))$$

$$P_{\ell}^{(-m)}(x) = (-1)^m \frac{(\ell - m)!}{(\ell + m)!} P_{\ell}^{(m)}(x).$$

$$P_0^0(x) = 1$$

$$P_1^{-1}(x) = -\frac{1}{2}P_1^1(x)$$

$$P_1^0(x) = x$$

$$P_1^1(x) = -(1 - x^2)^{1/2}$$

$$P_2^{-2}(x) = \frac{1}{24}P_2^2(x)$$

$$P_2^{-1}(x) = -\frac{1}{6}P_2^1(x)$$

$$P_2^0(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1)$$

$$P_2^1(x) = -3x(1 - x^2)^{1/2}$$

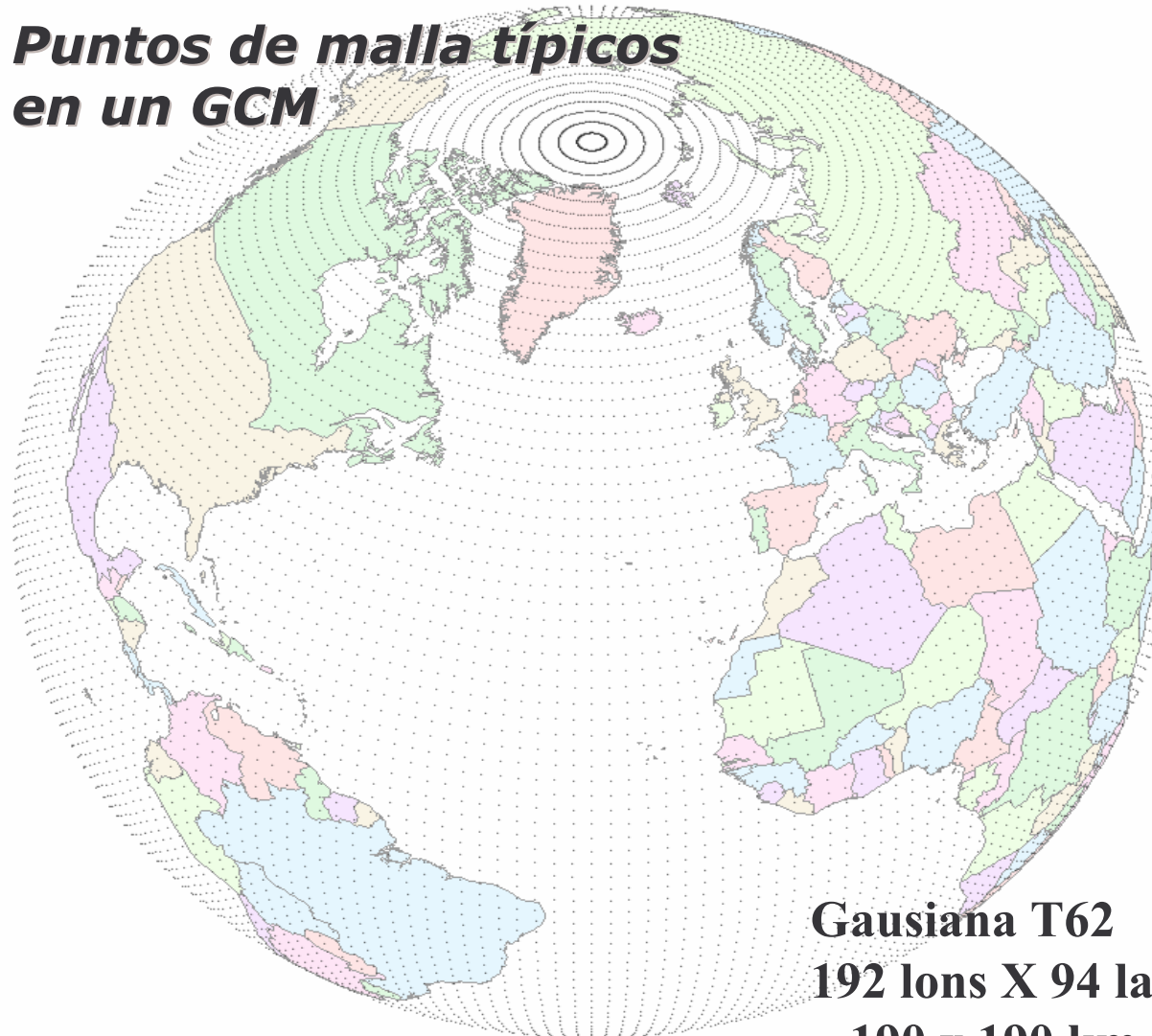
$$P_2^2(x) = 3(1 - x^2)$$

$$P_3^{-3}(x) = -\frac{1}{720}P_3^3(x)$$

$$P_3^{-2}(x) = \frac{1}{120}P_3^2(x)$$

MALLA DE UN MODELO GLOBAL

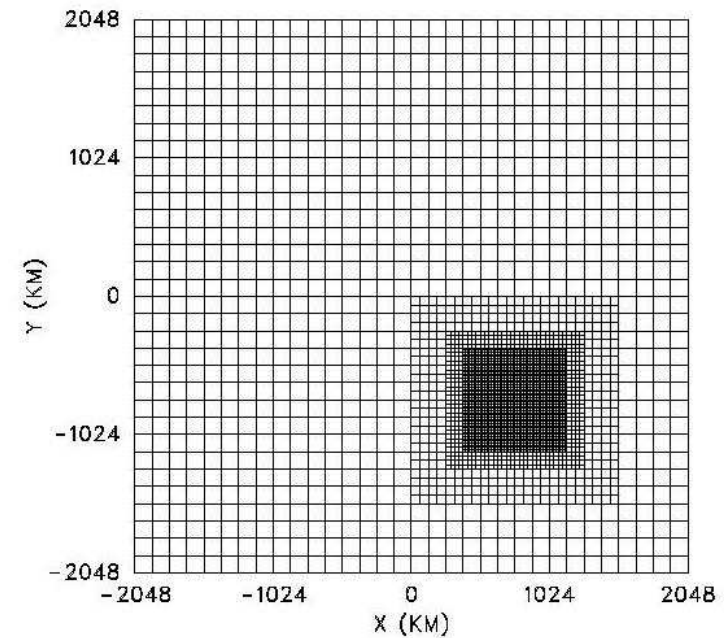
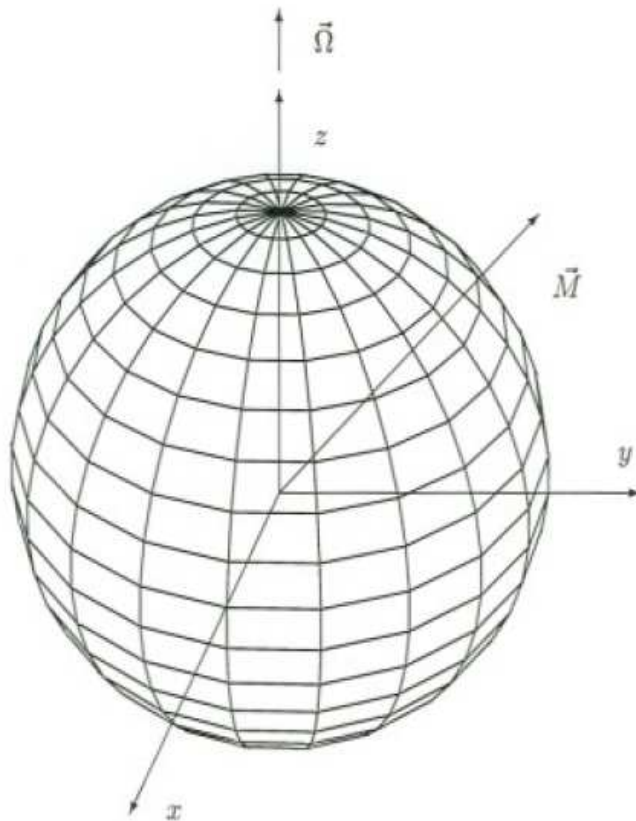
***Puntos de malla típicos
en un GCM***



Gausiana T62
192 lons X 94 lats
~ 190 x 190 km



MALLA DE UN MODELO GLOBAL Y UN MODELO DE ÁREA LIMITADA





MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

LA EXPANSIÓN DE TAYLOR DE FUNCIÓN $f(x)$ da:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x) \cdot \Delta x + \frac{1}{2} f''(x) \Delta x^2 + [O(\Delta x^3)]$$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - f'(x) \cdot \Delta x + \frac{1}{2} f''(x) \Delta x^2 + [O(\Delta x^3)]$$

Despejando $f'(x)$:

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} + O(\Delta x) = f_F + O(\Delta x)$$

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x) = f_B + O(\Delta x).$$

Restando $f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)$:

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2)$$

Sumando $f(x + \Delta x) + f(x - \Delta x)$:

$$f''(x) = \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2)$$

MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + c \frac{\partial Y}{\partial x} = 0.$$

n = 5	*	*	*	*	*	*	*
n = 4	*	*	*	*	*	*	*
n = 3	*	*	*	*	*	*	*
n = 2	*	*	*	*	*	*	*
n = 1	*	*	*	*	*	*	*
n = 0	*	*	*	*	*	*	*
	m=-3	m=-2	m=-1	m=0	m=1	m=2	m=3

$$\left(\frac{Y_m^{n+1} - Y_m^{n-1}}{2\Delta t} \right) + c \left(\frac{Y_{m+1}^n - Y_{m-1}^n}{2\Delta x} \right) = 0.$$

$$Y_m^{n+1} = Y_m^{n-1} - \left(\frac{c\Delta t}{\Delta x} \right) (Y_{m+1}^n - Y_{m-1}^n)$$



CONDICIÓN DE ESTABILIDAD CONOCIDA COMO CFL:

$$\frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$



CONCLUSIONES

La modelación dinámica de ciclones tropicales ha tenido grandes avances en los últimos 30 años, particularmente reduciendo de forma considerable los errores en las trayectorias pronosticadas.

El error en la estimación de la intensidad de los CTs está prácticamente sin cambios desde que se inició operacionalmente. Esto es debido a que los procesos internos que gobiernan la intensidad se dan a una escala espacial y temporal pequeñas.

La modelación dinámica contempla varios pasos: 1) Modelación física; 2) Discretización; 3) Programación; 4) Ejecución; 5) Verificación. Existen técnicas muy modernas en cada uno de ellos, sin embargo el desarrollo no ha sido uniforme.

Se requiere dar un buen impulso en los conocimientos de la modelación numérica en países en desarrollo.