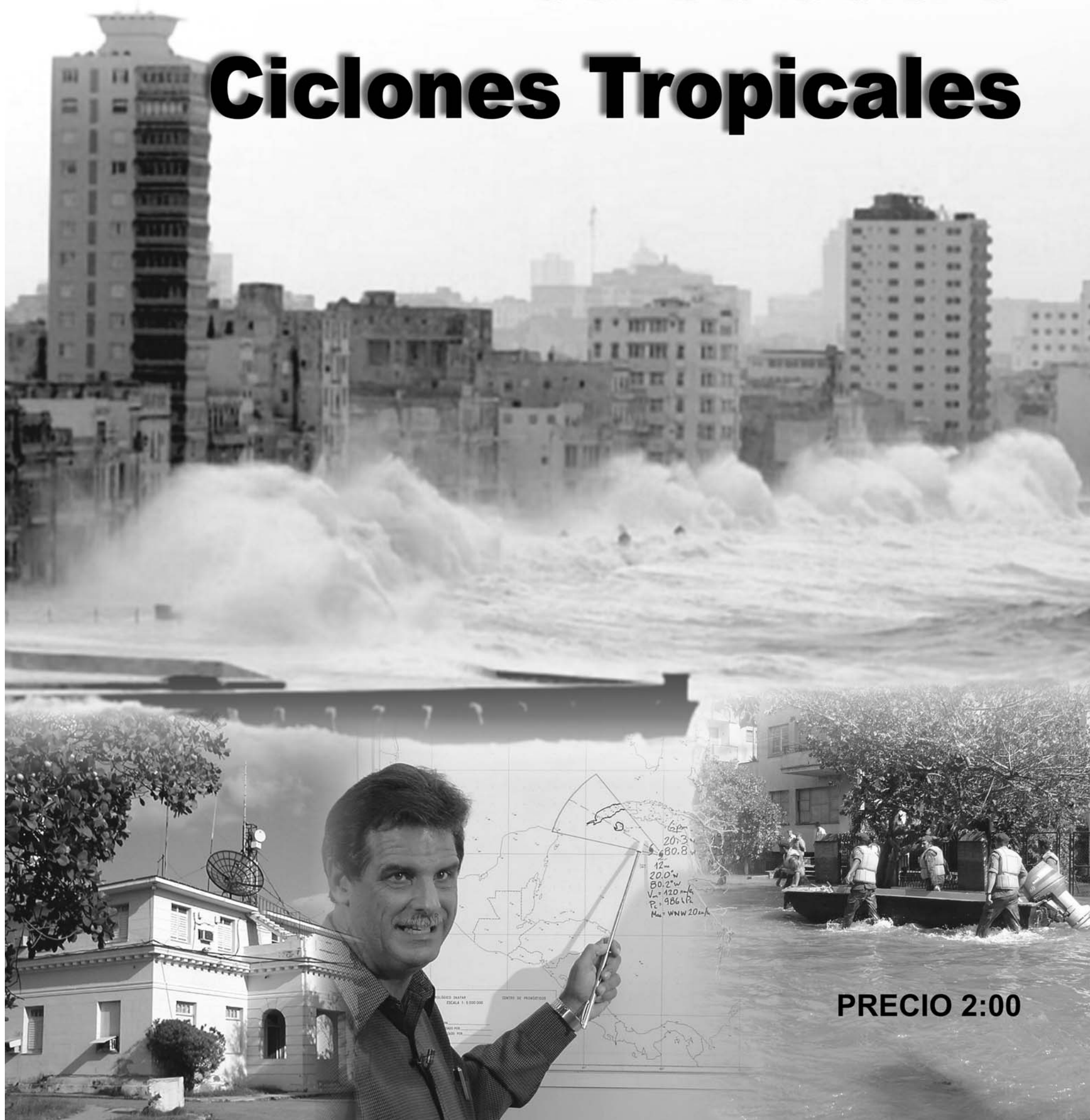


**UNIVERSIDAD PARA TODOS**

# **Curso sobre Ciclones Tropicales**



**PRECIO 2:00**

Í N D I C E

INTRODUCCIÓN / 2

EL TIEMPO EN LOS TRÓPICOS: SISTEMAS METEOROLÓGICOS DE LA ZONA TROPICAL / 3

Introducción / 3

Principales características del tiempo en los trópicos / 3

El tiempo en Cuba / 3

Sistemas del tiempo generadores de lluvia en la zona tropical / 3

Zona Intertropical de Convergencia (ZIC) / 3

Vaguada Tropical Troposférica Superior (TUTT) / 4

Evolución de la circulación de verano en el nivel de 200 hPa / 4

Oscilaciones de baja y alta frecuencia / 4

Hondonada / 5

Ondas del Este / 5

Líneas de tormentas / 5

Bajas frías / 6

Ciclones extratropicales / 6

Sistemas lineales: los frentes fríos y las líneas de tormentas / 6

Frentes fríos en los trópicos / 6

Corrientes en chorro subtropical. Sus características / 6

Sistemas convectivos / 6

Interacción de los sistemas del tiempo de la zona tropical con las latitudes medias / 6

Penetración de aire frío en las regiones tropicales / 7

Transformación de un ciclón tropical a extratropical, con especial énfasis en la lluvia / 7

Características de la lluvia en los trópicos / 7

CICLONES TROPICALES / 8

Definición / 8

Clasificación de los ciclones tropicales / 8

Categorías de los huracanes / 8

Nombres de los ciclones tropicales / 8

Historia del uso de nombres en los ciclones tropicales / 8

Otros sistemas de tormentas / 8

Mecanismos en los ciclones tropicales / 9

Perfiles estacionales de la ocurrencia de ciclones tropicales / 10

Ciclogénesis en el Atlántico norte / 10

Disipación / 10

Estructura de los ciclones tropicales / 11

Movimiento / 11

Presión atmosférica y el viento / 12

Relación viento-presión / 12

Perfil del viento en los ciclones tropicales y factores de racha / 12

Elementos peligrosos de un ciclón tropical / 12

Acción del mar: el oleaje y la surgencia / 13

Vientos / 13

Lluvias / 13

Tornados / 13

Descripción del paso de un huracán por una localidad. Características encontradas en el ojo/ 13

Agrupamiento de los ciclones tropicales en el tiempo / 14

Influencia del Evento El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) / 14

Modulación de los ciclones tropicales por la Oscilación Cuasi Bienal (QBO) del viento / 14

Oscilación Multidecadal del Atlántico / 14

Variaciones y tendencias de la actividad ciclónica / 14

¿Efectos del calentamiento global? / 14

Ciclones tropicales de Cuba / 15

TECNOLOGÍA DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE LOS CICLONES TROPICALES / 16

Introducción / 16

Instrumentos convencionales. Estaciones automáticas / 16

Comunicaciones y recepción de datos / 17

Monitoreo de los ciclones tropicales con los Dropsondas GPS / 18

Técnicas de los radares meteorológicos / 19

Técnicas de los satélites meteorológicos / 21

¿En qué consiste la Técnica Dvorak? / 22

PRONÓSTICO DE LOS CICLONES TROPICALES / 23

Introducción / 23

Modelos de pronósticos / 23

Factores generales dinámicos y físicos / 23

Pronóstico de Consenso / 24

Modelos para el pronóstico de intensidad / 24

Oleaje y surgencia. Modelos de pronósticos utilizados para los huracanes / 25

Evaluación de los modelos de pronósticos de trayectorias e intensidad / 26

Técnicas de predicción estacional. Estado actual a nivel internacional y en Cuba / 26

Estado actual de la temática en la cuenca atlántica / 26

Pronóstico estacional de la actividad de ciclones tropicales en Cuba / 27

¿Cómo se confecciona un pronóstico estacional en Cuba? / 27

SISTEMA DE PRONÓSTICOS Y AVISOS DE CICLONES TROPICALES Y EL SISTEMA DE DEFENSA CIVIL EN LA REPÚBLICA DE CUBA / 28

Trabajo operativo del Centro de Pronósticos en caso de ciclón tropical / 28

Sistema de pronósticos y avisos en Cuba / 28

Alerta temprana / 28

Interacción con los Medios y la Defensa Civil / 28

Sistema de Defensa Civil en casos de ciclón tropical / 28

TEMPORADA CICLÓNICA DE 2005 EN EL ATLÁNTICO NORTE ¡TEMPORADA RÉCORD / 28

Huracán Dennis en Cuba / 30

BIBLIOGRAFÍA / 31

COORDINADOR GENERAL Y PROFESOR:  
Dr. José M. Rubiera Torres  
Investigador Titular y Jefe del Centro de Pronósticos, INSMET

AUTORES

Dra. Cecilia González Pedroso  
Investigador Titular, Centro de Pronósticos, INSMET

Dra. Maritza Ballester Pérez  
Investigador Titular, Centro de Pronósticos, INSMET

M.Sc. Miriam T. Llanes Monteagudo  
Especialista, Centro de Pronósticos, INSMET

M.Sc. Armando Caymares Olivares  
Especialista, Centro de Pronósticos, INSMET


Lic. Yamilis Gimeno Albizu  
Especialista, Centro de Pronósticos, INSMET

Dr. Eugenio Mojena López  
Investigador Titular, Centro de Pronósticos, INSMET

**Agradecimiento:**

Al colectivo de la Editorial Academia por el trabajo de edición y diseño realizado en condiciones difíciles, así como por su atención a los autores.

GRUPO DE EDICIÓN  
EDITORIAL ACADEMIA

  
ACADEMIA

Edición: Lic. Hermes J. Moreno Rodríguez  
Diseño y tratamiento de imágenes: Marlene Sardiña Prado  
La Habana, 2006, «Año de la Revolución Energética en Cuba»

**INTRODUCCIÓN**

Uno de los primeros cursos de «Universidad para Todos» transmitido por el Canal Educativo fue el de «Meteorología y Climatología». Fue un largo curso de 42 clases, en que las primeras 21 trataron sobre la Meteorología General y los diversos sistemas y fenómenos meteorológicos. De ellas 5 clases fueron dedicadas a los ciclones tropicales y sus efectos, con una clase-resumen que se transmitió al final del curso.

El interés de nuestra población fue muy grande, muchas personas pidieron al Canal Educativo que retransmitiera el curso, y así se hizo. En particular, las clases dedicadas a los ciclones tropicales tuvieron una gran demanda y fue necesario volverlas a transmitir de nuevo durante la temporada ciclónica del 2004 en vísperas del azote del huracán Iván.

En el contexto de un período de intensa actividad ciclónica en nuestra área geográfica, y estando nuestro País amenazado en cada nueva temporada por estos temibles sistemas tropicales, resulta muy necesario presentar a la población un curso dedicado íntegramente a los ciclones tropicales para no sólo elevar más la cultura meteorológica dentro de la Cultura General e Integral, sino para que nuestro pueblo conozca más profundamente qué son estos poderosos organismos tropicales y que pueda comprender mejor las informaciones y pronósticos que sobre los mismos emita el Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología (INSMET), para entonces tomar las medidas de prevención con más conciencia y celeridad, a fin de proteger las vidas y también la riqueza material de nuestra sociedad.

Este nuevo curso consta de cinco temas. El primero permitirá conocer las condiciones meteorológicas normales que usualmente están presentes en la zona tropical; el segundo se dedica a brindar un conocimiento lo más exhaustivo posible sobre los ciclones tropicales y sus efectos; el tercero trata acerca de las tecnologías para la obtención de observaciones y datos desde las estaciones meteorológicas, de satélite y radar, pasando por los sistemas de comunicaciones necesarios para transmitir rápidamente esas valiosas informaciones; el cuarto se dedica al pronóstico de trayectoria e intensidad de los ciclones tropicales, así como al de los fenómenos peligrosos que traen asociados; mientras que en el quinto, y final, se describe el Sistema de Pronósticos y Avisos de Ciclones Tropicales y el Sistema de Defensa Civil de nuestro País, con los cuales se protege a la población de los temibles impactos que pueden traer consigo estos eventos meteorológicos.

Este curso ha sido preparado para ustedes con mucho esmero y dedicación por un colectivo de autores, especialistas e investigadores del Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología. Espero que lo disfruten y que el mismo les sea de gran utilidad.

**Dr. José Rubiera**

Jefe del Centro de Pronósticos,  
Instituto de Meteorología, INSMET  
Coordinador del Curso

## EL TIEMPO EN LOS TRÓPICOS: SISTEMAS METEOROLÓGICOS DE LA ZONA TROPICAL

### Introducción

En los trópicos el elemento climático más importante es la lluvia y se debe principalmente a que esa variable meteorológica muestra la más alta variabilidad espacio-temporal, y en un porcentaje alto determina la economía de la mayoría de los países situados en el área tropical. Los patrones espacio-temporales de lluvia generalmente reflejan las características de los sistemas productores de lluvia en las escalas mencionadas. La Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) es uno de los grandes sistemas controladores del tiempo e influye de forma determinante en el patrón lluvioso de esa región ecuatorial. Otros sistemas como son los monzones, los ciclones tropicales, las ondas del este, las corrientes en chorro, los oestes ecuatoriales, las circulaciones de mesoescala, los disturbios de latitudes medias, incluyendo los frentes y sistemas de bloqueo, sistemas de teleconexión como el Evento El Niño/Oscilación Sur (ENOS), ondas inter-estacionales como las oscilaciones de 30-60 días (OMJ, OAN) y la Oscilación Quasi Bienal de los vientos estratosféricos (QBO), caracterizan los sistemas del tiempo en bajas latitudes, no sólo en la estructura de ellos sino además en la humedad y el flujo convectivo.

A diferencia de las latitudes medias y altas, donde uno de los más importantes modelos sinópticos, como lo es el del ciclón extratropical (desarrollado por la escuela noruega), se aplica con éxito en el pronóstico del tiempo, pero en latitudes tropicales no se alcanza similar propósito. Gran parte del tiempo en los trópicos es rutinario, y sólo es alterado por el paso de frentes fríos, hondonadas, ondas tropicales y ciclones tropicales, que son los sistemas del tiempo más significativos de la zona tropical.

Hace algunos años atrás la mayoría de los modelos numéricos para el pronóstico del tiempo no incluían a los trópicos. Con el desarrollo vertiginoso de los medios de cómputo y la demanda y éxitos alcanzados en los pronósticos para plazo medio, se valoró como la circulación tropical influye de forma significativa en el desarrollo del estado del tiempo en las latitudes extratropicales y entonces se desarrollaron los modelos globales. Palmer (1990) afirmó que para el pronóstico a mediano plazo el impacto de los trópicos en los extratropicos es más que ocasional; es decir, se manifiesta con mayor frecuencia. Este especialista concluye su estudio afirmando que la pericia o habilidad del pronóstico del flujo tropical a gran escala es un requisito fundamental para la predicción a largo plazo de la zona extratropical.

Las principales características generales del tiempo en la zona tropical, así como los sistemas meteorológicos generadores de lluvia en esa área serán tratados con el objetivo de profundizar en el conocimiento e identificación de los procesos meteorológicos en las diferentes escalas espacial y temporal.

### Principales características del tiempo en los trópicos

Los trópicos son las zonas entre el Trópico de Cáncer (latitud 23.5° N) y el Trópico de Capricornio (latitud 23.5° S), aunque en Meteorología esta definición no debe ser interpretada tan estrictamente, ya que los tipos de tiempo que se observan en la zona tropical con frecuencia se extienden a la zona subtropical, como por ejemplo, los ciclones

tropicales, que en ocasiones se mueven fuera de los trópicos sin perder las características propias que los identifican. Similarmente, los frentes fríos y otros fenómenos del tiempo de latitudes medias algunas veces penetran en los trópicos. Es por eso que la Meteorología de los trópicos se trata de forma diferente, y se debe a que los sistemas meteorológicos en esa zona son bastante diferentes a los que se hallan en la zona extratropical. Esa diferencia se observa principalmente en el comportamiento de los vientos, en los gradientes de temperatura, en la estacionalidad del tiempo y en el ciclo diurno.

El tiempo en los trópicos es básicamente cálido y húmedo debido, principalmente, a que en esa zona la Tierra recibe más radiación solar que la que emite al espacio, y este calentamiento excesivo es el que provoca que el «tiempo» pueda ser más impactante en una región del globo que en otra. Esta energía no balanceada genera la Circulación General de la Atmósfera; es decir, los movimientos del aire a gran escala en busca de un equilibrio térmico.

Las abundantes lluvias que ocurren en la zona tropical se producen debido al ascenso del aire húmedo por el calentamiento solar, y en determinados períodos del día están presentes las tormentas eléctricas como consecuencia del predominio en esa zona de los movimientos verticales convectivos del aire, donde la mayoría son ascendentes. Esos movimientos no son uniformes sino que varían de acuerdo con el calentamiento de la superficie terrestre. Sobre el océano son menos intensos que sobre el continente. En la Fig. 1 se muestra la inestabilidad de la atmósfera aparece representada en esa figura por los movimientos ascendentes de aire cálido y húmedo en la troposfera baja con aire frío en los niveles medios y altos de la atmósfera, situación que conlleva a la formación de nubes de gran desarrollo vertical (Cb), asociadas a las precipitaciones convectivas que producen lluvias en forma de chubascos, y en su continuo desarrollo alcanzan alturas superiores a los 15 km.

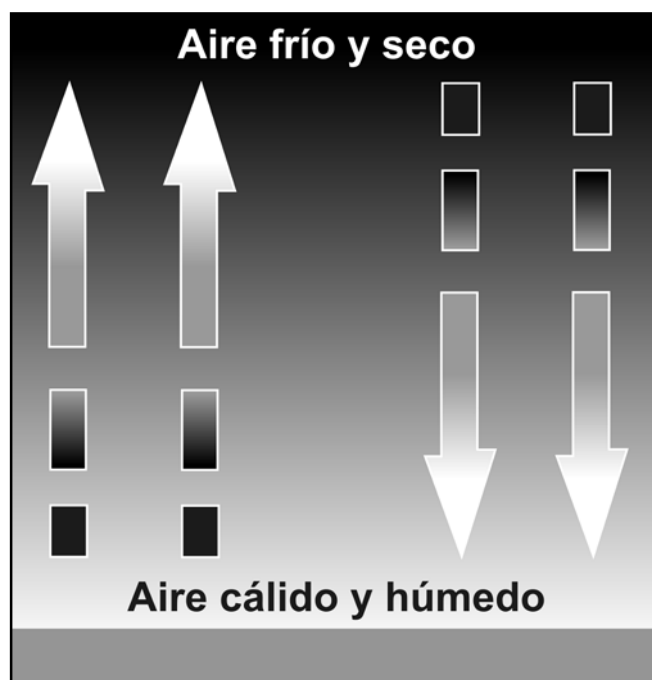


Fig. 1. Inestabilidad convectiva.

En los trópicos una parte sustancial de la energía solar se utiliza en los procesos de evaporación y formación de la lluvia. Por ello no es notable la oscilación diaria de la temperatura en relación con los valores extremos de esta variable. La temperatura media en las regiones tropicales oscila alrededor de los 27.0° C, aunque sí se producen variaciones a través el año, pero ligeras. Por eso no se distinguen significativamente las estaciones por períodos cálidos y fríos, sino por períodos secos y lluviosos.

### El tiempo en Cuba

En el archipiélago cubano el estado del tiempo está bien definido y delimitado estacionalmente por dos períodos, uno lluvioso (mayo-octubre) y otro poco lluvioso (noviembre-abril), en los que se observan sistemas meteorológicos con características propias y disímiles en cada uno de ellos.

En el período poco lluvioso (denominado por algunos como período seco) se observa la influencia de hondonadas prefrontales, frentes fríos y anticiclones continentales migratorios que alternan con altas presiones del anticiclón subtropical oceánico del Atlántico. En el período lluvioso los cambios más pronunciados en el estado del tiempo vienen dados por el cruce o desplazamiento de hondonadas, ondas tropicales, depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes por los mares adyacentes al archipiélago cubano.

### Sistemas del tiempo generadores de lluvia en la zona tropical

Los sistemas del tiempo que se observan en la zona tropical pueden ser agrupados en ondulatorios, lineales y vorticiales. Entre los primeros sistemas se hallan las hondonadas, las ondas tropicales, y como caso particular de éstas, se citan las Onda del Este (Riehl, 1954, 1979). Ejemplos de sistemas lineales son los frentes fríos y las líneas de tormentas. Entre los vórtices o sistemas vorticiales merecen ser citados, en primer lugar, los ciclones tropicales, ciclones subtropicales y las bajas frías.

Otros sistemas de vientos que también se observan en la zona tropical son: la Zona Intertropical de Convergencia, los vientos alisios, el monzón y la corriente en chorro subtropical.

### Zona Intertropical de Convergencia (ZIC)

La Zona Intertropical de Convergencia (ZIC) se denota como una banda de nubes, mayoritariamente convectivas con lluvias y tormentas eléctricas, que circunda el globo en las proximidades del ecuador. Representa el «ecuador meteorológico» del planeta. Su ancho oscila entre 500 y 600 km. Con frecuencia se observan en ella áreas de lluvias fuertes e intensa inestabilidad. Esa banda nubosa que se extiende por cientos de kilómetros se presenta algunas veces fragmentada en pequeños segmentos lineales, y la misma varía estacionalmente. Se desplaza hacia el norte en el verano del hemisferio norte y hacia el sur en el invierno de ese hemisferio. La ZIC es la máxima responsable de las estaciones húmeda y seca en los trópicos. En ella pueden generarse ciclones tropicales.

La presencia de la ZIC se debe a la convergencia de los vientos alisios del hemisferio norte (nordeste) y del hemisferio sur (sudeste). El punto en el que convergen los vientos alisios de ambos hemisferios, y donde se observa de forma significativa el ascenso del aire, es donde se forma la Zona Intertropical de Convergencia. También se le denomina por algunos autores como *vaguada ecuatorial*, y en ella predominan las bajas presiones. Algunos especialistas la definen como una *vaguada semipermanente de baja presión*.

En ocasiones su posición exacta no es fácil de determinar, principalmente en las regiones monzónicas, debido a las grandes variaciones que presenta de semana en semana y de día en día.

Las áreas de mayor nubosidad asociadas a la ZIC no son continuas y el eje de ella no coincide con las presiones más bajas en la vaguada ecuatorial. Similarmente, las variaciones diarias en las áreas nubosas ocurren como un resultado de la influencia geográfica y diurna en el desarrollo de las nubes. Las nubes convectivas, que se producen por el calentamiento diurno, algunas veces incrementan a la ZIC sobre tierra. La posición media de la ZIC en los meses de enero y julio se muestra en la Fig. 2.

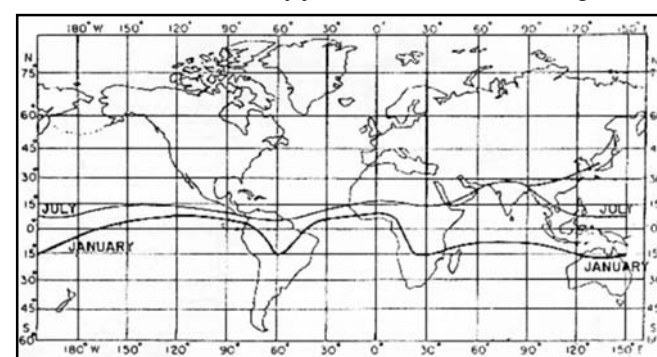


Fig. 2. Posición media de la Zona Intertropical de Convergencia en los meses de enero y julio.



En relación con la dinámica de la ZIC y los tipos de nubosidad que en ella se desarrollan se exponen varios conceptos y teorías que contribuyen al conocimiento de los sistemas meteorológicos de bajas latitudes, los que están basados en las diferentes investigaciones que sobre ellos se han realizado. Aquí se ha mencionado que los disturbios a escala sinóptica (de miles de kilómetros) se observan en muchas partes de los trópicos, en particular a lo largo de la Zona Intertropical de Convergencia (ZIC), definida por Gu y Zhang (2001) como una amplia banda de convección profunda en los océanos Atlántico y Pacífico.

Esos autores expresan que por lo general, en períodos de 3 a 8 días, la mayoría de los disturbios tropicales se propagan hacia el oeste con velocidades que oscilan entre 5 y 10 m/s, con una longitud de onda del orden de 2 000 a 4 000 km. Mientras que Carlson (1969) expone que la propagación al oeste de los disturbios tropicales a escala sinóptica constituyen una parte importante de la Zona Intertropical de Convergencia, así como que con frecuencia se ha observado que esa zona está compuesta por nubes convectivas aisladas, dispersas y organizadas, las que presentan un movimiento zonal hacia el oeste.

Por otra parte, Chang (1970) afirma que esos sistemas nubosos están estrechamente asociados con disturbios tropicales a escala sinóptica, y de acuerdo con las teorías de Holton *et al.* (1971) y Chang (1973), la inestabilidad en la dinámica interna de la atmósfera determina la latitud de los disturbios a escala sinóptica, de ahí que la nubosidad media y la precipitación asociada con los mismos constituyen una amplia banda orientada zonalmente, donde se concentra la nubosidad y la lluvia al norte del ecuador, y que comúnmente es la referida como la Zona Intertropical de Convergencia. Esa teoría tiene implícita la influencia de otros factores sobre la ZIC, como son las distribuciones de la temperatura superficial del mar y la topografía, por lo que la ZIC es ecuatorialmente asimétrica gran parte del tiempo. Estas teorías y otras están siendo probadas en simulaciones numéricas (Chang, 1973; Hess *et al.*, 1993).

### Vaguada Tropical Troposférica Superior (TUTT)

La circulación troposférica superior sobre los Estados Unidos de América, el Golfo de México, Mar Caribe y el Atlántico Tropical presenta cambios significativos en la escala estacional. Esos cambios se presentan desde principios de junio y gradualmente se establecen hasta mediados de septiembre en un año normal. El patrón medio de la circulación tropical troposférica superior de verano se disipa a finales de septiembre o principios de octubre, y vuelve rápidamente en el mes de noviembre al régimen invernal.

Los grandes cambios en esa circulación se presentan al sur de los 30° N, donde ella se acopla a los cambios del calentamiento en la superficie sobre los continentes y los océanos, en concordancia con las regiones de convección de la Circulación General.

Es de gran importancia para los pronosticadores operativos el conocimiento del comportamiento medio de esta circulación en los diferentes períodos estacionales, y así la valoración diaria de los cambios que experimenta la circulación tropical troposférica pudiera ser más efectiva, ya que al conocer la circulación media, el pronosticador puede determinar las anomalías de la circulación y en consecuencia precisar el estado del tiempo en la zona de pronóstico.

La Vaguada Tropical Troposférica Superior (referida internacionalmente por sus siglas en inglés como TUTT), y asociada a la circulación troposférica superior, desempeña un importante rol en el estado del tiempo en la zona tropical, no sólo en los mecanismos generadores de lluvia sino también en los procesos de génesis y evolución de los ciclones tropicales. Esta vaguada se localiza en el nivel de los 200 hPa (aproximadamente 10 km de altura) y su eje se extiende desde México hacia el noreste sobre el Atlántico central.

Para valorar la importancia de esta vaguada se exponen sus principales características en relación con el comportamiento medio que ella presenta en los diferentes meses del año en el marco de la circulación troposférica superior sobre el sudeste de los Estados Unidos, el Golfo

de México, Mar Caribe y el Atlántico tropical. La misma cambia significativamente desde el invierno hacia la primavera y el verano. Si se considera un año climatológicamente normal, este cambio ocurre gradualmente y comienza a principios de junio. En julio el patrón de verano se establece completamente y se mantiene hasta mediados de septiembre. La circulación tropical troposférica superior se disipa a finales de septiembre o principios de octubre, vuelve rápidamente a la circulación de invierno a principios de noviembre si se asumen, como ya se expresó, condiciones normales en el comportamiento de los sistemas meteorológicos. Sin entrar en detalles de las condiciones dinámicas relacionadas con el calentamiento de los diferentes tipos y escalas que intervienen en los cambios de la circulación atmosférica, aquí se tratará brevemente la evolución de la circulación tropical troposférica superior, para lo cual se considerará el nivel de 200 hPa, representativo de la troposfera superior, en el dominio limitado por las latitudes 5 y 40° N y las longitudes 10-110° O.

### Evolución de la circulación de verano en el nivel de 200 hPa

Las características y posiciones medias aquí descritas están tomadas de Sadler (1975). Este autor realizó un estudio climatológico del nivel troposférico superior (200 hPa) en el área tropical a escala global, en el que consideró, además de los registros del aire superior sobre esa región, observaciones de aviones y de imágenes de satélites, los que combinó con la información convencional de los sondeos atmosféricos, con ello obtuvo resultados muy positivos, principalmente para los meteorólogos pronosticadores.

En el nivel troposférico de 200 hPa, la evolución o transición de la circulación desde el invierno-primavera hacia la circulación de verano comienza desde finales de mayo y principios de junio. La primera señal es la retirada hacia el norte de los oestes de latitudes medias y un desplazamiento hacia el norte de la dorsal subtropical sobre la región central del Golfo de México. En junio este anticiclón se localiza en las inmediaciones de 17° N y 105° O, dominando los oestes desde el Golfo de México central hacia el norte. Y sólo se observa una débil dorsal, con su eje extendido a lo largo de las latitudes entre 8 y 10° N, sobre el Caribe ecuatorial y el Atlántico. Mientras que una amplia vaguada se localiza sobre el Atlántico central (Fig. 3).

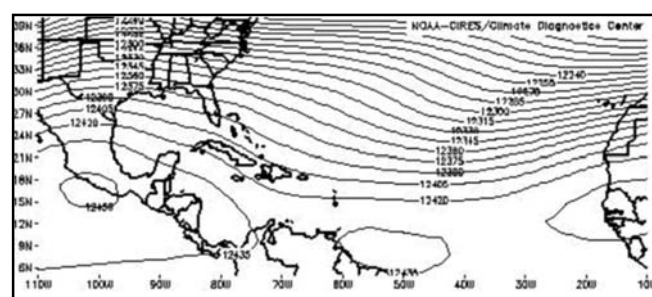


Fig. 3. Distribución media de las vaguadas y dorsales en el nivel de 200 hPa (junio).

Las circulaciones descritas se desplazan hacia el norte en julio y se presentan mejor definidas. En los meses de junio y julio, el anticiclón mexicano se mueve hacia 30° N y 105° O, con su dorsal extendida hacia el este y el eje a lo largo de los 30° N. Esta dorsal es común observarla sobre el sudeste de los Estados Unidos. Mientras que la débil dorsal que se encontraba en junio entre 8 - 10° N, se mueve en julio hacia el norte y entonces se sitúa entre 12 y 18° N a través del Atlántico tropical (Fig. 4).

La zona que separa a la dorsal subtropical de la dorsal subecuatorial presenta cizalladura ciclónica (cambio en la dirección del viento) con bajas presiones, a la que está asociada la vaguada que se extiende desde México (20-25° N) hacia el noreste adentrándose en el centro del Atlántico norte. Embebidas en esta vaguada se pre-

sentan circulaciones ciclónicas y a esta vaguada es a lo que se denomina TUTT, la que se muestra en la figura 4.

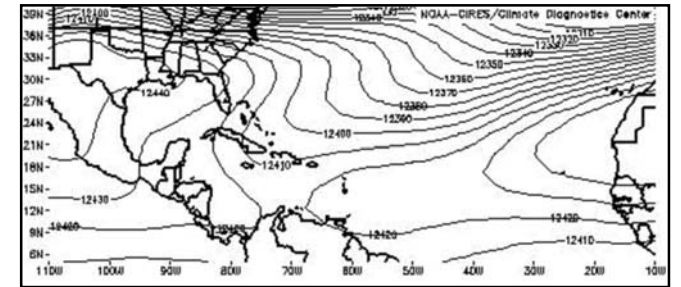


Fig. 4. Distribución media de las vaguadas y dorsales en el nivel de 200 hPa (julio).

La circulación de julio es representativa de la circulación media de verano y se mantiene (prácticamente sin cambios) hasta agosto. En septiembre se debilita considerablemente y en octubre (Fig. 5) sólo se reconoce como una amplia vaguada en el centro del Atlántico. Las características de la circulación de octubre son muy similares a las de mayo y principios de junio. La circulación tropical de verano en la troposfera superior evoluciona nuevamente hacia los patrones de invierno y no se impondrá otra vez hasta el mes de junio.

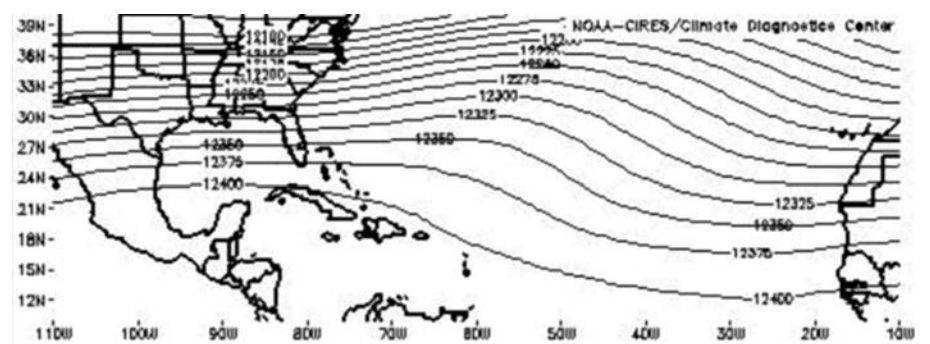


Fig. 5. Distribución media de las vaguadas y dorsales en el nivel de 200 hPa (octubre).

En la Fig. 6 se muestra la posición media de la vaguada tropical troposférica superior en julio y agosto. En ella se observa que en ambos meses esa posición se haya en las inmediaciones al sur y sobre las provincias orientales de Cuba.

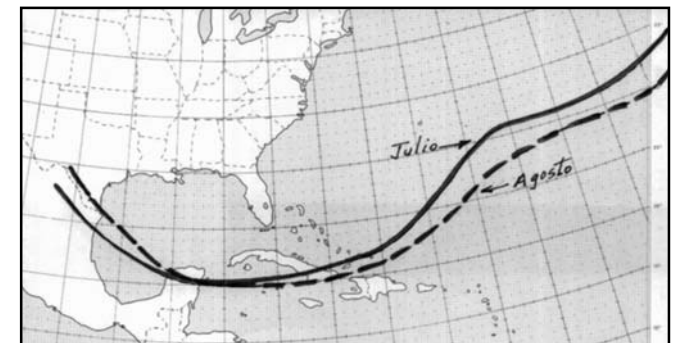


Fig. 6. Posición media de la TUTT en los meses de verano.

Después de la discusión expuesta sobre el comportamiento medio del flujo en el nivel de 200 hPa, se concluye señalando que los pronosticadores meteorológicos del área del Caribe deben comprender, además de los sistemas de latitudes medias, el estado medio de la circulación en los trópicos, por la importancia e incidencia que ella tiene en la detección del tiempo anómalo y en consecuencia con la confección de los pronósticos, los que serán más lógicos y correctos.

A finales de mayo y principios de junio, la circulación troposférica superior sobre esas regiones evoluciona rápidamente en una circulación tropical, situación que puede ser reconocida con rapidez si se valora correctamente el estado anómalo de la configuración en relación con la posición de las vaguadas y dorsales en la altura de 10 - 12 km de la columna atmosférica.

### Oscilaciones de baja y alta frecuencia

Por la incidencia que presentan las diferentes oscilaciones en la escala temporal sobre las anomalías de la circulación atmosférica en los patrones de la lluvia tropical, aquí se tratará la caracterización de las oscilaciones de baja y alta frecuencia en los trópicos y subtrópicos.

En la escala temporal el patrón Pacífico-Atlántico norte (referido en la literatura internacional por sus siglas en inglés PNA) refleja una variabilidad sustancial interestacional, interanual y entre décadas. Este patrón es el más prominente en la variabilidad de baja frecuencia en la zona extratropical del hemisferio norte y se observa en todos los meses, excepto en junio y julio.

La Oscilación del Atlántico norte (referida por sus siglas en inglés NAO) domina la variabilidad climática invernal en la región del Atlántico norte, desde la parte central de Norteamérica hasta Europa. Presenta dos fases, una positiva y otra negativa, aunque la tendencia de sus correspondientes índices muestra que una de sus fases puede permanecer por algunos años. Entre otras características el índice positivo de esta oscilación refleja en la parte oriental de los Estados Unidos y el Golfo de México inviernos húmedos, mientras que la fase de índice negativo muestra condiciones del tiempo con más penetraciones de aire frío en esa misma área.

La lluvia tropical muestra una fuerte variabilidad a escala temporal más pequeña que la estacional. Estas fluctuaciones en la lluvia tropical con frecuencia se presentan en ciclos de 30 a 60 días, y son referidas como oscilaciones interestacionales. Estas se presentan como una componente natural del sistema océano-atmósfera, las que afectan de forma significativa a la circulación atmosférica en los trópicos y subtropicos a escala global, así como también a las corrientes en chorro en la temporada invernal.

Las oscilaciones interestacionales son la variabilidad en el tiempo y clima con rangos muy variables en la escala temporal y espacial, desde fenómenos del tiempo a pequeña escala como rachas de viento, tormentas eléctricas y tornados, hasta gran escala, donde la influencia de estas oscilaciones caracterizan a sistemas de bajas y altas presiones que, si se prolongan en la escala temporal, se manifiestan situaciones como las sequías e inundaciones. Pero existe también un fenómeno climático de más larga vida: los eventos conocidos como «El Niño» y «La Niña», con tendencias de décadas y a más largo plazo.

De forma general, los fenómenos en la escala temporal de tendencias superiores están asociados con cambios en la circulación atmosférica que afectan no sólo a una región en particular. En ocasiones las características de este tipo de circulación se presentan de forma simultánea a escala hemisférica o global, y resultan un tiempo anómalo en los patrones de temperatura y lluvia en muchas regiones del planeta. Los resultados alcanzados por los científicos de diferentes países sobre esta anomalía convergen en que aspectos importantes de esta variabilidad están enlazados a fenómenos de escala global que afectan la distribución e intensidad de la lluvia tropical, como por ejemplo la posición e intensidad de las regiones de altas subtropicales y las corrientes en chorro en latitudes medias.

La variabilidad anual en la lluvia tropical se relaciona con frecuencia con la presencia de «El Niño» o «La Niña» en el Pacífico tropical. Así como también se manifiesta una fuerte variabilidad por década en la lluvia tropical, la que pudiera ser una causante importante de tendencias interdecadales en la circulación atmosférica y los patrones del tiempo que tiene asociados.

La lluvia tropical también presenta fuerte variabilidad en la escala temporal interestacional. Estas fluctuaciones en la precipitación con frecuencia se manifiestan en un ciclo de 30 a 60 días y entonces se refieren como *oscilaciones interestacionales*. Estas oscilaciones también son conocidas como Oscilación Madden-Julian (MJO), Oscilación de 30 - 60 días y Onda de 30 - 60 días, aunque en la literatura internacional se les refiere usualmente por las siglas en inglés MJO.

La MJO se presenta como una componente natural del sistema océano-atmósfera. Afecta significativamente a la circulación atmosférica a través de los trópicos y subtropicos, además de incidir fuertemente en la temporada invernal sobre las corrientes en chorro y las características de la circulación atmosférica en el Pacífico norte y el occidente de América del Norte, tanto en el campo de la temperatura como en el tiempo asociado a las tormentas extratropicales. En el verano su efecto modulador in-

cide en la actividad ciclónica tropical en las regiones del Atlántico y Pacífico. En lo antes expuesto radica la importancia de su observación y predicción, por las implicaciones que ella tiene en el pronóstico del tiempo y en la variabilidad climática durante el año.

También la MJO se caracteriza por un desplazamiento gradual hacia el este sobre amplias regiones, y modula la lluvia tropical (incrementándola o disminuyéndola). Las anomalías de la lluvia se manifiestan primeramente en el Océano Índico occidental, propagándose sobre las aguas oceánicas muy cálidas del Pacífico tropical central. Este patrón de la lluvia tropical se enmascara, y no es identificable, cuando se desplaza sobre las aguas frías del Pacífico oriental, pero reaparece en el Atlántico tropical y el Océano Índico. Cada ciclo tiene una extensión aproximada de 30 a 60 días. El patrón de la lluvia tropical que acompaña a la MJO presenta diferentes características en las anomalías de la circulación troposférica (niveles bajos y altos). Esas características de la circulación no están restringidas solamente al hemisferio occidental, sino que se observan a escala global.

La actividad de la MJO presenta una gran variabilidad, con períodos largos de fuerte actividad seguidos por períodos en los que ella es débil o está ausente. Esa variabilidad de la oscilación es parte del enlace al ciclo del evento «El Niño» (ENOS= El Niño-Oscilación del Sur). Se observa con frecuencia actividad fuerte de la MJO en los años de eventos «La Niña» (débil) y en condiciones neutrales del ENOS, mientras que la MJO es débil o está ausente en presencia de episodios fuertes del ENOS.

En los meses de verano la variabilidad de baja frecuencia en los trópicos es dominada por las variaciones interanuales asociadas con el evento ENOS y por las variaciones interestacionales de la MJO. Estos fenómenos caracterizan, prácticamente, los patrones globales de las anomalías de la circulación atmosférica que están estrechamente relacionadas con las variaciones de la lluvia en muchas regiones de los trópicos y subtropicos.

### Hondonada

Se define como una perturbación en el flujo del este, con un mínimo de presión atmosférica a lo largo de su eje, y éste delimita las componentes del viento del nordeste delante y del sudeste detrás. Puede estar acompañada de lluvias y chubascos. Está representada en la troposfera baja y en algunas ocasiones se extiende hasta los 5 km en la altura.

### Ondas del este

Es una deformación en el campo de las isobaras (líneas de igual presión atmosférica) como consecuencia de las perturbaciones que se manifiestan en los vientos del este. Estas ondas se desplazan de este a oeste, con vientos del nordeste delante de la onda y del sudeste detrás, con velocidades superiores. La onda del este tiene su máxima amplitud en la troposfera baja y media. También tiene asociados nublados y chubascos, principalmente en la parte posterior a su eje (al este).

El campo de las presiones se manifiesta con una caída en los valores de esta variable delante y en el eje de la onda, que oscila entre 0.5 y 3.0 hPa, antecediendo este comportamiento al paso de la onda, mientras la presión atmosférica aumenta detrás del eje de la onda. Su orientación es nordeste-suroeste, y abarca una zona que oscila entre 90 y 190 km de ancho, en la que se observa un cambio gradual del tiempo.

Las regiones de divergencia en los bajos niveles se corresponden con las áreas de caída de la presión, mientras que las regiones donde predominan la convergencia en estos niveles se asocia a las áreas de subida de la presión; quedan así muy bien definidos los patrones de divergencia asociados a esta situación meteorológica.

Se observa aquí que la onda del este clásica se considera como una sub-categoría de la onda tropical, la que se define como un flujo perturbado en los vientos alisios, con máxima curvatura ciclónica. Puede estar representada en la troposfera media, o puede ser el reflejo de una baja fría en la troposfera superior. También ella puede

ser una extensión hacia el ecuador de una vaguada de latitudes medias. La onda tropical presenta deformaciones significativas en los campos de presión, viento, nubosidad y precipitación, como se muestra en la Fig. 7. Estas ondas inclinan su eje con la altura hacia el este.

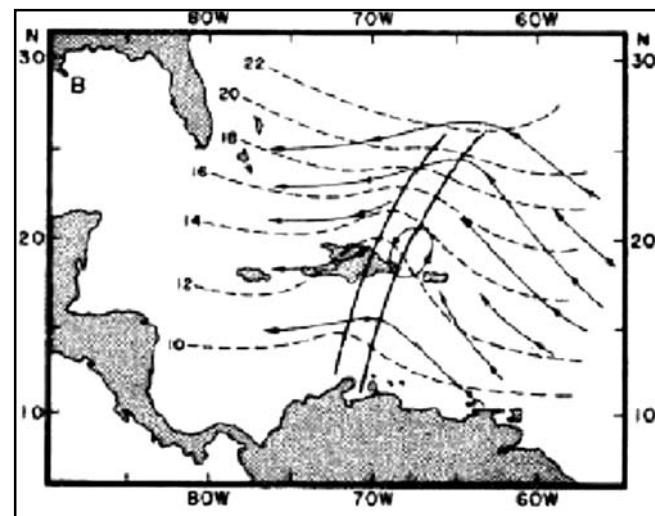


Fig. 7. Onda tropical desplazándose al oeste sobre el Mar Caribe central.

En el seno de estas ondas se desarrollan ciclones tropicales. El 60 % de los ciclones tropicales que se desarrollan en el Atlántico norte tienen su génesis en las ondas tropicales que se desplazan hacia el oeste por el Atlántico central tropical provenientes de las costas de África.

### Líneas de tormentas

También denominadas *líneas de inestabilidad*, las líneas de tormentas prefrontales son de gran importancia para Cuba en el período poco lluvioso, ya que pueden presentar en su interior fenómenos severos. Esta situación meteorológica precede a los frentes fríos que afectan al archipiélago cubano en el citado período. Su orientación meridional muestra la actividad convectiva asociada en la que se producen tornados.

Los estudios realizados por Alfonso (1994) arrojan que las Líneas de Tormentas Prefrontales (LTP) que afectan a Cuba no muestran grandes diferencias a las que se desplazan por el centro de los Estados Unidos, y señaló las características siguientes en las LTP que afectan a Cuba:

1. Preceden a los frentes fríos débiles y mal definidos.
2. Se presentan de 12 a 18 horas antes de que afecten los frentes fríos a los que están asociadas.
3. Presentan fuerte convergencia en los niveles bajos de la troposfera.
4. Los tornados estuvieron presentes en las bajas extratropicales relacionadas con sistemas frontales en el Golfo de México.
5. Se forman predominantemente en el área de mayor humedad.
6. La atmósfera se presenta condicionalmente inestable.
7. Generalmente se forman al oeste de la dorsal en el nivel de 500 hPa.

En estudios recientes (González, 1999) se encontró que la frecuencia de las condiciones de la circulación atmosférica, asociadas a la presencia de líneas prefrontales, se incrementa significativamente cuando se manifiesta el evento ENOS en el Pacífico ecuatorial, expandiéndose sobre Cuba (en el período poco lluvioso) los oestes de las latitudes extratropicales, con un predominio e incremento del transporte atmosférico superficial en la dirección meridional. La situación descrita se corresponde con la formación y desarrollo de bajas extratropicales en el Golfo de México, y en consecuencia con un incremento en el número de frentes fríos que afecta al archipiélago cubano, así como de las lluvias asociadas a los sistemas invernales y el rápido desarrollo de líneas prefrontales con eventos severos (lluvias intensas y tornados) en el extremo sudeste del citado golfo. Por ello, en presencia de un evento ENOS la temporada invernal en Cuba se presenta más lluviosa que lo normal, e influye en la mayor de las islas del Caribe, provocando inviernos húmedos y cálidos, que en ocasiones alternan con períodos más fríos.

### Bajas frías

Son centros de baja presión en altura que se caracterizan por tener aire más frío en el centro que en sus alrededores. A medida que disminuye la altura la circulación de baja comienza a debilitarse. Su intensidad es máxima en los niveles superiores de la atmósfera (200 ó 300 hPa; 8-10 km de altura).

Las bajas frías pueden ser húmedas y secas, las primeras alcanzan la troposfera baja. En estudios realizados por Alfonso (1994), este autor corroboró la relación entre las Tormentas Locales Severas en Cuba y las bajas frías superiores. También señaló que la severidad en el período lluvioso está relacionada con las bajas frías, principalmente en el trimestre julio-septiembre.

### Ciclones extratropicales

Los ciclones extratropicales (CE) son sistemas meteorológicos de escala sinóptica que tienen un centro donde se observan los valores mínimos de la presión atmosférica. Están constituidos por un núcleo frío y tienen asociados diferentes tipos de frentes atmosféricos: fríos, calientes y ocluidos. Por ello, su masa de aire no es homogénea y en su área de influencia se observan vientos intensos con circulación ciclónica (en el hemisferio norte giran en el sentido contrario a las manecillas del reloj).

Los ciclones extratropicales ocupan gran extensión en la escala horizontal, en ocasiones de cientos y hasta miles de kilómetros, mientras que en la vertical se observan en zonas troposféricas de intensa baroclinicidad (cambios de presión y temperatura). Este tipo de sistema meteorológico también es conocido como *baja extratropical* y puede desarrollarse en latitudes bajas (como es el área del Golfo de México) y afectar al archipiélago cubano. Los centros de bajas presiones extratropicales desarrollados en el Golfo de México también reciben el nombre de *Golfianas* y se desplazan hacia el este y nordeste sobre los estados del sur de los Estados Unidos y el Atlántico.

### Sistemas lineales: los frentes fríos y las líneas de tormentas

Los frentes fríos son sistemas meteorológicos clasificados como lineales, penetran hasta bajas latitudes sobre las áreas tropicales y mares adyacentes. Se manifiestan principalmente en el campo de viento y en la discontinuidad en los campos de la temperatura y el punto de rocío.

En el período poco lluvioso la precipitación en Cuba está asociada mayoritariamente a los sistemas frontales, y aquellas que llegan a ser intensas en los trópicos se deben a la combinación de los sistemas frontales, a menudo los que se vuelven casi estacionarios, con la orografía del terreno, que incentiva la convergencia en los niveles bajos de la troposfera.

### Frentes fríos en los trópicos

En el invierno del hemisferio norte los anticiclones continentales son muy fuertes y con frecuencia penetran en los trópicos. La corriente de aire polar fría detrás del frente frío se mezcla con el flujo de los alisios, pero mientras ocurre el proceso de mezclamiento, las características intrínsecas del aire polar se van transformando, con predominio por un tiempo de un incremento en la velocidad del viento en la línea de cizalladura (cambio en el viento) sobre el área tropical, asociada a la zona frontal, la que puede estar acompañada de chubascos y tormentas eléctricas.

Los frentes fríos que afectan a Cuba en el período poco lluvioso del año y que se clasifican por su tipo como clásicos, generalmente están asociados a centros de bajas presiones extratropicales que se hallan o desarrollan en el Golfo de México o los estados del sur del continente norteamericano. Este tipo de frente frío está precedido por vientos de región sur, con intensidades entre 36 y 55 km/h, que en rachas han alcanzado hasta 122 km/h. El régimen de vientos *sures* tiene asociado calor y humedad, y al influir sobre Cuba el valor de esas variables meteorológicas presenta un ascenso significativo antes de afectar el frente frío al territorio nacional cubano.

González (1984) determinó que entre las principales características de los frentes fríos que produjeron en Cuba

acumulados de lluvia superiores a los 100 mm en 24 horas se encuentran los siguientes: lento desplazamiento de los sistemas frontales sobre el territorio cubano, se corresponden con el tipo clásico en 85 % de los casos, influencia del ancho de la banda nubosa y la composición nubosa de la misma, así como la pendiente de la superficie frontal. Pueden estar precedidos por líneas de tormentas, principalmente los clasificados como clásicos.

### Corriente en chorro subtropical. Sus características

Las corrientes en chorro son corrientes de aire de altas velocidades en los niveles superiores de la atmósfera (300-200 hPa). Generalmente su extensión es de miles de kilómetros de largo, cientos de kilómetros de ancho y se caracteriza por presentar un espesor de sólo algunos kilómetros. Se localiza aproximadamente entre los 10 y 15 km en la vertical.

La corriente en chorro subtropical separa las masas de aire tropical y de latitudes medias. Es más continuo y fluctúa menos en posición geográfica que el frente polar. También su extensión en la altura es más profunda que el frente polar. El chorro subtropical presenta entre sus características formas de meandros alrededor del hemisferio. Son regiones de intensa cizalladura horizontal y vertical del viento.

Las condiciones medias que presenta ese sistema de vientos en la altura se define como una zona casi permanente, de intensa baroclinicidad en la troposfera media y superior a lo largo de los 30° N en invierno y 45° N en verano (ver Fig. 8). La variación latitudinal del chorro subtropical es de 15 grados alrededor del hemisferio norte, menor que la del chorro polar que es de 17 grados. El número de ondas asociadas al chorro subtropical es de tres, las vaguadas se encuentran en las longitudes de África occidental, India y Pacífico central. Mientras que las dorsales se localizan sobre Europa oriental, Pacífico occidental y la parte oriental de América.

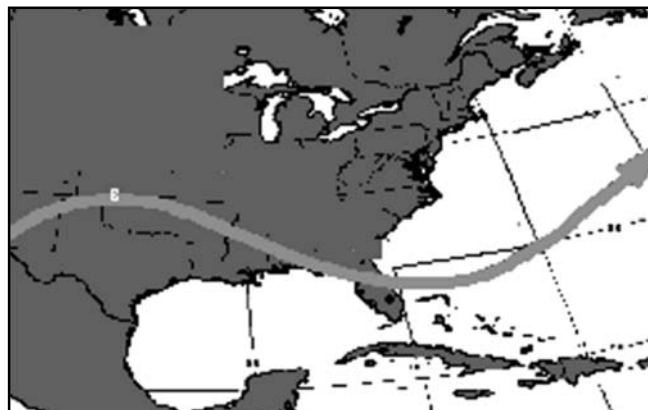


Fig. 8. Posición media de la corriente en chorro subtropical en invierno.

La separación latitudinal entre los dos chorros es mínima sobre el Pacífico, con un número secundario en el este de América del Norte y la máxima en la porción media del Atlántico.

En el verano, ambos chorros (polar y subtropical) están más cerca del polo respecto de sus posiciones invernales. En determinadas condiciones atmosféricas los frentes polar y subtropical se aproximan y pueden llegar a unirse, provocando complicadas estructuras. Esas aproximaciones se reflejan como situaciones sinópticas de importancia fundamental para los mecanismos que gobiernan la circulación general, lo que implica aumento de la energía potencial de forma significativa, convirtiéndose en energía cinética, la que se manifiesta en ocasiones de forma explosiva en la superficie de la tierra y por medio de procesos atmosféricos inestables y severos.

En la práctica diaria el meteorólogo sinóptico puede situar el eje de la corriente en chorro en los niveles altos de la atmósfera, mediante el análisis de las isotacas (isolíneas de igual velocidad del viento) en aquella zona donde el gradiente isohípico (líneas de presión en altura) sea mayor. Ese análisis refleja núcleos en forma alargada del campo de isotacas, con lo que denota la presencia de la corriente en chorro.

### Sistemas convectivos

La radiación solar es la principal fuente de energía para la atmósfera, los océanos y para la vida en la tierra, lo que deviene en que las diferencias de la radiación, en las escalas espacial y temporal, determinan el tiempo y el clima en las diferentes regiones del globo.

En latitudes tropicales la incidencia de esa radiación en el comportamiento de los procesos convectivos es fundamental, caracteriza así el ciclo diario y estacional en bajas latitudes. La morfología de las islas influye en la variabilidad diurna de esos procesos convectivos, pues establece una delimitación entre las costas y el centro de esos territorios, en los que se presenta una especie de confluencia de las brisas o el flujo de aire desde las costas, en el centro de masa terrestre se aprecia la mayor actividad nubosa y de tormentas eléctricas.

El aire cálido y húmedo de las regiones tropicales, conjuntamente con la inestabilidad atmosférica presente, tributan al incremento de los sistemas convectivos en presencia de frentes fríos que penetran hasta esas latitudes, ondas tropicales desplazándose sobre los mares tropicales y los ciclones tropicales, en cualquiera de sus etapas. La formación de nubes convectivas (Fig.9) en forma de celdas aisladas o conglomerados nubosos, son inherentes a las latitudes tropicales, donde los sistemas de presión son débiles y desorganizados, a excepción de los ciclones tropicales.

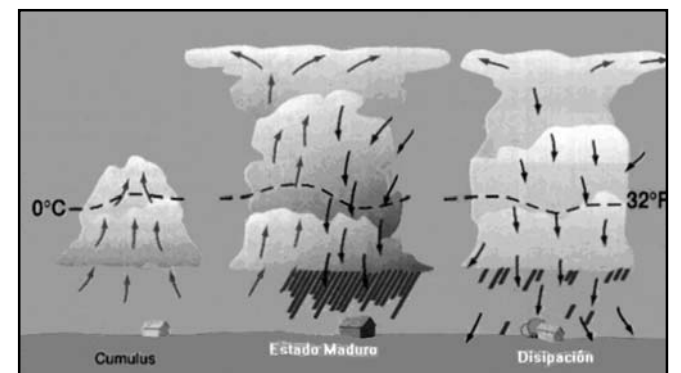


Fig. 9. Diferentes estados de desarrollo de una nube convectiva (Cb).

El advenimiento de los satélites meteorológicos permitió realizar estudios de los sistemas nubosos y las lluvias asociadas, así como las tormentas eléctricas, con un considerable grado de organización de esos eventos y esa lluvia que en los trópicos ocurre predominantemente en extensos disturbios que pueden persistir por días, con movimiento lento e irregular, aunque usualmente lo hacen hacia el oeste. En las vastas áreas de los océanos tropicales es común la repetición de días lluviosos.

En las imágenes de los satélites meteorológicos se observan con frecuencia áreas grandes y sin nubes, entre las densas masas nubosas asociadas a las zonas de tiempo perturbado. Las mismas, también llamadas *disturbios*, se deben a la convergencia del aire en los niveles bajos de la troposfera en las corrientes húmedas profundas. En estos disturbios no se evidencia una circulación ciclónica y pueden presentar variedad de formas desde masas de tormentas eléctricas, sobre áreas de aproximadamente algunos cientos de kilómetros de diámetro, hasta áreas más extensas de nubes bajas y lluvia ligera. Ellas pueden estar presentes en la vecindad de la Zona Intertropical de Convergencia sobre los océanos y sobre los continentes en las estaciones húmedas.

Los sistemas convectivos también se asocian a los remanentes de los frentes fríos en bajas latitudes y a la vaguada troposférica superior (TUTT).

### Interacción de los sistemas del tiempo de la zona tropical con las latitudes medias

La interacción entre los sistemas meteorológicos tropicales y de latitudes medias es un proceso importante que reclama la atención de investigadores y pronosticadores de ambas regiones. El análisis de diferentes estudios realizados sobre este tópico arroja que muchos desastres ocasionados por eventos severos del tiempo, en la génesis



y/o desarrollo de ellos, estuvo asociado con sistemas que provienen de la interacción entre los procesos tropicales y de latitudes medias. Este proceso interactivo es considerado como un gran mecanismo que cambia súbitamente el estado del tiempo. Algunos pronósticos desacertados están relacionados a esos procesos interactivos, los que conducen a rápidos desarrollos de sistemas de mal tiempo.

La interacción entre los sistemas de la zona extratropical y la tropical es esencial para mantener el necesario balance de calor y de *momentum* en la atmósfera, así como es una necesidad del mantenimiento de la Circulación General de la Atmósfera. Algunos autores clasifican esta temática en cinco categorías, como son:

- La penetración de los frentes fríos en las regiones tropicales.
- Transformación de los ciclones tropicales en extratropicales, con especial énfasis en la lluvia.
- Impacto de la meteorología de latitudes medias en el desarrollo de los ciclones tropicales.
- Intercambio de la Vorticidad Potencial (tendencia a la rotación del aire) entre las latitudes tropical y extratropical.
- Especial énfasis en el rol que desempeña la TUTT en el mecanismo generador de la lluvia.

Pero aquí esa interacción será tratada en dos tópicos principales:

- 1 La penetración de aire frío en las regiones tropicales.
- 2 La transformación de un ciclón tropical a extratropical, con especial énfasis en la lluvia.

### Penetración de aire frío en las regiones tropicales

Los resultados alcanzados por Chen (1997) sobre tormentas y tifones en el área del Pacífico muestran que una fuerte intrusión de aire frío puede destruirlas, mientras que la tormenta tropical rápidamente se desarrollará en su medio con una masa de aire propia y fría. Otros estudios muestran que la intrusión de aire frío en África proveniente del Mediterráneo causa la intensificación de la corriente en chorro subtropical, detona así una vaguada y estimula los procesos de lluvia.

Situación similar se presenta en el área del Golfo de México con la intrusión de aire frío procedente del continente norteamericano e intensifica la corriente en chorro subtropical, y como resultado de esa interacción estimulante se presentan los procesos generadores de lluvia, que se desarrollan de forma explosiva en la mitad oriental del citado Golfo y en su desplazamiento hacia el este afectan a la región occidental de Cuba, principalmente.

Estudios realizados afirman que las lluvias intensas sobre regiones tropicales en invierno son provocadas por la penetración de los frentes fríos en esas áreas y González (1984) determinó las características de los frentes fríos que afectan a Cuba (en el período poco lluvioso) y producen acumulados de lluvia igual o mayor a 100 mm en 24 horas. En los registros obtenidos de esas intensidades han predominado los mecanismos de interacción trópico-latitudes medias. Un ejemplo de ella en Cuba se muestra en la Fig. 10, con la penetración de aire frío en el Golfo de México y el Mar Caribe occidental, a través de una onda

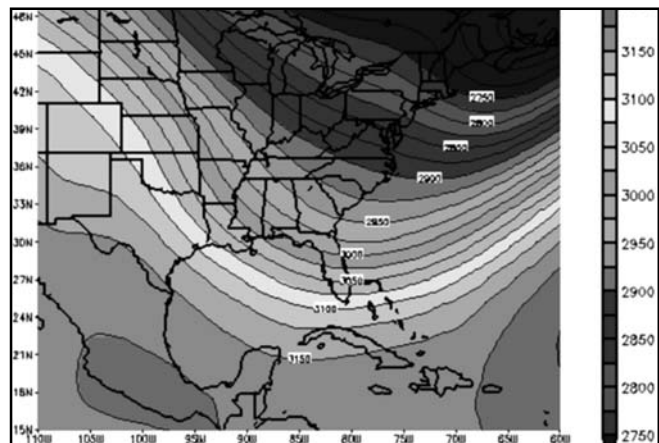


Fig. 10. Penetración de aire frío en los trópicos.

larga (nivel de 700 hPa: 3 km de altura) que se desplaza hacia el este sobre la costa oriental de los Estados Unidos y el Atlántico adyacente.

La imposición sobre el Golfo de México de un flujo de región noroeste transportó una notable advección de aire frío al penetrar la vaguada polar en la zona tropical. La misma estuvo asociada al frente frío no. 14 que afectó al archipiélago cubano en la temporada invernal 2005-2006. Estuvo precedido por una hondonada que tenía asociada lluvia, chubascos y tormentas eléctricas, la que afectó a las provincias occidentales el día 12 de febrero con actividad prefrontal desde la madrugada. Produjo lluvias con acumulados entre 20 y 58 mm, y un máximo de 70 mm en la provincia de La Habana. Las altas presiones continentales que le seguían, con una masa de aire fría y seca de origen polar, produjo en Cuba temperaturas mínimas notables con valores significativos que oscilaron entre 6 y 11° C.

### Transformación de un ciclón tropical en extratropical, con especial énfasis en la lluvia

Las lluvias intensas que se presentan en las latitudes medias y altas en el verano o al comienzo del otoño (hemisferio norte) son con frecuencia originadas por los ciclones tropicales, cuando ellos se desplazan hacia esas latitudes desde los trópicos, debido a la transformación que resulta del proceso de interacción entre los ciclones tropicales y un frente frío. Los desastres ocasionados por lluvias intensas en los países de esas latitudes del Pacífico norte y la costa oriental de los Estados Unidos, se origina con frecuencia por la transformación de los ciclones tropicales en sistemas extratropicales.

La transformación de un ciclón tropical usualmente ocurre mediante la creación de una estructura fría en el semicírculo occidental y cálida en el semicírculo oriental, así como una capa superior fría y una baja cálida. Esa fuerte estructura inestable creará una conversión de la energía potencial en energía cinética con fuerte convección (Chen, 1997). Este proceso de transformación producirá intensas lluvias asociadas con la reintensificación de un ciclón bajo la acción de su transformación extratropical.

Se han realizado muchos estudios de la transición de un ciclón tropical a extratropical y los mismos sugieren que en la misma interviene una interacción compleja entre el ciclón, la convección y las corrientes del oeste, en los que se han identificado muy bien las características precursoras en relación con la intensificación y el debilitamiento. Se observa una convergencia de criterios relacionados con la intensificación de los ciclones tropicales que consideran los conglomerados nubosos como determinantes en la etapa de intensificación o como detonantes en la formación de ellos.

El intercambio de la Vorticidad Potencial (VP) relacionado con la TUTT, tanto en el hemisferio norte como en el sur, señala que la periodicidad de los ciclones tropicales juega un rol importante en el comienzo o intensificación de la TUTT. Se señala la importancia de esa vaguada superior para el pronóstico, que incluye su aplicación no sólo para el movimiento de los ciclones tropicales sino también en la organización y distribución de las bandas de nubosidad (Thorncroft, 1998).

Otro ejemplo de la interacción citada (trópico y latitudes medias) son los ciclones que se forman en las latitudes subtropicales, y presentan la característica de tener un núcleo frío. Se mueven lentamente y erráticos. Además de observarse en el océano Atlántico, también se encuentran en el Pacífico y tienen asociadas lluvias intensas. Estudios realizados sobre estos sistemas meteorológicos han arrojado que presentan una intensidad significativa en superficie. Se distinguen dos tipos en su formación:

- 1 Los que se desarrollan a partir de las bajas de desprendimiento (cut off low) localizadas en una fuerte vaguada de los oeste en la troposfera media, la cual penetra profundamente en latitudes tropicales, moviéndose hacia el este y permanece la baja en su extremo sur, donde son capturadas por los estees tropicales, se desarrollan y comportan entonces como un sistema tropical, pero de núcleo frío.

- 2 El otro tipo es aquel que se forma cuando existe una baja superior en latitudes bajas y se le aproxima una vaguada superior del oeste. El ciclón y la vaguada se unen temporalmente, se forma una circulación en superficie, reflejo de la baja superior, a la vez que la vaguada del oeste se mueve al este abandonando a la baja y queda un ciclón tropical en los niveles bajos. De tal forma, esta ciclogénesis ocurre enteramente en los estees de los niveles bajos de la atmósfera, sin involucrar a sistemas frontales.

La interacción de los trópicos y extratropicos desempeña un rol importante en la determinación de la estructura y las variaciones de los sistemas meteorológicos que se desarrollan en bajas latitudes.

La importancia de los nuevos aportes a una mejor comprensión del proceso de interacción entre los fenómenos meteorológicos de ambas latitudes ha sido muy bien acogida por los pronosticadores operativos, los que son aplicados en la prevención de desastres.

### Características de la lluvia en los trópicos

Los principales elementos relacionados con la lluvia que cambian estacionalmente en la zona tropical son: la humedad, la estabilidad atmosférica y el campo de viento a gran escala. A continuación se relacionan algunos de los patrones de la lluvia en la zona tropical durante los meses más representativos:

#### Enero

- 1 La Zona Intertropical de Convergencia se sitúa al norte del ecuador en los océanos Atlántico y Pacífico.
- 2 La máxima lluvia se localiza en Suramérica, aproximadamente en los 5° S.
- 3 Sobre África el máximo de lluvia se denota aproximadamente en los 15° S.

#### Abril

- 1 La máxima lluvia se registra en Suramérica y África, la que se desplaza hacia el ecuador.

#### Julio

- 1 La Zona Intertropical de Convergencia (ZIC) se mantiene al norte del ecuador.
- 2 Se denota un área de aproximadamente 0.5 m sobre América Central y la costa occidental de África.

#### Octubre

- 1 Grandes lluvias asociadas a la Zona Intertropical de Convergencia en el Atlántico oriental y el Pacífico occidental.
- 2 Disminución de las lluvias en el Pacífico oriental y en las islas occidentales del Atlántico (Arco de las Antillas Menores).

El proceso de la alta evaporación que hay en los trópicos está caracterizado por un máximo de evaporación que se produce en la región de los alisios, con movimiento subsidente (estable, hacia abajo), un alto porcentaje de la radiación es absorbida por el océano, los vientos fuertes facilitan la evaporación, la cubierta nubosa reduce la evaporación en la vaguada ecuatorial (ZIC), por eso la máxima evaporación coincide con el mínimo de precipitación.

Hay también algunos aspectos interesantes de la variabilidad de la lluvia en la zona tropical:

- 1 La precipitación tropical es mayoritariamente de origen convectivo.
- 2 Una gran parte de la lluvia tropical se presenta como una consecuencia de la convección organizada.
- 3 La lluvia se incrementa durante la noche sobre los océanos con un máximo al mediodía y disminuye durante el día.
- 4 Al incremento de la lluvia sobre las islas contribuye el medio oceánico circundante, por un factor de 2 - 3, o más, por los efectos del calentamiento y la topografía o relieve.

5. Los acumulados más significativos de la lluvia se registran en las áreas montañosas y ocurren generalmente en alturas entre 1 000 y 1 400 m.

Las lluvias de la zona tropical presentan, además, algunas características que son importante destacar. Por ejemplo, la frecuencia más alta de días con tormentas eléctricas en tierra es superior a los 300 días En Cuba se ha observado un valor máximo medio de 136 días (Veguitas, provincia Granma, región oriental; seguido por 129 días en Pinares de Mayarí, provincia Holguín, región oriental); mientras que en el occidente cubano se observó un máximo de 127 días en Tapaste, provincia La Habana), Álvarez *et al.* (2005).

CICLONES TROPICALES

Definición

*Ciclón tropical* es un término genérico que se emplea para designar a los sistemas de bajas presiones no frontales que se forman sobre las aguas tropicales o subtropicales, en una escala sinóptica con núcleo caliente y una convección profunda organizada, junto a una circulación ciclónica del viento definida en la superficie (WMO, 2006). La energía de estos sistemas de bajas presiones se deriva de la evaporación desde el mar, por la influencia de fuertes vientos y la baja presión superficial, y de la condensación del vapor de agua en las nubes convectivas concentradas cerca del centro.

Los términos utilizados para los ciclones tropicales que tienen vientos en superficie superiores a los 117 km/h varían según la región. En la cuenca atlántica y en el Pacífico nororiental se denominan *huracanes*, en el noroeste del Pacífico se conocen como *tifones*, en el suroeste del Pacífico y el sudeste del Océano Índico como *ciclones tropicales severos*, en el Océano Índico norte como *tormentas ciclónicas severas*, en el suroeste del Índico y el Pacífico sur como *ciclones tropicales* y en el Atlántico sur se les llama, no de forma oficial, *ciclones*. Hay otros nombres regionales para los ciclones tropicales, por ejemplo, en Filipinas se les llaman *baguío* y *taino* en Haití.

Clasificación de los ciclones tropicales

Hay una variación considerable en la terminología para los distintos estadios de desarrollo de los ciclones tropicales. Cada uno de los cinco grupos regionales del Programa de Ciclones Tropicales de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) tiene su propia terminología. El *Vocabulario Meteorológico Internacional* de la OMM utiliza incluso otra, la Comisión para la Meteorología Marina de la OMM, la escala Beaufort y el Centro Conjunto de Alerta de Tifones (JTWC por sus siglas en inglés) tienen cada uno la suya. También existen diferencias significativas entre las naciones de la cuenca del Índico del norte.

Las diferencias entre el tiempo de los promedios de los vientos (1, 3 y 10 minutos) es una gran complejidad, ya que un sistema tropical adquiere un nombre o un número en un país pero no en otro con el mismo criterio de viento, pero con distintos tiempos para el promedio. Las estadísticas mundiales son también difíciles e inexactas por la misma razón.

La definición de viento máximo recomendada por la OMM y utilizada por la mayoría de los servicios meteorológicos y la aviación es considerar la velocidad media de los vientos promediadas en 10 min. La definición acordada por el Comité de Huracanes de la Asociación Regional IV (AR IV) de la OMM para los ciclones tropicales del Atlántico norte y el Pacífico nororiental se basa en la medición de la rapidez media en 1 min a 10 m de altura sobre la superficie y esta definición es la que se utiliza en Cuba.

De esta forma, en el Plan Operacional de Ciclones Tropicales de la AR IV de la OMM, donde se encuentra Cuba y que abarca el área del océano Atlántico norte, el Mar Caribe, el Golfo de México y el nordeste del Pacífico, los ciclones tropicales se clasifican según la velocidad de los vientos máximos sostenidos promediados en 1 min, en:

*Depresión Tropical:* Sistema organizado de nubes y tormentas eléctricas con circulación superficial definida y vientos máximos sostenidos inferiores a 63 km/h.

*Tormenta Tropical:* Vientos máximos sostenidos entre 63-117 km/h. Cuando un sistema tropical alcanza esta intensidad se le asigna un nombre según las listas aprobadas por todas las naciones del área en el Plan Operacional de Huracanes, por eso el término de *tormentas con nombre*.

*Huracán:* Vientos máximos sostenidos superiores a los 117 km/h.

Categorías de los huracanes

Los huracanes se clasifican de acuerdo a los vientos máximos sostenidos mediante la escala de Saffir-Simpson (ver Tabla 1), utilizada en todos los países miembros del Comité de Huracanes de la AR IV de la OMM. Esta escala varía de uno a cinco categorías y se basa en la intensidad de los huracanes, lo que da un estimado del potencial de daños que puede ocasionar el huracán. El poder destructivo de los huracanes aumenta rápidamente, ya que depende del cuadrado de los vientos máximos sostenidos.

Tabla 1. Clasificación de los huracanes según la escala de Saffir-Simpson

Categoría	Presión central (hPa)	Viento máximo sostenido (km/h)	Daños
1	≥980	118 – 153	Mínimos
2	979 – 965	154 – 177	Moderados
3	964 – 945	178 – 209	Extensos
4	944 – 920	210 – 250	Extremos
5	< 920	>250	Catastróficos

Los rangos no son absolutos en términos de efectos. Los huracanes de categorías más bajas pueden producir mayores daños que uno de categoría superior en dependencia del terreno y la lluvia total, o un huracán Categoría 2 que impacte sobre un área urbana hará probablemente más daño que uno de Categoría 5 que lo haga sobre un área rural. Los sistemas tropicales con una fuerza inferior a la de huracán también pueden producir daños significativos y pérdidas humanas, especialmente por las lluvias intensas que ocasionan inundaciones repentinas y deslizamientos de tierra.

Nombres de los ciclones tropicales

Un ciclón tropical se nombra cuando alcanza la clasificación de tormenta tropical. Los nombres de las tormentas tropicales se toman de una lista que varía en las distintas regiones del mundo y se diseñan con antelación. Esas listas se deciden, en dependencia de la región, por comités de la OMM o por los servicios nacionales del tiempo asociados al pronóstico de los ciclones tropicales.

El Comité de Huracanes de la Asociación Regional IV de la OMM selecciona los nombres para las tormentas tropicales de la cuenca atlántica y el Pacífico nororiental. Aquí se asignan alternativamente nombres femeninos y masculinos en orden alfabético durante una temporada determinada. El género de la primera tormenta de la temporada se alterna de año en año: la primera tormenta de un año de número impar toma un nombre femenino, mientras que la primera tormenta de un año de número par toma un nombre masculino. Se preparan seis listas con antelación y cada lista se utiliza cada seis años. Las letras Q, U, X, Y, Z se omiten en el Atlántico; en el Pacífico nororiental se omiten sólo la Q y la U, por lo que el formato en esas regiones se limita a 21 y 24 tormentas, respectivamente, en una temporada ciclónica.

Los nombres se pueden retirar a petición de los países afectados si la tormenta les ha causado severos daños o si ha sido un huracán notable. Los países con afectaciones deciden reemplazar el nombre del mismo género y usualmente en el mismo idioma del nombre que haya sido retirado. En la cuenca del Atlántico los nombres vienen dados en los idiomas español, inglés y francés. Los nuevos nombres se aprueban por consenso unánime de los países miembros del Comité de Huracanes y cualquier país puede vetar un nombre por las razones que estime pertinentes.

Por acuerdo del Comité de Huracanes de la AR IV, si en la cuenca del Atlántico o en la del Pacífico nororiental

ocurriera una temporada ciclónica muy activa en la cual se terminen los nombres de la lista aprobada, se emplearán los nombres de las letras del alfabeto griego. Si alguno de ellos cumpliera las condiciones para el retiro del nombre, se retiraría el nombre de la letra con el año, por ejemplo: Beta 2007. En la temporada del 2005 en el Atlántico se desarrollaron más de 21 tormentas y en consecuencia se nombró a las restantes con las letras griegas Alfa, Beta, Gamma, Delta, Epsilon y Zeta. Es la única vez que esto ha ocurrido desde 1886, año en que comienzan las estadísticas confiables.

En el Pacífico norte central las listas de nombres están dadas por el Centro de Huracanes del Pacífico central en Honolulu, Hawai. Se utilizan cuatro listas de nombres hawaianos seleccionados sin considerar el año. En el Pacífico noroccidental las listas se elaboran por el Comité de Tifones de la OMM. Se utilizan cinco listas, con dos nombres en cada lista de cada una de las 14 naciones suscritas a ese Comité. El orden de los nombres es según el orden alfabético de los nombres de los países. Se nombran consecutivamente sin considerar el año.

La Agencia Meteorológica Japonesa utiliza un sistema de nombres secundarios en el Pacífico noroccidental que numera a un tifón en el orden en que se forma y cierra la lista el 31 de diciembre de cada año. Por ejemplo, el Tifón Songda de septiembre de 2004 es internamente llamado como el tifón número 18 y registrado como el 0418, dado el 04 por el año.

El Buró de Meteorología Australiano mantiene tres listas, una por cada región australiana: oeste, norte y este. También hay nombres de las regiones de Fiji, Papua y Nueva Guinea. En el suroeste del Índico se mantiene una lista por temporada y en el Índico norte se utilizan cuatro listas en secuencia.

Historia del uso de nombres en los ciclones tropicales

Desde el descubrimiento de América los huracanes se nombraban en las colonias españolas del área del Caribe según el día del santoral católico en que la tormenta azotara. La práctica de los nombres fue introducida por el meteorólogo australiano Clement Lindley Wragge a finales del siglo XIX. Él utilizó nombres femeninos, de políticos, de la historia y la mitología.

Durante la Segunda Guerra Mundial a los ciclones se les daban nombres femeninos, principalmente por la conveniencia de los pronosticadores. Durante los años 1950 a 1952 se utilizaron los nombres del alfabeto fonético inglés empleado en las comunicaciones.

Las necesidades de la radiocomunicación con los barcos y aviones llevaron a emplear nuevamente nombres, ya que varios tifones, huracanes o ciclones pueden describir sus trayectorias al mismo tiempo. Por eso, para ayudar a su identificación, en 1953 comenzó la práctica sistemática de nombrar a las tormentas tropicales con nombres femeninos en los EE.UU.

Los nombres que se utilizaban eran sólo femeninos en concordancia con la práctica de la lengua inglesa de referir los objetos animados por medio del pronombre «ella». Sin embargo, como las tormentas tropicales y los huracanes son destructivos, algunos consideraron esta práctica como «sexista».

A partir de 1978 el recién creado Comité de Huracanes de la AR IV de la OMM introdujo la utilización de nombres femeninos y masculinos, tal como se ha venido haciendo hasta la fecha, por acuerdo entre sus miembros, por lo que esta práctica tiene un carácter internacional. La primera vez que se usó este sistema fue en la temporada ciclónica de 1979, fue en 1978 cuando se preparó y utilizó, por primera vez, una lista de nombres con antelación, los nombres utilizados en la cuenca atlántica fueron de origen español, inglés y francés, por ser éstas las tres lenguas predominantes en el área donde típicamente se forman los ciclones tropicales.

Otros sistemas de tormentas

Ciclones extratropicales

Derivan su energía de la diferencia de temperatura en el plano horizontal y son típicos de latitudes más altas. Un



ciclón tropical se puede convertir en extratropical, según se mueve hacia latitudes más altas si su fuente de energía cambia del calor latente liberado por la condensación a la diferencia térmica entre dos masas de aire. Con menor frecuencia un ciclón extratropical puede transformarse en uno subtropical y después en tropical. Estos sistemas pueden ser también peligrosos porque sus centros de bajas presiones ocasionan fuertes vientos.

### Ciclones subtropicales

Son sistemas de bajas presiones que existen en las latitudes tropicales o subtropicales y muestran algunas características de un ciclón tropical y algunas de ciclón extratropical. Ellos se pueden formar hasta los 50° N. Por tanto, muchos de estos ciclones existen en regiones de gradientes de temperatura entre débiles y moderados, pero también reciben mucha energía de la nubosidad convectiva. Con frecuencia, presentan un radio de vientos máximos más alejado del centro (100 - 200 km) que el de los ciclones tropicales. Además, no se ha observado que el viento máximo sostenido en estos ciclones supere los 117 km/h.

Muchos de los ciclones subtropicales se convierten en ciclones tropicales. En la cuenca atlántica se clasifican según el viento máximo sostenido en: depresión subtropical (< 64 km/h) y tormenta subtropical (≥ 64 km/h). En la actualidad estas tormentas son nombradas.

La Fig. 11 muestra cuatro sistemas ciclónicos en la cuenca atlántica: una tormenta tropical en el Caribe y un huracán, un ciclón subtropical y un ciclón extratropical sobre el área oceánica.

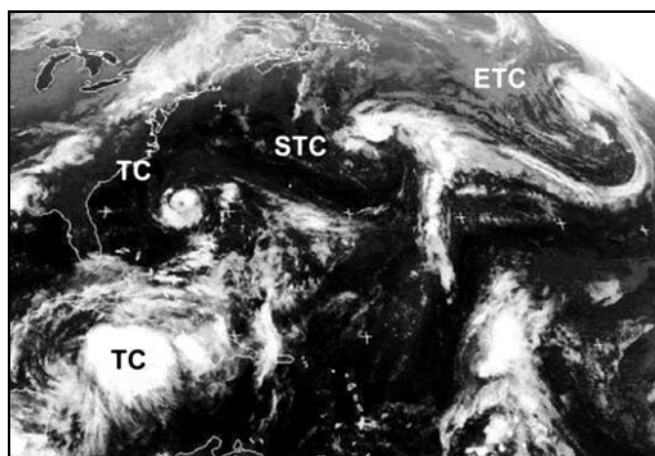


Fig. 11. Sistemas ciclónicos sobre la cuenca atlántica. Dos ciclones tropicales (TC), un ciclón subtropical (STC) y un ciclón extratropical (ETC).

### Mecanismos en los ciclones tropicales

Estructuralmente, un ciclón tropical es un gran sistema rotatorio de nubes, viento y turbonadas. Su fuente de energía primaria es la liberación de calor de condensación por el vapor de agua que se condensa en altas altitudes. Por tanto, un ciclón tropical se puede considerar como una gigantesca máquina de calor vertical soportada por mecanismos conducidos por fuerzas físicas, como la rotación y la gravedad de la Tierra.

La persistencia de condiciones dinámicas, térmicas y de humedad favorables para la ciclogénesis tropical, permite crear un lazo de retroalimentación, maximizando la entrada de energía posible. Otro factor, como la falta de equilibrio en la distribución de la masa de aire, también puede sustentarle energía al ciclón. La revolución orbital de la Tierra le causa rotación al sistema (efecto conocido como la *Fuerza de Coriolis*) y le da a éste la característica de ciclón.

La condensación como fuerza conductora es lo que distingue fundamentalmente a los ciclones tropicales de otros fenómenos meteorológicos. El ciclón tropical debe permanecer sobre aguas calientes, las cuales proveen la humedad necesaria. La evaporación de esa humedad se acelera por los intensos vientos y la reducida presión atmosférica de la tormenta, de ello resulta un lazo de retroalimentación positiva. Por eso, cuando un ciclón tropical pasa sobre áreas terrestres su fortaleza disminuye con rapidez.

Se ha estimado que un huracán libera energía en una proporción de 50 - 200 trillones de watts, aproximadamente la cantidad de energía liberada en 20 min por la explosión de una bomba nuclear de 10 megatones.

El movimiento de las nubes en los ciclones tropicales es hacia el centro en los niveles bajos, pero ellos también desarrollan un flujo saliente en la troposfera superior. Este se origina del aire que ha liberado su humedad y es expedida a las altas altitudes a través de la «chimenea» de la tormenta.

### Formación

Las transiciones entre los diferentes estados del proceso evolutivo de los ciclones tropicales se denominan de la forma siguiente:

1. **Formación:** Transición de un disturbio a depresión tropical.
2. **Desarrollo:** Transición de una depresión a tormenta tropical.
3. **Intensificación:** Evolución del estado de tormenta tropical a huracán.

Los ciclones tropicales se forman de disturbios convectivos iniciales, conocidos como agrupaciones nubosas o complejos convectivos de mesoescala. Estas agrupaciones pueden tener su origen en la zona intertropical de convergencia, ondas del este, hondonadas casi estacionarias, extremo sur de viejos sistemas frontales y en la vaguada troposférica superior tropical (TUTT), que son bajas superiores de núcleo frío. En todos los casos es necesaria la presencia de un área de nublados convectivos.

A pesar de los adelantos en las técnicas de observación y de la modelación numérica, la formación de los ciclones tropicales es un tema que continúa en investigación y aún no se conoce a plenitud. No obstante, hay un consenso generalizado sobre la relación que existe entre la génesis y la presencia de estos seis factores ambientales:

1. Altos valores de la vorticidad relativa en los niveles bajos de la troposfera.
2. Localización de un disturbio a más de 2.5° del ecuador, donde son significativos los valores de la vorticidad planetaria.
3. Vientos débiles en la troposfera superior que no cambien mucho en dirección y velocidad a través de la altura (débil cizalladura vertical del viento horizontal).
4. Temperatura superficial del mar mayor que 26.5° C hasta al menos 50 m de profundidad.
5. Inestabilidad condicional a través de una capa atmosférica profunda.
6. Altos valores de la humedad relativa en la troposfera baja y media.

Los tres primeros factores son funciones de la dinámica horizontal y el producto de ellos se define como potencial dinámico, mientras que los tres restantes son parámetros termodinámicos y el producto de ellos se define como potencial termodinámico.

Algunos de estos parámetros se pueden agrupar e incluso eliminarse, ya que dependen unos de otros como por ejemplo los parámetros 1 y 2, que pueden definirse como vorticidad absoluta en los niveles bajos.

Aunque los criterios mencionados existen sobre grandes porciones de los océanos tropicales por largos períodos de tiempo, la génesis tropical ocurre con frecuencia relativamente baja. De ahí la hipótesis de que *los ciclones tropicales se forman sólo cuando esas condiciones se encuentran perturbadas hacia valores por encima de la media climatológica regional*. En los casos individuales de formación, las condiciones termodinámicas se satisfacen por lo general, pero la génesis no se produce hasta que el disturbio se halle en un área en que se satisfagan las condiciones dinámicas, que son las más cambiantes.

No obstante, se han formado ciclones tropicales a pesar de que alguna (o algunas) de estas condiciones no

sea la propicia. Como ejemplo se puede citar al huracán Iván de la temporada ciclónica de 2004 que comenzó su formación en los 9.7° N y se convirtió en huracán por debajo de esa latitud. Otro ejemplo es el huracán Epsilon de 2005, que se originó sobre aguas relativamente frías (25° C) y se intensificó bajo un ambiente de fuerte cizalladura.

En nuestro planeta, como promedio, se forman 80 tormentas tropicales anualmente y las 2/3 partes de ellas alcanzan el estado de huracán. Estas tormentas afectan a unos 50 países. El 87% de los ciclones tropicales se forman en la faja comprendida entre los 20° N y los 20° S, excepto entre los 2.5° a ambos lados del ecuador. Alrededor de las 2/3 partes se originan en el hemisferio norte y en el hemisferio oriental se duplica la cifra del occidental. En la Fig. 12 se puede apreciar la distribución global de los puntos de orígenes y las ciclogénicas.

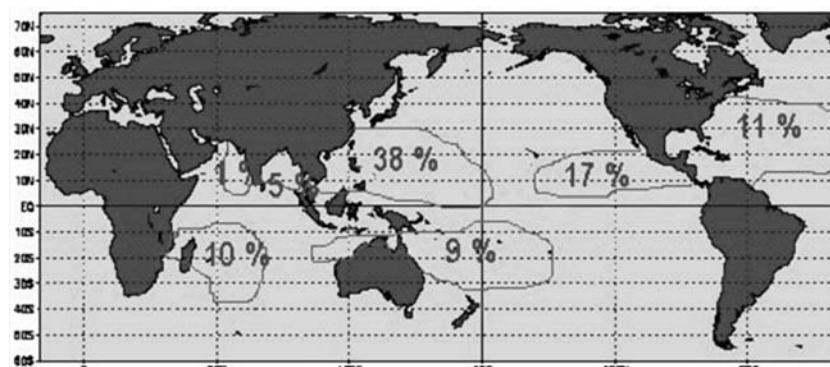


Fig. 12. Localización de los puntos de orígenes de los ciclones tropicales en todo el mundo.

Las principales cuencas ciclogénicas del planeta son:

1. **Atlántico Norte:** Incluye el Océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México. La variabilidad interanual en esta cuenca es grande, oscila entre 1 (1914) y 27 (2005) por año. El promedio anual es de aproximadamente 10 tormentas tropicales. La mayoría de los ciclones más intensos son huracanes tipo Cabo Verde y se forman al oeste de la costa africana cerca de las islas que llevan ese nombre. Se debe señalar que en la temporada 2005 si se considera la tormenta subtropical *sin nombre* el número total se eleva a 28.
2. **Nordeste del Pacífico:** Es la segunda cuenca más activa del mundo y la de mayor frecuencia de génesis por unidad de área, específicamente en los mares cercanos a México, donde la temperatura del mar supera los 29° C.
3. **Noroeste del Pacífico:** Esta es la cuenca más activa, donde ocurre un tercio de la actividad ciclónica mundial. Las costas orientales de Taiwán y Filipinas son las más impactadas por los ciclones tropicales a nivel mundial.
4. **Índico Norte:** Esta cuenca se divide en Bahía de Bengala y el Mar Arábigo, es la primera 5 - 6 veces más activa. En esta cuenca se han formado los ciclones tropicales que han ocasionado más pérdidas de vidas humanas. El más notable fue el ciclón Bhola que en 1970 produjo 200 000 muertes.
5. **Suroeste del Índico:** Es la cuenca menos conocida debido a la carencia de datos históricos.
6. **Australia / Sudeste del Índico.**
7. **Australia / Suroeste del Pacífico.**

El 80% de los ciclones tropicales se forman en la zona intertropical de convergencia hacia su lado polar y gran parte del resto a partir de ondas tropicales. Específicamente en el Atlántico norte no sucede así, pues su máxima frecuencia de formación proviene de las ondas tropicales. En el Pacífico nororiental parte de la ciclogénesis se debe a las ondas tropicales procedentes del Atlántico.

No obstante, algunos ciclones tropicales se han originado en áreas inusuales. El Atlántico sur se caracteriza por sus aguas frías, por la inexistencia de la zona intertropical de convergencia y por presentar fuerte cizalladura del viento, lo que limita la actividad ciclónica en esta cuenca. Sin embargo, se han observado aquí tres

ciclones tropicales: una débil tormenta en 1991 cerca de las costas africanas, el ciclón Catarina que afectó a Brasil como huracán de Categoría 1 en marzo de 2004 y una tormenta más pequeña al este de Brasil en enero de ese mismo año.

En el Pacífico norte central la cizalladura imperante es un factor inhibitorio para la formación de los ciclones tropicales, sin embargo esta área es frecuentada por los ciclones tropicales que se originan en el Pacífico nororiental.

En el Pacífico suoriental la ciclogénesis es rara y la formación está vinculada con El Niño. La mayoría de los ciclones que entran a esta región se originan en el suroeste del Pacífico.

En el Mar Mediterráneo se producen tormentas similares en estructura a los ciclones tropicales, pero se debate si ellas son tropicales en su naturaleza.

En el Atlántico nororiental, cerca de Madeiras, se formó el huracán Vince en octubre de 2005 y penetró como depresión tropical por la costa suroccidental de España, este fue el primer organismo tropical que alcanza la Península Ibérica.

Un sistema de tormentas similar a un ciclón tropical se originó en el Lago Hurón (Los Grandes Lagos) en 1996.

En el sursudeste del Mar de China, próximo al ecuador, donde la Fuerza de Coriolis no es significativa, se originó el tifón Vamei en el 2001.

Perfiles estacionales de la ocurrencia de ciclones tropicales

Los ciclones tropicales son fenómenos estacionales y muchas de las cuencas tienen un máximo al final del verano y comienzo del otoño, cuando los océanos son más cálidos. Sin embargo, cada cuenca ciclogénica en particular tiene su propio patrón estacional (ver Tabla 2 y Fig. 13).

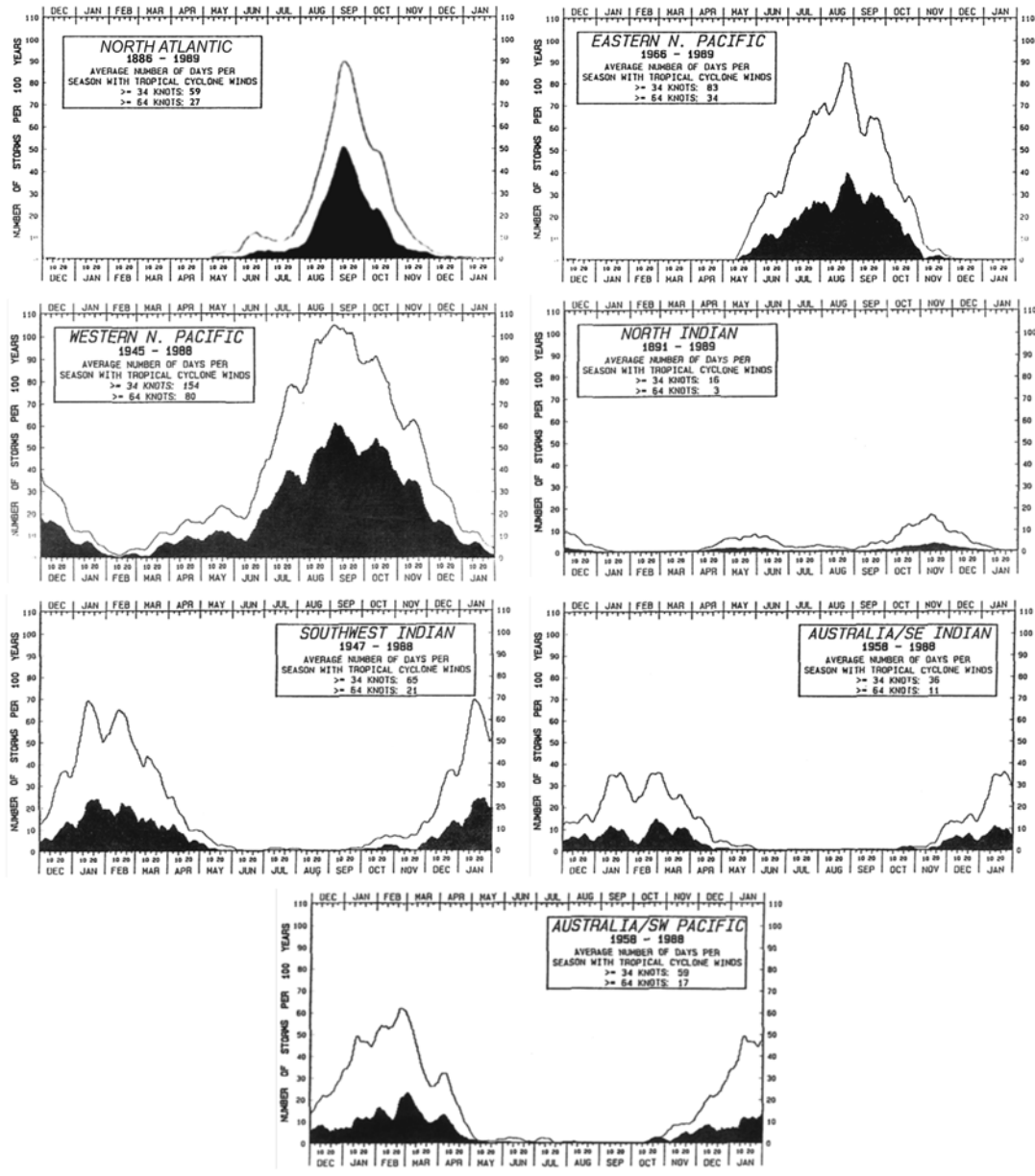


Fig. 13. Perfiles estacionales de la frecuencia de los ciclones tropicales en cada una de las cuencas ciclogénicas. La línea se refiere a vientos con fuerza de tormenta tropical y el área sombreada a la intensidad de huracán o tifón. Los datos están suavizados en periodos de 15 días (figura extraída de WMO, 1993).

Tabla 2. Promedio de la actividad ciclónica en cada cuenca ciclogénica

Cuenca	Comienzo de temporada	Final de temporada	Tormentas tropicales (63-117 km/h)	Ciclones tropicales (>117 km/h)	Ciclones tropicales de Categoría 3 (>177 km/h)
Noroeste del Pacífico	Todo el año	Todo el año	26.7	16.9	8.5
Nordeste del Pacífico	Mayo	Noviembre	16.3	9.0	4.1
Suroeste del Índico	Octubre	Mayo	13.3	6.7	2.7
Atlántico Norte	Junio	Noviembre	10.6	5.9	2.0
Australia / Suroeste del Pacífico	Octubre	Mayo	10.6	4.8	1.9
Australia / Sudeste del Índico	Octubre	Mayo	7.3	3.6	1.6

Fuente: [http://en.wikipedia.org/wiki/Tropical\\_cyclone#Times\\_of\\_formation](http://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_cyclone#Times_of_formation)

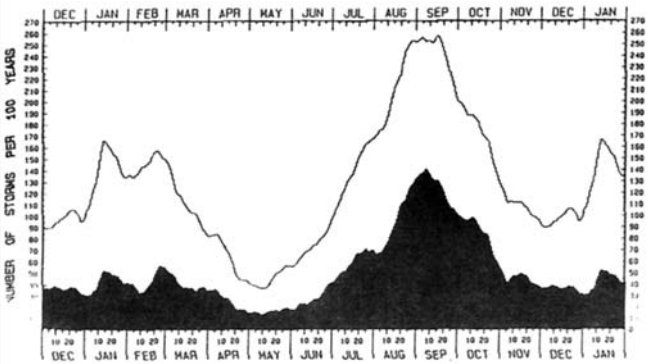


Fig. 14. Perfil estacional de la frecuencia de los ciclones tropicales al nivel global. La línea se refiere a vientos con fuerza de tormenta tropical y el área sombreada a la intensidad de huracán o tifón. Los datos están suavizados en periodos de 15 días (figura extraída de WMO, 1993).

En el Atlántico norte la temporada oficial se extiende desde el primero de junio hasta el 30 de noviembre, con el máximo de actividad el 10 de septiembre y dos máximos relativos en octubre y junio. En el nordeste del Pacífico se extiende desde el 15 de mayo hasta el 30 de noviembre, con una distribución mensual de la actividad parecida a la del Atlántico.

En el Pacífico noroccidental el mínimo de actividad ciclónica se presenta en febrero y el pico a principios de septiembre. En el Índico norte las tormentas son más comunes desde abril hasta diciembre, con la frecuencia máxima en mayo y noviembre. En el hemisferio sur la actividad ciclónica comienza en octubre y finaliza en mayo, con los picos a mediados de febrero y principios de marzo.

El mínimo de la actividad global (ver Fig. 14) ocurre durante mayo y éste es seguido por un máximo en septiembre y un mínimo secundario en diciembre.

El número de ciclones tropicales que alcanza la categoría de huracán es mayor en el hemisferio norte que en el sur. Sin embargo, la magnitud de la diferencia es posiblemente inferior a la mostrada en la figura, ya que las cuencas del hemisferio sur utilizan el viento máximo promediado en 10 min, lo cual puede introducir hasta 20% de sesgo, además de que antes de la era del satélite pudo ser subestimada la intensidad de los ciclones.

Ciclogénesis en el Atlántico norte

En la cuenca atlántica las áreas ciclogénicas varían durante la temporada (ver Fig. 15). En junio la mayoría de las tormentas se originan en el Golfo de México y el oeste del Caribe. En julio y agosto las áreas de mayor frecuencia se expanden y se trasladan hacia el este, mientras que en septiembre se localizan sobre una extensa área que se extiende desde Las Bahamas hacia el sudeste hasta las Antillas Menores y hacia el este, hasta la vecindad de Cabo Verde, cerca de la costa occidental africana. En octubre y noviembre las áreas de formación regresan al oeste del Caribe y el Golfo de México.

La naturaleza de los ciclones tropicales del Atlántico en los meses de junio, octubre y noviembre se asocia fundamentalmente a la presencia de hondonadas casi estacionarias sobre el sudeste del Golfo de México y el Caribe occidental, las cuales interactúan con fenómenos de latitudes tropicales. Desde julio hasta septiembre la génesis se produce fundamentalmente sobre el área oceánica, donde los sistemas en su mayoría se deben a las ondas tropicales y en menor grado a disturbios procedentes de la zona intertropical de convergencia.

Disipación

Un ciclón tropical se disipa o pierde sus características tropicales si:

1. *Se mueve sobre tierra.* Al privarse del agua caliente necesaria pierde con rapidez su fuerza. La mayoría de las tormentas fuertes pierden su intensidad y se convierten en áreas desorganizadas de bajas presiones uno o dos días después de su *entrada en tierra*. Sin embargo, existe la oportunidad de que se regeneren si logran salir al mar y moverse sobre aguas calientes. Si la tormenta se encuentra en una zona montañosa, aunque sea en un período corto de tiempo, pierde su estructura con rapidez. No obstante, ocurren muchos desastres en esos terrenos por las lluvias torrenciales que pueden provocar inundaciones y deslizamientos de tierra.
2. *Permanece en la misma área oceánica por largo tiempo,* pues le extrae el calor a la superficie marina hasta que ésta se enfríe lo suficiente como para no poder sustentar la tormenta.
3. *Experimenta una fuerte cizalladura* que causa ventilación y desorganiza la convección.
4. *Es lo suficiente débil* como para que sea absorbido por otra área de bajas presiones.
5. *Se traslada sobre aguas frías.* Esto no significa la muerte de la tormenta, pero sí que pierde sus características tropicales.
6. *Se forma una pared de ojo externa.* Este debilitamiento es generalmente temporal, a menos que se encuentren otras condiciones superiores.

Cuando un ciclón tropical alcanza latitudes más altas o pasa sobre tierra, se puede unir con sistemas frontales o desarrollarse en un ciclón extratropical. En el Atlántico, los vientos asociados a estos ciclones extratropicales pueden permanecer con la fuerza de huracán y alcanzar a Europa. Como ejemplo de ello se puede citar al huracán Lili de 1996, que azotó con violencia a Gran Bretaña transformado ya en ciclón extratropical.



Fig. 15. Regiones de origen y trayectorias típicas de los ciclones tropicales del Atlántico norte en cada uno de los meses de la temporada ciclónica (figuras tomadas de: [http://www.srh.weather.gov/jetstream/tropics/tc\\_basins.htm](http://www.srh.weather.gov/jetstream/tropics/tc_basins.htm) )

### Estructura de los ciclones tropicales

Las principales partes de un ciclón tropical son las bandas de lluvias, el ojo y la pared del ojo. En la Fig. 16 se representa de forma esquemática la estructura de un ciclón tropical bien desarrollado y en la Fig. 17 el patrón de nubes típico de un huracán intenso.

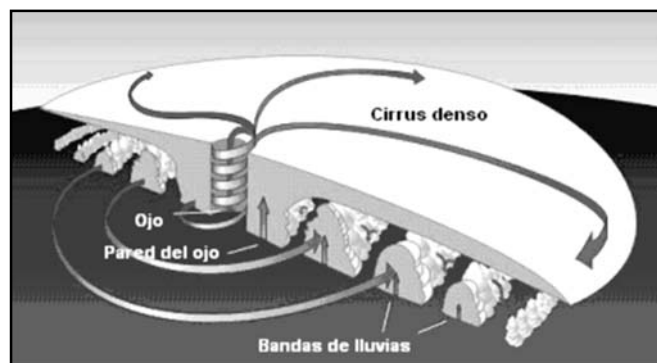


Fig. 16. Partes principales de un ciclón tropical (figura extraída de: [http://www.srh.weather.gov/jetstream/tropics/tc\\_structure.htm](http://www.srh.weather.gov/jetstream/tropics/tc_structure.htm))

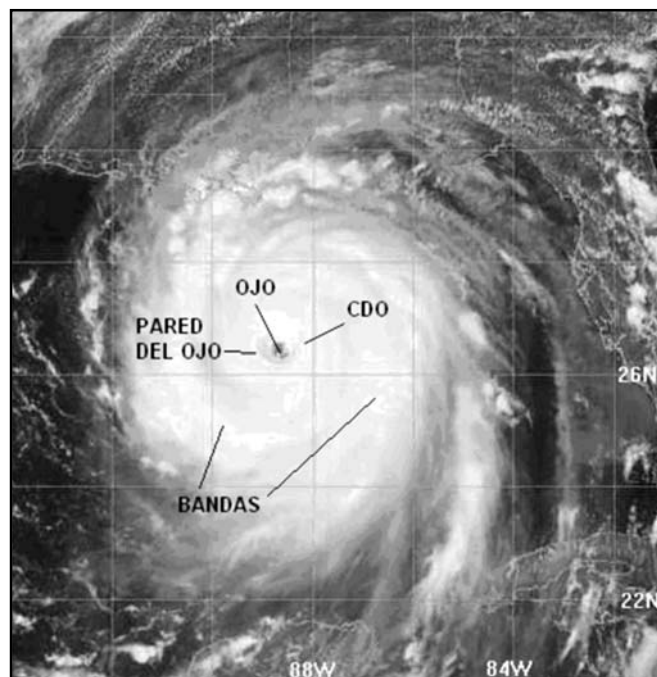


Fig. 17. Estructura del campo nuboso asociado a un huracán intenso.

Normalmente el ojo es un área de buen tiempo, donde se registran calmas o vientos muy débiles, que por lo general no exceden los 24 km/h. Generalmente tiene forma circular y su diámetro puede variar desde unos 8 hasta 200 km, como promedio es de 30-60 km. El ojo aparece cuando el viento máximo sostenido supera los 117 km/h. En los ciclones más débiles la nubosidad densa central (CDO por su sigla en inglés) cubre el centro de circulación, lo que trae como resultado que el ojo no sea visible. En los huracanes maduros e intensos la pared del ojo puede presentar, algunas veces, el *efecto de estadio o coliseo romano*.

El ojo es la región de presión más baja en la superficie y de temperaturas más cálidas en su parte más alta. La temperatura del ojo puede ser de 10 o más grados más caliente que el ambiente circundante a 12 km de altura, pero sólo hasta unos 2° C más caliente en la superficie. El ojo está compuesto por aire que se hunde o desciende lentamente, mientras la pared que lo rodea tiene un flujo ascendente.

La temperatura caliente del ojo ocurre debido a la compresión del aire que desciende en esa región. La mayoría de los sondeos tomados dentro del ojo muestran una capa húmeda en los niveles bajos, con una inversión arriba, que sugiere que el descenso de aire en el ojo típicamente no se extiende hasta la superficie del océano, sino que sólo llega hasta 1-3 km de altura.

La causa que origina el ojo no se comprende a plenitud. El del ciclón tropical comparte muchas características cualitativas con otros sistemas vorticiales tales como tornados, trombas marinas, torbellinos de polvo y remolinos. Dado que muchos de éstos carecen de cambio de la fase del agua, puede ser que la característica del ojo sea un componente fundamental de todos los líquidos rotatorios. Una hipótesis explica su origen a través del flujo de vientos de supergradientes presentes cerca del radio de vientos máximos. Ellos causan que el aire sea centrifugado hacia la pared del ojo, ocasionando la subsidencia del aire en el ojo.

Otra característica de los ciclones tropicales, que probablemente juega un rol en la formación y mantenimiento del ojo, es la convección en la pared del ojo. A lo largo de las bandas convectivas la convergencia es máxima en los niveles bajos y la divergencia es pronunciada en los altos. Se desarrolla una circulación directa, donde el aire cálido y húmedo converge en la superficie, sube por estas bandas, se separa arriba y desciende en ambos lados de las bandas. El hundimiento se distribuye sobre una área extensa en el exterior de la banda de lluvias, pero se concentra en una pequeña área interior. Según el aire desciende, ocurre el calentamiento adiabático, y se seca el aire.

Debido a que el descenso de aire se concentra en el interior de la banda, el calentamiento adiabático es más fuerte hacia adentro de la banda y causa un contraste agudo en los descensos de presión a lo largo de la banda, ya que el aire caliente es más ligero que el aire frío. A causa de los descensos de la presión en el interior, los vientos tangentes alrededor del ciclón aumentan debido al aumento del gradiente de presión.

Eventualmente la banda se mueve hacia el centro y lo rodea para formar el ojo y la pared del ojo. De este modo, un ojo libre de nubes puede producirse debido a la combinación de una masa impulsada fuera del ojo de forma dinámica y centrífuga, hacia la pared del ojo y a un descenso forzado causado por la convección húmeda en la pared del ojo. Este tema es indudablemente uno de los de mayor investigación para descubrir cuál mecanismo es el primario.

La *pared del ojo* es una banda alrededor del ojo donde se encuentran los vientos más intensos. Es un anillo de convección muy profunda que produce lluvias muy fuertes. Los mayores daños por viento ocurren por donde pasa la pared del ojo. Los cambios en la estructura del ojo y su pared puede causar cambios en la intensidad de la tormenta.

Algunos de los ciclones tropicales más intensos exhiben paredes concéntricas del ojo, dos o más estructuras de pared del ojo localizadas en el centro de la circulación de la tempestad. Según se forma la pared del ojo interior, la convección que rodea dicha pared puede organizarse en diferentes anillos. Eventualmente, el ojo interior comienza a sentir los efectos del descenso de aire que resulta de la pared del ojo exterior, y la pared del ojo interior se debilita, para ser reemplazada por la pared exterior. El incremento de la presión causado por la destrucción de la pared del ojo interior es generalmente más rápido que el descenso de la presión causado por la intensificación de la pared exterior, y el ciclón mismo se debilita por un período corto de tiempo.

El CDO es la región de nubes Ci muy altas y frías que cubre el núcleo del ciclón tropical. Este escudo denso de actividad de turbonadas muy intensa contiene la pared del ojo y el propio ojo. Los huracanes clásicos contienen un CDO simétrico.

La convección en los ciclones tropicales se organiza en bandas largas y estrechas de lluvia que se desplazan en la misma dirección del viento horizontal. Puesto que estas bandas parecen girar en espiral hacia el centro de un ciclón tropical, ellas son llamadas *bandas espirales*. Estas bandas son capaces de producir explosiones fuertes de lluvias y vientos, así como tornados. Algunas veces hay brechas entre las bandas espirales donde no se produce ni lluvia ni vientos fuertes.

El tamaño de un huracán no necesariamente es un indicativo de su intensidad. Sin embargo, los vientos destructivos de los huracanes y las lluvias cubren un área extensa. Los vientos huracanados se pueden extender hasta más de 240 km para el caso de los grandes. El área de vientos con fuerza de tormenta tropical es aún mayor, hasta casi 480 km del ojo de un huracán de gran tamaño. El tamaño se puede expresar por el diámetro de los vientos huracanados o por los vientos con fuerza de tormenta tropical. Otra forma de expresión es mediante el diámetro de la última isobara cerrada.

### Movimiento

Los ciclones tropicales, en su movimiento, describen una amplia variedad de curvas. No obstante, se pueden seleccionar trayectorias básicas que tipifican ampliamente muchas de las trayectorias individuales. El curso del movimiento es referido como la *trayectoria* de un ciclón tropical.

A groso modo, los ciclones tropicales se pueden dividir en tres grupos, según la dirección del movimiento: los que se mueven todo el tiempo en los estes, los que lo hacen todo el tiempo en los oestes y aquellos que su rumbo inicial al oeste cambia hacia el polo y posteriormente al este; este último cambio denominado *recurva* es uno de los problemas en el pronóstico del movimiento de los ciclones tropicales.

Estos organismos se mueven bajo la influencia de fuerza externas e internas. Las fuerzas externas son aplicadas por las corrientes que rodean a la tormenta y la transportan, mientras que las internas surgen dentro de la circulación.

### Fuerzas externas

Uno de los criterios más aceptados es el concepto de corriente directriz o de arrastre, introducido desde finales de la década de los años 40 del siglo XIX. En general, se considera que el movimiento de un ciclón tropical está determinado por la dirección y la velocidad de la corriente básica, en la cual se halla embebido. Los vientos a gran escala (las corrientes atmosféricas) son los responsables del movimiento de los ciclones tropicales. La fuerza principal que afecta la trayectoria de los sistemas tropicales



son los vientos que circulan alrededor de las altas presiones.

Fuerzas internas

El hecho de que los ciclones tropicales presenten una tendencia en su movimiento hacia el polo indica la influencia de una fuerza interna, que se debe a la variación del *parámetro de Coriolis* a través de la tormenta.

La rotación de la Tierra imparte una aceleración (*aceleración de Coriolis o efecto de Coriolis*) que provoca que los sistemas ciclónicos tornen su movimiento hacia los polos en ausencia de fuertes corrientes de arrastre. De este modo, los ciclones tropicales en el hemisferio norte, que por lo general se mueven al oeste en sus comienzos, normalmente giran hacia el norte y en el hemisferio sur hacia el sur, si no hay fuertes sistemas de presión que estén en contra de la aceleración de Coriolis.

El movimiento de los ciclones tropicales puede diferir considerablemente de la rapidez del flujo básico por razones dinámicas. Este efecto se manifiesta por las oscilaciones sinusoidales sobre la trayectoria media de la tormenta. La tormenta describirá una trayectoria circular si el fluido, en el cual se halla embebida, no posee un movimiento básico. En caso de que posea un movimiento básico, por ejemplo del este, entonces trazará un trocoide con una progresión hacia el oeste. La amplitud y el período de oscilación dependen de la rapidez del viento y del tamaño e intensidad de la tormenta. Si la tormenta se mueve bajo la influencia de otro sistema atmosférico, que posee vientos con componente sur, la amplitud de la oscilación se incrementará por esos vientos y recurvará hacia el norte.

Los movimientos oscilatorios son perfectamente visibles en las observaciones de los radares y de los satélites geostacionarios.

Las direcciones medias del movimiento (Fig. 18) muestran que los patrones clásicos de recurva ocurren sobre el Atlántico norte y el Pacífico noroccidental, mientras que en el suroeste del Índico son menos extensos. Los ciclones del Pacífico nororiental se disipan antes de recurvar. En el Índico norte y el norte y oeste de Australia los ciclones tropicales con frecuencia tocan tierra y se disipan antes o durante la recurva. La aproximación de los oestes de latitudes medias al ecuador en el suroeste del Pacífico conlleva a los ciclones a moverse en una componente predominante hacia el este.

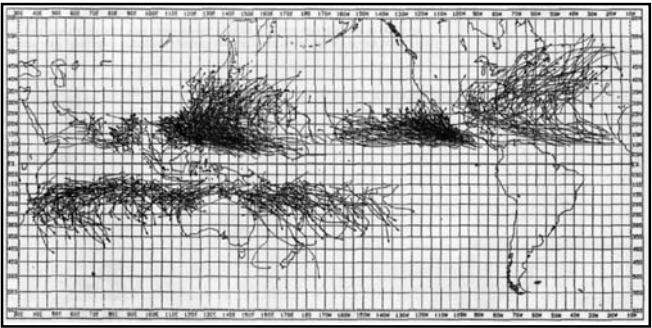


Fig. 18. Trayectorias de los ciclones tropicales (vientos máximos > 62 km/h) durante el período 1979-1988 (figura extraída de WMO, 1993).

La rapidez del movimiento también experimenta cambios entre las cuencas ciclogénicas y dentro de ellas. Algunos de los aspectos más significativos son:

- El predominio del movimiento lento sobre el norte del Índico y las porciones más ecuatoriales del hemisferio sur al oeste de 160° E.
- Una carencia marcada de movimientos lentos sobre el Atlántico norte y el noroeste del Pacífico.
- Los ciclones tropicales más rápidos predominan sólo en las altas latitudes del Atlántico norte y el Pacífico noroccidental, donde la rapidez media supera los 75 km/h.
- En el Pacífico nororiental los rangos de la rapidez son pequeños.

En la cuenca atlántica los ciclones tropicales presentan movimientos característicos durante los distintos meses de la temporada ciclónica, dados por el flujo troposférico imperante en cada uno de ellos (ver Fig. 15).

En junio, el rumbo predominante es hacia el primer y cuarto cuadrante, con desplazamientos lentos que ocurren sobre el noroeste del Caribe y el sudeste del Golfo de México. En julio el movimiento está regido, fundamentalmente, por el anticiclón subtropical Azores-Bermudas, y es más lento en la franja comprendida entre los 20 y 30° N.

En agosto, los ciclones tropicales también describen, por lo general, sus trayectorias a lo largo de la periferia del anticiclón subtropical, con la rapidez mínima entre los 25 y 35° N. En este mes algunos organismos presentan una componente oeste más marcada en el desplazamiento y penetran hasta el Caribe. En septiembre el movimiento es similar, pero el mínimo en la velocidad de traslación se produce algo más al sur, entre los paralelos 20 y 25° N.

En octubre la dirección del movimiento de los ciclones tropicales sobre el Caribe tiende hacia el cuarto cuadrante en su mitad oriental, mientras que en la occidental la traslación se extiende hacia el primer cuadrante. El cinturón de velocidades mínimas de traslación se localiza más al sur que en septiembre: entre los 10 y 20° N sobre el Atlántico y el Caribe.

En noviembre el desplazamiento de los sistemas en el Caribe occidental no presenta una dirección predominante que defina su movimiento, con las velocidades de traslación mínimas sobre el suroeste de esa región.

Presión atmosférica y el viento

La presión atmosférica y el viento varían a través de un ciclón tropical (ver Fig. 19). Entre 100 y 200 km desde el centro los vientos por lo general tienen la fuerza de tormenta tropical. La presión atmosférica aquí es relativamente alta comparada con la del centro de la tormenta. Sin embargo, la presión desciende gradualmente y el viento se incrementa hasta la pared del ojo. En los últimos 50 - 100 km es donde ocurren los cambios más grandes de la presión y el viento.

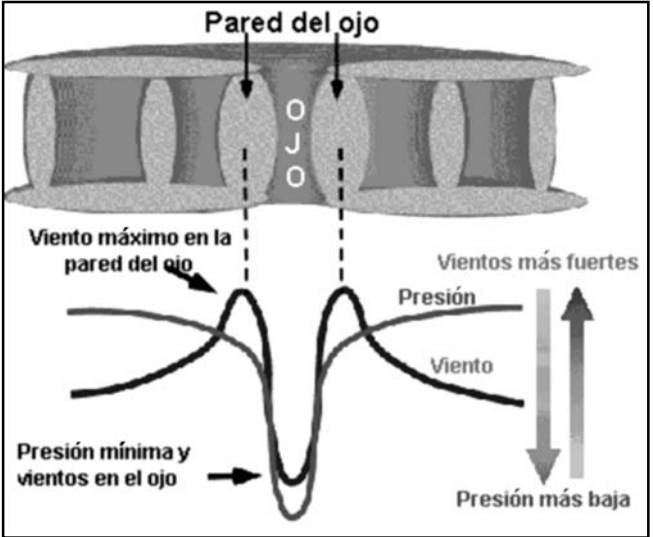


Fig. 19. Representación esquemática de la distribución de la presión atmosférica y el viento superficial en un ciclón tropical.

La presión comienza a descender más rápido, mientras se incrementa la velocidad del viento. El viento alcanza su máxima velocidad dentro de la pared del ojo pero dentro de este se debilita, incluso hasta la calma. La presión superficial continúa su descenso a través de la pared del ojo y hacia el centro del mismo, donde se produce la presión más baja. Los perfiles de presión y viento en el huracán son aproximadamente simétricos, de manera que un ascenso rápido en los vientos y la presión a través de la pared del ojo está seguido por un incremento más lento en la presión y un decrecimiento en la velocidad del viento.

En la Fig. 20 se presenta la distribución en la horizontal del campo del viento superficial de un huracán intenso.

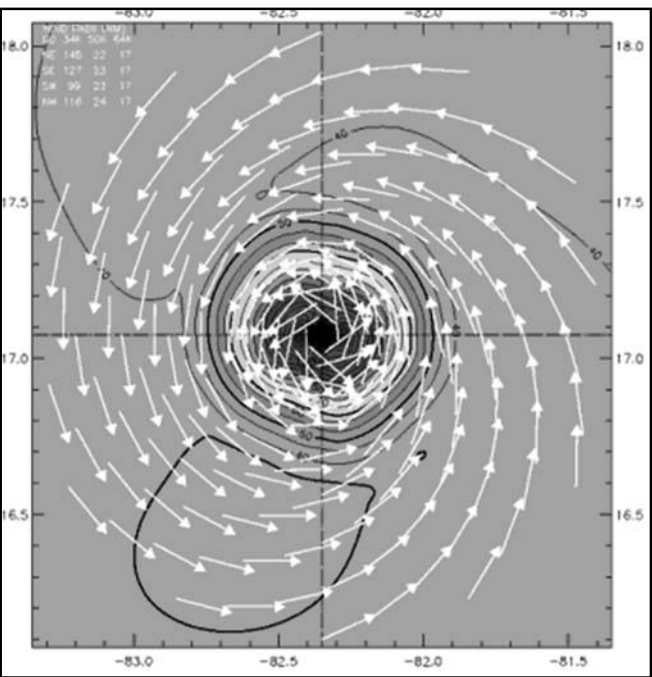


Fig. 20. Distribución en la horizontal del campo de viento superficial asociado a un huracán intenso. Figura extraída de: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/#>

Relación viento-presión

Mediante la presión mínima registrada al nivel del mar se puede estimar el viento máximo sostenido utilizando algunas de las ecuaciones que relacionan ambas variables. Por ejemplo, en los archivos de las trayectorias de los ciclones tropicales del Atlántico, elaborados por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos, se utilizó la *fórmula de Kraft* para el estimado del viento máximo, cuando no se tenían mediciones confiables del viento. En la actualidad se ha desarrollado y puesto en práctica un nuevo sistema de ecuaciones que mejora los resultados de Kraft. Ese sistema trabaja con una muestra estratificada en cuatro grupos según el área: al sur de 25° N, entre 25 y 35°, entre 35° y 45° y el Golfo de México.

Algunas de las fórmulas desarrolladas para estimar la velocidad máxima del viento ( $V_m$ ), a partir de la presión central ( $P_c$ ), son las siguientes:

Takehashi (1939):  $V_m = 6.9 \sqrt{1010 - P_c}$

Kraft (1961):  $V_m = 6.3 \sqrt{1010 - P_c}$

Fujita (1971):  $V_m = (13.1/a) \ 1 < a < 5$

Atkinson Holliday (1975):  $V_m = 3.4 (1010 - P_c)^{0.644}$

Perfil del viento en los ciclones tropicales y factores de rachas

La Fig. 21 muestra el perfil medio de la velocidad del viento en la pared del ojo, normalizado según la velocidad del viento en el nivel de 700 hPa. Los vientos más fuertes en la pared del ojo se hallan a 500 m de altura y superan en 20% a los del nivel de 700 hPa, debido a la naturaleza de núcleo caliente del ciclón tropical. En la parte externa del vórtice el viento máximo en los niveles bajos se localiza un poco más alto, y el perfil no es tan pronunciado como en la pared del ojo.

Los factores de rachas se definen por la relación de las rachas del viento con el viento medio a 10 m de altura, para varias exposiciones y tiempos promedios y en velocidades del viento de al menos la fuerza de huracán. Por ejemplo, el factor de racha, tomando el viento medio en un minuto en el área oceánica, oscila entre 1.17-1.29, mientras que en las áreas boscosas y ciudades lo hace entre 1.61-1.77.

Elementos peligrosos de un ciclón tropical

Los principales peligros asociados a los ciclones tropicales, y en especial a los huracanes, son los debidos a la acción del mar, los vientos fuertes, las lluvias intensas y los tornados. La intensidad del ciclón tropical o huracán



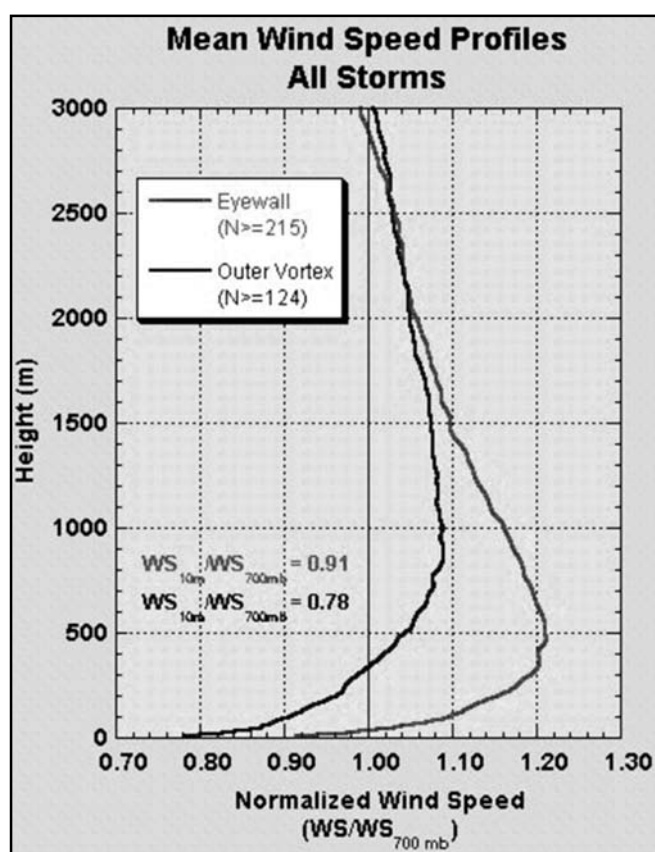


Fig. 21. Perfil de la rapidez media del viento (normalizada según la rapidez en 700 hPa) para la pared del ojo y el exterior del vórtice (figura extraída de: <http://www.nhc.noaa.gov/aboutwindprofile.shtml#fig1>)

es un indicador del potencial del daño. Sin embargo, los impactos están en función de las características del lugar y el momento en que la tormenta azote.

### Acción del mar: el oleaje y la surgencia

Los ciclones tropicales, en especial los huracanes, tienen una fuerte acción sobre la superficie oceánica y dan lugar a dos fenómenos diferentes, pero que a veces pueden ocurrir al unísono: el oleaje y la surgencia. Sobre ambos fenómenos se tratará más adelante cuando se trate el tema dedicado a pronósticos. Baste ahora una pequeña introducción a ellos.

La intensidad y la extensión del campo de viento asociado a los ciclones tropicales genera fuerte oleaje, que al moverse sobre aguas profundas, donde hay poca pérdida de energía, puede afectar zonas muy alejadas del punto donde se halla el ciclón. Ocasionan inundaciones costeras por la penetración del mar a lo largo de una extensa zona del litoral.

De todos los peligros relacionados con un ciclón tropical, en especial cuando es huracán, la surgencia es la que presenta una mayor amenaza en cuanto a la vida de la población. Los mayores desastres relacionados con huracanes han sido ocasionados por este elemento, como ocurrió con las 5 000 vidas perdidas en Galveston, EE.UU. en el huracán de septiembre de 1900, y el de Santa Cruz del Sur, Camagüey, en el huracán de 1932, donde ocurrió la mayor catástrofe natural de la historia de Cuba al desaparecer la ciudad con un saldo de 3 033 muertes.

La surgencia es una onda gravitacional de longitud larga con una escala similar al tamaño del ciclón que la genera, y dura algunas horas en dependencia del tamaño del ciclón y la velocidad del movimiento. Ella es de escala similar a la de la marea astronómica y no se debe confundir con las olas de viento, que tienen longitudes de ondas de metros y períodos de segundos.

Usualmente la surgencia consiste en una ola simple que eleva o profundiza la altura del agua. En algunas situaciones especiales, como los casos de los ciclones que se mueven paralelos a las costas, se pueden formar olas secundarias o resurgencias detrás del ciclón.

La mayor parte de la surgencia es causada por los vientos que empujan la superficie del océano al frente del ciclón, en el lado derecho del mismo en el hemisferio norte (izquierdo en el hemisferio sur). Dado que el gradiente de presión en la superficie (desde el centro del ciclón hasta

las condiciones del medio ambiente) determina la fuerza del viento, la presión central indica de forma indirecta la altura de la surgencia, pero no directamente.

Los canales formados por la batimetría local y las reflexiones de las costas también contribuyen a una amplificación sustancial de la altura de la surgencia. A diferencia de la propagación de las olas de viento, la surgencia no rompe en aguas someras. La surgencia es positiva a la derecha en el hemisferio norte (izquierda en el sur), donde el viento fluye hacia la costa y negativa donde el viento fluye hacia el mar.

El radio de los vientos máximos es un parámetro importante para el cálculo de la surgencia. La longitud de onda de la surgencia es aproximadamente cuatro veces el radio de los vientos máximos, descontando los efectos de la fuerza del gradiente de presión. El tamaño de un ciclón tropical, la velocidad de traslación, el tiempo de estancia sobre la plataforma insular o continental y el ángulo de incidencia al tocar tierra, junto con la batimetría y la topografía costera juegan también un rol significativo en la generación de la surgencia y las inundaciones tierra adentro.

No se debe confundir la surgencia con la *marea de tormenta*. La primera es la elevación de las aguas generada por un ciclón tropical por encima o por debajo de la marea astronómica normal, mientras que la segunda es la combinación de la surgencia con la marea astronómica presente en el lugar donde está ocurriendo el fenómeno, produciéndose la mayor sobre elevación del nivel medio del mar ante la presencia de una pleamar. Estas mareas se pronostican por las alturas de las aguas emitidas en los avisos de ciclón tropical. A los efectos devastadores de este dañino fenómeno natural se le añade, además, la altura que alcanza el oleaje provocado por los fuertes vientos del ciclón tropical, cuyas olas se desplazan por encima de ella.

### Vientos

El poder destructor del viento aumenta rápidamente con su velocidad, ya que depende del cuadrado de esa velocidad. Los vientos de una depresión tropical son usualmente débiles y sólo son capaces de ocasionar daños en estructuras débiles o en cultivos de poca raíz y amplio follaje como el plátano. En una tormenta tropical son lo suficientemente fuertes como para representar ya una cierta amenaza.

Los vientos de intensidad de huracán pueden fácilmente destruir una casa o un edificio cuya estructura es de mala calidad. Durante un huracán los escombros, los carteles, las tejas y materiales que se desprenden de los techos y cualquier objeto pequeño que se haya dejado afuera, se transforman en proyectiles. Los vientos más intensos soplan generalmente en el lado derecho de la pared del ojo del huracán.

Las rachas son las que más daños ocasionan. El valor de las rachas con sólo 1 a 3 seg de duración puede alcanzar 1.3 a 1.5 veces el valor del viento máximo sostenido. Los vientos dañinos comienzan mucho antes de que el centro de la tormenta haga su entrada en tierra, por lo que las medidas de prevención deben estar completadas desde mucho antes de que llegue a tierra el centro del ciclón tropical.

Los vientos de intensidad de huracán también pueden dañar los edificios altos debido a que la fuerza del viento puede aumentar con la altura hasta en una categoría de la escala Saffir-Simpson.

### Lluvias

La lluvia asociada a los ciclones tropicales no se relaciona con la intensidad de ellos. Las lluvias intensas en los sistemas más débiles ocurren, por lo general, en el semicírculo derecho y se pueden extender muy lejos de la región central, mientras que en los más intensos tienden a concentrarse alrededor de la pared del ojo y en las bandas espirales. Los factores fundamentales que dominan la cantidad de lluvia caída son la velocidad de traslación del ciclón y el tamaño del área de lluvias. En el caso de un ciclón que afecta un área terrestre se incluye, además, la orografía.

Los ciclones tropicales con frecuencia producen grandes cantidades de lluvias y las inundaciones pueden ocasionar un problema significativo, particularmente en las comunidades. Un huracán típico produce al menos entre 75 y 150 mm de lluvia por la zona en que ellos crucen. Las inundaciones resultantes causan considerables daños y pérdidas de vidas, especialmente en las áreas montañosas donde las fuertes lluvias ocasionan inundaciones repentinas y pueden ocasionar deslizamientos de tierra devastadores.

La segunda catástrofe natural de la historia de Cuba fue causada por este elemento, cuando el huracán Flora de octubre de 1963 tuvo un rumbo errático y lento sobre la zona oriental, este dejó caer en sólo tres días la cantidad de lluvia promedio de un año, con valores de 1 800 mm, por lo que causó terribles inundaciones con el triste saldo de la pérdida de 1 200 vidas.

### Tornados

Los tornados generados por los ciclones tropicales que entran en áreas terrestres pueden causar destrucciones enormes. Según el ciclón tropical se mueve tierra adentro, los tornados se desarrollan en el borde derecho del sector delantero. Sin embargo, a menudo también se forman en otras partes del ciclón, lejos del centro, asociados a las bandas de lluvia intensa.

Los daños causados por los tornados son muy superiores a que los ocurren por los propios vientos de la circulación del ciclón tropical, aunque éste sea huracán, pero estos daños se localizan en zonas pequeñas. Usualmente los tornados están enmascarados al observador por el sonido del viento y la lluvia del huracán, pero después se observan sus daños. Durante el huracán Wilma de 2005, a pesar de que su centro no cruzó por Cuba, fueron reportados cinco tornados en San Juan y Martínez, Pinar del Río, con gran daño en un área muy localizada.

Otras consecuencias peligrosas que no están relacionadas directamente con la tormenta son los fuegos generados por la caída del tendido eléctrico, además de los accidentes, ataques cardíacos y derrames químicos, que pueden empeorar las condiciones de un potencial desastre.

### Descripción del paso de un huracán por una localidad. Características encontradas en el ojo

Es interesante describir qué percibirá un observador situado en una localidad por donde cruzará un huracán, a medida que éste se acerca. El observador verá que de hora en hora se incrementa la frecuencia y la intensidad de los chubascos y tormentas eléctricas, los vientos van aumentando y el tiempo, en general, va deteriorándose rápidamente. Después vendrá el huracán en toda su intensidad, y si el ojo pasa por la localidad, entonces abruptamente vendrá la calma, saldrá el Sol si es de día o se vean las estrellas y la luna si es de noche, pues el cielo estará despejado o con nubes altas, un cierto tiempo después, volverá el huracán con toda su furia, y a veces lo peor ocurre después de pasar el ojo. Esta descripción será mejor comprendida después que a continuación se analicen las distintas partes de la estructura del huracán.

Las partes principales de la estructura horizontal de un huracán son su centro u ojo, la pared del ojo y las bandas espirales de lluvia que conforman el cuerpo del huracán. El aire se mueve hacia el centro en espiral, en dirección generalmente contraria a la de las manecillas del reloj, y sale por arriba, a alturas entre 5 y 10 km en la dirección opuesta.

### Centro u ojo del huracán

El ojo no existe en los estadios de depresión tropical y tormenta tropical. Aparece en el primer estadio del huracán, a veces cercano a la Categoría 2. Esto ocurre porque es necesaria una velocidad apreciable del viento que genere en el centro de rotación una zona donde las fuerzas se equilibren, y el aire desciende seco y más cálido, formando la zona sin nubes del ojo. El ojo puede medir entre 30 y 60 km de diámetro.

Pared del ojo

La densa pared de tormentas eléctricas y chubascos que rodean al ojo, es la zona de mayor convergencia del aire superficial, por tanto es donde se encuentran los vientos más intensos del huracán. Un cambio en la estructura del ojo y la pared de este durante cualquier momento de la vida de un huracán, puede alterar la velocidad del viento, que es una indicación de la intensidad del sistema. El diámetro del ojo puede aumentar o disminuir en tamaño y es posible que se formen dos paredes concéntricas alrededor de este. En los sistemas débiles pueden aparecer hasta dos y tres ojos o centros de circulación, pero por poco tiempo.

Bandas espirales

Las bandas de lluvias externas del huracán, cuyos vientos a menudo alcanzan intensidad de huracán o de tormenta tropical, pueden extenderse a varios cientos de kilómetros del centro. A veces estas bandas y el ojo quedan ocultos por las nubes altas, en estos casos puede resultar difícil para el pronosticador usar las imágenes de satélite para seguir el movimiento del ciclón, sobre todo de noche.

Agrupamiento de los ciclones tropicales en el tiempo

Los ciclones tropicales tienden a agruparse en el tiempo. Se pueden observar entre 10 y 20 ciclones al nivel global en algunas semanas, y esos períodos activos están separados por un período equivalente de actividad ciclónica mucho más reducida. Los períodos activos e inactivos de unos 15-30 días de duración se alternan. El ciclo de 30-60 días en la actividad ciclónica tropical tiene relación con la *Oscilación Maden-Julian* (MJO por sus siglas en inglés), especialmente en la variabilidad de los ciclones nombrados en la franja tropical hasta los 20° de latitud.

Los ciclones tropicales más intensos tienden a desarrollarse cuando la MJO favorece la precipitación. A medida que la MJO avanza hacia el este, la región favorable para la actividad ciclónica también avanza hacia el este desde el Pacífico occidental hacia el oriental y el Atlántico. Si bien esta relación parece fuerte, hay que tener en cuenta que la MJO no es el único factor que contribuye al desarrollo de los ciclones tropicales.

Influencia del Evento El Niño / Oscilación del Sur (ENOS)

El factor fundamental para que decline la actividad ciclónica durante los años en que hay un evento ENOS en desarrollo se debe al incremento de la cizalladura del viento.

En los años de ENOS los patrones de viento se distribuyen de tal forma que la cizalladura vertical se incrementa sobre el Caribe y el Atlántico, lo que contribuye a evitar que los disturbios tropicales se desarrollen. La actividad ciclónica en el Atlántico norte es más sensible a la influencia de El Niño que el resto de las cuencas ciclogénicas del planeta. Con la presencia de este fenómeno se produce una reducción sustancial en el número de ciclones tropicales, especialmente en bajas latitudes, y en la intensidad de esos sistemas.

En el Pacífico nororiental la frecuencia de los huracanes se incrementa durante los años ENOS, debido al incremento de la temperatura del mar, la cual se asocia con el potencial máximo de la intensidad de los ciclones tropicales.

En el Pacífico occidental la cantidad total de ciclones tropicales varía poco durante los ciclos del ENOS. Sin embargo, hay un desplazamiento hacia el este de los centros primarios de la actividad ciclónica tropical durante los años ENOS. En el Pacífico noroccidental la frecuencia se incrementa durante los años ENOS en su porción norte. La actividad en el Mar de la China meridional tiene una relación inversa, experimentándose un decrecimiento de la actividad en los años ENOS. Además, en el Pacífico noroccidental la actividad ciclónica decrece un año después de manifestarse el ENOS, excepto en el Mar de la China meridional.

Los análisis realizados de los ciclones tropicales en el Océano Índico hasta el presente no indican que existan relaciones entre el ENOS y la frecuencia de los ciclones tropicales o la ubicación de éstos.

Hay notables diferencias entre las causas físicas del ENOS que inducen a la variación de los ciclones tropicales entre las regiones atlántica y australiana. Mientras que el fortalecimiento de los oestes superiores y la cizalladura vertical son los mecanismos que reducen la actividad ciclónica en el Atlántico en los años ENOS, las diferencias de la temperatura superficial del mar y la presión superficial son los enlaces físicos fundamentales en la región australiana. Aquí las anomalías frías de temperatura superficial del mar y las altas presiones barométricas acompañan a los eventos El Niño, los cuales se relacionan con la disminución de la frecuencia de los ciclones en el área australiana del Mar Coral. El Niño no es una causa significativa de la alteración de la temperatura superficial del mar en el Atlántico ni de la presión superficial.

Un fenómeno antagónico al ENOS se manifiesta cuando se produce un enfriamiento de las aguas del Pacífico ecuatorial oriental, conocido como La Niña. Cuando se encuentra en evolución este evento el efecto es contrario, pues incentiva la actividad ciclónica en aquellas cuencas, como la atlántica, en las que el ENOS la inhibe y viceversa.

Modulación de los ciclones tropicales por la Oscilación Cuasi Bienal (QBO) del viento

Además del ENOS, otro parámetro meteorológico de escala global de importancia, que está relacionado con las tendencias estacionales en la frecuencia de los ciclones tropicales es la *Oscilación Cuasi Bienal* del viento estratosférico. Durante la fase este, en los sistemas que se mueven al oeste dentro de los 20° de latitud al norte y sur del ecuador se inhibe el desarrollo y la intensificación. En la fase oeste se estimulan la formación y la intensidad.

La causa física son los procesos contrastantes de la ventilación del viento horizontal estratosférico sobre el huracán. Durante la fase este, el valor absoluto de los vientos estratosféricos entre los 10-15° N es más fuerte del este. Esta condición causa advección neta de los elementos de la estructura del huracán, que se extienden hasta la estratosfera baja desde el centro del mismo.

Esta advección relativa restringe la contribución estratosférica al desarrollo y la intensificación del huracán. Mientras que en la fase oeste el valor absoluto del viento zonal estratosférico sobre los huracanes es débil. En este caso en la estratosfera baja ocurre una ventilación del viento horizontal pequeña.

En el Atlántico norte la frecuencia de los ciclones tropicales y los huracanes se incrementa durante la fase oeste y disminuye en la fase este.

En el Pacífico occidental se produce una disminución modesta de la frecuencia total de los ciclones tropicales durante la fase oeste de la QBO, especialmente en la región australiana. Aunque estas relaciones son débiles, la relación opuesta con la cuenca atlántica puede deberse a las diferencias en el régimen del viento zonal en la troposfera superior entre los dos océanos. Sin embargo, los tifones intensos tienen preferencia en gran parte del Pacífico occidental por la fase oeste de la QBO. Esta relación aún no se comprende bien.

Oscilación Multidecadal del Atlántico

La *Oscilación Multidecadal del Atlántico* (AMO por sus siglas en inglés) es una serie continua de cambios de larga duración en la temperatura superficial del mar en el Atlántico norte, con fases frías y cálidas que en los últimos 15-40 años han tenido una diferencia extrema de aproximadamente 0.5° C. Estos cambios son naturales y han estado ocurriendo en al menos los últimos 1 000 años.

La frecuencia de las tormentas tropicales y huracanes débiles no está correlacionada fuertemente con la AMO. Sin embargo, durante las fases cálidas el número de tormentas tropicales que llegan a ser huracanes intensos es significativamente mayor que durante las fases frías, al menos lo duplica.

Desde que la AMO cambió a su fase cálida cerca de 1995, los huracanes intensos se han hecho más frecuentes. Basado en la duración típica de fases negativas y positivas de la AMO, el régimen cálido actual persistirá al menos hasta el 2015 y no se extenderá más allá del 2035.

Variaciones y tendencias de la actividad ciclónica

Mientras que el número de tormentas se ha incrementado en el Atlántico desde 1995, esto no parece ser una tendencia global, ya que el número anual de ciclones tropicales se mantiene entre los 80 y 100.

Los récords muestran un incremento en el número e intensidad de los huracanes intensos. Sin embargo, los expertos consideran todavía dudosos los datos anteriores a la era de los aviones de reconocimiento y de los satélites meteorológicos, ya que la destrucción de los barcos y la entrada de los huracanes por áreas con poca densidad de población limitaron el número de huracanes intensos en los registros oficiales antes de esa era.

El número y la fuerza de los huracanes del Atlántico pueden experimentar ciclos multidecadales (50-70 años). El récord de 21 tormentas tropicales desarrolladas en 1933 fue roto en 2005, cuando se desarrollaron 28 tormentas tropicales y en ese mismo año se estableció el récord de 15 huracanes, por lo que dejó atrás el de 12 ocurrido en 1969.

Durante el primer cuarto del siglo XX la ocurrencia de huracanes en el área tuvo un mínimo, después de un período muy activo entre 1870 y 1899. Otro período activo ocurrió entre los años 30-60, seguido por un período menos activo que duró hasta mediados de la década de los años 90. Un nuevo período de alta actividad ciclónica se inició desde 1995. En toda la cuenca atlántica ha habido una tendencia al incremento de dicha actividad, dado fundamentalmente por el aumento continuado en el trimestre agosto-octubre, el más activo de la temporada ciclónica.

Antes de la era del satélite, iniciada en 1961, pudieron dejar de registrarse oficialmente algunas tormentas o huracanes, si no se encontraba algún barco cerca de ellos que reportara información. Sin embargo, se ha determinado la ocurrencia de temporadas activas antes de que los satélites cubrieran toda la cuenca atlántica, lo que ahora le facilita a los pronosticadores observar todos los ciclones tropicales. Esto confirma la periodicidad de los ciclones tropicales en la región atlántica.

La actividad de los huracanes que se originan en el Caribe y que alcanzan esa categoría en el área también experimenta oscilaciones multidecadales. Se produjo una tendencia significativa al decrecimiento hacia la década de los años 80, y después una recuperación del número de huracanes desde la década de los años 90, además de los huracanes intensos.

La cantidad de huracanes que se trasladan por el Caribe provenientes del Atlántico tuvo una tendencia significativa a la disminución, la cual es marcada en agosto durante los últimos 40 años. La década de 1890-1899 fue la más frecuentada y tuvo la mayor cantidad de años consecutivos de afectación, mientras que la de 1950-1959 fue la más relevante en cuanto a los huracanes intensos. El tránsito de los huracanes por el Caribe también presenta oscilaciones de bajas y altas frecuencias interdecadales.

¿Efectos del calentamiento global?

El cuestionamiento científico sobre los efectos del calentamiento global en los ciclones tropicales es si la frecuencia, distribución geográfica e intensidad de los ciclones tropicales podrán cambiar en el futuro. La comprensión actual sugiere que globalmente hay un potencial para que la intensidad de los ciclones tropicales se incremente con el calentamiento global. Pero algunos modelos indican que la frecuencia de los ciclones tropicales al nivel global es probable que disminuya. No obstante, este escenario global medio puede enmascarar la variación regional, ya que algunas áreas del planeta pudieran incrementar la frecuencia, intensidad y riesgo de estos eventos.

Hasta la fecha las investigaciones no han sido capaces de demostrar un enlace causal entre el incremento de la intensidad y la frecuencia de los ciclones tropicales con el calentamiento global. Sin embargo, esto no significa que este enlace no exista. En estos momentos la información disponible no permite afirmar que el incremento de la actividad ciclónica de 2005 se debe al cambio climático.

El tercer reporte del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) incluye predicciones de un incremento de 5-10% en la intensidad de los ciclones tropicales en el presente siglo. Muchos estudios sugieren

que habrá menos organismos de este tipo al nivel global. Sin embargo, un número de estudios, pero no todos, muestran más ciclones tropicales en el Atlántico norte.

Se considera que el incremento de la temperatura superficial del mar conllevará a más ciclones tropicales, sin embargo este no es el único factor importante para la formación de esos sistemas. Los ciclones tropicales también dependen de las condiciones que existan en la atmósfera superior.

Hay estudios que indican que habrá menos ciclones en el futuro debido a los cambios en la circulación atmosférica. En particular, en las regiones donde la cizalladura del viento en altura se incrementa conllevará a menos ciclones tropicales.

Los modelos de resoluciones más altas indican que los ciclones incrementarán su intensidad o que la proporción de los huracanes intensos se incrementará (aún si el número de ciclones tropicales decrece). Los modelos de más bajas resoluciones predicen un decrecimiento en el número y un ligero incremento en la intensidad.

Un estudio publicado en 2005 por Kerry Emanuel mostró que los ciclones tropicales en el Atlántico y el Pacífico norte han incrementado la intensidad desde 1970. Otro estudio realizado por Webster mostró que el número de huracanes de categorías 4 y 5 a nivel global casi se ha duplicado desde esa fecha, pero no ha habido un incremento de la intensidad en muchos de los huracanes intensos. Otros estudios muestran que no hay cambios en la intensidad o que la intensidad ha decrecido en otras cuencas oceánicas. Emanuel y Webster explican en parte el incremento en la energía destructiva de los ciclones tropicales por el aumento de la temperatura superficial del mar, pero el incremento de la temperatura superficial del mar no puede explicarlo todo.

No hay observaciones confiables de la intensidad de los ciclones tropicales antes de 1970, lo que dificulta distinguir una señal de cambio climático hecha por el hombre de la variabilidad natural. Por ejemplo, las fluctuaciones en el Atlántico norte parecen estar dominadas por las variaciones de la temperatura superficial del mar.

El profesor William Gray sostiene ese criterio, y atribuye el aumento presentado en la cantidad de huracanes intensos al incremento multidecadal en la fortaleza de la circulación termohalina (cambios multidecadales conocidos como AMO), que no está directamente relacionada al incremento global de la temperatura. Considera que los cambios en la salinidad del océano es el mecanismo impulsor. También plantea que: «otros factores como la cizalladura vertical del viento troposférico, la cizalladura horizontal en los niveles bajos, la humedad en los niveles medios, la fortaleza de la vaguada ecuatorial del Atlántico juegan roles mucho más dominantes en la variabilidad mensual y estacional de los huracanes en el Atlántico. Además, que la intensidad de los huracanes es también función del tamaño de la pared del ojo, la profundidad de la capa de mezclamiento del océano, el movimiento y otros factores que no necesariamente se relacionan con la temperatura superficial del mar o con los cambios de los gases de invernadero.»

En resumen, sobre este problema hay una gran incertidumbre en la comunidad científica y no existe una respuesta definitiva a si el incremento de la actividad ciclónica observado en la región atlántica obedece ya al calentamiento global, o es el resultado de una variabilidad natural, beneficiado en parte por el aumento tanto cualitativo como cuantitativo de las técnicas de observación.

### Ciclones tropicales de Cuba

Una de las cuestiones más importantes relacionadas con el clima de Cuba es la afectación por ciclones tropicales. Al considerar las tormentas o huracanes cuyos centros cruzaron sobre el territorio cubano y aquellos que tuvieron un impacto notable sobre las condiciones del tiempo, pero sus centros no cruzaron sobre nuestro país durante el período 1899-2005, se tiene que Cuba es afectada cada año por un ciclón tropical (tormentas tropicales + huracanes) y por un huracán cada dos años.

La afectación de los ciclones tropicales a Cuba también tiene una marcada estacionalidad (ver Fig. 22). En octubre se presenta la mayor frecuencia de afectación, seguido por septiembre y agosto, respectivamente. La mayor parte de los huracanes se originaron en el Mar Caribe, mientras que

los restantes lo hicieron en el Océano Atlántico. Ningún huracán originado en el Golfo de México ha afectado el territorio nacional al menos desde el siglo XX.

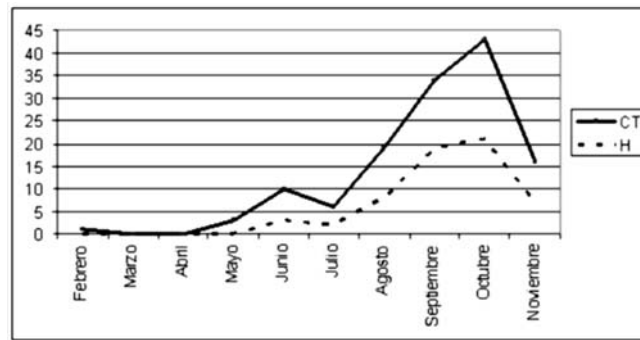


Fig. 22. Número de ciclones tropicales y huracanes que afectaron a Cuba por meses durante el período 1899-2005.

En junio las trayectorias de los ciclones tropicales que han azotado a Cuba presentan una marcada componente meridional, en su mayoría se originan sobre el Caribe occidental. El más notable de ellos fue el huracán Alma de 1966, que cruzó al oeste y muy cerca de Ciudad de La Habana, donde produjo vientos máximos del orden de los 180 km/h.

Las trayectorias de los ciclones tropicales que han azotado al país en julio presentan una componente aproximada hacia el oeste-noroeste, con una procedencia más oriental que en junio. Julio es el mes de menor afectación de los organismos ciclónicos a Cuba, y sólo la han azotado dos huracanes desde 1899, en los años 1933 y 2005. El último huracán que influyó en ella fue Dennis (Categoría 4) durante los días 7-9 de julio de 2005. Dennis es el único huracán intenso que ha afectado al país en este mes.

En agosto la influencia de los ciclones tropicales se extiende por todo el territorio, con la supremacía para la región occidental (81%). Dada la característica que presenta el movimiento de estos meteoros en esta época del año conlleva a que hallan sistemas que atraviesen la Isla longitudinalmente, y en algunos casos penetren en tierra por su costa norte.

Los huracanes de mayor significación han sido el que influyó en 1915 durante los días 14 y 15 sobre el extremo occidental, y recientemente en el 2004 el huracán Charley que cruzó por la parte occidental de las provincias habaneras entre los días 12 y 13. Ambos huracanes fueron de Categoría 3.

En septiembre la influencia también es sobre toda Cuba, pero conserva la preferencia la región occidental. En este mes se destaca el huracán de Nueva Gerona de 1917 (Categoría 4), que afectó el día 15 la Isla de la Juventud y la porción este de Pinar del Río, este registró la presión mínima de 939 hPa. Otros huracanes notables fueron el huracán de Sagua la Grande de 1933 y el huracán de Cienfuegos de 1935.

El último huracán que afectó el territorio cubano en esta época del año fue Iván en la temporada ciclónica de 2004.

En octubre las trayectorias de los ciclones tropicales que influyen sobre Cuba presentan una componente meridional, la mayoría se origina sobre el Caribe occidental. La región más expuesta a la influencia de estos sistemas es la occidental, incluyendo la Isla de la Juventud. Por ser el mes de mayor frecuencia de afectación, tanto de ciclones tropicales como de huracanes intensos (ver Tabla 3), se caracteriza como el mes más interesante de la temporada en nuestro país.

Tabla 3. Huracanes más intensos (Categorías 4 y 5) que han afectado a Cuba (1799-2005). Se incluyen el huracán de San Marcos y Flora por la magnitud del desastre que ocasionaron

Nro.	Nombre	Año	Mes	Día	Categoría
1	La Tormenta de san Francisco de Asís	1844	Octubre	4-5	4
2	La Tormenta de San Francisco de Borja	1846	Octubre	10-11	5
3	Huracán de San Marcos	1870	Octubre	7-9	3
3	Huracán de Pinar del Río	1882	Octubre	7-9	4
4	Huracán de los 5 días	1910	Octubre	14-18	4
5	Huracán de Nueva Gerona	1917	Septiembre	25	4
6	Huracán sin Precedentes	1924	Octubre	19	5
7	Huracán del 26	1926	Octubre	20	4
8	Huracán de Santa Cruz del Sur	1932	Noviembre	9	5
9	Huracán del 44	1944	Octubre	18	4
10	Fox	1952	Octubre	24	4
11	Flora	1963	Octubre	4-8	2
11	Michelle	2001	Noviembre	4-5	4
12	Iván	2004	Septiembre	13	4
13	Dennis	2005	Julio	7-9	4

La Tormenta de San Francisco de Borja se consideraba en 1872 como la mayor de que se tenía memoria en La Habana, característica que aún se mantiene por ser la más intensa que haya azotado a Cuba. Este huracán de Categoría 5 tuvo una oscilación barométrica de 85.3 hPa en 10.5 horas, registró una presión de 916 hPa, la más baja hasta el presente en el área de Cuba.

Otro huracán de Categoría 5 azotó en 1924 y se conoce con el nombre de Huracán sin Precedentes. Dos huracanes de Categoría 4 muy recordados son los de 1926 y 1944. Además del Flora, que a pesar de haber afectado como un huracán de Categoría 2 en 1963 ocasionó un terrible desastre por las torrenciales lluvias que produjo sobre el oriente cubano y su prolongado azote durante 5 días. Este organismo igualó la permanencia sobre una misma región al Huracán de los 5 días de octubre de 1910. Flora es la segunda catástrofe natural en la historia de Cuba al ocasionar más de 2 000 muertes.

El último huracán que cruzó en este mes sobre el territorio cubano fue Lili (Categoría 2), que afectó el día primero de octubre de 2002 a la Isla de la Juventud y Pinar del Río.

La mayoría de los ciclones tropicales que han cruzado sobre Cuba en noviembre se han originado en el Caribe, y en ellos predominaron trayectorias con componente meridional. El huracán más intenso que afectó a Cuba en este mes fue el Huracán de Santa Cruz del Sur (Categoría 5), tristemente recordado por ser la mayor catástrofe natural en la historia de nuestro país. Afectó el 9 de octubre de 1932 directamente a Camagüey y la presión barométrica descendió en Nuevitas hasta 940 hPa. Los vientos huracanados duraron unas 8 horas, con acumulados de hasta 300 mm de lluvias en 24 horas. La marea de tormenta de este organismo arrasó con la población de Santa Cruz, ocasionó más de 3 000 muertes.

El último huracán que azotó a Cuba en este mes fue Michelle en la temporada 2001, el cual atacó con fuerza a la Isla de la Juventud, Cienfuegos, Villa Clara y Matanzas.

El número de ciclones tropicales que afecta anualmente a Cuba es muy variable, con totales que van desde cero hasta seis (1909) y el de huracanes desde cero hasta cuatro (1886 y 1909). Además de la variabilidad interanual, también hay períodos de altas y bajas frecuencias de afectación, que se alternan. El número total de ciclones tropicales (ver Fig. 23) entre 1900 y la década de los años 30 conformaron períodos de elevada actividad y en el caso de los huracanes en el siglo XX fueron los años 1900 y los comprendidos entre 1940 y 1949, así como 1950 y 1951 (ver Fig. 24). Con respecto a estos últimos, sobresale la década de los años 20 y el período 1973 a 1994 como componentes de los dos períodos principales de poca actividad.

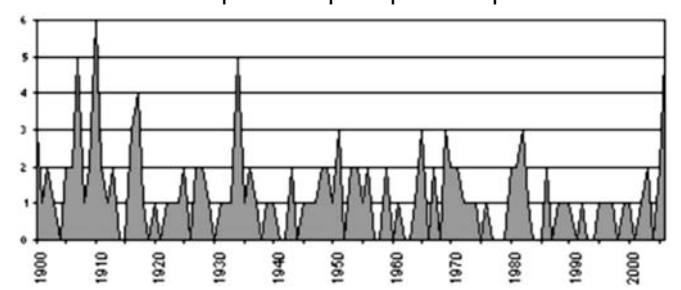


Fig. 23. Frecuencia anual de los ciclones tropicales que afectaron a Cuba durante el período 1899-2005.

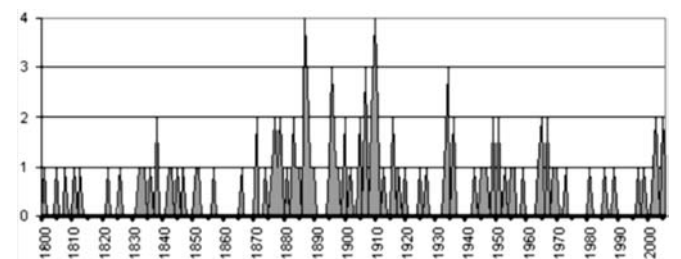


Fig. 24. Frecuencia anual de los huracanes que afectaron a Cuba durante el período 1799-2005.

La disminución observada en ese último período de baja afectación, no impidió la ocurrencia de efectos desastrosos como fueron los casos de los ciclones tropicales Frederic (1979), Alberto (1982) y Kate (1985) por las torrenciales lluvias de los dos primeros y la gran área que afectó el último, dada las características de su trayectoria.

Entre 1909 y 1952 (44 años) afectaron 12 huracanes intensos de los 14 presentados en el siglo XX, lo que guarda

cierta similitud con el brote de tormentas intensas ocurrido en el período 1844-1888 (45 años) durante el cual afectaron 8 de los 11 huracanes intensos del siglo XIX.

Un nuevo período activo se inició desde 1996, en el que han afectado a Cuba ocho huracanes, cuatro de los cuales fueron intensos. Esos huracanes intensos se presentaron entre los años 2001-2005.

TECNOLOGÍA DEL SISTEMA DE VIGILANCIA DE LOS CICLONES TROPICALES

Introducción

El Programa de la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM, conocida en inglés como WWW) constituye la columna vertebral del programa general de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). En él se combinan los centros de procesamiento de datos, los sistemas de observación e instalaciones de telecomunicación bajo la dirección de los miembros, con el objetivo de facilitar la información meteorológica y geofísica con ella relacionada, que se necesita para suministrar servicios meteorológicos e hidrológicos eficaces a cada país.

También se incluye un Programa de Ciclones Tropicales en el cual participan más de 60 países, actividades de la OMM en materia de satélites, que ayudan a asegurar el suministro de datos y productos para hacer frente a las necesidades de los miembros, y un Programa de Instrumentos y Métodos de Observación, cuyo objeto es fomentar la normalización y desarrollo de la observación meteorológica y otras observaciones conexas.

El Sistema de Vigilancia de Ciclones Tropicales permite observar toda la trayectoria de estos peligrosos fenómenos, gracias a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) y a los Centros Meteorológicos Regionales Especializados (CMRE) de la OMM en Miami, Fiji, Nueva Delhi, Tokio, La Reunión y Honolulu. Los CMRE utilizan datos de satélites, buques, estaciones terrestres y radares para seguir la evolución de los ciclones y predecir su entrada en tierra con bastante exactitud. Estas actividades se coordinan entre todos los países mediante la Vigilancia Meteorológica Mundial y el Programa de Ciclones Tropicales de la OMM.

Ya desde comienzos del siglo XX se hacían observaciones del aire superior mediante globos pilotos, aerostatos, dirigibles y aeroplanos. En 1943 se realiza la primera observación meteorológica por radar.

La explotación de la tecnología en el Sistema de Vigilancia de los Ciclones Tropicales se ha desarrollado cada vez más desde la aparición de los satélites meteorológicos en la década de los años 60, que permitieron una visión global de los sistemas nubosos.

En la década de los años 90 del siglo XX se generalizó el empleo de las computadoras personales y la información de todo tipo a través de INTERNET. En estos últimos años aumentó el uso de los radares Doppler y de nuevos principios en los radares y satélites meteorológicos. El procesamiento de toda la información meteorológica se efectuó automáticamente en tiempo real. Estos hechos han contribuido al desarrollo de la ciencia meteorológica.

Existen dos preguntas clave para los meteorólogos tropicales:

- ¿Cuentan los pronosticadores y los investigadores con la información óptima para llevar a cabo su trabajo con las posibilidades estándar más altas?
- ¿La introducción de nuevas tecnologías basada en los satélites meteorológicos compensa el decrecimiento que paulatinamente han experimentado en los trópicos otras fuentes convencionales de datos, como son los vuelos de reconocimientos y los radiosondas?

La respuesta a estas interrogantes debe comenzar por señalar que la distribución de datos es en gran medida una función económica, y por lo tanto varía considerablemente entre las diferentes cuencas, entre los diferentes países e incluso con la hora, dentro de una misma región.

Por otra parte, los requerimientos para la observación de un pronosticador de ciclones tropicales son diferentes a

los de un investigador. El pronosticador trabaja con resultados en tiempo real y necesita dar una respuesta en muy breve tiempo; el investigador, con procesos físicos y necesita observaciones con gran densidad de todas las variables básicas (velocidad horizontal y vertical, temperatura, presión en superficie, altura geopotencial, humedad y temperatura del mar), además de los valores de toda una serie de variables adicionales (por ejemplo, tipo de vegetación, tipo de suelo, humedad del; suelo, etcétera) necesarias para las diferentes modelaciones numéricas.

El pronosticador utiliza no solamente las conclusiones cualitativas, sino también las estimaciones cuantitativas y los métodos particulares de pronóstico de las magnitudes meteorológicas. Para realizar los métodos de pronóstico del tiempo se requiere información primaria sobre el estado presente del tiempo que se refleja en las observaciones meteorológicas directas, e información secundaria sobre el tiempo en resúmenes, mapas, diagramas, cortes verticales, cortes temporales, mapas de nubosidad e información de los radares y satélites meteorológicos. Los pronosticadores, por su parte, necesitan de observaciones que puedan ser asimiladas en un análisis para deducir la localización y estructura de las circulaciones productoras de «tiempo». Ellos generalmente se auxilian para lograr sus objetivos, de sistemas observacionales de escala sinóptica (miles de kilómetros) y de mesoescala (escala de decenas de kilómetros).

Tener disponibilidad de numerosas observaciones de calidad se considera la columna vertebral de la meteorología moderna, pues sin éstas no es posible realizar un análisis apropiado y mucho menos un pronóstico razonable, sea éste numérico o de técnicas manuales.

Instrumentos convencionales. Estaciones automáticas

Los medios de observación en el caso de los ciclones tropicales son muy importantes para determinar el momento de formación, desarrollo e intensificación de estos organismos. Estos medios son: las estaciones de superficie y de sondeos del aire superior, los reportes de los barcos y boyas, aviones de reconocimiento, Dropsondas, radares y satélites meteorológicos (Fig. 25).

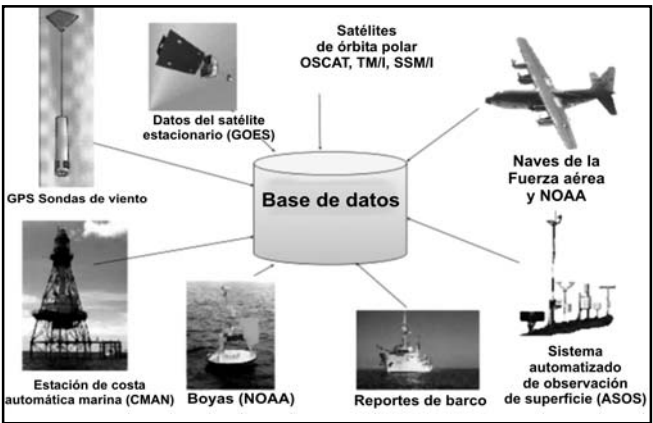


Fig. 25. Medios observacionales.

El costo de las observaciones, particularmente las de aire superior, se elevan cada día más, lo que provoca que la mayoría de los países en vías de desarrollo estén imposibilitados no sólo de obtener y explotar los equipos más sofisticados, sino de mantener los requerimientos más elementales.

Para los pronosticadores, los sensores remotos (satélites y radares) continúan al frente de los avances más recientes para observar y analizar los ciclones tropicales. Sin embargo, entre otras cosas, cuando se comparan las intensidades de estos organismos estimadas por satélites y las medidas por aviones de reconocimiento, se observa que a pesar de la gran utilidad de los satélites, estos no pueden sustituir los datos del avión, lo mismo sucede con los perfiles verticales de temperatura, humedad, etcétera. En la figura 26 se muestra la red satelital.

La triste realidad es que el alto costo de los aviones de reconocimientos (3 000 dólares por hora), ha llevado a su discontinuidad, excepto en la cuenca atlántica y el

nordeste del Pacífico en que aun vuelan aviones norteamericanos, aunque con restricciones. Los meteorólogos cubanos lograron realizar misiones en aviones de reconocimiento durante los años 1988 a 1990 mediante la colaboración Cubano-Soviética. La tripulación meteorológica de esas misiones aéreas era cubana y se lograron magníficos datos operacionales y de investigación durante la penetración en el centro de huracanes intensos como el Gilbert (1988) y el Hugo (1989).

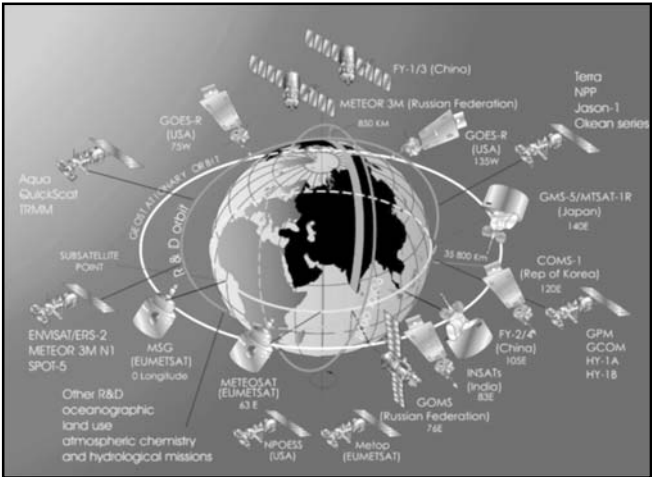


Fig. 26. Red satelital.

Gran parte de la energía utilizada para los movimientos divergentes es derivada de la liberación de calor latente, por lo tanto las observaciones del campo de humedad asumen un papel mayor que en las latitudes medias.

Otro factor que influye con gran peso en el problema observacional en los trópicos al analizar un ciclón tropical es la inclusión de diferentes escalas horizontales; para modelaciones numéricas realísticas se requiere de resoluciones del orden de 5 km en la vecindad del centro, de 20-50 km son apropiadas para observaciones fuera del núcleo interior y de 100-150 km para resolver el ambiente.

A pesar de la naturaleza limitada de las observaciones de superficie, una red de este tipo es fundamental en los trópicos para monitorear el océano y la atmósfera tropical en una escala amplia. Además reviste una gran importancia el uso de las observaciones de superficie en régimen horario durante el paso de los huracanes.

Por ejemplo, durante el acercamiento de un ciclón tropical a una región determinada se pueden hacer análisis de secciones transversales con los datos horarios de las estaciones meteorológicas. Estos análisis permiten tener una visión integral de la variación de los diferentes parámetros meteorológicos en una región dada durante la aproximación de un ciclón tropical, así como durante el paso del mismo.

De vital importancia es la observación de nubes bajas (las llamadas *fracto-cúmulos*) en la cercanía y durante el paso de un ciclón tropical, así como la dirección de los vientos, la tendencia de la presión barométrica y las condiciones de tiempo presente, pues el ciclón tropical se propaga como un todo y deteriora más rápidamente las condiciones del tiempo en la zona por donde cruzará su núcleo o región central.

La peor situación se presenta en las áreas oceánicas tropicales del hemisferio sur, donde por haber muy pocas observaciones meteorológicas se emplean las llamadas observaciones «artificiales» del campo de presión, basadas en interpretaciones subjetivas de los satélites. Los avances en este campo están ocurriendo principalmente por el desarrollo de pequeñas boyas a la deriva (pocas de larga vida en el trópico). Por otra parte se tiene, que el costo de las boyas fijas permanece muy alto, mientras que el uso de estaciones automáticas ha sido moderadamente exitoso. Las boyas se muestran en la figura 27 y la estación automática en la figura 28.

La configuración de una estación meteorológica automática puede variar de un lugar a otro, una instalación típica incluye los siguientes sensores: velocidad del viento, dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y lluvia. La unidad de control (*data logger*), instalada en una caja con protección para la intemperie, toma las señales de los sensores y se alimenta de una batería interna recargable con un panel solar opcional, ade-



más de electricidad de la red local. Los datos del *data logger* se pueden leer directamente con una computadora o bien con un módem por radio, teléfono fijo o móvil.

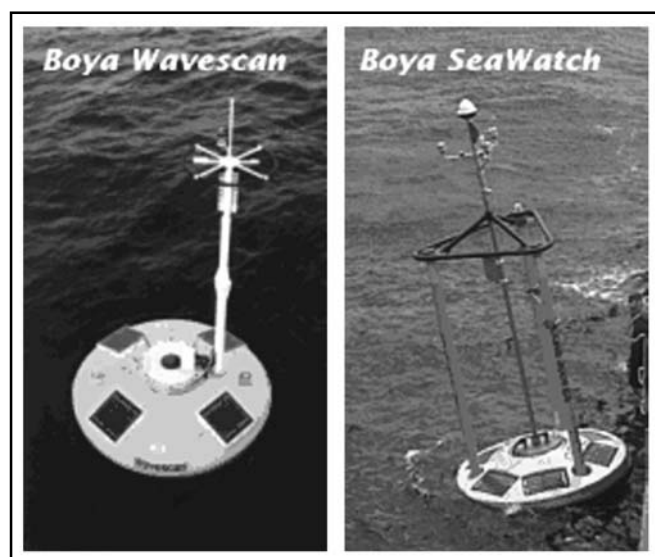


Fig. 27. Boyas.

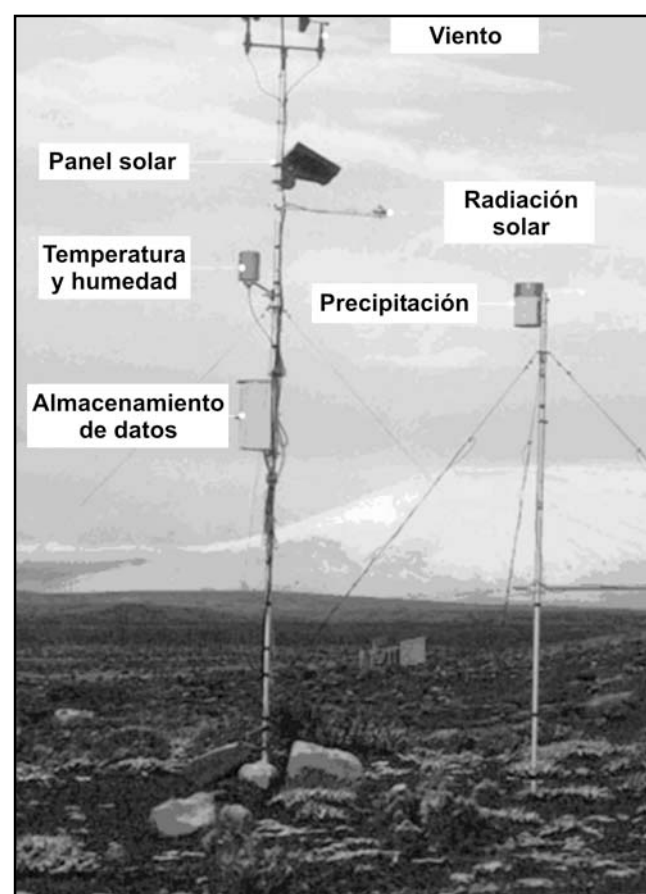


Fig. 28. Estación meteorológica automática.

En cada estación se incluye un programa de software de fácil utilización para ordenadores tipo PC. Este programa se basa en *Windows* e incluye la selección del tipo de sensor, rango de medida, frecuencia de lectura y formato de los datos de salida. El mismo programa se utiliza para leer los datos almacenados en la estación que pasan a una hoja de cálculo o bases de datos o formato ASCII. También se incluyen gráficos en tiempo real para los usuarios que lo necesitan.

El conjunto de sensores de velocidad y dirección de viento está diseñado para trabajar con *data loggers* multicanales inteligentes. Los sensores están contruidos en aluminio resistente a la corrosión y con una protección de poliuretano blanco para una mayor protección contra los rigores de exposición a condiciones ambientales extremas.

En Cuba se han instalado ya 20 estaciones meteorológicas automáticas que comienzan a brindar servicios a partir de la temporada ciclónica de 2006. Las mismas constan de un software para el procesamiento de la información y su transmisión creado por los técnicos del INSMET.

Resulta de gran importancia poder recopilar toda la información relacionada con el ciclón tropical, asentarla y ana-

lizarla mucho antes de la hora en que el pronosticador prepare y distribuya los Avisos.

En la práctica se observa la tendencia a la disminución del tiempo de procesamiento de los datos para poder tener acceso al diagnóstico de la situación meteorológica en el menor tiempo real posible.

Actualmente los datos meteorológicos son asentados rápidamente por máquinas ploteadoras o *software*, como los utilizados en las estaciones de trabajo del pronosticador. De esta manera se economiza el tiempo significativamente, aunque aún la presencia del hombre resulta vital cuando se trata de detectar errores, hacer correcciones y análisis que las máquinas por sí mismas no son capaces de realizar.

### Estaciones de trabajo (Workstations)

Las estaciones de trabajo (Figs. 29 y 30) en su sistema automático de pronóstico de ciclones tropicales incluyen:

- Un sistema de manejo de base de datos,
- capacidades para el análisis de los campos de variables meteorológicas,
- se sobreponen los campos gráficos de las diferentes variables,
- se hacen animaciones de los campos gráficos,
- modelos de pronósticos de tipo CLIPER y modelos climatológicos, y
- uso de interfase amigable.

Otras estaciones de trabajo incluyen también:

- Biblioteca de mapas de alta resolución para las diferentes cuencas,
- trayectorias de los ciclones tropicales y cálculo de las distancias a los objetivos,
- esquemas de verificación automática,
- capacidad para la preparación de los avisos,
- modelos numéricos de surgencia y modelos barotrópicos, e
- incorporación de sistema de expertos para la toma de decisiones.

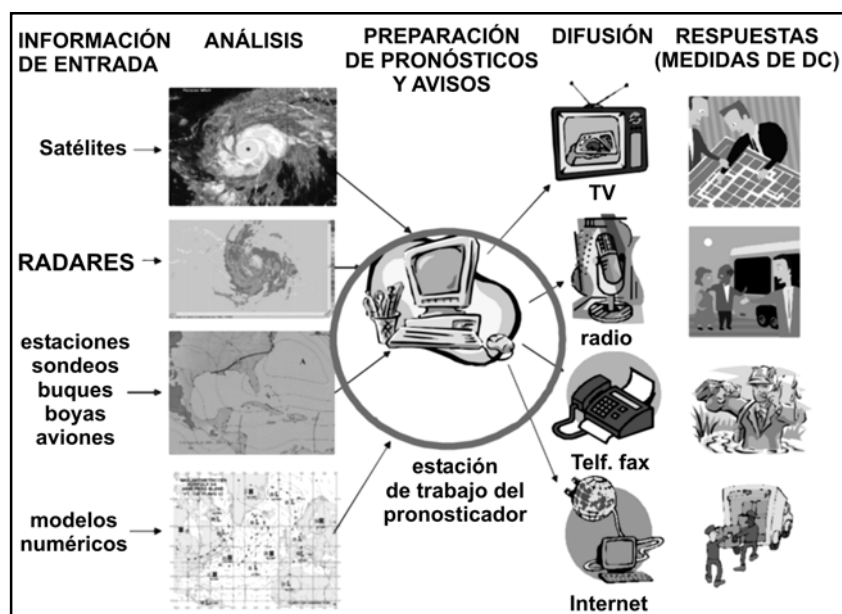


Fig. 29. Estación de trabajo.



Fig. 30. Estación de trabajo (Corobor). Centro Nacional de Pronósticos de Cuba.

Otro instrumento para la vigilancia del estado de la mar es el mareógrafo, pero el número existente de estos para monitorear las características de la surgencia, es generalmente muy inferior al necesario para calibrar y evaluar los modelos de surgencia. Ejemplo de ese instrumento se muestra en la figura 31.



Fig. 31. Mareógrafo.

Los radiosondas continúan siendo el principal instrumento para examinar la estructura vertical de los campos de temperatura, viento, geopotencial y humedad; sin embargo, el costo ha llevado a una gran disminución de los mismos en los trópicos. En gran parte del Caribe sólo se sondea una vez al día.

El radiosonda y el equipo terrestre conexo que se muestra en la figura 32 es un sistema de medida para la telemetría directa de los parámetros atmosféricos. Los parámetros normalmente medidos son la temperatura, la humedad y la presión atmosférica. Con la utilización de un radioteodolito o radar se pueden obtener también las

variables del viento en altitud. Las radiosondas también se utilizan para mediciones, con fines especiales, del ozono atmosférico, la radioactividad, el potencial eléctrico de la atmósfera, etcétera.

Las unidades de medida para las observaciones de radiosondeo de rutina, es el hectopascal (hPa) para la presión atmosférica, el grado Celsius o Centígrado (°C) para las temperaturas y el porcentaje (%) para la humedad relativa. La unidad de geopotencial es el metro geopotencial (mgs), aunque para efectos prácticos se considerará al metro geopotencial como la altura expresada en metros.

En lo que respecta a las mediciones de radiosondeo, los requisitos de exactitud difieren según las mediciones que se efectúen. En la mayoría de los casos será satisfactoria la determinación de la tempe-

ratura con una exactitud de 0.25°C, la humedad con 5% y la presión atmosférica con 1 hPa.

Los datos leídos por la sonda son rastreados desde la estación en tierra, con la ayuda de un dispositivo que tiene integradas las dos antenas: la antena de recepción de datos y la de posicionamiento de satélites. Los datos llegan en lapsos de dos segundos, por lo que se puede obtener información cada 10 m aproximadamente.

La sonda es una pequeña caja de aproximadamente 300 g de peso y que mide 5.5 cm de espesor por 15.5 cm en largo y 12.5 centímetros de ancho. Ver la figura 33 donde se esquematizan las partes y los sensores de la sonda. Tiene integrados sus dispositivos de medición de temperatura, presión y humedad, una antena externa que envía los datos a la estación en tierra, y una antena interna que ayuda a la determinación de la dirección y velocidad de los vientos. También consta de un compartimiento donde se resguarda la batería encargada de suministrar la potencia de 200 miliwatts para que puedan ser detectados los datos por la estación en tierra.

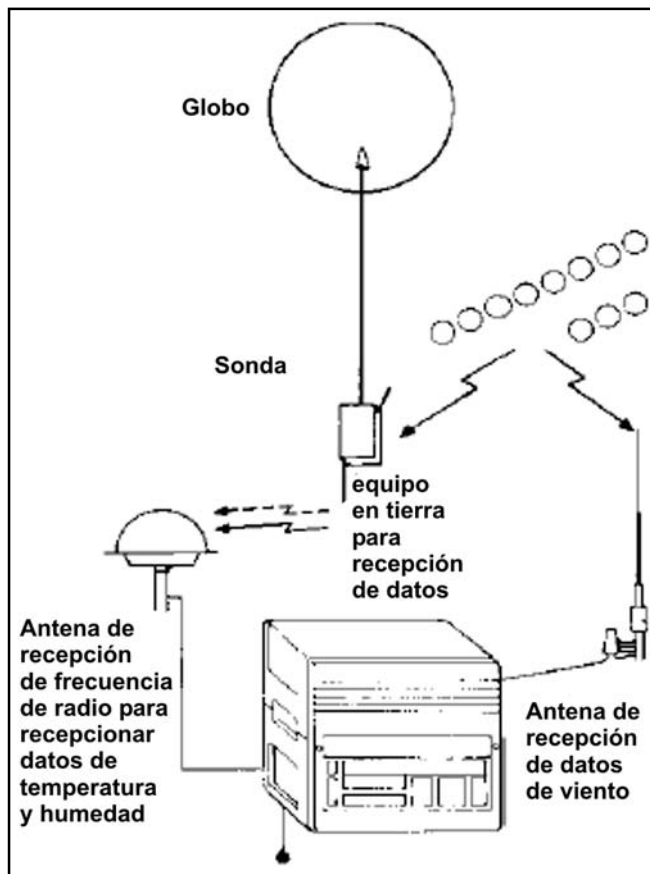


Fig. 32. Sistema de radiosondeo viento.

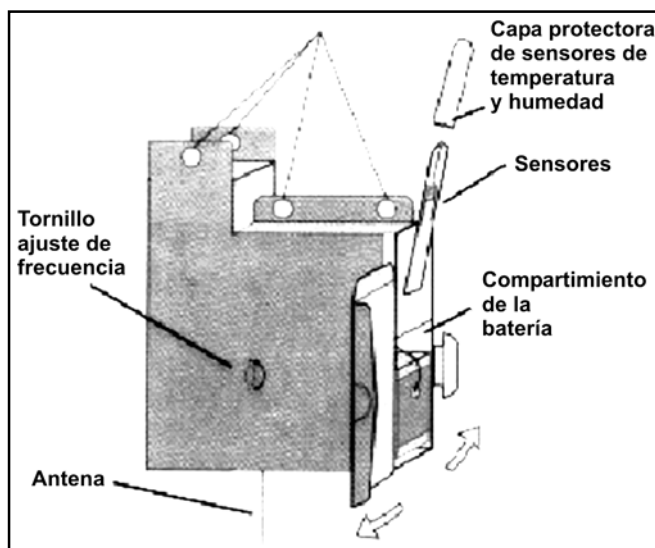


Fig. 33. Esquematiza las partes y los sensores de la sonda.

La caja de la sonda está debidamente protegida por un recubrimiento de unicel, lo cual la hace más ligera y evita lastimar a las personas en caso de que caiga en una zona poblada al descender después de reventar el globo.

La sonda consta de un sensor externo de temperatura y humedad, consistente en un capacitor de película delgada, el cual se dilata o contrae ante la variación de la temperatura. Un segundo capacitor determina los valores de humedad en función de la temperatura leída por el primero. La presión es medida mediante una cápsula aneroide dentro de la sonda, la cual se expande conforme el globo alcanza mayor altura; o se contrae, cuando éste se ha reventado y la sonda comienza a caer. Finalmente, los valores de viento son detectados mediante una antena integrada que tiene la sonda, que se encarga de rastrear la posición de los Satélites NavSTAR con respecto a la antena de la sonda. Para poder determinar los valores de vientos, la sonda tiene que registrar el posicionamiento de por lo menos cuatro de los 18 satélites visibles.

### El globo

Para que la sonda detecte los valores meteorológicos en diferentes estratos de la atmósfera es necesario elevarla a través de dichas capas, lo cual se consigue atándola a un globo que se irá levantando a través de la atmósfera hasta llegar a los 25 000 o 30 000 m de altura, que es suficiente para estimar el comportamiento de la atmósfera durante las próximas 24 horas.

El globo es de neopreno o de caucho sintético, que es un polímero altamente resistente a la humedad, bajas tem-

peraturas, ozono y radiaciones ultravioleta, además de ser elástico. El globo debidamente inflado con hidrógeno, llega a medir hasta 150 cm de diámetro máximo y es capaz de levantar un peso de 450 g, suficientes para vencer fuertes corrientes de viento y conseguir que se levante verticalmente. El cuello del globo es la parte más resistente de éste, es capaz de levantar un peso de hasta 18 kg sin dañar el caucho; su diámetro oscila entre los 10 y 15 cm y el espesor del globo debe aumentar conforme se aproxima al cuello. El globo meteorológico se muestra en la figura 34.

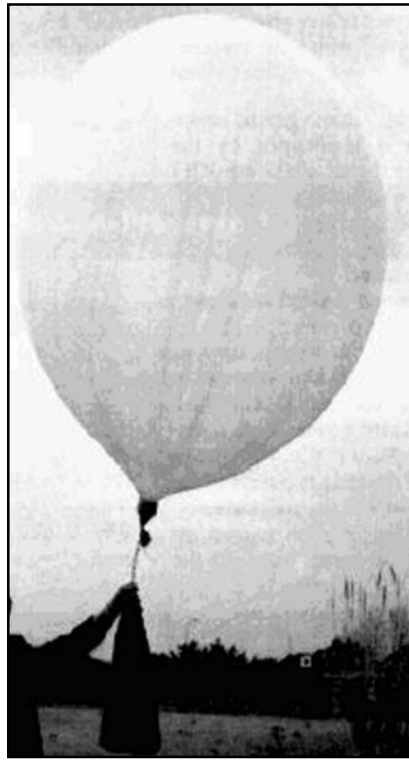


Fig. 34. Globo meteorológico.

Para que la sonda alcance alturas de hasta 30 km en un período no mayor de 90 min, que es el tiempo máximo que debe durar un radiosondeo, se estima que se requiere de un globo meteorológico de 800 g de peso y un diámetro de 160 cm (no inflado), capaz de levantar hasta 450 g (incluido el peso de la sonda) a una velocidad promedio de 5 m/seg.

El globo es inflado con gas hidrógeno; que es un gas ligero, fácil de obtener y que ocupa bastante volumen, lo cual es sumamente económico.

### Reconocimiento aéreo

Otra fuente importante de datos en los niveles altos la forma los reportes AIREP de los aviones comerciales. En los aviones a chorro comerciales se incrementa el uso del sistema AMDAR (*Aircraft Meteorological Data Relay*), el cual transmite observaciones frecuentes de viento, turbulencia y temperatura vía satélite.

Por todos los meteorólogos es conocida la importante información que se extrae de los vuelos de reconocimiento, tanto para determinar la posición, como para conocer rasgos de la estructura de un ciclón tropical; particularmente la mayoría de los conocimientos acerca de la región interior del ciclón tropical se ha obtenido con el análisis de las observaciones realizadas por aviones. Ejemplos de los aviones de reconocimiento se muestran en la figura 35.



Fig. 35. Aviones de reconocimiento.

Desde 1987 los vuelos de reconocimiento fueron retirados del Pacífico occidental y sólo se realizan este tipo de vuelo regularmente en el Atlántico y Golfo de México, aunque también pueden ser despachados a Hawai o al nordeste del Pacífico cuando un ciclón tropical se aproxima a esa zona. Los vuelos a cargo de la Fuerza Aérea de los EE.UU. se efectúan en una nave del tipo C-130, mientras que la NOAA tiene bajo su administración dos aviones del tipo P-3.

Las naves de la NOAA están equipadas con radares convencionales y *dopplers* que permiten estudiar la estructura del huracán a mesoescala y a escala convectiva. También tienen disponible un equipo de sondeo descendente Omega (*Dropwindsonde Omega*, ODW) con el cual se pueden obtener perfiles de viento, temperatura y humedad desde los 400 hPa hasta la superficie. El sistema de transmisión de datos satélite-nave y la estación de trabajo a bordo permiten el análisis y envío al Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) de las observaciones, incluyendo los patrones de reflectividad y las velocidades radiales *doppler* (Fig. 36).

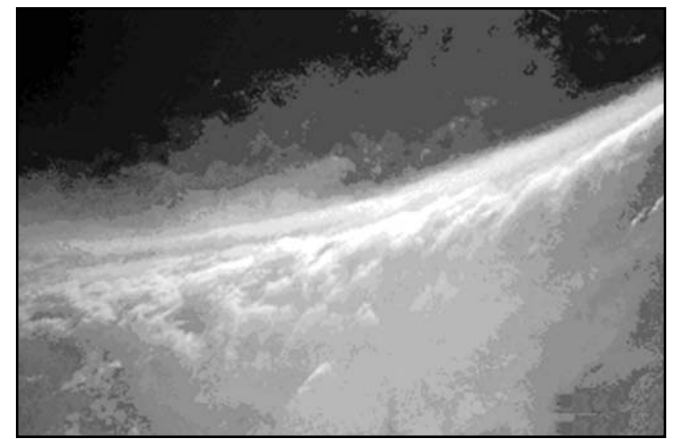


Fig. 36. Foto tomada por el Dr. P. Black (NOAA) cuando volaba dentro del ojo de un huracán.

Los reportes de los aviones de reconocimiento son simples bloques de una o dos líneas de datos en un código numérico. Ellos son normalmente enviados cada 30 min en ruta hacia y desde el huracán y también cuando vienen de vuelta. En las misiones de investigación de los niveles bajos, ellos deben obtener un solo reporte y enviarlo en la vecindad de la tormenta. Finalmente, este tipo de observación toma unas misiones de entrenamiento en ruta y otras de los vientos de la tormenta. Estos reportes de datos codificados son enviados desde el avión al Centro Nacional de Huracanes de los EE.UU.. Estos mensajes contienen la información meteorológica que incluye la presión, la temperatura, el viento, las nubes y la turbulencia.

Los mensajes abreviados y detallados del vórtice son transmitidos de una manera alfabética. En cada reporte, una letra del alfabeto es seguida por la información sobre el centro de la circulación del ciclón tropical. La información incluye latitud y longitud del centro, temperatura dentro y fuera del ojo de la tormenta, viento, presión mínima, etcétera. Estos mensajes con datos de aviones son distribuidos a todos los Servicios Meteorológicos Nacionales de la región, como procedimiento regular del Plan Operativo de Ciclones Tropicales en la AR IV, OMM.

### Monitoreo de los ciclones tropicales con los dropsondas GPS

Un dropsonda (Fig. 37) no es más que una radiosonda liberado desde el avión de reconocimiento (Fig. 38). Las observaciones son transmitidas desde la sonda y recibidas en el avión (Fig. 39). Realiza mediciones de la presión, temperatura, humedad y viento.

Los sondas GPS son utilizados:

- En misiones de la vigilancia sinóptica en el medio ambiente donde se mueve el huracán para mejorar el pronóstico de trayectoria.
- Sondeo en la pared del ojo del huracán para estimar la intensidad.

¿Por qué son necesarios los dropsondas?

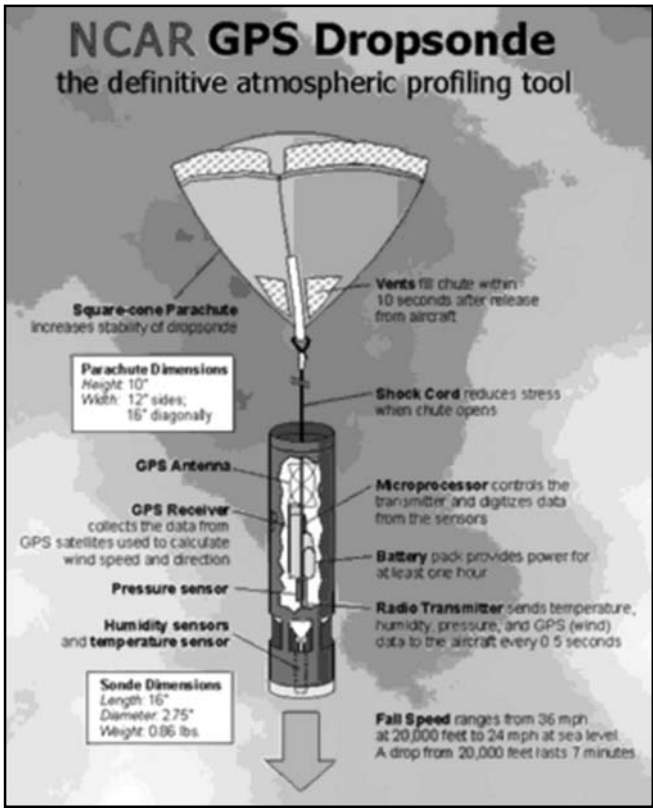


Fig. 37. Esquema de un dropsonda GPS.

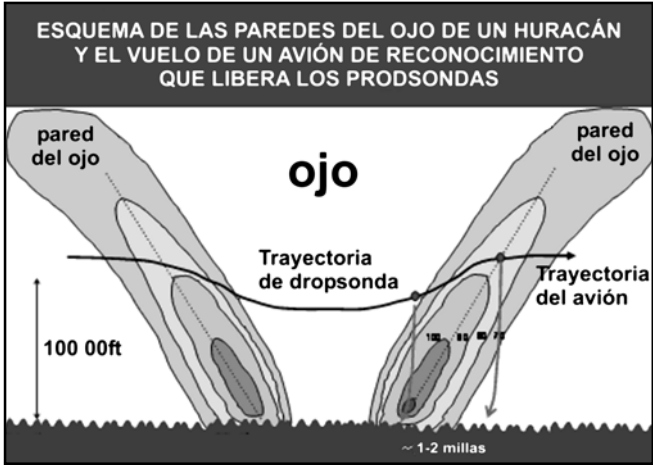


Fig. 38. Esquema del vuelo de un avión de reconocimiento que libera las dropsondas en las paredes del ojo del huracán.



Fig. 39. Dropsonda GPS liberado desde un avión.

Tabla 4. Precisión de los parámetros medidos por un dropsonda

Parámetro	Precisión
Presión	1 hPa
Temperatura	0.2°
Humedad Relativa	< 5 %
Viento	0.5 – 2.0 m/s

Un nuevo Jet para obtener datos desde los altos niveles se puso operacional en la temporada ciclónica de 1996 (ver figura 40).



Fig. 40. NOAA G-IV AIRCRAFT: Plataforma para la vigilancia meteorológica.

Una propuesta alternativa para obtener datos con aviones a costo menor es la utilización de aviones no piloteados tipos Aerosonde y Perseus, pero más que competitivos estos aviones son plataformas complementarias ya que ellas no pueden llevar equipos sofisticados (ej. radares doppler), ni penetrar a las áreas de vientos fuertes, pero son menos costosas y pueden realizar el vuelo durante mayor tiempo.

Técnicas de los radares meteorológicos

Una fuente alternativa, pero relativamente cara, es la obtención de perfiles verticales de viento mediante los radares doppler. Desde mediados de la década de los años 40 el radar se ha adaptado a la vigilancia meteorológica (Fig. 41). Actualmente la transmisión de datos digitalizados desde sitios remotos a los centros de pronósticos, composiciones de ecos detectados por diferentes radares y la animación de imágenes, proporciona una información muy útil al pronosticador. También pueden ser usados con fines meteorológicos en aviones y satélites.

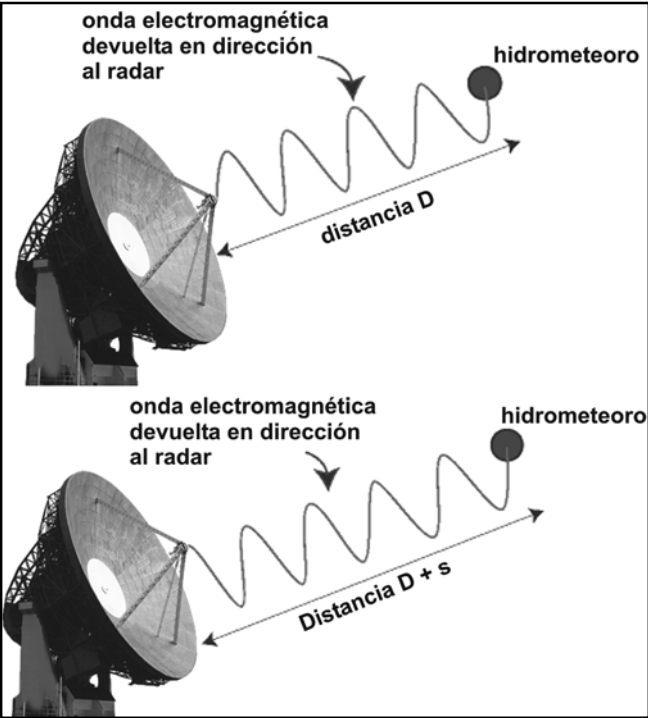


Fig. 41. Radar meteorológico.

Radar

Radar es una sigla inglesa que significa: «Radio Detection and Ranging» (detección y medición de distancias mediante ondas radioeléctricas). En primera instancia fue un dispositivo para localizar y determinar la distancia de objetos, tales como barcos o aviones, basado en la medición del tiempo que tarda en volver la señal, una vez reflejado en el objeto en cuestión, un impulso de radiofrecuencia que envía el propio radar. Actualmente el radar puede generar imágenes cuasireales y cuasitridimensionales, a partir de la tecnología militar de radares doppler con antena expandida por síntesis de software.

Dado que se conoce la velocidad de propagación de las ondas radioeléctricas (que es la velocidad de la luz) es relativamente fácil conocer la distancia a la que se encuentra el objeto.

En cuanto a la dirección en que se halla el objeto, se determina por el uso de antenas parabólicas que son altamente direccionales, por lo que sólo emiten y reciben en un ángulo muy pequeño.

El radar fue desarrollado principalmente en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial y supuso una notable ventaja táctica para la Real Air Force (RAF) en la Batalla de Inglaterra. Aunque fue desarrollado con fines bélicos, en la actualidad es una de las principales ayudas a la navegación con que cuenta el control de tráfico civil para poder tener una imagen del tráfico aéreo.

Los radares se dividen en función de la forma en que emiten la energía en radares de onda continua o de pulsos, los primeros se basan en el efecto doppler y pueden calcular la velocidad de un objeto en movimiento.

El radar Doppler mide la dirección y velocidad de un objeto en movimiento, por ejemplo, una gota de lluvia, así determina si el movimiento atmosférico horizontal es en dirección hacia o fuera del radar. El efecto Doppler mide la velocidad de las partículas. Toma el nombre de J. Christian Andreas Doppler, un físico austriaco.

El radar meteorológico, desde su introducción durante la Segunda Guerra Mundial, ha sido un potente medio para el pronóstico de los sistemas atmosféricos y la investigación meteorológica.

¿Qué es el efecto Doppler? Consiste en la variación de la longitud de onda de cualquier tipo de onda emitida o recibida por un objeto en movimiento. Doppler propuso este efecto en 1842 en una monografía titulada *Sobre el color de la luz en estrellas binarias y otros astros*.

Su hipótesis fue investigada en 1845 para el caso de ondas sonoras por el científico holandés Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot, confirmando que el tono de un sonido emitido por una fuente que se aproxima al observador es más agudo que si la fuente se aleja. Esto podemos apreciarlo en la vida diaria cuando un auto pasa junto a nosotros tocando el claxon. Hippolyte Fizeau descubrió, independientemente, el mismo fenómeno en el caso de ondas electromagnéticas en 1848, como ocurre con las ondas que emiten los radares. Por ello en Francia este efecto se conoce como *Efecto Doppler-Fizeau*.

En el caso del radar, cuando el objetivo se aleja del radar la frecuencia es menor; cuando el objetivo se acerca al radar la frecuencia es mayor; y cuando no hay movimiento en la dirección del radar la frecuencia es la misma.

El radar es un instrumento activo en manos del especialista que puede seleccionar sus parámetros técnicos. Una de las principales características del mismo es la longitud de las ondas electromagnéticas que emite. Para el estudio de la microestructura de las nubes se usan longitudes de onda corta, mientras que para el análisis de sistemas nubosos potentes como los frentes fríos y los ciclones tropicales se usan radares que emiten ondas de gran longitud, o sea, de 5 a 10 cm.

Esto es así porque si se empleara para investigar un huracán un radar de una pequeña longitud de onda, por ejemplo de menos de 1 cm, las gotas pequeñas muy alejadas del centro del huracán harían retornar el pulso del radar sin poder penetrar en la estructura del sistema. Por el contrario, si se quisiera estudiar una pequeña nube aislada y se empleara un radar que emite ondas electromagnéticas con una longitud de 10 cm, el haz pasaría sin ser retornado y no se apreciaría la nube.

El radar permite la observación continua de la evolución del proceso atmosférico y permite seguir la trayectoria exacta de los puntos del sistema, en especial de su centro. Un ejemplo se puede observar en la figura 42, donde se muestra una imagen digitalizada del radar meteorológico de Casa Blanca en el seguimiento del huracán Wilma. El radar permite hacer cortes verticales del sistema e igualmente obtener su imagen «horizontal» a diferentes niveles, con diferentes resoluciones que dependen de la escala que se use. La principal limitación del radar meteorológico es el alcance acotado que posee de hasta 500 km.

Las redes de radares se forman de manera tal que la zona de información se solapa garantizando una franja de cubrimiento de cientos de kilómetros. Los radares no solamente permiten obtener la descripción de la forma y



tipo de la nubosidad y precipitaciones sino también realizar mediciones cuantitativas. En Cuba la red de radares cubre todo el territorio nacional (Fig.43).

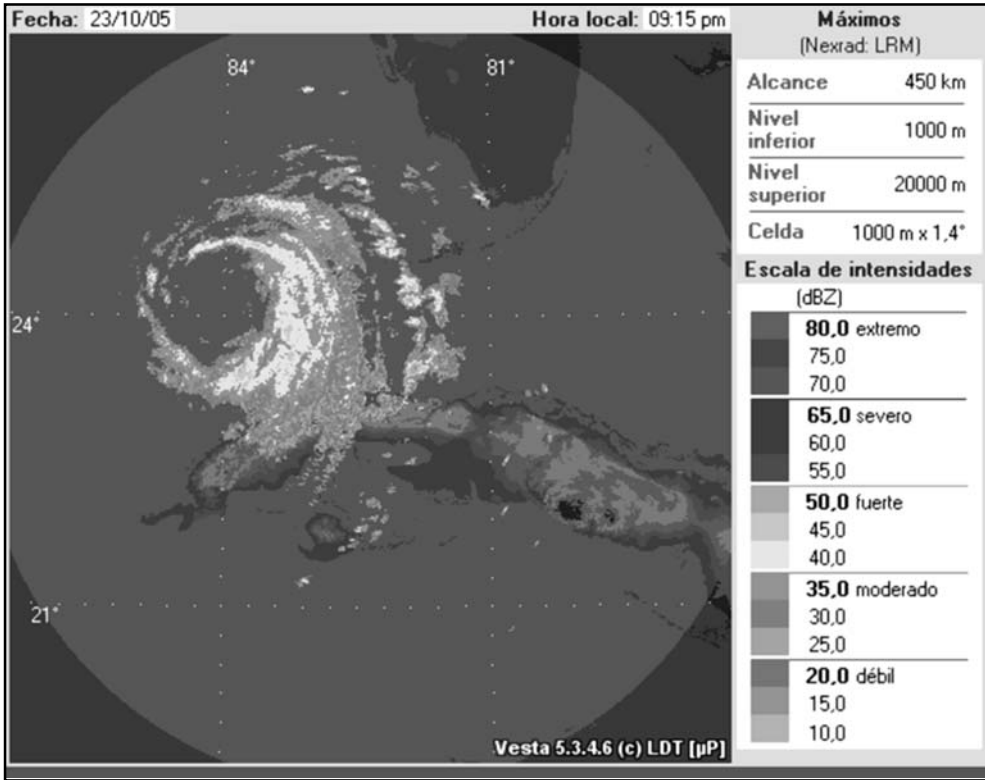


Fig. 42. Imagen digitizada del radar meteorológico de Casa Blanca.

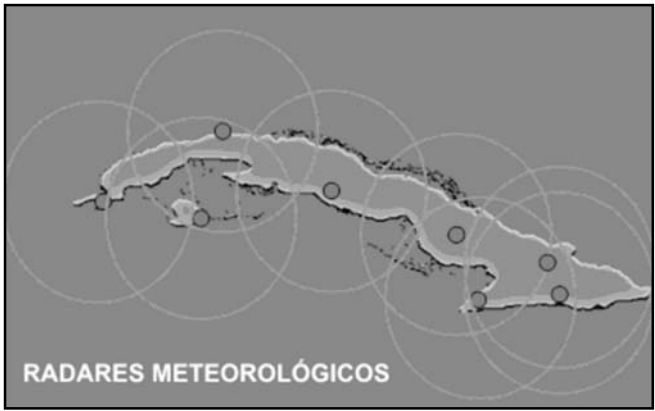


Fig. 43. Red de radares de Cuba.

Toda la red de radares de Cuba está automatizada gracias al desarrollo de esta tecnología con medios nacionales realizada por los técnicos del Centro de radares del INSMET con sede en Camagüey. Un radar meteorológico de capacidad *doppler* está instalado en la provincia de Holguín. Se trabaja en un proyecto que permitirá la conversión de los radares cubanos al sistema *doppler*.

Existen métodos de pronósticos específicos que se fundamentan en el radar meteorológico, estos métodos constituyen parte de la meteorología de radar. Aparte del uso del radar en la meteorología sinóptica este equipo tiene amplio uso en la meteorología física, y en particular, en la física de las nubes y las precipitaciones, así como en las actividades de influencia activa sobre los procesos atmosféricos. El radar permite seguir la génesis, desarrollo y desplazamiento de los fenómenos de mesoescala y de escala local.

La intensidad de la precipitación es medida por un radar emplazado en la superficie que recibe las ondas electromagnéticas de los radioecos que retornan de las gotas. La reflectividad de base del radar local muestra la intensidad del eco (reflectividad) medida en decibeles (dBZ). La reflectividad es la cantidad de potencia transmitida que es devuelta al receptor de radar tras impactar la precipitación en comparación con una densidad de potencia de referencia a una distancia de 1 m de la antena del radar.

La reflectividad de base se muestra a varios niveles diferentes de ángulos de elevación de la antena. Generalmente el ángulo más bajo es de 0.5°. En los radares de corto alcance la reflectividad de base llega a 230 km de la ubicación del radar y en los de largo alcance esta distancia se duplica. Los radares se ubican en diferentes loca-

lidades y constituyen una red observacional. De estar ocurriendo precipitaciones a más de 230 km se detectarían por un radar adyacente de la red. Aún dentro del área de 230 km a la redonda que cubre con efectividad un radar de bajo alcance la imagen del radar no mostrará los ecos de la precipitación que ocurren fuera del haz del radar, ya sea porque la precipitación se produce a demasiada altura por encima del radar o porque está tan cerca de la superficie terrestre que se sitúa por debajo del mencionado haz.

Existen dos modos de operación del radar: el modo en *aire despejado* y el modo de *precipitación*:

- **Modo en aire despejado:** En este modo el radar opera con una mayor sensibilidad. Este modo tiene la menor velocidad rotacional de la antena, lo que posibilita explorar un volumen dado de la atmósfera durante más tiempo. Esto aumenta la sensibilidad del radar y su «habilidad» de detectar objetos menores en la atmósfera en comparación con el modo de precipitación. En gran medida se detecta polvo en suspensión y partículas de sustancias. La nieve no refleja muy bien la energía enviada desde el radar y por ello este modo se usa ocasionalmente para detectar nevadas ligeras.
- **Modo de precipitación:** Cuando está lloviendo el radar no requiere ser tan sensible como en aire despejado, ya que la lluvia suministra suficientes señales de retorno. La detección se hace a una mayor velocidad.

La reflectividad abarca una amplia gama de señales desde las muy débiles hasta las muy fuertes, por eso un número conveniente para los cálculos y las comparaciones que se usan es la escala decibel o logarítmica expresada en dBZ. Los valores de dBZ aumentan al aumentar la fuerza de la señal que retorna al radar. Cada imagen de reflectividad incluye una de las dos escalas de color. La primera escala representa los valores dBZ cuando el radar está en modo de aire despejado en que oscilan entre -28 y +28. La otra escala representa los valores dBZ cuando el radar está en modo precipitación y los valores dBZ varían entre 5 y 75.

La escala de valores dBZ también se relaciona con la intensidad de la lluvia. Típicamente la lluvia ligera ocurre cuando el valor dBZ alcanza 20. A mayor dBZ, más intensa es la lluvia. En dependencia del tipo de sistema meteorológico productor de lluvia y de las condiciones geográficas del lugar se establecen relaciones entre los valores dBZ y la intensidad de la lluvia que se conocen como relaciones Z-R. Así se estiman los valores de la lluvia por hora. El granizo refleja bien la energía por lo que los valores dBZ de la señal de retorno serán muy altos. Por ello se han creado procedimientos para que el granizo no provoque estimados de lluvias mayores de los que realmente estén ocurriendo.

Los radares del pulso y barrido se han venido automatizando para suministrar una imagen integrada de un barrido

completo. Los radares de la próxima generación, conocidos por el acrónimo NEXRAD, pueden medir tanto la lluvia como el viento. La mayoría de los radares meteorológicos actualmente son del tipo Doppler que culminan un desarrollo ascendente de esta técnica desde su descubrimiento durante la Segunda Guerra Mundial. El radar emite un pulso corto de energía y si el pulso impacta un objeto (una gota de lluvia, un copo de nieve o un ave, por ejemplo) las ondas del radar son dispersadas en todas las direcciones. Una pequeña parte de esa energía dispersada es devuelta al radar. Esta señal reflejada es entonces recibida por el radar. Las computadoras analizan la fuerza de las ondas que retornan y calculan el tiempo transcurrido de ida y vuelta, así como el corrimiento de frecuencia del pulso.

La «habilidad» de detectar el corrimiento de frecuencia del pulso de energía convierte a NEXRAD en un radar de tipo *doppler*. La frecuencia de la señal de retorno típicamente cambia sobre la base del movimiento de las gotas de lluvia, el polvo, el ave, etcétera. El cambio de frecuencia del pulso de energía reflejado se vincula a un cambio de velocidad del objeto que se acerca o se aleja del radar, lo que permite estimar la rapidez del viento. Esto a su vez posibilita detectar la formación de tornados u otros sistemas meteorológicos.

Los radares *doppler* pueden detectar la mayor parte de la precipitación dentro de un radio de aproximadamente 145 km alrededor de su ubicación y las lluvias intensas o las nevadas a una distancia de hasta 250 km. Sin embargo, las lluvias o nevadas ligeras o las lloviznas provenientes de nubes estratiformes pueden pasar inadvertidas.

Los radares meteorológicos convencionales poseen longitudes de onda de 5 cm (banda C) o 10 cm (banda S) y proporcionan información útil del centro de la tormenta en un rango de hasta 400 km. También información cuantitativa sobre la precipitación se obtiene a partir de los datos de reflectividad, por supuesto la estimación de la lluvia es más efectiva para la realización de *nowcasting*. La animación de imágenes digitizadas ayuda a reconocer regiones de formación y disipación de celdas convectivas y el movimiento de las celdas, así como la contracción o expansión del ojo.

Con el advenimiento del radar *doppler* es posible la medición del campo de viento, confiable en un rango de unos 100 km. En la figura 44 se muestra una imagen del radar Doppler de Puerto Rico que puede medir la lluvia y el viento.

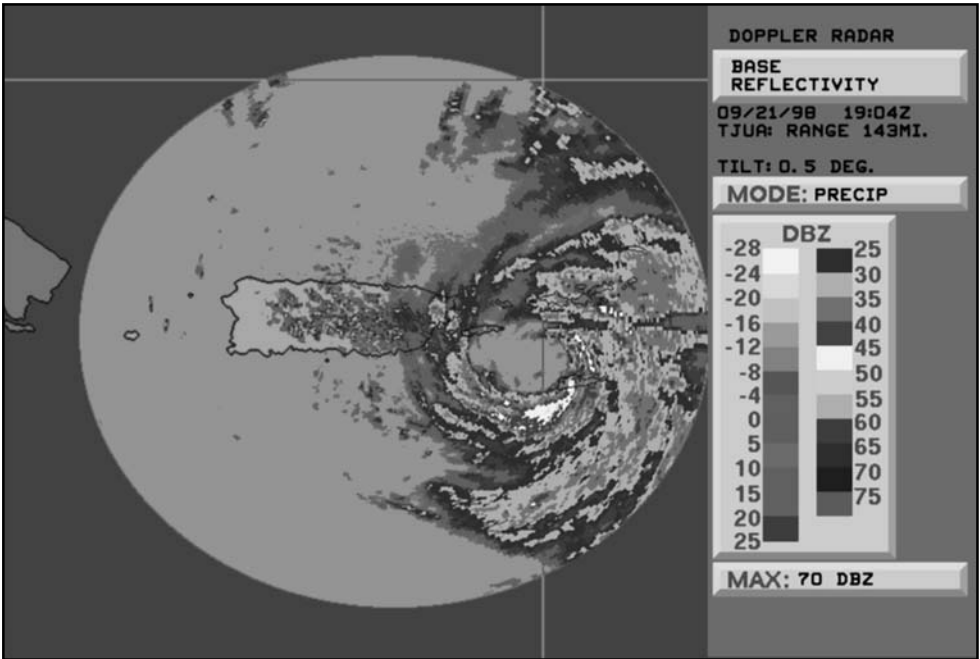


Fig. 44. Imagen del radar doppler de Puerto Rico que puede medir la lluvia y el viento.

El sistema NEXRAD utilizado en los radares *doppler* situados a lo largo de la costa atlántica y el Golfo de México de los EE.UU. permiten monitorear constantemente la distribución del viento alrededor del ciclón tropical, dentro de los 100 km antes de su llegada a tierra.

Los radares de tipo *doppler* miden la reflectividad de base, la reflectividad compuesta, la velocidad radial de base, la velocidad radial media relativa a la tormenta, el agua líquida integrada verticalmente, los toques de los



ecos, la precipitación total de la tormenta, la precipitación total en una hora, el perfil del viento visualizado del acimut de velocidad y el agrandamiento de las imágenes que actualmente sólo puede efectuarse en el centro de la imagen de radar.

Al estudiar la reflectividad de base con diferentes ángulos de elevación también se puede estudiar la estructura de la precipitación y de la tormenta, localizar las fronteras atmosféricas y determinar el potencial de ocurrencia de granizo.

La reflectividad compuesta muestra la reflectividad del eco máximo para los ángulos de elevación de 0.5°, 1.45°, 2.40° y 3.35°. Este indicador muestra la mayor reflectividad en todos los ecos y cuando se compara con la reflectividad de base permite apreciar las características estructurales de la tormenta y la tendencia de cambio de su intensidad.

La velocidad radial de base se calcula para los ángulos de elevación de 0.5° y 1.45° y es la velocidad con que la precipitación se acerca o se aleja del radar en una dirección radial. La verdadera dirección del viento solamente puede determinarse donde la velocidad radial de base es nula.

Para determinar la dirección del viento dondequiera se requiere de un segundo radar de tipo *doppler* ubicado en un lugar diferente. Estas técnicas duales *doppler* permiten generar una imagen total tridimensional de los vientos sobre un área extensa. Los radares *doppler* permiten localizar tornados cuando se detecta un área pequeña de velocidades positivas fuertes al lado de otra pequeña área con velocidades negativas fuertes que puede ser la identificación de un mesociclón, o sea, una tormenta eléctrica rotatoria. Aproximadamente 40% de todos los mesociclones producen tornados. En 90% de los casos el mesociclón y el tornado giran en contra del sentido de las manecillas del reloj.

El agua líquida verticalmente integrada es la cantidad de agua líquida que el radar detecta en una columna vertical de la atmósfera para un área de lluvia. Los valores altos de este indicador se asocian con lluvias fuertes o granizadas. Los valores anormalmente altos inequívocamente indican la presencia de granizo y se puede determinar su tamaño aproximado. Además, este parámetro permite localizar las áreas de lluvia intensa y de tormentas eléctricas más significativas y predecir el comienzo de los daños por viento. La rápida disminución de los valores de este indicador frecuentemente señala que pueden estar ocurriendo daños por viento.

La imagen de los toques de los ecos muestra la altura máxima de los ecos de lluvia. El radar no reporta toques de eco por debajo de 1 525 m ni por encima de 21 335 m, y reportará solamente los toques que tengan una reflectividad de al menos 18.5 dBZ. Esta información permite identificar áreas de fuertes corrientes ascendentes en las tormentas eléctricas. Además, una súbita disminución en los toques de los ecos dentro de una tormenta eléctrica puede señalar el comienzo de una aeroavalancha, conocida en inglés como downburst, que es un evento de tiempo severo donde las corrientes descendentes de la tormenta eléctrica bajan aceleradamente hacia la superficie terrestre a alta velocidad y provocan daños por vientos con intensidad similar a la de un tornado.

La precipitación total de la tormenta es un estimado de lluvia acumulada que se actualiza continuamente desde el total correspondiente a la hora anterior. Esta información en forma de imagen de radar se utiliza para localizar el potencial de inundaciones sobre áreas urbanas o rurales, estimar la escorrentía total de una cuenca y suministrar acumulados de lluvia para la duración del evento.

El radar de apertura sintética SAR es un radar activo que emite la energía en el intervalo de frecuencias de microondas (unos centímetros) en un período pequeño de tiempo, y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos dando lugar a una apertura sintética, es decir, debido a la gran velocidad de desplazamiento del vehículo espacial (7.5 km/s aproximadamente), la antena del dispositivo SAR se convierte en una antena virtual de mayor tamaño. El objetivo permanece en el haz de la antena durante unos instantes y es observado por el radar desde numerosos puntos a lo largo de la trayectoria

de satélite, lo que es equivalente a prolongar la longitud real de la antena. La resolución acimutal mejora sustancialmente al considerarse el *Efecto Doppler* que tiene lugar como consecuencia del desplazamiento del satélite.

Dos objetivos puntuales separados ligeramente en la dirección acimutal muestran en cualquier instante velocidades relativas algo diferentes (respecto del radar), por ello el eco procedente de cada objetivo presentará un desplazamiento en frecuencia *doppler* distinto.

El procesamiento de datos obtenidos por radares SAR es complicado debido a un gran volumen de información correspondiente a cada imagen. Los primeros ensayos de obtención de imágenes SAR a bordo de un satélite de la NASA SEASAT se realizaron en 1978. Desde aquel momento se desarrollaron distintos dispositivos mejorados basados en principios de los SAR. Los sistemas SAR emiten ondas cortas de unos centímetros. La intensidad de la señal recibida es debida principalmente a la rugosidad a pequeña escala de la superficie. Cuando la superficie monitoreada mediante radar es rugosa y contiene pendientes pequeñas cuyo tamaño es comparable con la longitud de la onda de la señal de radar, entonces se observa el fenómeno de difracción. En el caso de la superficie del mar, la señal de los SAR dispersada por los trenes de las ondas capilares o pequeñas de altura comprendida entre 0,1 mm y 10 cm se suma coherentemente. Por otro lado, los fenómenos meteorológicos tales como: ciclones, frentes sinópticos, vientos, ondas internas atmosféricas y lluvias, actúan en la superficie del mar, lo que permite también detectar su presencia mediante las imágenes del SAR.

### Técnicas de los satélites meteorológicos

El satélite Explorer 8 fue en 1959 el primero que llevó un instrumento para la observación de la atmósfera desde el espacio a través de un radiómetro de radiación global (ERBE). Los primeros satélites específicamente meteorológicos fueron los TIROS (Televisión Infra-Red Observation Satellite), estos fueron puestos en órbita durante los primeros años de la década de los 60, ellos permitieron una visión global de los sistemas nubosos.

Los satélites pueden «ver» gracias a los radiómetros. La radiación que la superficie de la tierra refleja se concentra en el espectro visible de la radiación, mientras que la propia emitida es principalmente del tipo infrarroja (IR). A ésta última se le denomina también *emisión de cuerpo negro*.

Los satélites meteorológicos constituyen el Subsistema Espacial del Sistema Mundial de Observación y su principal objetivo es completar la información facilitada por el Subsistema de Superficie de una forma económicamente viable.

Los satélites artificiales giran en torno a la Tierra conforme a la ley de gravitación universal descrita por Newton, y descriptivamente cumplen con las Leyes de Kepler. La Ley de Gravitación Universal nos dice que la fuerza de atracción de dos cuerpos está relacionada con la masa y distancia entre los mismos. A mayor masa y menor distancia, mayor atracción. La primera ley de Kepler dice que las órbitas de los planetas son «elipses» y que el Sol ocupa uno de sus focos. La segunda, relaciona el recorrido (órbita) del planeta con el tiempo que tarda en recorrerlo y dice que un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. La tercera relaciona el tiempo que tarda un planeta en recorrer su órbita con la distancia media al Sol, y manifiesta que el tiempo de recorrido es mayor cuanto mayor sea la distancia Planeta-Sol. A pesar de estar hablando de planetas estas leyes rigen para cualquier cuerpo que orbite entorno a otro en el espacio, por ejemplo, los satélites artificiales y la Tierra.

Los satélites meteorológicos han tenido un tremendo impacto en el análisis y pronóstico de los ciclones tropicales y es casi imposible que un organismo de este tipo

escape a su vigilancia, así se tiene que el promedio de formación de ciclones tropicales en el Pacífico oriental es el doble de lo reportado previamente a la era satelitaria.

Todos los pronosticadores usan alguna versión de la técnica de Dvorak para estimar la intensidad de los ciclones tropicales, y en muchas regiones los satélites proporcionan la única información evidente sobre la existencia de estos, y la técnica de Dvorak es el único método para analizar la intensidad.

Los satélites geostacionarios transmiten imágenes Vis o IR (del disco completo) de forma horaria, y a veces cada media hora. La resolución de las imágenes IR es de alrededor de 5 km mientras que muchos satélites son capaces de transmitir fotos Vis con 1.25 km de resolución en el nadir.

El viento estimado por el movimiento de las nubes ha tenido un importante impacto en el análisis tropical y en la exactitud de los modelos numéricos en el trópico, normalmente los niveles de estos datos son: 850, 400 y 250 hPa. Un ejemplo se muestra en la figura 45.

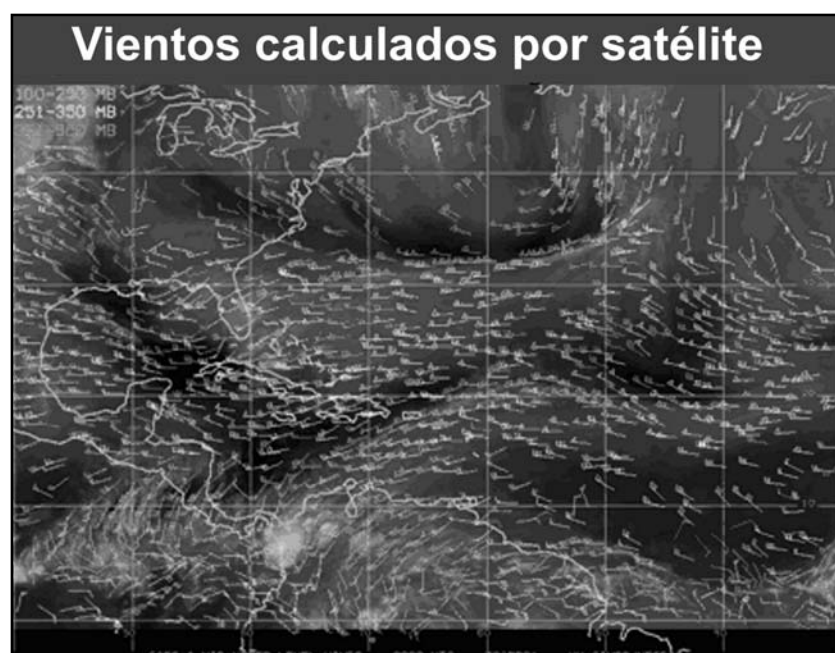


Fig. 45. Vientos obtenidos por satélite.

El viento puede también estimarse en áreas libre de nubes usando imágenes animadas de vapor de agua (canal de 6,7) a bordo de los satélites METEOSAT y GOES, nominalmente de 400 a 200 hPa. La comparación realizada contra los radiosondas indica una diferencia media de 4 m/s en los bajos niveles y 7 m/s en los altos, mientras que con imágenes de vapor de agua el error es de alrededor de 8 m/s.

También los sensores a bordo de los GOES permiten entre otras cosas, calcular el perfil vertical de temperatura, humedad y altura geopotencial relativo. En la figura 46 se observa el satélite GOES.

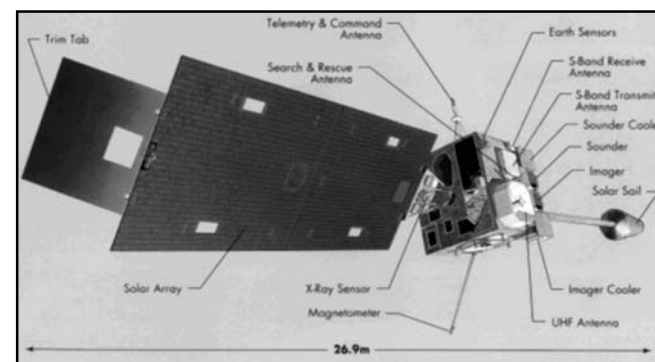


Fig. 46. Satélite GOES 8 - 12.

Los satélites de órbita polar, tales como los de la serie TIROS, METEOR y DMSP proporcionan también imágenes VIS o IR con resolución muy buena, así como una enorme cantidad de perfiles de temperatura y humedad; el reto es asimilar estos datos atemporales con los convencionales, también se obtienen datos de la temperatura de la superficie del mar.

Desde 1987, a bordo de los satélites del Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa (DMSP), se ha utilizado un sensor especial de microonda (SSM/I), sensor



## PRONÓSTICO DE LOS CICLONES TROPICALES

### Introducción

Debido a la diversidad de escalas espaciales y los procesos físicos que están involucrados, el problema del pronóstico de los ciclones tropicales reviste una vital importancia dentro del ámbito de la meteorología tropical, donde juegan un importante papel las predicciones numéricas del tiempo. El rápido incremento en el poder de las computadoras en los años recientes ha generado modelos numéricos capaces de tener resoluciones que han beneficiado el pronóstico de los ciclones tropicales y algunos sistemas de pequeña escala.

Las investigaciones recientes acerca de los modelos y programas de investigación indican que los modelos numéricos de pronóstico continúan desarrollándose, con la particularidad de incrementar la habilidad de resolver estructuras cada vez menores que computadoras más veloces y menos costosas puedan calcular.

El pronóstico de la trayectoria y la intensidad de los ciclones tropicales es una tarea de primordial importancia, debido a los peligros y amenazas que representan los ciclones tropicales tanto para la vida humana, los ecosistemas, así como para la economía. Estos pronósticos se realizan sobre la base de modelos numéricos operativos, los que son ejecutados varias veces al día.

Resulta importante destacar que los modelos de pronóstico constituyen una guía muy importante para el pronosticador, pues ellos son una herramienta para pronosticar la trayectoria e intensidad de los ciclones tropicales. Sin embargo, estos tienen la limitante de que a medida que nos alejamos de los plazos temporales cercanos al inicial (12, 24 y 36 horas) los errores aumentan considerablemente en magnitud. De esta manera, los pronósticos de 4 y 5 días pueden llegar a tener errores medios de cientos de kilómetros, por lo que estos pronósticos a veces son muy imprecisos.

Tomando en cuenta lo antes expuesto, se considera que la experiencia o la habilidad del pronosticador juega un papel muy importante a la hora de emitir un pronóstico, pues hay situaciones muy difíciles, como por ejemplo el momento de la recurva de los huracanes o los momentos en que el mismo permanece casi estacionario y va a iniciar un desplazamiento hacia un rumbo determinado.

Un modelo numérico emplea una serie de ecuaciones de la dinámica de los fluidos que describen el comportamiento de la atmósfera. Un modelo dado:

- Consta de una rejilla de puntos donde se asimilan los parámetros atmosféricos.
- Posee distintas capas o niveles en la vertical.
- Tiene un ciclo de asimilación y otro de análisis de los campos iniciales.
- Asimila observaciones simuladas en zonas carentes de datos para proveer información adicional.
- Posee un método para la integración de las ecuaciones hacia delante en el tiempo.

Las «parametrizaciones» físicas son números promedio que se emplean para incorporar los efectos de sistemas pequeños que no pueden ser resueltos mediante la rejilla o por un número espectral de ondas. Tal es el caso de elementos de la estructura del «ojo» del huracán, algunos tan importantes como lo son las nubes de tormenta. Es un factor que, al no ser real, introduce errores, pero un error mayor sería no incluirlos.

Los modelos operacionales de rejilla, incluyendo los modelos espectrales, emplean varios tipos de proyecciones de mapas como son la *Proyección Cónica de Lambert* o la *Proyección Polar Estereográfica*. Alternativamente, las rejillas de alta resolución están sucesivamente anidadas unas dentro de otras para producir un efecto telescópico, con un foco de alta resolución en la región de interés.

### Modelos de pronósticos

Existen dos tipos básicos de modelos, los *aplicables al pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales* y los de *intensidad*.

Primeramente hay que resaltar que los ciclones tropicales se mueven atendiendo a diversos factores, los que se clasifican en:

**Factores de orden Cero:** Los que están relacionados a la vorticidad relativa, pues un vórtice ciclónico se mueve por un «flujo de arrastre» general.

**Factores de Primer Orden:** Los factores relativos a la vorticidad absoluta.

La vorticidad es un término meteorológico que implica el movimiento de giro sobre si mismas de las partículas de aire durante su trayectoria de traslación, este término se define matemáticamente como el rotacional del vector velocidad. El vórtice induce giros Beta que afectan el movimiento del ciclón tropical.

El giro Beta no es más que la resultante de movimiento que produce la circulación del ciclón tropical, combinada con la variación norte-sur del parámetro de Coriolis, esto induce asimetrías conocidas como giros BETA. Estos giros producen una corriente de arrastre neta a través del ciclón tropical generalmente hacia el noroeste.

### Factores generales dinámicos y físicos

Los modelos numéricos operativos proporcionan una guía para la confección del pronóstico de la trayectoria del ciclón tropical, la cual es comparable con otras técnicas. Estos modelos muestran los rasgos o características generales de un número de sistemas y los mismos proporcionan y ayudan a los pronosticadores a interpretar la salida del pronóstico.

Estos modelos de pronóstico de trayectoria son una importante herramienta que sirven como guía para el pronosticador a la hora de realizar el pronóstico de la trayectoria del ciclón tropical, y algunas ocasiones el subjetivismo o la habilidad del pronosticador puede ser un arma adicional que juegue un rol muy importante a la hora de tomar una decisión ante un conjunto de modelos que muestren tendencias o diferencias en sus soluciones.

Los modelos de pronóstico pueden ser de varios tipos de acuerdo con las características que toma en cuenta: la persistencia, la climatología, las técnicas sinópticas, los métodos dinámicos y las técnicas dinámico-estadísticas.

Los modelos estadísticos no incorporan las características dinámicas en las cuales está inmerso el ciclón tropical, éstos se basan en la climatología y la persistencia que tienen los ciclones tropicales, como por ejemplo la persistencia que llevan en su rumbo o trayectoria, así como la tendencia climatológica que tienen los mismos en el área geográfica que se encuentran en determinado mes dentro de la temporada ciclónica.

Un modelo básico muy usado es el CLIPER y el mismo se considera que «no tiene habilidad» «no-skill» en comparación con otros. El modelo CLIPER combina la **CL**imatología y la **PER**sistencia. Este es un modelo estadístico de regresión múltiple que utiliza la persistencia del movimiento e incorpora la trayectoria climatológica (Aberson, 1998). Este modelo tiene la particularidad de que necesita de dos datos primarios fundamentales, estos son las coordenadas del ciclón tropical (latitud y longitud) y la dirección actual de movimiento en grados y 12 horas antes de la posición inicial.

El modelo muestra una media de error en 24 horas del orden de las 110 millas náuticas, en 48 horas del orden de 230 millas náuticas, que crece hasta 350 millas náuticas en 72 horas.

En el Centro de Pronósticos del INSMET de Cuba se utilizan dos modelos estadísticos que toman en cuenta la persistencia y la climatología, estos son el *Modelo Analógico Aritmético* y el *Analógico Ponderado*, estos se corren y muestran una solución para el pronóstico de trayectoria basándose en características tales como la persistencia en la trayectoria y las tendencias climatológicas de las trayectorias del mes en cuestión.

Los pronósticos dinámicos puros son menos rígidos en comparación con los estadísticos, y a diferencia de los estadísticos estos toman en cuenta las características dinámicas reales del medio donde se desarrollan. Estos pueden ser de tipo globales o de área limitada.

Los pronósticos globales pueden ser usados para este propósito así como también los de área limitada. Los modelos globales dan una visión integral de los diferentes sistemas sinópticos existentes en nuestra área geográfica para los diferentes niveles de la atmósfera, los cuales acompañan y rigen el movimiento de los ciclones tropicales. Estos modelos se corren en las horas sinópticas 12 UTC y 00 UTC, algunos de ellos se corren para plazos cada 6 horas como el modelo GFS. Los principales modelos globales operativos utilizados en nuestra área geográfica son:

- Modelo de la Aviación (AVN) del NCEP y Modelo MRF (*Medium Range Forecasting*), llamado en la actualidad GFS (*Global Forecasting System*) (Lord, 1993), estos modelos globales se emplean desde la temporada de 1992.
- Modelo Global de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (UKMET), se utiliza por los pronosticadores de todo el mundo (Radford, 1994).
- Modelo NOGAPS (*Navy Operational Global Atmospheric Prediction Systems*). Este modelo global presenta habilidades muy utilizables en el pronóstico de trayectoria de los huracanes (Fiorino *et al.*, 1993).
- Modelo Global ECMWF. Este modelo de mediano plazo lo ejecuta el Centro Europeo de Pronósticos a Plazo Medio (ECMWF) y el mismo se corre hasta plazos de 168 horas. Este presenta mapas pronósticos para los campos de presión en superficie al nivel del mar, así como geopotencial en 500 y 200 hPa. También pronostica campos de temperatura. Es un modelo global que se ha utilizado en Cuba con acierto por su habilidad para describir el surgimiento y desarrollo de los ciclones tropicales.

Además de los modelos globales antes expuestos existen los llamados Modelos de Pronóstico de Área Limitada. A continuación se relacionan los principales Modelos de Área Limitada que usualmente se corren operacionalmente en la cuenca del Atlántico.

- *Modelo de Pronóstico Dinámico-Estadístico*, NHC90 (McAdie, 1991): Este modelo utiliza la altura geopotencial como predictor, extraída de los modelos AVN y el mismo genera una trayectoria pronóstico cuatro veces al día. Las horas primarias del modelo NHC90 son los pronósticos realizados a las 0000 y 1200 UTC, o sea, a las 7:00 p.m. y 7:00 a.m., basados en las corridas de los modelos 12 horas antes del modelo AVN. Una versión especial es el NHC90-LATE, que se corre con los datos primarios del AVN y está disponible un número de horas después del NHC90. Ambas versiones del NHC90 se corren operacionalmente desde 1990 en el Centro Nacional de Huracanes de los EE. UU. Una actualización de este modelo es el NHC98, que fue utilizado a partir de 1998.
- *Modelo de Advección Beta* (BAM): Este modelo sigue la trayectoria del peso promediado verticalmente del viento horizontal (*pressure-weighted vertically-averaged horizontal wind*) del modelo AVN, comienza por la posición inicial del huracán e incluye las correcciones que toma en cuenta cuando asume el efecto Betta (Marks, 1992).

Este modelo presenta tres versiones: uno de capa baja nombrado BAMS, uno de capa media BAMB y una de profunda capa BAMD. Para el de capa baja se usa la capa 850-700 hPa, para el de capa media la capa 850-400 hPa y para el de profunda la capa 850-200 hPa. Las tres versiones se corren operacionalmente desde 1989 en los EE. UU. Estas tres versiones se corren para las cuatro horas sinópticas desde 1990.

- *Modelo de pronóstico de trayectoria Barotrópico* (Rejilla barotrópica) (VICBAR): Este se corre cuatro veces al día desde 1989. Primariamente este modelo se corre sobre la base de los datos de análisis del Centro NCEP de EE.UU. (National Center Environmental Predicción) y el mismo se corre cada 6 horas. (Aberson y DeMaria,



1994). Otro modelo barotrópico es el LBAR, el cual es de área limitada. El mismo se corre cada 6 horas y es ligeramente peor que el VICBAR, pero está disponible más temprano para uso de los pronosticadores del Centro Nacional de Huracanes de Miami. En Cuba se ha empleado una variante nacional de este tipo de modelo.

- **Modelo GFDL:** Este posee tres rejillas finas anidadas que se basan en las ecuaciones primitivas de la termodinámica desarrolladas por el Laboratorio Geofísico de los Fluidos Dinámicos (Bender *et al.*, 1993). Este modelo provee a los pronosticadores de magníficos resultados, pues tiene un espesor de 42 niveles, incluyendo la capa fronteriza y niveles de la tropopausa, y está operativo desde la temporada ciclónica de 1992.

Este modelo posee una alta resolución, suficiente para simular la estructura interior del ciclón tropical y presenta habilidades importantes en la predicción de estos organismos. En la pasada temporada este modelo brindó una buena información al pronóstico de intensidad de los huracanes Katrina, Rita y Wilma, aunque en ocasiones ha fallado grandemente en sus predicciones.

La figura 52 presenta una salida del modelo GFDL para el huracán Wilma en octubre de 2005. Este modelo en los últimos años ha sido uno de los más eficientes para el pronóstico de la trayectoria del ciclón tropical, sin embargo, en relación con los pronósticos de intensificación el modelo todavía no brinda los mejores resultados en algunos casos.

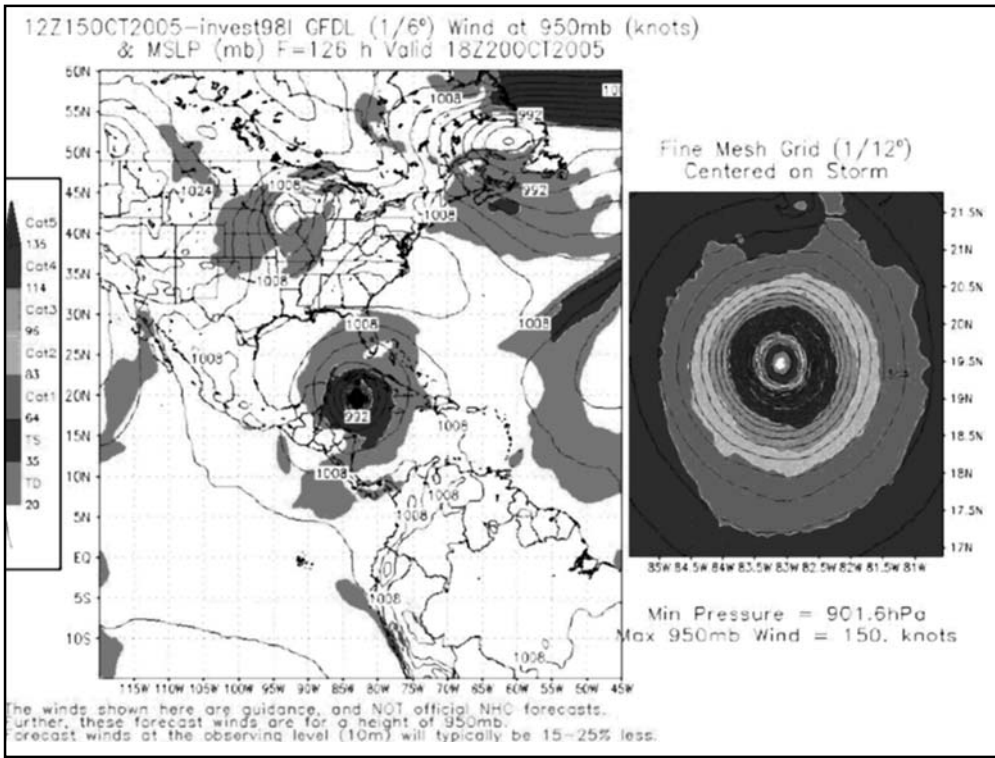


Fig. 52. Modelo de área limitada GFDL para el huracán Wilma, corrida el 15 de octubre de 2005 a las 1200 UTC.

Pronóstico de Consenso

Hay una técnica novedosa llamada *Ensemble*, palabra del inglés que significa *conjunto*. Esta técnica permite tener una visión integral de conjunto de modelos diferentes superpuestos en la guía de modelos, con el fin de realizar una predicción más exacta tomando en consideración un conjunto de modelos de pronóstico de diversas fuentes.

En efecto, el Ensemble multimodelo (Fig. 53) es usualmente superior al de uno solo, pues los modelos tienen diferentes tendencias o desviaciones particulares y estas se cancelan cuando son combinados entre sí. El Ensemble multimodelo es usualmente llamado *Pronóstico de Consenso*. En el Centro Nacional de Huracanes de Miami este modelo se le nombra GUNA y muestra un simple promedio de los modelos GFDL, UKMET, NOGAPS y AVN (GFS).

En Cuba se emplea ampliamente la técnica de Consenso, empleando en la misma los resultados de los modelos europeos, norteamericanos y cubanos.

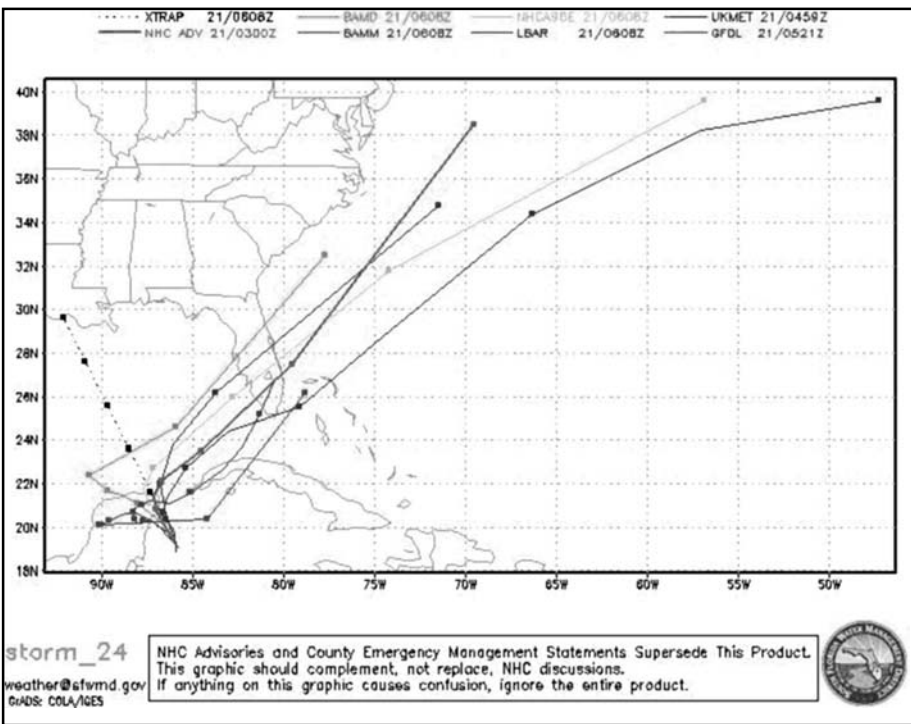


Fig. 53. Guía de modelos para el huracán Wilma, corrida de las 0600 UTC del 21 de octubre de 2005.

Modelos para el pronóstico de intensidad

Además de toda esta variedad de modelos que se usan para pronosticar la trayectoria de los huracanes, algunos pronostican la intensidad o vientos máximos sostenidos de los ciclones tropicales de la cuenca Atlántica. Sin embargo, hay que destacar que el pronóstico de intensidad es de mucha menor confiabilidad que el de trayectoria y los progresos han sido muy pequeños durante los últimos 10 años. A continuación se enumeran los modelos más usados para determinar la intensidad de los ciclones tropicales:

- Similar al modelo CLIPER de trayectoria está el *Modelo SHIFOR (Statistical Hurricane Intensity Forecast Model)*, este no tiene «habilidad» y es un modelo estadístico de regresión múltiple que utiliza la persistencia de la tendencia de los cambios de intensidad y la

combina con la información que se tiene de la climatología que han mostrado los cambios de intensidad en los huracanes. (Jarvinen y Neumann, 1979). El modelo SHIFOR ha mostrado dificultades importantes en los últimos años. En Cuba se emplea una variante de este desarrollado en el país por Ramón Pérez en 1991.

- **Modelo Sinóptico Estadístico SHIPS (Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme)**, este modelo está disponible desde la década de los años 90. (DeMaria y Kaplan, 1994). Él toma la información actual y pronóstico de escala sinóptica de la temperatura superficial del mar, cizalladura vertical del viento, humedad, estabilidad, etcétera; y toma en cuenta estos parámetros como una combinación óptima de la tendencia de la intensidad del huracán.

- **Modelo GFDL:** Este modelo, además de describir la trayectoria pronóstico del ciclón tropical, pronostica los cambios de intensidad. El GFDL tiende a incrementar mucho la intensidad del ciclón tropical, sobre todo a plazos mayores de 72 horas, por lo que sus predicciones se toman con reserva.
- **Esquema RI:** Un nuevo esquema estadístico para estimar la probabilidad de la intensificación rápida fue desarrollado por (Kaplan y DeMaria, 1999) y es usado en la actualidad, operativamente, en los EE. UU. Es el llamado Esquema RI. Este modelo emplea la información sinóptica y persistencia del modelo SHIPS para estimar la probabilidad de la rápida intensificación (para un incremento mayor a 35 mph o más en 24 horas) cada 6 horas.

Los modelos antes descritos, principalmente los dinámicos, trabajan con ecuaciones matemáticas complejas que describen la conducta atmosférica en todo el mundo y cientos de computadoras llevan a cabo miles de millones de cálculos por segundo para procesar las observaciones recolectadas en todo el planeta por los diversos medios de observación. El resultado se presenta como pronósticos objetivos de trayectoria e intensidad que, no obstante, presentan errores que sólo la experiencia y habilidad de los meteorólogos pronosticadores, mediante un análisis exhaustivo de toda la información, pueden soslayar.

En nuestro país el Centro Nacional de Pronósticos del Instituto de Meteorología recibe los modelos de pronósticos de diferentes centros meteorológicos, ya sean globales o de área limitada, además ejecuta modelos de pronósticos nacionales, como los de tipo estadísticos, estos son el *Analógico Aritmético*, el *Analógico Ponderado* y el *Climatológico Persistente para el Pronóstico de la Intensidad*; así como de tipo dinámico que es la versión más actualizada del modelo matemático de quinta generación MM5 con el cual se han obtenido buenos resultados en los últimos años, por nombrar algunos.

Los especialistas cubanos pronosticadores después de recibir y analizar detalladamente los modelos de pronósticos de diversas fuentes, incluyendo los nacionales, así como toda la información disponible, ejecutan un consenso, donde está incluida su percepción basada en su experiencia y conocimientos, y trazan una trayectoria pronóstico para los plazos de 24, 48 y 72 horas. Esta información es brindada a la población mediante la forma gráfica de un cono como se observa en la figura 54.



Fig. 54. Forma gráfica del pronóstico oficial, con el cono de probabilidad emitido por el Centro Nacional de Pronósticos del INSMET para el huracán Lili en octubre de 1996.



Este cono representa el área de peligro que cubre una determinada región del país y la proyección del cono es la zona de incertidumbre que se amplía a medida que aumentan los plazos del pronóstico, puesto que los errores medios aumentan en la medida en que transcurre el tiempo. Se advierte que la línea central del cono representa la trayectoria pronóstico más probable que debe seguir el centro del ciclón tropical dentro de los plazos prefijados, pero que no es la única: el área de peligro es la que está dentro del cono.

Por ejemplo, cuando el huracán Lili de 1996 se encontraba próximo a la Isla de la Juventud, los modelos indicaban trayectorias desde Pinar del Río hasta Ciego de Ávila. Ello era un reflejo de la incertidumbre ocasionada por el hecho de que una onda superior avanzaba hacia el este y se sabía que cuando el flujo del suroeste del sector delantero de la onda interactuara con el huracán, lo haría desviar de su trayectoria al nordeste. Pero, ¿cuándo y dónde lo haría?, porque no sólo se desplazaba la Onda, sino también el huracán. En la situación que se encontraba y en la dirección que traía en sólo 8 horas llegaría a estar próximo a la capital del País. La decisión fue que el cono de trayectorias previstas se inclinara al nordeste, pero con un rango amplio en 48 horas que iba desde La Habana hasta Ciego de Ávila. En efecto, fueron afectadas, de una forma u otra, todas estas provincias, pero en mayor medida las que se encontraban en el centro del cono, la región central de Cuba.

### Oleaje y surgencia. Modelos de pronósticos utilizados para los huracanes

Los ciclones tropicales, además de producir vientos intensos y fuertes lluvias, tienen también asociados varios sistemas ondulatorios en la superficie marina. Se pueden clasificar en oleaje y surgencia:

**Oleaje:** Las olas de viento u oleaje local son las olas generadas por el viento en la zona del ciclón tropical, las que se propagan en todas las direcciones. Por otra parte, se denominan *olas de leva* o *mar de leva* a las olas de viento que se generaron localmente en la zona del ciclón tropical y que recorren un largo trayecto a través del océano y llegan a un lugar bastante distante de donde se generaron, disipando su energía inicial en su traslado. Este oleaje llega al observador situado en un lugar distante, a veces miles de kilómetros, con dirección distinta a la del viento que reina en el lugar.

El oleaje u olas de viento se caracteriza por su aspecto irregular y tridimensional, como resultado de la superposición de sucesivas ondas sinusoidales, cada una con su propia amplitud, longitud de onda, período y dirección de propagación. Es por ello que su descripción matemática es difícil.

No obstante, se han desarrollado varias teorías para analizar matemáticamente el oleaje y se ha comprobado que la más satisfactoria es la teoría espectral, que constituye la base fundamental de los actuales modelos de olas, los cuales describen la evolución temporal y espacial de los campos de olas según el balance entre varios procesos físicos de magnitud similar: el suministro de energía por el viento, la disipación de energía por rompiente y la transferencia de energía entre componentes debido a interacciones no lineales.

Especialistas del Centro de Meteorología Marina del INSMET han adaptado con éxito el modelo de olas SWAN (siglas de *Simulating WAVes Nearshore*) para el pronóstico de los campos de olas en los mares adyacentes a Cuba y sus costas (Fig. 55). Para su inicialización el modelo emplea datos reales y pronosticados de la presión atmosférica, con los que serán generados los campos de vientos sobre el Golfo de México, el Mar Caribe y el Océano Atlántico, y resolver a partir de aquí la ecuación del balance de energía.

El resultado final es el valor de la energía neta en los puntos de cálculo, lo cual puede ser expresado en valores de *alturas de olas significativas* en metros. Es la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas de un registro de una extensión determinada (50 olas, 100 olas,

20 min, etcétera). Es la altura que es capaz de definir un observador con experiencia y el parámetro que mejor caracteriza el estado del mar.

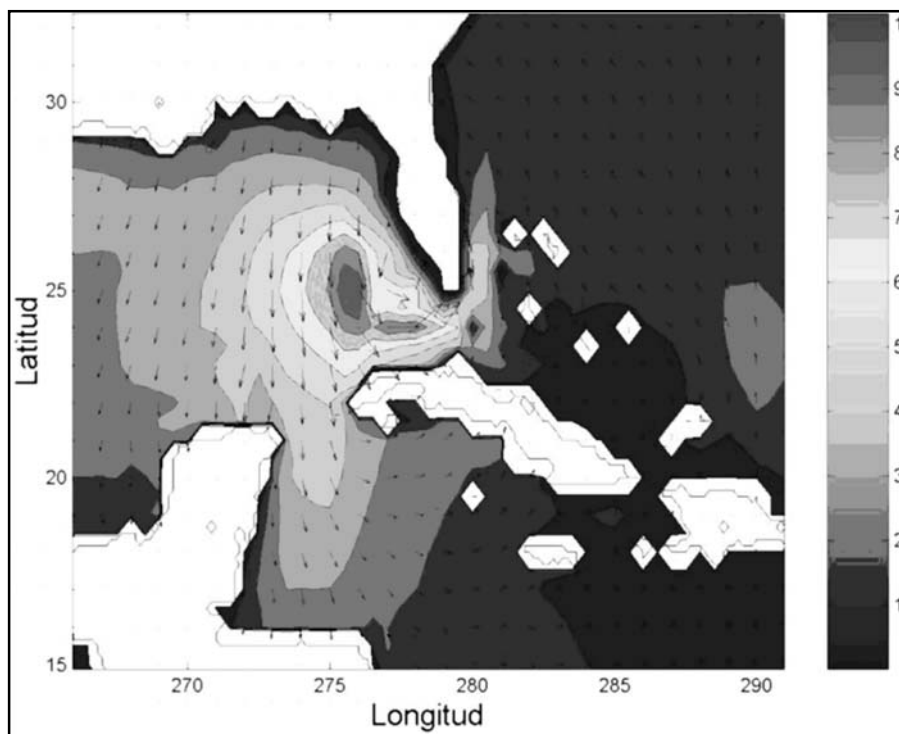


Fig. 55. Salida del modelo de olas SWAN en versión adaptada en Cuba, corrida con datos pronosticados para el 24 de octubre de 2005 a la 1:00 a.m., asociados al huracán Wilma.

Estas olas, cuando alcanzan determinada altura, ocasionan inundaciones costeras y pueden ser originadas por un huracán cercano (oleaje u olas de viento: huracán Wilma) o por un huracán lejano, en cuyo caso las olas llegan a nuestras costas como olas de leva: huracán Juan en el norte del Golfo de México, octubre de 1986.

**Surgencia:** La surgencia es una elevación anormal y temporal del nivel del mar, sobre la marea astronómica, causada por la fuerza ejercida por fuertes vientos y la caída de la presión atmosférica, que ocurre cuando un ciclón tropical, en especial los de categoría de huracán, se aproxima o cruza la línea costera para internarse en tierra.

Es una onda gravitacional larga que se origina principalmente en el sector derecho del huracán, con una longitud similar al tamaño del ciclón tropical que la genera y durabilidad de algunas horas, depende, entre otras causas, del tamaño y la velocidad de traslación del ciclón tropical, así como de la batimetría o profundidad de la plataforma oceánica. Afecta como promedio a unos 200 km de línea costera.

La sobre elevación total del nivel del mar se llama *marea de tormenta*, que es la suma de la altura de la surgencia con la altura de la *marea astronómica* del lugar. Esto no debe confundirse con el oleaje u olas ocasionadas por el viento. Estas viajan por encima de la marea de tormenta.

Es importante destacar que la respuesta del océano a la presencia de un ciclón tropical es diferente en aguas profundas y en aguas someras.

El efecto de sobre elevación del nivel medio del mar que antecede a la ola de surgencia se le conoce como:

1. Marea precursora.
2. Surgencia principal.
3. Resurgencia: es el retorno del mar a su nivel normal.

### Generalidades sobre la surgencia

- En el caso de islas y penínsulas al penetrar un ciclón tropical por la costa sur u occidental se produce el mayor efecto de la surgencia a la derecha de la trayectoria, y al salir el organismo por la costa norte u oriental la sobre elevación del nivel medio del mar por surgencia se localiza a la izquierda de la trayectoria.
- Cuando el organismo penetra en tierra con un ángulo de 90 grados, medido con respecto a la trayectoria,

provoca la mayor sobre elevación del nivel medio del mar por efecto de surgencia, según el ángulo de penetración disminuye se alcanza una altura menor del nivel medio del mar; es el ángulo de 0° (trayectoria paralela a la costa) el de menor peligro por surgencia. Debe señalarse que en esta situación especial pueden formarse ondas secundarias detrás de la onda principal.

La surgencia se pronostica sobre la base de modelos estadísticos y modelos dinámicos. Algunos modelos para pronosticar la surgencia son: SLOSH, SPLASH y MONSAC.

El modelo cubano MONSAC fue desarrollado por los especialistas del Departamento de Meteorología Dinámica del INSMET Rafael Pérez Parrado e Isidro Salas. Es un modelo que posee un sistema de ecuaciones diferenciales que simula el movimiento del fluido y permite el cálculo de la altura de la surgencia producida por un ciclón tropical. El modelo se diseñó originalmente para el trabajo operativo, aunque también se utiliza para otros fines. Los parámetros de entrada que describen al ciclón tropical son simples. Los resultados se muestran en un software de fácil acceso e interpretación.

Para este modelo se impusieron condiciones de frontera. La costa fue considerada como una pared vertical recta e infinita, con una rejilla rectangular de 120 x 120 puntos y resuelto hacia adelante en el tiempo, además de un conjunto de condiciones iniciales para el nivel de las aguas.

La figura 56 muestra la salida gráfica del modelo MONSAC para el caso del huracán Rita del 20 de septiembre de 2005.

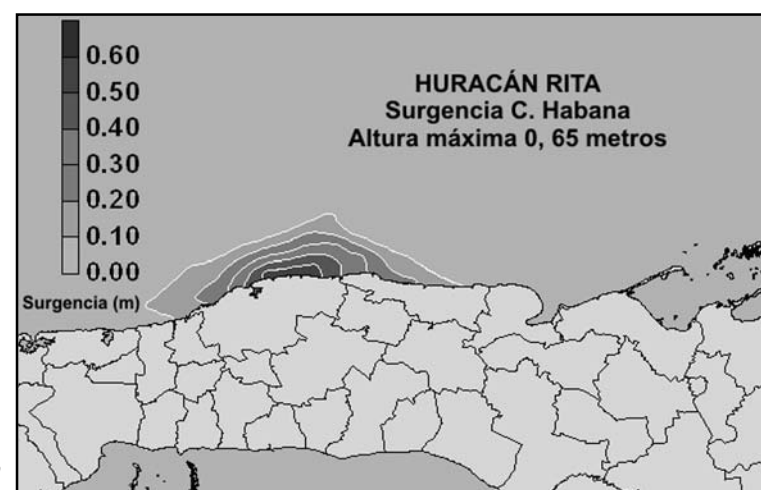


Fig. 56. Modelo MONSAC versión 3.3 para el huracán Rita.

En los últimos años este modelo ha mostrado magníficos resultados, resulta importante destacar la precisión con que fue modelada la surgencia en la costa sur de la provincia La Habana al paso del huracán Charley en agosto de 2004, y para el huracán Wilma en la costa norte occidental en octubre del mismo año, en ambos huracanes los resultados fueron muy valiosos, pues permitieron tomar decisiones muy oportunas en relación con la evacuación de la población que residía en zonas costeras con mayor riesgo de inundación.

También existe un modelo llamado SLOSH (*Sea, Lake and Overland Surge in Hurricane*). Este es un modelo computarizado que utiliza el Servicio Meteorológico de los EE. UU. y que sirve para estimar la altura de la surgencia del huracán y los vientos resultantes de forma hipotética. Este modelo contempla parámetros como la presión central del huracán, el diámetro, la velocidad de traslación, la trayectoria y el campo de vientos.

Este modelo calcula la altura de la surgencia en pies y toma en cuenta los valores de la marea astronómica, lo cual puede inducir valores significativos a la altura de la

surgencia. Toda la información que contempla este modelo presenta un resultado final y muestra el análisis de las áreas de riesgos.

Sin embargo, hay que destacar que los modelos de surgencia dependen siempre de los modelos de trayectoria e intensidad del ciclón tropical. El punto por donde el huracán penetra en tierra firme y la intensidad con que lo hace es un elemento crucial para determinar las áreas inundadas por la surgencia del huracán. El modelo de surgencia puede entonces ser usado para determinar el lugar o las localidades potenciales donde va a ser máxima la surgencia de la tormenta basada en una determinada trayectoria e intensidad del huracán.

Evaluación de los modelos de pronósticos de trayectoria e intensidad

A medida que nos alejamos de los plazos cercanos al inicial los errores en los modelos aumentan considerablemente, pues además de los errores iniciales, las ecuaciones que describen el estado de la atmósfera son imperfectas y sólo representan aproximaciones a la realidad. De acuerdo con esto para plazos de 24 horas los errores promedios son del orden de los 147 km y no se consideran muy grandes, tomando en cuenta que el huracán no es un punto, sino que sus elementos peligrosos abarcan un área de tamaño similar al de ese error. Sin embargo, para plazos de 48 y 72 horas son del orden de 257 y 385 km y para 120 horas (cinco días) llegan hasta 688 km.

La tabla 4 muestra los errores promedios en los pronósticos de trayectoria durante los últimos años expresados en kilómetros, así como también se muestran los errores promedios para la intensidad de los vientos en los diferentes plazos de pronóstico.

Tabla 5. Errores medios en los pronósticos de trayectorias

	24 HRS	48 HRS	72 HRS	96 HRS	120 HRS
POSICIÓN (km)	147	257	388	505	688
VIENTOS (km/h)	18	28	33	37	40

La eficiencia de los modelos de pronóstico se ha incrementado gradualmente de forma ascendente durante los últimos 30 años, la figura 57 muestra la marcha interanual de los errores medios para el plazo de 48 horas para diferentes modelos de pronóstico. En dicha figura se observa que los errores medios de cada modelo, además de oscilar de forma interanual, ha decrecido con el tiempo, y esto está condicionado por el continuo mejoramiento de la modelación física empleada en los modelos de pronóstico, así como por un mejor ajuste de sus ecuaciones y parametrizaciones.

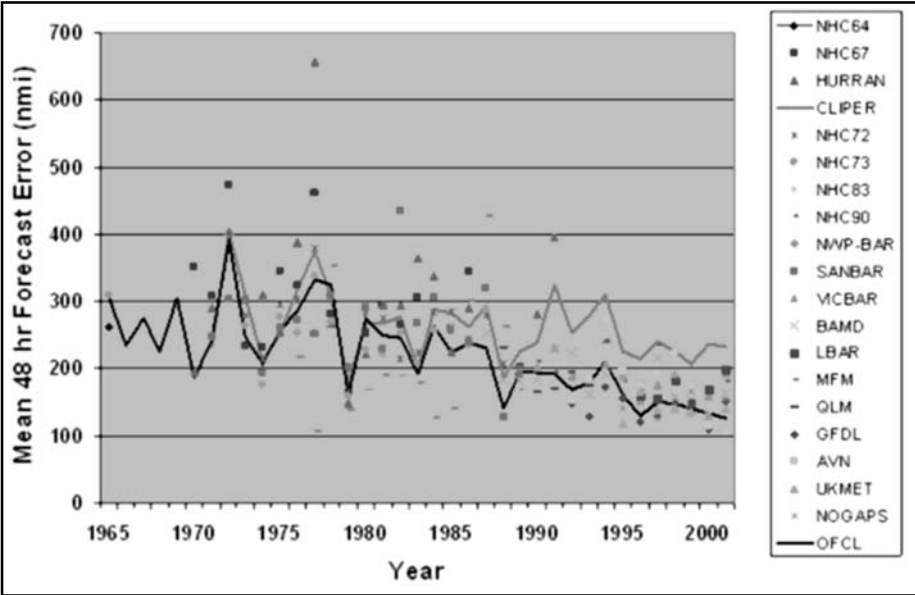


Fig. 57. Evaluación temporal de los modelos de pronósticos de trayectorias para el plazo de 48 horas.

Técnicas de predicción estacional. Estado actual a nivel internacional y en Cuba

La actividad ciclónica en la cuenca del Atlántico presenta una gran variabilidad interanual y la predicción de la actividad

ciclónica estacional data de la década de los años 80 del pasado siglo XX. En Cuba se han desarrollado métodos de pronósticos desde la última década de este siglo.

Los resultados alcanzados por los modelos cubanos presentan niveles de efectividad comparables con los de los métodos desarrollados por investigadores de otros países, pero todavía no alcanzan los niveles deseados en algunas variables.

La decisión final del método de pronósticos cubano se fundamenta en la evaluación de un conjunto de ecuaciones de regresión, con el criterio adicional del análisis climatológico. Para esto se utiliza un método de clasificación que determina el comportamiento de las temporadas ciclónicas en el Atlántico norte y en particular en el Golfo de México, según los patrones de la circulación general de la troposfera baja en el mes de abril. Sin embargo, en este método no se hallaron tales relaciones con respecto a la actividad ciclónica en el Mar Caribe. En los últimos 20 años se han determinado algunas de las relaciones fundamentales entre estos sistemas meteorológicos y las características del clima, cuyos resultados han contribuido a la mejor comprensión de dichas variabilidades.

En la actualidad de mantienen vigentes los criterios formulados por Gray (1984) sobre las relaciones de la actividad ciclónica en el Atlántico norte con dos forzamientos físicos bien conocidos en el clima global y local, como son el evento ENOS (El Niño/ Oscilación del Sur) y la oscilación Quasi Biental (QBO).

Los autores determinaron que el espectro de los huracanes con origen tropical es dominado por escalas temporales asociadas al ENOS y a la QBO, mientras que la oscilación decadal domina el espectro de los huracanes surgidos de sistemas baroclínicos.

Ballester *et al.* (1995) indicaron que la temperatura del aire era un posible enlace entre la actividad solar y la ciclónica en la cuenca atlántica, y expusieron después una hipótesis de cómo debía ser ese enlace (Ballester y González, 2000). Estos autores hallaron que existen relaciones entre el comportamiento general de las variaciones de la ciclogénesis tropical de la región atlántica y el de las variaciones de la actividad solar en los ciclos de 22 años. Estos autores, además, pensaron que estas relaciones inducían a pensar que las frecuencias bajas y altas que ocurrían en la formación de ciclones tropicales en esa región, eran partes de una oscilación de largo periodo que respondía a procesos naturales.

Ballester y González (2000) determinaron que la actividad ciclónica en el Mar Caribe había mostrado una tendencia al incremento desde la década de los años 30 del siglo XX, dada fundamentalmente por el aumento en el trimestre agosto-octubre. Apesar de esta tendencia global, la actividad ciclónica en las décadas de los años 70 y 80 decreció, se inició así la recuperación a mediados de la década de los años 90.

En lo que respecta a Cuba, Ballester *et al.* (1995), en estudios realizados acerca de la variabilidad de los ciclones tropicales, observaron la ocurrencia de periodos de frecuencias de afectación altas y bajas que se alternaron en el periodo 1900-1994. Los periodos de gran actividad se enmarcaron en los años 1900 y la década de los años 60, mientras que la década de los años 20 y los periodos 1973-1994 fueron los dos periodos de poca actividad.

Las investigaciones a escala mundial, hemisférica y regional encaminadas a la detección temprana en los cambios de la atmósfera son de mucho interés para la comunidad científica internacional.

Los pronósticos estacionales están basados en la premisa: las condiciones oceánicas y atmosféricas que precedieron a temporadas ciclónicas activas o inactivas en el pasado dan una información útil sobre tendencias probablemente similares en temporadas futuras.

Ballester *et al.* (1995, 2000) expusieron los diferentes métodos de pronóstico estacional hasta 1999 en el ámbito internacional, y al mismo tiempo desarrollaron la creación de un nuevo modelo de pronóstico de la actividad ciclónica del Océano Atlántico norte, el Golfo de México, el Mar Caribe y Cuba.

Estado actual de la temática en la cuenca atlántica

El profesor W. M. Gray fue el primer científico que emitió predicciones estacionales de la actividad ciclónica en el atlántico y ha continuado trabajando en este aspecto con su equipo de colaboradores, ha incorporado nuevas variables en los modelos estadísticos y ha variado la metodología de obtención de las ecuaciones. Los métodos desarrollados por Gray entre 1992 y 1994 se crearon utilizando un modelo de regresión lineal sobre la base de las desviaciones mínimas absolutas, donde se incluía un alto número de predictores sin selección previa.

En el pronóstico extendido de la temporada de 2002 emitido en diciembre de 2001 se hizo un análisis de las predicciones operacionales del periodo 1993-2001 porque no habían obtenido una habilidad adecuada. Estimaban que la causa de ello residía en la ruptura que se había producido en esos nueve años entre la asociación de la lluvia en el occidente africano en el año precedente a una temporada ciclónica y la actividad de huracanes en esa temporada. Debido a la falta de habilidad encontrada, descontinuaron la metodología anterior y elaboraron una nueva donde no se incluían los predictores referidos a las precipitaciones en el oeste africano.

Una última versión del pronóstico de rango extendido fue introducida en diciembre de 2002. Aquí se consideraron los cuatro mejores predictores de la versión anterior y se incluyeron otros.

El pronóstico emitido en abril de 2002 presentó una nueva versión creada por Philip Klotzbach, miembro del proyecto de meteorología tropical de la Universidad de Colorado, EE. UU. Este esquema consideró el periodo 1950-2000 y utilizó los tres o cuatro mejores predictores para obtener las habilidades de las predicciones que aproximadamente concordaran con las del modelo anterior.

La última modificación del método de pronóstico utilizado se realizó en abril de 2003, tomando el periodo 1950-2001.

Desde el año 2002 las emisiones de los pronósticos de junio se hacen a finales de mayo. En la predicción de esa temporada también se evaluaron las ecuaciones con las condiciones reales de sequía del África occidental y con la asunción de condiciones normales. En la temporada de 2003 Gray *et al.* desarrollaron un nuevo modelo estadístico con la inclusión de 11 años en la muestra de trabajo (1950-2001) y no seleccionaron la lluvia del oeste africano como predictor, seleccionando otros predictores.

Los pronósticos para meses individuales comenzaron a realizarse en la temporada ciclónica de 2000. En esta temporada Eric Blake introdujo una nueva técnica para predecir la actividad ciclónica de agosto, mes donde ocurre 26 % de una temporada ciclónica en el Atlántico. Las variables pronosticadas son las mismas y se incluyen en las predicciones estacionales.

Otros pronósticos estacionales son emitidos por la NOAA en los EE.UU. y por el Consorcio Tropical Storm Risk del Reino Unido. Las predicciones de la NOAA son independientes a las realizadas en la Universidad de Colorado por el grupo de investigaciones de meteorología tropical dirigido por el profesor William Gray.

Las predicciones de la NOAA se basan en el comportamiento de la temperatura superficial del mar en las áreas del Pacífico y el Atlántico norte, así como señales multidecadales como las condiciones de cizalladura vertical del viento, los alisios en el atlántico tropical y de las corrientes en chorro sobre el este de África, además de la oscilación Cuasi Biental Estratosférica.

Para clasificar el comportamiento de una temporada lo hacen a través del índice de energía ciclónica acumulada.

da (ACE), el cual combina la fortaleza y la duración de las tormentas tropicales y los huracanes durante una temporada determinada. Este índice se calcula mediante la suma de los cuadrados de la rapidez del viento máximo sostenido a intervalos de 6 horas (en nudos) para todos los sistemas que alcancen al menos la fuerza de tormenta tropical y su unidad es:  $\times 10^4$  nudos<sup>2</sup>. La clasificación depende de la relación de ACE con respecto a la mediana.

Aquí se predice el índice ACE, el número de tormentas tropicales, de huracanes y de huracanes intensos, expresados en rangos de valores. Sobre la base de datos históricos de temporadas similares se dan como pronóstico los valores medios de la entrada de huracanes a los Estados Unidos y a las islas del Caribe (incluye el Mar Caribe y las áreas terrestres que lo rodean). Las perspectivas sobre la actividad ciclónica las emiten en mayo y las actualizaciones en agosto.

En las predicciones realizadas por el consorcio citado del Reino Unido, Saunders *et al.* (2000), para la emisión realizada en mayo, tomaban como base un modelo lineal generalizado de Poisson. Los predictores que intervenían eran los pronósticos para agosto y septiembre de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 y en cinco regiones del Atlántico, además del de la QBO.

Para las predicciones de la temperatura en la región Niño 3.4 empleaban la mediana de ocho pronósticos del ENOS confeccionados por otros autores del ámbito internacional, y en el caso del Atlántico utilizaban uno desarrollado por ellos. En este último, encontraron que desde finales de abril se puede anticipar 50% de la varianza estacional en la temperatura del mar requerida para esos dos meses. Estos autores pronostican el número de ciclones tropicales, de huracanes en general y de los intensos en particular, así como la cantidad de huracanes que afectarán a las costas oriental y sur de los Estados Unidos.

En la actualidad los pronósticos se emiten en diciembre y se realizan actualizaciones mensuales hasta agosto, sobre la base del método propuesto por Saunders y Rockett (2001). En este esquema se modela la variabilidad interanual del número de huracanes utilizando la distribución de Gauss. En la selección de los predictores se aplican pruebas de significación de las correlaciones en subsecciones de datos para asegurar la estabilidad y la persistencia de éstos.

Para que un predictor sea aceptable debe pasar esta prueba al nivel de 10% en cada subsección de datos. La estrategia consiste en dividir la cuenca atlántica en tres subregiones: la región de mayor desarrollo ciclónico, el Caribe y Golfo de México, y por último la del Atlántico norte extratropical. La predicción general se deriva de la suma de los pronósticos de las dos primeras regiones más la climatología de la tercera. Los pronósticos de entrada en tierra se obtienen mediante la multiplicación del número total por la fracción histórica del número total que hizo su entrada en áreas terrestres, se plantea que esta aproximación es razonable en la práctica, aunque físicamente no sea exacta. Como predictores se utilizan:

- Los pronósticos para julio-septiembre de la componente zonal del viento en la superficie isobárica de 950 hPa sobre el Caribe y el Atlántico norte tropical. Estos pronósticos se derivan de las predicciones para agosto-septiembre del ENOS y de la temperatura superficial del mar en el Atlántico/Caribe.
- El pronóstico de la temperatura superficial del mar para agosto-septiembre en la región de máximo desarrollo de huracanes en el Atlántico, el cual se deriva de un modelo de componentes principales.

Los predictandos son: El índice ACE, el número de tormentas tropicales, de huracanes y de huracanes intensos a desarrollarse en toda la región atlántica y en el área que incluye la región de mayor desarrollo ciclónico, el Caribe y el Golfo de México, y los valores de estas variables referidas a la entrada a los Estados Unidos y a las Antillas Menores. El pronóstico del índice ACE referido a las Antillas se introdujo en la emisión de agosto de 2003 (Saunders y Lea, 2003).

### Pronóstico estacional de la actividad de ciclones tropicales en Cuba

En Cuba el primer modelo de pronóstico estacional de la actividad ciclónica se desarrolló en 1995 (Ballester *et al.*, 1995) y las emisiones de las predicciones comenzaron en 1996 sobre la base del método elaborado por Ballester y González (1996). Ese año se emitió, por primera vez en el mundo, un pronóstico de carácter probabilístico sobre la afectación por un ciclón tropical a un país determinado, en ese caso Cuba (Ballester *et al.*, 1996).

Tres años después se introdujo en la práctica otro método (Ballester *et al.*, 1999, Ballester *et al.*, 2000a), donde se incluían los pronósticos por separado de la cantidad de ciclones tropicales a desarrollarse en el Mar Caribe y el Golfo de México, tratas ambas áreas como un todo en el modelo precedente, además del pronóstico probabilístico del cruce de ciclones tropicales por Cuba. Este método presenta niveles de efectividad comparables con los de los modelos desarrollados por otros investigadores, pero todavía no tiene los niveles deseados en algunas variables pronosticadas, además de que no considera algunas predicciones de interés, como las de afectación por huracanes a Cuba y al Caribe. En general, aquí se pronostica la cantidad de ciclones tropicales y de huracanes, el potencial destructivo de estos últimos, la cantidad de ciclones tropicales a desarrollarse en el Atlántico, el Caribe y el Golfo de México y las probabilidades de entrada al Caribe y cruce por Cuba por al menos un ciclón tropical.

La cantidad de ciclones tropicales (tormentas tropicales más huracanes) y de huracanes en una temporada continúan siendo las características más consideradas como predictandos en los métodos relacionados con la predicción de la actividad ciclónica en cualquier cuenca del planeta. El conocimiento *a priori* de ellas permite alertar a una región determinada, sobre todo en aquellos años en que se espera un número por encima de lo normal.

Es conocido que para Cuba la región ciclogénica de mayor interés es el Mar Caribe, ya que según Ballester *et al.* (1999) las dos terceras parte (67%) de los ciclones tropicales que la han afectado se han desarrollado en él. El resto de los ciclones tropicales que influyen en Cuba (33%) provienen en su mayoría del área oceánica atlántica (27%), con una componente de su movimiento pronunciada al oeste. Por esto, el conocimiento *a priori* del número de organismos de tal procedencia es también importante para nuestro país. Predictandos como el comienzo y el final de la temporada también resultan de interés en estos pronósticos estacionales, si se tiene en cuenta que para Cuba un comienzo temprano y un final tardío son períodos de alto riesgo.

Las predicciones de los días en que se debe desarrollar la primera tormenta nombrada de la temporada y disipar la última se obtienen valorando las ecuaciones determinadas por Ballester y González (1996). La decisión final de los pronósticos se fundamenta en la evaluación del conjunto de ecuaciones de regresión, con un criterio climatológico adicional basado en un método de clasificación, el cual determina el comportamiento de las temporadas ciclónicas en el Atlántico norte y en el Golfo de México, según los patrones de la circulación en la troposfera baja en el mes de abril (Fig. 58) (González y Ballester, 2000).

En general, se tienen como predictandos: el número de ciclones tropicales para toda la región atlántica (CT), el número de huracanes (H), el potencial destructivo de los huracanes (PDH), el número de ciclones a desarrollarse en el área oceánica (At), en el Mar Caribe (Car) y en el Golfo de México (GM), el día en que se desarrolla la primera tormenta tropical (Com) y el día en que se disipa el último ciclón (Fin).

De forma indirecta se determina la cantidad de ciclones tropicales que penetran en el Caribe procedentes del Atlántico (AtC).

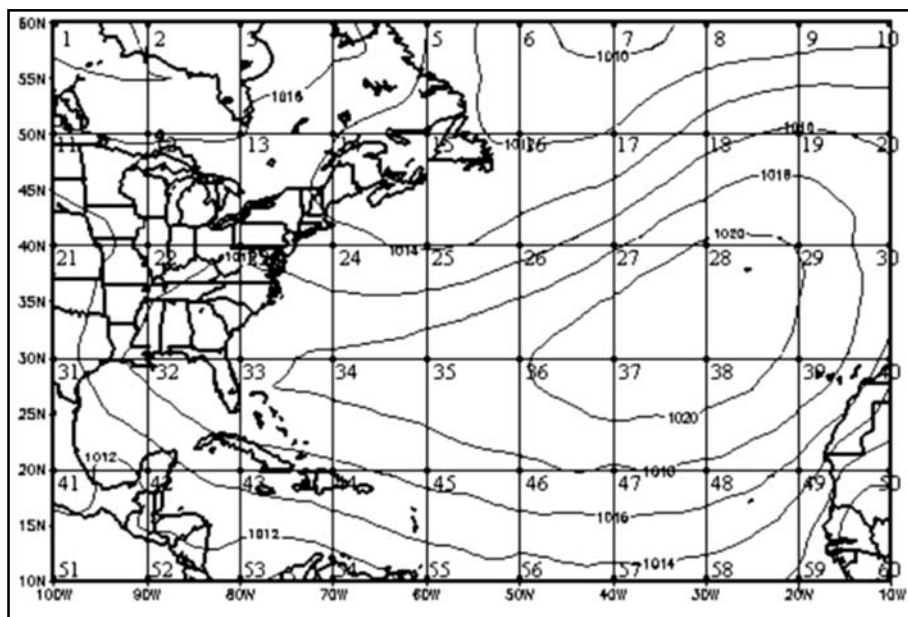


Fig. 58. Rejilla empleada para la extracción de los valores de la presión al nivel del mar ( $P_i$ ) y circulación atmosférica media del mes de abril en el período 1965-2002, uno de los predictores empleados en el desarrollo del modelo de pronóstico estacional de la actividad ciclónica en Cuba.

### ¿Cómo se confecciona un pronóstico estacional en Cuba?

La confección de un pronóstico estacional se fundamenta en la evaluación de las ecuaciones de regresión y de las funciones discriminantes obtenidas en el desarrollo del modelo, tomando en consideración, además, los criterios de carácter climatológico y analógico.

La fuente de los datos de entrada es la misma que la utilizada para conformar la muestra de trabajo en la obtención del modelo, y en el caso de la Oscilación Cuasi Bienal (QBO) se considera el valor pronosticado del índice correspondiente a predominar durante la temporada mediante una extrapolación. El índice ENOS se valora según los resultados de los pronósticos confeccionados por el Centro del Clima del Instituto de Meteorología.

Se debe tener en cuenta que el pronóstico estacional se confecciona sobre la base de las predicciones de los eventos El Niño o La Niña realizadas con la información limitada hasta marzo, justo el mes de comienzo de la llamada *barrera de la calidad de predicción*, ya que estos eventos tienden a desarrollarse entre abril y junio. Por esto es recomendable que en la actualización del pronóstico de la actividad ciclónica en agosto se revalore el índice ENOS, cuando esos fenómenos son más discernibles.

Las ecuaciones de regresión se evalúan mediante el programa PRONEST creado con la finalidad de aplicarse en el trabajo operativo. PRONEST está programado en lenguaje FORTRAN y se encuentra disponible en el Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología.

Las funciones discriminantes también fueron programadas en el mismo lenguaje y se encuentran en los programas HUR y HURCAR, dedicados a los pronósticos de Cuba y el Caribe, respectivamente, y en el programa HURA a utilizar en la actualización de la predicción para Cuba. Las salidas se reflejan de las siguientes formas:

- Afectación por al menos un huracán con una probabilidad de \_\_\_\_%.
- Origen e intensificación de un huracán en el Caribe con una probabilidad de \_\_\_\_%.

Las probabilidades resultantes se relacionan con las climatológicas para determinar el grado de la actividad. Las consideraciones son las siguientes: normal: 80-120%, poco activa: menos de 80% y activa: más de 120%.

En las predicciones se toma en cuenta el error de las ecuaciones y se tratan en término de rangos de días.

El texto del pronóstico se debe expresar en un lenguaje claro y conciso para que sea comprensible por los



usuarios. La predicción se difunde sistemáticamente el 2 de mayo a las distintas entidades del Gobierno y a los Centros Meteorológicos Provinciales, y la actualización del mismo tiene su salida el 1ro. de agosto. En las emisiones del pronóstico no se presenta de forma explícita el potencial destructivo de los huracanes, ya que no es un término comprensible, en general, para los usuarios. Los pronósticos del día en que se desarrolla la primera tormenta tropical y del día en que se disipa el último ciclón tampoco se expresan, pero se consideran en el pronóstico para Cuba.

SISTEMA DE PRONÓSTICOS Y AVISOS DE CICLONES TROPICALES Y EL SISTEMA DE DEFENSA CIVIL EN LA REPÚBLICA DE CUBA

Trabajo operativo del Centro de Pronósticos en caso de ciclón tropical

El seguimiento y pronóstico de la trayectoria y de la intensidad futura de un ciclón tropical es una tarea operativa ardua y compleja. Es también una tarea que está revestida de una gran responsabilidad por las decisiones que hay que tomar, y el relativamente breve tiempo en que hay que tomarlas, estas proporcionan un impacto directo en la población y la economía, a las que hay que proteger. Es, además, un trabajo muy colectivo en el que cada paso es importante.

Las distintas actividades que hay que realizar para llegar a tener el pronóstico del ciclón tropical y emitir un Aviso, pueden desglosarse de la manera siguiente:

1. Obtención de los datos de las estaciones meteorológicas y los sistemas de observación, se incluyen el satélite y el radar.
2. El trabajo de los sistemas de comunicaciones, nacionales e internacionales, que trasladan todo el flujo de información hacia y desde el Centro Nacional de Pronósticos del INSMET. El mismo está compuesto por sistemas de computadoras, estaciones de radio, estaciones satelitales VSAT, estaciones terrestres receptoras de satélites meteorológicos, y hasta teléfono si se hace necesario.
3. El sistema de procesamiento de datos compuesto por las estaciones de trabajo y las computadoras.
4. La guía objetiva de los modelos de pronóstico, tanto nacionales como de otros países.
5. Los especialistas, primero individualmente y después de manera colectiva, los que realizan el análisis de toda la información disponible, de la cual se obtiene primero un diagnóstico y después se realiza el pronóstico de la trayectoria y la intensidad, en el cual, además de los modelos numéricos-guía, se emplea el factor más importante: el hombre, el meteorólogo con sus conocimientos y su experiencia, que muchas veces provee una mayor eficiencia que los mejores modelos numéricos.
6. El análisis y pronóstico de los impactos de los fenómenos peligrosos que puede ocasionar el ciclón tropical en determinadas áreas.
7. Redacción del Aviso de ciclón tropical que es discutido entre todos los especialistas, el Jefe del Centro de Pronósticos toma las decisiones de importancia.
8. Coordinaciones de la Dirección del Centro de Pronósticos del INSMET con el Gobierno y el Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil, el que entonces, después de realizado su análisis de la situación, propone al Consejo de Defensa Nacional las fases y medidas que entienden que es necesario establecer, las que son aprobadas por el Ministro de las FAR a nombre de ese Órgano.
9. Emisión del Aviso de ciclón tropical a través de la TV y la radio nacionales.

Sistema de pronósticos y avisos en Cuba

Se emiten Avisos para cualquier ciclón tropical de cualquier clasificación y categoría que se encuentre en el área del océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México. Los mismos se emiten con una mayor frecuencia a medida que el ciclón tropical está más próximo a Cuba. Cuando éstos se encuentran situados al este del meridiano 55° W o al norte del paralelo 30° N, se emiten cada 24 horas, a las seis de la tarde; si el ciclón tropical ha penetrado, o se ha generado, dentro de los límites señalados anteriormente, los avisos se emiten cada 12 horas, a las 6:00 p.m. y 6:00 a.m. por otra parte, si el ciclón tropical representara algún peligro para Cuba en las próximas 72 horas, los Avisos de ciclón tropical se emiten cada 6 horas, a las 6:00 p.m., 12:00 p.m., 6:00 a.m. y 12:00 m. Cuando está muy próximo o ya azota al territorio nacional pueden emitirse cada 3 horas, con actualizaciones de la posición y vientos más frecuentes a través de las cadenas nacionales de radio y televisión.

Alerta Temprana

Sin embargo, antes de que exista alguna fase de la Defensa Civil en el País, puede que haya indicios de un peligro potencial a Cuba en plazos más o menos largos. En esos casos, el Centro Nacional de Pronósticos del INSMET emite además Avisos de Alerta Temprana. La Alerta Temprana representa un elemento de gran utilidad al informar a las autoridades que deben tomar decisiones, con suficiente antelación (de 72 a 120 horas), de la posibilidad o peligro potencial de que algún ciclón tropical pueda afectar a alguna zona del territorio nacional. Representa en sí una alerta de que algo puede suceder y promueve la preocupación por incrementar la percepción de un posible peligro. En períodos de tiempo inferiores a 72 horas las alertas vienen contenidas en los Avisos de ciclón tropical.

Interacción con los Medios y la Defensa Civil

Es muy importante la interacción de los pronosticadores con los medios de difusión y la Defensa Civil. A través de los medios de difusión, principalmente la radio y la televisión, los meteorólogos dan a conocer sus pronósticos a la población, la que está habituada a verlos diariamente en las emisiones estelares del NTV y en la revista *Buenos Días*, así como a través de otros programas de las emisoras nacionales y provinciales de radio y televisión. Sin embargo, ante la amenaza de un ciclón tropical o cualquier otro fenómeno meteorológico peligroso de gran envergadura, las cámaras de la TV y los micrófonos de las cadenas nacionales de radio se trasladan a la sede del Centro de Pronósticos del INSMET, y desde allí se dan a conocer los avisos y cualquier otra información actualizada. De esa manera se brinda una información oficial y única, en la cual nuestro pueblo presta una gran atención y tiene depositada una gran confianza.

La prensa escrita, debido a su mayor lentitud de difusión, no puede dar estos avisos actualizados. Sin embargo, la información complementaria que aparece en los artículos que se publican es de gran utilidad para que se conozcan más detalles de la situación meteorológica general y de la amenaza del ciclón tropical en particular. Los medios de difusión divulgan, además, el esfuerzo que hace el País para proteger a la población y la economía a través de las orientaciones emitidas por el Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil y los Consejos de Defensa Provinciales.

**Sistema de Defensa Civil en casos de ciclón tropical**

Es de suma importancia la interacción de los pronosticadores con el Sistema Nacional de la Defensa Civil (EMN-DC), porque las orientaciones de éste órgano son las que permiten disminuir las pérdidas humanas y materiales. La Defensa Civil tiene establecida cuatro fases ciclónicas. Las orientaciones se toman teniendo en cuenta que debe terminarse la evacuación antes de que comiencen a manifestarse las lluvias intensas, que pueden dejar incomunica-

dos los caminos, y antes de que comiencen a soplar los vientos de intensidad de tormenta tropical, no los de intensidad de huracán. Se toman en consideración, además, otros factores para garantizar en todo momento la seguridad de la población, tales como el no realizar la evacuación de noche a menos que sea imprescindible hacerlo.

Las cuatro fases ciclónicas son:

*Fase Informativa por ciclón tropical:* Se establece por el Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil (EMN-DC) cuando el Centro de Pronósticos del INSMET (CP) ha informado del surgimiento o la existencia de un ciclón tropical y de su posible aproximación a cualquier punto del País en un período de tiempo próximo a las 72 horas, se toman además en consideración las características del organismo ciclónico.

*Fase de Alerta Ciclónica:* Se establece por el EMN-DC cuando el CP ha informado que un ciclón tropical puede comenzar a afectar a alguna parte del territorio nacional en las próximas 48 horas.

*Fase de Alarma Ciclónica:* Se establece por el EMN-DC cuando el CP ha informado que es inminente la afectación de un ciclón tropical al País en las próximas 24 horas.

*Fase Recuperativa:* Se establece una vez que el fenómeno meteorológico haya dejado de afectar a un territorio dado y si es necesaria la realización de trabajos para mitigar las consecuencias.

Para el establecimiento de las fases ciclónicas la Defensa Civil tiene en cuenta además:

- a) Las características propias del sistema meteorológico (depresión tropical, tormenta tropical o huracán).
- b) Intensidad de los vientos máximos y áreas de lluvias intensas que acompañan al ciclón tropical.
- c) La situación de las áreas costeras amenazadas por inundaciones costeras o por surgencia.
- d) Características específicas del territorio amenazado (costa, llano, montañas, ríos, etcétera).
- e) Estado de las presas y del manto freático.

**TEMPORADA CICLÓNICA DE 2005 EN EL ATLÁNTICO NORTE ¡TEMPORADA RÉCORD!**

A modo de resumen del curso sobre ciclones tropicales se expone un análisis de la temporada ciclónica más relevante en el Atlántico norte, y los principales sucesos que la caracterizaron. También se ilustra con la descripción del huracán Dennis, organismo ciclónico que afectó a 10 provincias cubanas, la aplicación de los medios de observación disponibles en el seguimiento de un ciclón tropical, así como en su desarrollo y evolución.

La temporada de 2005 resultó ser excepcional desde muchos puntos de vista. Fue una temporada «récord» en cuanto a número de tormentas tropicales y huracanes, pues relegó a un segundo lugar en el área atlántica a la temporada de 1933. En efecto, esta última alcanzó 21 ciclones tropicales, mientras que en la temporada de 2005 se formaron 27, rompiendo en cinco ocasiones su propio récord. Fue también récord en cuanto al número de huracanes, al registrarse 15, de ellos siete de gran intensidad, superado sólo por la temporada de 1950. Fue también la temporada de final más tardío, ya que Zeta finalizó el 6 de enero de 2006, mientras que Alice, de la temporada de 1954, había terminado el 5 de enero de 1955. El número total de tormentas se eleva a 28 si se considera la tormenta subtropical «sin nombre» incluida en los registros finalizada esa temporada.

En general, en esta temporada se originaron dos depresiones tropicales, 27 tormentas tropicales, una tormenta subtropical y una depresión subtropical. El 63% de los ciclones tropicales se formaron a partir de ondas

tropicales, lo cual iguala el promedio de la cuenca atlántica. De los siete huracanes intensos (Categoría 3 o superior en la escala de Saffir-Simpson), dos alcanzaron la Categoría 3, uno la Categoría 4 y cuatro la Categoría 5. Tres de los huracanes de Categoría 5 quedaron en el sexto, cuarto y primer lugares de la lista de los huracanes con presiones mínima central más baja de la cuenca atlántica. Wilma (882 hPa) desplazó al huracán Gilbert (888 hPa), que desde 1988 ocupaba el lugar cimero.

Al observar en la Tabla 6 la distribución mensual de los ciclones tropicales se destaca el mes de julio, con la cifra récord de cinco tormentas tropicales. En este mes se presentaron dos huracanes intensos, lo que ocurrió sólo en 1916. En julio de 2005 también se iguala el récord de tres huracanes ocurrido en 1966 y se presenta por primera vez un huracán intenso (Emily). Con la formación en junio de dos tormentas tropicales, colocaban a este bimestre de 2005 como el más activo desde 1886. Las tres tormentas desarrolladas en noviembre constituyó un récord y las seis de octubre igualaron a las temporadas 1887 y 1950. Otro récord de octubre es la génesis de dos huracanes intensos en el Caribe. Los cuatro huracanes intensificados en octubre también igualaron la cifra de 1950. Agosto y septiembre, con cinco tormentas cada uno, se mostraron activos al igual que diciembre, con el desarrollo de la tormenta Zeta, además de transcurrir en él parte de la vida del huracán Épsilon.

**Tabla 6.** Frecuencia media mensual de los ciclones tropicales del período 1886-2004 y comportamiento en 2005

Período	Extens.*	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.
1886-2004	0.2	0.5	0.7	2.2	3.0	1.8	0.4
2005	1	2	5	5	5	6	3

\* Meses que no comprenden el período oficial de la temporada ciclónica.

En la Tabla 7 se presenta un resumen de las características de los ciclones tropicales y sus trayectorias se muestran en la Fig. 59. En esta figura se aprecia que sobre el Océano Atlántico se desarrollaron 16 ciclones tropicales (Emily, Franklin, Harvey, Irene, Katrina, Lee, María, Nate, Ophelia, Philippe, Rita, Tammy, Vince, Delta, Épsilon y Zeta), cuatro lo hicieron sobre el Golfo de México (Bret, Cindy, Gert y José) y siete en el Mar Caribe (Arlene, Dennis, Stan, Wilma, Alfa, Beta y Gamma), esta última cifra constituyó un récord. También fueron récords el tránsito de cuatro huracanes intensos por el Mar Caribe (Dennis, Emily, Wilma y Beta), el cruce de cinco huracanes intensos por el Golfo de México (Dennis, Emily, Katrina, Rita y Wilma) y de dos Categoría 5 (Katrina y Rita). Esta temporada tiene, además, el récord de ocurrencia de cuatro huracanes de Categoría 5 (Emily, Katrina, Rita y Wilma).

Los principales factores que favorecieron la actividad ciclónica en la cuenca atlántica fueron el alto contenido de calor de las aguas del Atlántico, el Caribe y Golfo de México, el ambiente anticiclónico imperante en la troposfera superior de la franja tropical del Atlántico norte, producto de las condiciones neutras a ligeramente fría presentadas por las aguas del Pacífico ecuatorial oriental, y las bajas presiones predominantes en la cuenca atlántica, fundamentalmente en el sudeste del Golfo de México y el Atlántico central.

En la temporada de 2005 varios países fueron afectados por algún organismo ciclónico. Los Estados Unidos fueron azotados por los huracanes intensos Dennis, Katrina, Rita y Wilma, además del huracán Cindy y de Ophelia, que pasó muy cerca de la costa de Carolina del Norte como huracán de Categoría 1. También influyeron las tormentas tropicales Arlene y Tammy. Otro país que sintió fuertemente el rigor de esta temporada ciclónica fue México, al cruzar por su territorio los huracanes intensos Emily y Wilma, así como el huracán Stan, las tormentas tropicales Bret y José, además de Cindy en la fase de depresión tropical. Nicaragua sufrió el embate del huracán Beta. El resto de los países de Centroamérica fueron afectados con intensas lluvias fundamentalmente por Stan, Gamma y Beta.

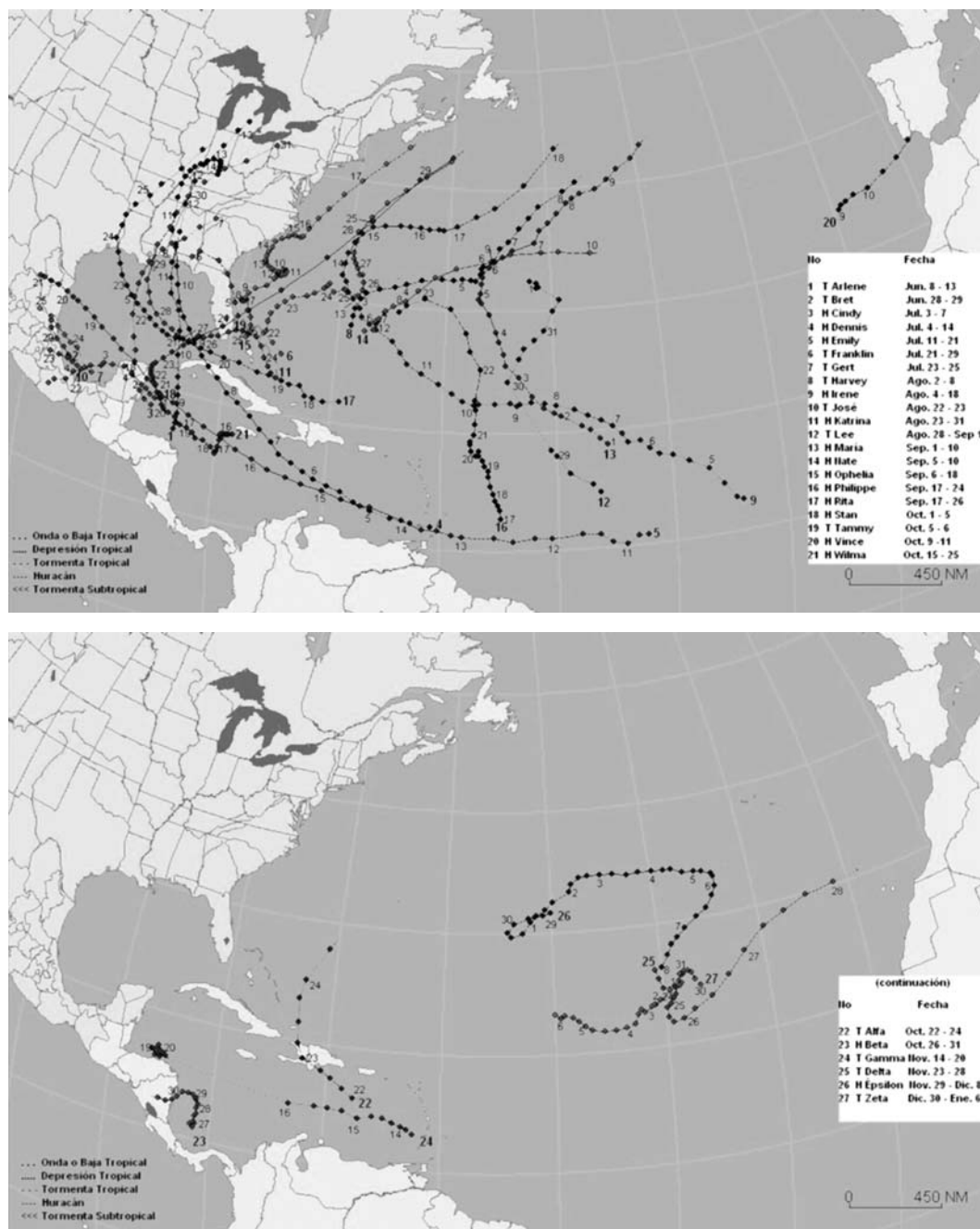
El grupo sur de las Antillas Menores fue azotado por el huracán Emily, por Dennis y Gamma, ambos en la fase de depresión. La tormenta tropical Alfa cruzó por La Española y cerca de Jamaica pasaron los huracanes Dennis y Emily. Wilma se formó en la vecindad de esta isla.

A la Península Ibérica llegó el huracán Vince como depresión tropical y Las Canarias fueron afectadas por Delta en la fase postropical, hechos sin antecedentes desde 1871 que se tienen registros.

Katrina ocasionó un desastre de grandes dimensiones en los Estados Unidos. Aunque la cifra total de muertes se desconoce, basado en las informaciones disponibles alcanza a 1

336 víctimas mortales. Las muertes directas se estiman en 1200, pero la cifra verdadera quizás nunca sea conocida. Todavía, a principios de 2006, se reportaban 4 000 personas como desaparecidas, por lo que el estimado de fallecidos podría ser aún mayor. En términos de pérdida de vidas humanas, Katrina ocupa el tercer lugar en la historia de los Estados Unidos, después del huracán de Galveston en 1900 y del huracán de 1928.

En cuanto a Cuba, nuestro país fue azotado directa o indirectamente por 5 ciclones tropicales, directamente por la tormenta tropical Arlene en junio y por el huracán de Categoría 4, «Dennis» en julio, mientras que los huracanes Katrina, Rita y Wilma azotaron a varias regiones del país con vientos fuertes, lluvias intensas e inundaciones costeras, aunque sus centros no pasaron por el territorio nacional. El país no era afectado directamente por una tormenta tropical en junio desde que lo hiciera Abby en 1968 y desde 1933 no era impactado por un huracán en julio. Dennis resultó ser el primer huracán Categoría 4 en tocar tierra en la provincia de Granma y el primer huracán intenso en afectar al país en un mes de julio. Las inundaciones costeras ocasionadas por Wilma en Ciudad de La Habana fueron muy severas y prolongadas. Las lluvias originadas por estos cinco organismos tropicales fueron por lo general beneficiosas,



**Fig. 59.** Trayectorias de los ciclones tropicales de la temporada ciclónica de 2005. Las posiciones están dadas cada 6 horas y las señaladas con el día se corresponden con las 1200 UTC.

dada la intensa sequía implantada en el país, sobre todo en la región oriental.

En Cuba hubo que lamentar 16 muertes en el huracán Dennis, de las cuales un deceso ocurrió en la provincia de Sancti Spiritus, dos en Santiago de Cuba y 13 en Granma. Esta última cifra es alta para nuestro país y está condicionada por el hecho de que este huracán ha sido el

**Tabla 7.** Tormentas tropicales, subtropicales y huracanes de la temporada ciclónica de 2005 en el Atlántico norte

Nombre	Fecha de inicio	Fecha en que finaliza	Viento máximo (km/h)	Presión mínima (hPa)	Día y hora (UTC*) en que alcanzó la máxima intensidad	Escala Saffir Simpson
Arlene	6/08	6/13	110	989	11/01:47	-
Bret	6/28	6/29	65	1002	28/22:35	-
Cindy	7/3	7/7	120	991	6/03:00	1
Dennis	7/4	7/14	240	930	10/12:00	4
Emily	7/11	7/21	260	929	16/23:40	5
Franklin	7/21	7/29	110	997	28/18:00	-
Gert	7/23	7/25	75	1005	25/00:00	-
Harvey	8/2	8/8	100	994	4/15:00	-
Irene	8/4	8/18	165	970	16/18:00	2
José	8/22	8/23	85	998	23/03:30	-
Katrina	8/23	8/31	280	902	28/17:55	5
Lee	8/28	9/1	65	1006	31/12	-
María	9/1	9/10	185	962	6/00:00	3
Nate	9/5	9/10	150	979	9/00:00	1
Ophelia	9/6	9/18	140	976	10/12:00	1
Philippe	9/17	9/24	130	985	20/00:00	1
Rita	9/18	9/26	285	895	22/03:00	5
Stan	10/1	10/5	130	977	4/12:00	1
Sin	**10/4	10/5	85	997	4/18	-
Nombre						
Tammy	10/5	10/6	85	1001	5/20:05	-
Vince	10/9	10/11	120	988	9/18:00	1
Wilma	10/15	10/25	295	882	19/12:00	5
Alfa	10/22	10/24	85	998	23/00:00	-
Beta	10/26	10/31	185	962	30/06:00	3
Gamma	11/14	11/20	85	1002	19/12:00	-
Delta	11/23	11/28	110	980	24/12:00	-
Épsilon	11/29	12/8	140	981	5/06:00	1
Zeta	12/30	1/6	100	994	1/18:00	-

\* UTC: Significa Tiempo Universal Coordinado y difiere en +5 de la hora local para Cuba (Meridiano 75° W).

único de gran intensidad que ha azotado a la región oriental, más preparada hasta entonces para sistemas lluviosos que para fuertes vientos.

El estimado total de muertes, debido a los ciclones tropicales en toda la cuenca atlántica durante la temporada de 2005, es de 3 570, aunque esta cifra puede ser muy superior debido a la inexactitud de los datos del Katrina en los Estados Unidos y de Stan en Centroamérica.

Por el alto número de pérdida de vidas humanas y los cuantiosos daños materiales ocasionados por los huracanes Dennis, Katrina, Rita, Stan y Wilma, sus nombres fueron retirados de la lista de ciclones tropicales en el área del Atlántico norte y fueron sustituidos por Don, Katia, Rina, Sean y Whitney respectivamente.

Huracán Dennis en Cuba

Dennis se gestó en el seno de una fuerte onda tropical en la tarde del 4 de julio a unos 95 km al este de Granada, grupo sur de las Antillas Menores. Como depresión tropical se movió al oeste por la periferia de la dorsal subtropical con ganancia en organización e intensidad. En la mañana del siguiente día alcanzó la fase de tormenta tropical, a la vez que inclinaba la trayectoria hacia el ostenoroeste. El proceso de intensificación continuó con rapidez y a finales de la tarde del día 6 alcanzó la categoría de huracán.

En la madrugada del 7 se dirigió al noroeste y llegó a ser un huracán de Categoría 2 en la mañana, cuando se hallaba por los mares al sur de Haití. Con esa intensidad cruzó al mediodía el Canal de Jamaica y las fuertes marejadas llegaron hasta la provincia de Guantánamo, ocasionó daños en un tramo de la carretera Guantánamo-Baracoa en la localidad de Yateritas. Los vientos con fuerza de tormenta tropical se extendieron hasta la ciudad de Guantánamo y fueron inferiores a los 63 km/h en el resto de la provincia.

En Santiago de Cuba las inundaciones costeras por penetraciones del mar comenzaron en horas del mediodía del día 7. Éstas llegaron hasta 30 m en Siboney y La Plata quedó incomunicada.

Dennis en su traslado por el Estrecho de Colón alcanzó la Categoría 3 en horas de la tarde y en la noche la Categoría 4. El avión que sobrevolaba el área reportó a las 7:14 p.m. la presión mínima central de 951 hPa y el viento máximo al nivel de vuelo de 250 km/h (220 km/h estimado para la superficie).

En la provincia de Santiago de Cuba los vientos con fuerza de tormenta tropical predominaron en los municipios de Santiago de Cuba, Guamá, Contramaestre, Palma Soriano y Tercer Frente. Produjo marejadas con olas de hasta 6 m de altura.

Con movimiento entre el ostenoroeste y el noroeste a razón de unos 28 km/h cruzó en la noche por la provincia Granma. A las 10:25 p.m. su centro estaba penetrando por Punta del Inglés, municipio Niquero. La estación meteorológica ubicada en Cabo Cruz registró vientos sostenidos de 215 km/h y una racha de 238 km/h a las 10:10 p.m., derribándose en ese momento la torre del anemómetro de Dines. Esto indica que la fuerza del viento fue superior, estimándose el viento máximo sostenido de 220 km/h. Posteriormente, se produjo una calma desde las 10:40 hasta las 10:57 p.m.. El ojo, según el radar de Pílon, tenía 19 km de diámetro minutos antes de tocar tierra.

La presión medida por el barómetro a las 10:10 p.m. fue de 956 hPa y la registrada por el barógrafo a las 10:40 p.m. fue de 955 hPa, después no pudo ser medida. La presión mínima central estimada fue de 951 hPa.

En la Fig. 60 se presenta un segmento de la trayectoria de Dennis a su paso sobre el archipiélago cubano, así como el área de los vientos con fuerza de huracán y de tormenta tropical. Aquí se puede apreciar que los vientos con fuerza de huracán asociados a Dennis se extendieron hasta unos 70 km a la derecha de la trayectoria, cubriendo los municipios de Niquero, Pílon, Media Luna, Campechuela y el extremo occidental de Bartolomé Masó y Manzanillo, todos pertenecientes a la provincia Granma y el extremo oeste de Guamá, provincia Santiago de Cuba. En el resto de Granma se registraron vientos sostenidos con velocidades de hasta 70 km/h, superiores en rachas. La altura de las olas reportadas en Granma fue superior a los 6 m.

Después de cruzar la provincia Granma se debilitó y en la madrugada del 8 los vientos máximos eran del orden de los 205 km/h (Categoría 3) y la presión mínima central de 953 hPa. Se trasladó por los mares al sur de Camagüey, pasó a unos 60 km de Santa Cruz del Sur. En esta provincia los vientos huracanados se extendieron hasta las áreas cercanas a las costas de los municipios Santa Cruz del Sur y Vertientes, y con fuerza de tormenta tropical en el resto. En la zona de la playa de Santa Cruz el mar penetró hasta unos 1 300 m y en el malecón alcanzó la altura aproximada de 3 m.

A finales de la madrugada del día 8 se movió por los mares al sur de Ciego de Ávila a unos 105 km de distancia, en un rumbo al ostenoroeste a una velocidad de traslación de 22 km/h y con mayor intensidad. Sin embargo, la influencia indirecta de Dennis se comenzó a sentir en este territorio desde el mediodía del día anterior, con un incremento en la fuerza del viento en los cayos del norte, lo que provocó marejadas desde la noche, que se mantuvieron hasta gran parte del día 8. Los vientos máximos sostenidos en la provincia se encontraron entre los 55 y 85 km/h, con la racha máxima de 105 km/h reportada por la estación meteorológica de Júcaro.

En la mañana del día 8 comenzó a trasladarse al sur de la provincia de Sancti Spíritus en dirección noroeste a unos 28 km/h y alcanzó la intensidad máxima de los vientos, que llegó a ser del orden de los 240 km/h (Categoría 4). Un avión de reconocimiento reportó la presión mínima central de 938 hPa a las 9:23 a.m. Su centro pasó a unos 25 km de Casilda, municipio Trinidad. A finales de la mañana y al mediodía se trasladaba a una distancia de 15 - 20 km de la provincia de Cienfuegos.

En Tunas de Zaza las afectaciones mayores se produjeron por la fuerza de los vientos, mientras que el mar alcanzó la altura de 1 m y llegó hasta unos 25 m tierra adentro. La Península de Ancón quedó cubierta por el agua, que llegó a la altura de 2 m, mientras que en Casilda penetró hasta 300 m, con una altura aproximada de 1.5 m. En la costa espirituanas hubo olas entre 2 y 4 m de altura.

El avión que reconocía el área reportó a la 1:06 p.m. la presión mínima central de 941 hPa, el viento máximo disminuyó a 220 km/h. El ojo era circular y tenía 18 km de diámetro, según estimaciones del radar de Pico de San Juan. Dennis finalmente penetró por un punto justo al oeste de Punta Mangles Altos, Matanzas, aproximadamente a las 2:30 p.m. En la Fig. 61 se muestra el patrón de nubes que acompañaba al huracán en el momento de la entrada en tierra. En la tarde, ya sobre el territorio matancero, se dirigió en un rumbo entre el ostenoroeste y noroeste con una velocidad de traslación de 21 km/h. Su centro pasó por la Ciénaga de Zapata muy cerca de los municipios cienfuegueros Abreus y Aguada de Pasajeros, del municipio matancero Jagüey Grande; además cruzó por Calimete y Unión de Reyes.

Dennis produjo vientos huracanados en Tri-



Fig. 60. Trayectoria de Dennis sobre el archipiélago cubano. Las horas están referidas al horario de verano.

nidad y el área costera de Sancti Spíritus. Los vientos con fuerza de tormenta tropical entre 65 y 115 km/h se extendieron hasta la parte central de Sancti Spíritus y Villa Clara. Los vientos huracanados de Dennis al pasar cerca de Cienfuegos se extendieron en promedio hasta unos 40 km a la derecha de la trayectoria, estos afectaron Cumanayagua, Cienfuegos, Abreus, Aguada de Pasajeros, el sur de Rodas y de Palmira. En el resto de la provincia se mantuvieron con fuerza de tormenta tropical.

Sobre Matanzas los vientos huracanados influyeron en los municipios Ciénaga de Zapata, Jagüey Grande, Pedro Betancourt, Unión de Reyes y el extremo sur de Jovellanos, el resto de la provincia quedó bajo los efectos de vientos con velocidades entre los 90 y 115 km/h. En Unión de Reyes el anemómetro se rompió al registrar una racha superior a los 198 km/h, por lo que el registro se detuvo en esta cifra. Se estimó que sobre este municipio la presión central era de 960 hPa y el viento máximo sostenido de 185 km/h.

A medida que el huracán se trasladaba sobre áreas terrestres fue perdiendo en intensidad, por lo que descendió a la Categoría 3 en Matanzas y al pasar su centro a Nueva Paz, La Habana, sobre las 9:00 p.m. era un huracán de Categoría 2. Dennis sobre el territorio habanero inclinó ligeramente la trayectoria hacia el noroeste y se movió a razón de unos 20 km/h. Al cruzar sobre Nueva Paz y el límite entre Madruga y Güines mantuvo esa categoría y al pasar sobre el límite entre Jaruco y San José de las Lajas lo hizo como un huracán de Categoría 1. Después se trasladó por el municipio Habana del Este, Ciudad de La Habana, con igual categoría y salió finalmente al mar por las inmediaciones de Playa Bacuranao alrededor de las 12:30 a.m. del día 9. Al abandonar el territorio cubano, Dennis poseía vientos máximos del orden de los 140 km/h.

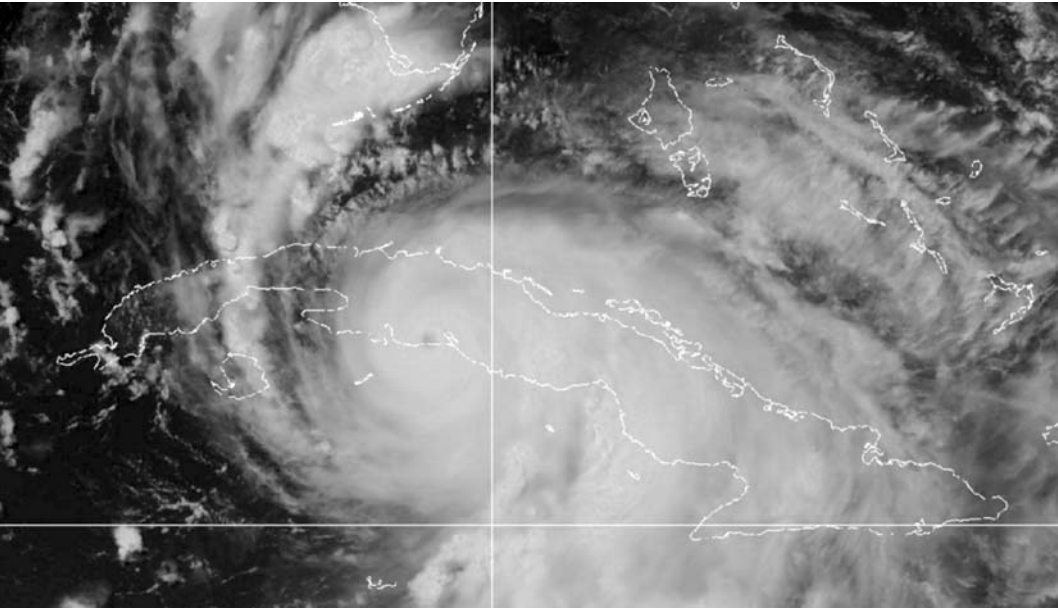


Fig. 61. Huracán Dennis. Imagen VIS del satélite GOES 12 del 8 de julio de 2005 a las 2:25 p.m.



Se debe señalar que el ojo del huracán fue disminuyendo su diámetro al moverse sobre áreas terrestres, según lo observado en las imágenes del satélite y del radar de Casa Blanca. Después de cruzar por las provincias habaneras el ojo no era identificable. Las tres estaciones más cercanas al centro (entre 5 y 9 km) fueron Bainoa, Tapaste y Casa Blanca y en ninguna de ellas se registró calma.

La trayectoria sobre estas provincias fue ajustada por las áreas de calma reportadas en Pipián (Madruga), Catalina de Güines (Güines), Casiguas (Jaruco), El Perú (San José de las Lajas), Campo Florido, Minas, Celimar y Alamar (Habana del Este). En la zona 17 de Alamar se reportó calma entre las 12:10 y 12:35 a.m. del día 9. Tomando en cuenta la información anterior se calculó que el ojo del huracán fue disminuyendo sobre las provincias habaneras y al salir al mar presentaba aproximadamente unos 10 km de diámetro.

Los vientos huracanados cubrieron entre unos 17-20 km a la derecha de la trayectoria y unos 10-13 km a la izquierda, quedaron bajo esta influencia los municipios de Nueva Paz, Madruga, Jaruco, el nordeste de San Nicolás, Güines, San José de las Lajas y la parte occidental de Santa Cruz del Norte en la provincia de La Habana, además de las áreas aledañas a San Francisco de Paula en Limonar y Ceiba Mocha, ambas pertenecientes a Matanzas. En Ciudad de La Habana los vientos huracanados afectaron los municipios Habana del Este y Guanabacoa. Los vientos con fuerza se tormenta tropical se extendieron hasta unos 40 km a la izquierda de la trayectoria hasta el este de Batabanó, Quivicán, San Antonio de los Baños y Bauta.

Este huracán produjo lluvias intensas desde las provincias habaneras hasta Ciego de Ávila, en Granma y Santiago de Cuba, donde llegaron a ser torrenciales en Tercer Frente, con un acumulado de 779.0 mm en 10 horas. En Holguín y Camagüey las lluvias llegaron a ser intensas en aislados puntos. El núcleo del sistema y una banda de alimentación persistente sobre la región central de Cuba ocasionó lluvias torrenciales sobre esa área. Entre ellas se destaca el registro de Cuatro Vientos (zona montañosa del Escambray) entre las 8:00 a.m. del día 8 y las 8:00 a.m. del día 9 con 1000.9 mm de lluvia. Otros acumulados notables fueron los de Mayarí, La Campana y Topes de Collantes con 918.0, 783.1 y 702.7 mm, respectivamente.

Dennis durante la madrugada del 9 siguió su movimiento al noroeste a 22 km/h sobre las aguas del Golfo de México. En la mañana inclinó algo más su trayectoria y en la tarde retomó de nuevo la Categoría 2. Su proceso de intensificación continuó, en la noche alcanzó la Categoría 3 y en la madrugada del 10 la Categoría 4, tras inclinar su rumbo hacia el nornoroeste. Esa madrugada la pared del ojo presentaba ciclos de reemplazos. En la mañana tuvo la presión mínima central de 930 hPa. Después pasó a la Categoría 3 antes de penetrar en la tarde por el noroeste de La Florida, cerca de Navarre Beach, alrededor de las 3:25 p.m. Se debilitó con rapidez mientras se trasladaba sobre el estado de Alabama. En la noche se degradó a tormenta tropical y en la mañana del 11 a depresión tropical sobre el estado de Mississippi. La depresión continuó trasladándose sobre Tennessee, Kentucky, Illinois e Indiana. Al llegar a Indiana derivó al sur encontrándose de nuevo en la noche del 14 en Kentucky, donde finalmente se disipó.

El huracán Dennis afectó a 10 provincias cubanas, causó daños de consideración, especialmente en la provincias de Granma y Cienfuegos, y afectó a 175 615 viviendas, de las cuales destruyó 28 082, una cifra superior al huracán Michelle de 2001. Provocó, además, la pérdida de 142 343 ton de productos, derribó 47 torres eléctricas de alta tensión y 7 de transmisión de televisión, y dañó o destruyó 10 158 postes eléctricos y telefónicos. Igualmente afectó 339 instalaciones turísticas, 1 877 escuelas y 588 instalaciones de salud. Las pérdidas materiales en este huracán se estimaron en 1 400 millones de dólares.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aberson, S. D. (1998): Five-day tropical cyclone track forecasts in the North Atlantic basin. *Wea Forecasting*, 13:1005-1015.
- Aberson, S. D. and M. DeMaria (1994): Verification of a nested barotropic hurricane track forecast model (VICBAR). *Mon. Wea. Rev.*, 122:2804-2815.
- Alfonso, P. A. (1994): *Climatología de las Tormentas Locales Severas de Cuba. Cronología*, Editorial Academia, La Habana, 168 pp.
- Álvarez, L.; I. Borrajo; R. Álvarez y colaboradores (2005): «Estudio de la distribución de las tormentas eléctricas en Cuba y su tendencia» [inédito], Informe Científico Técnico, UDICT, Instituto de Meteorología, 90 pp.
- Ballester, M. (1987): «Pronóstico estadístico sinóptico del movimiento de las depresiones tropicales» [inédito], tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Geográficas, Instituto de Meteorología, 100 pp.
- \_\_\_\_\_ (2004): Curso de Satélite [inédito].
- Ballester, M.; C. González y R. Pérez Suárez (1995): «Variabilidad de la ciclogénesis tropical en el Atlántico Norte» [inédito], Informe Científico del Resultado 415.511, Instituto de Meteorología, La Habana, 88 pp.
- \_\_\_\_\_ (2004): «Pronóstico de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte, con énfasis en el Caribe y Cuba» [inédito], Informe Científico del Proyecto 4050, Instituto de Meteorología, La Habana.
- Bankert, R. L. and P. M. Tag (1997): Using SSM/I data and computer vision to estimate tropical cyclone intensity. 9 th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, *Amer. Meteor. Soc.*
- Bender, Wu and K. Emmanuel (1993): Changes to the GFDL Hurricane Forecast System. Sitio WEB [www.nws.noaa.gov/om/tpb/492bodydraft.htm](http://www.nws.noaa.gov/om/tpb/492bodydraft.htm)
- Chen Lianshou (1997): Report on Interaction between Tropical and mid-latitude Weather System. *Report of the Cast Working Group on Tropical Meteorology*, WMO/TD, no. 843.
- Bluestein, B. H. (1993): *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Observations and Theory of Weather Systems*, vol. II, Oxford University Press, 594 pp.
- Carlson, T. N. (1969): Synoptic histories of three African disturbances that developed into Atlantic hurricanes, *Mon. Weather Rev.*, 97:256 - 276.
- Chang, C. P. (1970): Westward propagating cloud patterns in the tropical Pacific as seen from time composite satellite photographs. *J. Atmos. Sci.*, 27:133 -138.
- \_\_\_\_\_ (1973): A dynamical model of the intertropical convergence zone. *J. Atmos. Sci.*, 30:190-212.
- De Maria, M. and J. Kaplan (1994): Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones. *J. Climate*, 7:1324-1334.
- Fiorino, M. J.; J. S. Goers; J. J. Jensen and E. J. Harrison, Jr. (1993): An evaluation of the real-time tropical cyclone forecast skill of the Navy Operational Global Atmospheric Prediction System in the western North Pacific. *Weather and Forecasting*, 8:3-24.
- Gray, W.; Ch. Landsea and J. Sheaffer (1992): Long Period Variations in African Rainfall and Hurricane Related Destruction Along the US Coast. In *14th Annual National Hurricane Conference*, 37 pp.
- Gray W., Ch. Landsea, P. Mielke and K. Berry (1992): Predicting Atlantic Seasonal Hurricane Activity 6-11 months in advance. *Weather and Forecasting Journal*, vol. 7, pp. 440-455.
- Gray W.M. and Ph. Klotzbach (2005): *Summary of 2005 Atlantic Tropical Cyclone Activity and verification of author's seasonal and monthly forecasts*. <http://hurricane.atmos.colostate.edu/Forecasts/2005/nov2005/>
- González, P. C. (1984): Algunas características de los sistemas frontales que produjeron precipitaciones por más de 100.0 mm/24 horas. En *Primer Seminario de Desastres Naturales*, UNDRO, 7-12 pp.
- \_\_\_\_\_ (1999): Climatología de los frentes fríos que han afectado a Cuba desde 1916-1917 hasta 1996-1997. *Revista Cubana de Meteorología*, 6 (1):15-20.
- González, C. y M. Ballester (2000): Relaciones entre los patrones de la circulación general de la atmósfera y la actividad ciclónica. *Boletín de la Sociedad Meteorológica*, vol. 6, no. 1, <http://www.met.inf.cu>
- Gu, G. and C. Zhang (2001): A spectrum analysis of synoptic-scale disturbances in the ITCZ. *J. Clim.*, 14:2725-2739.
- Hess, P. G.; D. S. Battisti and P. J. Rasch (1993): The maintenance of the intertropical convergence zone and the large scale circulation on a water covered Earth. *J. Atmos. Sci.*, 50: 691-713.
- Holton, J. R.; J. M. Wallace and J. A. Young (1971): On boundary layer dynamics and the ITCZ. *J. Atmos. Sci.*, 28:275 - 280.

- Jarvinen, B. R. and C. J. Neumann (1979): Statistical forecasts of tropical cyclone intensity. *NOAA Tech. Memo, NWS NHC-10*, 22 pp.
- Kaplan, J. and M. De Maria (1999): An updated statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Weather and Forecasting Journal*.
- Lord, S. J. (1991): A bogussing system for vortex circulations in the National Meteorological Center global forecast model. Preprints, 19th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, *Amer. Meteor. Soc.*, pp. 328-330
- McAdie, C. J. (1991): *Model which uses the output from CLIPER in combination with vertically averaged (1000-100 hPa) geopotential heights from the Aviation Run of the MRF model as predictors*. [www.nhc.noaa.gov/modelsummary.shtml](http://www.nhc.noaa.gov/modelsummary.shtml)
- Marks, D. G. (1992): The beta and advection model for hurricane track forecasting. *NOAA Tech. Memo, NWS NMC 70*, National Meteorological Center, Camp Springs, MD, 89 pp.
- Palmer, T. (1990): Low frequency variability of the tropical circulation and its interaction with the extratropics. Meteorological Training Course, Lecture Series, p. 32 Internal, Report from ECMWF.
- Pérez, R.; R. Vega; M. Limia; M. Sarmiento y otros (2000): «Cronología de los Ciclones Tropicales de Cuba» [inédito], Informe Científico de Resultado, Instituto de Meteorología, La Habana.
- Pérez, R. (1999): «Curso de Meteorología Tropical» [inédito], Instituto de Meteorología, La Habana.
- Portela, M. (2006): «Meteorología General» [inédito], Instituto de Meteorología, La Habana.
- Radford, R. (1994): On the subsident side of the cyclone. August 17-18 (Beryl). *J. Climate*, no. 7.
- Riehl, H. (1954): *Tropical Meteorology*, McGraw Hill, NY, 392 pp.
- Riehl, H. (1979): *Climate and Weather in the Tropics*, Academic Press, London, 601 pp.
- Sadler, J. C. (2005): The Upper Tropospheric Circulation Over the Global Tropics. Dept. Meteorology, University of Hawaii, *UHMET*, no. 75.
- Salas, I. y R. Pérez Parrado (2005): «Surgencias provocadas por los ciclones tropicales. Conceptos asociados a este fenómeno natural» [inédito], Conferencia, Instituto de Meteorología, La Habana.
- Saunders, M. and P. Rockett (2001): *Extended Range Forecast for Atlantic Hurricane Activity in 2002*, Benfield Grieg Hazard Research Centre, UCL (University College London), UK, 6 pp.
- Saunders, M.; R. Saunders; C. Jakob; K. Felding, *et al.* (2000): *Major accomplishments Nature Run processed. Observation error*. [www.emc.ncep.noaa.gov/research/osse/ams2001/slide/slideshow.html](http://www.emc.ncep.noaa.gov/research/osse/ams2001/slide/slideshow.html)
- Simpson, R. H. (1974): *The hurricane disaster potencial scale*, Weatherwise, August, pp. 169-170.
- Thorncroft, C. D. (1998): A diagnostic study of a mid-latitude trough intrusion into the African subtropics. *WMO/TD*, no. 731.
- WMO (1993): Workshop in hurricane forecasting and warming. RAIV. NHC
- WMO (1993): WMO/TD-No. 560. Tropical Cyclone Programme. *Report No. TPC-31*. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting.
- \_\_\_\_\_ (1997): Tropical Meteorology Research. Programme. *WMO/TD*, no. 843.
- \_\_\_\_\_ (2006): Informe del PCT No. 30, OMM/DT, no. 494, Ginebra, Suiza

## SITIOS WEB CONSULTADOS:

- <http://www.insmet.cu>
- <http://www.nhc.noaa.gov/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/>
- <http://www.srh.weather.gov/>
- <http://www.aoml.noaa.gov/hrd>
- [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO\\_summary.pdf](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO_summary.pdf)
- [http://meted.ucar.edu/hurricane/chp\\_spa/hp.htm](http://meted.ucar.edu/hurricane/chp_spa/hp.htm)
- [http://univision.centennialpr.net/jsp/weather/faq\\_hurricane.pdf](http://univision.centennialpr.net/jsp/weather/faq_hurricane.pdf)
- [http://www.imn.ac.cr/educa/JC-HURACAN\\_HURACANjc.htm](http://www.imn.ac.cr/educa/JC-HURACAN_HURACANjc.htm)
- <http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/tema.htm>
- <http://www.thesloshcomputermodel.htm>
- <http://www.insmet.cu/aspgenesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=TEMPORADA&TB2=/Temporadas/temporada2005.htm>



TRAYECTORIA OFICIAL DEL INSTITUTO DE METEOROLOGIA

