

Agenda 21 en vista de la necesidad y de la urgencia crecientes de mejor información meteorológica, climatológica, hidrológica y ambiental, que se requiere para diversos aspectos del desarrollo sostenible de las naciones del mundo.

Confío en que con nuestra historia de unidad colectiva de propósitos y de recursos, y con el espíri-

tu de colaboración y solidaridad que existe entre las naciones, la Organización Meteorológica Mundial estará, una vez más, a la altura de las circunstancias y afrontará, con convicción y dentro de su área de responsabilidad, los retos principales a los que se enfrenta la humanidad cuando se prepara para el próximo milenio.

## CICLONES TROPICALES

### RESUMEN DE LA OCTAVA CONFERENCIA OMI, QUE SE PRONUNCIARÁ EN EL DUODÉCIMO CONGRESO (MAYO/JUNIO 1995)

Por William M. GRAY\*

#### Análisis de conjunto

Esta monografía aborda el estudio general de los numerosos aspectos meteorológicos de los ciclones tropicales, desde la perspectiva de los 35 años que el autor ha dedicado a investigar y enseñar este tema. Aunque está dirigido a la comunidad meteorológica en general, se espera que también resulte de valor para los especialistas en investigación y predicción de los ciclones tropicales.

La población de las costas del mundo y el valor de las propiedades costeras han crecido a un ritmo mucho mayor que la población mundial y el valor de las propiedades en conjunto. Por lo tanto, es inevitable que aumenten con el tiempo los efectos relativos de los ciclones tropicales sobre la humanidad. Podemos esperar que acabarán por producirse daños materiales por valor de 25 a 50 mil millones de \$ EE.UU., o más, a consecuencia de tifones o huracanes catastróficos ocasionales y que cada vez serán más frecuentes.

Las naciones que están amenazadas por los ciclones tropicales deben continuar aumentando su capacidad para mejorar las predicciones entre uno y tres días de los vientos fuertes de origen ciclónico, de las inundaciones y de las elevaciones del nivel de las aguas causadas por las mareas de temporal. Es probable que cualquier mejora de los planes y procedimientos futuros de mitigación demuestre que los gastos invertidos en su elaboración han valido bien la pena.

#### Los ciclones tropicales como clase única de sistemas ciclónicos a gran escala

Los ciclones tropicales constituyen una clase especial de grandes sistemas de vientos en rotación, que tienen lugar sobre una parte considerable de los océanos tropicales y subtropicales del mundo. Cada año se forman en todo el globo un total de unos 80 de estos sistemas ciclónicos con vientos sostenidos en niveles bajos de  $20 \text{ m s}^{-1}$  o más fuertes. Alrededor de los dos tercios de estos ciclones alcanzan intensidad de huracanes ( $>33 \text{ m s}^{-1}$ ), alrededor de los dos tercios tienen lugar en el hemisferio oriental (desde el oeste de la línea internacional de cambio de fecha hasta la costa oriental de África).

Los ciclones tropicales poseen unas características únicas de circulación completamente distintas de los sistemas ciclónicos típicos de las latitudes medias y de los tornados de escala menor, de las trombas marinas y de los remolinos de polvo. En concreto, los ciclones tropicales tienen un núcleo central cálido, se desarrollan en entornos de débil cizalladura vertical y su parte central se inclina sólo ligeramente con la altura. En contraste, los ciclones de las latitudes medias poseen una región central fría en la troposfera, tienen una gran inclinación con la altura y se desarrollan en condiciones de fuerte baroclinidad y de gran cizalladura vertical. Mientras que la estratosfera es un componente fundamental de los ciclones de latitudes medias, no es normalmente un factor importante para los ciclones tropicales.

Si no supiésemos por experiencia que hay huracanes, es dudoso que con nuestro conocimiento actual de la mecánica de fluidos y de los procesos de inestabilidad en flujos fluidos, hubiésemos podido pre-

\* Universidad del Estado de Colorado, Fort Collins, Colorado, EE.UU.

decirlos o incluso creer posible su existencia. Esto se debe a que los huracanes son una combinación notablemente complicada de procesos mecánicos con procesos mixtos de temperatura y humedad. Los procesos físicos puramente mecánicos o newtonianos de los huracanes se conocen bastante bien. Sin embargo, todavía están por determinar bien las complicadas interacciones no lineales de estos efectos mecánicos con los procesos mixtos de temperatura y humedad de los sistemas nubosos y de los océanos y las superficies terrestres sobre las que se mueven estos ciclones tropicales.

La liberación de calor de condensación desde las gruesas nubes de lluvia de tipo cumulonimbo es un ingrediente necesario para la formación y el mantenimiento de los ciclones tropicales. En cambio, los procesos de producción de lluvia de los ciclones de las latitudes medias, aunque importantes por diversos aspectos de su estructura, no constituyen un ingrediente necesario ni fundamental de su formación. La mayoría de los trabajos para lograr un mejor conocimiento cuantitativo de las complicadas interacciones mecánicas, caloríficas, higrológicas y superficiales de los ciclones tropicales se están realizando mediante modelos numéricos, con conjuntos de datos específicos o imaginados. Sin embargo, los avances han sido lentos y difíciles de comprobar con las observaciones reales, debido a la complejidad de los procesos físicos que entran en juego.

La comprobación de los modelos sigue siendo un problema difícil, puesto que los ciclones tropicales se forman y se mueven sobre los océanos tropicales, donde son escasas las observaciones meteorológicas convencionales. En consecuencia, y desde un punto de vista práctico, resulta imposible medir simultáneamente las características del flujo de un ciclón tropical en múltiples intervalos radiales y niveles verticales. Los grandes avances técnicos que nos han permitido recientemente acceder desde nuestras casas a imágenes desde satélites en color de la nubosidad de los ciclones tropicales, no deben considerarse indicadoras de una gran mejora en la disponibilidad de los tipos de datos que se precisan para lograr un conocimiento básico de estos sistemas tormentosos. Los satélites no han aliviado esta deficiencia de datos básicos.

Los satélites de teledetección han constituido una ayuda indispensable para localizar estos temporales y seguir su trayectoria. En la mayoría de los casos, los satélites han proporcionado buenas estimaciones de la intensidad del ciclón. Sin embargo, en general, los satélites no han podido proporcionar la resolución necesaria en los datos de los perfiles verticales del viento, de la temperatura y de la pre-

sión o altura de los distintos temporales, que son necesarios para una descripción cualitativa y un conocimiento físico completos. En particular este es el caso en las proximidades del centro de los ciclones tropicales, en donde las nubes de los niveles altos oscurecen toda la información de los niveles bajos. También es de destacar que en los últimos años se han reducido gradualmente las redes oceánicas de sondeos de radioviento, que antes proporcionaban parte de esta necesaria información cuantitativa. Esta tendencia continúa. La terminación en 1986, tras más de 40 años, de los vuelos militares estadounidenses desde Guam para reconocer los ciclones tropicales, ha eliminado una valiosa fuente de datos cuantitativos de su zona interior.

A pesar de estas dificultades de observación, todavía es posible reunir sensatamente en muchos sistemas de temporales, las diversas fuentes de informes de observación procedentes de barcos, islas, globos, aviones y satélites. El autor y su grupo de investigación han utilizado durante muchos años un método de composición de sondeos de radioviento para superar muchas de las limitaciones de datos impuestas por los distintos casos de deficiencias de los mismos. A partir de estos aportes diversos es posible obtener una imagen general bastante coherente de la multitud de relaciones físicas básicas que explican por qué se forman los ciclones tropicales, sus características estructurales únicas y sus cambios de estructura.

### **Aspectos básicos de la estructura de los huracanes y limitaciones de su intensidad máxima**

Esta sección explora las grandes variaciones que tienen lugar en la velocidad radial del viento en los ciclones tropicales grandes frente a los pequeños, en los intensos respecto de los débiles, y en los de latitudes altas frente a los de latitudes bajas. También se aclararán los típicos cambios en el viento radial que tienen lugar durante el ciclo vital de un ciclón tropical. La denominada "aceleración rotatoria" o intensificación del núcleo interno de un ciclón tropical (de radio  $0^\circ$  a  $1^\circ$ ) no implica que haya al mismo tiempo una aceleración rotatoria similar de los vientos externos (de radio  $1^\circ$  a  $5^\circ$ ). De hecho, las tendencias de la aceleración de ambas bandas radiales tienden a ser opuestas; cuando tiene lugar una intensificación rápida de los vientos del núcleo interior, en general los vientos externos no aumentan. A medida que un huracán cambia de trayectoria y se desplaza hacia latitudes más altas, los vientos máximos internos tienden a decrecer, mientras que los vientos externos mantienen su fuerza o incluso se intensifi-

can. Los cambios cronológicos de la convección que se deducen de la radiación emitida de onda larga (REOL) observada desde satélite muestran una tendencia similar. Cuando los valores de la REOL en el núcleo interior se hacen menores con el tiempo, indicando un aumento de la convección profunda de cumulonimbos y una intensificación del núcleo interior, los valores de la REOL en el núcleo externo no suelen cambiar o cambian poco, y a veces incluso se debilitan.

Mecánicamente, un huracán es un sistema extremadamente ineficiente. Sus vientos más fuertes se dan en los niveles bajos, donde el contacto con la superficie terrestre origina una fuerte disipación por rozamiento. Esta disipación por rozamiento aumenta con la potencia de orden dos, tres o más, de la velocidad del viento y por esa razón los ciclones tropicales pueden ser tan destructivos. En contraste, los ciclones de las latitudes medias alcanzan con frecuencia sus vientos más fuertes en los chorros alargados en las proximidades de la tropopausa, muy alejados de la influencia disipadora del rozamiento superficial.

Los huracanes superan su disipación por rozamiento en niveles bajos mediante un proceso compensador de aceleración, que implica que los vientos en niveles bajos soplen desde las altas presiones, en el radio externo, hasta las bajas presiones, cerca del centro del ciclón. Solamente mediante este movimiento hacia el interior, a favor del gradiente de presión en niveles bajos, pueden los huracanes mantener su intensidad en contra de los fuertes procesos de disipación. Sin embargo, este proceso de equilibrio por rozamiento introduce en el huracán limitaciones de masa, por lo cual el flujo hacia el interior producido por el rozamiento del aire en niveles bajos se dirige hacia arriba en las nubes que forman la pared del ojo, rodeando primero el centro y yéndose luego hacia afuera en los niveles superiores.

Esta circulación radial necesaria hacia dentro, hacia arriba y hacia afuera precisa que las nubes que constituyen la pared del ojo mantengan un gradiente vertical condicionalmente inestable. Pero a medida que el huracán cobra intensidad, los niveles superiores se hacen más calidos y estables. Este es el factor clave que limita la intensidad máxima que puede alcanzar un huracán. En el caso de los huracanes que están en fase de intensificación, es necesario que la circulación transversal hacia adentro, hacia arriba y hacia afuera sea el uno por ciento o algo mayor de lo necesario para equilibrar la disipación por rozamiento. En el caso de ciclones que están en fase de debilitamiento, la circulación transversal suele ser el uno por ciento menor que dicha disipación.

La necesidad de flujos entrantes aún más intensos a medida que se intensifica el ciclón, también lleva aparejado un aumento de las temperaturas en los niveles superiores y un aumento de la estabilización térmica. Este proceso de estabilización en los niveles superiores actúa como freno en la circulación radial hacia adentro, hacia arriba y hacia afuera en el núcleo interior. Esta aminoración inhibe posteriores descensos de la presión central. La estabilización vertical resulta ser el factor que limita la intensidad máxima que puede alcanzar un ciclón tropical.

Esta argumentación pone de manifiesto una paradoja en el desarrollo de un ciclón tropical. El calentamiento en los niveles superiores, que se precisa para que en el proceso de intensificación disminuya la presión superficial, actúa también como un freno en el proceso de aumento de la circulación radial hacia adentro, hacia arriba y hacia afuera de los ciclones, que se requiere para equilibrar la disipación por rozamiento del ciclón. Considerando los gradientes verticales ambientales de los trópicos, estos procesos de estabilización prescriben un límite superior para los vientos máximos ( $\sim 75 \text{ m s}^{-1}$ ) que pueden alcanzarse en un tifón y para las disminuciones de la presión central ( $\sim 870 \text{ hPa}$ ) de un huracán.

Los tifones y los huracanes intensos pueden mantener en las paredes del ojo una convección más profunda de lo que podría imaginarse, considerando la estabilización que se produce en los niveles superiores y el enfriamiento por evaporación en la capa límite de las masas de aire situadas bajo las nubes de las paredes del ojo, de  $2^\circ$  a  $3^\circ \text{ C}$  por debajo de la temperatura de la superficie del mar (TSM). Esto se realiza en primer lugar situando la mayor parte del calentamiento (condensación) del núcleo interior justamente en el interior de las nubes de la pared del ojo y lejos de la zona de máximo movimiento vertical ascendente y, en segundo lugar, por la pendiente hacia afuera de las corrientes ascendentes de la pared del ojo en los niveles superiores. Alrededor de un tercio del aumento de la temperatura del ojo de un huracán es el resultado de una subsidencia forzada mecánicamente en el interior de la región de movimiento vertical ascendente. Por lo tanto, las nubes de la pared del ojo necesitan superar sólo alrededor de los dos tercios de la estabilización total que tiene lugar asociada a la caída máxima de la presión.

Fijado el tamaño óptimo del ojo y el radio óptimo asociado del viento máximo, el límite superior para la intensidad máxima del huracán viene en gran medida determinado por la TSM sobre la que se forma y se desplaza el huracán. Cuanto más cálida sea la TSM y, en consecuencia, cuanto más cálido sea el

aire de la capa límite situada encima, en mayor medida puede la región de la pared del ojo mantener una presión baja y resistir incluso la estabilización de los niveles altos. Mientras que en las regiones tropicales las temperaturas en niveles altos muestran poca variación geográfica, las temperaturas del océano subyacente presentan variaciones más grandes (con los cambios asociados de humedad). Esta es la razón por la que la TSM es un parámetro crucial para determinar la localización y la intensidad máxima que puede alcanzar un ciclón tropical.

Otra característica distintiva de los ciclones tropicales, en comparación con los ciclones de las latitudes medias, se refiere a esta relación con la superficie subyacente. Se observa que los huracanes no se forman inicialmente o no se intensifican a menos que estén situados sobre océanos tropicales o subtropicales, cuyas temperaturas del agua a nivel de la superficie sean de 26° a 27° C (~80° F) o más cálidas. Los ciclones tropicales no se forman ni se mantienen por sí mismos sobre tierra, independientemente de la temperatura superficial. En comparación, los ciclones de las latitudes medias se desarrollan y se mantienen por sí mismos tanto sobre tierra como sobre los océanos y sin restricciones importantes vinculadas a la temperatura.

### **Temas adicionales**

La monografía también analiza la climatología mundial de la frecuencia de los ciclones tropicales y los múltiples factores dinámicos y termohigrológicos que originan esa climatología. Entre las preguntas concretas que se plantearon están: por qué el sudoeste del Pacífico y el Atlántico sur carecen de ciclones tropica-

les; por qué los ciclones tropicales del norte del océano Índico se dan principalmente en primavera y otoño, pero no durante el verano; y cómo y por qué la cuenca atlántica es tan diferente de las otras cuencas de ciclones tropicales del mundo.

En esta monografía también se estudian los procesos físicos primarios responsables de la formación y del cambio de intensidad de los ciclones tropicales, además de los procesos básicos asociados al movimiento y a la propagación de los ciclones tropicales. Entre otros temas se incluyen las razones por las cuales, en el caso de que hubiese un calentamiento mundial en superficie causado por el hombre de 2° a 4° en los próximos 100 años, no se debería esperar necesariamente un aumento de la frecuencia o de la intensidad máxima de los ciclones tropicales, hipótesis avanzada recientemente por algunos científicos. Se discutirán los problemas de la predicción. Entre éstos se incluyen un análisis de las dificultades que supone mejorar la predicción de la intensidad y del movimiento, a plazos de entre uno y tres días. Se proporcionará nueva información sobre las interesantes posibilidades de la predicción estacional del número de ciclones tropicales, especialmente en la cuenca atlántica, y las grandes reducciones a escala de varios decenios en la frecuencia de los grandes huracanes (categorías 3-4-5), que han tenido lugar en la cuenca atlántica. También habrá una discusión de los esquemas, anteriores y posibles futuros, de la alteración que el hombre ha causado en la intensidad máxima de los huracanes. La monografía concluye con una discusión acerca del papel de la OMM y de los gobiernos para promover métodos nuevos e innovadores con los que lograr un mayor conocimiento y una predicción mejor de esta clase especial de sistemas de ciclones.

## **LAS ENTREVISTAS DEL *BOLETIN***

### **James P. (Jim) Bruce**

*Si se le pidiese al Dr. Taba que describiese a Jim Bruce como persona, le calificaría sin ninguna duda como "un hombre para todas las estaciones". Cruzó, sin ninguna dificultad, los límites entre la meteorología y la hidrología, se situó como figura internacional en el campo ambiental y en numerosas ocasiones demostró ser un hábil negociador, tanto a nivel nacional como internacional. En su propio país, fue la fuerza motriz que estaba detrás de numerosos proyectos, de la investigación de múltiples problemas ambientales y de la aplicación de los resultados.*

*Nuestro entrevistado nació en 1928. Se licenció en física, con especialización en meteorología, por la Universidad de Toronto en 1952. Al comenzar su vida profesional, fue predictor en St. Hubert, del Centro Meteorológico de Canadá, Montreal. Entre 1955 y 1966 trabajó como investigador científico y enseñó hidrometeorología. Durante este período, creó el sistema de predicción de inundaciones de Ontario. Conjuntamente con R.H. Clark, fue autor de un texto titulado "Introducción a la Hidrometeorología" (1966). En 1968 pasó a ser miembro de lo que*