

# Investigaciones destinadas a mejorar las predicciones y alertas de la llegada a tierra de ciclones tropicales

por Russell L. Elsberry\*

## Desastres ocasionados por la llegada a tierra de ciclones tropicales

**La llegada a tierra de ciclones tropicales ha sido causa de enormes daños y pérdida de vidas.** Dos tormentas ciclónicas que azotaron Bangladesh el 12 de noviembre de 1970 y el 29 de abril de 1991 causaron respectivamente más de 300 000 y 130 000 víctimas mortales. Más ejemplos de llegadas a tierra catastróficas se pueden encontrar en otros países (China: *Nina* en agosto de 1975; Japón: *Flo* en 1990; EEUU: *Andrew* en septiembre de 1992; Australia: *Tracy* en diciembre de 1974).

Las consecuencias de la llegada a tierra de ciclones tropicales son patentes cada año en todo el mundo. Durante 2004, Japón recibió el impacto de un número récord de ciclones tropicales. En la tabla adjunta se resumen las pérdidas económicas estimadas en el este de Asia como consecuencia de cuatro tifones en 2004. Aunque los daños fueron cuantiosos, afortunadamente la pérdida de vidas humanas fue relativamente limitada, considerando el alto número de ciclones tropicales que tocaron tierra. No hay duda de que los daños y la pérdida de vidas habrían sido mucho más dramáticos si no hubiera sido por

las inversiones a largo plazo que Japón ha realizado en los ámbitos de la observación convencional y por teledetección, la orientación de los modelos numéricos, un sistema de alertas eficaz que incluye múltiples métodos de comunicación de las mismas, un programa de mitigación, y planes de preparación para hacer frente a los desastres.

Durante 2004, cuatro huracanes azotaron el estado de Florida en EEUU. Según los cálculos preliminares, las pérdidas relacionadas con estos cuatro temporales superaron los 42 000 millones de \$ EEUU. Al igual que en Japón, el número de víctimas fue limitado gracias al desarrollo de un sistema eficaz de alertas y a las inversiones realizadas en programas de mitigación.

Sin embargo, el huracán *Jeanne* tocó tierra en la isla caribeña de La Española, en septiembre de 2004, ocasionando la pérdida de 3 000 vidas, la mayoría de ellas debido a las inundaciones y deslizamientos

de tierra que tuvieron lugar como consecuencia de las fuertes lluvias. Tal y como afirmó Jim Davidson, del Servicio Meteorológico Australiano, lo que mata es el agua. Aunque el total de daños producidos en La Española es mucho menor que el registrado en EEUU por los ciclones tropicales que tocaron tierra allí, el impacto que tienen dichos daños en la infraestructura y economía de los pequeños países en vías de desarrollo tales como Haití y la República Dominicana puede tardar muchos años en superarse. Los vientos asociados al pequeño huracán *Iván*, de categoría 4, destruyeron o dañaron la mayor parte de los edificios de la pequeña isla de Granada, arrasando también su agricultura. En Granada murieron 39 personas a causa de *Iván*.

La mayor catástrofe natural de los EEUU fue la llegada a tierra del huracán *Katrina*, el 29 de agosto de 2005. El temporal provocó la rotura de los diques de contención que protegían Nueva Orleans, quedando

*Estimaciones de víctimas mortales y de daños en la región del Pacífico norte occidental y el este de Asia por los tifones seleccionados durante la temporada de 2004. En todos los casos, las estimaciones de daños se extienden a más de un país.*

| Nombre   | Número | Fecha                  | Muertes | Daños en \$ EEUU <sup>1</sup> |
|----------|--------|------------------------|---------|-------------------------------|
| Mindulle | 07W    | 30 junio-5 julio       | >60     | 350                           |
| Chaba    | 16W    | 22 agosto-2 septiembre | 16      | 2 000                         |
| Songda   | 18W    | 6-8 septiembre         | 41      | 9 000                         |
| Tokage   | 23W    | 19-21 octubre          | 80      | 2 300                         |

\* Escuela de Posgrado de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Meteorología, Escuela de Posgrado de la Armada, Monterrey, California 93943-5114, EEUU. Elsberry@nps.edu

<sup>1</sup> Estimación de daños en EEUU en millones de \$ EEUU (Fuente: Munich Re)

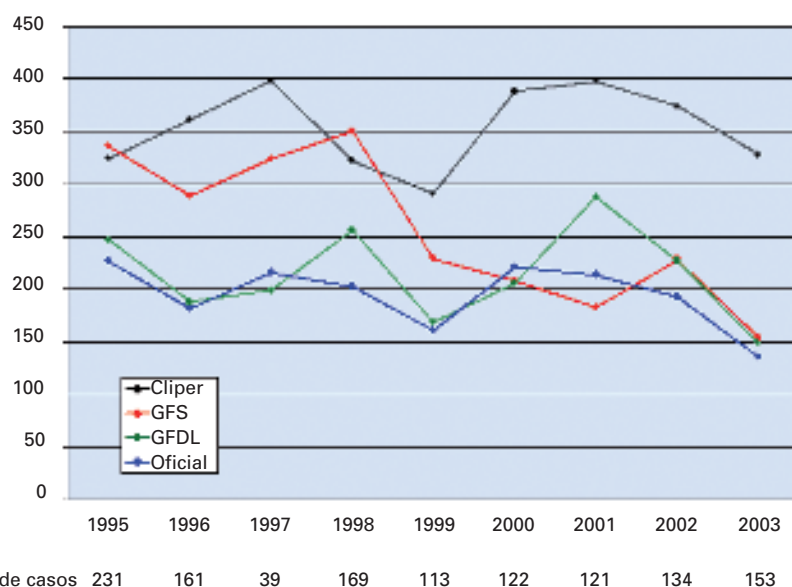


Figura 1 — Tendencias de los errores de trayectoria (en millas náuticas) de ciclones tropicales en el Atlántico, en el plazo de 72 horas, del CLIPER (línea negra), el Sistema de Predicción Global (línea roja), el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (línea verde) y las predicciones oficiales del Centro Nacional de Huracanes del PCT. Los tamaños de la muestra para cada año se indican a lo largo del eje inferior.

inundada esta ciudad en un 80 por ciento. Además, en el vecino estado de Misisipi, una marea de tempestad de entre 9 y 11 metros golpeó las ciudades costeras, destruyendo prácticamente todas las estructuras en una franja de 0,5 km de anchura hacia el interior. Se perdieron más de 700 vidas y, según las estimaciones, los daños podrían superar los 80 000 millones de dólares.

Con motivo de su comparecencia en Kobe (Japón), en enero de 2005, en el Congreso Mundial sobre Reducción de Desastres, el Secretario General de la OMM afirmó que "la reducción de los desastres naturales forma parte de la misión fundamental de la OMM y de sus 187 Miembros". El primer punto en su lista de desastres eran los ciclones tropicales, sin duda debido a los acontecimientos de 2004 y de los años anteriores. El Secretario General explicó que el objetivo de la OMM es reducir a la mitad el número de muertes provocadas por las catástrofes naturales de origen meteorológico, hidrológico y climático, a lo largo de los próximos 15 años. Como meteorólogos, sabemos que no podemos reducir el número de víctimas sin otros apoyos. Tal y como se ha mencionado anteriormente, los pequeños números de víctimas

en Japón y en el estado de Florida pueden atribuirse al desarrollo de sistemas de alerta eficaces y de programas de mitigación, a pesar de que ambas zonas sufrieron un número récord de llegadas a tierra de ciclones tropicales durante 2004.

La pregunta es, pues: ¿qué pueden hacer los investigadores de ciclones tropicales para mejorar el componente meteorológico de un sistema eficaz de alertas? Esta fue la cuestión que se planteó en el Seminario internacional sobre procesos de llegada a tierra de ciclones tropicales (IWTCLP), patrocinado por el Programa de Investigación sobre Meteorología Tropical de la Comisión de Ciencias Atmosféricas de la OMM, que tuvo lugar en la Oficina Meteorológica y Geofísica de Macao (China). Se examinaron algunos de los últimos progresos en materia de investigación y predicción de los ciclones tropicales y se debatieron también los retos y consecuencias de la llegada a tierra de ciclones tropicales, estableciéndose prioridades. Finalmente, se propusieron cinco programas futuros de investigación y estudios sobre impacto social, que contribuirán a mejorar los sistemas de alerta y predicción de la llegada a tierra de ciclones tropicales.

## Avances recientes en la investigación sobre ciclones tropicales

El mayor avance se ha producido en la comprensión y predicción del movimiento de los ciclones tropicales. Las grandes sumas invertidas en investigación han conducido a una mejora en la confección de los modelos numéricos. Así, las predicciones a 72 horas de la trayectoria de un ciclón son ahora tan precisas como lo eran las predicciones a 48 horas de hace una década. En la Figura 1 puede apreciarse un ejemplo de cómo la inversión ha influido en la transición entre la investigación y la operatividad en el Grupo Experimental Conjunto sobre Huracanes (JHT), financiado por el programa de Llegada a Tierra de Huracanes, del Programa de Investigaciones Meteorológicas de los Estados Unidos. Los errores en las predicciones de trayectoria a 72 horas realizadas por el Sistema de Predicción Global de los Centros Nacionales de Predicción del Medio Ambiente se redujeron en un 40 por ciento, lo que hace de ellas una de las herramientas de predicción más fiables. Del mismo modo, gracias a los fondos del JHT se consiguió modificar sustancialmente el modelo del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos, mejorando las predicciones de trayectoria en más de un 20 por ciento en el espacio de dos años. Hay que destacar también que los predictores del Centro Nacional de Huracanes (NHC) pudieron añadir valor inmediatamente a esta mejor orientación de los modelos numéricos, ya que participaban directamente en los proyectos del JHT. A raíz de esto, en 2003 el NHC comenzó a emitir predicciones a cinco días vista. En el caso del huracán *Katrina*, el NHC predijo con exactitud el lugar donde tocaría tierra con más de 48 horas de anticipación.

Además de mejorar la simulación numérica introduciendo, por ejemplo, una mayor resolución horizontal y vertical, y las representaciones de procesos físicos, las técnicas avanzadas de asimilación de datos también están sacando partido de las observaciones por teledetección,

tanto de las ya existentes como de las nuevas. Por ejemplo, dispersómetros como el Quikscat han contribuido a mejorar las estimaciones de la estructura externa del viento (véase Elsberry y Velden, 2003). En cuanto al Pacífico, que desde 1987 carece de reconocimientos aéreos sistemáticos, la aeronave a reacción DOTSTAR proporciona radiovientosondas desde una altura de unos 12 000 pies en sus vuelos de vigilancia en torno a tifones. Japón investiga asimismo el posible patrocinio comercial de vuelos ocasionales en torno a tifones desde aeronaves a reacción. Las aeronaves no tripuladas (UAV) constituyen una nueva plataforma para observar los ciclones tropicales.

Se han puesto visualizaciones gráficas avanzadas de las predicciones a disposición de los medios de comunicación y para su publicación en Internet. También es posible ahora comunicar las alertas de ciclones tropicales mediante la utilización de nuevos sistemas, como pueden ser la telefonía inalámbrica, los organizadores electrónicos personales, los buscapersonas, la emisión continua de información meteorológica a través de la televisión por cable, etc. En la medida que las alertas provienen de diversas fuentes, es más probable que el público responda mejor a las mismas, siempre y cuando el mensaje sea coherente en todo momento. La mejora de la comunicación entre los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) ha conllevado una nueva información adicional que puede utilizarse en la preparación de alertas.

Un fin específico del IWTCLP era el de aprender de los últimos experimentos de campo, como por ejemplo el de Transferencia en la capa límite del sistema acoplado océano-atmósfera (CBLAST), patrocinado por la Oficina de Investigación Naval de los EEUU. El CBLAST tenía por objetivo observar los flujos entre el océano y la atmósfera en el régimen de fuertes vientos del huracán, y los efectos de estos flujos tanto en la capa límite atmosférica como en la oceánica. Por ejemplo, tres días antes de que el huracán *Frances* tocara tierra en la costa este de EEUU, en septiembre de 2004, se distribuyeron en su

camino 38 boyas de superficie a la deriva y 16 flotadores perfiladores oceánicos de subsuperficie. Estas boyas proporcionaron observaciones inéditas de la evolución de la estructura térmica del océano y de los campos de corriente superficial durante el paso del huracán. El programa CBLAST también consiguió observaciones únicas de los flujos desde aeronaves que volaban a muy baja altura (60 m), en un intento por comprender el papel que juegan los rociones marinos generados por las olas que rompen con vientos de gran velocidad. Como al mismo tiempo se realizaron observaciones de alta resolución espacial por medio de radiosondas con paracaídas, estas se utilizarán para determinar las estimaciones del flujo entre el océano y la atmósfera en la región de la pared del ojo, utilizando métodos de balance.

La variación del coeficiente de resistencia para vientos de gran velocidad constituye un resultado preliminar de las observaciones de campo del CBLAST, la simulación numérica y los estudios de modelización de las ondas de viento. El modelo anterior suponía que el coeficiente de resistencia continuaba aumentando con la velocidad del viento, más allá del valor suficientemente establecido de 18 m/s. Aunque sigue existiendo cierta variabilidad en los resultados del CBLAST, hay pruebas de que el coeficiente de resistencia no continúa subiendo por encima de los 28-30 m/s. Por el contrario, con velocidades en aumento, el coeficiente de resistencia o bien queda constante o de hecho se reduce, tal y como habían apuntado Powell y otros (2003). A medida que se confirman estos resultados con el estudio pormenorizado de los numerosos datos recogidos en el CBLAST, las modificaciones que se produzcan en los sistemas de parametrización del flujo entre el océano y la atmósfera en los modelos numéricos contribuirán, sin duda, a mejorar

las predicciones de la estructura de los ciclones tropicales, incluido el cambio de intensidad.

Otro aspecto asociado al problema de la predicción de ciclones tropicales es la llamada "transición extratropical", en la que la estructura casi simétrica del ciclón tropical se transforma en primer lugar en una estructura altamente asimétrica a medida que se mueve hacia el polo y pasa por encima de superficies marinas de temperatura más baja y cizalladuras verticales del viento más altas y, posteriormente, vuelve a intensificarse hasta convertirse en un ciclón extratropical intenso. El Programa de Investigación sobre Meteorología Tropical de la Comisión de Ciencias Atmosféricas de la OMM ha patrocinado tres Cursos internacionales sobre la transición extratropical, reuniendo a investigadores y predictores para estudiar este fenómeno así como los problemas de predicción más comunes (Jones y otros, 2003). El Servicio Meteorológico de Canadá ha organizado una serie de vuelos dentro de ciclones que estaban sufriendo una transición extratropical. Una radiosonda con paracaídas de uno de esos vuelos (Figura 2) midió velocidades de viento que superaban los 70 m/s a menos de 1 km por encima de la superficie. Se necesita avanzar más en la investigación para llegar a explicar cómo se pueden mantener estos vientos tan fuertes a latitudes tan septentrionales, así como los posibles daños localizados que puede ocasionar el viento cuando el ciclón toca tierra.

## Retos para mejorar las predicciones de ciclones tropicales

Al tratar el problema de los ciclones tropicales que tocan tierra, los participantes del IWTCLP establecieron prioridades en relación con diversos aspectos en los que se requiere ayuda por parte de

... lo que mata es el agua.

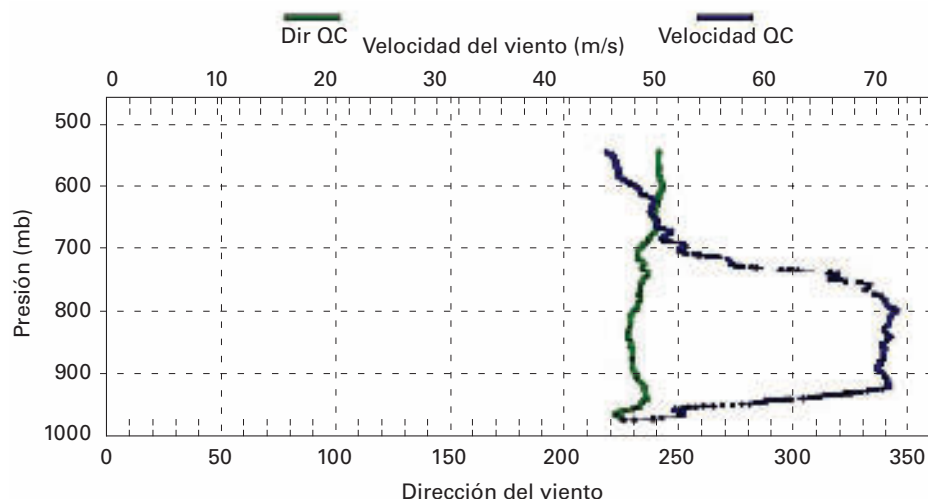


Figura 2 — Perfil de radiovientosonda en el ex huracán Michael en el momento de aproximarse a la costa este de Canadá que documentó un chorro profundo a bajo nivel (fuente: Chris Fogarty)

la comunidad investigadora para poder avanzar. Se acordó otorgar la prioridad más alta a la mejora de las predicciones de trayectoria, lo cual incluye la necesidad de transferir la tecnología avanzada a los países menos desarrollados. Al existir una gran concentración de población, comercio e industria en las zonas costeras, es necesario identificar el punto de llegada a tierra con una antelación de entre 48 y 72 horas, para permitir la evacuación de islas barrera y ciudades por unas carreteras saturadas (sobre todo si se lleva a cabo la evacuación de más gente que la necesaria). El grupo de trabajo de modelización afirmó que se requieren mejores condiciones iniciales, especialmente en lo que concierne a la estructura del ciclón tropical. Aproximadamente en el 96 por ciento de las predicciones globales de trayectoria no se dispone de observaciones sobre el terreno del ciclón tropical. En estos casos se ha de utilizar algún tipo de modificación o recolocación del vórtice a partir de la predicción anterior. Tanto el grupo de modelización como el de predicción estaban de acuerdo en que la incorporación de todas las observaciones (especialmente las de teledetección por satélite y radar) al sistema de asimilación de datos es el mejor camino para mejorar la orientación de la trayectoria. Los sistemas variacionales de asimilación de datos en cuatro dimensiones garantizan el uso óptimo de las observaciones entre las horas sinópticas. Asimismo, el predictor podrá utilizar los sistemas de predicción por

conjuntos (EPS), que proporcionan una estimación de la incertidumbre asociada a la trayectoria, para dar cuenta de la fiabilidad de esta predicción. Sin embargo, no está tan claro que los actuales EPS dispongan de un método adecuado para generar los miembros del conjunto en los trópicos.

La segunda área de prioridad investigadora era la distribución y cuantía de las precipitaciones tras la llegada a tierra de un ciclón tropical. Estas lluvias pueden prolongarse durante días y pueden caer sobre tierras ya saturadas de agua a causa de precipitaciones anteriores. De este modo, la consecuencia física asociada puede ser la inundación o, incluso, las crecidas repentinas si se da el caso de que las fuertes lluvias caen sobre una cuenca fluvial pequeña. En los países en vías de desarrollo que carecen de estructuras para mitigar las inundaciones, pueden desaparecer pueblos enteros situados en los márgenes de ríos o arroyos. Por otro lado, si las prácticas de deforestación han expuesto la tierra de las laderas, las fuertes precipitaciones que acompañan a un ciclón tropical pueden provocar deslizamientos. Incluso en un país desarrollado como EEUU hay personas que pierden la vida intentando cruzar una corriente sin darse cuenta de la fuerza de la misma, aunque este caso es cuestión de educación pública más que de meteorología.

Como ya hemos señalado, todo esto conduce a la afirmación de “lo que

mata es el agua”, aunque también se puede relacionar con la marea de tempestad y la rotura de diques. Se da un caso especial cuando la marea de tempestad se encuentra con el agua que desciende en la desembocadura de un río. Especialmente cuando esta circunstancia tiene lugar en momentos de marea astronómica alta, la crecida combinada del nivel del agua puede resultar catastrófica. Se pueden llevar a cabo estudios de riesgo para determinar el nivel de peligro de estos episodios a fin de desarrollar planes de mitigación.

La precipitación asociada a los ciclones tropicales se complica sobre el océano, ya que existen incertidumbres tanto en términos de la cantidad de agua que entra en el sistema como en los flujos de humedad que ascienden desde abajo. La asimilación de observaciones del vapor de agua por satélite ofrece alguna información, pero la resolución vertical (precisión) en las proximidades de la superficie no es buena. Cuando un ciclón tropical toca tierra, y posteriormente, se hace todavía más difícil predecir la precipitación. El aire que fluye sobre las aguas costeras más cálidas y luego penetra en la tierra puede modificar rápidamente los patrones de nubosidad y precipitación. Igualmente, si la costa presenta un relieve significativo, la elevación de las masas de aire puede dar origen a precipitaciones extremas. Sin embargo, a pocos kilómetros, es posible que la cantidad de lluvia sea de casi un orden de magnitud menor, conforme a lo observado en medidas pluviométricas de alta resolución tomadas en Guam. De este modo, a los investigadores se les plantea la siguiente pregunta: “¿Hasta qué punto es posible predecir estas estructuras de pequeña escala en la precipitación?”.

El Seminario definió algunos requisitos para mejorar las predicciones cuantitativas de precipitación (PCP):

- mejorar las condiciones iniciales introduciendo más observaciones y mejores técnicas de asimilación de datos;
- aumentar notablemente la resolución horizontal (2-4 km) respecto a los actuales modelos operativos;
- perfeccionar la representación de la física de la humedad, incluyendo la microfísica; y

- realizar unas mejores representaciones de las capas límite, sobre todo en lo que se refiere a los fuertes vientos asociados a los ciclones tropicales cuando tocan tierra.

Aunque no aparece explícitamente en la lista anterior, es obvio que se necesita una trayectoria sumamente exacta para la PCP en un lugar específico. La velocidad de traslación es crítica para poder determinar el comienzo y duración de la precipitación, ya que pueden ocurrir acumulaciones extremas con ciclones tropicales de movimiento lento, incluso si el ciclón está en la fase de tormenta y no en las fases de huracán o tifón.

La aproximación consistente en consensuar modelos múltiples o por conjuntos puede proporcionar una incertidumbre de la trayectoria y velocidad que sea útil para estimar la incertidumbre de las cantidades de precipitación que cabe esperar; es decir, la estimación por radar de la distribución de la intensidad de precipitación con respecto al centro del ciclón podría proyectarse hacia delante a lo largo del abanico de trayectorias y velocidades del conjunto, tal y como se está probando en la actualidad en la región atlántica con un proyecto del Grupo Experimental Conjunto sobre Huracanes.

En algunos países hay distintas agencias con competencias sobre los componentes meteorológico e hidrológico del problema. En consecuencia, la eficiencia de la comunicación entre oficinas o agencias puede representar un reto. Las medidas de mitigación contra las inundaciones requieren unas buenas estimaciones a largo plazo de extremos de precipitación del tipo de los que tienen lugar cuando un ciclón tropical toca tierra.

Las estadísticas de Guam sugieren que las máximas intensidades de precipitación en cualquier intervalo de tiempo, de minutos a días, parecen estar relacionadas directamente con los ciclones tropicales; es decir, las intensidades máximas de precipitación que se dan durante los ciclones tropicales no son alcanzadas en ningún caso por ningún fenómeno independiente, ya sean cumulonim-

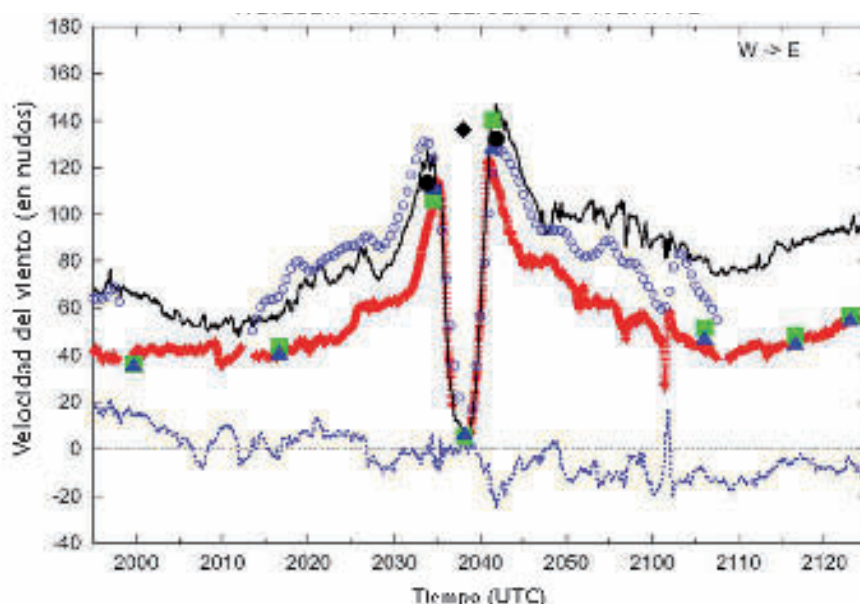


Figura 3 — Observaciones en el huracán Katrina, el 28 de agosto de 2005, del viento tangencial (línea negra), a 12 000 pies de nivel de vuelo, comparado con los vientos del gradiente (círculos azules) y el viento radial (línea de trazos azul de la parte inferior); y en superficie, realizadas por un radiómetro de microondas de frecuencia escalonada (línea roja). Los cuadrados verdes representan los vientos medidos por la radiosonda a 10 m, y los triángulos azules, los vientos estimados en los 150 m inferiores de la capa límite (fuente: Peter Black).

bos, líneas de turbonada o sistemas mesoescalares convectivos. Por esta razón, la planificación de medidas para mitigar las inundaciones requiere una buena estimación del “período de retorno” o de la probabilidad de superar un umbral.

El cambio de estructura e intensidad se situó como tercera prioridad entre los participantes en el Seminario, aunque para algunos centros de alerta este es el parámetro de predicción menos fiable. La estructura externa del viento (por ejemplo, los radios en los que se encuentran vientos de 18 m/s (34 kt) ó 26 m/s (50 kt)) tiene una importancia máxima para los responsables de gestión de emergencias, ya que las medidas de preparación frente a desastres deberían estar listas a la llegada de estos vientos y de las fuertes precipitaciones que probablemente los acompañen. Del mismo modo, los barcos que naveguen en ese momento pueden mantenerse alejados de la región de fuertes vientos (y probable fuerte oleaje) para evitar verse atrapados con imposibilidad de maniobrar. Si estos barcos se mantienen fuera de la zona de peligro, la intensidad no reviste tanta importancia.

La intensidad sí es importante para evaluar los probables daños causados por el viento y la necesidad de evacuación por marea de tempestad. Cuanto mayor sea la intensidad del ciclón, mayor es el área hacia el interior en la que puede penetrar la marea de tempestad si el agua rebasa la altura de la barrera costera, o si una rotura en dicha barrera posibilita que entre el agua.

Las estimaciones del viento en superficie del dispersómetro Quikscat proporcionan normalmente el radio de los vientos duros (cuando lo permite el paso del satélite de órbita polar). A lo largo de 2004 se realizaron varias series de vuelos de aeronaves P-3 de la NOAA, que facilitaron la distribución espacial de los vientos del núcleo interno de las tormentas del Atlántico, gracias al radiómetro de microondas de frecuencia escalonada. Estas observaciones de viento (Figura 3) permitieron al Centro Nacional de Huracanes actualizar y modificar varias veces sus estimaciones de radios de viento. Sin embargo, estas observaciones de la estructura interna del viento no estarán disponibles fuera del Atlántico, y habrá que ajustar

perfiles de velocidad del viento con perfiles radiales del viento. Debido a la falta de observaciones (o a su distribución desigual en torno a la tormenta), carecemos de una buena información detallada sobre la variación con el tiempo de la estructura externa del viento.

Los participantes en el IWTCLP sugirieron que muchos de los requisitos para mejorar la PCP por medio de modelos constituyen las mismas condiciones necesarias para mejorar la predicción de intensidades. En el caso de una tormenta tropical de movimiento lento que contenga sistemas mesoescalares convectivos o que interactúe con frentes que determinen la distribución de la precipitación (en lugar de tratarse de una convergencia dinámicamente restringida), no se percibe una relación directa entre las mejoras en la predicción de intensidades y unas mejores predicciones de precipitación. Es necesaria una resolución horizontal muy alta para resolver la pared del ojo y los fenómenos de mezcla en la misma, de los que se ha sugerido que juegan un papel como moduladores de la intensidad.

Los ciclones en transición extratropical pueden desplazarse hacia el polo muy rápidamente, con el resultado de que la suma del flujo de vórtice y el flujo principal da origen a un fuerte máximo de viento hacia el lado derecho de la trayectoria (en el hemisferio norte). En estos casos pueden crearse enormes olas en la superficie oceánica a causa del fenómeno del "*fetch* (alcance) atrapado", si se da la circunstancia de que la velocidad de traslación es igual a la velocidad de la onda de gravedad interna de modo que el forzamiento de la tensión del viento favorece el aumento continuo del tamaño de las olas. La precipitación máxima se da en el lado izquierdo de la trayectoria y puede provocar importantes lluvias en la costa este de EEUU o de Asia incluso aunque el centro del fenómeno se halle localizado aún cerca de la costa. Si la vaguada de latitud media que ha provocado el desplazamiento hacia el polo del ciclón tropical ya ha ocasionado precipitaciones de tipo frontal a lo largo de la trayectoria del ex ciclón tropical, puede ocurrir una importante acumulación de precipitación.

Dada la interacción a tres bandas entre el ciclón tropical, la vaguada de latitud media y la alta presión subtropical, la ciclogénesis extratropical que resulta de esta interacción parece tener múltiples soluciones. En el Pacífico se han liberado algunas radiovientosondas direccionadas desde aeronaves para intentar comprender mejor cómo se modifican estas circulaciones durante la transición extratropical. Además, el Servicio Meteorológico de Australia está llevando a cabo actualmente observaciones adicionales específicas por medio de un procesamiento especial de los vientos determinados por satélite, en zonas donde se espera obtener una respuesta más amplia.

La cuarta prioridad en el ámbito de los ciclones tropicales que tocan tierra son las mareas de tempestad, que han ocasionado numerosas catástrofes asociadas a ciclones tropicales en países en vías de desarrollo donde la población habitaba en áreas costeras de litoral bajo y disponía de muy poca o ninguna información acerca de los ciclones tropicales que llegan a tierra. Parece existir un sentimiento de autocomplacencia en los países desarrollados que llevan un cierto tiempo sin sufrir un desastre por marea de tempestad. Probablemente las razones de que haya mortalidad nula en casos de marea de tempestad puedan encontrarse en un mejor uso de las tierras costeras y mejores normas de edificación, así como en un mejor sistema de alertas. El nivel total del agua en la marea de tempestad no es solo el ascenso del agua por causa del temporal, sino que incluye también la marea astronómica, los mecanismos impulsores del oleaje y la elevación momentánea al romper la ola. Las diferentes regiones costeras tienen distintas mareas astronómicas (por ejemplo, la costa oriental de Australia tiene una amplitud mareal mayor que la costa este de EEUU), y, por lo tanto, pueden ser más o menos sensibles al impacto de las mareas de tempestad, dependiendo de las características de la marea y de la vulnerabilidad a nivel local.

La mayor incertidumbre en la predicción de mareas de tempestad se debe a la imposibilidad de cono-

cer con precisión el forzamiento meteorológico. La incertidumbre respecto a la velocidad del viento es más grave porque la tensión del viento necesaria para hacer funcionar el modelo de mareas depende del cuadrado de la velocidad del viento. Si se conoce esta distribución de la tensión, la fiabilidad de los modelos es suficientemente alta como para poder determinar con razonable exactitud la altura máxima de la marea. Esta afirmación presupone que se conozca la trayectoria, ya que una altura máxima de la marea en el lado derecho (en el hemisferio norte) implica alturas mínimas (niveles de agua negativos) en el semicírculo opuesto. Esta incertidumbre en la trayectoria constituye una consideración importante para aquellos modelos dinámicos de mareas de tempestad que pueden ejecutarse en tiempo real, ya que suponiendo que se esté empleando una determinada distribución de tensiones asociadas a la tormenta para el forzamiento del modelo de marea de tempestad, si esta se sitúa erróneamente en una magnitud equivalente al ancho de la pared del ojo, acabaremos localizando la marea máxima en un tramo costero equivocado, ya sea bahía o entrada de mar.

## Propuesta para futuros proyectos de investigación

Tras haber recibido la información de investigadores y predictores respecto a los últimos avances en investigación y sobre las necesidades actuales priorizadas, el Seminario evaluó y aprobó cuatro proyectos de investigación meteorológica y expresó su apoyo a la intensificación de trabajos relativos a los impactos sociales. Aunque existe algo de solapamiento, se consideró que los proyectos eran ya lo suficientemente independientes como para dejar para más adelante las deliberaciones para estudiar las posibilidades de colaboración existentes. Los requisitos para que prosperen estos proyectos son: que exista un cuadro de investigadores y/o predictores que se responsabilicen de hacer avanzar cada proyecto; y que los directores de proyecto consigan la financiación necesaria para llevarlo a buen término. Ya

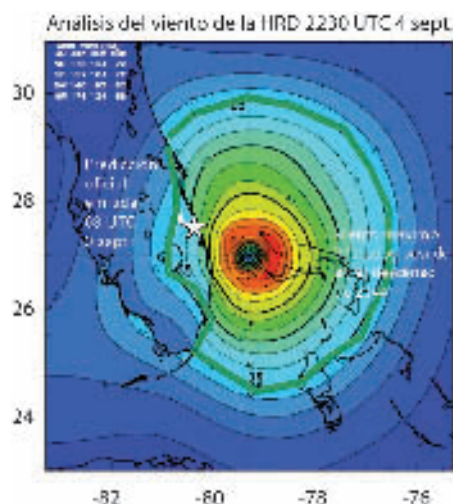
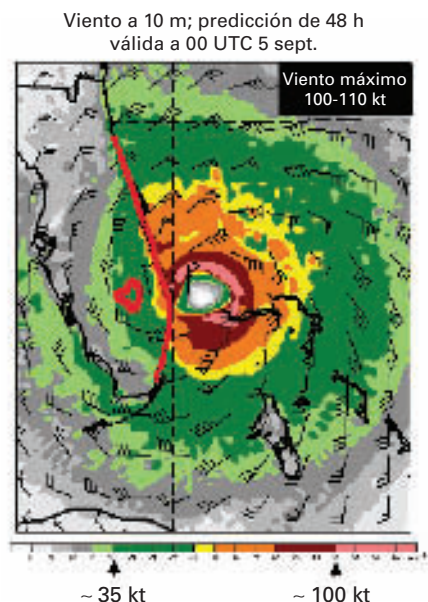


Figura 4 — Velocidad del viento de superficie (en nudos) (véase la barra inferior de colores) prevista por el modelo de alta resolución del Centro Nacional de Investigación de la Atmósfera (izquierda); y verificación del análisis de viento por la División de Investigación de Huracanes (HRD) de la NOAA (derecha) (fuente: Greg Holland)

que el problema de los ciclones tropicales que llegan a tierra es compartido por muchos países de todo el mundo, la OMM es una agencia apropiada para amparar estos proyectos.

### La intercomparación de modelos para predecir la llegada a tierra de ciclones tropicales

En el IWTCLP hubo varios grupos de investigación que presentaron predicciones optimistas de los cambios de intensidad y estructura de los ciclones tropicales, así como distribuciones de precipitación realistas. En la Figura 4, se compara un ejemplo de la estructura del viento prevista en superficie por un modelo de investigación de 4 km para la llegada a tierra del huracán *Frances* (el 4 de septiembre de 2004) con el campo de viento analizado en aquel momento. Este estudio supone un desarrollo pleno de los modelos numéricos comparable a la modelización del movimiento de ciclones tropicales de hace 10 años, que condujo a las predicciones de trayectoria más perfeccionadas de que disponemos hoy en día. Sin embargo, estos modelos de predicción tienen numerosos componentes distintos (inicializaciones, dinámica del núcleo, procesos físicos que incluyen aspectos que afectan a capa

límite, convección y microfísica, acoplamiento de olas oceánicas, acoplamiento térmico oceánico, modelización de la superficie terrestre, etc.) y no se han validado con un amplio número de casos (ni siquiera con un procedimiento de validación completo). La propuesta del proyecto es que el PIMT (tal vez en colaboración también con el grupo de predicción numérica del GTEN/CCA/OMM) financie una evaluación o intercomparación integral de estos nuevos modelos que parecen ser capaces de mejorar la comprensión y predicción de los procesos de llegada a tierra de los ciclones tropicales.

Esta iniciativa sería semejante al programa COMPARE III de la CCA que hace una década utilizó condiciones iniciales de los experimentos de campo combinados de 1990 (TCM-90, SPECTRUM y TATEX) y que abarcó más de 10 modelos. La iniciativa ahora propuesta incluiría los siguientes modelos: WRF-CNIA; WRF-NCEP; COAMPS; Instituto japonés de investigación meteorológica; instituciones académicas (Miami, Hawai, Maryland, estado de la Florida, etc.); y otros grupos internacionales tales como el Servicio Meteorológico del Reino Unido, el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo, Météo-France, Alemania, China, Australia, Canadá, etc.

La estrategia del proyecto sería similar a la de COMPARE III en que se podrían proporcionar condiciones iniciales idénticas y se utilizarían grupos de datos de validación comunes. Sin embargo, las demás intercomparaciones podrían formularse para conjuntos de datos físicos autoconfigurables e intercambiables. El enfoque se centraría sobre todo en aquellos procesos de llegada a tierra de ciclones tropicales que son necesarios para mejorar su comprensión y predicción.

Uno de los objetivos sería fijar un conjunto mínimo de modelos y desarrollar medidas de la incertidumbre para la predicción de la llegada a tierra de los ciclones tropicales. Un segundo objetivo sería realizar una prueba de sensibilidad de la física de cada modelo, así como evaluar su capacidad para predecir aspectos específicos de los cambios estructurales y de la precipitación. Un resultado adicional sería el papel de la asimilación de datos y las contribuciones de diversas fuentes de observación. Otro aspecto esencial de este proyecto sería el establecer un conjunto de parámetros de medida para validar los modelos de predicción de los impactos de un ciclón tropical que toca tierra. Finalmente, esta intercomparación de modelos y de impactos observacionales podría proporcionar una estimación de lo que costaría mejorar las predicciones de viento, precipitaciones y mareas de tempestad de acuerdo con diversos niveles de complejidad del modelo o de los sistemas de observación.

### Proyecto de demostración de predicciones para los ciclones tropicales que llegan a tierra

El objetivo de este Proyecto de Demostración de Predicciones (PDP) es demostrar los beneficios meteorológicos y sociales que resultan de una mejor comprensión del campo de viento inferior sobre el océano y al tocar tierra, y de las tecnologías que contribuyen a ello, tales como los modelos numéricos de alta resolución y las técnicas perfeccionadas de asimilación de datos mesoescales, especialmente de datos

de teledetección. En este PDP, se aplicarán los nuevos conocimientos acerca del cambio en la estructura e intensidad de los ciclones tropicales, y sobre las precipitaciones asociadas a los mismos, a la predicción de fenómenos asociados a la llegada a tierra de un ciclón tropical: aparición de vientos dañinos, precipitaciones fuertes y respuestas hidrológicas, marea de tempestad, etc. Un segundo aspecto social sería la evaluación de respuestas adecuadas (o la ausencia de ellas) ante las alertas por ciclón tropical, con el ánimo de desarrollar estrategias y procesos de comunicación de alertas que sean más eficaces.

El primer PDP se centrará en Filipinas. Se presentó una propuesta en la tercera Conferencia sobre alerta temprana (Alemania, marzo de 2006). El siguiente paso es preparar un plan de ejecución para presentarlo ante el organismo de financiación. Uno de los principales objetivos del PDP será el uso de uno o varios modelos numéricos mesoescalares para predecir la llegada a tierra de ciclones tropicales. Otros fines serán los siguientes:

- evaluar la capacidad de los predictores de la región para adoptar los resultados del programa de investigación y desarrollo;
- aplicar un programa de educación pública; y
- evaluar de forma objetiva, allí donde se produzcan, las mejoras en observación, predicción, alertas y respuesta de la comunidad.

Este PDP aprovechará los resultados de investigación del programa de Llegada a Tierra de Huracanes, del Programa de Investigaciones Meteorológicas de los Estados Unidos. En este país se han desarrollado nuevas observaciones por medio de aeronaves, satélite y radar, así como la asimilación avanzada de datos y modelos numéricos capaces de resolver nubes. En estos momentos, estas nuevas tecnologías y avances en materia de investigación que se han desarrollado en EEUU se están probando en el Grupo Experimental Conjunto sobre Huracanes, con vistas a su aplicación en el Centro Nacional de Huracanes. Este es el tipo de Proyecto de Demostración de Predicciones que se propone extender ahora a otras áreas.

Una parte del proyecto propuesto constituye un extenso programa de formación para predictores de ciclones tropicales. La formación incluiría la actualización o introducción de estaciones de trabajo para gestionar el flujo de información que recibe el predictor. La colaboración con las organizaciones no gubernamentales que representan un papel esencial en la comunicación y en las tareas de recuperación tras el temporal será una parte fundamental de este enfoque y otro importante objetivo es el de aprender a ajustar los avisos según los distintos sectores de la sociedad. La Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia y el Pacífico (CESPAP) podría organizar actividades de creación de capacidad, especialmente en lo que se refiere al componente hidrológico.

También ha comenzado a planificarse un PDP para ciclones tropicales en el área de la India y Bangladesh, donde, como ya vimos en la introducción, se han sufrido las mayores pérdidas de vidas humanas a causa de los ciclones tropicales.

### Proyecto de orientación de predicciones avanzadas de ciclones tropicales en el este de Asia

La finalidad de este programa, en el que colabora el Comité Regional de Asia (CRA) para el Experimento de Investigación y Predictibilidad del Sistema de Observación (THORPEX) hemisférica, es ampliar el plazo de predicción para los ciclones tropicales y ofrecer predicciones probabilísticas con el nuevo sistema de predicción de síntesis del THORPEX, reforzando los vínculos y esfuerzos de ambos proyectos. Los tres componentes clave que se proponen para este proyecto son: observaciones dirigidas, asimilación de datos, y el Gran conjunto interactivo mundial del THORPEX para ciclones tropicales (TC-TIGGE), que es un súper conjunto basado en modelos múltiples.

Los experimentos de observaciones dirigidas se deberían realizar desde diversas plataformas de observación. Se han llevado a cabo varios experimentos sobre el terreno con

observaciones dirigidas correspondientes a temporales invernales, pero no se ha realizado ningún experimento sobre el terreno para los ciclones tropicales de la zona occidental del Pacífico Norte. Esto puede deberse a que no haya estado disponible la versión húmeda del sistema auxiliar que se necesita para el sistema de asimilación de datos, o a que no se pueda aplicar a la circulación o a las nubes convectivas intermitentes, o a que la técnica no valga para determinar las áreas sensibles, etc. Este proyecto se beneficiará de las observaciones de un programa especial de campo en la región asiática (según se explica más adelante), y del uso de sistemas avanzados de predicción.

Se propone aplicar técnicas avanzadas de asimilación de datos a varios conjuntos de datos importantes, para mejorar las predicciones de ciclones tropicales: radar, perfilador de viento, observaciones por satélite y también las nuevas observaciones dirigidas. Existe una técnica avanzada de asimilación de datos en cuatro dimensiones (4DVAR), para utilizarla con estos conjuntos de datos. Sin embargo, de acuerdo con las últimas investigaciones, el test de asimilación de las observaciones dirigidas aún presenta lagunas importantes, que serán estudiadas en este proyecto.

Un proyecto en marcha del CRA del THORPEX es el de intercambiar predicciones de trayectoria de ciclones tropicales entre los miembros del CRA. Se podría incluir el TC-TIGGE en la nueva propuesta de intercomparación de modelizaciones de ciclones tropicales (como en el COMPARE III). La intención del CRA es la de desarrollar a continuación un modelo de conjuntos de múltiples modelos y poder proporcionar predicciones probabilísticas a sus miembros.

### El componente de transición extratropical en colaboración con el THORPEX

La transición extratropical de ciclones tropicales afecta a muchos países entre los que se incluye a Australia, Canadá, China, EEUU, Federación Rusa, Japón, Nueva Zelanda, República de Corea y

República Popular Democrática de Corea. Efectos asociados también pueden afectar a zonas de Asia, Europa y América del Norte. Los cambios estructurales del ciclón durante la transición extratropical se hacen patentes en los campos de precipitación y de viento, y frecuentemente vienen acompañados por una aceleración del ciclón, lo que solo permite al centro de alerta un margen de error mínimo a fin de ofrecer un sistema de alertas eficaz. Además, el aflujo de energía y humedad que se introduce en latitudes más altas a raíz de estos procesos puede tener efectos ulteriores importantes, con consecuencias meteorológicas violentas afectando a áreas bastante distanciadas del fenómeno inicial.

Los actuales modelos numéricos operativos tienen dificultades para predecir de forma adecuada la transición extratropical a causa de las interacciones a cuatro bandas que se dan entre el ciclón tropical, la circulación de la vaguada en latitudes medias, la circulación del

Todos estos modelos de alta resolución podrían utilizarse para estudiar los procesos que intervienen durante la transición extratropical y perfeccionar, de este modo, la capacidad de predicción.

El IWTCLP también reconoció la necesidad de incorporar más estudios de impacto social, a fin de garantizar la eficacia del sistema integral de alertas. Esto es especialmente importante para los episodios de transición extratropical, ya que tienen consecuencias irregulares y muestran unas características muy diferentes que en el caso de los ciclones tropicales, al tiempo que se acercan mucho más hacia el polo de lo que puede esperar la población en general de un fenómeno que normalmente se comporta como un ciclón tropical.

El IWTCLP propuso que las comunidades internacionales de investigación y predicción aprovechen el incremento de observaciones previstas con motivo del Año Polar 2007-2008, así como los

se llevó a cabo en el III Cursillo internacional sobre transición extratropical celebrado en Perth (Australia) a lo largo de diciembre de 2005.

El Comité Regional de Asia y los grupos del THORPEX para América del Norte están ultimando los planes para llevar a cabo un programa de campo que tendrá lugar durante 2008 y recibirá el nombre de Campaña regional del área del Pacífico (PARC). Los países asiáticos se encargarán de las fases de génesis y de "precurvatura" de los ciclones tropicales de la PARC, mientras que las naciones de América del Norte cooperarán en las de "recurvatura" y transición extratropical, con un enfoque particular sobre los efectos vinculados en las áreas circundantes. Como ya se ha indicado, el programa de observaciones se verá complementado por estudios de modelización numérica y por análisis de impacto social. También se prevé un apoyo adicional por parte del Proyecto de demostración de predicciones para los Juegos Olímpicos de Pekín 2008, del Programa Mundial de Investigación Meteorológica (PMIM), por medio de una red mejorada de observaciones en el norte de China, un área que resulta crítica a la hora de identificar la estructura de las circulaciones en latitudes medias que influyen sobre el proceso de transición extratropical. En el caso de Canadá, los recursos de observación e investigación pueden formar parte del programa para el Año Polar Internacional. En EEUU se ha dirigido una propuesta a la *National Science Foundation* para solicitar estudios e instalaciones de carácter científico.

## Integración de los impactos sociales en los sistemas de alerta por ciclón tropical

Las graves consecuencias sociales y económicas de los ciclones tropicales pueden ser mitigadas en parte por el sistema de predicción y alerta de huracanes. El objetivo principal de las tareas de vigilancia y predicción de huracanes es evitar la pérdida de vidas humanas y reducir la vulnerabilidad ante vientos, mareas de tempestad, inundaciones de zonas interiores y otras amena-

## Parece existir un sentimiento de autocomplacencia en los países desarrollados que llevan un cierto tiempo sin sufrir un desastre por marea de tempestad.

anticiclón subtropical y los flujos océano-atmósfera. Es fundamental utilizar modelos numéricos de alta resolución para resolver tanto los cambios mesoescalares en el núcleo interno del vórtice del ciclón tropical, como la transición a procesos predominantemente baroclínicos que alimentan de energía el temporal.

El IWTCLP señaló los continuos progresos en modelización numérica, que implican un gran potencial para aplicar modelos mejorados al problema de la transición extratropical. Se informó al Seminario de la puesta en marcha de modelos nuevos, tales como el modelo canadiense de 35 km de resolución, el modelo de los Centros Nacionales de Predicción del Medio Ambiente (también de 35 km), y el modelo global japonés previsto para 2006.

programas de campo que se están preparando dentro del marco del THORPEX, para llevar a cabo un programa de investigación acerca de la transición extratropical. Los objetivos principales propuestos para este proyecto son los siguientes:

- mejorar la comprensión y predicción de la transición extratropical en la zona occidental del Pacífico Norte, y
- trasladar los nuevos conocimientos sobre este fenómeno a los sistemas de alerta de los países que se ven afectados por la transición extratropical y sus efectos asociados, con objeto de mejorar las medidas de mitigación de desastres y de reducir sus consecuencias para la sociedad.

La planificación de los requisitos observacionales y de modelización

zas. Una incorporación más amplia de las dimensiones económica y social a nuestro cometido de predicción de huracanes generará sin duda grandes beneficios en cuanto a eficacia y respuesta de los usuarios.

A lo largo del IWTCLP se sucedieron ponencias y debates en los que quedó claro que tanto los directores del Seminario como los participantes en el mismo convienen en la necesidad de aumentar e integrar mejor la colaboración con investigadores en ciencias sociales, así como de estudiar posibles enfoques para paliar las consecuencias sociales de los ciclones tropicales. En consonancia con esta convicción, se realizó un esfuerzo explícito para incluir en el Seminario las aportaciones de expertos en impacto social, y para contextualizar las prioridades de investigación de modo que incluyan el impacto social en la agenda de investigación sobre ciclones tropicales.

Dada la complejidad de los impactos sociales relacionados con los ciclones tropicales y la diversidad de posibles contribuciones y enfoques que podrían ofrecer las ciencias sociales para abordar distintos aspectos de este problema, toma forma un amplio catálogo de cuestiones entre los países que asistieron al Seminario. En primer lugar, hay que considerar las necesidades y el potencial asociados a la inclusión de estudios sobre impacto social en los programas de investigación sobre ciclones tropicales.

Para continuar avanzando en estos debates, el IWTCLP recomienda a la OMM:

- Realizar una declaración en la que reafirme explícitamente la importancia del componente social en un sistema de alertas eficaz.
- Reforzar el compromiso de explorar los impactos sociales de los ciclones tropicales y los sistemas de predicción y alerta de los mismos. La OMM debería fomentar la integración de esta iniciativa dentro de la comunidad de investigación sobre ciclones tropicales, de manera que se pueda conseguir un sistema de alertas más eficaz por medio del uso de los resultados de estudios sobre impacto social. Esto

optimizaría el índice de respuesta apropiada por parte de la población ante la amenaza de la llegada a tierra de un ciclón tropical.

La integración del componente de impacto social dentro del problema de los ciclones tropicales habría de verse como un factor esencial para cubrir los objetivos y necesidades de las comunidades que se ven afectadas habitualmente por ciclones tropicales. De hecho, los aspectos económicos de la investigación sobre impacto social podrían justificar una intensificación de los estudios en materia de ciclones tropicales a fin de lograr un sistema de alertas más eficaz.

El primer objetivo es saber cómo puede contribuir la investigación sociológica a alcanzar un sistema de alertas más eficaz y qué clase de investigación hace falta. Es necesario reagrupar de manera sistemática las bases de datos dispares sobre el impacto social de los ciclones tropicales que ya existen en diversas regiones, y hacerlo en un formato digital que facilite la investigación. Se dispone de documentación sobre impacto social para poder analizar o interpretar una base de datos de este tipo. Sin embargo, esto requiere comprender la diversidad y naturaleza de los diferentes enfoques que recibe internacionalmente el componente social de la predicción y alerta de ciclones tropicales (es decir, cómo funciona en los diversos países el sistema de mitigación, predicción, comunicación, alerta y respuesta en caso de ciclón tropical, y qué impacto tiene este sistema en la eficacia a la hora de conseguir los objetivos sociales para solventar el problema de los ciclones tropicales). Otro objetivo es el esfuerzo concertado para integrar la investigación sobre impacto social dentro de la iniciativa global de investigación que se lleva a cabo en el área de estudios de campo sobre ciclones tropicales (por ejemplo, realizando un cursillo específico sobre cuestiones de impacto social en casos de ciclones tropicales).

## Resumen

Los continuos desastres asociados a los ciclones tropicales que llegan

a tierra constituyen un acicate para incrementar la investigación en aras de mejorar el sistema de predicción y alertas. El Seminario internacional sobre procesos de llegada a tierra de ciclones tropicales, patrocinado por el Programa de Investigación sobre Meteorología Tropical de la Comisión de Ciencias Atmosféricas, ofreció una oportunidad para que investigadores y predictores de muchos países establecieran un plan de investigación.

Tres de los cuatro programas de investigación propuestos en el Seminario ya están en marcha. En la tercera Conferencia sobre alerta temprana se presentó un Proyecto de demostración de predicciones centrado en Filipinas, y se está preparando un plan de ejecución. También se prepara un segundo Proyecto de demostración de predicciones para Bangladesh. El Comité Regional de Asia de THORPEX está llevando a cabo una iniciativa para la predicción de ciclones tropicales, y progresan los planes para un programa de campo, operativo en 2008, que se llamará Campaña regional del área del Pacífico, en colaboración con el Comité Regional de América del Norte. Además, los participantes en el Seminario recomendaron la integración de la investigación sobre impacto social en todos los proyectos, de manera que pueda garantizarse una respuesta apropiada a las alertas por ciclón tropical, y reducir así al máximo la pérdida de vidas humanas y los daños.

## Agradecimientos

Doy las gracias a los participantes en el seminario que presentaron sus ponencias e ideas, especialmente a aquellos que proporcionaron cifras.

## Referencias

- ELSBERRY, R.L. y C.S. VELDEN, 2003: Estudio de los centros de predicción de ciclones tropicales: usos y necesidades de datos de satélite. *Boletín de la OMM*, 52, 274-281, OMM, Ginebra.
- POWELL, M.D., P.J. VICKERY y T.A. REINHOLD, 2003: Reduced drag coefficient for high winds speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422, 279-283.