

gunas situaciones. Se está enseñando a la población que no tiene que irse a protegerse en el lugar, y a quienes no tienen que recorrer distancias importantes desde su hogar para alcanzar lugares seguros a buscar refugio en lugares cercanos. Se están utilizando nuevas técnicas de cartografiado como el LIDAR para identificar zonas en las que las inundaciones no serían lo suficientemente grandes como para suponer un peligro para la vida de las personas y, en algunas comunidades, no se dice en esas áreas que abandonen el hogar, reduciendo de forma importante el número total de horas necesarias para realizar una evacuación. El flujo de tráfico en una evacuación se controla de forma que puedan restringirse las nuevas salidas si hay una probabilidad de que los evacuados no tengan el tiempo suficiente para desalojar la región en peligro antes de la llegada de la tormenta. Los predictores trabajan para reducir los errores de predicción de la trayectoria y la intensidad para no tener que evacuar zonas mayores de lo necesario.

La tendencia histórica es, de forma clara, a la baja, con respecto a las muertes por huracanes y esto es atribuible principalmente a mejores predicciones y avisos y a un mejor uso de los mismos. Pero, como las

poblaciones costeras siguen creciendo más rápido que las mejoras de las predicciones, las innovaciones en las actividades de preparación siguen siendo cruciales para mantener esa tendencia en la dirección correcta.

### Referencias

- BLAIKIE, P., T. CANNON, I. DAVIS y B. WISNER, 1994: *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*, Routledge, London.
- CHEN, L., 2000: Tropical Cyclone Impacts in China, pp. 357-385, en R. Pielke y R. Pielke (Eds.), *Storms*, Vol. 1, Routledge, London.
- HAQUE, C. E., 1997: Atmospheric Hazards Preparedness in Bangladesh: A Study of Warning, Adjustments and Recovery from the April 1991 Cyclone, *Natural Hazards*, 16, 181-202.
- RAGHAVAN, S. y A. K. SEN SARMA, 2000: Tropical Cyclone Impacts in India and Neighborhood, en R. Pielke and R. Pielke (Eds.), *Storms*, Vol. 1, 339-356, Routledge, London.
- RAMESH, K. S., 1994: Cyclone Disaster Management in Coastal Districts of Andhra Pradesh: A Case Study, en V. K. Sharma (Ed.), *Disaster Management*, 159-177, National Centre for Disaster Management, New Delhi.
- SOUTHERN, R. L., 2000: Tropical Cyclone Warning-Response Strategies, en R. Pielke and R. Pielke (Eds.), *Storms*, Vol. 1, 259-305, Routledge, London.

## Ciclones tropicales que se adentran en tierra firme

Por Gary R. FOLEY\*

### Llegadas a tierra firme a través de la historia

Los ciclones tropicales son una consecuencia violenta de la tendencia de la circulación atmosférica global a autorregularse térmicamente. Están organizados y son paquetes de energía maravillosamente estructurados. Sus trayectorias son aleatorias y caóticas en un sentido y, sin embargo, extrañamente ordenadas en otro, ya que interaccionan o se someten a los esquemas de circulación atmosférica mayores y más estables que encuentran en su viaje hacia el polo (Figura 1a, b). Aunque de origen oceánico, ocasionalmente encuentran islas y continentes en su camino. La llegada a tierra firme es aleatoria. Los humanos simplemente se cruzan en su camino.

Neumann (1993) sugirió que la zona de contacto con tierra firme más frecuente del planeta está en la isla de Luzón, en Filipinas. Otras zonas de riesgo alto son las costas de China, Japón, Vietnam, el norte del Golfo de Bengala, la costa oriental de América del Norte, la costa noroccidental de Australia y las islas del oeste del Océano Índico y del Pacífico Sur. El riesgo de ciclones tropicales tampoco está confinado a los trópicos. El punto de recalada puede darse también en latitudes medias.

A medida que la sociedad se desarrollaba y los humanos se agrupaban en comunidades creció la destrucción causada por los ciclones tropicales. Los supervivientes deben haber observado el furioso aumento del viento, el cambio de la dirección del viento durante la tormenta, tal vez el paso del mismo ojo del ciclón, la entrada de agua marina por encima de los niveles normales de la marea, la lluvia torrencial con

\* Director Regional (Queensland), Oficina de Meteorología, Australia.

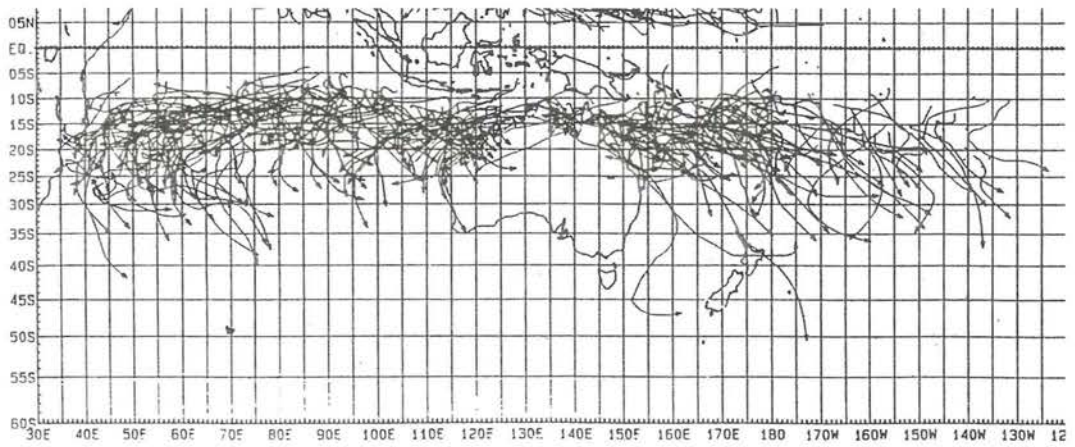


Figura 1 (a) — Trayectorias de ciclones tropicales del hemisferio sur para el periodo 1979-1988 (adaptado de Neumann, 1993)

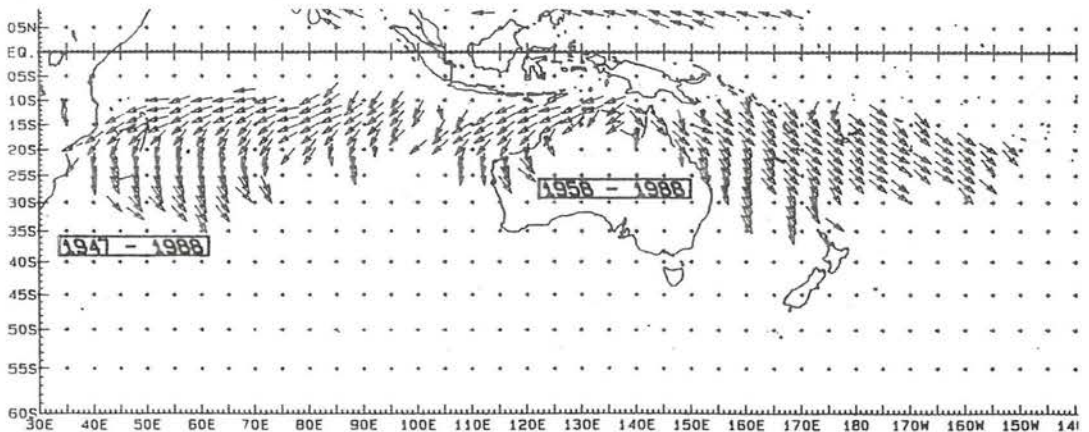


Figura 1 (b) — Dirección media del movimiento de ciclones tropicales del hemisferio sur (adaptado de Neumann, 1993)

las inundaciones y corrimientos de tierra concomitantes: la destrucción de todo lo que habían construido. Un ciclón tropical era distinto, obviamente, a los demás episodios meteorológicos tropicales. Podrían caracterizarse los ciclones como un único evento con un inicio y un final. Los intentos de apaciguamiento mediante sacrificios a los dioses furiosos dieron paso a los esfuerzos por detectar señales de la aproximación de estas tormentas —formaciones de nubes, viento en un cuadrante determinado, aumento de las olas oceánicas— sobre todo, y al principio, por los marineros, que, en el siglo XVII, habían acumulado la experiencia suficiente al menos para intentar evitar lo peor de las tormentas con las que se encontraban. La experiencia y la observación se consolidaron en trabajos escritos tales como *Law of Storms (La ley de las tormentas)*, de Reid, en 1838, y *Sailor's Hornbook (La cartilla del marinero)* de Piddington, en 1848. Si una comunidad sabía que se estaba acercando un ciclón tropical podía prepararse y, tal vez, sobrevivir. El conocimiento era la puerta de la seguridad. La ciencia tenía la llave.

El jesuita Fray Benito Viñes dirigió uno de los primeros intentos para seguir la trayectoria y avisar de ciclones tropicales en Cuba en 1873, utilizando una red de estaciones de observación. La formación de servicios meteorológicos constituyó un esfuerzo de los gobiernos por tener una infraestructura que avisara a las comunidades del inminente paso de ciclones tropicales. Los avances en las comunicaciones y las mejores medidas de superficie hicieron posible el sistema de avisos. Burpee (1988) observó que hasta la década de los treinta las predicciones de huracanes en EE.UU. se basaban en observaciones de superficie y no fue hasta la década de los cuarenta, con la introducción del radar y de la instrumentación de seguimiento de la dirección por radio, que se realizaron análisis de viento en altura.

Los predictores dependían de las observaciones casuales desde barcos o desde islas cercanas a la costa en el recorrido de los ciclones tropicales para detectar su presencia antes de su llegada a tierra firme pero el desarrollo y la aplicación del radar a mediados de los años cuarenta permitió a los meteorólogos localizar con precisión los centros de las tormentas y medir su

tamaño por medio de la teledetección. El creciente despliegue de radares costeros a partir de los años cincuenta ha permitido a los predictores seguir la trayectoria de los ciclones hasta varios cientos de kilómetros antes de su llegada a tierra firme con una precisión mucho mayor que antes. También a partir de mediados de los años cuarenta los EE.UU. comenzaron un programa de reconocimiento desde aeronaves que ofreció numerosas observaciones de alta calidad a los predictores de la Cuenca Atlántica y (hasta 1987) de la zona occidental del Pacífico Norte. La mayor parte de los países de otras cuencas no tenían presupuesto para esta opción y no la adoptaron. Sin embargo, se beneficiaron enormemente de la subsiguiente actividad investigadora a que dieron lugar estos datos, originado un conocimiento mucho mayor de la estructura, el comportamiento y la física subyacente de los ciclones tropicales en general.

La llegada de los satélites meteorológicos en los años sesenta permitió la detección de todas las tormentas tropicales. A veces los predictores podían seguir la trayectoria de los ciclones durante días antes de la llegada a tierra firme, permitiendo alertar a las comunidades de su presencia con antelación. Dvorak (1975) ofreció una técnica para calcular la intensidad de los ciclones tropicales a partir de imágenes de satélite. Antes de los satélites y sin aviones, las estimaciones de la intensidad dependían de las observaciones de superficie disponibles, generalmente alejadas del

centro de la tormenta y los errores del punto de contacto con tierra firme podían ser, con frecuencia, grandes. Aunque los cálculos de Dvorak se consideran útiles y se utilizan mucho en centros de avisos, la técnica está en gran parte sin verificar.

La tecnología de satélite se está desarrollando rápidamente y se están abriendo paso hacia los puestos de trabajo de los predictores técnicas mejoradas (Figura 2). Retrospectivamente, la humanidad ha recorrido un largo camino en un tiempo relativamente corto debido a un mejor conocimiento del fenómeno mediante un programa de investigación coordinado, una capacidad para medir la atmósfera con mayor precisión, el desarrollo de centros de avisos dedicados, y mejores comunicaciones para hacer fluir la información hacia y desde los centros de aviso.

Sin embargo, la predicción de ciclones tropicales no es perfecta en ningún país. Sigue habiendo pérdidas económicas por la llegada a tierra firme de ciclones tropicales que podrían disminuir si se dispusiera de información más oportuna. Las zonas de aviso tienden a ser grandes como para tener en cuenta la incertidumbre de la predicción. Se pueden producir evacuaciones innecesarias en algunas comunidades debido a ese exceso de avisos. Una mejor estimación de la precipitación ayudará a los hidrólogos a una predicción más precisa de las inundaciones. La ciencia sigue buscando un camino hacia delante.

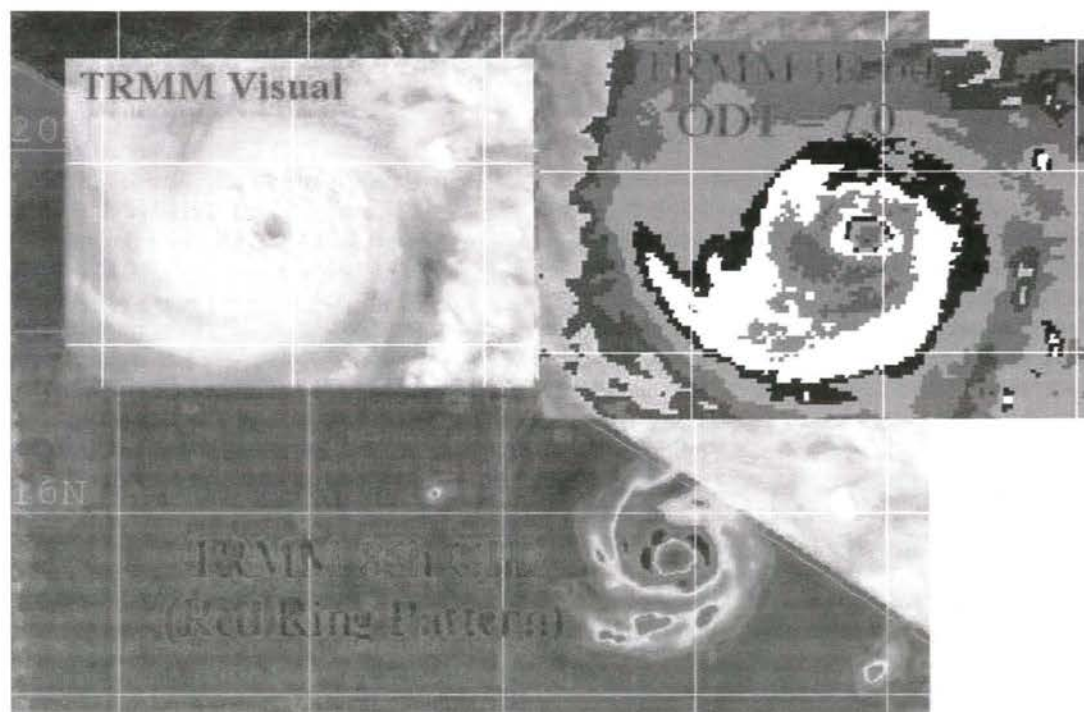


Figura 2 — Imágenes del super tifón Podul en el oeste del Pacífico Norte, el 23 de octubre de 2001, ilustrando varias vistas de satélite distintas, de las que los predictores disponen en la actualidad para su análisis. (Fuente: R. Edson utilizando imágenes de la página Web del NRL)

## Al servicio de las necesidades de la comunidad

Para decidir lo que la comunidad meteorológica mundial tiene que hacer, es instructivo tener en cuenta lo que cualquier comunidad dada podría necesitar saber a partir de un conjunto de avisos de ciclones tropicales. Asumiendo que esta última ha desarrollado planes adecuados contra los desastres y campañas de concienciación sobre los ciclones tropicales se sugiere que hay cuatro informaciones fundamentales, a saber:

- dónde está,
- dónde afectará,
- cuándo afectará,
- qué efectos tendrá.

Se propone que un Centro de Avisos de Ciclones Tropicales que proporcione esa información a gusto del usuario necesitaría, de forma ideal, ser capaz de:

- seguir la trayectoria de los ciclones tropicales de modo exacto y continuo;
- predecir el punto de recalada con un margen de error de  $\pm 50$  kilómetros (por ejemplo) con 24 horas de antelación, con errores proporcionales de hasta 72 e incluso 120 horas;
- predecir la hora del contacto con tierra firme con un error de  $\pm 3$  horas (entre 12 y 24 horas antes del mismo);
- predecir los cambios de intensidad con, al menos, 12 ó 24 horas de antelación;
- describir la distribución del viento en torno al ciclón tropical, en especial la frontera de la zona delantera de vientos con fuerza huracanada y también en la zona de vientos máximos; y
- describir la distribución de la precipitación en valores críticos para las comunidades individuales.

Los números que se dan aquí son un tanto especulativos, pero se basan en el siguiente razonamiento. El error en la predicción del punto de recalada debería ser comparable con, al menos, el diámetro de los vientos destructores del núcleo interno, de tal forma que una comunidad sufra aproximadamente la fuerza del viento pronosticada. Sin embargo, debería aclararse que incluso este valor de error relativamente pequeño podría no bastar para discriminar los efectos de la marea de tormenta. La hora de contacto con tierra firme es importante para tener en cuenta los efectos de la marea astronómica sobre la marea de tormenta, que en algunas circunstancias pueden ser muy importantes.

La Tabla I resume la importancia relativa de esos elementos individuales de predicción en las causas principales del daño originado por la llegada a tierra firme de un ciclón tropical. Esto sugiere una clasificación de los elementos sobre los que podría ser más útil acertar y, tal vez, dónde podría tener una mayor apli-

cación la inversión en investigación. La clasificación sería:

- Predicción de la trayectoria
- Predicción del cambio de intensidad
- Distribución del viento
- Estimación o predicción de la precipitación

Examinemos estos elementos a la luz del conocimiento actual para encontrar caminos de mejora y conocer los impedimentos.

### Predicción de la trayectoria

En la actualidad los errores promedio de la predicción de la trayectoria experimentados en distintos centros de todo el mundo están en el intervalo de 70-110 km en 12 horas, 115-185 km en 24 horas y 210-300 km en 48 horas. Sobre estas cifras promedio existen episodios individuales de errores grandes que representan importantes desviaciones de la predicción con respecto a la trayectoria real. Ahora mismo, en el proceso de predicción de la trayectoria los meteorólogos calculan la posición inicial del ciclón con relación a otros rasgos medioambientales que pueden influir en su trayectoria. Una predicción subjetiva de la trayectoria se basa en una serie de modelos conceptuales, orientaciones climatológicas y de persistencia, técnicas estadísticas y dinámicas y orientaciones del modelo numérico. Un ingrediente final de todo esto es la experiencia del predictor que sigue siendo un factor importante tanto en los éxitos como en los fracasos de la predicción de la trayectoria y que puede incorporar decisiones de "arrepentimiento mínimo", que tratan de garantizar que se avisa a las comunidades en riesgo del peligro potencial.

La mayor mejora sencilla a la predicción de la trayectoria de ciclones tropicales a lo largo de la última década ha sido el avance hecho en la predicción numérica del tiempo. Mejores modelos como resultado de la investigación y el desarrollo, más datos iniciales y ordenadores con más capacidad han dado a los predictores más confianza para aplicar las salidas de los modelos. Este avance no ha estado exento de problemas. Los predictores de los centros principales pueden enfrentarse ahora a una serie de, a veces, información contradictoria. Ha habido varias estrategias para ocuparse de esto. Carr y Elsberry (1999) describen un enfoque sistemático para guiar al predictor en la toma de decisiones, incorporando la utilización de modelos conceptuales y de salidas numéricas, aunque la llegada de las técnicas de predicción por conjuntos también ha supuesto una promesa para minimizar el error de predicción. Es significativo que estos dos temas, además del funcionamiento de modelos numéricos mundiales, aparecen de forma separada en este número.

Tabla I

Importancia relativa de los parámetros de predicción al considerar la predicción de las causas principales de daño en una comunidad

	Daño por viento	Mareas de tormenta	Inundaciones
Predicción de la trayectoria y zona de contacto con tierra firme	m.i. - Hay que predecir bien la zona de viento máximo para que los avisos a la comunidad sean eficaces	m.i. - Crítico con respecto al ángulo y a la velocidad de acercamiento y a la proximidad de los centros de población	m.i. - Crítico para medir el componente orográfico de la precipitación
Predicción del momento del contacto con tierra firme	i. - Importante debido a que la preparación para la aparición de vientos se hace generalmente durante las horas de luz solar y se necesita un plazo adecuado	m.i. - Parámetro crítico para tener en cuenta los intervalos mareales al determinar el nivel de la marea de tormenta	i. - La precipitación máxima que se da por la noche es más difícil de controlar y hace más difícil ordenar las evacuaciones que la que se produce durante las horas de luz solar
Distribución del viento	m.i. - Hay que definir bien la zona y el valor de los vientos máximos	m.i. - Hay que definir bien la zona y el valor de los vientos máximos	i. - Relacionada con los efectos orográficos y con la estructura de la tormenta
Distribución de la precipitación	n.i.	i. - Puede contribuir a los niveles globales de agua en particular a través de la precipitación precedente	m.i.
Cambio de la intensidad	m.i. - Cualquier cambio de la intensidad afectará a la distribución del viento	m.i. - Cualquier cambio de la intensidad afectará a la distribución del viento	m.i. - En especial cuando un debilitamiento produce un gran aumento de la precipitación

m.i. = muy importante; i. = importante; n.i. = no importante

Además de los centros de predicción principales, las oficinas de avisos más pequeñas pueden tener un conjunto más limitado de productos en los que basar su predicción. Se plantea la cuestión de qué nivel de sistemas de observación y de orientaciones de la predicción es necesario para dirigir un servicio de avisos eficaz. Incumbiría a la comunidad mundial determinarlos y prescribir normas para que los centros de avisos se esfuerzen en lograr sus objetivos.

El paso obvio para mejorar la predicción es mejorar la calidad de los datos disponibles antes y hasta el momento de realizar cualquier predicción, tanto para garantizar la valoración de la situación por parte del predictor como para la inicialización de los modelos numéricos. El reconocimiento regular de aviones con radar Doppler y sondas de viento en descenso entre la serie de instrumentos a bordo ha ayudado en gran medida a la toma de decisiones y a la modelización en la cuenca atlántica. Las observaciones derivadas de satélites, incluidas las de los medidores de dispersión y las imágenes de microondas también han demostrado un potencial enorme para

medir la situación de una tormenta y otros parámetros útiles.

Aunque las mejoras de la predicción en el movimiento a gran escala de los ciclones tropicales continúan, la menor desviación de la trayectoria en la mesoescala se convierte en crítica cerca del punto de contacto con tierra firme del ciclón. Por ejemplo, el ciclón tropical *Bobby* (Región australiana, 1995) sufrió un movimiento mesoescalar errático antes de su llegada a tierra firme que afectó tanto a su rastro sobre las islas e instalaciones petrolíferas cercanas a la costa dentro de su camino como también al momento de recalar en tierra firme (Figura 3). Las observaciones de radar indicaban una estructura de doble ojo durante este momento. Para resolver las características de la trayectoria mesoescalar es necesario el conocimiento del núcleo interno, su interacción con el entorno y la utilización de modelos numéricos de muy alta resolución, probablemente con capacidad tanto para asimilaciones de datos y ejecuciones del modelo frecuentes. Una encuesta a los predictores sobre su función de predicción más importante (McBride y Holland, 1987)

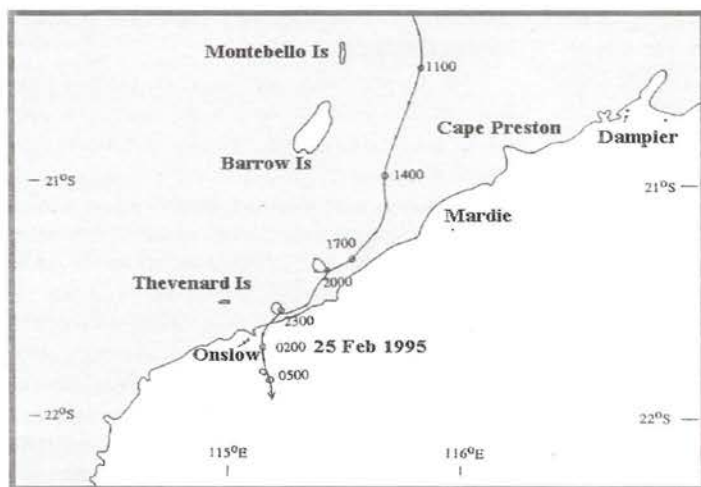


Figura 3 — Mejor trayectoria radar del ciclón tropical Bobby mostrando su movimiento errático al llegar a tierra firme en el noroeste de Australia (Oficina de Meteorología)

demonstró abrumadoramente que ésta era la predicción de trayectorias. El razonamiento de los predictores era que, si tenían confianza en la predicción de la trayectoria, podían intentar enfrentarse a otros problemas como la intensidad, el tamaño y la distribución de la precipitación, a la vez que se creaba una credibilidad valiosa frente a la comunidad minimizando el índice de falsas alarmas. La interrelación entre el cambio de intensidad y el cambio de trayectoria lo convierte en un objetivo difícil de alcanzar aisladamente pero ilustra la importancia de la predicción de la trayectoria en la mente del predictor.

### Predicción de la intensidad

Sin el beneficio de los datos de aeronaves o del radar Doppler de tierra, los predictores tienen que confiar en las escasas observaciones de superficie y en las técnicas satelitales para determinar la intensidad de un ciclón tropical. Esta disparidad de los sistemas de observación disponibles produce, probablemente, la mayor diferencia en el funcionamiento entre los centros de avisos. Ha habido intentos con métodos objetivos de predicción de intensidad tales como SHIPS. Los modelos numéricos operativos tales como los modelos globales tienen dificultades para describir con precisión la intensidad de los ciclones tropicales. Los modelos de mayor resolución muestran cierto potencial de mejora. La utilización de modelos acoplados océano-atmósfera para acomodar el efecto de la temperatura de la superficie del mar al cambio de intensidad también pueden demostrar su utilidad.

Puede que la predicción operativa de la intensidad sea todavía más subjetiva que la predicción de la trayectoria. Actualmente se depende de la tendencia de intensidad percibida, como puede ser la extrapolación de toda intensificación o debilitamiento en el pe-

riodo anterior, pero los cambios dinámicos, en especial frente a la tendencia, generalmente no se predicen bien. Ciertamente, los campos que necesitan atención especial parecen ser las fases de intensificación rápida en el ciclo de vida de los ciclones tropicales, la etapa de decaimiento y cuando sufre la transición extratropical en latitudes más altas.

### Distribución del viento

Es importante la especificación del tamaño y de la distribución de la velocidad del viento de un ciclón tropical para asignar zonas de avisos y calcular la marea de tormenta en la llegada a tierra firme. Los

aviones y el radar Doppler logran buenas medidas. Los datos del escaterómetro han ayudado a determinar el radio de las zonas de viento duro pero les es difícil resolver vientos en el núcleo interno de tormentas intensas. Los modelos paramétricos de viento (tales como el Holland, 1981) se han utilizado en las oficinas de predicción para describir el perfil de viento con cierto éxito. Los modelos de viento son esenciales en los métodos numéricos de cálculo de la marea de temporal y en sistemas de diseño de ingeniería que ayudan a una más eficaz planificación y preparación frente a episodios de ciclones tropicales. Sin embargo, dichos modelos de viento no pueden hacer frente a efectos como los tornados que se forman alrededor de un ciclón tropical, las asimetrías del ciclón, la caracterización de dorsales en un lado de la tormenta o características del núcleo interno tales como las estructuras de mesovórtice, las cuales se cree que causaron zonas de daños extraordinarios durante el huracán Andrew (1992). Una parte esencial de toda mejora para describir los vientos superficiales es un conocimiento fundamental de la distribución vertical del viento en la capa límite lo cual tiene que lograrse mediante estudios de observación utilizando series de anemómetros en torres grandes o radar Doppler.

### Estimación de la precipitación

La estimación y la predicción precisas de la precipitación siguen siendo una de las tareas más molestas de la meteorología actual. Las técnicas de radar y de satélite parecen ser la única forma de intentar capturar la distribución total de la precipitación alrededor de un ciclón tropical y, aunque se ha progresado en la cuantificación, por ahora está lejos de ser fiable. Verdaderamente, es imposible para una red de pluviómetros convencional tener la densidad necesaria para descri-

bir completamente la distribución de la precipitación casi hasta en las zonas más pequeñas. Las mejores perspectivas parecen estar en la calibración de datos de teledetección con observaciones convencionales para llegar a la mejor aproximación de la cantidad de precipitación.

Cualquier predicción de precipitación de origen ciclónico depende fuertemente tanto de la trayectoria como de la velocidad de la tormenta, lo que limita la exactitud hasta un plazo de 12 horas, nada de 24 horas o de un período mayor. La topografía de la zona de llegada a tierra firme juega un papel importante para determinar la cantidad de la precipitación y tanto el terreno montañoso como la dirección de aproximación de la tormenta presentan problemas especiales para cualquier predicción.

Los ciclones tropicales no tienen que ser particularmente intensos con respecto a los vientos máximos para dar lugar a precipitaciones fuertes. La tormenta tropical *Agnes*, que afectó a los EE.UU. en 1972 con intensas inundaciones, ocasionó mucho más daños y muertes a medida que se “debilitaba” tierra adentro que en el punto de recalada en tierra firme. También es más difícil, inherentemente, localizar el centro de los ciclones tropicales de menor intensidad y, por lo tanto, predecir su trayectoria, sumándose a los problemas del predictor cuando tiene que estimar la precipitación. La tormenta tropical *Greg* fue una tormenta marginal que afectó al norte de Sabah, Malasia, en diciembre de 1996, ocasionando 238 muertos y 80 millones de \$ EE.UU. de pérdidas, casi exclusivamente por causa de las inundaciones. Los predictores se enfrentaron al problema de una trayectoria incierta debido a la incapacidad para localizar el centro de *Greg* con cierta confianza, la evidencia de que la circulación no era “fuerte”, lo que podría haber comprometido la conceptualización de la precipitación esperada, y tener que enfrentarse a lo relativamente raro de que se produjera actividad de un ciclón tropical en una latitud tan baja. El hecho de que la mayor parte de la actividad lluviosa se produjera a primeras horas de la mañana también produjo sus propios problemas, limitando las oportunidades de que la comunidad respondiera o se la evacuara.

### Un futuro brillante

Los centros de avisos de todo el mundo manejan satisfactoriamente una gran parte de los episodios de ciclones tropicales. Sin embargo, de vez en cuando, un ciclón tropical podrá superar el conocimiento o el sistema de observación desviándose repentinamente de su trayectoria esperada o sufriendo una fase rápida de intensificación. Si no se produce una anticipación a ello, las comunidades costeras lo tomarán como in-

certidumbre o sorpresa, con resultados potencialmente calamitosos.

Hay un optimismo justificable en que la comunidad científica mundial pueda seguir reduciendo tales incidentes, a pesar de que las redes de datos convencionales, tales como los radiovientosondas y las observaciones de superficie se están volviendo cada vez más caras de mantener, en especial para los países en vías de desarrollo. La tecnología para medir la atmósfera está avanzando rápidamente, en particular con respecto a los principales sistemas de teledetección de instrumentos montados en satélites, aviones y radar. Son artículos caros, que quedan fuera del alcance de muchos países aisladamente, pero que se comparten hasta un punto mediante la determinación de la OMM de facilitar gratis los datos básicos. Periódicamente se pide a la comunidad meteorológica que justifique los costes y aunque es importante para argumentar firmemente que existen importantes beneficios económicos provenientes de la inversión en desarrollo meteorológico, existe la obligación correspondiente de determinar los sistemas más rentables posibles. Esto requiere cooperación a escala global.

El Programa de Investigación Meteorológica de los EE.UU. tiene un plan de investigación a cinco años (2000-2004) con el objetivo final de ofrecer mejor asesoramiento a los predictores de huracanes (Elsberry y Marks, 1999). Una faceta de la investigación implica que la comunidad meteorológica trabaje con el sector público y el privado para conocer qué mejoras produciría el mayor efecto socioeconómico. Los objetivos de los estudios “previos a la llegada a tierra firme” son aumentar el plazo de preparación por anticipación en, al menos, 12 horas; mejorar los informes de predicción a 96 horas hasta los actuales niveles de exactitud para las 72 horas; y reducir la actual razón de sobrea-visos de 3:1 de las zonas costeras a 2:1 en el 90 por ciento de las llegadas a tierra firme.

Se esperan mejores predicciones de trayectorias a través de las nuevas oportunidades de la predicción numérica del tiempo creadas mediante una mejor especificación inicial del vórtice y del entorno y las técnicas, actualmente en desarrollo, de asimilación variacional para introducir más datos, en particular a partir de plataformas satelitales y de aviones.

Dentro de la OMM, el Programa Mundial de Investigación Meteorológica y el Programa de Investigación de Meteorología Tropical cooperan para avanzar en el Programa Internacional de Llegada a Tierra Firme de Ciclones Tropicales, vinculándolo al proyecto de llegada a tierra firme de los EE.UU. pero ampliando los objetivos para la comunidad mundial. Los planes incluyen la elaboración de, al menos, dos proyectos de demostración de predicción para evaluar la

eficacia de las técnicas de predicción y las mejoras de los sistemas de observación de acuerdo con la medida de los efectos sociales del episodio del contacto con tierra firme.

*¿Hay un futuro brillante para la predicción de ciclones tropicales? Sabemos que sí.*

### Bibliografía

BURPEE, R. W., 1988. Forecaster Biography. Grady Norton: Hurricane Forecaster and Communicator Extraordinaire. *Wea. and Forecasting*, 3, 247-254.

CARR, L. E., III y ELSBERRY, R. L., 1999. Systematic and integrated approach to tropical cyclone track forecasting. Part III: traits knowledge base for JTWC track forecast models in the

western North Pacific. Informe Técnico NPS-MR-99-002, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 227 pp.

DVORAK, V. F., 1975. Tropical Cyclone Intensity Analysis and Forecasting from Satellite Imagery. *Mon. Wea. Rev.*, 103, 420-430.

ELSBERRY, R. L. y F. D. MARKS, 1999. The hurricane landfall workshop summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 683-685.

HOLLAND, G. J., 1981. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1212-1218.

MCBRIDE, J. L. y G. J. HOLLAND, 1987. Tropical cyclone forecasting: A worldwide summary of techniques and verification statistics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 68, 1230-1238.

NEUMANN, C. N., 1993. Global Overview, Chap. 1, *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*. G. J. Holland (Ed.), Informe N.º TCP-31, OMM, Ginebra, 1.1-1.56.

## Reconocimiento de ciclones tropicales utilizando la aerosonda UAV

261

Por Greg J. HOLLAND\*

### Introducción

Aunque los satélites han supuesto una importante mejora en la capacidad de observación global de los ciclones tropicales, sigue habiendo una carencia seria de observaciones directas, en particular en la capa límite y en las regiones del núcleo. Estas regiones del núcleo de ciclones tropicales tienen vientos muy fuertes y precipitación intensa, lo que ofrece condiciones de operación peligrosas y caras para las aeronaves tripuladas convencionales. Las Aeronaves no Tripuladas (UAV) tienen la capacidad de tomar observaciones de ciclones tropicales que no pueden obtenerse con las aeronaves tripuladas y que son complementarias a las disponibles actualmente provenientes de satélites y de aeronaves tripuladas.

La Aerosonda es un avión robótico pequeño, barato y muy resistente (Holland y otros, 2000), que fue

diseñado para ofrecer dicha capacidad de reconocimiento. Todos los vuelos son autónomos pero bajo el mando de un controlador de tierra que puede, por ejemplo, cambiar las trayectorias de vuelo y responder a las peticiones de control del tráfico aéreo. El controlador de tierra y el avión se comunican por radio UHF dentro de un alcance de 100-200 km, mientras que el satélite se utiliza en distancias mayores. Aquí ofrecemos una visión de conjunto de la Aerosonda y de sus sistemas relacionados, junto con una descripción de su forma de funcionamiento en un ciclón tropical.

### La Aerosonda

#### El avión

En la Figura 1 se muestra el lanzamiento de la Aerosonda desde su soporte en lo alto de un coche. El avión es pequeño, barato y tiene una autonomía de más de 30 horas (Holland y otros, 2000). Es un vehículo a propulsión, con el motor atrás, lo que permite instalar instrumentos muy sensibles delante, lejos del calor y

*Las aerosondas son aviones robóticos pequeños y muy resistentes, que se concibieron originariamente para ofrecer observaciones seleccionadas en regiones remotas. Vale la pena destacar la capacidad de explorar sistemas de tiempo violento, tales como ciclones tropicales. Para cumplir este papel se aprobó el desarrollo de la Aerosonda como un programa del Decenio Internacional de las NU para la Reducción de los Desastres Naturales. Este artículo describe los aspectos operativos de las misiones de la Aerosonda, incluidos los temas de regulación, las comunicaciones por satélite, el entorno de campo virtual y la navegación con vientos fuertes.*

\* Aerosonde Ltd, Melbourne, Australia.