

Análisis de la temporada 2000 de ciclones tropicales en México

Michel Rosengaus

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Se presenta un análisis general de la temporada 2000 de ciclones tropicales en cuanto a: a) la normalidad de su actividad, b) el desempeño de los pronósticos de actividad ciclónica de la temporada, c) el desempeño de los pronósticos del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC) ciclón por ciclón, d) los principales efectos de los sistemas que incidieron en México y e) el desempeño de la creciente red de estaciones meteorológicas automáticas. En el contexto de c), se aplica una metodología que compara la posición efectivamente alcanzada por el centro de giro del ciclón con la pronosticada para el mismo instante, procesando estadísticamente los errores cometidos tanto en términos absolutos como en las direcciones longitudinal y transversal a la trayectoria. En el Atlántico la temporada fue tardía, pero aun así muy activa, rebasándose con amplitud el pronóstico de actividad ciclónica. En el Pacífico se trató de un año típico. Aunque los pronósticos del NHC resultan prácticamente sin sesgos, todavía tienen errores importantes de precisión. El análisis de error longitudinal y transversal realizado muestra tener utilidad operativa directa. El sistema más importante para México fue Keith, no sólo por las extensas lluvias producidas en el sureste y noreste, sino por el peligro al que sujetó a la zona de la bahía de Chetumal. Por primera vez durante la temporada 2000 se contó con mediciones de estaciones meteorológicas automáticas confiables y se observó que se perfilan como una poderosa herramienta de toma de decisiones y postanálisis.

Palabras clave: ciclones tropicales, huracanes, pronóstico, trayectoria, temporada 2000, Keith, estaciones meteorológicas automáticas, incertidumbre.

Introducción

Los ciclones tropicales representan fenómenos determinantes para México desde varios puntos de vista: condiciones meteorológicas, operación de obras hidráulicas, control de inundaciones, producción de alimentos y energía, protección civil, desarrollo sustentable de las comunidades, transporte de personas y mercancías, etcétera. Año con año, la temporada de ciclones tropicales implica un claro incremento en el nivel de actividad de muchos profesionales que, de una u otra manera, deben lidiar con sus efectos. Al término de dicha temporada se tiene un cúmulo de información, la cual, apropiadamente integrada, analizada y difundida, puede resultar en un enriquecimiento profesional para dicha comunidad y en una mejora en el estado de preparación de la sociedad ante estos fenómenos.

El propósito de este trabajo es presentar algunos aspectos del análisis de la temporada 2000 de ciclones tropicales que no tratan otras fuentes de informa-

ción. Además de caracterizar a la temporada en forma general, se abordan en forma específica los errores de pronóstico de trayectoria e intensidad, los efectos y peligros más importantes identificados en México y una visión preliminar de lo que el monitoreo de estos fenómenos a través de estaciones meteorológicas automáticas permitirá en el futuro. Pero antes resulta conveniente presentar algunos antecedentes sobre el tema.

Antecedentes

México es afectado por ciclones tropicales de dos regiones ciclógenas distintas: la del Atlántico norte (del 1° de junio al 30 de noviembre) y la del Pacífico nor-oriental (del 15 de mayo al 30 de noviembre). Ambas zonas pertenecen a la región IV de la Organización Mundial de Meteorología y la entidad especializada a cargo es el Centro Nacional de Huracanes (NHC) de los Estados Unidos. Mientras se encuentre activo un ciclón, este centro genera boletines con pronósticos

tanto de la trayectoria como de la intensidad cada seis horas, desde su etapa de identificación como depresión tropical hasta su disipación, salida de la zona de responsabilidad, adquisición de características extratropicales o absorción por algún sistema extratropical. Estos boletines se emiten a las 03, 09, 15 y 21 horas (GMT) tanto para el Atlántico como para el Pacífico. Por brevedad, y como se acostumbra en el tratamiento de fenómenos que traspasan husos horarios, en el resto de este trabajo todas las fechas y horas se referirán, sin hacerlo explícito, a la hora del meridiano de Greenwich (seis horas más tarde que la hora geográfica del centro de México durante horario normal de invierno y cinco horas más tarde en horario de verano). Estos boletines se basan en información de tres horas antes del instante de emisión del boletín, es decir, las 00, 06, 12 y 18 horas, respectivamente. Los pronósticos se refieren a horizontes a futuro de 12, 24, 36, 48 y 72 horas con respecto a los datos, o sea, a 9, 21, 33, 45 y 69 horas en relación con el instante de emisión de los boletines. Por ejemplo, el boletín emitido el 25 de junio a las 03:00 horas, basado en los datos conocidos al 25 de junio a las 00:00 horas, contiene pronósticos de posición e intensidad del ciclón para los siguientes instantes: 12:00 horas del 25 de junio; 00:00 y 12:00 horas del 26 de junio; 00:00 horas del 27 de junio, y 00:00 horas del 28 de junio. Por convención, el presente trabajo identifica estos horizontes de pronóstico en cuanto al instante de los datos en los que se basa y no sobre el instante de emisión del boletín. El NHC advierte que la información a 48 y 72 horas no se les puede denominar "pronóstico", sino que es, de manera menos estricta, una "visión general" (*outlook* en inglés). En el contexto de este trabajo no existe diferencia en el tratamiento de ambos casos, por lo que todos los horizontes se refieren como pronósticos. Las posiciones se presentan en latitud-longitud y están redondeadas al décimo de grado más cercano, mientras que las intensidades (en términos de velocidad de vientos máximos sostenidos del ciclón tropical) lo están a múltiplos de cinco nudos (9.26 km/h). Los boletines pueden obtenerse (en tiempo real y en archivos históricos recientes) en <http://www.nhc.noaa.gov>. Incluso cuando a los ciclones tropicales se les asigna un nombre hasta que alcanzan la categoría de tormenta tropical, los boletines de sus etapas previas como depresión tropical se asocian también con el mismo nombre y siguen una misma secuencia.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México también emite boletines sobre los ciclones tropicales activos (accesibles en <http://www.cna.gob.mx/smn.html>), los cuales contienen pronósticos de posición e intensidad, pero sólo para un horizonte a futuro y no

son completamente regulares entre un boletín y otro (en general, entre seis y nueve horas a futuro). En este sentido, los boletines del NHC resultan más adecuados para un análisis cuantitativo de errores de pronóstico. De todas formas, la cercana comunicación entre el SMN y el NHC hace que la información en ambos sea casi 100% congruente (la excepción es cuando el SMN cuenta con datos adicionales de radar muy recientes en los casos de ubicaciones sumamente cercanas a la costa de México).

El NHC (en colaboración con otras áreas de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera, NOAA, y otros centros internacionales) cuenta con numerosas herramientas objetivas para el pronóstico de trayectoria e intensidad de ciclones tropicales (ver <http://www.nhc.noaa.gov/aboutmodels.html>), todas ellas computarizadas. Actualmente, la mayor parte de éstas son modelos numéricos del comportamiento de la atmósfera. Sin embargo, el *pronóstico oficial* del NHC es una combinación subjetiva de los resultados de estas herramientas objetivas individuales establecida por unos cuantos meteorólogos especialistas licenciados para emitir este tipo de boletines. Este *pronóstico oficial* es el que aparece en los boletines a los que se ha hecho referencia. El juego de herramientas disponibles para el Atlántico y para el Pacífico no es exactamente igual. Más aún, los datos con los que se alimentan los modelos en el Atlántico se complementan con los vuelos de penetración y periferia de los llamados *aviones cazahuracanes* y sus sondas de caída. En el Pacífico nororiental no se realizan este tipo de vuelos.

Resulta necesario contrastar dos trayectorias (ligemente distintas) que pueden ser asignadas a un mismo ciclón tropical: la trayectoria operativa y la "mejor trayectoria" (traducción directa de *best track* en inglés). La primera consiste en la secuencia de posiciones estimadas en tiempo real con los datos disponibles hasta ese momento. La "mejor trayectoria" resulta de un análisis posterior de toda la información disponible, aunque ésta no se hubiese tenido a tiempo para tomarse en cuenta en la trayectoria operativa. Por supuesto, la "mejor trayectoria" es la aproximación más cercana a la verdadera trayectoria que un ciclón haya seguido, pero ésta no se encuentra disponible sino hasta meses después de ocurrido el evento. También resulta conveniente diferenciar entre lo que son los pronósticos de trayectorias/intensidades de ciclones tropicales individuales (que se han mencionado hasta ahora) y los pronósticos generales de actividad ciclónica de la temporada, que se hacen con meses de anticipación y no pretenden (ni pueden) dar detalle alguno sobre trayectorias/intensidades de ciclones individuales. Sin lugar a dudas, el más consultado es el

que realiza desde 1984 el grupo del doctor William Gray de la Universidad Estatal de Colorado (accesible en <http://typhoon.atmos.colostate.edu/forecast>).

Caracterización de la temporada

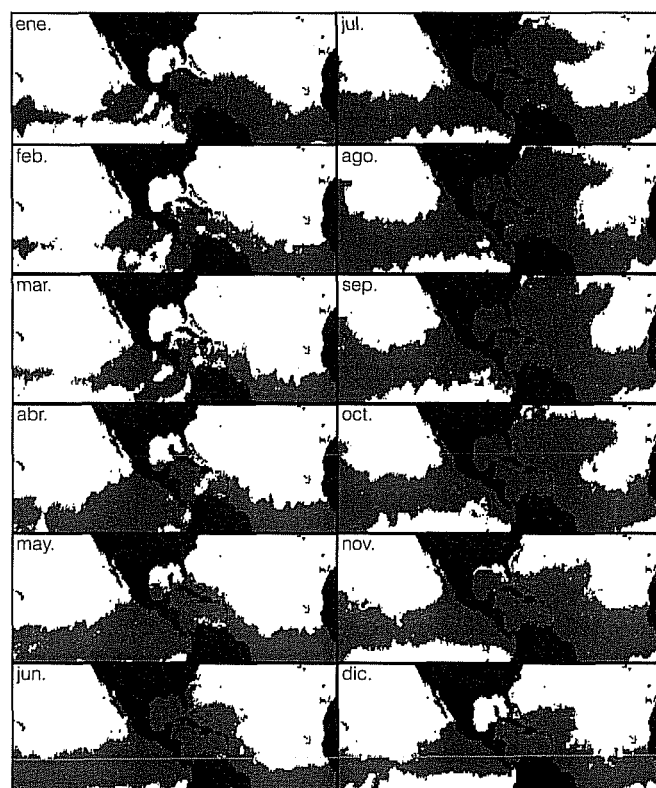
Esta sección no se dedica a presentar una de las clásicas crónicas de la temporada ciclón por ciclón. De hecho, ya existen excelentes crónicas de este tipo por parte del NHC (<http://www.nhc.noaa.gov>) y del SMN (<http://www.cna.gob.mx/smn.html>, SMN 1998, SMN 1999 y SMN 2000). Estas crónicas contienen mapas de las trayectorias y gráficas de evolución de intensidad de cada uno de los eventos individuales. Por el contrario, se pretende caracterizar a la temporada en forma conjunta.

Uno de los principales factores que controlan la posible génesis e intensificación de ciclones tropicales es la temperatura de la superficie del mar (TSM), considerándose temperaturas por arriba de 26°C como adecuadas para la formación y desarrollo (Ahrens, 1994). En la ilustración 1 se muestra la evolución de la zona propicia para ciclones tropicales a lo largo del año 2000, con 12 instantes representativos del inicio de cada mes (a partir de mediciones por satélite disponibles en http://las.saa.noaa.gov/las-bin/climate_server/dset=50km+SST+GLOBAL). Como puede observarse, tanto la costa sur en el Pacífico mexicano como la costa este de la península de Yucatán cuentan con temperaturas que soportarían el desarrollo de ciclones durante prácticamente todo el año (otros factores son los que controlan el inicio y fin de la temporada, Rosengaus, 1998). El golfo de México y el mar de Cortés se incorporan a esta condición a partir de junio, perdurando hasta noviembre. Normalmente la costa oceánica (oeste) de la península de Baja California adquiere estas temperaturas a partir de septiembre y hasta noviembre, aunque, como se puede observar en la ilustración 1, esto no se dio durante la temporada 2000. Excepto por dicha irregularidad en esta angosta franja costera y una ligera anomalía positiva en el Atlántico tropical y norte (no perceptible en gráficas de este tipo), la evolución de la TSM en la temporada 2000 se puede considerar como normal; sus diferencias en relación con promedios de la última década pueden compararse con las de cualquier otro año típico. La TSM no sobrepasa por más de unos cuantos grados el umbral de 26° C mencionado; zonas con temperaturas mayores a los 30° C son muy restringidas. La temporada de ciclones 2000 se dio en el contexto de una débil fase fría (*La Niña*) del llamado fenómeno *ENOS* (*El Niño-Oscilación del Sur*). Esto resulta uno de los indicadores de temporadas activas en

el Atlántico, aunque, paradójicamente, *ENOS* no muestra efectos claros en el grado de actividad del Pacífico nororiental (Magaña, 1999).

La temporada 2000 de ciclones tropicales en el Atlántico norte resultó ser muy activa en número de eventos; sólo otras cinco temporadas (10%), desde 1950 hasta 1999, han presentado 14 o más ciclones con nombre, aunque tres de estas cinco ocurrieron en la última década. Pero afortunadamente hubo una muy baja incidencia en tierra y fueron menores los daños producidos. En el cuadro 1 se muestra el número de ciclones tropicales con nombre (es decir, que alcanzaron categoría de tormenta tropical o huracán); el número de huracanes; el número de huracanes intensos (aquellos con categoría Saffir-Simpson igual o mayor a III), y el número de ciclones con nombre que incidieron en México, todo ello con los valores climatológicos (de 1950 a 1999) específicamente de la temporada 2000. Los valores climatológicos incluyen media y rango de variación como más/menos desviación estándar. Una gran cantidad de estos ciclones reviraron hacia el norte antes de llegar a afectar islas del Caribe, Centroamérica, México o los Estados Unidos, guiados por

Ilustración 1. Evolución de la zona con temperatura de la superficie del mar mayor o igual a 26°C (indicada en tono gris) a lo largo del año 2000.



Cuadro 1. Comparación del número de ciclones de la temporada 2000 con valores climatológicos (y con el pronóstico de Gray *et al.*, 2000), zona Atlántico norte.

	Climatología (1950-1999)	Temporada 2000	Pronóstico de Gray <i>et al.</i> , 1999
Ciclones con nombre	9.8 ± 3.3	14	11
Huracanes	5.9 ± 2.4	8	7
Huracanes intensos	2.6 ± 2.2	3	3
Ciclones con incidencia en México	1.1 ± 1.0	3	–

vientos promedio desde el norte del subcontinente sudamericano hacia el centro del Atlántico norte. Esto resulta especialmente interesante en el contexto de los, recientemente tan populares, pronósticos de actividad ciclónica de la temporada; el hecho de que exista un número extraordinario de ciclones no resulta un indicador directo de la gravedad de la temporada en cuanto a incidencia sobre zonas pobladas o daños producidos. La relativamente alta incidencia de ciclones sobre México con respecto a la climatología (cuadro 1) no debe interpretarse como un indicador de daños significativos en el país. Los detalles de los efectos sobre México se presentan más adelante. Fue notable la baja frecuencia de desarrollo de perturbaciones frente a las costas de África en latitudes bajas que normalmente se convierten en ciclones tropicales (Gray *et al.*, 2000).

Por otro lado, la temporada 2000 del Atlántico inició muy tarde, pues no fue sino hasta el 3 de agosto que se produjo el primer sistema con nombre. Sólo ocho temporadas (16%), desde 1950 hasta 1999, habían iniciado en fecha posterior. Lo más peculiar es que ninguna de las temporadas tardías había acumulado 14 o más ciclones tropicales con nombre. Esto hace que la temporada 2000 destaque por ser extraordinariamente concentrada en el pico de la temporada: agosto, septiembre y octubre. Otra peculiaridad fue la longevidad del primer ciclón, *Alberto*, con una duración del orden de 522 horas. Sólo tres ciclones del Atlántico han resultado más longevos desde 1950 hasta 1999: *Ginger*, en 1971; *Inga*, en 1969, y *Carrie*, en 1957. Sin embargo, todos estos ciclones de mayor longevidad se dieron más cerca del pico de la temporada (septiembre), cuando la extensión de la TSM mayor a 26° C es máxima (ilustración 1).

En cuanto a la temporada 2000 del Pacífico nor-oriental, no hay mucho que decir. Se trató de una temporada típica: ciclones con nombre, huracanes, huracanes intensos y ciclones con incidencia en México dentro de la media, más o menos una desviación estándar (de 1966 a 1999), como se observa en el cuadro 2. En este caso, los valores climatológicos se

toman para un intervalo menor de años que en la situación del cuadro 1, debido a que la muestra estadística previa a 1966 (al iniciar su operación los satélites meteorológicos) no es del todo confiable, al no identificarse algunos ciclones lejanos a la costa o a rutas marítimas o aéreas. En todo caso, se podría caracterizar como una temporada donde predominaron ciclones tropicales más débiles que lo normal.

Análisis de desempeño de los pronósticos

Inicialmente se analiza el desempeño de los pronósticos de actividad ciclónica de la temporada 2000 por Gray *et al.* (1999) para el Atlántico norte. El pronóstico inicial se publicó el 8 de diciembre de 1999 y posteriormente se actualizó el 7 de abril, el 7 de junio y el 4 de agosto de 2000. Este pronóstico se basa en el comportamiento medido de variables atmosféricas complejas que han demostrado tener una relación estadística con la actividad ciclónica de la temporada siguiente (llamadas *predictores*), la identificación de temporadas históricas con similares antecedentes y hasta análisis subjetivo de los autores. La metodología ha sido aplicada desde 1984, aunque no ha permanecido estática; se han tenido mejoras progresivas año con año. La metodología ha mostrado tener *habilidad* de predicción de la actividad ciclónica más allá del azar. Aunque actualmente los pronósticos incluyen probabilidad de incidencia en varias zonas de la costa norteamericana, no se realizan pronósticos específicos para la costa de México. En el cuadro 1, última columna, se muestran los pronósticos de número de ciclones con nombre, huracanes y huracanes intensos. Como puede observarse, se pronosticó una actividad del orden de 15% superior a lo normal (comparar con segunda columna). La temporada en realidad resultó ser aún más activa (excepto en el caso de huracanes de escala Saffir-Simpson III o mayor): del orden de 35% superior a lo normal. Incluso la actualización del 7 de junio, que incrementaba un poco el pronóstico, se quedó corta con respecto a la realidad. Para crédito del grupo de Gray *et al.* (1999), aun bajo el muy tardío inicio

Cuadro 2. Comparación del número de ciclones de la temporada 2000 con valores climatológicos (y con el pronóstico de Douglas/SMN, Hernández, 2000), zona Pacífico nororiental.

	Climatología (1966-1999)	Temporada 2000	Pronóstico de Douglas/SMN
Ciclones con nombre	16.1 ± 4.6	17	14
Huracanes	9.1 ± 3.1	6	8
Huracanes intensos	4.1 ± 2.7	2	3
Ciclones con incidencia en México	2.4 ± 1.6	3	

de la temporada, mantuvieron sus pronósticos de actividad mayor a lo normal, incluso en la actualización del 4 de agosto, cuando apenas se estaba gestando el primer ciclón tropical (*Alberto*). Pero, para ubicar bien la habilidad actual sobre el pronóstico de actividad ciclónica por temporadas, resulta justo mencionar que también predijeron una incidencia mayor a lo normal sobre la costa norteamericana y que en realidad resultó muy por debajo de lo normal.

En cuanto al pronóstico de actividad para el Pacífico nororiental, el SMN, en colaboración con Arthur Douglas de la Universidad de Creighton, Nebraska, y a través de la identificación de temporadas históricas análogas a la del 2000, presentó un pronóstico de una temporada ligeramente baja (14 sistemas con nombre, 13% por debajo de la media), aunque con el dominio de huracanes moderados (36% de categorías I y II). Este pronóstico también se quedó corto en cuanto a lo que ocurrió realmente, al presentarse 17 sistemas con nombre (6% por arriba de lo normal), sin que predominaran huracanes de moderada intensidad (sólo 23% de categoría I y II). En el cuadro 2 se muestran los valores específicos, tanto los normales como los realmente ocurridos y los del pronóstico. Obsérvese que tanto lo que pasó como el pronóstico se encuentra dentro del rango de normalidad definido por la media, más o menos una desviación estándar. En una versión anterior del pronóstico mencionado se habían planteado 17 sistemas con nombre, exactamente el número ocurrido.

Ya en el ámbito de los pronósticos individuales de trayectoria e intensidad por el NHC, éstos resultaron, estadísticamente, sólo ligeramente mejores que el promedio de la última década, por lo que el análisis de desempeño realizado resulta representativo de la habilidad actual sobre el tema. El NHC publica un análisis de desempeño de sus pronósticos, pero sólo en términos de la magnitud del error absoluto tanto en ubicación como en intensidad del ciclón para los horizontes de pronóstico de 12, 24, 36, 48 y 72 horas (Gross, 2001). Este análisis se realiza entre los pronósticos y la mejor trayectoria (*versus* la trayectoria operativa), e in-

cluso incorpora estadísticas de cada ciclón en lo individual. En el caso de este trabajo, el análisis de desempeño de los pronósticos se realiza comparándolo contra la trayectoria operativa, es decir, aquella conocida en el momento en sí y sobre la cual se toman las decisiones en tiempo real. De todas formas, la diferencia entre la *trayectoria operativa* y la *mejor trayectoria* resulta mucho menor que los errores de pronóstico en sí, por lo que los resultados de Gross (2001) y los mostrados aquí, en los casos incluidos en ambos, resultan congruentes. En este trabajo se calculan, además de la magnitud del error absoluto, otras modalidades que, como se verá más adelante, resultan de utilidad operativa.

Como ejemplo, en la ilustración 2 se muestra la trayectoria (en línea negra gruesa) de uno de los huracanes de la temporada 2000, *Keith*, que resultó más importante para México. En línea delgada se muestra cada uno de los pronósticos de trayectoria realizados por el NHC. Los puntos sobre la trayectoria real (círculos negros de mayor tamaño) representan las posiciones estimadas cada seis horas. Los círculos grises

Ilustración 2. Diagrama de la trayectoria real (línea gruesa negra) y de los pronósticos de trayectoria (líneas delgadas) del huracán *Keith*.

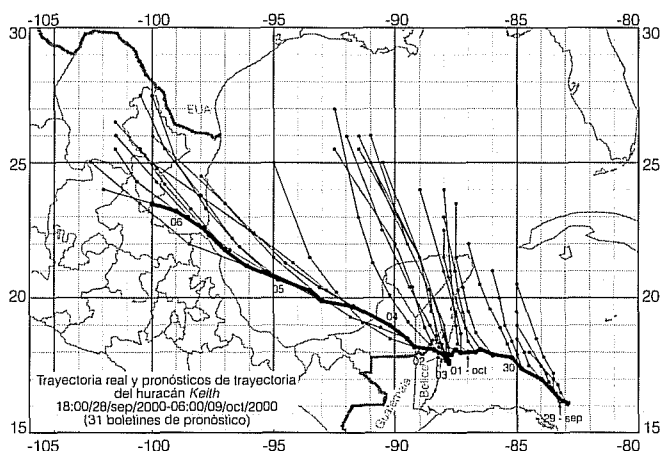
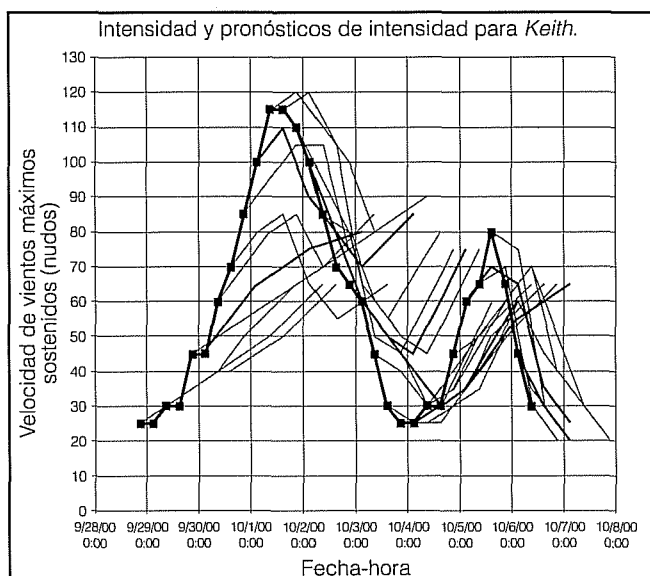


Ilustración 3. Gráfica de la intensidad, en términos de velocidad de vientos máximos sostenidos, real (línea gruesa negra) y de los pronósticos (líneas delgadas continuas) para el huracán Keith.

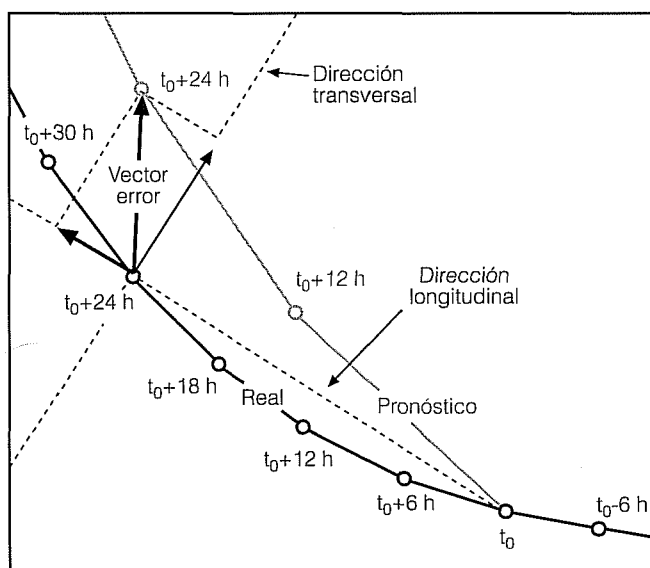


pequeños sobre las trayectorias pronosticadas representan las posiciones a 12, 24, 36, 48 y 72 horas del instante de los datos de pronóstico. Por supuesto que, operativamente, al realizarse un pronóstico, el resto de la trayectoria real no es aún conocida. En otras palabras, la línea negra gruesa termina en el instante del pronóstico y continúa con la línea delgada correspondiente. Sólo se puede conocer el error hasta que ha transcurrido el horizonte de pronóstico. Para su explotación posterior, los errores individuales de cada boletín no resultan de mucho interés, pero las estadísticas obtenidas sobre extensas muestras de estos errores son de gran utilidad. En la ilustración 3 se observa la gráfica de evolución de la velocidad de vientos máximos sostenidos del mismo huracán Keith como línea negra gruesa, así como cada uno de los pronósticos de intensidad (líneas delgadas y punteadas), excepto que para facilitar la lectura, los pronósticos cada 24 horas se marcan con una línea delgada pero continua; los instantes con datos conocidos sólo se muestran como círculos sobre la línea negra gruesa. Las unidades en el eje de las ordenadas son las originales (nudos, 1.85 km/h) para recalcar que tanto las estimaciones de intensidades reales como las pronosticadas se encuentran redondeadas a incrementos de cinco nudos.

El análisis de desempeño de los pronósticos del NHC se hizo siguiendo las directrices generales en Rosengaus y Reza (1991). En la ilustración 4 se muestra un diagrama de definición del vector error en cuanto a

la trayectoria y las componentes en que se descompone para el caso particular del pronóstico a 24 horas. Los resultados se presentan en términos del error absoluto de posición (en km), o sea la magnitud del vector error, y sus componentes ortogonales *error longitudinal* y *error transversal* (también en km). Es importante recalcar que el error longitudinal no es, necesariamente, en la dirección en la que el ciclón avanza en el instante pronosticado, sino en la dirección promedio entre el instante de realizar el pronóstico y el instante pronosticado. Lo análogo se puede decir en cuanto al error transversal. Para trayectorias no demasiado caprichosas, el error longitudinal no se traduce en un error en cuál será el punto de incidencia a tierra, sino en un error en el tiempo para el cual dicha incidencia ocurrirá. Bajo otra óptica, es un error asociado con la velocidad de translación del fenómeno. Por el contrario, el error transversal está ligado con un error en la dirección de avance. Esto se traduce en un error sobre el sitio de incidencia, aunque la velocidad de translación sea correctamente pronosticada. Por supuesto, en contraste con el error absoluto (siempre positivo), los errores longitudinales y transversales tienen signo. Un error longitudinal positivo implica una sobreestimación de la velocidad de avance, uno negativo implica una subestimación en la misma. Un error transversal positivo implica pronósticos a la derecha de la trayectoria real, uno negativo involucra pronósticos a la izquierda (siguiendo la convención geográfica de ángulos de

Ilustración 4. Diagrama de definición del vector error (de posición) y sus componentes longitudinal y transversal. Ejemplo para pronóstico a un horizonte de 24 horas.



Cuadro 3. Estadísticas de errores de pronóstico para el huracán Keith.

$\bar{x} \pm \sigma_x$ ($x_{\min} \rightarrow x_{\max}$)	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
Tamaño de muestra	29	27	25	23	19
Error total de posición (km)	71 $\pm$ 41 (15 $\rightarrow$ 164)	150 $\pm$ 54 (51 $\rightarrow$ 276)	256 $\pm$ 56 (123 $\rightarrow$ 380)	365 $\pm$ 61 (291 $\rightarrow$ 514)	562 $\pm$ 136 (329 $\rightarrow$ 848)
Error longitudinal (km)	-46 $\pm$ 53 (-164 $\rightarrow$ 24)	-103 $\pm$ 80 (-265 $\rightarrow$ 43)	-159 $\pm$ 109 (-349 $\rightarrow$ 90)	-182 $\pm$ 141 (-357 $\rightarrow$ 129)	-180 $\pm$ 154 (-501 $\rightarrow$ 67)
Error transversal (km)	21 $\pm$ 38 (-91 $\rightarrow$ 100)	73 $\pm$ 58 (-27 $\rightarrow$ 211)	159 $\pm$ 82 (6 $\rightarrow$ 317)	266 $\pm$ 120 (30 $\rightarrow$ 421)	507 $\pm$ 150 (134 $\rightarrow$ 684)
Error en intensidad (km/h)	-1 $\pm$ 25 (-46 $\rightarrow$ 57)	-10 $\pm$ 38 (-65 $\rightarrow$ 65)	-16 $\pm$ 52 (-102 $\rightarrow$ 74)	-18 $\pm$ 56 (-120 $\rightarrow$ 74)	30 $\pm$ 59 (-83 $\rightarrow$ 111)

acimut). En cuanto a la intensidad, el error se calcula como la diferencia entre la velocidad pronosticada de vientos máximos sostenidos menos la velocidad realmente alcanzada de vientos máximos sostenidos. También tiene signo: positivo para sobreestimaciones de intensidad, negativo para subestimaciones de intensidad. Los errores para cada horizonte de pronóstico se manejan y reportan por separado. Las estadísticas sobre la muestra de errores incluyen tanto el tamaño de muestra como la media, la desviación estándar, el valor mínimo y el valor máximo. Como ejemplo, en el cuadro 3 se tienen las estadísticas de los errores para el caso del huracán *Keith*. Como es de esperarse, los errores de todo tipo tienden a incrementarse conforme el horizonte de pronóstico crece. Resulta necesario observar que el análisis de solamente el error total en posición (como lo reporta el NHC) no indicaría claramente la marcada tendencia a pronosticar este ciclón por la derecha de la trayectoria efectivamente ocurrida, lo que es evidente en la ilustración 2. En el análisis del penúltimo renglón del cuadro 3 se observa claramente este sesgo. Por otro lado, estas simples estadísticas numéricas tienen sus límites. En la

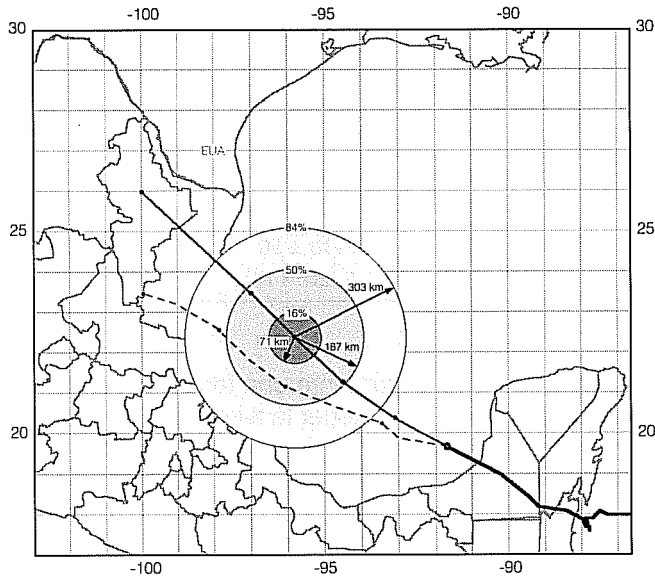
ilustración 3 se ve claramente una tendencia excesiva de los pronósticos a mantener la tendencia de la evolución inmediata anterior (*excesiva persistencia*), pero al manifestarse esto a veces en subestimaciones y a veces en sobreestimaciones, el defecto no queda claramente identificado en el cuadro 3. Es claro que el pronóstico de posición en cuanto a error longitudinal y transversal en el huracán *Keith* indica sesgo (error sistemático), pero se trata de una muestra demasiado pequeña como para juzgar el desempeño de las herramientas de pronóstico del NHC a partir de ella.

En el cuadro 4 se tienen las estadísticas de error para todos los pronósticos realizados por el NHC durante la temporada 2000. El análisis incluye a todos los ciclones que alcanzaron cuando menos la categoría de tormenta tropical (se les dio nombre), aun en sus etapas con intensidad de depresión tropical, pero no incluye los casos de depresiones tropicales que, incluso rastreadas por el NHC, nunca alcanzaron categoría de, al menos, tormenta tropical. Éstas son las de menos interés y de hecho, por su falta de intensidad, la misma definición de su centro de giro está sujeta a errores grandes (inclusive de ubicación actual, no sólo

Cuadro 4. Estadísticas de errores de pronóstico del NHC para la temporada 2000 (Atlántico norte y Pacífico nororiental).

$\bar{x} \pm \sigma_x$	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
Tamaño de muestra	612	548	485	422	319
Error total de posición (km)	74 $\pm$ 46	131 $\pm$ 75	187 $\pm$ 116	240 $\pm$ 156	377 $\pm$ 254
Error longitudinal (km)	-22 $\pm$ 68	-38 $\pm$ 80	-46 $\pm$ 165	-35 $\pm$ 219	-17 $\pm$ 350
Error transversal (km)	-6 $\pm$ 50	-10 $\pm$ 94	-14 $\pm$ 137	-30 $\pm$ 180	-98 $\pm$ 274
Error en intensidad (km/h)	1.6 $\pm$ 16.2	3.9 $\pm$ 25.3	5.5 $\pm$ 33.2	5.8 $\pm$ 37.8	11.8 $\pm$ 40.2

Ilustración 5. Utilización de las estadísticas de errores absolutos en la definición de rangos de incertidumbre sobre una posición pronosticada. Ejemplo para el huracán Keith, con el pronóstico a 36 horas realizado a las 06:00 horas del 4 de octubre.

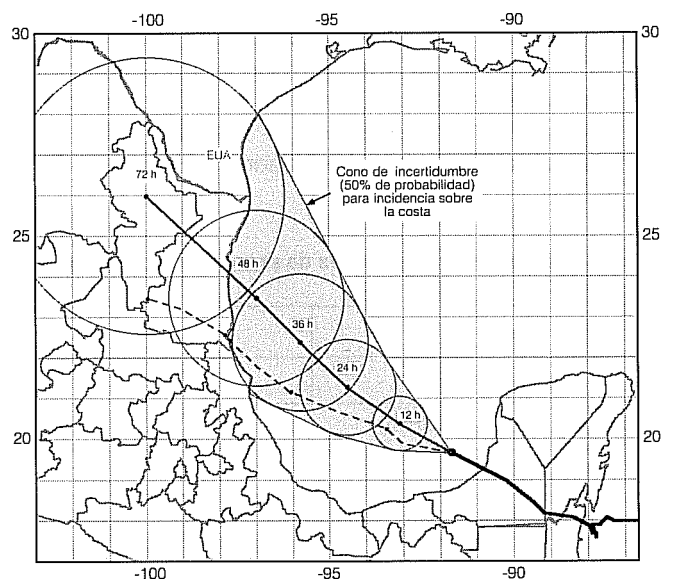


de pronóstico). El formato es similar al cuadro 3, pero por brevedad no se incluyen los valores mínimos y máximos. Ya con medidas de error más allá de las reportadas por el NHC, es necesario comentar sobre la interpretación de las estadísticas de error en los casos de falla longitudinal, transversal y de intensidad. En el cuadro 4, los valores medios del error indican yerros sistemáticos, mientras que las desviaciones estándar indican errores aleatorios; esto se debe a que los cálculos se hicieron con base en una muestra estadística amplia. Una herramienta de pronóstico *perfecta* no solo mostraría valores medios nulos, sino también desviaciones estándar nulas. Una herramienta que tuviera errores sistemáticos nulos produciría un pronóstico no sesgado, pero no por ello perfecto; los pronósticos individuales de instante a instante seguirían sujetos al error aleatorio (o de precisión). Así, es importante observar no sólo el comportamiento del error medio con el horizonte de pronóstico, sino también el comportamiento de la desviación estándar del error. El cuadro 4 muestra claramente que ésta también crece con el horizonte de pronóstico. El sesgo observado en el caso individual de *Keith* (cuadro 3) en relación con subestimar el avance, pronosticar a la derecha de la trayectoria real y subestimar la intensidad, se reduce sensiblemente en magnitud cuando se consideran todos los pronósticos de 2000. De hecho, los últimos dos

se revierten hacia un ligero sesgo para pronosticar a la izquierda de la trayectoria real y para sobreestimar ligeramente la intensidad. En la práctica se puede aceptar que las herramientas del NHC no muestran un sesgo significativo en el conjunto de todos los ciclones. Esto no quiere decir que individualmente, ciclón por ciclón, los pronósticos muestran este comportamiento no sesgado. Existe una cierta persistencia en los errores sistemáticos que se presentan en boletines consecutivos, como puede observarse en las ilustraciones 2 y 3, así como en las estadísticas de error del cuadro 3, todo esto para el caso individual de *Keith*.

Pero, ¿cómo utilizar en la práctica los resultados de este análisis de desempeño de los pronósticos del NHC? Para mostrarlo se utiliza una porción del caso real del mismo huracán *Keith* una vez que había regresado al golfo de México, específicamente el pronóstico realizado el día 4 de octubre a las 06:00 horas (boletín emitido a las 09:00 horas). En la ilustración 5 se muestra una porción de la trayectoria real seguida hasta dicho momento (línea negra), así como la trayectoria calculada (línea gris), con círculos en las posiciones pronosticadas. Aunque operativamente la trayectoria efectivamente seguida no se conoce todavía, en la ilustración se presenta con línea punteada y posiciones para los mismos instantes de pronóstico. Utilizando los resultados de error total de posición al horizonte

Ilustración 6. Utilización de las estadísticas de errores absolutos en la definición de un cono de incertidumbre alrededor de la trayectoria pronosticada. Ejemplo para el huracán Keith, con el pronóstico a 36 horas realizado a las 06:00 horas del 4 de octubre.



de 36 horas en el cuadro 4, en la misma ilustración 5 se muestran los círculos que incluirán a la posición realmente alcanzada en 36 horas con una probabilidad de 16% (media menos desviación estándar); 50% (media), y 84% (media más desviación estándar), de acuerdo con el desempeño de los pronósticos de la temporada 2000. Se puede observar que en este caso la posición real quedó ligeramente fuera del círculo de 50% de probabilidad. Si se desea construir un cono de incertidumbre, éste se puede generar como la envolvente de los círculos de incertidumbre en cada posición pronosticada, como se muestra para 50% de probabilidad en la ilustración 6. En este caso, el cono se extiende hasta la línea costera y en la situación particular de la trayectoria real seguida por *Keith*, 100% de la misma se encuentra dentro de dicho cono de incertidumbre de 50% de probabilidad. Esta es la única manera en que los reportes de error del NHC podrían ser utilizados para soporte en la toma de decisiones; es decir, la incertidumbre en cuanto a velocidad de avance y la incertidumbre como dirección seguida siempre estarían mezcladas.

Con el análisis de errores presentado aquí, estas dos incertidumbres pueden manejarse por separado, además de que las zonas de incertidumbre no necesariamente tienen que ser simétricas alrededor de la trayectoria pronosticada. Usando otra vez el mismo

ejemplo, el pronóstico a 36 horas realizado el 4 de octubre a las 06:00 horas, pero ahora con las estadísticas de error longitudinal y transversal del cuadro 4, las zonas que contendrán a la verdadera posición con 68% de probabilidad se muestran en la ilustración 7. Las dimensiones del rectángulo sombreado son iguales al doble de las desviaciones estándar del error en direcciones longitudinal y transversal (330 y 274 km, respectivamente) y su centro se encuentra desplazado de la posición pronosticada por distancias iguales a la medias del error en dirección longitudinal y dirección transversal, pero con el signo cambiado para corregir el error sistemático detectado (+46 y +14 km, respectivamente). Por supuesto que se pueden construir fácilmente rectángulos para otras probabilidades, usando como dimensiones la proporción adecuada de las desviaciones estándar. Aplicando este concepto para cada uno de los horizontes de pronóstico (con los respectivos datos del cuadro 4), se puede obtener un cono de incertidumbre como la envolvente de los errores transversales (ilustración 8). En este caso, el cono de incertidumbre no es simétrico alrededor de la trayectoria pronosticada. De forma similar, se puede establecer un rango de incertidumbre alrededor de los pronósticos de intensidad (ilustración 9), en la que las *barras de error* se extienden a más y menos una desviación estándar, pero su centro se encuentra despla-

Ilustración 7. Utilización de las estadísticas de errores longitudinales y transversales en la definición de rangos de incertidumbre sobre una posición pronosticada. Ejemplo para el huracán *Keith*, con el pronóstico a 36 horas realizado a las 06:00 horas del 4 de octubre.

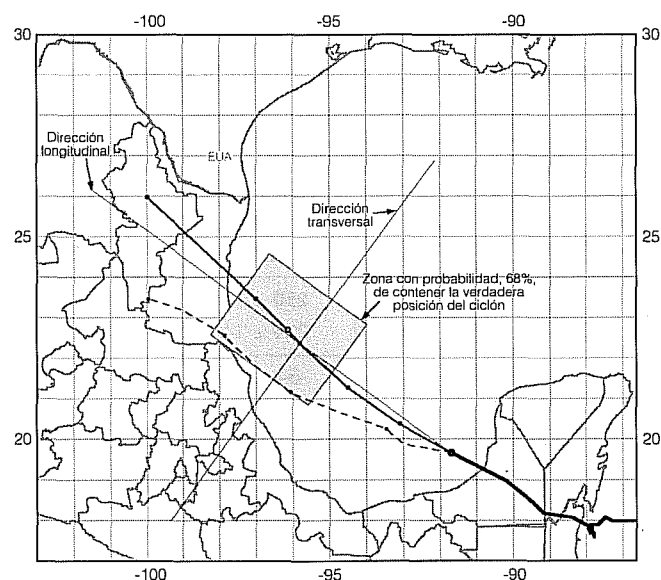


Ilustración 8. Utilización de las estadísticas de errores transversales en la definición de un cono de incertidumbre alrededor de la trayectoria pronosticada. Ejemplo para el huracán *Keith*, con el pronóstico a 36 horas realizado a las 06:00 horas del 4 de octubre.

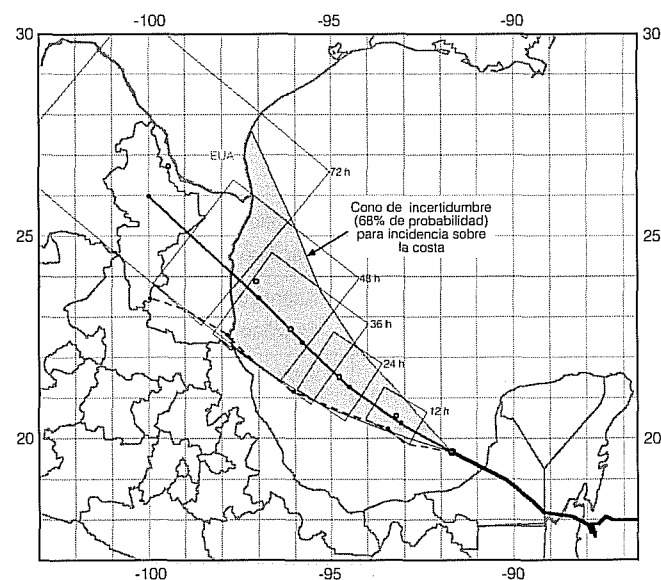


Ilustración 9. Utilización de las estadísticas de errores en intensidad en la definición de un rango de incertidumbre alrededor del pronóstico. Ejemplo para el huracán Keith, con el pronóstico a 36 horas realizado a las 06:00 horas del 4 de octubre.



zado del pronóstico oficial en una magnitud igual al del error sistemático encontrado (con signo contrario para corregirlo).

El NHC publica gráficas en tiempo real (<http://www.nhc.noaa.gov>) que incluyen los rangos de incertidumbre alrededor del pronóstico, tanto en trayectoria como en intensidad, pero que están asocia-

dos con la no coincidencia en pronóstico de las diferentes herramientas computacionales que utilizan, y no se ligan con estadísticas del desempeño de los pronósticos oficiales en temporadas anteriores.

Dadas las diferencias entre las herramientas y las fuentes de datos que se utilizan para pronosticar en el Atlántico norte y en el Pacífico nororiental, la pregunta sobre cómo se compara el desempeño de los pronósticos en ambas cuencas siempre está presente. En el cuadro 5 se muestran las mismas estadísticas de error que en el cuadro 4, pero ahora separadas por cuenca. Resulta algo sorprendente que, en contra de lo esperado, los errores en la trayectoria resultan inclusive un poco menores en el Pacífico que en el Atlántico. Esto probablemente se deba a un comportamiento más *climatológico* de los ciclones del Pacífico que del Atlántico. De hecho, y confirmando esta hipótesis, un estudio no publicado del autor indica que, al menos en la vecindad inmediata de México, las trayectorias típicas tienden a alinearse mejor con isolíneas (climatológicas) de velocidad de translación e intensidad, y las direcciones de avance tienden a tener mayor uniformidad espacial en el Pacífico que en el Atlántico. Esto implica que a pesar de utilizar más modelos y mejores datos en el Atlántico, el comportamiento más climatológico de los ciclones del Pacífico permite que los pronósticos en esta región sean ligeramente mejores. Sin embargo, en el caso del error en la intensidad, la ventaja se observa del lado del Atlántico; los mejores datos de las sondas de caída lanzadas desde los aviones cazahuracanes son probablemente los causantes directos de esto. De todas formas, y tratándose de estadísticas de tan sólo una temporada anual, las diferencias no se consideran suficientemente grandes

Cuadro 5. Estadísticas de errores de pronóstico del NHC para la temporada 2000, las del Atlántico norte en la parte superior y las del Pacífico nororiental en la parte inferior de cada celda.

$\bar{x} \pm \sigma_x$		12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
Tamaño de muestra	Atlántico	285	255	227	199	156
	Pacífico	327	293	258	223	163
Error total de posición (km)	Atlántico	79 ± 52	137 ± 81	197 ± 127	259 ± 171	437 ± 289
	Pacífico	70 ± 40	126 ± 69	178 ± 104	224 ± 140	320 ± 199
Error longitudinal (km)	Atlántico	-24 ± 76	-45 ± 122	-65 ± 183	-64 ± 247	-54 ± 413
	Pacífico	-20 ± 60	-31 ± 101	-30 ± 144	-9 ± 186	+18 ± 272
Error transversal (km)	Atlántico	-7 ± 50	-15 ± 91	-20 ± 129	-26 ± 175	-83 ± 308
	Pacífico	-4 ± 49	-5 ± 96	-8 ± 144	-34 ± 184	-112 ± 236
Error en intensidad (km/h)	Atlántico	0.7 ± 17.7	1.6 ± 27.2	1.7 ± 35.7	1.4 ± 41.1	10.7 ± 46.5
	Pacífico	2.4 ± 14.6	5.9 ± 23.3	8.8 ± 30.4	9.6 ± 34.1	12.8 ± 33.2

Cuadro 6. Estadísticas de errores de pronóstico del NHC para la temporada 2000, las generales en la parte superior y las de interés para México en la parte inferior de cada celda.

$\bar{x} \pm \sigma_x$		12 h	24 h	36 h	48 h	72 h
Tamaño de muestra	General	612	548	485	422	319
	México	243	219	194	169	122
Error total de posición (km)	General	74 $\pm$ 46	131 $\pm$ 75	187 $\pm$ 116	240 $\pm$ 156	377 $\pm$ 254
	México	73 $\pm$ 40	138 $\pm$ 73	200 $\pm$ 114	256 $\pm$ 158	383 $\pm$ 245
Error longitudinal (km)	General	-22 $\pm$ 68	-38 $\pm$ 80	-46 $\pm$ 165	-35 $\pm$ 219	-17 $\pm$ 350
	México	-25 $\pm$ 63	-44 $\pm$ 111	-62 $\pm$ 151	-50 $\pm$ 200	-20 $\pm$ 320
Error transversal (km)	General	-6 $\pm$ 50	-10 $\pm$ 94	-14 $\pm$ 137	-30 $\pm$ 180	-98 $\pm$ 274
	México	+2 $\pm$ 49	+11 $\pm$ 99	+25 $\pm$ 161	+32 $\pm$ 217	+12 $\pm$ 324
Error en intensidad (km/h)	General	1.6 $\pm$ 16.2	3.9 $\pm$ 25.3	5.5 $\pm$ 33.2	5.8 $\pm$ 37.8	11.8 $\pm$ 40.2
	México	2.2 $\pm$ 18.1	3.7 $\pm$ 29.1	4.8 $\pm$ 38.0	4.2 $\pm$ 41.2	15.1 $\pm$ 41.3

y consistentes como para recomendar utilizar valores diferentes en cada cuenca; los valores en el cuadro 4 parecen describir razonablemente el desempeño de los pronósticos en ambas.

Pero la duda sobre posibles diferencias importantes entre el desempeño de los pronósticos en general contra aquellos en la vecindad directa de México persiste, ¿es razonable utilizar estadísticas de error de la totalidad de las zonas ciclogénicas para establecer rangos de incertidumbre para ciclones que amenazan con incidencia directa a nuestro país? Para responder esta pregunta se calcularon las estadísticas particulares de un subconjunto de la muestra total de ciclones que resultan de especial interés nacional. Para el Atlántico se seleccionaron todos los que ingresaron en algún momento a la región definida por $5^\circ \text{ N} \leq \text{latitud} \leq 35^\circ \text{ N}$ y $\text{longitud} \geq 80^\circ \text{ W}$, excepto si se encontraban directamente al este de la península de La Florida (ver ilustración 2). Únicamente se analizó la porción al oeste del meridiano (70° W), que a velocidades típicas de translación, considera unas 72 horas antes de afectar (en caso de hacerlo) a nuestro país. De alguna forma, todos los ciclones del Pacífico son de interés nacional, pero aun aquí se seleccionó a los ciclones que en algún momento estuvieron a menos de 480 km de México continental, y aproximadamente a unas 24 horas de incidir directamente en tierra en caso de virar hacia el continente en dicho momento. En este caso se procesaron las porciones de la trayectoria al este del meridiano 120° W (ver ilustración 2). En el cuadro 6 se contrastan las estadísticas de error generales con este subconjunto de interés para México. El desempeño de los pronósticos en la región específica del país resulta equivalente al desempeño en general. La única diferencia a resaltar es que, mientras los pronósticos en

general tienden a pronosticar, en promedio, ligeramente a la izquierda de la trayectoria real, los pronósticos para México tienden a pronosticar, en promedio, ligeramente a la derecha de la trayectoria real. Dadas las trayectorias típicas (Rosengaus, 1998) para los ciclones del Pacífico, esto implicaría pronósticos con una ligera tendencia errónea a acercarse a tierra mexicana, es decir, resultarían conservadores.

La temporada 2000 también resultó notable en dos aspectos más: por un lado, se trata de la primera temporada en la que los sensores pasivos de microondas sobre satélites SSM/I se utilizan rutinariamente para evaluar la intensidad de los ciclones tropicales y cambios en la misma; por otro lado, también es la primera temporada en la que alguna de las herramientas computacionales individuales utilizadas (el modelo denominado *GUNS* fue el de mejor desempeño) superó estadísticamente al pronóstico oficial del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos.

Principales efectos sobre México

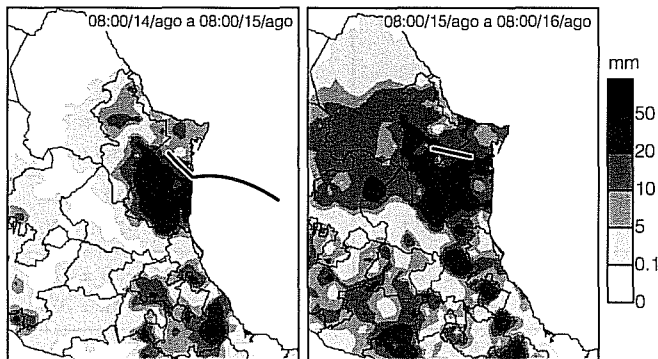
La temporada 2000 de ciclones tropicales se puede caracterizar como benévola para México. No ocurrió ningún desastre natural de consideración.

Por el lado del Atlántico, sólo tres de los 14 ciclones incidieron, con parte de su trayectoria, sobre territorio continental mexicano:

1. *Beryl* (del 13 al 15 de agosto) entró a tierra como tormenta tropical el 15 de agosto en la zona de La Pesca, Tamaulipas, y se disipó sobre Nuevo León.

2. *Gordon* (del 14 al 18 de septiembre) se generó prácticamente sobre territorio mexicano y merodeó el extremo noreste de la península de Yucatán como depresión tropical el 14 y 15 de septiembre.

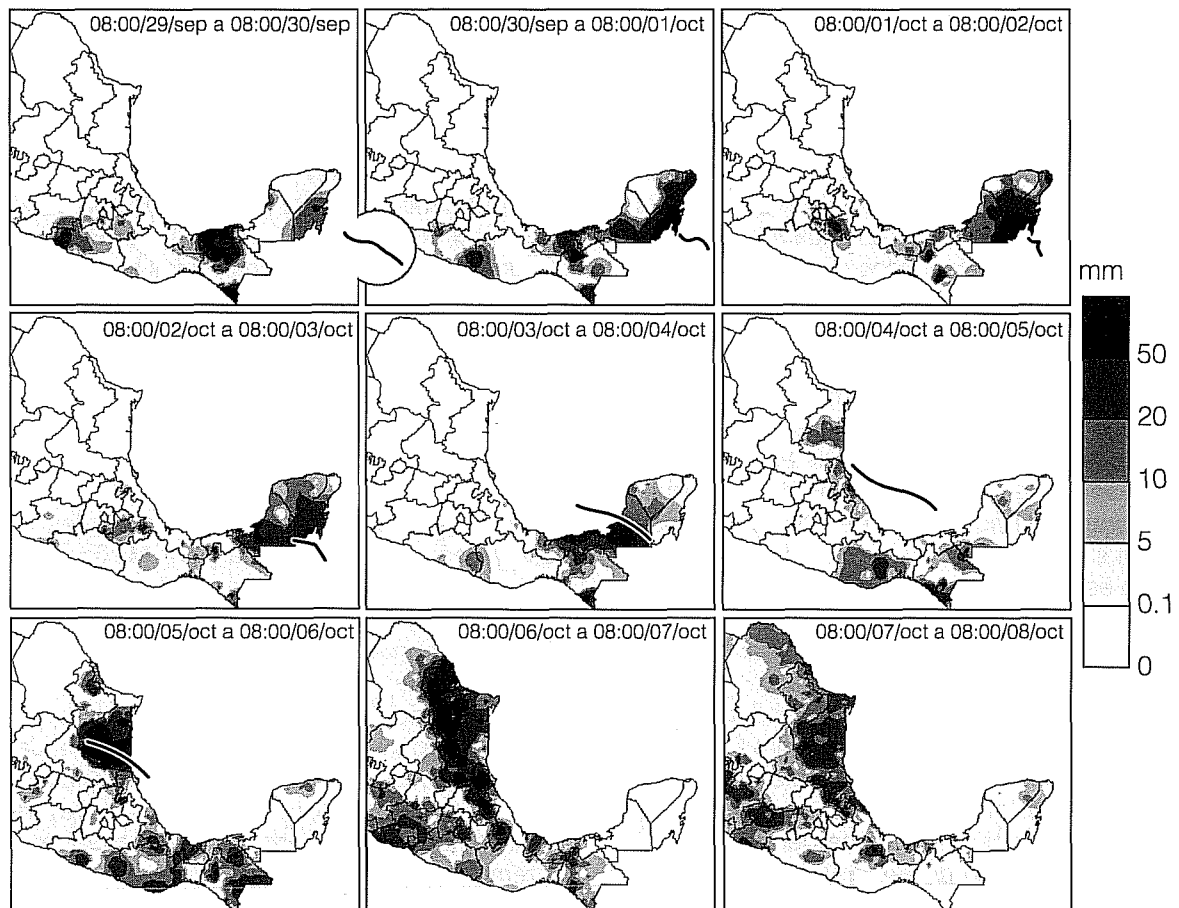
Ilustración 10. Mapas de precipitación diaria producida por la tormenta tropical *Beryl* (adaptado de mapas originales generados por J. Espinosa Cruickshank, SMN).



3. *Keith* (del 28 de septiembre al 6 de octubre), el ciclón de mayor importancia para México durante la temporada 2000, presentó incidencia directa sobre Be-

lice el 3 de octubre como tormenta tropical, recorriendo el sur de los estados de Quintana Roo y Campeche como tormenta y luego, como depresión tropical (3 y 4 de octubre). Reincidió en tierra, ligeramente al norte de Tampico, Tamaulipas, el 5 de octubre como un huracán débil de categoría I, cruzando dicho estado hasta disiparse al sur de Nuevo León el día 6. Las zonas sujetas a vientos de huracán (>120 km/h) resultaron muy restringidas: sólo el extremo sureste del estado de Quintana Roo al acercarse *Keith* y alrededor del punto de reingreso del mismo sistema al sur de Tamaulipas. De igual forma, los efectos marítimos (oleaje y marea de tormenta) fueron moderados. Sólo las precipitaciones pluviales resultaron dignas de mención. En la ilustración 10 se muestran los mapas de lámina de lluvia acumulada durante el ingreso y la disipación de *Beryl* en el noreste de México, de acuerdo con un subconjunto de las estaciones climatológicas manuales (lecturas cada 24 horas) que opera la Comisión Nacional del Agua (CNA). En estos mapas se sobrepone la por-

Ilustración 11. Mapas de precipitación diaria producida por el huracán *Keith* (adaptado de mapas originales generados por J. Espinosa Cruickshank, SMN).



ción de la trayectoria recorrida del ciclón durante las mismas 24 horas a las que corresponde la lámina acumulada. Por supuesto, de manera puntual, las acumulaciones alcanzaron valores mayores al de la isolínea de 50 mm, por ejemplo, 160 mm en la estación San Gabriel, Tamaulipas, del 14 al 15 de agosto. Como es común, aunque pasan al altiplano central significativos volúmenes de lluvia, las máximas acumulaciones se mantienen en la llanura costera o sobre la vertiente marítima de la Sierra Madre Oriental. Por su parte, *Gordon* produjo acumulaciones mayores a 50 mm únicamente en una restringida zona en la punta noreste de la península de Yucatán durante un día; se omite el mapa correspondiente. En el caso de *Keith*, la afectación de lluvias sobre México cubrió desde el 29 de septiembre hasta el 8 de octubre. La ilustración 11 muestra la secuencia de acumulados en 24 horas con la correspondiente porción de la trayectoria del ciclón. En este caso, las acumulaciones máximas puntuales que destacan son (días del mes de octubre): 140 mm en Chetumal del día 1° al 2; 80 mm y nuevamente 152 mm en Sabancuy, Campeche, del 2 al 3 y del 3 al 4; 366.5 mm en Sabinas, Tamaulipas, del 5 al 6, y 282.8 mm en Las Brisas, Nuevo León, del 6 al 7. Destaca el contraste entre la extensión de las zonas sujetas a más de 50 mm/día (y los valores de los picos) entre el sureste con orografía despreciable y el noreste con orografía apreciable. De hecho, las lluvias producidas ya en la etapa de disipación (últimos dos recuadros de la ilustración 11) son significativas y su distribución espacial sugiere un marcado efecto orográfico. También resulta interesante el contraste entre las grandes acumulaciones (del 3 al 4 de octubre) a la izquierda de la trayectoria sobre el sur de Campeche y todo Tabasco, sujetos a vientos del norte directamente del mar hacia

tierra, mientras que se presentan sólo moderadas a la derecha de la trayectoria sobre el norte de Campeche, zona que estuvo sujeta a vientos que previamente recorrieron todo el ancho de la península sobre tierra. Se contabilizaron 19 muertes debido a *Keith*, aunque la mayoría de ellas ocurrió en Centroamérica. Belice estimó daños en unos 200 millones de dólares.

En cuanto al Pacífico, de los 17 ciclones tropicales, sólo tres incidieron directamente en México: *Miriam* como tormenta tropical en el extremo sur de la península de Baja California el 17 de septiembre; *Norman*, tormenta tropical, pasó sobre la zona costera de Michoacán, Colima y Jalisco, y después de regresar al mar, sobre el sur de Sinaloa del 19 al 22 de septiembre; *Rosa*, como tormenta tropical, incidió sobre la parte media de la costa de Oaxaca el 8 de noviembre. Dos casos adicionales merecen atención:

- a) El huracán *Carlota*, el más intenso del Pacífico nor-oriental durante la temporada 2000, que alcanzó categoría IV del 18 al 25 de junio, describió una trayectoria típica (Rosengaus, 1998) casi paralela a la costa mexicana. Durante su recorrido zozobró un barco carguero lituano, pereciendo 18 tripulantes.
- b) Los remanentes del ciclón *Olivia*, ya como un sistema débil, incidieron sobre la parte media de la península de Baja California, introduciéndose hasta Sonora el 10 de octubre.

De todos estos casos, sólo *Norman* produjo lluvias importantes en cuanto a extensión y duración. En la ilustración 12 se muestra la secuencia de lluvias acumuladas cada 24 horas por *Norman*, con la porción correspondiente de la trayectoria. Aquí se marca todavía más la tendencia de las acumulaciones altas a permanecer en la vertiente marina de la Sierra Madre Occidental. Destacan las lluvias sobre la costa de Guerrero antes de la incidencia (bajo vientos directos del mar y perpendiculares a la sierra) y las lluvias sobre Sinaloa ya en la etapa de disipación. Puntualmente, durante su paso, los máximos nacionales se registraron en Acapulco, Guerrero, 116.2 mm; Callejones, Colima, 357.5 mm; Cajón de Peña, Jalisco, 173 mm, y Mazatlán, Sinaloa, 148.9 mm, respectivamente, para cada uno de los cuatro días representados en la ilustración 12.

El hecho de que la temporada 2000 haya resultado benévola en cuanto a daños no debe servir como indicador para reducir las medidas preventivas. De hecho, aunque no muy difundido, se estuvo cerca de haber tenido un desastre natural de proporciones mayores durante la incidencia del sistema *Keith*. Dicho sistema alcanzó una intensidad considerable: categoría IV con vientos máximos sostenidos de 213 km/h y ráfagas de 260 km/h el día 1° de octubre a las 12:00 horas a tan sólo unos 50 km de Xcalax, en la punta sureste de

Ilustración 12. Mapas de precipitación diaria producida por la tormenta tropical *Norman* (adaptado de mapas originales generados por J. Espinosa Cruickshank, SMN).

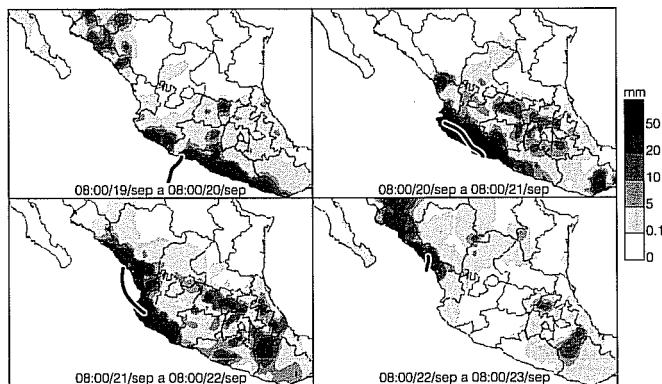
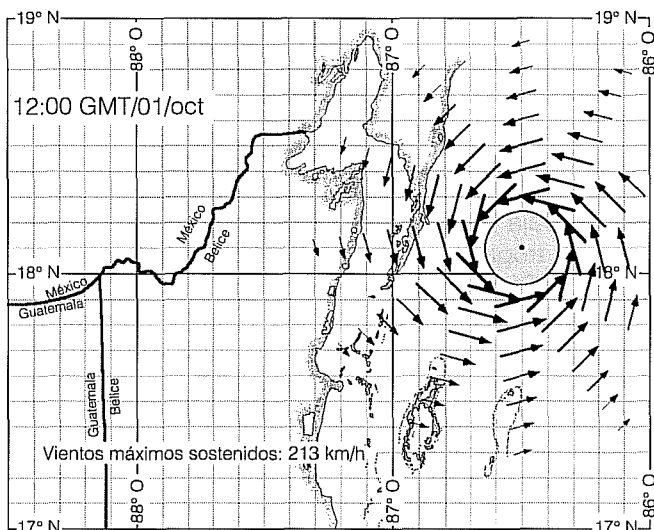


Ilustración 13. Esquema del campo de vientos del huracán Keith en su instante de máxima intensidad (en relación con la bahía de Chetumal).



Quintana Roo. Esto explica los daños sufridos por Belice, aunque al entrar a su territorio, *Keith* sólo era una tormenta tropical. En la ilustración 13 se muestra de forma esquemática el campo de vientos en dicho instante. Al respecto, es importante puntualizar que la totalidad de la bahía de Chetumal que se muestra en la ilustración tiene aguas muy someras, de menos de 5 m de profundidad, lo que la hace sumamente sensible al fenómeno de marea de tormenta (Rosengaus, 1998). En el instante de máxima intensidad, como se muestra en dicha ilustración, el esfuerzo cortante del viento sobre la superficie del mar obviamente estaba extrayendo agua de la bahía y, por lo tanto, bajando el nivel del mar en la misma. De hecho, muchos habitantes de Chetumal (a unos 100 km del centro de giro) caminaban por extensas zonas de la bahía que habían sido vaciadas. Esto sólo demuestra la sensibilidad mencionada. Si *Keith* hubiera proseguido con su trayectoria previa (ver ilustración 2) y hubiera mantenido dicha intensidad, al entrar a tierra sobre Belice los vientos en la boca de la bahía habrían cambiado 180° en dirección, pero hubieran mantenido su magnitud. Bajo estas condiciones, el esfuerzo cortante del viento sobre la superficie del mar habría empezado a introducir grandes cantidades de agua a la bahía, incrementando significativamente su nivel. Puesto que la zona terrestre aledaña es sumamente plana, pendientes de sólo 1.15 m por cada km desde la costa, dicha sobre-elevación habría significado extensas zonas inundadas, incluyendo, posiblemente, la totalidad de la ciudad de Chetumal. Velocidades reducidas de avance

(como efectivamente ocurrió) sólo hubieran magnificado el problema. Afortunadamente, el sistema empezó a debilitarse rápidamente mientras ejecutaba un pequeño rizo frente a la boca de la bahía, a tal punto que

Ilustración 14. Esquema del campo de vientos del huracán Keith poco después de entrar a tierra (en relación con la bahía de Chetumal).

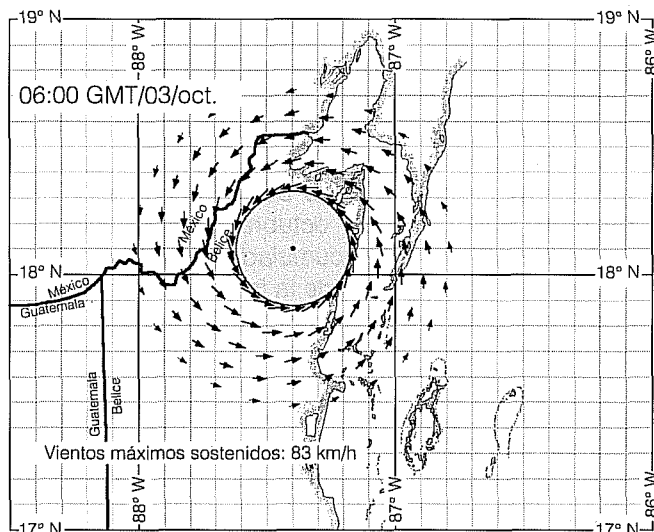
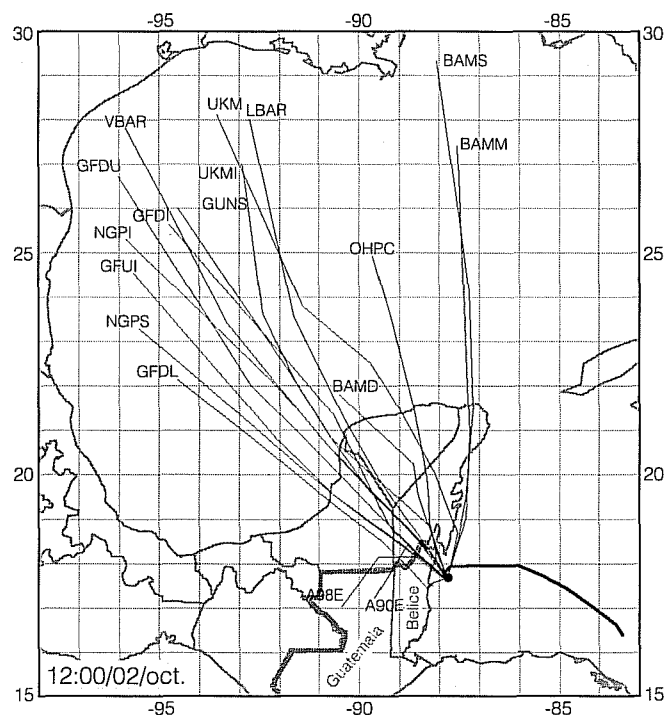


Ilustración 15. Diagrama de pronósticos de trayectoria de las diferentes herramientas del NHC para el huracán Keith antes de entrar a tierra.

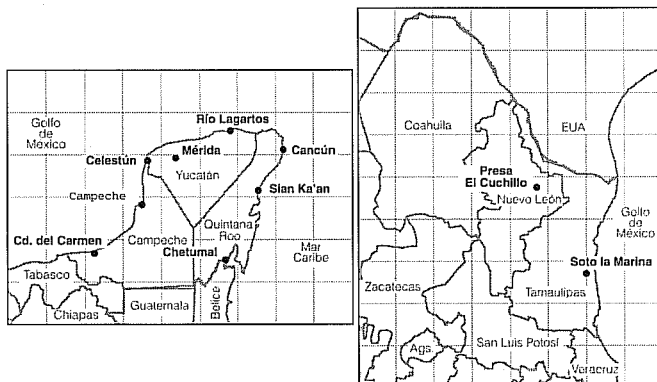


el campo de vientos en el momento de estar alineado con la entrada (06:00/03/oct.) presentaba vientos mucho menores, de tan sólo unos 83 km/h, como se muestra esquemáticamente en la ilustración 14. En relación con este peligro inminente, resulta necesario enfatizar que la *isla de barrera* que restringe la entrada a la bahía de Chetumal (ilustración 14) no operaría, en absoluto, como un obstáculo al paso del agua bajo condiciones extremas, pues se trata de una zona muy baja que ciertamente se vería rebasada por el extraordinario nivel del mar producido por vientos de un huracán categoría IV. Este caso ejemplifica la reserva con la que aún es necesario tomar los pronósticos en casos especiales de vulnerabilidad local, al considerar que para dicho instante en la trayectoria (12:00 horas del 2 de octubre), los distintos modelos de pronóstico del NHC indicaban una evolución promedio hacia el noroeste (como se muestra en la ilustración 15), comportamiento que no hubiera llevado al caso de peligro descrito.

Monitoreo con la red de EMA

Existe otra característica que distingue a la temporada 2000 de ciclones tropicales en México. Se trata de la primera temporada en la que un número significativo de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) estaba operando satisfactoriamente. Cincuenta y nueve de estas EMA pertenecen al sistema del SMN-CNA y 22 más, al sistema de la Secretaría de Marina (SM), estas últimas instaladas directamente sobre la costa o en islas. Dichas estaciones miden variables atmosféricas con gran frecuencia y transmiten sus resultados a centrales cada tres horas por satélite. Esto permite utilizarlas como un mecanismo de monitoreo de tiempo casi real. Aunque las zonas de incidencia y la intensidad de los ciclones de esta temporada no resultaron

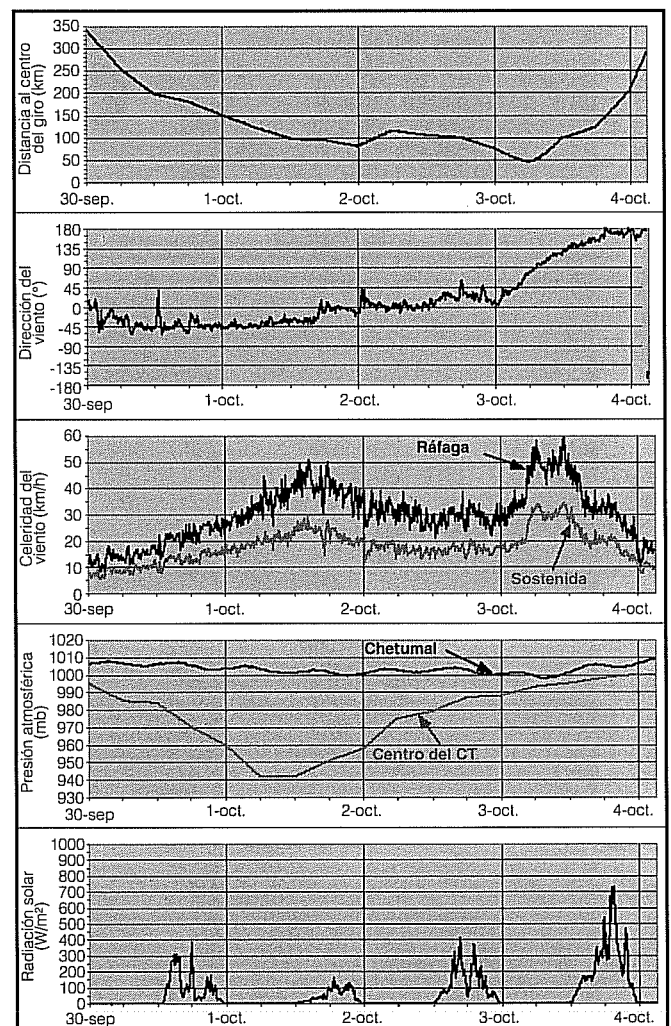
Ilustración 16. Ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas del SMN pertinentes en el caso del huracán Keith.



las ideales para evaluar la utilidad del sistema, se aprovecha este trabajo para mostrar cualitativamente su utilidad en un futuro. Tanto la red del SMN-CNA como la red de la SM deben crecer en unos años. De hecho, al momento de elaborar este trabajo, la SM estaba en el proceso de incorporar a un sistema de transmisión en tiempo real otras 34 EMA ubicadas en sus instalaciones a lo largo del litoral mexicano.

El ejemplo más adecuado resulta nuevamente el ciclón tropical *Keith*, que dejó mediciones interesantes en 10 de las 59 estaciones del SMN/CNA (y en seis de las 22 de la SM, aunque éstas no se presentan aquí). La ubicación de las EMA del SMN-CNA se muestran en la ilustración 16. La estación más cercana al paso de *Keith* fue la de Chetumal. En la ilustración 17 se tienen las mediciones de las variables (excepto lluvia) desde que el sistema se encontraba unos 300 km an-

Ilustración 17. Mediciones de la EMA en Chetumal al paso del huracán Keith (excepto precipitación pluvial).



tes de la zona hasta que se encontraba a unos 300 km después de ella; al interpretar estas mediciones resulta conveniente considerar la trayectoria y las fechas en la ilustración 2. También, y para facilitar la interpretación, se incluye la evolución de la distancia del centro de giro del sistema a la EMA en Chetumal. La distancia mínima resultó de algo menos de 50 km, aproximadamente, a las 06:00 horas del 3 de octubre, momento para el cual el sistema ya se había debilitado de manera significativa. En la segunda gráfica de la ilustración 17 se muestra la dirección del viento en Chetumal, con viento aproximadamente del norte durante la aproximación y cambiando rápidamente en 180° (del sur) al alejarse el sistema, lo cual es completamente congruente con la circulación de viento en superficie de los ciclones tropicales. El tercer panel de la ilustración 17 muestra la evolución en el tiempo de la celeridad

del viento en Chetumal, tanto de la *velocidad sostenida* (en este caso, promedio en intervalos de 10 minutos) como de la *velocidad de ráfaga* (en este caso, velocidad máxima en cada intervalo de 10 minutos). Se observan dos picos: el primero (15:00 horas del 1° de octubre), asociado con una intensidad casi máxima del ciclón (velocidad de vientos máximos sostenidos en el borde del ojo de unos 210 km/h), pero aún alejado unos 100 km; el segundo (09:00 horas del 3 de octubre), vinculado con la mínima distancia del sistema, pero para un ciclón ya muy debilitado con velocidades de viento máximos sostenido de tan sólo 90 km/h (ilustración 3). Las velocidades del viento no llegaron a ser nunca de gran peligro. El cuarto panel muestra la evolución en el tiempo de la presión atmosférica tanto la local en Chetumal como la central del sistema ciclónico en sí. La baja de presión en Chetumal es muy pequeña, pero se puede observar claramente la variación semidiurna de las presiones en nuestro planeta. Finalmente, el último panel de la ilustración 17 muestra la radiación solar, que en este caso señala de manera indirecta el estado de cobertura nubosa del cielo. En días despejados, la radiación solar durante las horas del día tiene una variación característica que alcanza más de 1,000 W/m², muy superior a la observada durante el paso de *Keith* por la zona.

De máximo interés en este foro resultan las mediciones de precipitación pluvial. Éstas se muestran en la ilustración 18 para cinco EMA en el sureste de México, como la evolución en el tiempo de las intensidades de lluvia (promedio en 10 minutos). Los ejes del tiempo en los últimos dos paneles están retrasados en cuanto a los tres primeros, para considerar más tarde el paso del sistema por su zona. Resulta muy claro que las precipitaciones pluviales típicas de un ciclón se asocian con múltiples tormentas muy intensas, pero

Ilustración 19. Registros pluviográficos de dos EMA en el noreste de México al paso del huracán *Keith*.

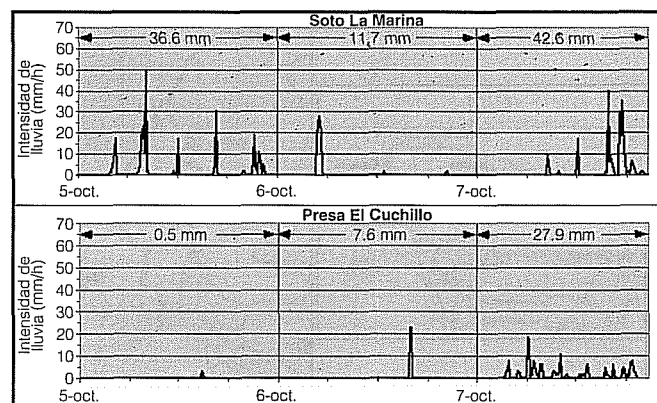
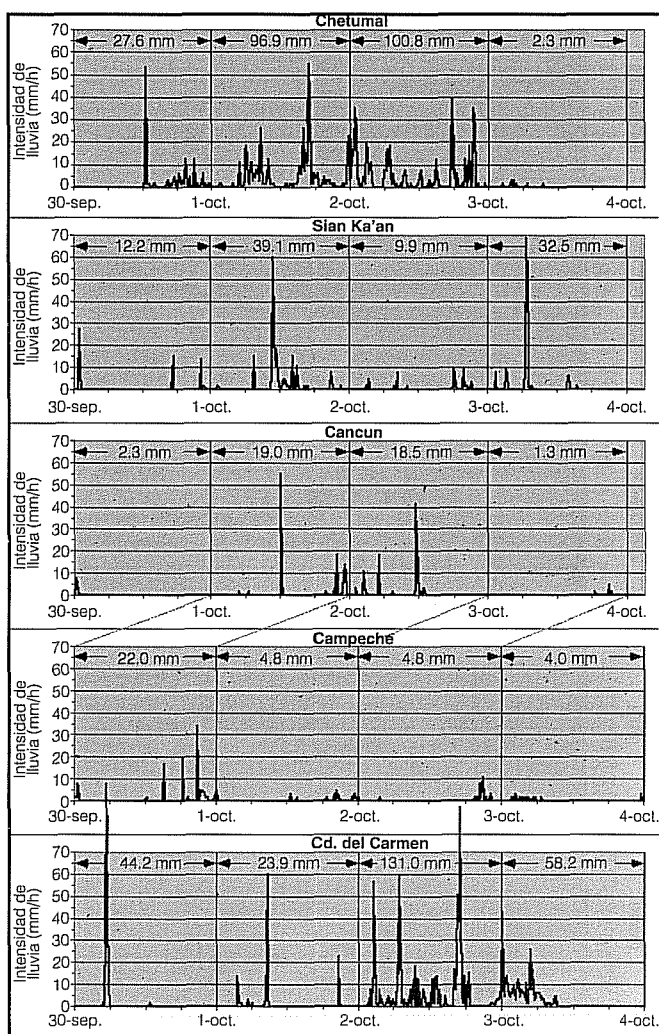


Ilustración 18. Registros pluviográficos de cinco EMA en el sureste de México al paso del huracán *Keith*.

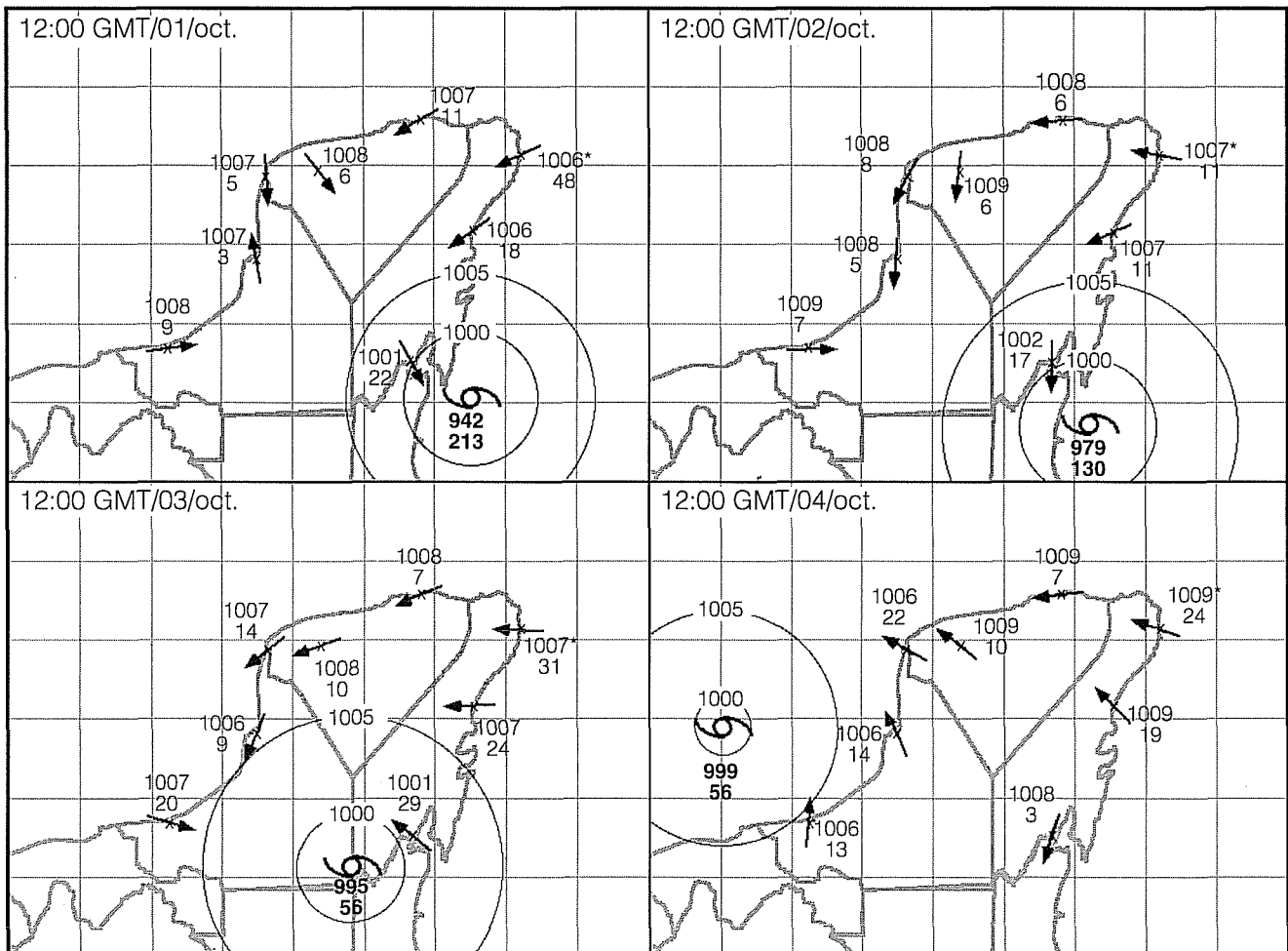


de relativamente corta duración. La intensidad máxima de las mismas no se encuentra bien correlacionada con la distancia al centro de giro del ciclón, pero la frecuencia con la que se presentan sí. Las ilustraciones acumuladas cada 24 horas que se muestran en la parte superior de cada panel muestran, para condiciones similares de acceso del aire húmedo, una relación inversa con la distancia al centro de giro del ciclón. El gran contraste entre la zona derecha e izquierda de la trayectoria al retornar al golfo de México (a la que ya se ha hecho mención en relación con la ilustración 11) es evidente en los dos paneles inferiores de la ilustración 18. De hecho, las intensidades máximas registradas se dieron en Ciudad del Carmen. Al calcular las láminas acumuladas de 08:00 a 08:00 horas cada día, la congruencia con los mapas de la ilustración 11 es excelente. En la ilustración 19 se muestran los registros pluviográficos para las EMA en la zona que vuelve

a entrar a México por el noreste. A pesar de las bajas intensidades y de las láminas acumuladas mostradas, y dada su ubicación geográfica específica, no presentan incongruencias con los mapas de la ilustración 11.

La máxima utilidad de una red de estaciones meteorológicas automáticas como herramienta de monitoreo en tiempo real y de postanálisis en caso de ciclones tropicales no proviene de la observación de las mediciones puntuales, sino de la reconstrucción (bajo algún esquema de interpolación) de los campos de las variables de interés. Como indicador de la utilidad de este sistema se presenta el ejemplo de las variables de presión, celeridad y dirección del viento durante el paso de *Keith* sobre la península de Yucatán a intervalos de 24 horas (ilustración 20). En ella se muestra la posición del sistema etiquetado con la presión en milibares arriba y la velocidad de vientos máximos sostenidos en km/h abajo. En la ubicación de cada estación

Ilustración 20. Mediciones de presión, celeridad y dirección del viento de las EMA en el sureste de México en cuatro instantes al paso del huracán *Keith*.



se presenta gráficamente la dirección del viento y, en el mismo orden, la presión atmosférica y celeridad del viento local. Se muestran, además, las ubicaciones aproximadas (como círculos concéntricos centrados en la posición del ciclón) de las líneas de igual presión atmosférica correspondientes a 1,000 y 1,005 mb (la presión atmosférica *normal* es de 1,013.3 mb). Dada la relativa lejanía de las estaciones al centro del sistema y la debilidad del mismo, las presiones locales resultan congruentes. Es necesario advertir que las mediciones de presión en Cancún, marcadas con *, fueron corregidas por el autor sumando 10 mb a todas (por lo que, aparentemente, sería un error sistemático de *puesta a cero* del instrumento). La fluidodinámica establece que los vientos en superficie deben girar alrededor del centro de baja presión en sentido antihorario, con una ligera convergencia hacia el centro, digamos de 15° sobre el mar y de unos 30° sobre terreno plano. Puede observarse la congruencia de las direcciones del viento con esto en la mayor parte de los casos; las únicas que no coinciden son ubicaciones relativamente lejanas al centro y con celeridades muy bajas. Las celeridades locales de viento no muestran este grado de congruencia; ello se explica por no ser el ciclón el único factor determinante en la velocidad del viento local (brisas de mar, brisas de tierra, etcétera). Densas redes de este tipo permiten reconstrucciones de los campos de las variables de interés con incrementos de tiempo de tan sólo 10 minutos (contra 24 horas del ejemplo en la ilustración 20).

Conclusiones

La temporada 2000 resultó muy activa en el caso del Atlántico y normal en el Pacífico. La evolución de las temperaturas de la superficie del mar fue cercana a lo normal, con la excepción de una pequeña anomalía negativa en la zona inmediatamente costera del océano Pacífico frente a la península de Baja California. Los pronósticos de la actividad ciclónica de la temporada resultaron cualitativamente acertados, aunque el número de sistemas en el Atlántico fue todavía más alto que el pronosticado. La máxima peculiaridad de esta temporada en el Atlántico fue que a pesar de haber iniciado tardíamente a inicios de agosto presentó un número de sistemas 1.25 desviaciones estándar por arriba de lo normal. Esto implica una anormal concentración de sistemas en el tiempo.

Separar el error de pronóstico en la trayectoria en sus componentes longitudinal y transversal brinda información adicional útil en términos operativos, al permitir la aplicación diferenciada a incertidumbre en el tiempo de llegada o en la dirección de avance. Se pre-

senta un análisis estadístico de los errores de los pronósticos del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos tanto de la trayectoria como de la intensidad de los ciclones de la temporada 2000, no sólo en términos de la magnitud del error sino también de las componentes longitudinal y transversal en el caso de trayectoria, y de subestimación o sobreestimación en los casos de intensidad. Donde es aplicable, el error se separa en sistemático y aleatorio. Los resultados se presentan en el cuadro 4 y muestran que los pronósticos del NHC no tienen un sesgo significativo, pero aún están sujetos a errores aleatorios importantes en el contexto de toma de decisiones y protección civil. Se propone una forma práctica de aplicar los resultados en la evaluación de incertidumbre en las ilustraciones 7 y 8. El análisis de errores diferenciado entre Pacífico y Atlántico muestra que, a pesar de los mejores datos utilizados en el Atlántico, el desempeño de los pronósticos en el Pacífico es ligeramente mejor; esto se debe al comportamiento más *climatológico* de los ciclones de esta cuenca. El análisis sobre un subconjunto de pronósticos en la vecindad de interés para México muestra desempeño equivalente al de la totalidad de las zonas ciclónicas.

Desde el punto de vista de incidencia directa y daños ocasionados, la temporada 2000 resultó benévola. Zonas muy restringidas estuvieron sujetas a condiciones peligrosas por viento, oleaje o marea de tormenta (aunque se presenta un caso donde se vislumbra la posible ocurrencia de un desastre de consideración: *Keith* sobre la bahía de Chetumal). Se documentan gráficamente los campos de precipitación pluvial de los ciclones *Beryl*, *Keith* y *Norman* a través de su evolución sobre el territorio nacional.

Se muestra la posibilidad de aplicar la creciente red de estaciones meteorológicas automáticas para el monitoreo en tiempo real y el postanálisis detallado de ciclones tropicales en el futuro.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de Javier Espinosa Cruickshank, Juan Olalde Fuentes, Alberto Hernández Unzón y, en general, del Servicio Meteorológico Nacional de México en la obtención de datos. También se reconoce el apoyo de Arturo Caracas Uribe de la Dirección de Meteorología Marítima de la Secretaría de Marina de México y de Sergio A. Jaramillo Guel de la Dirección General de Capitanías de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Asimismo, se agradecen tanto los comentarios de dos árbitros anónimos como las atinadas indicaciones de Roberto Mejía Zermeño del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Recibido: 20/05/2001
Aprobado: 09/07/2001

Referencias

- Ahrens, C. Donald, *Meteorology Today*, West Publishing Company, 1994, 591 pp.
- Gray, W.M., C. Landsea, P. Mielke y K. Berry, "Extended Range Forecast of Atlantic Seasonal Hurricane Activity and US Landfall Strike Probability for 2000", <http://typhoon.atmos.colostate.edu/forecast/2000/fcst2000/index.html>, 8 de diciembre de 1999, pp. 1-8.
- Gross, J.M., "2000 National Hurricane Center Forecast Verification", <http://www.nhc.noaa.gov/ver00.html>, 2 de marzo de 2001, pp. 1-8.
- Hernández U., A., "Informe sobre la evolución actual de la temporada de ciclones tropicales 2000 (4 de agosto de 2000)", <http://www.cna.gob.mx/smn.html>, 4 de agosto de 2000, pp.1-2.
- Magaña, V. (editor), *Los impactos de El Niño en México*, Secretaría de Gobernación, UNAM, IAI, Conacyt, México, 1999, 229 pp.
- Rosengaus, M. y G. Reza, *Análisis de errores de pronóstico de ciclones tropicales de 1990*, informe técnico, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México, 1991, 195 pp.
- Rosengaus, M., *Efectos destructivos de ciclones tropicales*, Mapfre Re, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Asociación Mexicana de Hidráulica, México D.F., México, 1998, 251 pp.
- SMN, *Crónica de la temporada de huracanes de 1998 en México*, Comisión Nacional del Agua, México, 1998, 98 pp.
- SMN, *Crónica de la temporada de huracanes de 1999 en México*, Comisión Nacional del Agua, México, 1999, 103 pp.
- SMN, *Crónica de la temporada de huracanes de 2000 en México*, Comisión Nacional del Agua, 2000. En imprenta.
- Páginas WWW citadas de Internet:
- <http://www.nhc.noaa.gov>
<http://www.cna.gob.mx/smn.html>
<http://www.nhc.noaa.gov/aboutmodels.html>
<http://typhoon.atmos.colostate.edu/forecast>
http://las.saa.noaa.gov/las-bin/climate_server/dset=50km+SST+GLOBAL

Abstract

Rosengaus, M., "An Analysis of the 2000 Tropical Cyclone Season for Mexico", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 4, pages 5-23, October-December, 2001.

A 2000 tropical cyclone season analysis is presented on: a) its general level of activity, b) the performance of the forecast of seasonal activity, c) the performance of the cyclone-by-cyclone NHC forecasts, d) the main effects on Mexico and e) the performance of the growing network of automatic weather stations. In the context of (c), a methodology is applied that compares the actual tropical cyclones position with its forecast for the same instant, statistically processing the errors, both in the absolute sense and in the longitudinal and transversal directions to the storm track. The Atlantic season was late, nevertheless very active, surpassing the season activity forecasts. On the Pacific the season can be considered typical. The NHC track and intensity forecast show no bias but still significant precision errors. Applying separately uncertainty into the longitudinal and transversal track forecasts shows operational usefulness. The most important tropical system for Mexico was Keith, not only due to its extended rainfall in the SE and NE, but also due to the hazard to which it subjected the Chetumal Bay region. For the first time, during the 2000 season, automatic weather stations were available, becoming a powerful tool for real time decision making and detailed post-analysis.

Key words: tropical cyclones, hurricanes, forecasting, track, 2000 season, Keith, automatic weather stations, uncertainty.

Dirección institucional del autor:

Michel Rosengaus Moshinsky

Doctor en ciencias
Especialista en hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Tecnología Hidrológica
Paseo Cuauhnáhuac 8532, 62550 Progreso, Morelos, México
Teléfono (52) (7) 319 4000, extensión 526
Fax (52) (7) 319 4341
Correo electrónico: michros@tlaloc.imta.mx