Ingeniería hidráulica en México, vol. XXI, núm. 2, pp. 27-41, abril-junio de 2006

Evaluación objetiva de la actividad ciclónica

Michel Rosengaus-Moshinsky

Unidad del Servicio Meteorológico Nacional
Comisión Nacional del Agua, México

La comparación entre la actividad de ciclones tropicales en diversas zonas ciclogenéticas, diversas temporadas o diversas regiones, se beneficia de contar con índices que la consideran en forma objetiva y que además son de fácil interpretación física y aplicación, y para los que se cuenta con los datos necesarios. Este trabajo propone el uso de un Índice de Actividad Ciclónica (IAC), que cumple con estas características. El IAC propuesto se calcula como el área, en km^2, cubierta por vientos de tormenta tropical o mayores, más tres veces el área cubierta por vientos de huracán. Su aplicación puede restringirse fácilmente a una región de interés arbitraria. Se ejemplifica la aplicación del IAC en la totalidad del Atlántico norte y el Pacífico nororiental, así como para el México continental y vecindades de 100, 300 y 500 km alrededor de él; esto para cinco temporadas de ciclones tropicales, de 2000 a 2004.

Palabras clave: ciclones tropicales, tormentas tropicales, huracanes, actividad ciclónica, meteorología tropical, evaluación objetiva, índice de actividad ciclónica, desastres naturales.

Introducción

La evaluación objetiva del nivel de actividad de ciclones tropicales es necesaria, entre otras muchas aplicaciones, para:

a) Comparar entre sí diversas cuencas de ciclogénesis, por ejemplo: el Atlántico norte *versus* el Pacífico nororiental en su totalidad.
b) Comparar entre sí diversas temporadas de ciclones tropicales en alguna cuenca de ciclogénesis, por ejemplo: 2000 *versus* 2004 en el Atlántico norte.
c) Comparar la afectación de ciclones tropicales sobre diversas regiones o países del planeta, por ejemplo, México *versus* Estados Unidos de América.
d) Comparar diversas partes de la temporada de ciclones, por ejemplo: el mes de junio *versus* el mes de septiembre.
e) Comparar la actividad ciclónica en diversas fases de fenómenos de variabilidad climática, por ejemplo: bajo condiciones de El Niño *versus* condiciones de La Niña (y/o *versus* condiciones neutras).
f) Detectar tendencias sistemáticas de largo plazo en el nivel de actividad o en la ubicación de ciclones tropicales.
g) Combinaciones diversas de (a) a (f), por ejemplo:
– Evaluar la importancia relativa sobre México del Atlántico norte *versus* el Pacífico nororiental.
– Evaluar el diferente efecto de la más frecuente recurvatura de ciclones tropicales del Pacífico nororiental en julio-agosto *versus* septiembre-octubre, aun bajo similitud en el número de ciclones tropicales.
– Evaluar las diferencias de precipitación pluvial producida por ciclones tropicales directamente sobre territorio de algún país en condiciones de El Niño *versus* condiciones de no-Niño (neutras + La Niña).

Para esta evaluación se ha usado, en forma simplista, el número de ciclones tropicales, por ejemplo, los que se presentan normalmente en el Pacífico nororiental durante agosto (4.6) *versus* los que se presentan durante septiembre (4.3) (climatología de ciclones con nombre de treinta años, 1961 a 1990, Rosengaus, 1998). Su principal limitación radica en que ignora totalmente la intensidad de dichos ciclones, la extensión de sus efectos destructivos, sus trayectorias y parcialmente también su cercanía al área de interés. Esta última limitación puede minimizarse no utilizando el número total de ciclones tropicales, sino el número con una trayectoria que pasó a menos de cierta distancia umbral de la zona de interés. Resulta difícil hacer juicios objetivos bajo la métrica de *número de ciclones tropicales*; por ejemplo:

- Al comparar agosto *versus* septiembre en el Pacífico nororiental, quedaría oculto el hecho de que la incidencia sobre territorio mexicano es mucho mayor en septiembre que en agosto, aun en caso de usar una distancia umbral relativamente pequeña (de unos 250 km; Rosengaus *et al.*, 2002).
- El paso de tres tormentas tropicales relativamente débiles sobre la península de Yucatán en cierto año aparecería como un caso de mayor actividad ciclónica que el paso de un solo huracán muy intenso en otro año, cuando la percepción sensorial de la población sería exactamente opuesta (con base en los daños ocurridos).
- Suponiendo que el área en estudio fuera la península de Yucatán y que el criterio para considerar cierto ciclón tropical fuera que pasó a 100 km o menos de ella, dos huracanes de similar intensidad calificarían igual, aun cuando uno de ellos hubiese pasado sobre el mar sin incidencia en tierra y el otro hubiese pasado directamente sobre el centro de la península.

Un grupo que frecuentemente usa índices objetivos de actividad ciclónica es el que varias veces al año emite pronósticos sobre la actividad ciclónica de la siguiente temporada en el Atlántico norte y que se encuentra ubicado en la Universidad Estatal de Colorado, bajo el liderazgo del doctor William Gray (Gray *et al.*, 2005). Además de la contabilidad directa de ciclones tropicales de diversas categorías (ciclón con nombre, huracán y huracán intenso), utilizan el número de días en los que los ciclones mantienen vientos máximos sostenidos, iguales o mayores a los que definen estas categorías a lo largo de su evolución. Estos días son contabilizados en incrementos de seis horas (NSD —*named storm day*—, HD —*hurricane day*— e IHD —*intense hurricane day*— en la fuente original). Aunque este grupo usa estos índices considerando la totalidad del área de la zona ciclogenética del Atlántico norte, no existe ningún impedimento técnico para emplearlos en una región de interés definida. Esto, en principio, permitiría utilizarlos para todas las aplicaciones que se presentaron al inicio de esta sección. Más aún, el mencionado grupo también utiliza el índice Potencial de Destrucción de Huracanes (HDP, por sus siglas en inglés), que es la suma del cuadrado de los vientos máximos sostenidos que presenta un ciclón tropical en cada uno de los instantes para los que se registran sus datos (cada seis horas), expresado en 10^4 nudos^2. También este índice objetivo puede contabilizarse para regiones de interés y por ello utilizarse para las aplicaciones mencionadas inicialmente.

Aunque conceptualmente son sencillos y de fácil aplicación, estos índices objetivos de actividad ciclónica mantienen una fuerte limitación: no consideran de ninguna manera la distribución de los efectos destructivos alrededor del centro de giro de los ciclones tropicales a los que se refieren. Esto es de especial importancia debido a que no existe una correlación fuerte entre la intensidad de un ciclón tropical, medida en términos de sus vientos máximos sostenidos, y la extensión del sistema, tentativamente medida como el área alrededor del centro de giro que se encuentra sujeta a vientos (u otros efectos) considerados como de peligro. Esto es, los ciclones tropicales intensos no son necesariamente muy amplios en su zona de peligro y los débiles no necesariamente cubren una zona muy pequeña con efectos de peligro. Esto se puede ejemplificar utilizando dos sistemas muy conocidos en la historia reciente: *Andrew*, en 1992, e *Isabel*, en 2003, ambos con plenitud de mediciones para reconstruir su campo de vientos en el instante de entrada a tierra en los Estados Unidos. En el caso de *Andrew*, un huracán muy intenso con vientos máximos sostenidos de 233 km/h, las áreas circunscritas por las isolíneas de 34, 50 y 64 nudos fueron de 66,210, 23,315 y 7,868 km^2, respectivamente. Esto hace de *Andrew* un sistema extraordinariamente compacto. En el caso de *Isabel*, también un huracán intenso, pero con vientos máximos sostenidos significativamente menores, de unos 170 km/h, las áreas circunscritas por las isolíneas de 34, 50 y 64 nudos fueron mucho mayores, de 418,640, 135,944 y 41,815 km^2, respectivamente. Esto muestra claramente que, en el contexto de ciclones tropicales, *intenso* no es sinónimo de *grande* y *débil* no es sinónimo de *pequeño*. Estas áreas las obtuvo el autor de las reconstrucciones del campo de vientos ubicadas en la página www del HRD, AOML, NOAA (2005).

El propósito del presente trabajo es proponer un índice de actividad ciclónica que no padezca de estas limitaciones y que al mismo tiempo sea razonablemente fácil de aplicar, así como de ejemplificar su uso, caracterizando cinco temporadas de ciclones tropicales del Atlántico norte y del Pacífico nororiental, desde 2000 hasta 2004, con un estudio más detallado de su afectación específica sobre México.

Características deseables en un índice de actividad ciclónica

Una serie de características deseables en un índice de actividad ciclónica sería:

a) Que sea completamente objetivo, es decir, que todo usuario potencial llegue a los mismos resultados al calcularlo.
b) Que tenga una interpretación física clara.

c) Que permita no solamente la caracterización de la actividad en una zona ciclógenética completa, sino que lo haga además en subregiones arbitrarias de interés (por ejemplo: zonas de tránsito marítimo, países, estados, cuencas, etcétera).
d) Que permita no solamente la caracterización de la actividad durante una temporada completa, sino también en subintervalos de dicha temporada (por ejemplo: por mes).
e) Que permita hacer aritmética (sumar subregiones o subintervalos, sacar promedios, etcétera) sin perder su sentido físico.
f) Que tome en cuenta la trayectoria de los ciclones tropicales (*versus* un simple contador).
g) Que tome en cuenta la intensidad de los ciclones tropicales.
h) Que tome en cuenta el tamaño de los ciclones tropicales.
i) Que facilite la comparación contra condiciones climatológicas de actividad ciclónica.
j) Que sea relativamente fácil de aplicar, incluyendo el fácil acceso a los datos necesarios para calcularlo.
k) Que se refiera al fenómeno físico en sí y no a una combinación inseparable con la vulnerabilidad de las zonas sobre las que los ciclones tropicales pasan.

El índice de actividad ciclónica propuesto

El *índice de actividad ciclónica* propuesto —al que de aquí en adelante se denominará IAC, con algún subíndice cuando resulte necesario— tiene una definición sencilla:

IAC = área en km^2 bajo condiciones de viento de tormenta tropical o mayor más tres veces el área en km^2 bajo condiciones de vientos de huracán.

Cuando se trate de la trayectoria completa de un ciclón tropical, el IAC se obtiene de calcular el área total de las envolventes de vientos de tormenta tropical y de huracán. Dichas envolventes aparecen en forma gráfica en diversas fuentes de internet en tiempo prácticamente real. Las envolventes se refieren a la máxima categoría de viento que se alcanzó en cada sitio al paso de un ciclón tropical. Para este trabajo se emplearon las de la fuente original para ciclones tropicales de interés para México, el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos, que funge también como Centro Meteorológico Regional Especializado de la Organización Meteorológica Mundial en esta parte del planeta (NHC, 2005). Esta fuente presenta también gráficas de las envolventes para ciclones tropicales históricos desde 2000 hasta la actualidad. Más adelante se presentarán múltiples ejemplos de estas envolventes. Los archivos históricos de boletines presentan también las estimaciones de radios a vientos de 34 y 64 nudos en la situación instantánea cada seis horas, que permitirían reconstruir las envolventes de la evolución completa de cada ciclón tropical.

De inmediato brota el cuestionamiento: ¿por qué el factor de tres para la envolvente de vientos de huracán, en comparación con la envolvente de vientos de tormenta tropical o mayor? El rango de vientos de tormenta tropical es de 34 nudos (63 km/h) a 64 nudos (119 km/h), mientras que el rango de vientos de huracán es de 64 nudos (119 km/h) a unos 175 nudos (325 km/h) (esto en la práctica, pues no existe un límite superior real). En forma aproximada, los huracanes mínimo/medio/máximo tienen velocidades de viento del doble de aquéllas de la tormenta tropical mínima/media/máxima. Dado que los efectos destructivos se consideran aproximadamente proporcionales al cuadrado de la velocidad del viento (Gray *et al.*, 2005; CFE, 1993), la zona de vientos de huracán está sujeta a daños al menos cuatro veces mayores que la zona de vientos de tormenta tropical. Sin embargo, la zona de vientos de huracán es necesariamente un subconjunto de la zona de vientos de tormenta tropical o mayores, por lo que uno de los cuatro tantos ya ha sido considerado dentro del área circunscrita a vientos de tormenta tropical o mayores. Resta, pues, aplicar tres tantos más de peso al área afectada por vientos de huracán. De esta forma, al área sujeta a vientos de huracán se le confiere un peso total de cuatro tantos del peso de las áreas sujetas a vientos de tormenta tropical. Es necesario enfatizar que en términos de daños materiales, las zonas de huracán resultan con daños muy superiores a cuatro veces los de las zonas con vientos de tormenta tropical, pero esto no se debe a la intensidad del efecto destructivo, sino a la vulnerabilidad de las obras a dichos efectos (que en general presentan condiciones que sobreviven vientos de tormenta tropical, pero no de huracán). Es entonces cuando se hace más necesaria la característica (de un IAC) con inciso (j): fácil de aplicar y con datos disponibles. Los mapas de isotacas envolventes con mejor definición que los que marcan únicamente las zonas de vientos de tormenta tropical y de huracán usualmente no se encuentran disponibles. Más aún, las áreas sujetas a vientos mucho más intensos que el umbral de 119 km/h son relativamente pequeñas y los daños reales ocurridos en ellas dependen de que dichos vientos se hayan presentado o no sobre una zona vulnerable (por ejemplo, una zona densamente urbanizada). Más aún, algunos de los efectos destructivos de un ciclón tropical —como la lluvia, el oleaje y la marea de tormenta— no presentan una concentración tan alta de

peligrosidad en las inmediaciones del borde del ojo del ciclón como sí lo hace el campo de vientos.

En general, la isotaca de 34 nudos muestra una buena correlación con el límite de la zona sujeta a oleaje mayor o igual a unos cuatro metros, lo que puede observarse en los boletines del NHC (los del tipo denominado *forecast/advisory*) (2005) en su página www, tanto los de tiempo real como los muy numerosos boletines en archivos históricos. Las únicas desviaciones claras en los radios a la isotaca de 34 nudos y a la línea de alturas de ola de 12 pies se encuentra asociada a limitaciones de la longitud de la zona de generación por presencia de masas continentales. En el caso de la marea de tormenta, existe una fuerte asimetría entre los lados derecho e izquierdo de un ciclón tropical que incide sobre tierra, mucho mayor a la asimetría que la zona de vientos mayores o iguales a 34 nudos tiene con respecto a la trayectoria del centro de giro. En general, las zonas de peligro significativo por invasión de aguas marinas también se encuentran dentro de la zona de vientos de 34 nudos o más del lado derecho del sistema (para ciclones en el hemisferio norte). Esto se confirma con tormentas no ciclónicas como los llamados "nortes" en el golfo de México, que se caracterizan por vientos de este orden de magnitud y que no producen marea de tormenta que resulte destructiva en términos prácticos.

Resulta más difícil demostrar la correlación entre la zona de vientos mayores o iguales a 34 nudos, y las zonas de precipitación pluvial significativa, no sólo por lo caótico que resulta el campo de esta variable alrededor del centro de giro del sistema, sino por su gran sensibilidad a la topografía local. Por otro lado, no es común encontrar en la literatura científica formal, análisis simultáneos del campo de vientos y del campo de precipitación pluvial. A pesar de ello, es claro que en el acumulado total de precipitación sí existe una franja de mayores lluvias alrededor de la trayectoria, seguida por el centro de giro del ciclón (Rosengaus, 1998, sección VII.1.2). En zonas de topografía plana sí se puede identificar cierta correlación en las zonas cubiertas por láminas de lluvias significativas y por vientos iguales o mayores a 34 nudos. Por ejemplo, en el análisis de Rosengaus y Sánchez-Sesma (1990) para el huracán *Gilbert* de 1988, la zona de vientos iguales o mayores a 34 nudos tenía una alta coincidencia con las zonas sujetas a precipitación pluvial total de más de 100-200 mm sobre la península de Yucatán y de más de 100-150 mm en la planicie costera de Tamaulipas. Otro ejemplo bien estudiado, aunque documentado en forma dispersa en diversas fuentes en internet, es el del huracán *Floyd*, en la zona de planicie adjunta a la costa este de los Estados Unidos. La comparación de los mapas de precipitación acumulada total (medida con radar) arroja una alta coincidencia de las envolventes de lámina de lluvia igual o mayor a 75-125 mm y de vientos iguales o mayores a 34 nudos. Inclusive en forma instantánea, las espirales de actividad convectiva con núcleos de reflectividad mayor o igual a unos 30-35 dBZ (indicadores de lluvias intensas) coinciden muy bien con las zonas internas a la isotaca de 34 nudos para varios instantes y varios radares sobre la costa este de los Estados Unidos. Esto no es sorprendente si consideramos que la convergencia de aire cálido y húmedo (prácticamente saturado) en la parte baja de la atmósfera debido al campo de vientos es precisamente el mecanismo de producción de las innumerables tormentas convectivas severas que se encuentran embebidas en un ciclón tropical. Esta correlación se reduce en zonas montañosas, pero incluso en estos casos sobrevive alguna coincidencia, como lo muestra el análisis de precipitación pluvial en Farfán (2004) para el ciclón *Juliette* de 2001 sobre la península de Baja California. En este caso, a pesar de la barrera montañosa a lo largo de la misma, la isotaca envolvente de 34 nudos coincide aproximadamente con la isoyeta acumulada de unos 100 mm. En este sentido, así como la vulnerabilidad no es un factor que el IAC pretenda caracterizar, la magnificación o el bloqueo de flujos de humedad debidos a la orografía deben ser considerados como factores modificadores de los peligros que representa un ciclón tropical.

¿Cuán bien cumple este IAC con la lista de características deseables previamente presentada? En general cumple bien con todas; esto será más claro al presentar la caracterización de las temporadas 2000 a 2004, pues servirá como ejemplo de su aplicación. Dos de esas características merecen una discusión adicional. La característica (a) de ser *objetivo* puede quedar en duda por la dificultad de estimar sin mediciones muy detalladas la verdadera extensión de estas envolventes en altamar. En el Atlántico norte, sobre todo en las últimas décadas, se tienen mediciones directas relativamente frecuentes de los campos de viento, realizadas por los llamados *aviones cazahuracanes*. En el resto de las zonas ciclogénetic as del mundo no sucede así, incluyendo al Pacífico nororiental, de gran importancia para México. En esos casos se confía en el largo historial de seguimiento de ciclones tropicales del NHC y su verificación (operativa y en análisis *a posteriori*) con todas las fuentes de datos confiables y disponibles. En términos estadísticos, las estimaciones de las envolventes del NHC en el Pacífico nororiental deben estar relativamente libres de sesgo o error sistemático. En casos individuales, no se puede descartar la presencia de errores importantes, por lo que se debe ser cauteloso, especialmente al utilizar el IAC

entre dos zonas ciclogenéticas diferentes, como el Atlántico norte y el Pacífico nororiental. De todas formas, se trata de la mejor estimación de la extensión real de las envolventes de viento que se encuentra ampliamente disponible. La característica (i) también puede ponerse en duda, ya que los mapas de envolventes disponibles directamente sólo cubren de 2000 en adelante, lo que ciertamente resulta inadecuado para establecer valores climatológicos. Sin embargo, la ingestión de los boletines históricos en *software* especializado como *HURREVAC* (*Island Software*, 2005) permite la obtención gráfica de estas envolventes para antigüedades mayores (lo que no se ha realizado en este trabajo). Evidentemente, la incertidumbre sobre los datos originales que permiten esta reconstrucción aumenta conforme se retrocede en el tiempo.

Dada la definición del IAC, es evidente que su cálculo se facilita mucho con herramienta que permita digitalizar y calcular las áreas de las envolventes de viento necesarias, pero hoy en día estas capacidades existen en prácticamente todos los sistemas de información geográfica. Inclusive las intersecciones entre regiones, útiles para aplicar el IAC a regiones de interés específicas, se encuentran ampliamente disponibles. En el caso específico de este trabajo, se utilizó el paquete *Didger* de *Golden Software* (2001).

Resulta importante puntualizar algunos conceptos adicionales:

a) Las envolventes mencionadas pueden no ser regiones conexas, es decir, pueden existir áreas no conectadas geométricamente entre sí que corresponden al mismo ciclón tropical. Esto ocurre cuando el sistema se debilita y deja de presentar vientos por arriba del umbral de la envolvente de que se trate durante una parte de su trayectoria. Esto puede producir algunos problemas en la interpretación de los mapas con las envolventes de viento, pero no produce ninguna dificultad en el cálculo del IAC al tratar cada región no conexa como una región independiente.
b) Las áreas que quedan bajo las envolventes de dos o más ciclones tropicales diferentes son contabilizadas en forma separada para cada uno de ellos. En forma más estricta, el IAC se calcula con la suma de las envolventes, no con la unión de las mismas. Esto va de acuerdo con la realidad de que una misma zona afectada en una misma temporada por dos ciclones tropicales sufrirá las consecuencias de cada uno de ellos en forma independiente y como tal serán contabilizadas.
c) La definición del IAC sugiere que los ciclones tropicales más débiles que una tormenta tropical (es decir, depresiones tropicales con vientos máximos sostenidos menores a 34 nudos) no producen consecuencias, pues no aportan nada a la contabilidad del IAC. Aunque esto no es estrictamente cierto, los efectos de una depresión tropical son frecuentemente menos significativos que los de muchos otros fenómenos meteorológicos frecuentes, como complejos convectivos de mesoescala, tormentas convectivas aisladas, ondas tropicales, frentes fríos, lluvias orográficas, etcétera. En muchas ocasiones, la población costera no percibe una depresión tropical como un fenómeno especial, a menos que sea notificada por las autoridades o los medios de comunicación.

Caracterización de las temporadas 2000 a 2004

En cada uno de los paneles de la ilustración 1 se presentan las envolventes de vientos de tormenta tropical o mayores (como zonas con diferentes tipos de ashurado) y las envolventes de vientos de huracán (como zonas de tono gris sólido) para cada una de las temporadas 2000 a 2004 de la zona ciclogenética del Atlántico norte. El recorte de los mapas ha dejado, ocasionalmente, alguna parte de las envolventes de viento fuera del mismo, pero los IAC calculados sí incluyen la totalidad de las mismas. Estos mapas permiten una comparación objetiva entre las diversas temporadas. En cada uno de los paneles se anota además la suma de las áreas sujetas a vientos de tormenta tropical o mayor, la suma de las áreas sujetas a vientos de huracán y el IAC calculado. Como referencia adicional, se presentan los nombres de los ciclones tropicales cuyas envolventes son graficadas, identificándolos como huracán (H) o tormenta tropical (TT), de acuerdo con la categoría máxima que hayan alcanzado en su desarrollo completo. Se incluyen además los índices que utiliza el grupo de la universidad estatal de Colorado para caracterizar las diversas temporadas: número de ciclones con nombre (NS), número de días con ciclón tropical con nombre (NSD), número de huracanes (H), número de días de huracán (HD), número de huracanes intensos (IH), número de días con huracán intenso (IHD), potencial de destrucción (HDP) y la actividad neta de ciclones tropicales (NTC), todos ellos identificados por sus siglas en inglés de acuerdo con Gray *et al.* (2004). El NTC es un simple promedio aritmético de NS, NSD, H, HD, IH y IHD, pero normalizado con respecto a sus valores climatológicos y expresado en porcentaje. De hecho, en paréntesis, después de cada uno de estos índices, se presenta una comparación con sus valores climatológicos. Obviamente el valor climatológico de NTC es 100%.

Es importante notar que el IAC sí muestra sensibilidad a las diferencias de actividad entre una temporada

Ilustración 1. Análisis de actividad ciclónica 2000-2004 en el Atlántico norte.

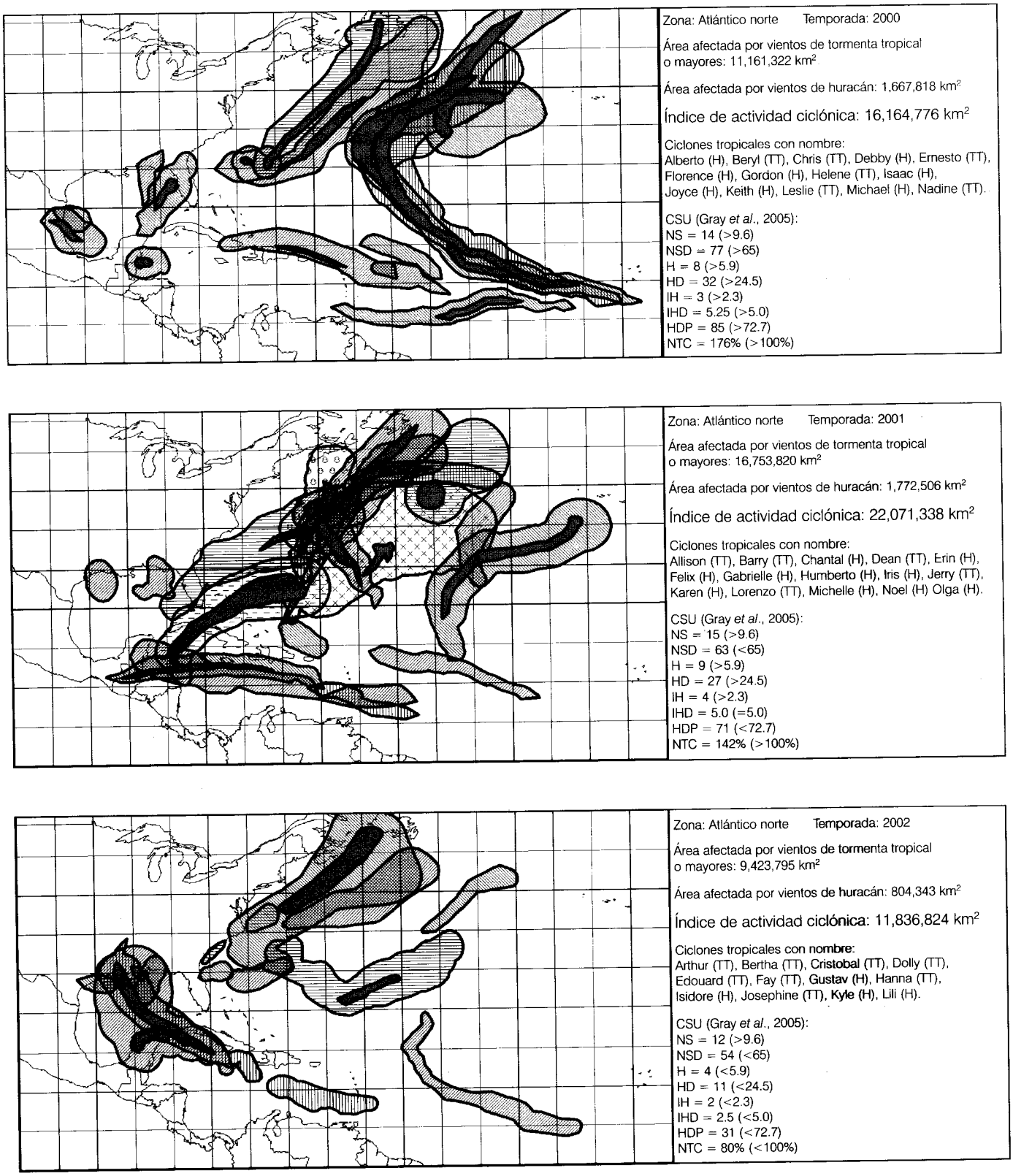
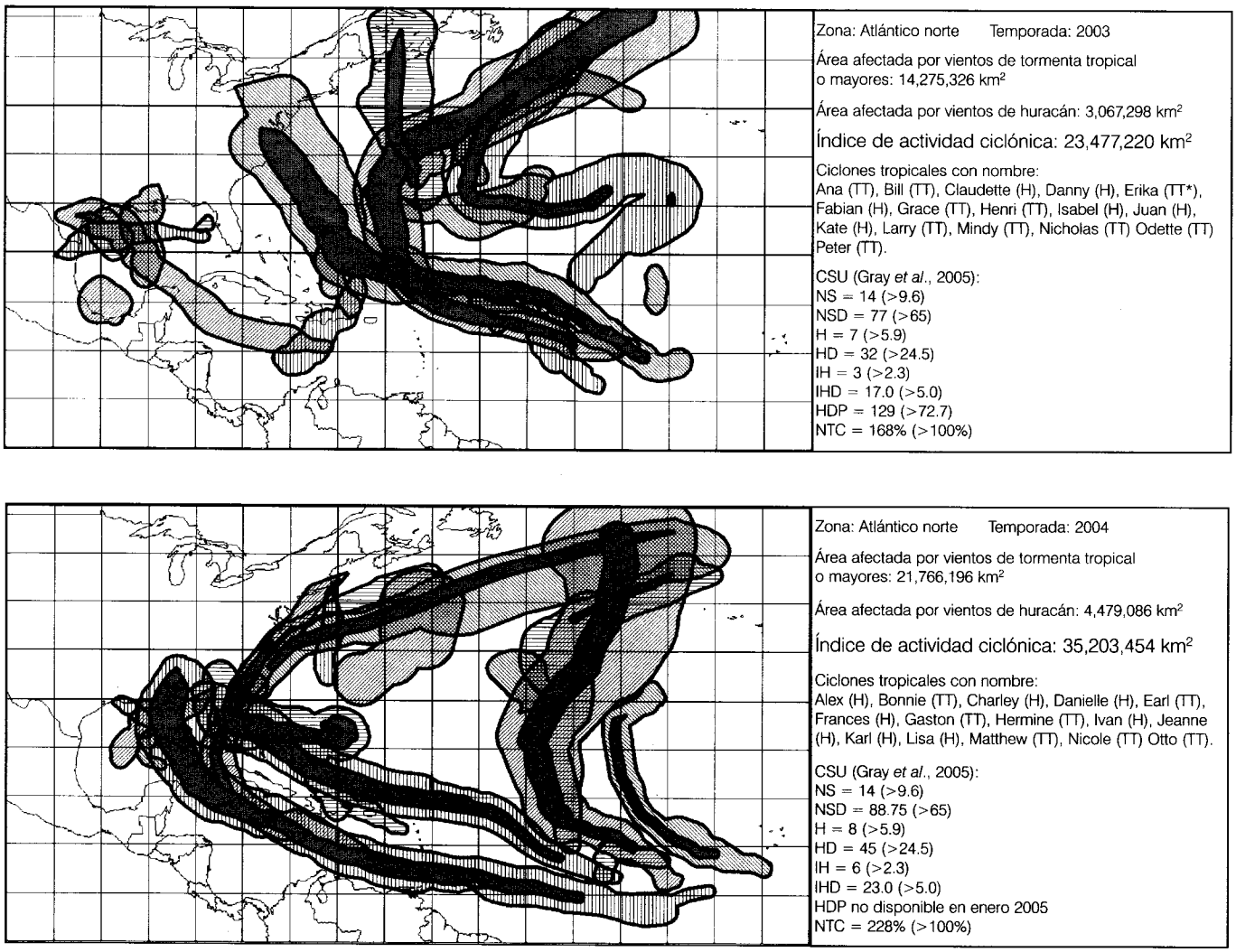


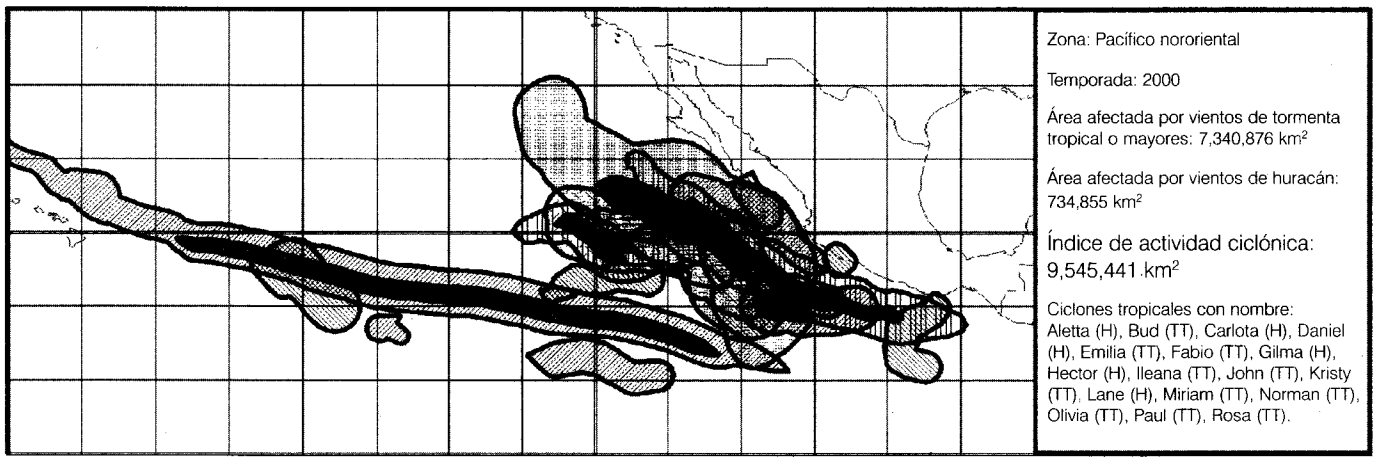
Ilustración 1. Análisis de actividad ciclónica 2000-2004 en el Atlántico norte (continuación).



y otra, pues para la temporada más activa (2004) adquiere un valor 3.0 veces el de la temporada más inactiva (2002) de entre las cinco consideradas. Este contraste resulta similar al que a su vez presenta el NTC. El ordenamiento de mayor actividad a menor actividad por temporadas resulta: 2004, 2003, 2001, 2000 y 2002. No se cuenta con valor climatológico para el IAC por no haber procesado suficientes temporadas históricas, pero en principio éste es obtenible. Por otro lado, al observar la ilustración 1, resulta evidente que el valor numérico del IAC para toda la zona de ciclogénesis es absolutamente insuficiente para caracterizar adecuadamente ciertos aspectos de la temporada. Por ejemplo, las temporadas 2000, 2002 y 2004 muestran una notable ausencia de ciclones en la parte central del dominio, mientras que 2001 y 2003 muestran una especial concentración en esta región, esto sin ninguna correlación al IAC total. En este aspecto es precisamente donde el IAC que se propone tiene sus mayores ventajas sobre otros índices, asunto que se tratará en detalle más adelante.

En la ilustración 2 se muestran las gráficas equivalentes, pero ahora para la zona del Pacífico nororiental. En los recuadros de texto a la derecha de los diagramas se coloca la misma información que para el caso del Atlántico norte, excepto por los índices del grupo de la universidad estatal de Colorado, ya que dicho grupo no ha incursionado aún en esta zona de ciclogénesis. De inmediato resalta el hecho de que el IAC para el Atlántico norte es significativamente más alto que para el Pacífico nororiental, del orden de tres veces mayor. También se observa una mucho menor variabilidad interanual que en el caso del Atlántico norte, ya que el año más activo

Ilustración 2. Análisis de actividad ciclónica 2000-2004 en el Pacífico nororiental.



Zona: Pacífico nororiental

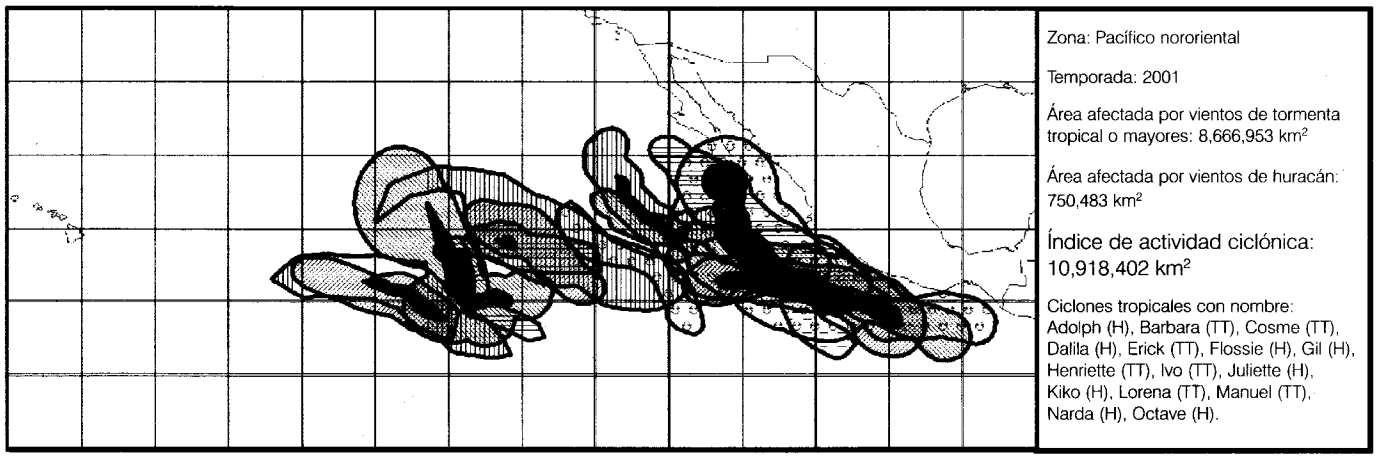
Temporada: 2000

Área afectada por vientos de tormenta tropical o mayores: 7,340,876 km^2

Área afectada por vientos de huracán: 734,855 km^2

Índice de actividad ciclónica: 9,545,441 km^2

Ciclones tropicales con nombre: Aletta (H), Bud (TT), Carlota (H), Daniel (H), Emilia (TT), Fabio (TT), Gilma (H), Hector (H), Ileana (TT), John (TT), Kristy (TT), Lane (H), Miriam (TT), Norman (TT), Olivia (TT), Paul (TT), Rosa (TT).



Zona: Pacífico nororiental

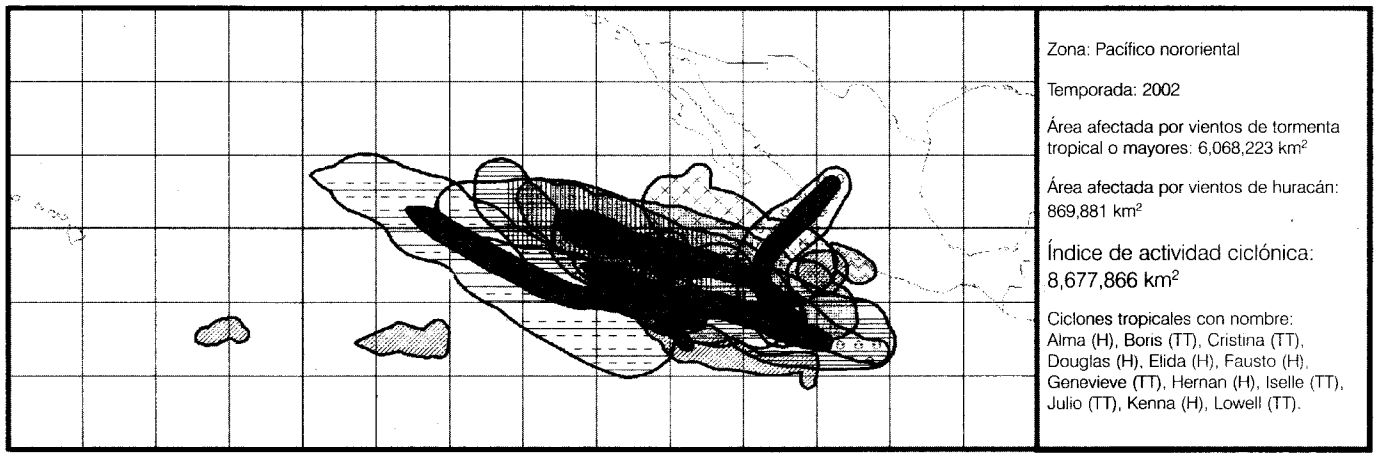
Temporada: 2001

Área afectada por vientos de tormenta tropical o mayores: 8,666,953 km^2

Área afectada por vientos de huracán: 750,483 km^2

Índice de actividad ciclónica: 10,918,402 km^2

Ciclones tropicales con nombre: Adolph (H), Barbara (TT), Cosme (TT), Dalila (H), Erick (TT), Flossie (H), Gil (H), Henriette (TT), Ivo (TT), Juliette (H), Kiko (H), Lorena (TT), Manuel (TT), Narda (H), Octave (H).



Zona: Pacífico nororiental

Temporada: 2002

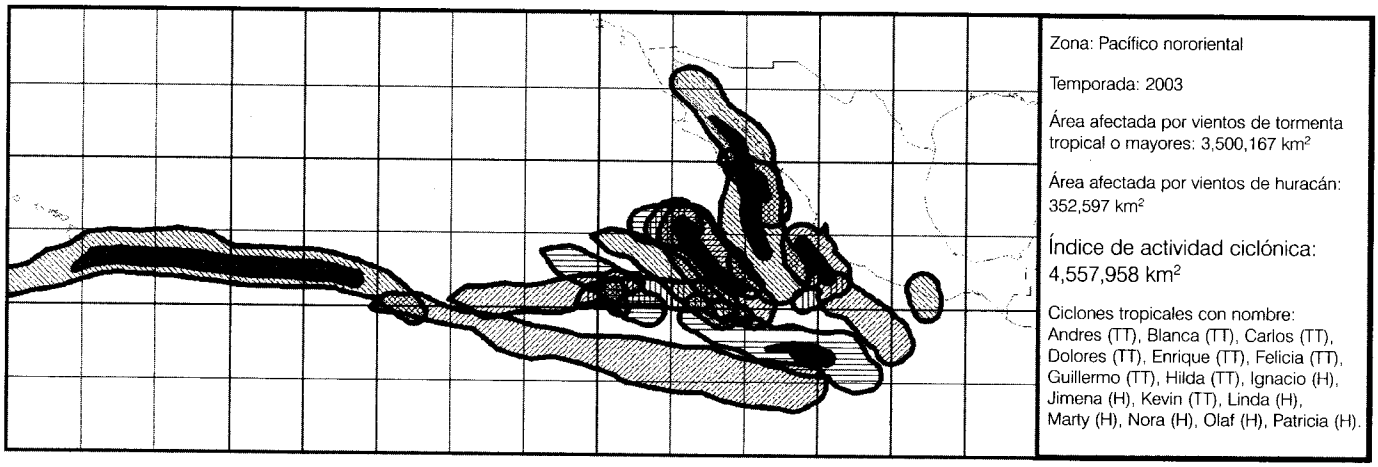
Área afectada por vientos de tormenta tropical o mayores: 6,068,223 km^2

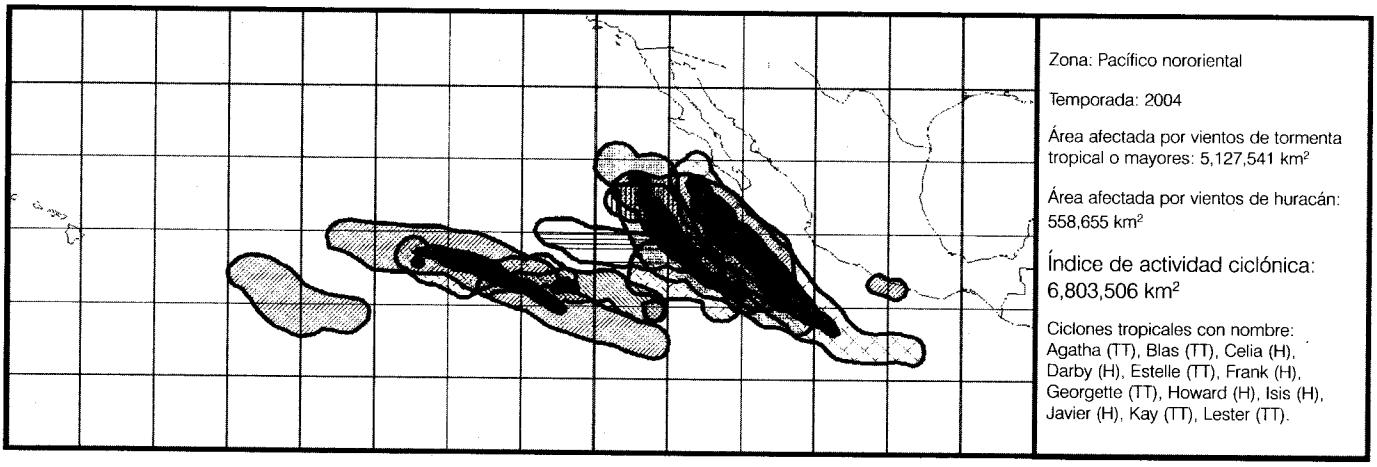
Área afectada por vientos de huracán: 869,881 km^2

Índice de actividad ciclónica: 8,677,866 km^2

Ciclones tropicales con nombre: Alma (H), Boris (TT), Cristina (TT), Douglas (H), Elida (H), Fausto (H), Genevieve (TT), Hernan (H), Iselle (TT), Julio (TT), Kenna (H), Lowell (TT).

Ilustración 2. Análisis de actividad ciclónica 2000-2004 en el Pacífico nororiental (continuación).





(2001) presenta un IAC de tan sólo 2.4 veces que el del año más inactivo (2003). En este caso, el ordenamiento de las temporadas de mayor a menor actividad es 2001, 2000, 2002, 2004 y 2003, lo que muestra una cierta independencia entre los niveles de actividad ciclónica entre el Atlántico norte y el Pacífico nororiental.

Naturalmente, la muy conocida concentración de ciclones tropicales al sur de la península de California (Rosengaus *et al.*, 2002) es evidente en todas las temporadas presentadas en la ilustración 2.

Aplicación del IAC a subregiones

Entre las características deseables para un índice de actividad ciclónica ya mencionadas se encuentra el de poder ser aplicado a subregiones arbitrarias (inciso c), ya que esto permite evaluar los efectos de los ciclones tropicales en cierta región de interés, por ejemplo, un país.

En el caso del IAC propuesto, su aplicación a subregiones arbitrarias resulta sumamente sencilla. Una vez definido un contorno de la subregión de interés, se procede a obtener la intersección de las envolventes de vientos de tormenta tropical y de huracán con dicha subregión de interés. Esta operación de intersección entre dos poligonales irregulares existe en múltiples herramientas computacionales. En este trabajo se utilizó *Didger* de *Golden Software* (2001). El IAC aplicable a la subregión será el calculado con las áreas de dichas intersecciones (en km^2), aplicando el factor de tres en el caso del área sujeta a vientos de huracán. Como ejemplo de aplicación, en este trabajo se calculan los índices para cada una de las cinco temporadas, para cada una de las dos zonas ciclógenas en el caso específico de México, utilizando como contorno el litoral y fronteras del país (sin considerar islas). A este índice se le denomina $IAC_{MÉX}$. Su interpretación es exactamente igual a la del IAC, que

corresponde a la totalidad de la zona ciclogenética, pero aplicado exclusivamente a la actividad sobre México continental. Dado que la afectación a un país no se debe exclusivamente a zonas de vientos significativos sobre su territorio continental, sino también sobre sus aguas territoriales o económicamente exclusivas, o sobre las zonas vecinas más allá de sus fronteras, también se calculó el índice para una vecindad alrededor del contorno exacto de México. Se consideraron vecindades de 100, 300 y 500 km alrededor del contorno, cada una de ellas aplicables a diferentes usos (por ejemplo, pesca ribereña *versus* transporte marítimo en alta mar). A estos índices se les denomina IAC_{100}, IAC_{300} e IAC_{500}.

Actividad ciclónica 2000-2004 sobre México

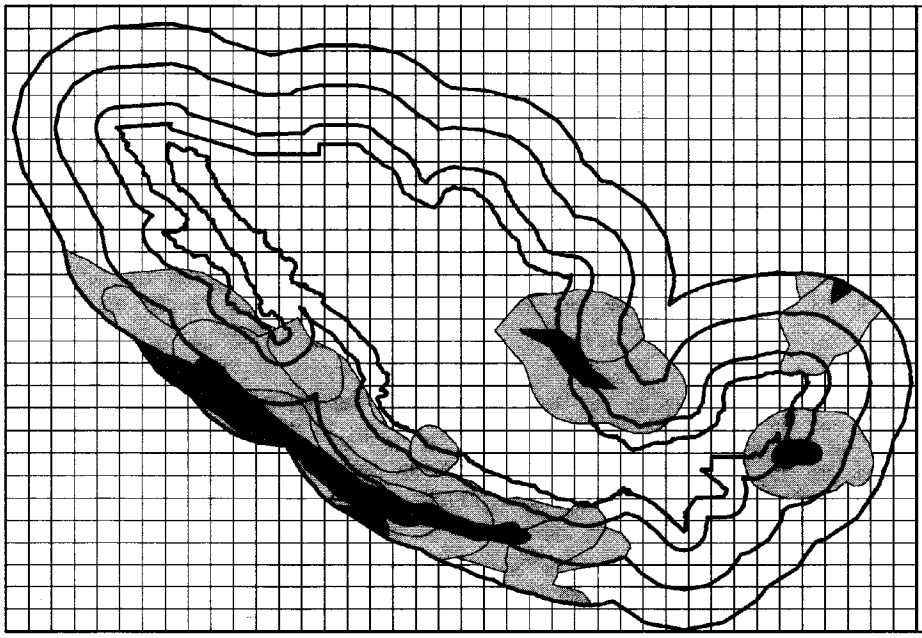
En las ilustraciones 3 a 7 se presentan en forma gráfica y tabular los resultados de aplicar el concepto del IAC al contorno exacto de México y a sus vecindades de 100, 300 y 500 km.

Cada diagrama incluye la afectación tanto del Atlántico norte (AN) como del Pacífico nororiental (PNO) y los cuatro contornos de interés. Obviamente los cálculos se hicieron con los recortes de las envolventes de viento para cada uno de los cuatro contornos mostrados, aunque en las figuras solamente es evidente el recorte del contorno más externo, el de 500 km alrededor del México continental. La rejilla rectangular es la de longitud-latitud con intervalo de 1° x 1°. En este caso, las envolventes de viento de tormenta tropical son las gris claro y las envolventes de huracán son las gris obscuro. En la parte tabular, a la derecha de cada IAC y entre paréntesis, se presenta la fracción de la actividad ciclónica total de la zona que corresponde a cada contorno expresado como porcentaje.

De inmediato destacan, ahora soportadas por un índice objetivo, algunas peculiaridades. Mientras la actividad ciclónica total es mucho mayor en el Atlántico norte que en el Pacífico nororiental (2.68 veces para las cinco temporadas consideradas), en la vecindad de México —es decir, en los 500 km alrededor— la actividad del Pacífico nororiental es mucho mayor que en el Atlántico norte (1.98 veces para las cinco temporadas consideradas). Para México, la zona del Pacífico nororiental resuta más importante que la del Atlántico norte; esto debido a la conocida concentración de la actividad ciclónica relativamente cerca de las costas mexicanas. Al considerar el contorno exacto del México continental (afectación directa), ambas zonas resultaron afectar en forma prácticamente igual al territorio nacional en el total de estas cinco temporadas.

Mientras que la temporada más activa del Atlántico norte completo resultó por mucho 2004, al considerar la actividad dentro del México continental e inclusive su vecindad de 100 km, 2004 resulta la temporada de menor actividad en los cinco años considerados. Inclusive en la vecindad de 300 km, 2004 resultó la segunda menos activa. Esto muestra claramente que índices de ac-

Ilustración 3. Análisis de actividad ciclónica sobre México y su vecindad en 2000.



Temporada: 2000

Atlántico norte

IAC	=	16,164,776 km²	(100.00%)
$IAC_{MÉX}$	=	211,239 km²	(1.31%)
IAC_{100}	=	484,537 km²	(3.00%)
IAC_{300}	=	904,580 km²	(5.60%)
IAC_{500}	=	1,087,996 km²	(6.73%)

Pacífico nororiental

IAC	=	9,545,441 km²	(100.00%)
$IAC_{MÉX}$	=	36,548 km²	(0.38%)
IAC_{100}	=	255,794 km²	(2.68%)
IAC_{300}	=	1,356,804 km²	(14.21%)
IAC_{500}	=	3,585,648 km²	(37.56%)

Atlántico norte+Pacífico nororiental

IAC	=	25,710,217 km²	(100.00%)
$IAC_{MÉX}$	=	247,787 km²	(0.96%)
IAC_{100}	=	740,331 km²	(2.88%)
IAC_{300}	=	2,261,384 km²	(8.80%)
IAC_{500}	=	4,673,644 km²	(18.18%)

Ilustración 4. Análisis de actividad ciclónica sobre México y su vecindad en 2001.

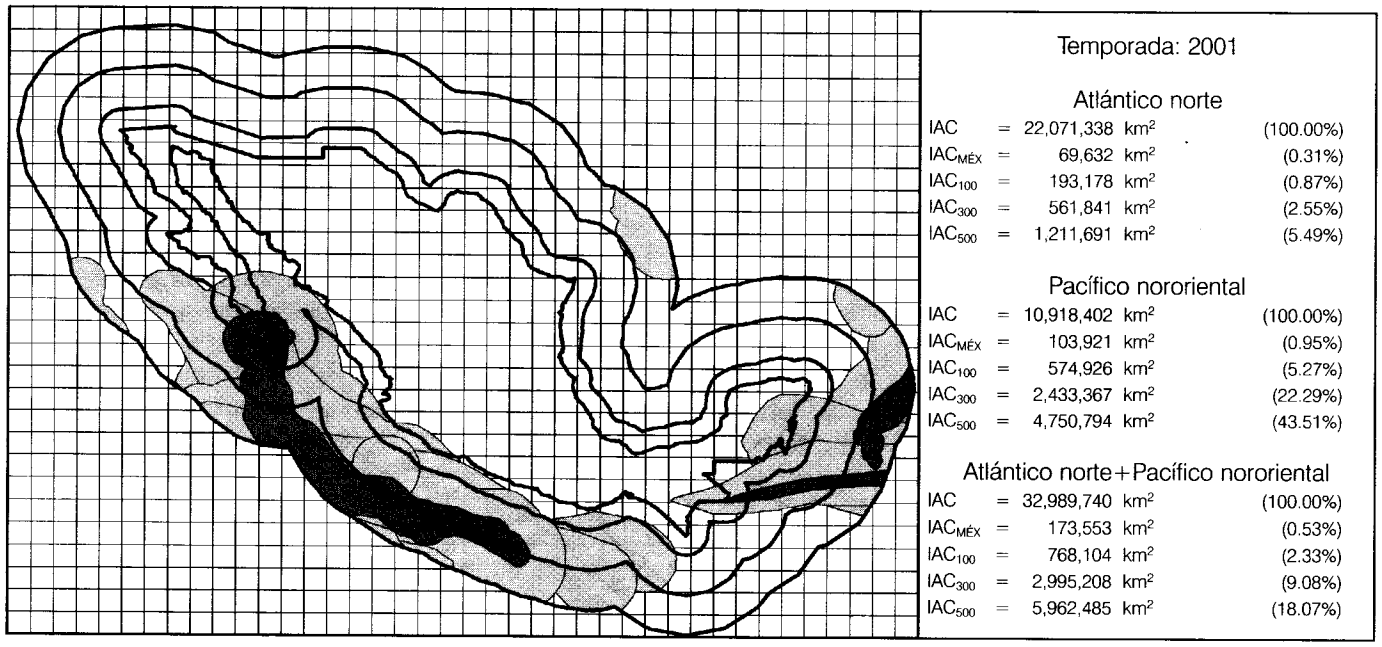
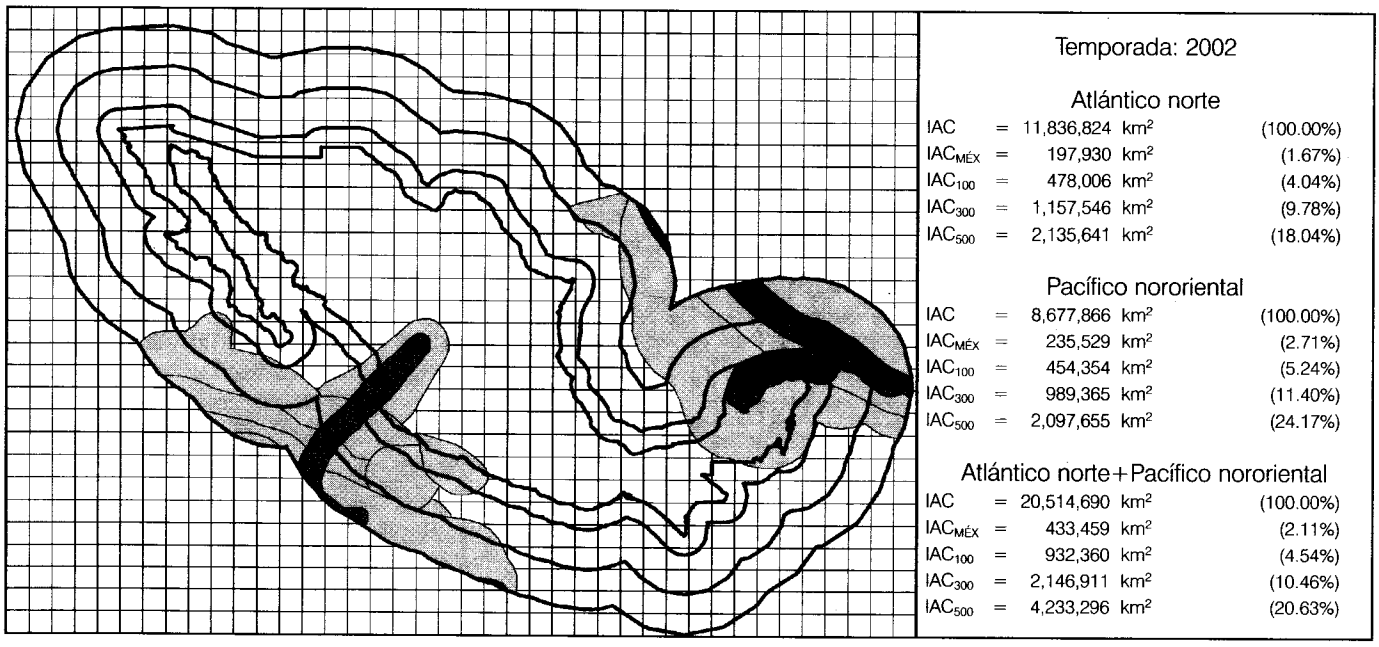


Ilustración 5. Análisis de actividad ciclónica sobre México y su vecindad en 2002.



tividad ciclónica que no puedan ser fácilmente aplicados en forma local están sujetos a producir una percepción equivocada de la realidad en sus usuarios. Algo similar ocurrió en el Pacífico nororiental, en donde la jerarquización de las temporadas de mayor a menor actividad resulta muy distinta al considerar la zona ciclogenética completa (2001, 2000, 2002, 2004, 2003), si se le compara con el territorio continental de México exclusivamente (2002, 2003, 2001, 2000, 2004).

Otro concepto interesante que resalta el IAC propuesto es la fracción de la actividad ciclónica total en cada zona ciclogenética que afecta a México en cada

Ilustración 6. Análisis de actividad ciclónica sobre México y su vecindad en 2003.

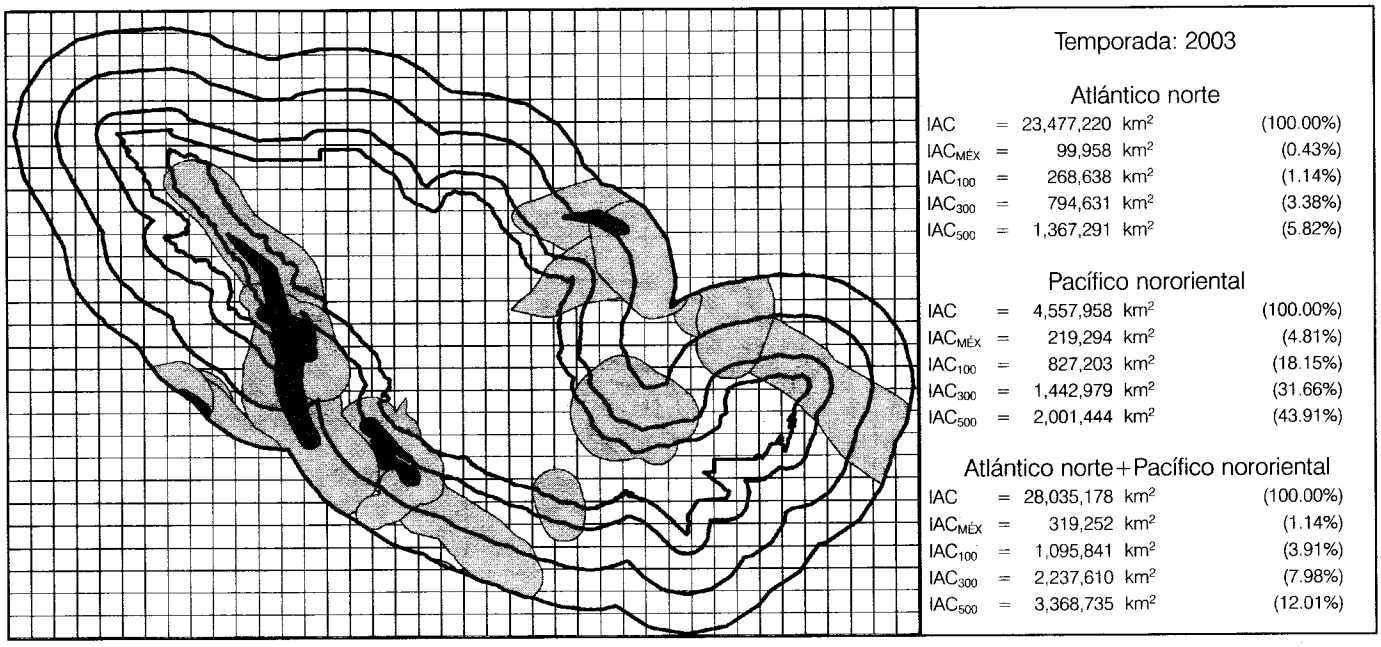
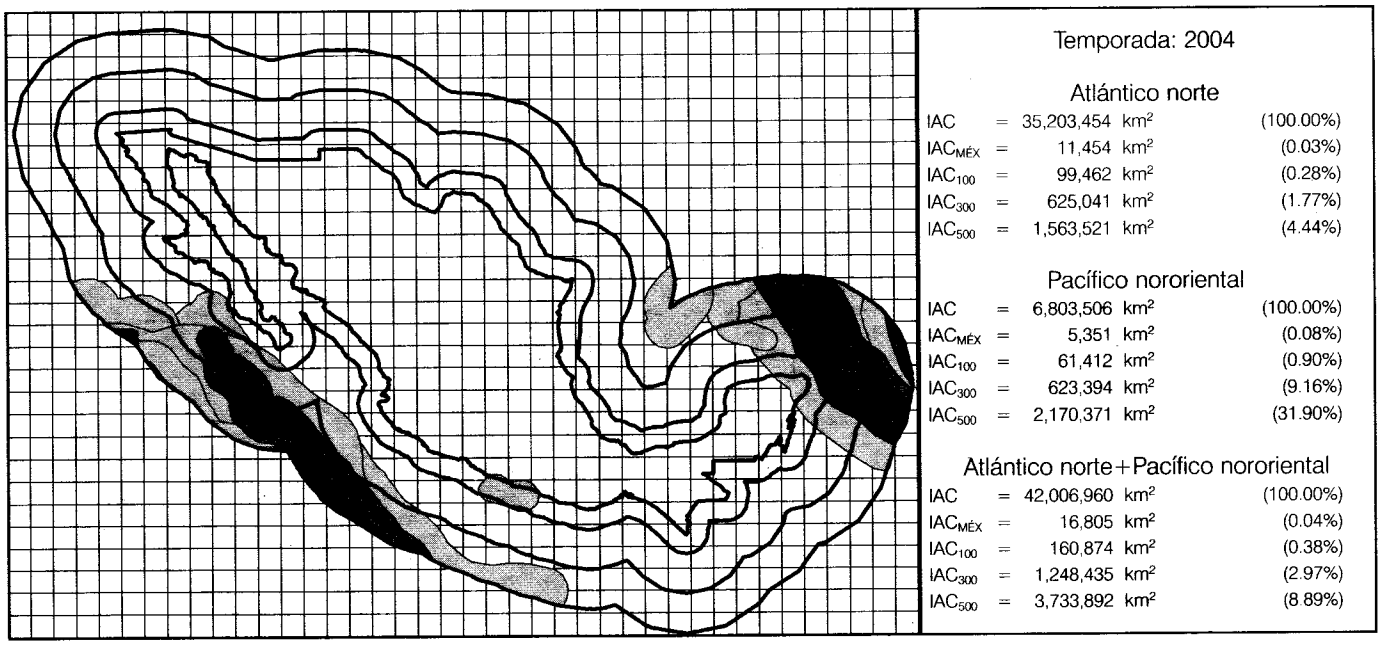


Ilustración 7. Análisis de actividad ciclónica sobre México y su vecindad en 2004.



temporada. Naturalmente, las fracciones que corresponden al Pacífico nororiental son mucho mayores que las fracciones correspondientes en el Atlántico norte, pero en cualquiera de los dos casos las fracciones no son nada despreciables. Al considerar ambas zonas en conjunto, la fracción de la actividad ciclónica total que afectó a México en las cinco temporadas consideradas es de 0.95 ± 0.77% para el contorno de territorio continental, 2.64 ± 1.51% para la vecindad de 100 km, 7.85 ± 2.87% para la vecindad de 300 km y 15.55 ± 4.90% para la de

500 km. La frecuente aseveración de *que México es uno de los países del mundo con mayor afectación por ciclones tropicales* está fundamentada en estas significativas fracciones de la actividad total en el hemisferio americano del planeta.

De hecho, estos rangos de fracción de la actividad total, en conjunto con los pronósticos de nivel de actividad ciclónica de la siguiente temporada, pueden servir como indicadores para planificación económica en cuanto a daños totales esperados, mismos que pudieran ser considerados en la distribución presupuestal del país. Por supuesto que se trataría solamente de una aproximación debido a la fuerte sensibilidad que el valor total de daños tiene a la vulnerabilidad de las zonas que efectivamente sean afectadas (vulnerabilidad que por diseño no está considerada en el IAC).

Perspectivas

Las posibles aplicaciones del IAC van más allá de lo mostrado explícitamente en este trabajo. Por ejemplo, sería directa la comparación de afectación ciclónica en una cierta temporada entre dos países distintos, por ejemplo: Cuba y México. Sin embargo, las diferencias entre estas dos naciones, en cuanto a extensión territorial, población total y producto nacional bruto, podrían hacer que dicha comparación absoluta no fuera la mejor posible. Sin embargo, la aplicación local del IAC no se limita a su valor absoluto, puede ser aplicado en forma relativa; por ejemplo, el $IAC_{MÉX}$ por kilómetro cuadrado del territorio nacional (unidades: km^2/km^2), el $IAC_{MÉX}$ por habitante en el país (unidades: km^2/habitante) o el $IAC_{MÉX}$ por unidad del producto nacional bruto del país (unidades: km^2/$). De esta forma puede facilitarse la comparación de la importancia relativa de la actividad ciclónica; en el ejemplo, el impacto de la actividad ciclónica sobre las economías de México y Cuba podría ser comparado de forma menos sesgada.

Una limitación previsible del IAC propuesto sería el hecho de que no considera en detalle las pequeñas áreas que están sujetas a vientos de muy alta velocidad (> 180 km/h), para los llamados *huracanes intensos* (los de categoría Saffir Simpson III, IV y V). Aunque estas zonas son muy pequeñas, comparadas con las envolventes que se han estado manejando, el peligro y el nivel de destrucción esperado es muy alto. Bajo el criterio de peligro proporcional al cuadrado de la velocidad del viento, el umbral inferior de un huracán categoría III sería del orden de ocho veces más destructivo que el umbral inferior de una tormenta tropical y 2.25 veces más destructivo que el umbral inferior de huracán. Algunos expertos juzgarían el criterio de proporcionalidad de la destrucción con el cuadrado de la velocidad como una subestimación de la verdadera destrucción. En principio no existiría problema para usar un índice que utilizara envolvente de tres diferentes umbrales de viento (tormenta tropical, huracán y huracán intenso) en lugar de los dos propuestos, pero los datos de esta tercera envolvente no se encuentran disponibles para un uso generalizado. Ciertamente las reconstrucciones que el HRD, AOML, NOAA (2005) hace de los campos de viento serían suficientes, pero hasta donde el autor sabe, éstas no se encuentran disponibles para todos los sistemas ni para todos los instantes (por ejemplo, cada seis horas) de cada sistema.

Bajo la situación actual, las envolventes ampliamente disponibles en internet y en herramientas computacionales especializadas para el seguimiento de ciclones tropicales deben ser primero digitalizadas como polígonos cerrados, tal y como el autor lo ha hecho para este trabajo. Sin embargo, de aceptarse que este índice es una buena forma de caracterizar la actividad ciclónica, el mismo *National Hurricane Center* podría introducir en el código que genera las imágenes con las envolventes de tormenta tropical y huracán, la salida de las coordenadas geográficas de cada vértice del polígono dibujado y proceder a su distribución vía internet en formatos de archivo comunes (por ejemplo archivos *.shp* ampliamente utilizados por sistemas de información geográfica). Bajo esta posibilidad, cada país (o estado, o agencia) podría utilizarlos para establecer un proceso totalmente automático de cálculo de afectación ciclónica local para el área específica de su interés. Alternativamente, mediante la cooperación internacional con organismos como la Organización Meteorológica Mundial, podría coordinarse que en un solo sitio se calcularan para todos los países (o estados, o agencias) en forma centralizada.

También es cierto que los diagramas de envolventes de tormenta tropical y huracán que se han utilizado corresponden a la información en tiempo real y no al post-análisis especializado que se hace, después de terminado el evento para obtener las llamadas *mejores trayectorias* (*best tracks*). En principio, sería mejor utilizar, para aplicaciones históricas, información más completa post-analizada, pero, hasta donde el autor conoce, las envolventes completas no se vuelven a regenerar. De todas maneras, el IAC propuesto podría perfectamente aplicarse a dicha información si existiera y estuviera ampliamente disponible.

Conclusión

Se ha propuesto un índice de actividad ciclónica simple, fácil de aplicar, con datos necesarios disponibles, con

interpretación física, que permite hacer comparaciones y evaluaciones cuantitativas y objetivas. Éstas pueden ser entre diversas temporadas en la misma zona ciclogenética, entre diversas zonas ciclogenéticas, entre diferentes regiones o países, e inclusive entre diversos ciclones tropicales en lo individual. Su mayor ventaja es que puede ser fácilmente evaluado en forma local para cualquier área geográfica de interés. La aplicación práctica del índice de actividad ciclónica propuesto se ha ejemplificado con las temporadas 2000 a 2004 tanto del Atlántico norte como del Pacífico nororiental, no sólo completas, sino también en forma específica para el México continental y vecindades de 100, 300 y 500 km alrededor de éste. Se identificaron algunos casos en los que temporadas muy activas resultaron de poca afectación para México y viceversa. Se identificaron otros aspectos interesantes difíciles de juzgar objetivamente sin el apoyo de un índice de actividad ciclónica de este tipo.

Recibido: 11/02/2005
Aprobado: 14/07/2005

Referencias

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento.* México, D.F., 1993, 192 pp.

FARFÁN, L.M, Regional observations during the landfall of tropical cyclone Juliette (2001) in Baja California, Mexico. *Monthly Weather Review.* Vol. 132, 2004, pp. 1575-1589.

GOLDEN SOFTWARE. *Didger 3 User's Guide*. Colorado: Golden, 2001, 207 pp.

GRAY, W., KLOTZBACH, P., THORSON, W. *Extended range forecast of Atlantic seasonal hurricane activity and US landfall strike probabilitiy for 2005* [en línea]. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, 2004 [citado en enero 2005]. Disponible en el *World Wide Web:* http://hurricane.atmos.colostate.edu/Forecasts/2004/dec2004/.

GRAY, W., KLOTZBACH, P., THORSON, W. *Extended range forecast of Atlantic seasonal hurricane activity and US landfall strike probabilitiy for 2005, Definitions* [en línea]. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, 2004 [citado en enero 2005]. Disponible en el *World Wide Web:* http://hurricane.atmos.colostate.edu/Forecasts/2004/dec2004/definitions.html

HRD, AOML, NOAA. Hurricane Research Division, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2005 [en línea] http://www.aoml.noaa.gov/hrd/.

NATIONAL HURRICANE CENTER (NHC), Tropical Prediction Center, National Centers of Environmental Prediction, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2005 [en línea] http://www.nhc.noaa.gov.

ROSENGAUS, M. *Efectos destructivos de ciclones tropicales*. México D.F.: MAPFRE RE, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Asociación Mexicana de Hidráulica, 1998, 251 pp.

ROSENGAUS, M., JIMÉNEZ, M., VÁZQUEZ, M.T. *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México.* México D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002, 106 pp.

ROSENGAUS, M. y SÁNCHEZ-SESMA, J. *Gilbert*: ejemplo de huracanes de gran intensidad. *Ingeniería hidráulica en México.* Vol. V, núm.1, 1990, pp.13-36.

Abstract

ROSENGAUS-MOSHINSKY, M. Objective evaluation of cyclonic activity. Hydraulic engineering in Mexico *(in Spanish). Vol. XXI, no. 2, April-June, 2006, pp. 27-41.*

Comparing tropical cyclone activity among different cyclogenetic zones, different seasons or different regions benefits from doing so with objective indexes, which, in addition, have simple physical interpretation, are easy to apply and have required data readily available. This paper proposes a Cyclonic Activity Index, which complies with such requirements. The proposed index is computed as the area surface, in square kilometers, covered by tropical cyclone or higher winds plus three times the area covered by hurricane winds. Its application can easily be restricted to arbitrary regions of interest. Examples of the index application are presented for the whole North Atlantic and Northeastern Pacific as well as for continental Mexico and three surrounding areas 100, 300 and 500 km wide, all of these for five seasons, 2000 to 2004.

Keywords: *tropical cyclones, tropical storms, hurricanes, cyclonic activity, tropical meteorology, objective evaluation, cyclonic activity index, natural disasters.*

Dirección institucional del autor:

Dr. Michel Rosengaus-Moshinsky

Unidad del Servicio Meteorológico Nacional,
Subdirección General Técnica,
Comisión Nacional del Agua,
Av. Observatorio 192,
Col. Observatorio,
Delegación Miguel Hidalgo,
México D.F., C.P. 11860,
teléfono: + (52) (55) 2636 4601,
fax: + (52) (55) 2636 4605,
michel.rosengaus@cna.gob.mx
mickros@prodigy.net.mx