

Gilbert: ejemplo de huracanes de gran intensidad

Michel Rosengaus Moshinsky
Jorge Sánchez-Sesma

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

Del 14 al 17 de septiembre de 1988, México fue azotado por un huracán de gran intensidad: el Gilbert. En este trabajo se presentan conceptos generales (de meteorología e ingeniería) que permiten la mejor comprensión del análisis posterior de este huracán. Se expone un recuento de los daños típicos producidos por este fenómeno meteorológico en diferentes zonas del país, diferenciándolos en lo posible por su causa: viento, oleaje, marea de tormenta o precipitación pluvial. Por último, se revisan las lecciones obtenidas durante el paso del Gilbert sobre territorio mexicano. Se ilustran de manera gráfica, lo más extensa posible, tanto los conceptos generales como los daños típicos observados directamente en la península de Yucatán.

En los huracanes, la variabilidad y potencia de la atmósfera se manifiestan en toda su magnitud. Es sorprendente que un mar tranquilo y un cielo despejado y apacible se transformen unos días después, al acercarse un huracán, en un mar agitado que puede oscilar en enormes áreas y en un cielo oscuro cargado de agua y de energía de movimiento.

En septiembre de 1988, el huracán Gilbert nos recordó, a pesar de los enormes avances que la humanidad ha realizado, lo vulnerables que aún somos ante la fuerza de la naturaleza. Con vientos superiores a los 300 km/h, un oleaje en altamar de más de cinco metros de altura, una marea superior a los dos metros y precipitaciones acumuladas en 24 horas de más de 350 mm, el Gilbert causó la pérdida de más de 250 vidas y daños económicos superiores al billón de pesos. Desquició las actividades de toda índole en más de cinco estados de la República Mexicana. Quintana Roo y Yucatán fueron los primeros afectados al ver paralizadas y dañadas sus instalaciones pesqueras y turísticas. Los vientos perjudicaron seriamente la producción agrícola y grandes áreas de bosque y vegetación fueron arrasadas. En Campeche, el oleaje y viento causados por el huracán impidieron la producción de petróleo y la actividad pesquera. En Nuevo León

y Tamaulipas las precipitaciones causaron enormes crecientes que, a su vez, provocaron la pérdida de más de 200 vidas.

En este trabajo se intenta no sólo analizar los daños que provocó Gilbert, sino también difundir las características generales que presentan los huracanes. Así, en la medida en que los técnicos y la población en su conjunto conozcan mejor estos fenómenos (órdenes, trayectorias, intensidades, estructuras, daños típicos, recurrencia y medidas de seguridad), se podrán reducir los riesgos y prevenir los desastres asociados con ellos. Primero, se describen los conceptos básicos de meteorología e ingeniería que permiten entender las manifestaciones de los huracanes y sus principales aspectos. Posteriormente, se analizan las manifestaciones básicas del Gilbert: vientos, oleajes y mareas, y precipitaciones y avenidas, así como los daños observados y reportados por cada uno de estos efectos. Se incluyen también el análisis de la serie de lecciones que el Gilbert dejó —que es responsabilidad de todos asimilar— y las principales conclusiones.

Nociones sobre huracanes

No obstante que el tema de los huracanes es muy amplio, aquí se muestran los principios básicos

que permiten comprender, de manera general, su comportamiento. Primeramente se hará una descripción amplia del fenómeno para después tratar lo referente a su origen, estructura, movimiento, energía, monitoreo y ocurrencia.

Descripción general

Los huracanes o ciclones tropicales (CT), en su etapa de madurez, son perturbaciones atmosféricas en las aguas cálidas de las zonas tropicales durante el verano y el otoño; son grandes remolinos o vórtices que se mueven hacia los polos con trayectorias difíciles de predecir, pero que en general tienen un componente hacia el oeste en latitudes bajas y hacia el este en latitudes superiores a los 25 grados.

Por su mecanismo de crecimiento, los CT concentran enormes cantidades de energía provenientes de las aguas oceánicas cálidas, a través de la condensación del vapor de agua. Por ello, elevan grandes cantidades de vapor de agua que después se precipitan al encontrar condiciones atmosféricas y orográficas adecuadas; se disipan al alejarse de la fuente de energía básica, ya sea que se dirijan al norte sobre aguas frías, o que se adentren a tierra, donde pierden fuerza relativamente rápido, sobre todo cuando se encuentran con alguna cadena montañosa. Sus manifestaciones más notorias, además de sus intensos vientos y bajas presiones centrales, son los oleajes, las mareas y las precipitaciones pluviales.

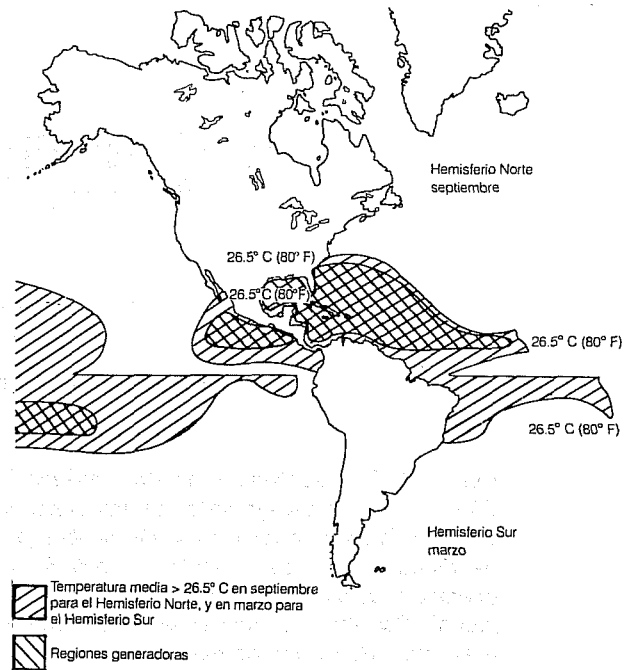
Origen

Los huracanes son una manifestación de la gran concentración de energía cerca del Ecuador, y sirven como válvula de escape y mecanismo de transporte de dicha energía hacia latitudes altas.

Ocurren durante el verano y el otoño, cuando el Ecuador climático se recorre hacia el polo unos cuantos grados, lo que permite que coincidan las fuerzas de Coriolis con las inestabilidades atmosféricas, producto de la gran concentración de energía en las aguas superficiales oceánicas y de las capas bajas de la atmósfera.

La ocurrencia de los ciclones en su etapa inicial está asociada a las elevadas temperaturas oceánicas superficiales, mayores de 27°C , las cuales se presentan en las latitudes bajas. En la ilustración 1 se observan las principales zonas de generación de CT que afectan al continente americano. México es un país predilecto para estos fenómenos, dado que sus costas están cerca de dos de las principales zonas de generación de tormentas tropicales en el mundo,

1. Zonas de generación de ciclones tropicales



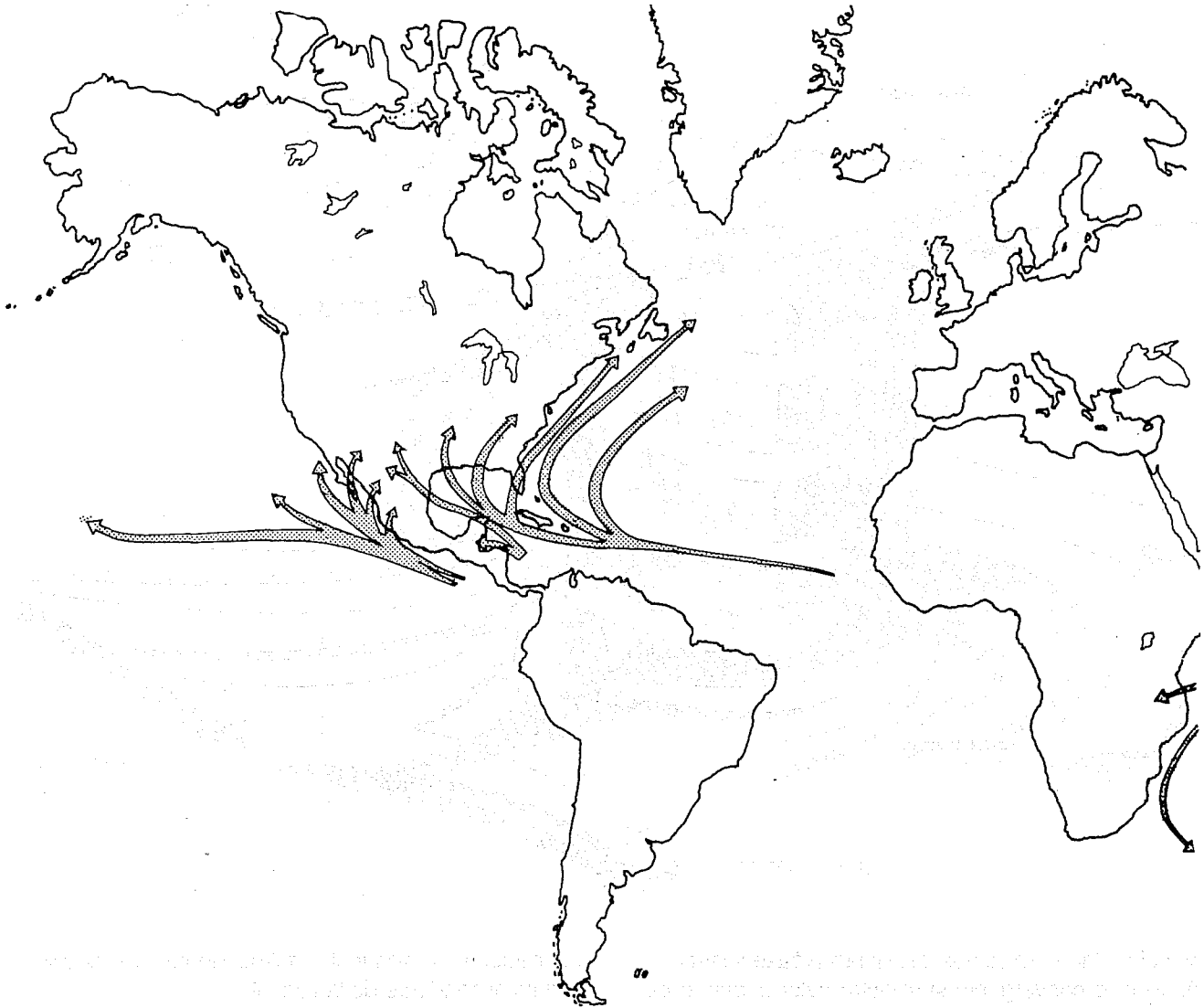
el Caribe y el Golfo de Tehuantepec.

Trayectoria

Una vez generados, los ciclones se desplazan con patrones poco definidos. Las trayectorias ciclónicas se han analizado para determinar sus frecuencias de ocurrencia en cada sitio o región y sus principales direcciones de movimiento (Colón, 1953 y Quayle, 1974). En la ilustración 2, las flechas indican las direcciones promedio de los ciclones y su grosor indica la frecuencia de ocurrencia. Para las latitudes bajas, la dirección de los ciclones es generalmente hacia el oeste y, para latitudes mayores de los 30° , el movimiento tiende hacia el este. Estas tendencias de desplazamiento de los ciclones son también propias de los vientos superficiales a escala global, denominados vientos Alisios.

En la actualidad, se estudia el problema de la definición de las trayectorias de los huracanes bajo todos los enfoques posibles. Se utilizan tanto técnicas estadísticas y fluidodinámicas como sus combinaciones. En cuanto al nivel de complejidad, se cubre el espectro que va desde los modelos analíticos simples que consideran las variables mínimas, hasta modelos refinados que, además de abarcar las áreas continentales, contemplan las variaciones atmosféricas verticales en detalle y se alimentan con datos provenientes de miles de sitios de observación y de satélites y aviones enviados expresamente.

2. Trayectorias típicas y frecuencia de ciclones

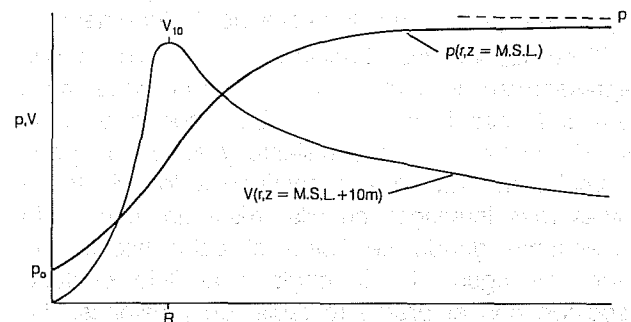


Estructura

Los huracanes presentan una estructura aproximadamente axisimétrica alrededor de la vertical que pasa por el centro de la tormenta. La presión y la temperatura son las variables más cercanas a dicha axisimetría; la primera tiene un déficit en el centro de la tormenta de manera contraria a la temperatura, que muestra un superávit o exceso en la misma zona. Ambas variables tienden a recuperar sus valores típicos a medida que aumenta la distancia radial al centro (véase ilustración 3).

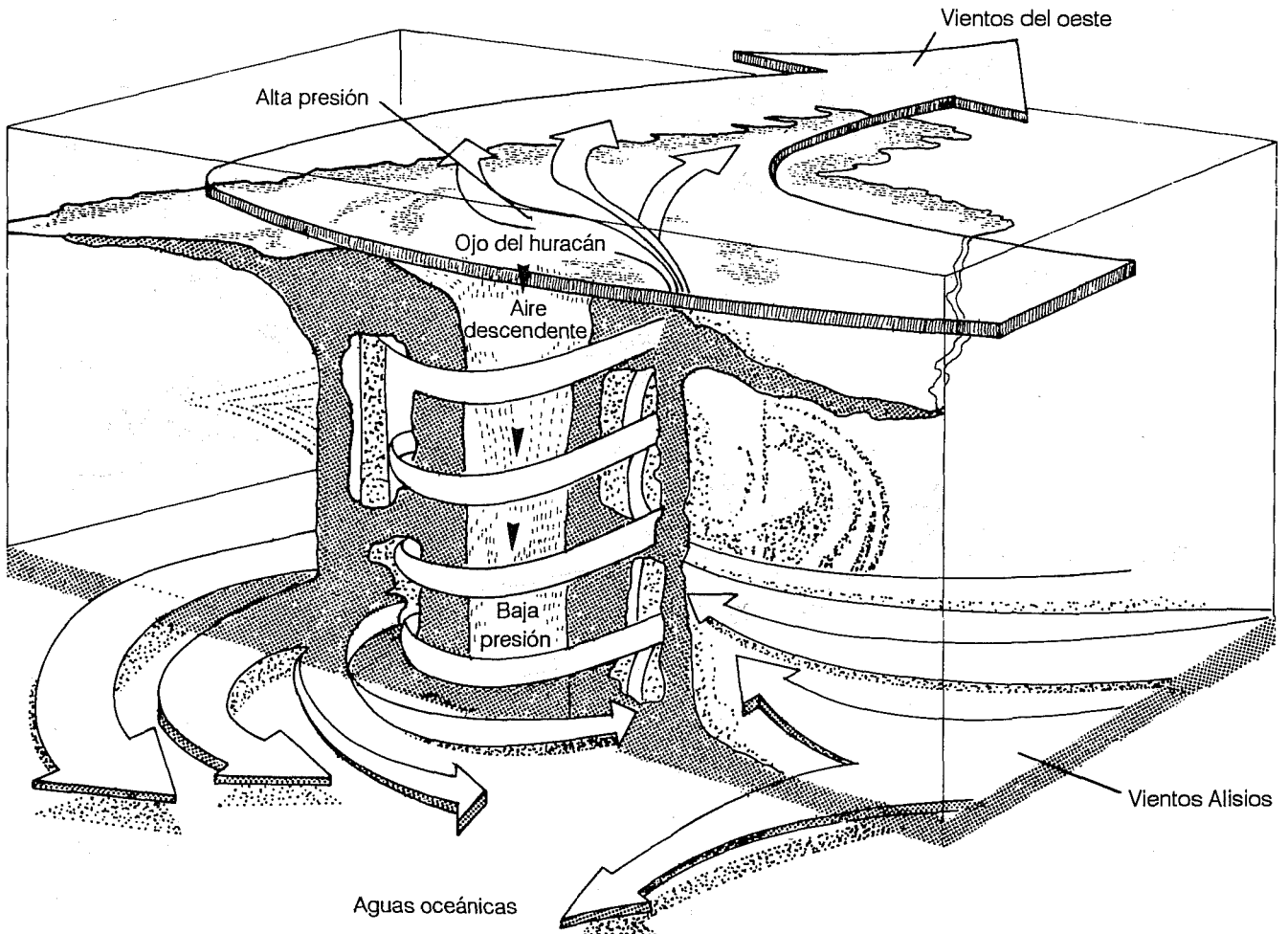
Los ciclones son vórtices de eje vertical con un flujo inferior convergente y uno superior divergente (véase ilustración 4). En su centro se produce una zona con baja presión y aire relativamente en reposo y seco que se denomina ojo. Alrededor de éste;

3. Distribución radial de presión y velocidad en un ciclón



existe una zona anular central donde convergen las corrientes superficiales y se producen fuertes lluvias y flujos ascendentes. Es en esta área donde se tienen

4. Estructura general de un ciclón



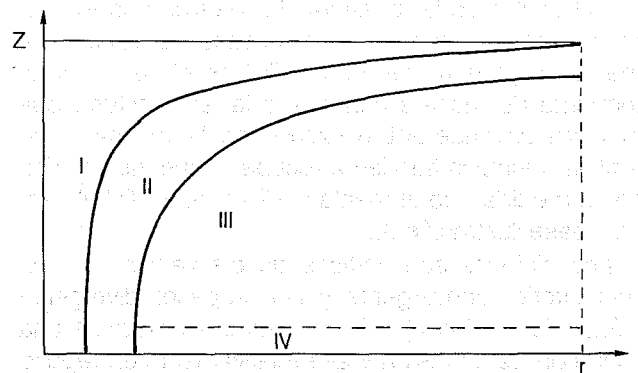
las velocidades máximas del viento (véase ilustración 3). El flujo convergente suministra calor al centro del ciclón, a través del calor latente que libera su vapor al condensarse; este calor asegura la distribución de densidades y, consecuentemente, de las presiones y flujos para que continúe la existencia del fenómeno.

Si se supone una simetría axial, un ciclón puede representarse en cuatro zonas sobre un corte radial vertical (véase ilustración 5). La I corresponde al ojo del ciclón, con aire caliente y seco con poca recirculación. La zona II contiene a los vientos y lluvias más intensos; en ella existe un fuerte flujo ascendente donde se libera el calor latente del vapor de agua. La III engloba al flujo giratorio asociado con el gradiente radial de presiones. La zona IV contiene a la capa límite atmosférica donde el flujo circulatorio interactúa con la superficie terrestre (océano o tierra); en esta zona se presenta un flujo radial de aire caliente y húmedo. Debe señalarse que en las partes externas de las zonas II y III, existe

un pequeño movimiento descendente que equilibra al flujo ascendente de la zona II.

En la zona IV, los efectos de fricción superficial juegan un papel sumamente importante, ya que al retardar éstos al flujo giratorio, y conservarse en

5. Corte vertical de un ciclón con zonas características



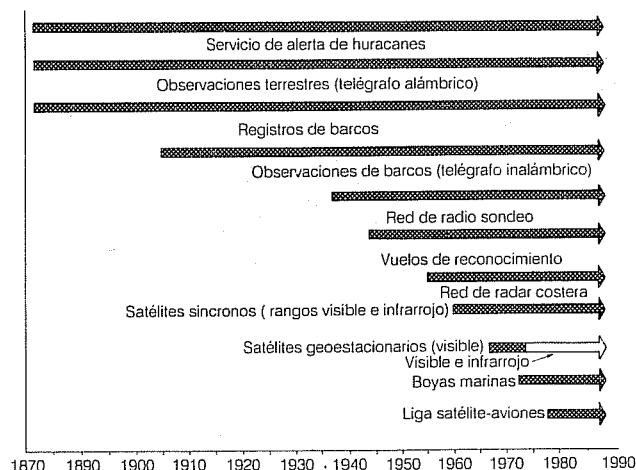
el mismo gradiente radial de presiones que mantiene el flujo superior (zona III), la fuerza centrípeta resultante genera un flujo radial acelerado que, como se ha dicho, alimenta al ciclón.

La estructura de los ciclones tropicales, además de ser modificada por la traslación, es alterada por las masas continentales, en especial, por las cadenas montañosas o sierras que cambian, entre otras variables, los contenidos de vapor de agua, las variaciones verticales del viento y los flujos convectivos. Todos estos efectos, además de tener especial importancia en la definición de los vientos y la precipitación que causan los CT en condiciones como las que México presenta, constituyen temas de investigación teórica y experimental.

Mediciones

Conforme pasa el tiempo, los sistemas de adquisición de información son más confiables; esto es especialmente válido para el estudio de los ciclones tropicales. Hace más de un siglo, se inició el proceso de medición de los CT mediante los reportes de barcos mercantes y de algunas estaciones terrestres. En 1831, Redfield publicó su primer artículo acerca de estos fenómenos; fue él quien dedujo, con base en las observaciones, la naturaleza rotatoria alrededor del centro de los vientos de los ciclones y el hecho de que éstos se trasladen como un todo. Hoy en día, las mediciones son directas por medio de aviones, o indirectas, a través de radares y fotografías de satélite. En la ilustración 6 se muestra esquemáticamente el incremento de las diferentes fuentes de información sobre ciclones en el Océano Atlántico norte, a lo largo de los últimos 100 años (Jarvinen y Caso).

6. Evolución de fuentes de información sobre ciclones



A pesar de los avances logrados en el monitoreo de huracanes, en la actualidad hay limitaciones para definir los valores máximos que pueden alcanzar las variables ciclónicas en las zonas costeras. Los problemas se deben a la falta de registros adecuados de dichas variables para estimar los valores extremos; son pocos los sitios donde se cuenta con registros de estas variables y, en la mayoría, la información corresponde a periodos cortos menores de 60 años, lo que implica no considerar la participación de los ciclones asociados con periodos grandes que, como se verá en la parte siguiente, tienen una contribución significativa. Además, muchas veces los sistemas de registro han fallado por las elevadas magnitudes de las variables ciclónicas. Otras veces sucede que aunque se registren los valores, por la dificultad para separar en la población de registros las variables debidas a ciclones tropicales de las otras, esta información no se procesa adecuadamente.

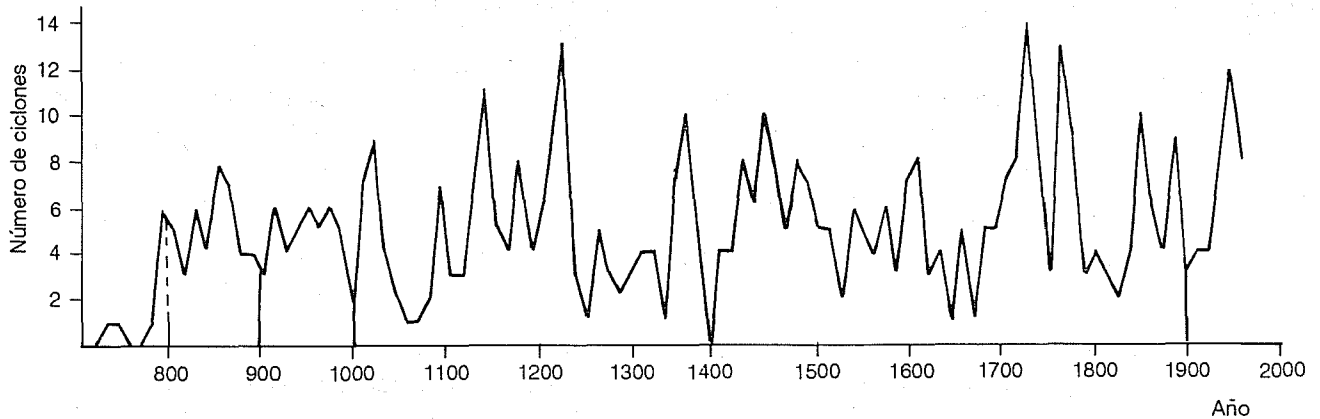
Ocurrencia

Gracias a un estudio realizado sobre la frecuencia de ciclones en las costas japonesas registrada para un periodo de más de 1200 años (Ishizaki, 1971), (véase ilustración 7) se cuenta con el espectro de frecuencias de la ocurrencia de ciclones. Dicho espectro señala bandas de frecuencias de mayor densidad alrededor de varios periodos, cercanos a los 100, 18, 6 y 3 años (véase ilustración 8). Otro estudio al respecto, pero realizado para la costa de Texas por Russell y Schueller (1974), con base en análisis de autocorrelación de información por más de 150 años, señala frecuencias cuyos periodos son 3, 6, 12, 33, 44 y 85 años. El estudio profundo de los registros históricos aunado al empleo de técnicas espectrales para la detección de variaciones periódicas, permitirá definir pronósticos de la actividad ciclónica.

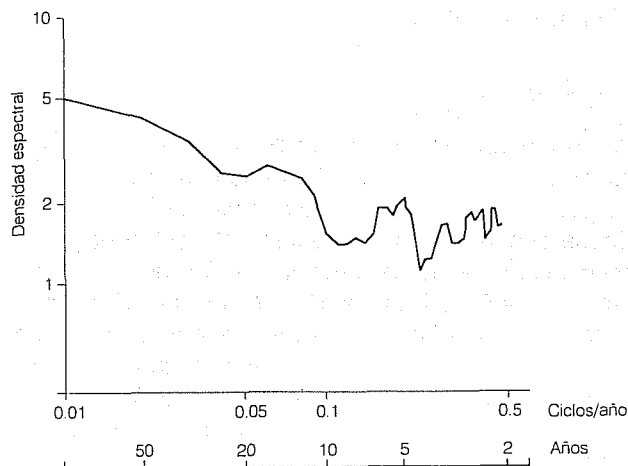
Efectos principales de los CT

Para la población en general y para la comunidad ingenieril en particular, los efectos o acciones producidas por los ciclones son de mayor interés que los detalles meteorológicos y de estructura de estas tormentas. Son estos efectos los que ponen en peligro a la población, sus bienes materiales, su actividad económica y a las diferentes estructuras de protección, comunicación y transporte, aprovechamientos hidráulicos, etc. En general, los principales efectos de ciclones y sus representantes de máxima intensidad, los huracanes, son: vientos, oleaje, marea de tormenta y precipitación.

7. Ciclones en el Japón durante los últimos 1200 años



8. Espectro de frecuencias de ocurrencia de ciclones en el Japón



de vientos en un huracán es su estructura giratoria alrededor del ojo (véase ilustración 9), producida por el equilibrio entre las fuerzas de presión, la centrífuga y la de Coriolis. A una altura apreciable sobre la superficie del mar o la tierra (fuera de la capa límite), la dirección local del viento es tangencial y presenta una magnitud decreciente y una deflexión creciente (hacia el ojo del huracán) dentro de la capa límite, que alcanza magnitudes de 15 a 30 grados, para los vientos de superficie (10 m sobre ella).

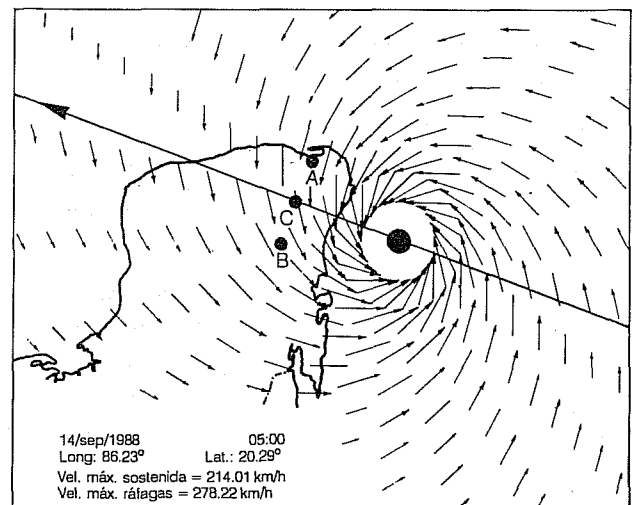
Esta característica es importante en cuanto al diseño, pues los vientos producidos por los huracanes no tienen una dirección predominante; la mayor parte de la áreas son atacadas, durante el paso de un huracán, por vientos que cubren aproximadamente 180 grados; este es el caso de los puntos A y B de la ilustración 9. Las magnitudes y direcciones de viento calculadas para dichos puntos se muestran en las ilustraciones 10 a y b. En

Vientos

Los vientos son la característica que mejor identifica a los huracanes y son éstos, con excepción de los tornados, los fenómenos que presentan las mayores intensidades de viento que en ocasiones sobrepasan velocidades de 300 km/h. Estos vientos producen daños importantes, ya que las fuerzas que ejercen sobre las estructuras son muy apreciables. Por ejemplo, una placa cuadrada de sólo 1m por lado colocada frontalmente en un viento de 300 km/h estaría sujeta a una fuerza lateral aproximada de 425 kilogramos. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad de viento, lo que hace sumamente crítica su estimación para fines de diseño; bastaría un viento de 140 km/h para producir fuerzas dos veces mayores que otro de 100 km/h.

Una característica esencial del campo superficial

9. Trayectoria y campo de viento superficial del Gilbert en su máxima intensidad



contraste, un punto que se encuentra sobre la trayectoria (como el punto C en la ilustración 9) experimenta un cambio abrupto de 180 grados en la dirección del viento cuando pasa el ojo del huracán (véase ilustración 10 c).

A menudo, la población cercana a puntos sobre la trayectoria de un huracán se ve confundida por el hecho de que los vientos que experimenta tienen una dirección casi normal a lo que se reporta como la dirección de aproximación del huracán. Otro factor de confusión usual para la población es el reporte de dos velocidades asociadas con el huracán: la de traslación del sistema completo (casi siempre muy baja, de alrededor de 10 a 40 km/h) y la velocidad máxima de viento (en general muy alta, 125 a 300 km/h). La manera en que los medios de comunicación difunden la información no ayuda a disminuir esta confusión, dado que el reportero está tan confundido como la población. La superposición de las velocidades mencionadas hace que los puntos que se encuentran a la derecha de la trayectoria (en el hemisferio Norte) experimenten velocidades mayores que los puntos correspondientes simétricos del lado izquierdo de dicha trayectoria, puesto que en el primer caso a la velocidad del campo de vientos se agrega la de traslación del sistema, mientras que en el segundo, se disminuye. (Esto sucede con los puntos A y B de la ilustración 9, cuyas velocidades se muestran en las ilustraciones 10 a y b). Además, casi siempre los reportes incluyen, a veces sin una clara diferenciación, las velocidades máximas sostenidas y las de las ráfagas máximas, aunque aquéllas son valores promedio en intervalos de aproximadamente 1 minuto, mientras que éstas son las (casi) instantáneas (en realidad, son el promedio de unos cuantos segundos) y es común que sobrepasen en un 25 ó 30% las velocidades sostenidas.

La ilustración 9 muestra un campo de vientos prácticamente simétrico alrededor del centro. En realidad este campo es afectado por la orografía del territorio donde incide e incluso por la interacción con otros centros de alta o baja presión. Hoy en día existe poca información para incluir estos efectos en los modelos simples del campo de vientos.

En nuestro país las zonas que son afectadas por vientos huracanados significativos son las vertientes del Pacífico y del Golfo, así como la totalidad de la península de Yucatán; los vientos que sobreviven el paso del huracán sobre el parteaguas de alguna cadena montañosa de cierta altura no son significativos.

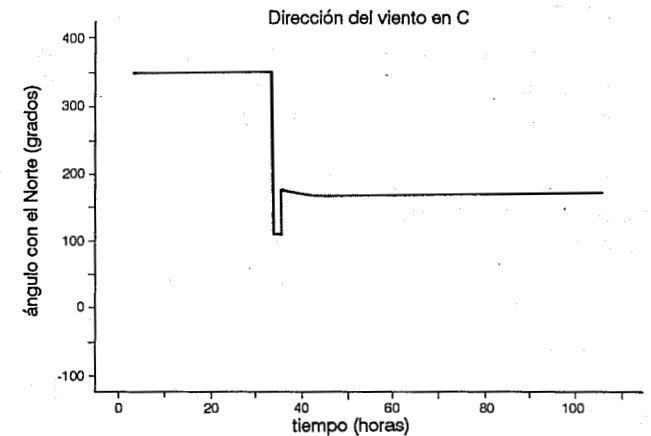
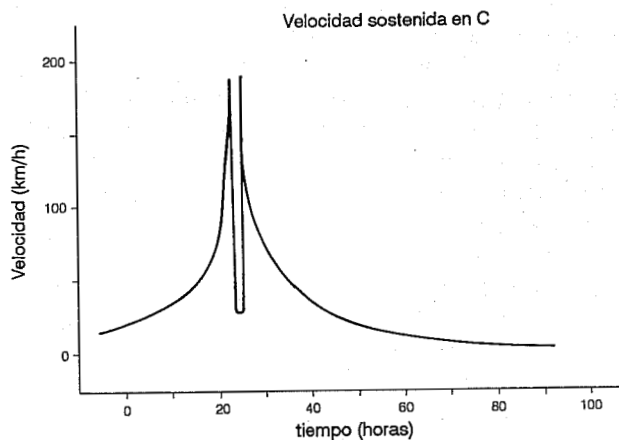
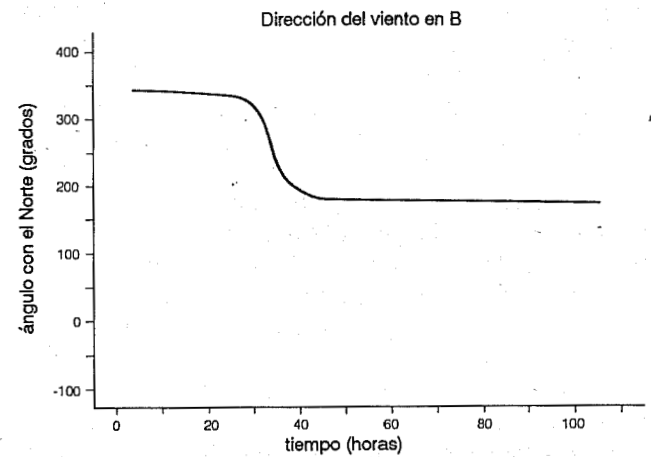
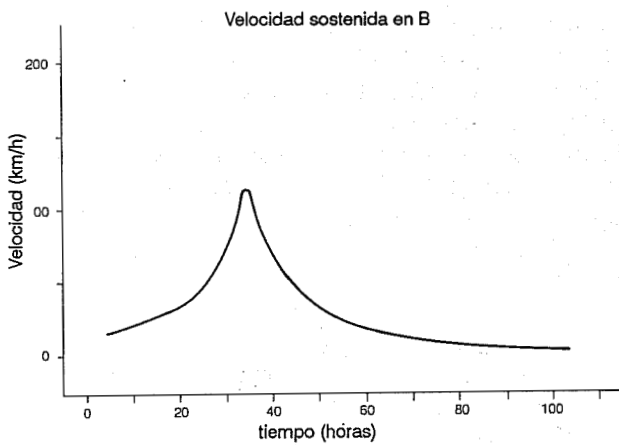
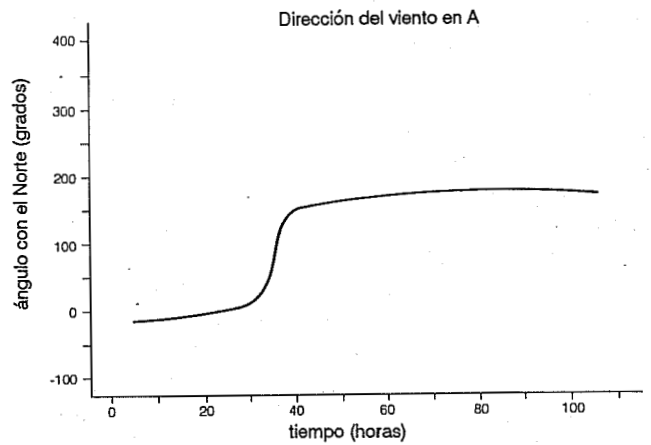
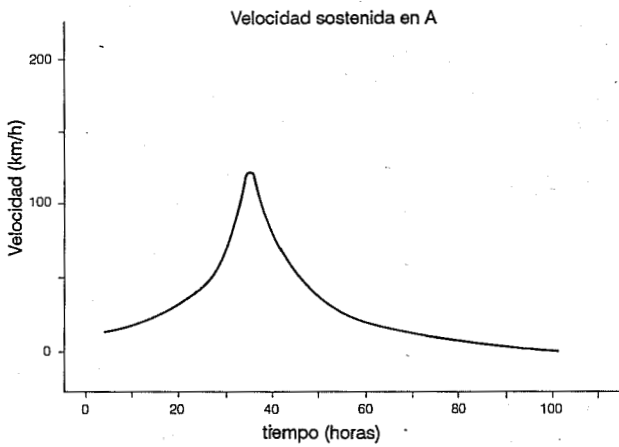
Oleaje

Los huracanes están íntimamente relacionados con el mar, puesto que se originan y tienen posibilidad de trasladarse por grandes distancias e intensificarse sólo sobre él. La gran intensidad y extensión del campo de vientos generan fuertes oleajes que, al trasladarse en aguas profundas (con poca pérdida de energía), pueden afectar en gran medida inclusive las zonas alejadas del punto de incidencia del huracán sobre la tierra. En grandes zonas del mundo, especialmente en México, los huracanes (conocidos como tifones en Oriente), producen las condiciones de oleaje más severas y, por lo tanto, dominan el diseño de las obras costeras y marítimas contra el oleaje. Este se genera cuando la energía del viento se transfiere al mar. El oleaje será mayor con la duración de esta acción y con la extensión del campo de vientos. Conforme el oleaje generado crece en tamaño (longitud y altura), avanza más rápido hasta que alcanza una velocidad igual a la del viento, momento en el que no puede transferirse más energía y se alcanzan las condiciones máximas.

Otro factor limitante de la altura de ola es la pérdida de energía cuando las olas rompen al alcanzar su pendiente límite estable (rompientes en aguas profundas). Sobre la plataforma continental (aguas con profundidades menores a los 200 m), el oleaje se ve afectado además por su interacción con el fondo, lo que se manifiesta principalmente en una atenuación por la fricción, y en un cambio de dirección y altura por la refracción y por las rompientes debido a las condiciones límites de profundidad (rompientes en aguas someras).

En el campo de la ingeniería se acostumbra caracterizar un cierto estado de agitación de la superficie libre del mar con un oleaje representativo monocromático y unidireccional. La realidad es que el proceso de generación de oleaje es tal, que todas las frecuencias en un cierto rango son excitadas por el viento, y el resultado es una superposición de trenes de oleaje de frecuencia y dirección múltiples (espectro direccional de oleaje) que proporcionan a la superficie del mar su aspecto caótico característico. Las componentes del oleaje de diferentes frecuencias y direcciones son afectadas en forma desigual por la presencia del fondo en la plataforma continental, lo que implica que al menos el tránsito del oleaje de aguas profundas hasta la costa, no se pueda realizar a través de la técnica simplificada de la ola monocromática unidireccional representativa. Sólo en las zonas alejadas del área de generación se observa un oleaje relativamente monocromático, ya que las olas de mayores periodos y longitudes

10. Evolución del viento en puntos a la derecha, izquierda y sobre la trayectoria de un huracán

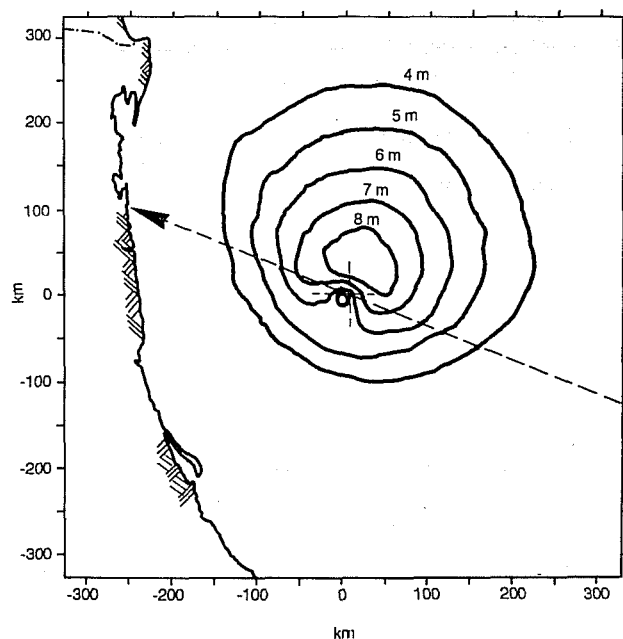


avanzan más rápido que las de periodos y longitudes menores, dispersándose y arribando a las costas lejanas de manera separada.

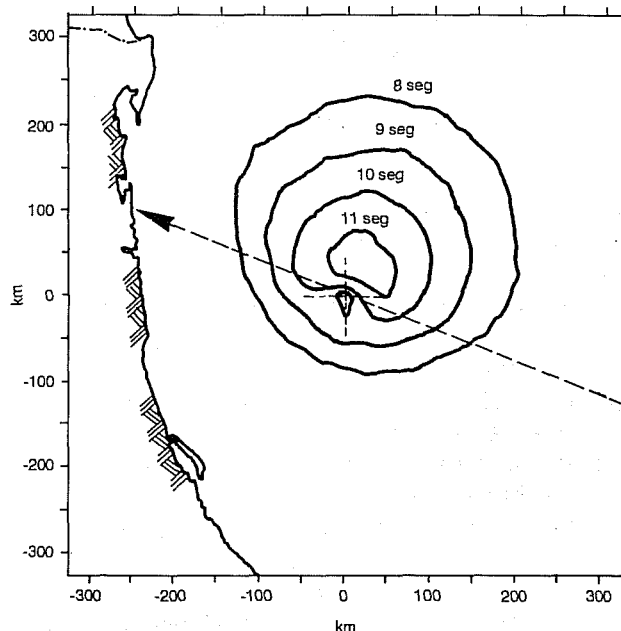
En la actualidad, existen varios modelos de predicción del oleaje generado por campos de viento huracanados en aguas profundas. La ilustración 11 representa el campo de altura de la ola significativa para las condiciones del huracán Gilbert cuando se encontraba a la mitad del Golfo de México, y la ilustración 12, el campo de periodo de la ola significativa, ambos calculados con el más sencillo de los criterios actuales, (US Army Corps of Engineers, 1977). Como puede observarse, las olas de mayor altura y periodo se esperan a la derecha de la trayectoria del huracán, cerca de la zona de vientos más intensos y avanzando en la misma dirección que el fenómeno meteorológico. Esto se debe a que en la zona derecha de la trayectoria, el campo de vientos acompaña al oleaje durante una distancia mayor que en el caso de los puntos simétricos del correspondiente lado izquierdo.

Sin embargo, la generación en aguas someras (o simplemente el tránsito de aguas profundas a las costas), sobre la plataforma continental, constituye todavía un tema de discusión e investigación. Lo que resulta evidente es que el oleaje máximo reportado en alta mar siempre será mucho mayor que el que efectivamente se alcanza en la costa; la reducción depende de las condiciones específicas de la batimetría y el material del fondo, aunque esto

11. Campo de altura de ola significativa para una posición del Gilbert según el modelo del Shore Protection Manual



12. Campo de período de olas significante para una posición del Gilbert según el modelo del Shore Protection Manual



no quiere decir que el oleaje incidente en la costa sea despreciable. Por ejemplo, las alturas de ola de 10 m en alta mar son comunes en los huracanes intensos, mientras que las mayores a 4 m en la costa son raras. Sin embargo, las fuerzas que el oleaje ejerce sobre las estructuras son apreciables: una ola incidente de sólo 2 m de altura sobre un muro vertical producirá típicamente una fuerza por metro de ancho de incidencia de 13 ton, en el caso de no ser una ola rompiente, y de 42 ton en el caso rompiente.

Marea de tormenta

El efecto más desconocido y menospreciado entre la población y aun en el nivel técnico en nuestro país, es la marea de tormenta o sobre elevación del nivel medio del mar cuando un huracán se acerca a la costa. Esta sobre elevación se produce por varias razones. El viento en dirección normal a la costa ejerce una fuerza cortante sobre la superficie del mar que, como no puede producir una corriente (puesto que es normal a la costa), se contrarresta con una sobre elevación del nivel en la costa. Por otra parte, el viento en dirección tangencial a la costa produce una corriente a lo largo de ésta, y la fuerza de Coriolis tiende a desviarla a la derecha; si la costa se encuentra a la derecha de dicha corriente, tal desviación no puede ocurrir y la manifestación es, de nuevo, una sobre elevación del nivel. Este doble efecto del viento, quizá el que

mayor sobreelevación produce, sólo es importante en las aguas someras, y tiene efectos despreciables en alta mar. Sin embargo, la baja presión en el ojo del huracán produce una sobreelevación del nivel que actúa independientemente de la profundidad local.

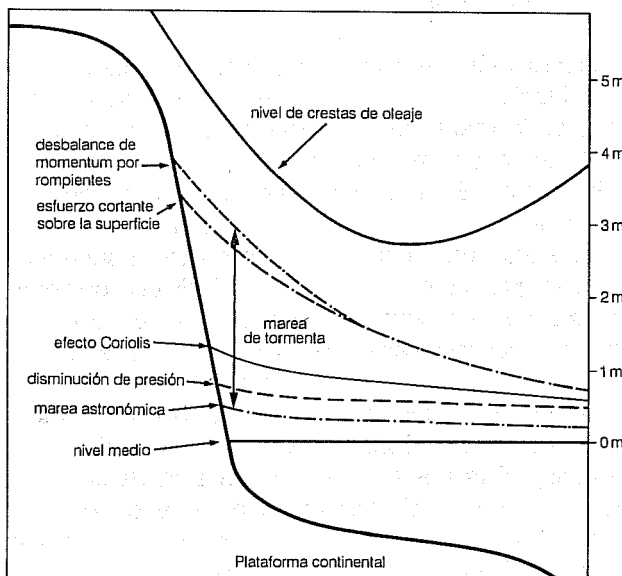
Otro efecto es el desbalance del *momentum* que entra y sale de la franja entre el litoral y la línea (o zona) de rompientes, lo que también se manifiesta con un incremento en el nivel de la superficie libre. El nivel máximo de la marea de tormenta puede verse adicionado por la marea astronómica, dependiendo de la coincidencia de la pleamar o la bajamar con la incidencia del huracán. La ilustración 13 esquematiza los diferentes efectos y su importancia relativa, marcando los valores máximos concebibles (envolventes). Como se nota, las sobreelevaciones del nivel del mar pueden ser considerables, aunque comúnmente se observan incrementos del nivel de 2 a 3 m sobre el nivel original.

La razón por la que un efecto tan importante se desconozca y menosprecie, es tal vez que para un observador en la costa, esta sobreelevación no es obvia, puesto que el nivel del mar no se puede percibir de manera independiente al oleaje y por ello simplemente se reportan olas que tienen mayores alcances tierra adentro, conforme se acerca el huracán. Es un hecho que el principal efecto de esta marea de tormenta es la inundación de extensas zonas costeras con agua de mar que, dependiendo de la topografía, puede llegar a cubrir franjas de varios kilómetros. En contraste con las inundaciones causadas por el desbordamiento de los ríos, donde

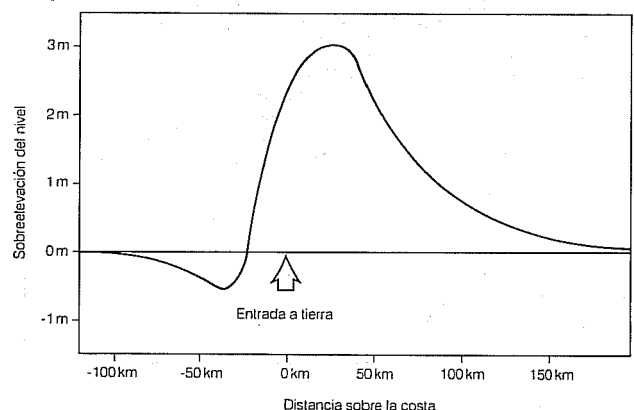
el volumen de agua disponible es más o menos limitado, en este caso, es prácticamente infinito. Es evidente que el cálculo de esta sobreelevación tiene gran importancia en el contexto de la seguridad de la población y los procedimientos de evacuación. En el hemisferio Norte, las máximas mareas de tormenta se esperan a la derecha del punto de incidencia del huracán en tierra (véase ilustración 14). En este sentido, para la población es básica una cultura elemental sobre los huracanes, pues cuando el ojo del huracán pasa con su aparente calma sobre una localidad y comienza de nuevo el viento muy intenso, es frecuente que los habitantes interpreten que el nivel del mar comenzará a subir de nuevo, cuando en realidad se encuentra cerca de su máximo y se retirará rápidamente, con vientos opuestos en 180 grados a los que generaron la marea.

La combinación del oleaje y la sobreelevación del nivel del mar produce efectos muy interesantes y destructivos, pues este nivel incrementado permite la supervivencia de un oleaje mayor sin romper y perder energía. Por ejemplo, a una profundidad inicial de 3 m, una ola rompería al alcanzar sólo 2.4 m de altura; sin embargo, bajo la acción de un huracán, con un incremento de 2 m del nivel del mar para alcanzar una profundidad temporal de 5 m, el oleaje puede llegar hasta 4 m de altura, y ser mucho más destructivo que bajo las condiciones del nivel original. Esta combinación aumentada con la acción del viento y la lluvia hace que las zonas más afectadas (y de mayor riesgo para la población) sean las franjas costeras. Otra combinación interesante de efectos se puede dar cuando las avenidas extraordinarias en los cauces se encuentran con niveles (temporalmente) extraordinarios en su descarga al mar, lo que provoca un arremansamiento que en ocasiones rebasa las condiciones de diseño de los bordos de protección.

13. Esquema de efectos que contribuyen a la sobreelevación del nivel del mar, en condiciones críticas



14. Distribución típica de la marea de tormenta alrededor del punto de incidencia a tierra de un huracán en el Hemisferio Norte



Precipitaciones

El último efecto y quizá el más conocido para los pobladores del altiplano, es el de las extraordinarias precipitaciones pluviales. Los huracanes arrastran consigo enormes cantidades de humedad que al precipitarse, generalmente con mayor intensidad cuando el huracán encuentra una barrera montañosa, provocan avenidas extraordinarias, deslizamientos de tierra e inundaciones en las zonas mal drenadas. Muchas veces estas solicitaciones representan las condiciones hidrológicas de diseño de las obras hidráulicas. Las intensidades de lluvia de 50 mm/h y láminas totales de 400 mm no son desusadas para las precipitaciones durante los huracanes. Aunque parezca paradójico, éste es también el medio por el que los huracanes benefician a la población, sobre todo en aquellas zonas que poseen infraestructuras para el almacenamiento y distribución de grandes volúmenes de agua, lo que permite asegurar el riego en el siguiente ciclo agrícola y la producción de electricidad sin usar los recursos no renovables.

Hoy en día la predicción de las precipitaciones producidas por los huracanes es un tema de estudio intenso, pero incluso con las tecnologías más avanzadas (como la observación desde satélites) existe una gran incertidumbre al respecto.

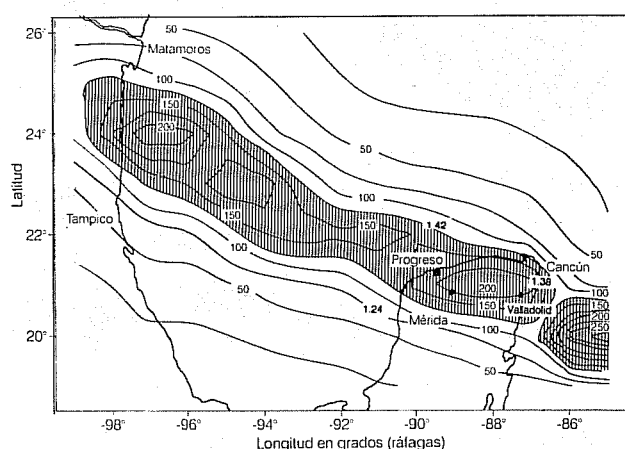
Daños por viento

Los vientos que el huracán Gilbert presentó en las zonas cercanas a su trayectoria causaron daños importantes. No sólo resultaron afectadas las estructuras con grandes áreas expuestas, debido a los vientos intensos, sino que también la vegetación fue derribada en grandes extensiones. A continuación se analizan las velocidades del viento. Para ello, se consideran los registros hechos en los observatorios meteorológicos y las estimaciones con modelos del campo de viento con base en la información sobre la posición y la intensidad. Los máximos valores registrados y calculados se comparan con las estimaciones previas de las velocidades máximas del viento de huracanes realizadas a partir de la historia registrada de estos fenómenos.

Análisis de las velocidades

Las velocidades registradas en tres sitios de la parte norte de la península de Yucatán se proporcionan en la ilustración 15. En ésta se observa que la intensidad del huracán disminuyó a medida que cruzaba la península; así mismo, se señalan las

15. Velocidades máximas durante el huracán Gilbert (en km/h)



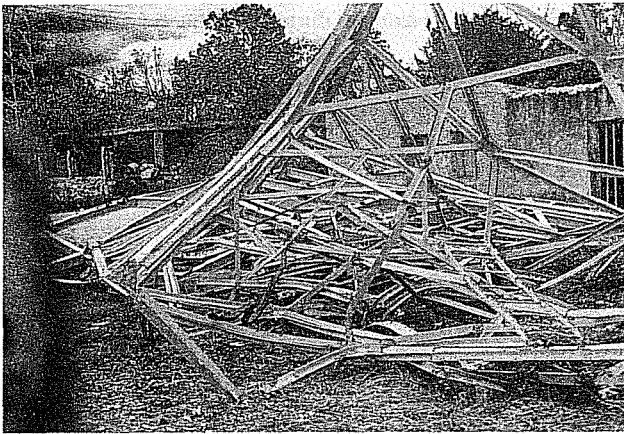
velocidades máximas simuladas a partir de los reportes de la posición e intensidad del huracán (elaborados por el Centro Nacional de Huracanes de los EUA), con información de satélite y de vuelos de reconocimiento. Puede notarse que la pérdida de fuerza del huracán en su entrada a tierra no se reportó de manera adecuada. Es notable que el factor de sobre-estimación de las velocidades es superior a 1.2, aun a pesar de haber considerado las distorsiones por el tipo de terreno.

Daños causados

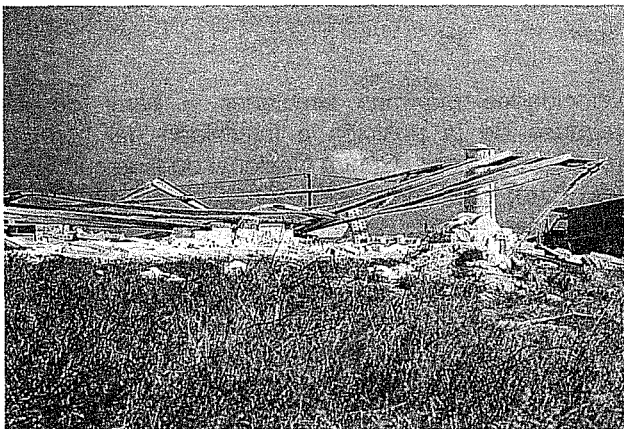
Los anuncios comerciales, las naves industriales y los postes de las líneas de transmisión eléctrica y de telecomunicaciones fueron seriamente perjudicados por los vientos del Gilbert. En las ilustraciones 16 a 19 se muestran algunos daños típicos causados por los intensos vientos. Se observó una fuerte correlación entre el peso de las estructuras y su



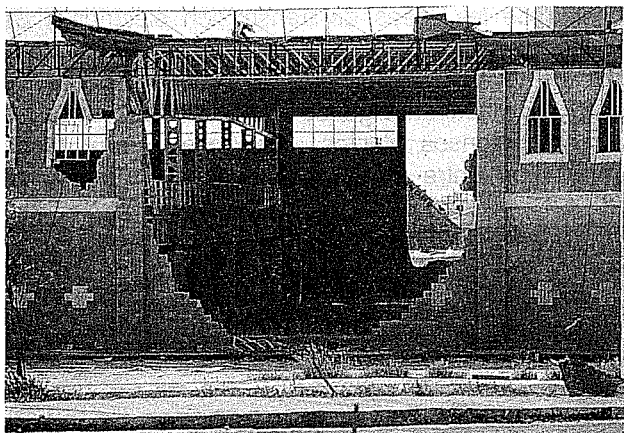
16. Anuncio publicitario derribado (Mérida)



17. Restos de una torre de transmisión de microondas



18. Restos de una nave industrial con estructura metálica (Cancún)



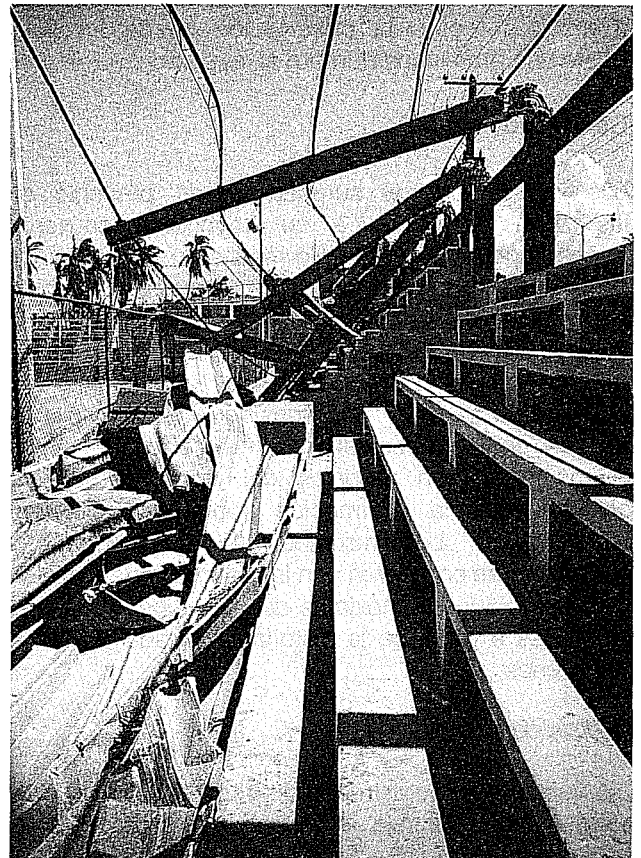
19. Muro de mampostería derribado por el viento (Cancún)

sensibilidad al viento. Los daños directos a las estructuras de concreto armado-mampostería fueron mucho menos frecuentes que a las metálicas y de lámina. Sorprendentemente, las casas mayas del sureste no sufrieron daños graves, siempre

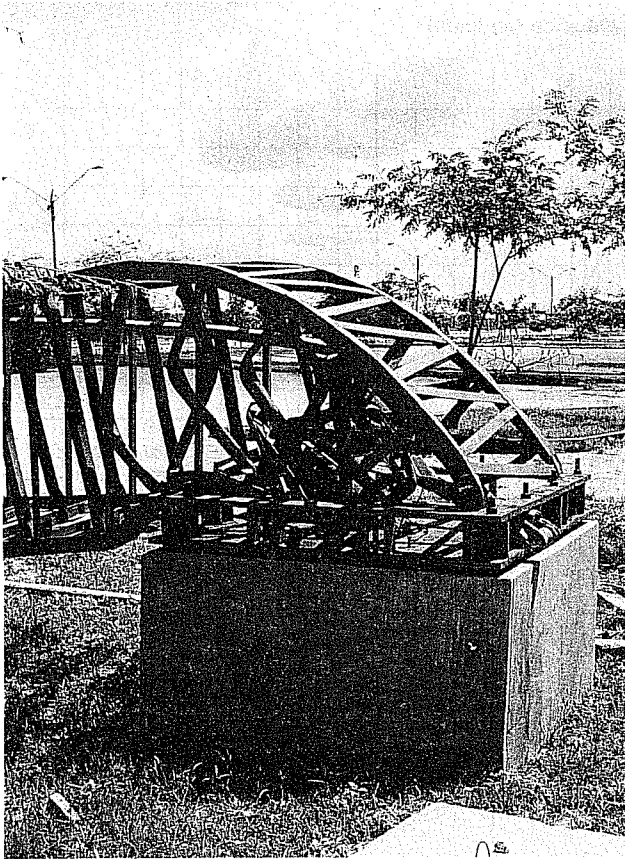
que la estructura no se derrumbara como un todo, ya que las techumbres cedieron localmente al viento. Fue considerable la cantidad de árboles derribados y dañados en las zonas urbanas, con los consiguientes problemas en las líneas de transmisión de electricidad, teléfono y alumbrado.

Los perjuicios a la vegetación de las zonas no urbanas fueron incalculables. Bajo condiciones huracanadas, el viento arrastró un aerosol compuesto de agua, sal y arena del mar hacia el interior, produciendo una *quema* generalizada de la vegetación en la franja costera.

Hubo algunos daños parciales en aquellas estructuras cuya localización en relación con otras construcciones provocó aceleraciones y fluctuaciones locales en el flujo, lo que produjo la falla. Este fue el caso de los soportes de las techumbres en algunos estadios (véanse ilustraciones 20 y 21). En ejemplos aislados y en la zona de mayor intensidad de vientos, hubo fallas en los muros de mampostería al centro de las estructuras de soporte. Estas fallas se explican por dos razones básicas que no se excluyen mutuamente. La primera y la más



20. Daños al techo de las gradas de un campo de beisbol (Puerto Progreso)



21. Torre de alumbrado del estadio, derrumbada en Mérida

importante es que no existía, y hasta la fecha no existe, un reglamento o recomendación actualizado en los niveles estatal y nacional para el diseño estructural, que tome en cuenta los vientos que provocó el paso del Gilbert. La segunda es que algunas estructuras tenían deficiencias en el diseño, en los procesos constructivos o en la calidad de los materiales usados.

En la zona del noreste hubo daños considerables en las estructuras de acero y de lámina, en su mayoría usadas para el almacenamiento de granos. Este tipo de estructura moderna resulta sumamente sensible a los daños producidos por el viento, ya que ofrece una gran área de resistencia a éste y no cede localmente.

Estudios previos

A fin de proporcionar datos suficientes para el diseño estructural en los sitios afectados por los ciclones, es necesario definir en las costas las distribuciones de probabilidad asociadas a los vientos máximos de ciclón. A continuación se describe el proceso de la velocidad máxima de los vientos en México y los resultados obtenidos en un estudio previo.

Sánchez-Sesma y Aguirre (1988) determinaron las velocidades máximas de un ciclón para diferentes probabilidades de excedencia; a lo largo de la costa mexicana; para ello, aplicaron modelos probabilistas a la información sobre el viento, tanto a la registrada directamente por los observatorios costeros como a la reconstruida a partir de la información extranjera sobre la posición e intensidades de los ciclones tropicales en los océanos Atlántico y Pacífico, recabada por el Centro Nacional de Huracanes de los EUA (Caso *et al*, 1980).

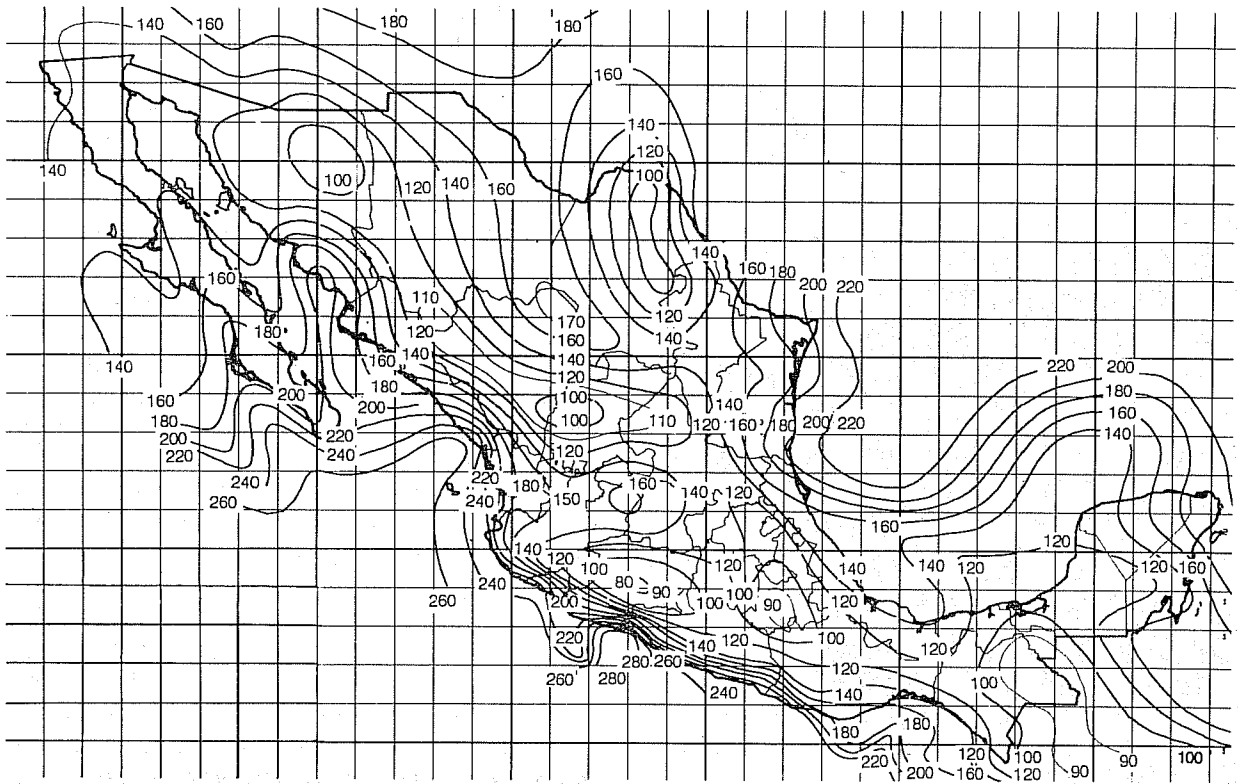
Los resultados finales de dichos estudios permitieron elaborar mapas de México con la distribución de las velocidades máximas del viento para diferentes periodos de retorno (Sánchez-Sesma *et al*, 1984). En la ilustración 22 se muestra un mapa de velocidades máximas, correspondiente a un periodo de retorno de 200 años, es decir, que abarca los valores máximos del viento que se estima se exceden en promedio una vez cada 200 años. Se observa que las velocidades del huracán Gilbert, salvo en Cozumel, no sobrepasaron los valores estimados para los vientos máximos de 200 años de periodo de retorno. Esto se ha presentado no sólo en la costa atlántica sino también en la del Pacífico, cuando en 1983 el huracán Tico alcanzó velocidades cercanas a los 250 km/h antes de su entrada al sur de Sinaloa, valores menores a los estimados en el estudio mencionado para ese lugar.

Por último, cabe mencionar que la falta de concordancia entre las estimaciones hechas para los vientos máximos de huracán y los valores registrados o modelados en la zona afectada por el Gilbert, se deben a una falla en el proceso de la elaboración de los resultados finales que no consideró en detalle los valores máximos estimados en esa región. En la ilustración 23 se muestran los resultados preliminares del estudio mencionado, para las velocidades de viento debidas exclusivamente a los ciclones tropicales. Esta distribución de velocidades sobre la península de Yucatán es cualitativamente similar a la distribución de velocidades máximas que el Gilbert provocó en esa región (véase ilustración 15). Esto muestra las ventajas de los procedimientos de reconstrucción histórica usados para estimar las velocidades máximas de los vientos de huracán, en condiciones tan severas como las que el Gilbert causó.

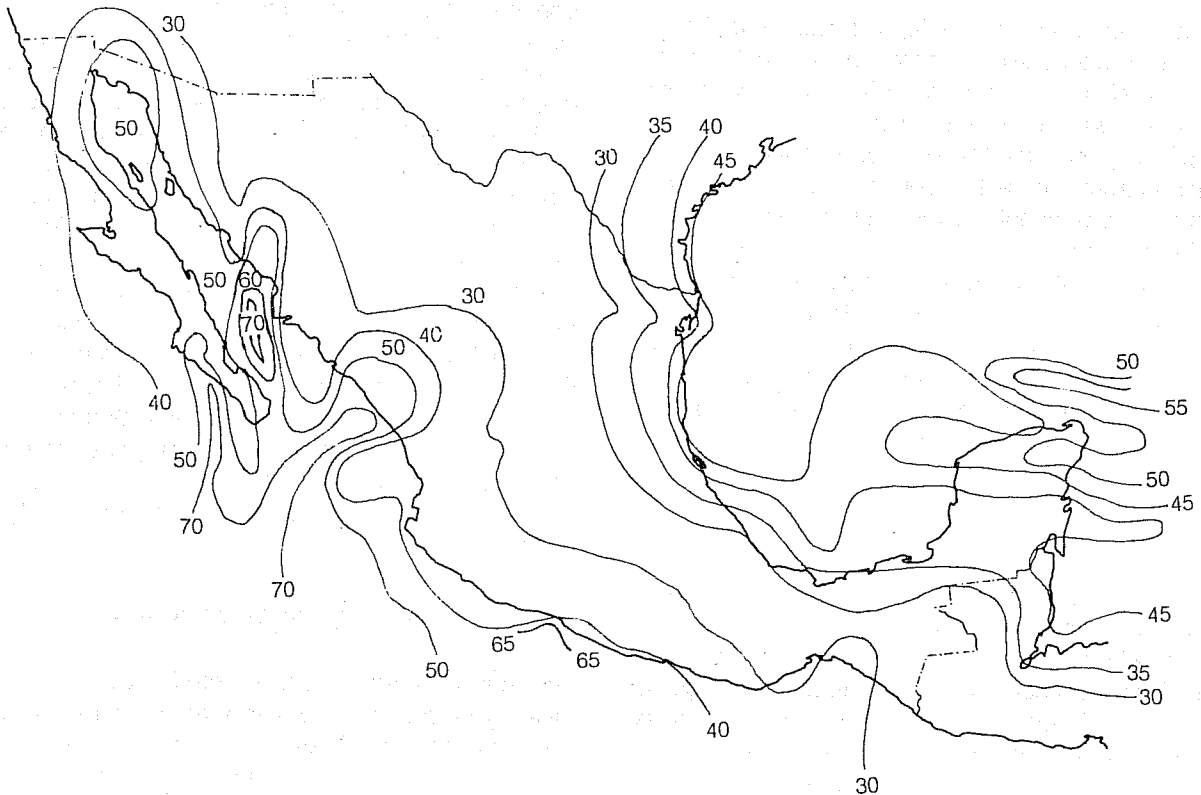
Daños por oleaje y marea de tormenta

Los daños sufridos por el efecto combinado del oleaje y la marea de tormenta en las zonas costeras de Quintana Roo, Yucatán y Tamaulipas durante el huracán Gilbert, están entre los mayores de los

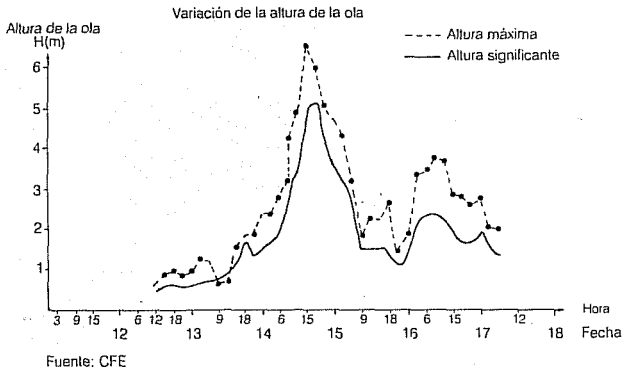
22. Velocidades máximas de viento para un período de retorno de 200 años (en km/h)



23. Velocidades máximas de viento debido a ciclones con periodo de retorno de 100 años (en m/s)



24. Registro de oleaje frente a la desembocadura del Río Cazon



que se tenga registro. A continuación se expone un panorama de las condiciones reinantes en las zonas costeras, así como un recuento de los daños característicos observados en estas zonas.

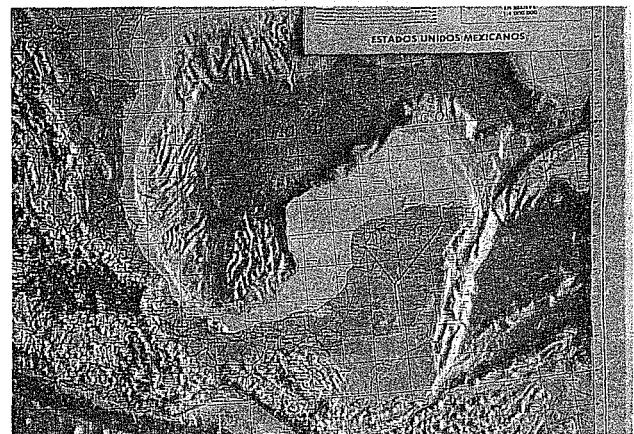
Las condiciones de oleaje (véanse ilustraciones 11 y 12) se obtuvieron con el modelo de oleaje en campos de viento huracanados del Manual de Protección de Costas (US Army Corps of Engineers, 1977). Este modelo es para aguas profundas, por lo que los resultados tienen significado solamente para los intervalos en que el huracán se encontraba fuera de la plataforma continental. Como puede observarse, las condiciones de navegación en aguas profundas deben haber sido muy peligrosas. Las únicas mediciones de oleaje que se conocen durante el huracán, fueron las del Departamento de Oceanografía de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1988), realizadas con medidores de presión en el fondo en aguas de poca profundidad (aproximadamente 10 m). Estos medidores registraron valores máximos de altura de ola significativa de cerca de 5 m con un periodo de 14.5 s, el 14 de septiembre de 1988, entre las 15 y las 18 horas. La ilustración 24 muestra un registro de dichos medidores frente a la desembocadura del río Cazon, Veracruz. Nótese que incluso estas mediciones en aguas poco profundas no implican que oleaje de esta altura incidió directamente sobre la costa, ya que hubiera roto en una profundidad aproximada de 6.5 m (en este caso con la marea de tormenta adicionada al estado normal). Estas mediciones brindan credibilidad a las magnitudes de oleaje producidas por el modelo, tomando en cuenta que en el punto de medición el oleaje ya se ha atenuado y refractado sobre una extensión de 50 km de la plataforma continental.

En cuanto a la marea de tormenta, en la zona de Puerto Progreso, Yucatán, se observó evidencia física de sobreelevaciones del nivel medio del mar cercanas a 2.5 m sobre su valor normal. Se estima que en la costa norte de la península de

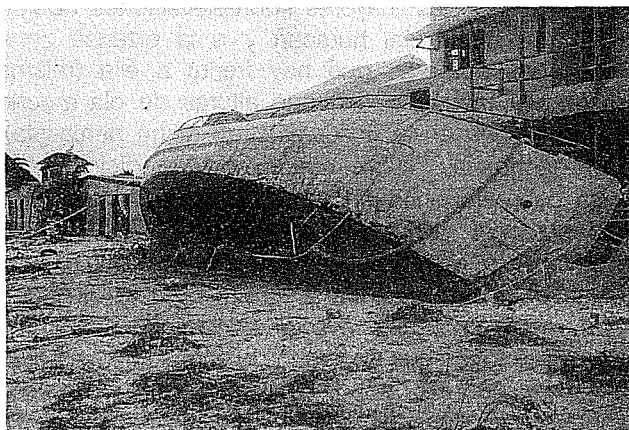
Yucatán hubo las mayores sobreelevaciones debido a la intensidad del huracán y a la extensa zona de aguas someras que hay frente a ella (misma razón por la que se estiman alturas de ola mucho menores que en la costa este de dicha península). Por desgracia, no se cuenta con mediciones de esta sobreelevación en las zonas cercanas al paso del huracán, principalmente debido a que la red del Servicio Mareográfico Nacional operada por el Instituto de Geofísica de la UNAM no está diseñada para medir o sobrevivir a estas condiciones extremas. Las mediciones que se tienen de zonas relativamente alejadas de las condiciones extremas denotan sobreelevaciones de unos 20 cm en Veracruz y de unos 35 ó 40 cm frente a la desembocadura del río Cazon (por arriba del nivel de la marea astronómica normal). En Cancún se observó evidencia física de niveles superpuestos de marea de tormenta y oleaje de más de 5 m de altura directamente sobre la costa, aunque en este lugar se estima sólo una pequeña sobreelevación del nivel del mar debido a la profundidad de las aguas frente a sus costas.

Daños en la costa este de la península de Yucatán

La costa este de la península de Yucatán fue la zona azotada con mayor severidad. La intensidad máxima del huracán se dio precisamente frente a esta costa, algunas horas antes de entrar a tierra, cerca de Puerto Morelos, Quintana Roo. Como ya se mencionó, debido a la gran profundidad de las aguas frente a este litoral (véase ilustración 25), el oleaje que se alcanzó en la costa fue significativo. El resultado más impresionante en la zona de entrada del huracán (entre Puerto Morelos y el vértice noreste de la península) fue que la primera línea de edificaciones frente a la playa sufrió daños que fluctuaron entre los graves y la demolición total. En las áreas con edificaciones ubicadas a muy



25. Batimetría en la costa del Atlántico de México



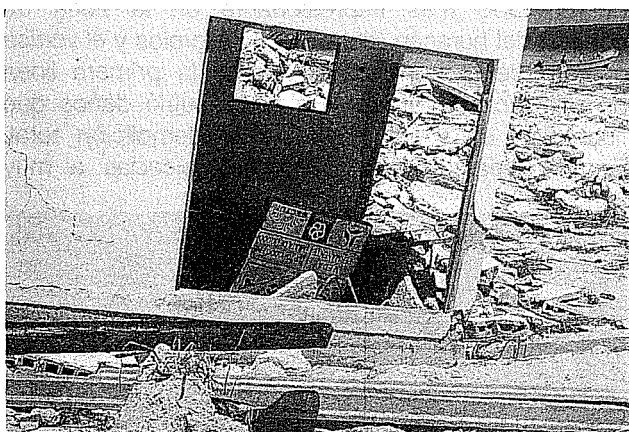
26. Restos del casco de una embarcación arrastrada tierra adentro (Puerto Juárez, Q.R.)



29. Contraste entre daños a la primera y segunda líneas de edificaciones (Puerto Morelos, Q.R.)



27. Falla de cimentación por erosión (Puerto Juárez, Q.R.)



28. Daños por socavación e impacto de oleaje (Puerto Morelos, Q.R.)

poca altura sobre el nivel del mar se observó una destrucción producida por el impacto violento de las olas, que en muchos casos actuaron sobre estructuras debilitadas previamente por la socavación de la arena por debajo de la profundidad de

cimentación, también producto del intenso oleaje (véanse ilustraciones 26, 27 y 28). La diferencia de los daños en la primera línea de las edificaciones comparada con la segunda es notable; esta última, sin dejar de estar dañada, era al menos reparable (véase ilustración 29). La socavación por debajo del nivel de cimentación fue el factor identificado como aquel que, salvo la prohibición de construir sobre la playa, debía ser atacado primero para evitar daños tan masivos y extensos como los sucedidos (véanse ilustraciones 27 y 28).

Un efecto combinado del viento, la sobre elevación del nivel del mar y el oleaje fue el arrastre de embarcaciones, en su mayoría pesqueras o de recreo, desde sus zonas de anclaje hasta ser depositadas tierra adentro, lejos de la línea de la costa, una vez que se retiraron las aguas (véase ilustración 30). Destaca el dramático caso de un barco pesquero cubano de gran tamaño que pretendió protegerse del huracán en la bolsa creada entre Isla Mujeres, Cancún y Puerto Juárez,



30. Embarcaciones arrastradas fuera de su lugar de amarre



31. Pesquero cubano arrastrado desde Isla Mujeres a Cancún

donde presumiblemente el oleaje debe haber sido menos violento. Dicha embarcación fue arrastrada varios kilómetros desde su punto de anclaje original en Isla Mujeres hasta chocar contra los edificios sobre la costa en Cancún, todo esto con los motores a plena potencia en dirección opuesta y arrastrando dos anclas sobre el fondo arenoso (véase ilustración 31). Buena parte de las bajas humanas ocurridas se dieron en situaciones similares, cuando las tripulaciones abandonaron los barcos al encallar en la playa bajo condiciones sumamente adversas.

La barra de arena donde se asienta la zona hotelera de Cancún sufrió esencialmente debido a un arrastre muy intenso de sedimentos hacia las aguas más profundas que eliminó casi por completo la arena de las playas y destruyó muchas instalaciones de recreo de los grandes hoteles al quedarse éstos sin sustentación. En esta zona quedó al descubierto la roca arenisca formada del mismo material pero con mucho mayor resistencia al arrastre que la arena (véanse ilustraciones 32, 33 y 34). Tomando en cuenta la dirección de incidencia del huracán y la gran profundidad frente a esta costa, que no produce una refracción fuerte (misma que tiende a hacer la incidencia del oleaje perpendicular a las curvas



32. Erosión del material granular en la zona hotelera de Cancún



33. Socavación por debajo del nivel de cimentación en la zona hotelera de Cancún



34. Destrucción de instalaciones de recreación en la zona hotelera de Cancún

batimétricas), este arrastre debe haber ocurrido en el periodo previo a la entrada del ojo a la tierra, debido a la corriente a lo largo de la costa (de norte a sur) generada por la incidencia oblicua del oleaje rompiente sobre la costa, que arrastró el sedimento



35. Robusto muro de concreto armado en la playa de la zona hotelera de Cancún



36. Falla de tanques de piscicultura en Puerto Morelos

suspendido por la gran agitación del agua. Sólo en la punta sur de la barra donde el litoral recurreva hacia mar adentro se notaron depósitos de arena en vez de erosión. Se estima que al menos 1 000 000 de metros cúbicos de arena fueron arrastrados en unas cuantas horas de oleaje intenso.

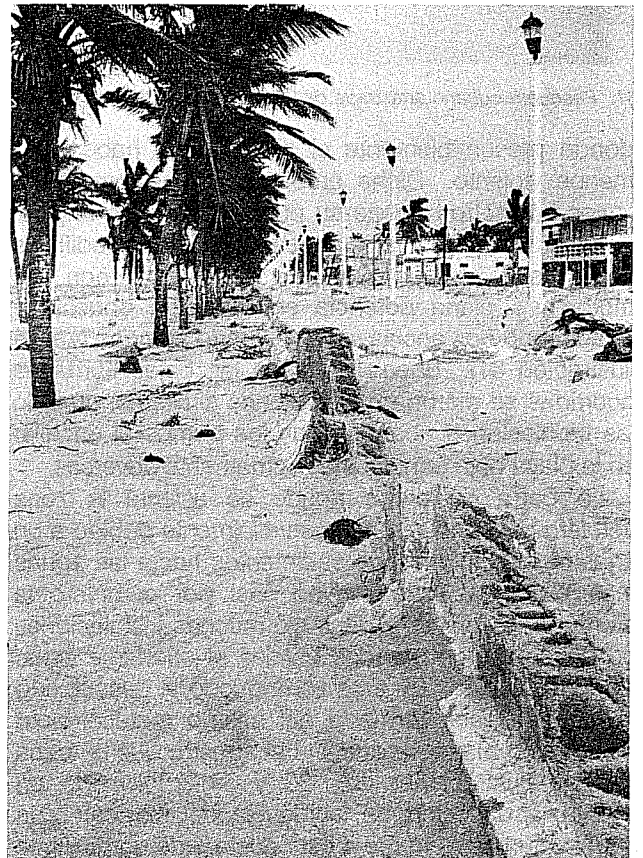
En las instalaciones de los hoteles se observó evidencia física de agua de mar que invadió las plataformas que se encontraban por arriba de 5 m sobre el nivel normal del mar. Los edificios principales no sufrieron daños de este tipo por encontrarse, en su mayoría, por arriba de 10 m sobre el nivel del mar. Destaca, que entre tanta destrucción, un muro muy robusto de concreto armado resistió el embate de frente del oleaje con sólo daños cosméticos (véase ilustración 35).

Más al sur, en la zona de Puerto Morelos, se observaron fuertes depósitos de arena en las instalaciones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM (que por cierto están diseñadas para condiciones huracanadas y soportaron admirablemente bien) y una falla

catastrófica de los tanques de piscicultura de la Secretaría de Pesca, al suspenderse las arenas sobre las que se apoyaban (véase ilustración 36). No se visitaron las islas de Cozumel y Mujeres, pero en ambos casos las estructuras importantes se encuentran en la costa interna (la que mira al continente) por lo que, salvo en casos especiales, el daño por el oleaje no debe haber sido tan extenso.

Daños en la costa norte de la península de Yucatán

Debido a la poca profundidad que hay frente a la costa norte de la península de Yucatán, la sobreelevación del nivel del mar fue muy grande y, por lo mismo, el oleaje que llegó a la costa fue relativamente pequeño (puesto que debe haber habido repetidas rompientes que disiparon mucha de su energía). En efecto, la evidencia física y la información oral proporcionada por la población señalan a la inundación de agua de mar como el principal efecto observado. Esta sobreelevación de alrededor de 2.5 m, incluso acoplada con un oleaje modesto, produjo daños importantes a las edificaciones directamente frente a la costa, en



37. Muerte del malecón de Puerto Progreso completamente demolido

poblaciones como Tel Chac y Puerto Progreso. El murete de protección de mampostería del malecón de este puerto fue demolido por completo (véase ilustración 37) y en la misma zona se observó un gran depósito de arena (estimado como una capa uniforme de alrededor de 40 cm de espesor sobre la avenida costera). La inundación y el oleaje causaron daños importantes aun a cientos de metros de la playa, como el arrastre de vehículos, el derrumbe de bardas, erosión en las calles, etc. (véase ilustración 38).

En zonas extensas, el agua de mar se conectó con las lagunas que están tras las poblaciones costeras, características de esta zona. Esta misma sobre elevación del nivel del mar hizo inútiles algunas bahías de abrigo para los botes pesqueros, pues éstos fueron arrastrados y amontonados en ocasiones a cientos de metros de la bahía, registrándose entre ellos importantes perjuicios por el impacto (véanse ilustraciones 39 y 40). Al menos en un caso, la inundación creó una nueva comunicación



40. Embarcación arrastrada y proyectada contra la primera línea de edificaciones

entre una laguna y el mar a través de un canal de unos 50 m de ancho, que antes no existía. Obviamente, hubo caminos seccionados y carpetas asfálticas dañadas. Las descripciones orales de la población, que en algunos casos recogió muebles y aparatos de su propiedad a varios kilómetros de distancia de sus viviendas, son muy impresionantes.

Daños en la costa de Tamaulipas

El huracán Gilbert incidió en la costa de Tamaulipas en una zona relativamente despoblada, por lo que la información sobre los daños típicos es escasa. Las condiciones sufridas por las poblaciones grandes más cercanas (Matamoros y Tampico) no son representativas de un huracán de extrema intensidad, ya que nunca se encontraron a menos de 150 km del ojo. Zala, Bravo y Juárez (1989), reportan daños significativos a lo largo de toda la costa de Tamaulipas, incluyendo la destrucción del 95% de las casas habitación de los pescadores en las playas de Lauro Villar, además de daños a pavimentos, instalaciones para manejo de granos y muelles, erosiones y depósitos en diversas partes del litoral, asentamientos, reacomodos, remoción de elementos y socavación en escolleras en el Mezquital, Boca Ciega, Boca Catán y el Puerto de Tampico. Las escolleras del Puerto Altamira sufrieron daños de consideración, dado que en algunos tramos la corona quedó un metro por debajo del nivel del mar. Se encontraron rastros de agua salina a una gran distancia de la costa tras el paso del huracán, lo que indica una inundación apreciable en la zona.

Daños por precipitación pluvial y avenidas

Los daños que la precipitación causó fueron básicamente en el noreste del país, Nuevo León,



38. Erosión en calles de la costa norte de la península de Yucatán



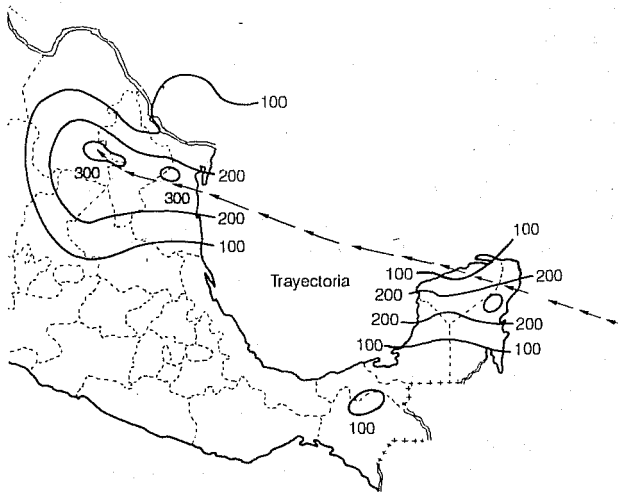
39. Embarcaciones pesqueras arrastradas fuera de la bahía de abrigo donde se protegieron

Coahuila y Tamaulipas. Una buena parte de los enormes volúmenes de agua que el huracán acumuló a lo largo de su recorrido fue precipitada en su etapa final, cuando la Sierra Madre Occidental le cortó el paso.

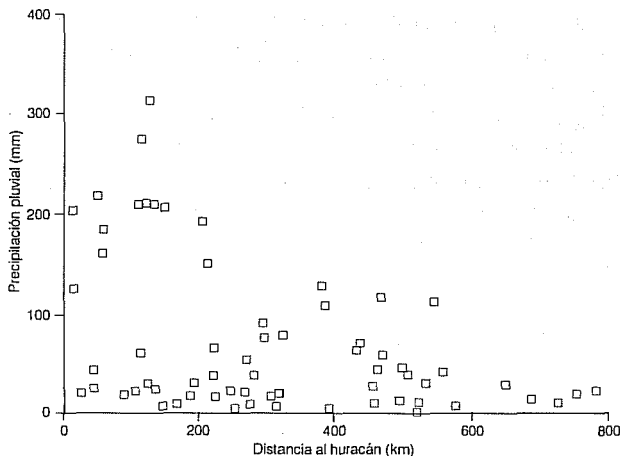
Análisis de la distribución

Se estima que a lo largo de su paso por México, el Gilbert causó una precipitación total acumulada de aproximadamente 90 000 millones de m³. En la ilustración 41 se muestran las precipitaciones acumuladas a su paso. Conviene notar que su distribución es irregular y que la mayor parte se concentró en la región noreste. En las ilustraciones 42 y 43, se señala la precipitación acumulada que causó el Gilbert en función de las distancias mínimas a su centro y de las alturas sobre el nivel del mar, respectivamente. Como se observa, la lluvia tiende a disminuir conforme se acorta la distancia a la

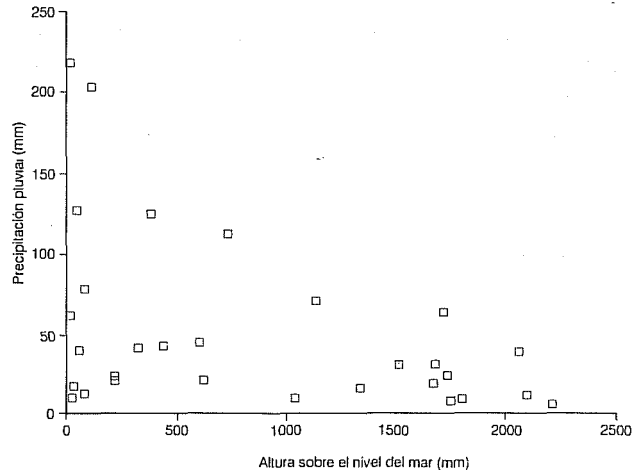
41. Precipitaciones acumuladas al paso del Gilbert (en mm)



42. Precipitación acumulada en función de la distancia mínima al centro del Gilbert



43. Precipitación acumulada en función de la altura sobre el nivel del mar



trayectoria, y a crecer conforme aumenta la altura del terreno sobre el nivel del mar.

Otra variable digna de tomarse en cuenta es la pendiente del terreno, que puede hacer que la precipitación se incremente significativamente.

Daños

Dada la intensidad y valor acumulado de la precipitación en el noreste, se generaron crecientes muy importantes en los principales ríos que cruzan los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. En la ilustración 44 se señalan los gastos máximos registrados en algunas de las corrientes afectadas; en el mismo mapa se señalan las cuencas correspondientes.

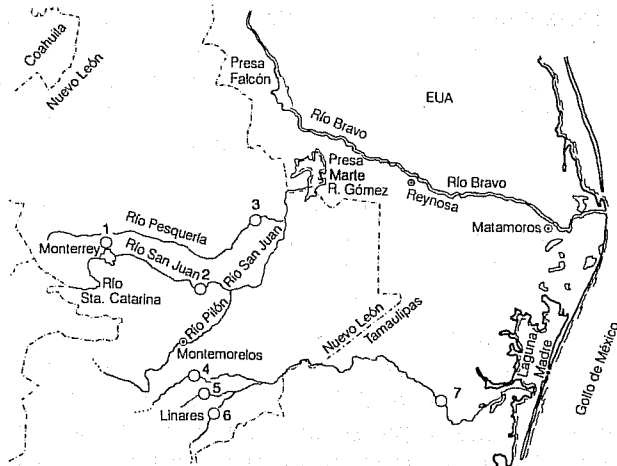
Los perjuicios más importantes sucedieron en la ciudad de Monterrey, con la muerte de más de 200 personas que fueron arrastradas por la creciente, al intentar atravesar los cauces, generalmente secos, por vados. Además, la creciente provocó la pérdida de gran cantidad de casas habitación situadas en los cauces y márgenes de los ríos afectados, principalmente en el Santa Catarina. Las tuberías que corrían por debajo del fondo original del cauce quedaron al descubierto y seriamente dañadas, al resuspenderse el material del fondo; además, hubo los daños previsibles de las instalaciones deportivo-recreativas y de las torres de transmisión de electricidad construidas en el interior del cauce. Hubo inundaciones en las márgenes de ríos, en particular el Río Bravo, con los consiguientes daños a la producción agrícola, las cintas asfálticas, las casas habitación y las bodegas, entre otros.

Cuantificación de daños

El daño más importante de cualquier desastre natural

44a. Gastos máximos durante el Gilbert

No.	Río	Est.	(A) Area Km ²	Gasto [m ³ /seg]		Gasto por unidad de área	
				(B) Gilbert (sep. 1988)	(C) Histórico	B/A	C/A
1	Sta. Catarina	Puente Zaragoza	1333	1900	178	1.43	0.13
2	Sn. Juan	Tepehuaje	3594	5880	2302	1.64	0.64
3	Pesqueira	Los Herrera	20023	900	1317	0.04	0.07
4	Potosí	Cabezones	1166	6900	1128	5.92	0.97
5	Pabillo	Linares S	994	730	472	0.73	0.47
6	Camacho	Linares N	428	1090	1086	2.55	2.54
7	Sn. Fdo.	Sn. Fdo.	14797	4400	2258	0.3	0.15

44b. Gastos máximos registrados en corrientes naturales

es, por supuesto, el de las vidas humanas perdidas. En el caso del Gilbert, y considerando su gran intensidad, éste cobró sólo un número moderado estimado en unas 250. Por desgracia, la mayor parte de las víctimas se debió a la imprudencia –intentaron pasar el río Santa Catarina en Monterrey, usando los vados que cruzan el cauce, factor al que se atribuye aproximadamente el 80% de las muertes. Este es un ejemplo típico y dramático de lo que puede significar la carencia de una cultura sobre huracanes, y sobre emergencias en general, entre la población y las autoridades de bajo nivel que son las que, en última instancia, toman decisiones que, como en este caso, pueden ser de vida o muerte.

Aunque la definición de un damnificado es muy vaga, se estima que el número total de damnificados fue de entre 100 000 y 200 000. La magnitud de viviendas afectadas está en las decenas de miles, la mayor parte de ellas en la franja costera o en los asentamientos irregulares en los cauces de los ríos. La valuación monetaria de los daños está por arriba de los 1 500 000 millones de pesos (de 1988), siendo los estados más afectados:

Quintana Roo	\$ 1 200 000 millones
Yucatán	\$ 242 000 millones
Nuevo León	\$ 195 000 millones

con daños considerables en Tamaulipas, Campeche y Chiapas. Para dar una dimensión a estas enormes cantidades basta mencionar que en sólo las pocas horas que tomó al Gilbert cruzar Yucatán, registró daños que rebasan significativamente el presupuesto total del estado para 1988.

Los perjuicios a la actividad económica en la producción de alimentos fueron importantes y, algunos de ellos, a largo plazo. Entre éstos destacan los de la flota pesquera (en Yucatán se estima que el 80% de las embarcaciones pesqueras resultó dañada), los de la agricultura en general, la producción de miel y la ganadería a nivel familiar de las zonas afectadas.

Un costo importante es el de la paralización de la actividad económica y la movilización de emergencia de grandes cantidades de personas y recursos durante el paso del huracán. Las plataformas de la Sonda de Campeche, donde se producen 1.7 millones de barriles de petróleo por día, tuvieron que suspender sus labores y evacuar a sus 5 000 empleados. Diversos puertos en el Golfo de México también paralizaron sus operaciones durante el paso del meteoro y cientos de miles de personas fueron desplazadas a lugares más seguros durante este periodo.

Las obras de infraestructura principalmente afectadas fueron las vías terrestres de comunicación (por deslaves, daños a la carpeta asfáltica, derrumbes de puentes, etc.), la red telefónica de telecomunicación (torres de transmisión por microondas), las redes de distribución de electricidad (caída de cables y postes) y de reparto de agua potable (por problemas en las tuberías y plantas de bombeo). Las conducciones de petróleo, gas natural, nitrógeno y aguas negras, sobre todo en el noreste, también sufrieron algunos daños. Hubo inundaciones importantes en las zonas costeras en Quintana Roo, Yucatán, Campeche y Tamaulipas, así como en las franjas laterales a las corrientes naturales de agua como el Río Bravo.

Aunque este es un fenómeno natural, la ecología y la fauna y flora naturales ya muy presionadas por los desarrollos humanos, también denotan condiciones inquietantes. Gran parte de la selva baja en la península de Yucatán fue afectada por el viento y la sal; incluso un año después del paso del Gilbert por la región, los grandes incendios forestales se asocian a sus efectos. Algunos estimados de daños a la fauna indican la pérdida de 10% de los flamencos y 50% de las tortugas en Yucatán. El estado natural y de relativo equilibrio que tenían las playas y litorales se vio seriamente perjudicado.

Es claro que, aun cuando los huracanes de gran intensidad se presentan en forma poco frecuente en una localidad dada, sus efectos son suficientemente

importantes como para ser considerados en todas las ramas de la actividad humana, ya sean de sobrevivencia, desarrollo o conservación.

Lecciones

Un huracán de gran intensidad como el Gilbert, pone a prueba a la sociedad en general en cuanto a su capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia y a la comunidad científica e ingenieril respecto a sus conocimientos y diseños bajo solicitaciones extremas. En este aspecto, un fenómeno como éste se aproxima a las muy comentadas, pero rara vez alcanzadas, condiciones de diseño. Es, por tanto, un momento adecuado para reevaluar de manera crítica las prácticas y el desempeño de la comunidad técnica y de la sociedad. A continuación se enumeran las lecciones claras legadas por el huracán Gilbert.

Es evidente que las prácticas de construcción en zonas afectadas por algunos efectos de los huracanes no incluyen un tratamiento adecuado para ellos. En parte, esto se debe a que muchas veces se desconocen los valores máximos probables de dichos efectos para los periodos de retorno de la obra en cuestión. Pero aun cuando sí se conozcan, como sucede con los vientos, tampoco están contemplados en los códigos y prácticas de construcción de estas zonas. Por tanto, es importante realizar estudios cuantitativos para obtener los valores máximos probables de los vientos, oleajes, mareas de tormenta y precipitación pluvial producidos por los huracanes, pero también es esencial la modificación de los códigos y las prácticas constructivas para incluir, en lo posible, los conocimientos y experiencias al respecto.

Es un hecho que las normas y prácticas de construcción de los anuncios publicitarios deben modificarse a fin de considerar, ya sea la máxima velocidad probable del viento, en la dirección más desventajosa, o para que los diseños más económicos estén dotados de elementos fusibles que fallen de una manera prevista, a velocidades menores de viento, sin posibilidad del desprendimiento de sus partes, dado que se convierten literalmente en proyectiles. Una forma efectiva de reducir el empuje del viento sobre estas estructuras es usar lámina perforada. En la actualidad, la construcción de anuncios publicitarios deja mucho que desear al respecto.

En las zonas sujetas a vientos huracanados se debe tomar en cuenta la susceptibilidad a daños considerables que pueden causar aquéllos en las construcciones ligeras, con poco peso, como

estructuras metálicas grandes aparentes, techos falsos, etc. Convendría evaluar los diferentes tipos de construcción en pruebas de túnel de viento para establecer cuantitativamente su desempeño en condiciones controladas. Por ejemplo, los contravientos de cable mostraron su eficacia, por lo que deben contemplarse para las torres de telecomunicaciones, de alumbrado, etc., ya sea en forma permanente, cuando sea posible a nivel operativo o como medida de emergencia ante la cercanía de un huracán.

En cuanto a las construcciones localizadas directamente sobre el litoral, además de tomar en cuenta las fuerzas de impacto y presión del oleaje sobrepuesto al nivel extraordinario producido por la marea de la tormenta, deben emplearse cimentaciones de concreto armado que no sólo alcancen la profundidad del terreno sólido, sino que se empotren en éste. En estos casos debe evitarse, en lo posible, la utilización de mamposterías de cualquier tipo en la zona de impacto directo, prefiriéndose el concreto armado.

Los códigos y reglamentos sobre el uso del suelo deben equilibrar el atractivo turístico de edificar directamente sobre el litoral, con el hecho de que no existe mejor protección contra los efectos de oleaje y mareas de tormenta que una franja costera deshabitada. Las muy apreciadas barras de arena frente a las costas proporcionan una excelente protección contra estos efectos. La construcción directa sobre el litoral debe cumplir con códigos muy estrictos y explícitos sobre esta materia.

El diseño de obras marítimas de protección debe incluir las condiciones de huracán. En el caso del Gilbert, los muretes de mampostería del malecón y las bahías de abrigo para embarcaciones resultaron por completo insuficientes (y en ocasiones ridículas), aunque ya habían soportado satisfactoriamente las condiciones de Norte.

Es indispensable respetar los sistemas de drenaje, natural y artificial, y no invadir los cauces con obras que, aunque desechables, reduzcan el área hidráulica de los mismos. Esto vale en especial para las zonas urbanas, donde los desbordamientos pueden resultar catastróficos. Es necesario controlar el crecimiento desordenado de las ciudades para no ocupar los cauces, aun a costa de tomar medidas impopulares para el público, que desconoce el enorme riesgo que esto significa. Para los casos irreversibles, la población en riesgo debe conocer éste y saber cómo actuar en caso de emergencia. Estas medidas son particularmente importantes en las zonas áridas y semiáridas donde los cauces permanecen sin agua por largos periodos.

Los estudios realizados después del Gilbert han dejado al descubierto la gran necesidad de que México cuente con una red de cobertura nacional para la medición y el monitoreo de las variables huracanadas. Esta debe incluir estaciones meteorológicas especiales para condiciones extremas, localizadas en posiciones estratégicas, libres de las influencias locales de topografía y urbanas; dichas estaciones deben tener medidores con los rangos adecuados y suficiente solidez como para funcionar y sobrevivir durante el paso de huracanes. También deben tener pluviómetros y, por las condiciones en que funcionarán, deberían estar altamente automatizadas, tener fuentes alternas de energía, ser independientes e incluso telemétricas.

También se requiere la medición de las mareas de tormenta mediante mareógrafos con localizaciones, rangos y robustez adecuados. Es necesaria la medición de oleaje en aguas profundas de tal manera que, después de ser *transitadas* hasta la costa, sus valores sean representativos de las condiciones en una zona costera amplia. Las mediciones de la marea de tormenta y el oleaje que se hacen hoy en día, por su escasez, localización e intermitencia resultan inadecuadas, no sólo para su utilización operativa, sino también para la calibración de modelos de pronóstico. En forma idónea, esta red debe manejar información en tiempo real y puede ser combinada con otros propósitos afines (como el pronóstico de tsunamis, estudios oceanográficos, etc.). Los lugares estratégicos más convenientes para empezar con un programa piloto son las islas de Cozumel, en el Caribe, y Socorro en el Pacífico, así como las plataformas marinas de Petróleos Mexicanos en la Sonda de Campeche y la ya extensa red de terminales aéreas en la costa de México.

La mayor parte de las muertes debidas al Gilbert ocurrió por el desconocimiento de la población acerca de qué es un huracán y qué puede esperar a su paso. Es fundamental difundir una cultura de huracanes entre los habitantes de zonas afectadas por ellos, de tal manera que puedan tomar decisiones *educadas* sobre sus personas y bienes al acercarse una perturbación meteorológica de este tipo. Esto tiene especial validez entre los técnicos, líderes comunitarios y encargados de las medidas de emergencia, quienes deben decidir con premura y limitación de recursos sobre el bienestar de la población. Esto debe darse en todos los niveles, pues en múltiples ocasiones las decisiones críticas recaen en los más bajos. Al respecto, basta recordar el lamentable suceso de los autobuses que intentaron cruzar el Río Santa Catarina a través de los vados. Un mecanismo eficaz

para alcanzar a toda la población es incluir esta información en los programas de las escuelas en las zonas potencialmente afectadas. Debe evitarse la cobertura periodística confusa y superficial, que casi siempre proporciona información errónea, más útil para charlas de café que para decidir bajo condiciones de emergencia.

Los pronósticos meteorológicos deben incluir no sólo la localización probable del ojo del huracán y el valor de sus vientos máximos, sino también las condiciones marítimas y los valores esperados de los efectos destructivos para diferentes localidades en la zona afectada, así como recomendaciones sobre zonas por evacuar y los lapsos disponibles para ello. Idealmente, los pronósticos deben señalar la evolución en el tiempo de dichos efectos, para que las decisiones locales se tomen con base en la mayor información posible.

Conclusión

En septiembre de 1988, el huracán Gilbert azotó el territorio mexicano causando grandes daños y pérdidas. Por su gran intensidad, en algunos aspectos alcanzó las condiciones de diseño de muchas obras, por lo que las lecciones que dejó son de gran importancia. En este sentido, representa una rara oportunidad para verificar los criterios de diseños, las prácticas de construcción y las medidas de emergencia bajo condiciones extremas. La comunidad científico-ingeneril tiene la responsabilidad de utilizar dichas lecciones para mejorar su preparación, a fin de afrontar fenómenos similares en el futuro.

El momento de hacerlo es ahora y no después del próximo gran huracán. Al analizar sus efectos y consecuencias, no debemos cegarnos por el título amarillista del huracán del siglo, sino por el contrario, considerarlo uno más de los huracanes intensos que afectarán a México en el futuro próximo. Es necesario hacer conciencia de que en gran parte, los daños se produjeron no por las condiciones máximas del meteoro (en su evolución en el tiempo y en la periferia del ojo), sino por otras mucho menos severas, y que una mejor preparación reducirá sensiblemente la posibilidad de daños futuros. Por su magnitud, los huracanes intensos, aunque sean fenómenos poco comunes, son factores importantes en la planeación, diseño y operación de obras y de las actividades humanas en general.

Referencias

Aguirre, R.J., Sánchez-Sesma, J. y Villegas, V.A., *Las*

- velocidades máximas del viento en México, III Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Morelia, Mich., abril, 1982.
- Aguirre, R.J., Sánchez-Sesma, J. y Villegas, V.A., *Procesamiento de la información*, Reporte interno núm. 6, Proyecto 3245, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1982.
- Anthes, R., Tropical Cyclones, *Monografía en Ciencias Atmosféricas e Hidrológicas*, vol. 1, Omar A. Duero (ed.), Universidad Veracruzana, Fac. de Física, Centro de Meteorología Aplicada, 1979.
- Batts, M.R., Russell, L.R. y Simiu, E., "Hurricane wind speeds in the USA", *NBS Building Science*, Series 124, Nat. Bur. of Standards, Washington, 1980.
- Carrier, G.F., Hammond, A.L. y George, O.D., "A model of the mature hurricane", *J. Fluid Mech.*, 47, pp. 145-170, 1971.
- Comisión Federal de Electricidad, *Oleaje extraordinario en el Golfo de México producido por el huracán Gilberto*, Departamento de Oceanografía, Unidad de Estudios de Ingeniería Civil, noviembre, 1988.
- Colón, J.A., "A study of hurricane tracks for forecasting purposes", *AMS, Monthly Weather Review*, vol. 81, núm. 3, marzo, 1953.
- Crutcher, H.L. y Quayle, R.G., "Mariners worldwide climate guide to tropical storms at sea", *NAVAIR 50-ic-61*, Naval Weather Service Command, marzo, 1974.
- Georgiou, P.N., Davenport, A.G. y Vickery, B.J., "Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclons", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 13, pp. 139-152, 1983.
- Graham, H.E. y Nunn, D.E., "National hurricane research project", Reporte núm. 33, *Weather Bureau*, US Dept. of Commerce, Washington D. C., 1959.
- Ho, F.P., Schwerdt, R.W. y Goodyear, H.V., "Some climatological characteristics of hurricane and tropical storms, Gulf and East coasts of the United States", *NOAA Tech. Rep. NWS 15*, Washington D.C., 1975.
- Ishizaki, H., *Wind damage and wind load problems in Japan*, Proceedings of USA-Japan Seminar, Wind Loads on Structures, Hawai, 1980.
- Jarvinen, B.R. y Caso, E.L., "A tropical cyclone data tape for the North Atlantic basin, 1886-1977: contents, limitations and uses", *NOAA Tech. Mem.*
- Kacheturian, N. et al., en Cohn. (ed.), *An introduction to structural optimization*, University of Waterloo, 1969.
- Miller, B.I., "Characteristics of hurricanes", *Science*, vol. 157, núm. 3795, pp. 1389-1399, sept. 22, 1967; NWS NHC 6, National Hurricane Center, Miami, 1978.
- Russell, L.R., "Probability distributions for hurricane effects, Journal of the Waterways Harbors and Coastal Engineering Division", *Proceeding of ASCE*, vol. 97, núm. WW1, febrero, 1971.
- Russell, R.L. y Schueller, G.F., "Probabilistic models for the Texas Gulf coast hurricane occurrences", *Journal of Petroleum Technology*, marzo, 1974.
- Sánchez-Sesma, J., Aguirre, R.J. y Villegas, V.A., *Valores para el diseño de la velocidad máxima del viento en México*, IV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Gto., marzo, 1984.
- Sánchez-Sesma, J., Aguirre, J. y Sen, M., "A simple modeling procedure for the estimation of cyclonic wind speeds", *Journal of Structural Engineering*, ASCE (aceptada, revisada y enviada para ser publicada en febrero de 1988).
- Simiu, E. y Scanlan, R.H., *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering*, John Wiley and Sons, Nueva York, 1979.
- Thom, H.C.S., "Toward a universal climatological extreme wind distribution", *Proceedings of Int. Res. Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures*, Ottawa, 1967; Univ. of Toronto Press, vol. 1, pp. 669-684, 1968.
- Thom, H.C.S., "Engineering climatology of wind speed with special reference to the Pacific area", *Proceedings of USA-Japan Research Seminar*, Hawai, octubre, 1970.
- Thompson, P. y O'Brien, T., "Fenómenos atmosféricos", *Colección Científica Time Life*, México, 1979.
- US Army Corps of Engineers, *Shore protection manual*, Coastal Engineering Research Center, 1977.
- Zala, Flores, N., Bravo González, H. y Juárez Rueda, M., *Efectos del huracán Gilberto en las costas mexicanas*, I Congreso Internacional de Ingeniería Marítima Portuaria, AMIP, ciudad de México, octubre, 1989.