

II. ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGO POR INUNDACIONES COSTERAS POR MAREA DE TORMENTA

Óscar Arturo Fuentes Mariles, Lucía Guadalupe Matías Ramírez, Martín Jiménez Espinosa, David Ricardo Mendoza Estrada y Carlos Baeza Ramírez

RESUMEN

En este capítulo se propone una guía metodológica para la elaboración de mapas de peligro y riesgo por inundaciones costeras. Con ella se pretende auxiliar a las unidades municipales y estatales de Protección Civil que enfrentan problemas con terrenos de baja elevación topográfica ubicados cerca del mar y que están sujetos al impacto de ciclones tropicales.

2.1 INTRODUCCIÓN

Existen diversos mecanismos que pueden originar inundaciones, una explicación más abundante sobre este tema se puede encontrar en el fascículo *Inundaciones* publicado por el Cenapred¹.

En el caso particular de los ciclones tropicales, éstos provocan un ascenso mayor al habitual del nivel medio del mar, lo que origina la entrada de agua marina a las zonas bajas que colindan con el océano y pueden ocasionar inundaciones. Este levantamiento del nivel medio del mar se debe, principalmente, a los vientos de los ciclones tropicales y se le denomina *marea de tormenta*.

La marea de tormenta es la principal causa de muertes ocasionadas por ciclones tropicales, por lo que su estudio y las recomendaciones que de éste se deriven servirán para mitigar el riesgo que generen estos meteoros.

Aunque en menor proporción que los vientos, la amplitud de la marea de tormenta también depende de la presión atmosférica, así como de algunos aspectos físicos del lugar, tales como la forma que tiene la línea de la costa, la configuración del terreno fuera del mar y las profundidades del fondo marino cercano a tierra.

El viento que sopla en la superficie del mar también genera oleaje. Cuanto más grande es su magnitud, la extensión del área donde actúa y el tiempo que dura su acción, resultan ser mayores las olas. Cuando la marea de tormenta es grande, el mar suele tener olas altas y, en estos casos, se incrementa notablemente el efecto destructor de ellas, ya que pueden impactar sobre construcciones costeras y viviendas. La combinación de la marea de tormenta grande y el oleaje alto también puede destruir instalaciones portuarias, romper obras de defensa costera, hundir embarcaciones o erosionar las playas. Este último, puede socavar la zona de apoyo de los cimientos de los edificios y otras clases de estructuras localizadas encima de ellas, lo que podría ocasionar su falla.

Otro fenómeno natural que puede generar una inundación costera es el tsunami, que a diferencia de las anteriores, se forma en un lapso corto, de tan solo unos minutos. Más información sobre el tema se encuentra en el fascículo *Tsunamis*, elaborado por el Cenapred¹.

¹ En la sección de publicaciones electrónicas de la página del CENAPRED www.cenapred.unam.mx se pueden consultar los fascículos

También el agua marina de las inundaciones por marea de tormenta deteriora la vegetación y el suelo donde ocurren. En la zona costera se albergan distintos sistemas ecológicos muy valiosos y productivos biológicamente, como son la vegetación de las playas, los manglares y los arrecifes de coral. Ellos, al igual que las dunas de arena, desempeñan un papel importante en lo que se refiere a la protección contra inundaciones y la erosión de las playas, por lo que ambos deben cuidarse y protegerse para asegurar su preservación.

2.1.1 Identificación del peligro por inundaciones costeras

En esta guía se describe la obtención de mapas de peligro y de riesgo por inundaciones costeras de la marea de tormenta.

Estos mapas permitirán localizar los lugares de elevación topográfica contiguos al mar, que tienen mayor probabilidad de ser inundados.

En el libro *Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica*” editado por Cenapred, se establece el marco conceptual sobre riesgo, peligro y vulnerabilidad, términos que se manejarán a lo largo de este capítulo.

En general, la obtención de las zonas que se pueden inundar es útil para identificar el peligro y riesgo de daños, cuando se relaciona el espesor de la capa de agua de ellas con respecto a los bienes materiales y centros poblacionales que están dentro de las mismas. La estimación de la zona de inundación y su profundidad sirven para evaluar los daños que provoca.

2.2 MAREA DE TORMENTA

La marea de tormenta es el ascenso del nivel medio del mar debido a la acción de los vientos de los ciclones tropicales sobre una región del océano. Este levantamiento tiene la apariencia de un domo de agua, agregado a la superficie habitual del mar. Esta marea dura de 12 h a 3 días, puede causar inundaciones en las zonas bajas del continente, colindantes a la costa, y oleaje que impacte sobre las estructuras y construcciones cercanas al mar, así como la remoción de la arena de las playas por las corrientes de agua que inducen las olas. Cuando al ascenso del nivel del mar (pleamar), correspondiente a la marea ordinaria (astronómica) se combina con la marea de tormenta, provoca una sobreelevación más alta.

Los huracanes Janet (1955), Gilbert (1988), Isidore, Kenna (2002) y Wilma (2005) dieron lugar a una marea de tormenta del orden de los 4 m de altura y a un fuerte oleaje, que causaron daños severos en México (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Altura de la marea de tormenta de algunos huracanes en México

Nombre del huracán	Categoría	Fecha	Marea de tormenta (m)	Decesos
Janet	4	21-30 sep, 1955	4.8	164
Gilbert	5	8-20 sep, 1988	2.4-4	--
Keith	4	28 sep-6 oct, 2000	2.7-3.6	14
Isidore	3	14-27 sep, 2002	1.8-3.1	--
Kenna	5	22-25 oct, 2002	2.7-3.7	--

2.2.1 Vientos de un ciclón tropical

La extensión y la profundidad de la inundación causada por la marea de tormenta dependen, principalmente de los vientos del ciclón tropical. Durante la ocurrencia de este fenómeno y en una amplia región de la superficie terrestre cercana a él, se presentan vientos fuertes. A los vientos que soplan en distintos puntos de esta región se les llama campo de vientos (figura 2.1).

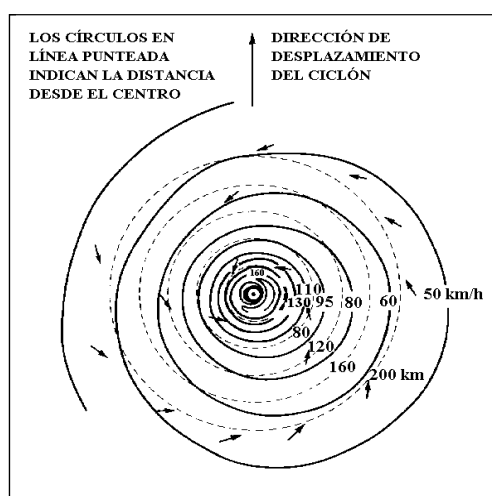


Figura 2.1. Campo de viento de un ciclón tropical

La magnitud de la velocidad de los vientos varía dependiendo de la distancia al centro, llamado usualmente *ojo* del ciclón tropical, en cualquier dirección. En su ojo, el viento es casi nulo y aumenta al alejarse de él, hasta alcanzar un valor máximo, a una distancia del orden de 50 km, llamada *radio de máximo viento*; luego disminuye gradualmente (figura 2.2).

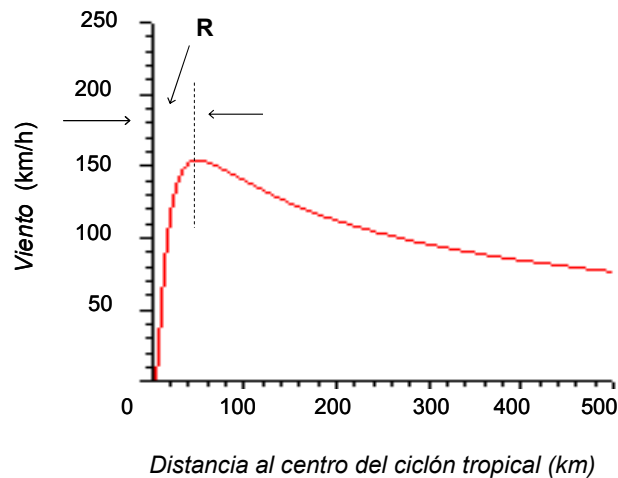


Figura 2.2 Variación de la magnitud de la velocidad del viento con la distancia

Los vientos son más fuertes cuando es intenso el ciclón tropical. Por ello, bajo las mismas condiciones de distancia y dirección de vientos, los huracanes de categoría 5 en la escala Saffir-Simpson, provocan una marea de tormenta más alta comparada con aquella que forman los de categoría 1 (CENAPRED, 2003).

La amplitud de la marea de tormenta no permanece constante, cambia a lo largo del tiempo debido a que, al desplazarse el ciclón tropical, modifica sus vientos. Es por ello que para conocer los efectos del viento, se requiere indicar su magnitud, dirección y sentido.

La dirección y el sentido del viento están determinados por el punto cardinal de donde procede. Cuando se habla de un viento del este, se refiere a un viento que sopla desde el este (dirección) hacia el oeste (sentido del viento). Para conocer la dirección del viento se utiliza el aparato llamado *veleta*, y para definir su magnitud (velocidad) se emplea el instrumento denominado *anemómetro* (figuras 2.3 y 2.4).



Figura 2.3 Aparato para obtener la dirección del viento (veleta)



Figura 2.4 Instrumento para medir la velocidad del viento (anemómetro)

2.2.1.1 Cálculo de la magnitud de los vientos de un ciclón tropical

Los vientos de los ciclones tropicales son una gran masa de aire con corrientes en forma de remolino que giran en torno a un centro, donde la presión atmosférica es la más baja del entorno, y con un diámetro del orden de 500 km.

Las masas de aire de un ciclón tropical en el hemisferio boreal giran en dirección contraria al movimiento de las manecillas del reloj. Los vientos se dirigen hacia el centro del ciclón en un ángulo aproximado de 30° (con respecto a la tangente de sus isobaras).

La magnitud del viento puede calcularse a partir de un balance entre varias fuerzas que lo generan. Cuando se toman en cuenta las fuerzas debidas a la presión del aire, la forma curva de la región donde sopla y la rotación de la Tierra, se obtiene el viento que se denomina gradiente. El viento gradiente proporciona una buena aproximación al viento que generan los ciclones tropicales, a partir del cual, se calcula el viento máximo sostenido.

Los ciclones tropicales se clasifican con base en la velocidad del viento máximo sostenido o la presión atmosférica que existe en su centro. El viento máximo sostenido se refiere al viento medio más grande registrado durante un minuto, a una altura aproximada de 10 m sobre la superficie. A un ciclón se le llama *depresión tropical* cuando sus velocidades están comprendidas entre 50 y 62 km/h, *tormenta tropical* si sus vientos están entre 63 km/h y 119 km/h, y *huracán* cuando las velocidades son mayores que 120 km/h.

El viento sostenido (en m/s) más grande ocurre a una distancia R , desde el centro del ciclón tropical y se puede calcular con la siguiente expresión:

$$V = 20.1834(1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618 R \sin \phi + 0.50 V_d \quad (2.1)$$

donde p_0 es la presión en el centro del ciclón tropical en milibares (mb); V_d la velocidad de desplazamiento del ciclón tropical (en km/h) y ϕ es la latitud en el centro del ciclón (en grados).

Para estimar el valor R del radio de máximo viento (en km), se puede usar la siguiente expresión:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0} \quad (2.2)$$

Donde:

p_0 es la presión central,

e es la base del logaritmo natural ($e=2.71828\dots$)

Con la figura 2.5 se puede obtener la velocidad máxima del viento sostenido (en km/h) de un ciclón tropical estacionario (siempre y cuando su velocidad de desplazamiento sea nula; es decir, cuando $V_d = 0$) a partir de la presión central y la latitud (en grados) del ojo del ciclón. Por ejemplo, si éste se encuentra en movimiento a la velocidad del viento se le adiciona la mitad de la velocidad de desplazamiento del ciclón, esto quiere decir, si la velocidad del viento es de 200 km/h y la velocidad de desplazamiento es de 25 km/h, la velocidad del viento sostenido será de 212.5 km/h.

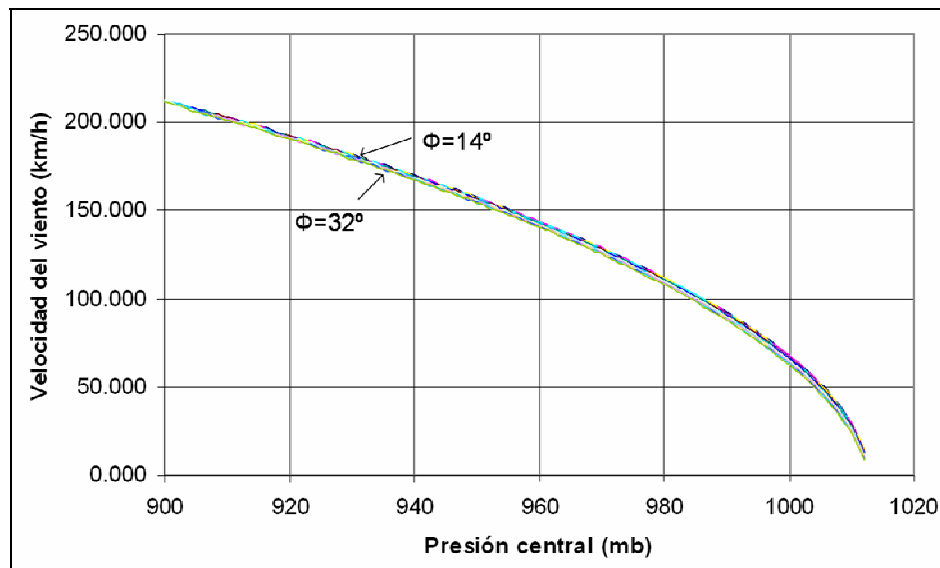


Figura 2.5. Velocidad del viento sostenido para distintos valores de presión central y latitudes del centro de un ciclón tropical sin desplazamiento

En la tabla 2.2 aparecen algunos valores de la velocidad del viento sostenido para distintas presiones centrales en un ciclón tropical que fueron obtenidas con la ecuación 2.1. En caso de que el ciclón tropical se traslade a otros sitios, se requiere aumentar los valores por la mitad de la velocidad de desplazamiento V_d .

Tabla 2.2 Velocidad del viento sostenido para algunos valores de presión

ϕ P_0	Latitud en grados								
	15	17	19	21	23	25	27	29	31
995.0	80.94	80.33	79.73	79.13	78.55	77.97	77.40	76.84	76.29
982.5	107.41	106.88	106.36	105.84	105.34	104.84	104.34	103.86	103.38
972.5	124.83	124.36	123.90	123.44	122.98	122.54	122.10	121.67	121.25
955.0	150.76	150.37	149.99	149.62	149.25	148.89	148.53	148.18	147.83
932.5	178.81	178.52	178.22	177.93	177.65	177.37	177.09	176.82	176.56
920.0	192.67	192.41	192.16	191.91	191.66	191.42	191.18	190.995	190.72

Cuando no se dispone de la velocidad de traslación de los ciclones tropicales, se puede asignar el valor de 20 km/h (éste se consideró en el Sistema de Alerta Temprana (SIAT-CT) de la Secretaría de Gobernación de México) o bien, tomarla de las figuras 2.6 y 2.7. A la velocidad de traslación se le proporciona el valor de la velocidad media de desplazamiento (en km/h) de los ciclones tropicales, que se encuentra a partir de la latitud y longitud del lugar de interés.

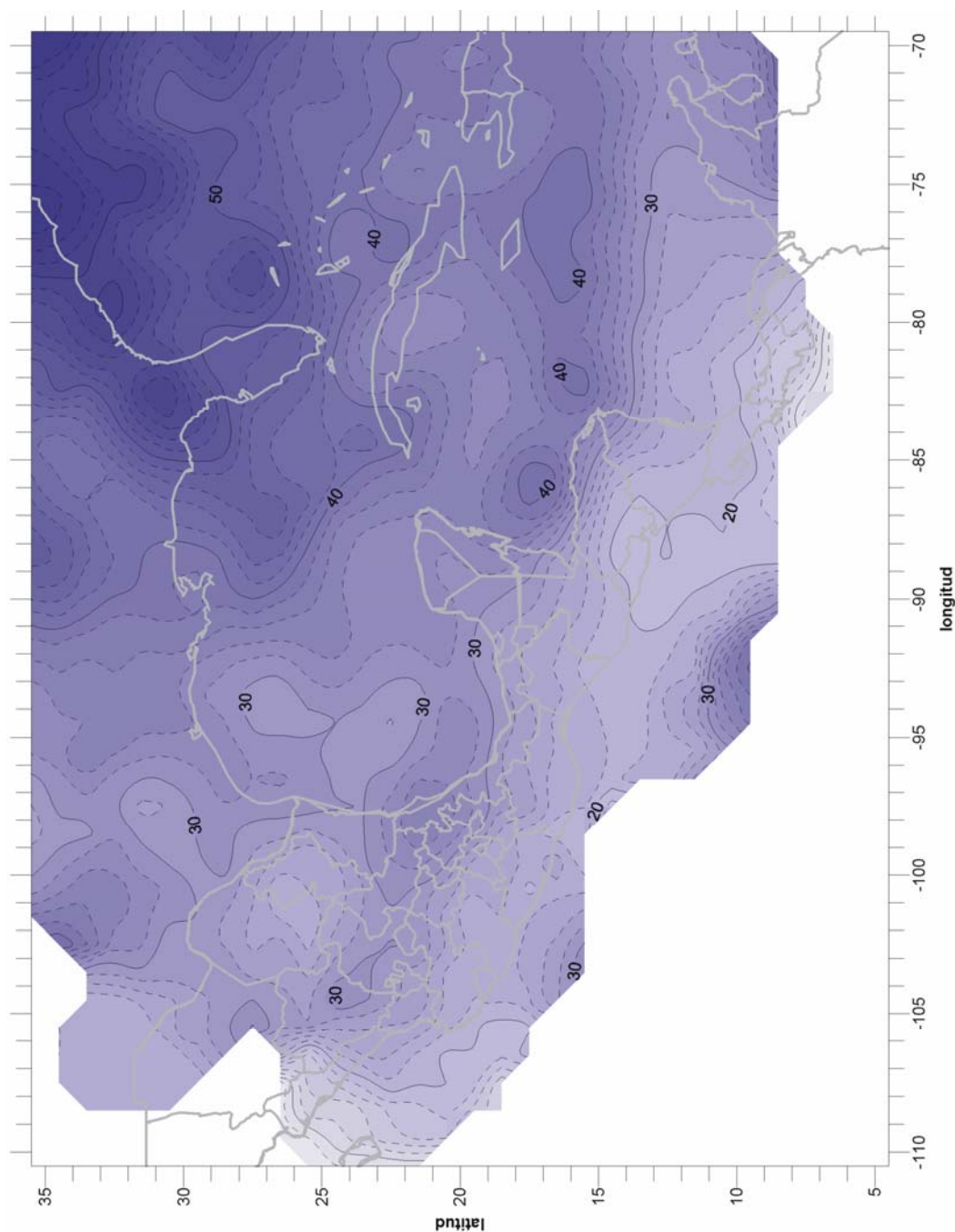


Figura 2.6 Máxima velocidad de traslación de los ciclones tropicales en el Atlántico (Rosengaus, et al., 2002)

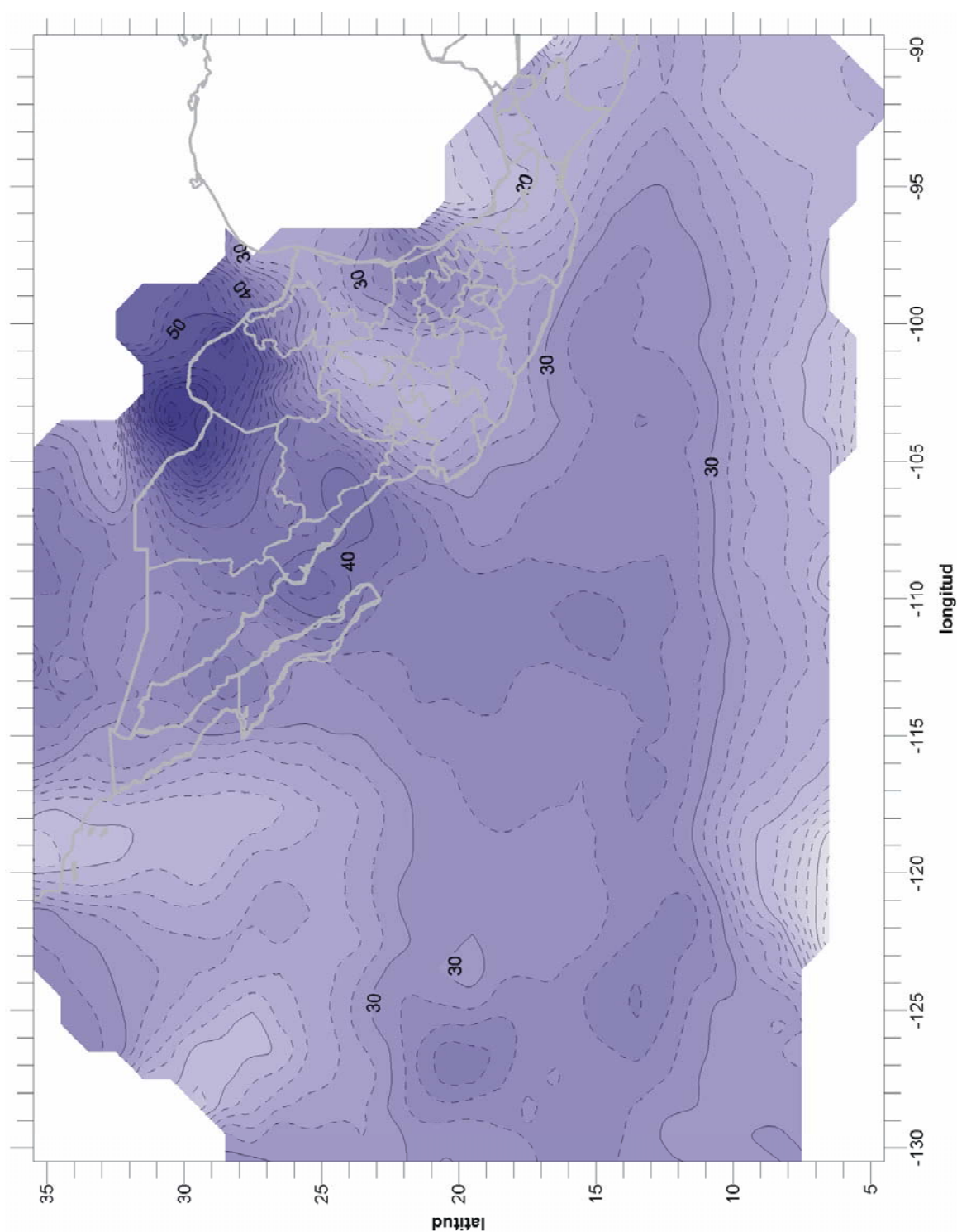


Figura 2.7 *Máxima velocidad de traslación de los ciclones tropicales en el Pacífico (Rosengaus, et al., 2002)*

2.2.1.2 Zona del ciclón tropical con vientos fuertes

En la región cercana al centro del ciclón tropical se presentan los vientos más intensos, principalmente entre las distancias mitad del radio de máximo viento y el doble de dicho radio; es decir, entre $0.5R$ y $2.5R$, siendo R el radio de máximo viento. Esta región con forma de anillo (figura 2.8) es donde se presentan los vientos más grandes.

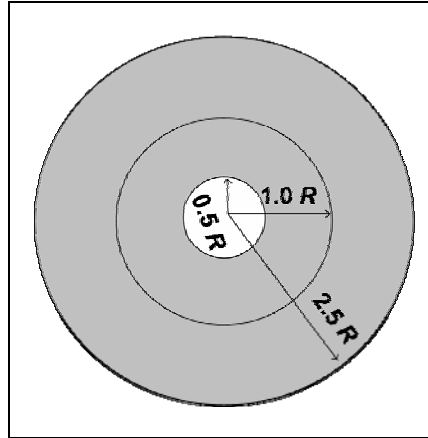


Figura 2.8 Localización del radio de máximos vientos
(en color gris aparece el anillo que forma dicha zona)

Ejemplo 2.1

Para un ciclón tropical que se localiza en cierto lugar a la latitud 24°N y longitud 95°W , con una presión central de 934 mb (que corresponde a un huracán categoría 4), encuentre la velocidad de sus vientos máximos sostenidos.

Solución:

Como no se dispone del valor del radio de máximo viento, se estima por medio de la ecuación 2.2

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

$$R = 0.0007 e^{0.01156(934)} = 0.0007 e^{10.79704}$$

$$R = 34.21 \text{ km}$$

Para la latitud de 24°N y la longitud 95°W , de la figura 2.6 se considera que $V_d = 30 \text{ km/h}$

Usando la ecuación 2.1

$$V = 20.1834(1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618 R \sin \phi + 0.50 V_d$$

$$V = 20.1834(1013 - 934)^{0.5} - 0.2618(34.21) \sin(24) + 0.50(30)$$

$$V = 20.1834(8.8882) - 0.2618(34.21)(0.4067) + 0.50(30)$$

$$V = 190.75 \text{ km/h}$$

Por medio de la figura 2.5 se aprecia que, para $p_0 = 934 \text{ mb}$, la velocidad del viento para un ciclón estacionario es del orden de 175 km/h, por lo que al sumar la mitad de la velocidad de desplazamiento $0.5(30)=15 \text{ km/h}$, queda $V = 175 + 15 \approx 190 \text{ km/h}$.

De la tabla 2.2 se obtienen los valores cercanos, por ejemplo para 24° y 932.5 mb , la velocidad es del orden de 177 km/h, al aumentar la mitad de la velocidad de desplazamiento, $V = 177 + 15 \approx 202 \text{ km/h}$.

2.2.2 Aspectos físicos del lugar que influyen en la marea de tormenta

La amplitud de la marea de tormenta depende de varios factores físicos del lugar donde se desee conocerla, como es el fondo marino, o batimetría, la línea de costa y su ubicación respecto de la trayectoria del ciclón y los vientos de éste.

2.2.2.1 Batimetría cercana a la zona de estudio

La marea de tormenta en aguas profundas es de poca importancia, debido al ascenso del orden de un centímetro por cada milibar (o hectopascal) de descenso de la presión atmosférica; en cambio, si los vientos del ciclón tropical se presentan sobre regiones marinas donde la profundidad de las aguas es menor de 200 m, adquiere valores de más de un metro.

Los métodos de cálculo de la marea de tormenta más precisos requieren de las curvas batimétricas, como las que se muestran en la figura 2.9.

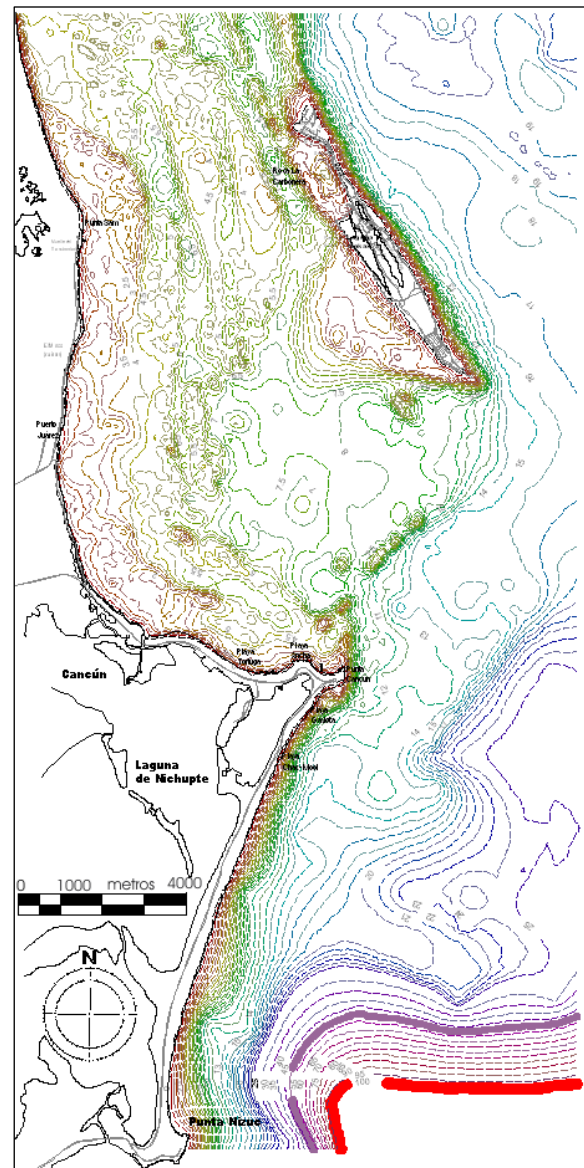


Figura 2.9 Curvas batimétricas de la zona cercana a Cancún, Quintana Roo

2.2.2.2 Configuración de la línea de costa

La forma de la línea de costa es importante debido a que de ello depende la mayor cantidad de agua que se acumule. La sobreelevación del nivel medio del mar será mayor si ocurre en las bahías, ya que dentro de su contorno no se permite que el agua fluya hacia los extremos.

De igual manera, el ángulo que forma la trayectoria del huracán con la línea de costa tiene gran importancia. Cuando se genera un ángulo de 90° (figura 2.10), puede acumular más agua cerca de la costa, ya que en la superficie del mar se recibe la mayor cantidad de energía del viento, por lo que será más grande la amplitud de la marea de tormenta.

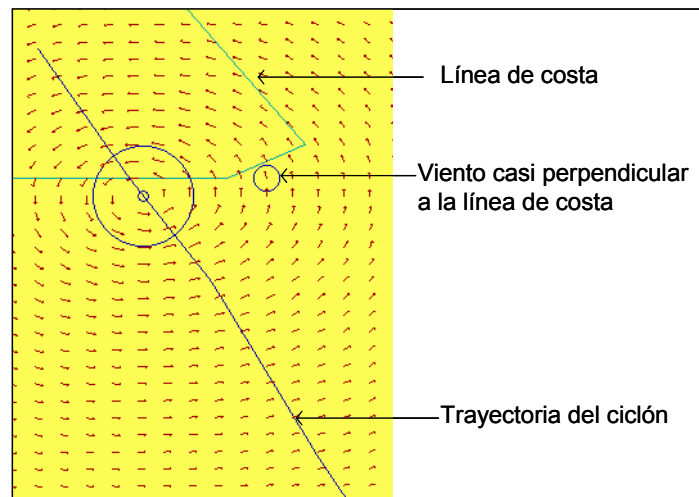


Figura 2.10 Campo de vientos y trayectoria de un huracán que entra a tierra firme

2.2.3 Método simplificado para calcular la marea de tormenta

Para obtener las elevaciones del nivel medio del mar debido a la marea de tormenta, a lo largo del tiempo, dentro de un área de interés cercana al continente, se requiere simular el ascenso del nivel medio del mar y las velocidades marinas que provocan los vientos del ciclón tropical sobre la superficie del océano.

La simulación del ascenso del mar se puede realizar por medio de un programa de cómputo que resuelva las ecuaciones de movimiento del agua dentro de una región expuesta a los vientos del ciclón tropical. Para ello, se toma en cuenta el campo de viento que presenta el ciclón tropical en diferentes momentos, así como información detallada del fondo marino próximo a la costa y la topografía del terreno en el continente. Sin embargo, para una escala geográfica media, se puede estimar la elevación más alta que alcanza la marea de tormenta durante la presencia del ciclón tropical con una adecuada aproximación y un método simplificado.

Las magnitudes, direcciones y sentidos de los vientos que desarrolla el ciclón tropical para cada una de las posiciones que ocupa a lo largo de su trayectoria de desplazamiento, son la base del cálculo de la máxima elevación que alcanza el nivel medio del mar durante la marea de tormenta.

2.2.3.1 Estimación de la altura máxima de la marea de tormenta

La elevación h (en m) más grande que alcanza a ascender el nivel medio del mar por la marea de tormenta (amplitud de la marea de tormenta), puede ser calculada a partir de la velocidad V del viento sostenido (km/h) y del radio de máximo viento R (en km). Ambos aspectos fueron tratados en el inciso 2.1.1.

Con base en el análisis de mediciones sobre elevaciones de la marea de tormenta de algunos ciclones tropicales, y de expresiones empíricas propuestas en Estados Unidos y en Japón, se obtuvo una expresión para conocer la amplitud máxima de la marea de tormenta debida a un ciclón tropical:

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F \quad (2.3)$$

Donde:

h es elevación (en metros) más alta que alcanza la marea de tormenta en el mar cerca de la costa.

R es el radio de máximo viento (en km)

V es la velocidad máxima del viento sostenido (en km/h) calculado a 10 m sobre la superficie media del mar a la distancia R del centro del ciclón tropical (puede obtenerse a partir de la presión central del ciclón tropical, radio de máximo viento, latitud del centro del ciclón tropical y la velocidad de traslación como se describió en 2.2).

F es un factor correctivo por dirección del viento.

El factor correctivo (F), se determina a partir del ángulo α que forma la dirección de desplazamiento del ciclón tropical con respecto a la línea de costa próxima al sitio de interés. Este factor se determina por medio de la expresión 2.4

$$F = \begin{cases} 0.6(1 + \sin \alpha) & \text{si } 0^\circ < \alpha < 180^\circ \\ 0.6 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (2.4)$$

En la figura 2.11 se muestra el ángulo α que existe en la trayectoria del ciclón tropical y la línea de costa, para dos casos distintos de dirección del desplazamiento del meteoro.

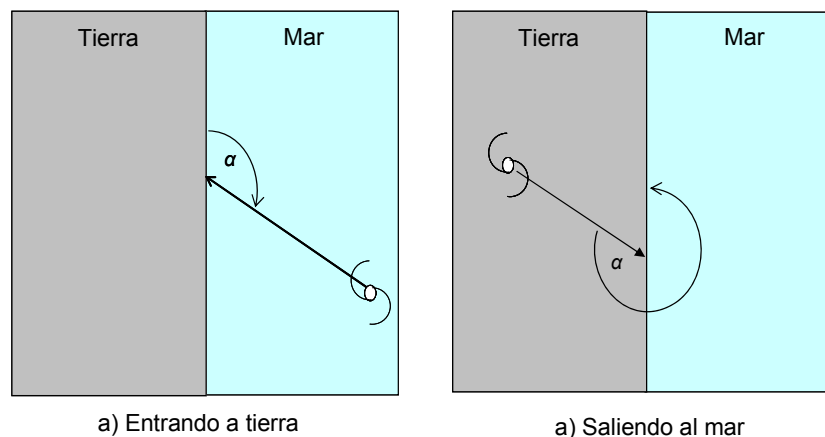


Figura 2.11 Trayectoria del ciclón tropical con respecto a la línea de costa

Otra manera de obtener el factor correctivo es por medio de la figura 2.12, tomando en cuenta el ángulo que forma la trayectoria del ciclón tropical con la línea de costa. Cuando el ángulo esté fuera del intervalo entre los 0° y 180° , el factor correctivo es igual a 0.6.

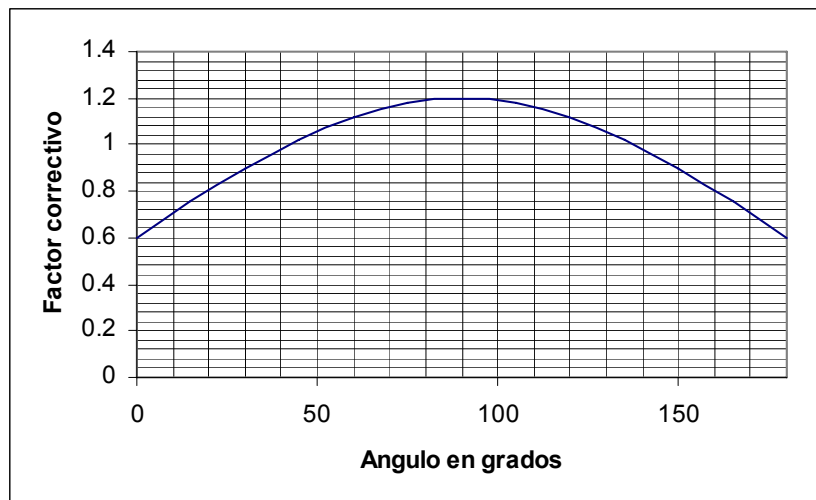


Figura 2.12 Gráfica para estimar el factor correctivo

Cuando no se dispone de la dirección de la trayectoria del ciclón tropical, ésta puede obtenerse a partir de las trayectorias medias de traslación (figuras 2.13 y 2.14).

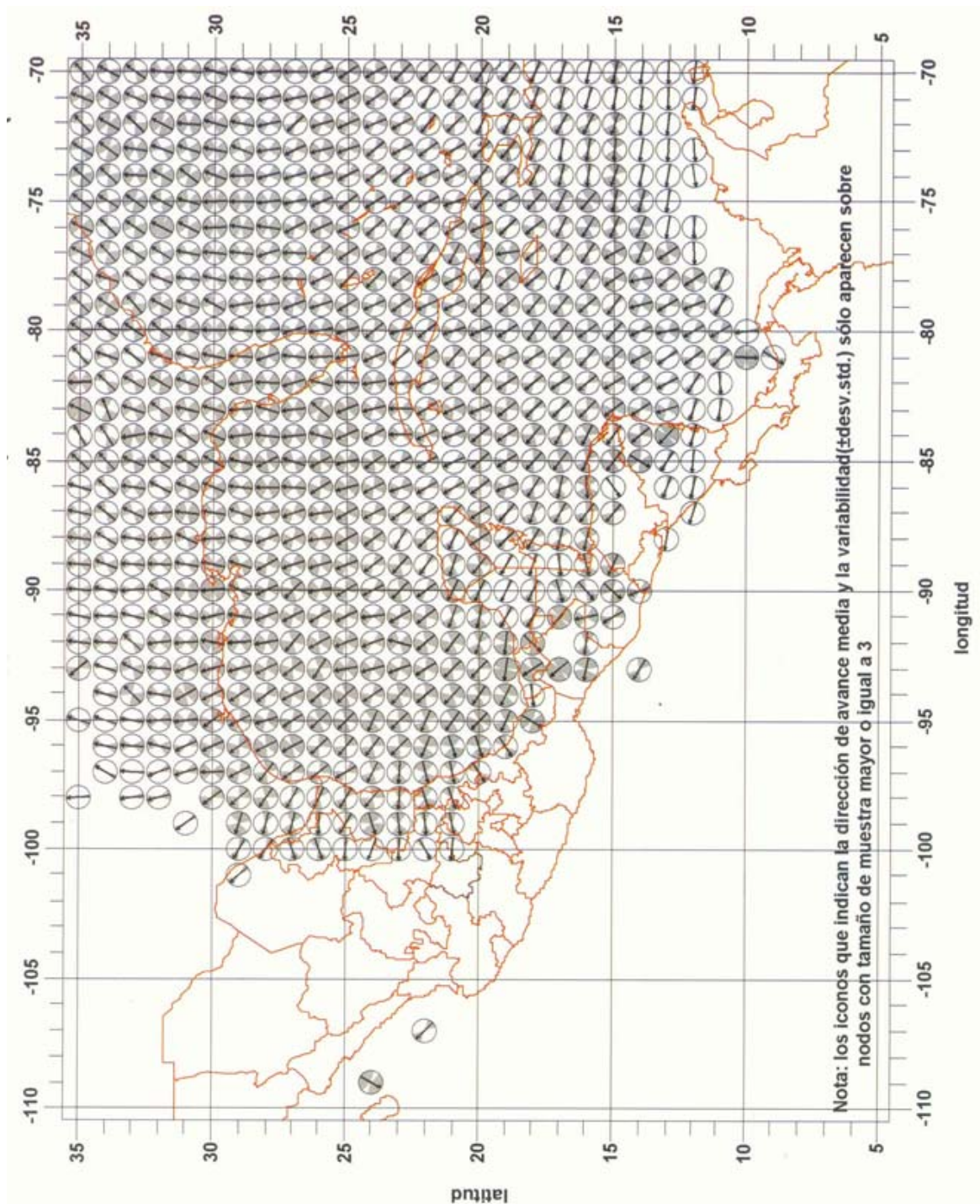


Figura 2.13 Dirección de la traslación (media y variabilidad) para ciclones tropicales en el Atlántico norte 1851-2000 (Rosengaus, et al., 2002)

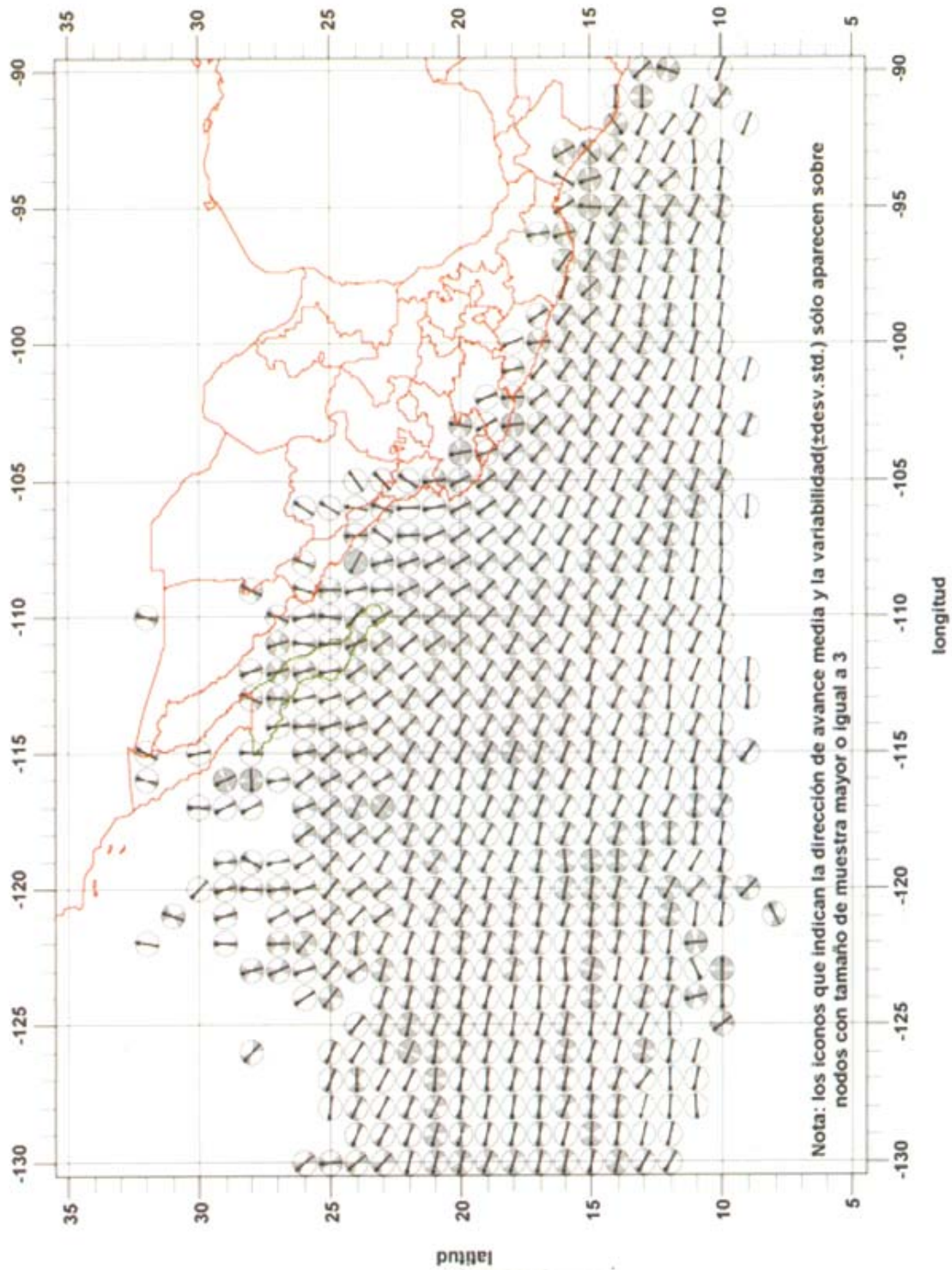


Figura 2.14 Dirección de la traslación (media y variabilidad) para ciclones tropicales en el Pacífico noroccidental 1949-2000 (Rosengaus, et al., 2002)

Ejemplo 2.2

Para el ciclón tropical del ejemplo 2.1, encuentre la amplitud de la marea de tormenta. La línea de costa es recta y tiene una dirección norte.

Solución:

Del ejemplo 2.1 se obtuvo con la ecuación 2.2 que:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

$$R = 0.0007 e^{10.79704}$$

$$R = 34.21 \text{ km}$$

y con la ecuación 2.1 se encontró que:

$$V = 20.1834(1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \operatorname{sen} \phi + 0.50 V_d$$

$$V = 20.1834(1013 - 934)^{0.5} - 0.2618(34.21) \operatorname{sen}(24) + 0.50(30)$$

$$V = 20.1834(8.8882) - 0.2618(34.21)(0.4067) + 0.50(30)$$

$$V = 179.3940 - 3.6428 + 15$$

$$V = 190.75 \text{ km/h}$$

Para la latitud de 24° N y la longitud 97° W, en la figura 2.13 se estima que la dirección media de desplazamiento de los ciclones tropicales forma con respecto al norte un ángulo de 295°. Por ello, el ángulo que existe entre la trayectoria del ciclón y la línea de costa resulta ser igual a 115° (figura 2.15). Mientras que, el factor correctivo puede obtenerse con la ecuación 2.4 de la siguiente manera:

$$F = 0.6(1 + \operatorname{sen} \alpha)$$

$$F = 0.6(1 + \operatorname{sen} 115^\circ)$$

$$F = 0.6(1 + 0.9063)$$

$$F = 0.6(1.9063)$$

$$F = 1.14$$

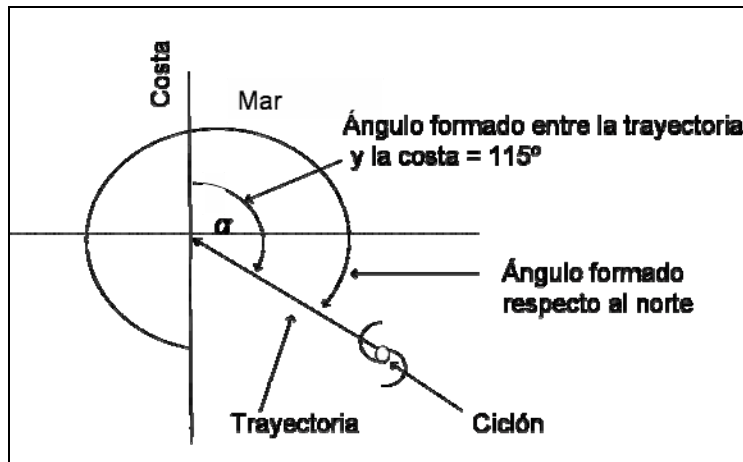


Figura 2.15 Forma de obtener los ángulos

Al emplear la ecuación 2.3 para los valores conocidos del radio de máximo viento, velocidad del viento máximo sostenido y el factor correctivo, se encuentra la amplitud de la marea de tormenta como:

$$\begin{aligned}
 h &= (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \\
 h &= [0.03(34.21) + 0.000119(190.75)^2 - 1.4421](1.14) \\
 h &= [1.0263 + 0.000119(36385.56) - 1.4421](1.14) \\
 h &= [1.0263 + 4.3299 - 1.4421](1.14) \\
 h &= 3.9141(1.14) \\
 h &= 4.47 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Esta amplitud de marea de tormenta se presenta dentro de la zona del mar donde actúan los vientos más intensos del ciclón. Ella tiene forma de anillo, con centro en el ojo, un radio mayor igual al doble del radio de máximo viento y el radio menor corresponde a la mitad del radio de máximo viento; es decir, está comprendida dentro del anillo con radios $0.5R = 0.5(34.21) = 17.1 \text{ km}$ y $2.5R = 2.5(32.21) = 85.53 \text{ km}$ (figura 2.8).

2.3. PROBABILIDAD DE PRESENTACIÓN DE CICLONES TROPICALES

Para las funciones de peligro y los periodos de retorno, asociados a un punto de estudio en las costas de la República Mexicana, se ha elaborado un algoritmo basado en mapas de probabilidades por la presencia de ciclones tropicales y uno de eventos totales de estos fenómenos, ambos para todo el país. La obtención de estos mapas y la justificación del algoritmo se explican en el anexo 1 de este capítulo.

La obtención de las probabilidades del punto específico que se desea analizar, es a partir de los mapas correspondientes a la categoría de cada ciclón (figuras 2.16 a 2.22), y realizar una estimación visual de la probabilidad conforme a las líneas de igual probabilidad, con los valores leídos se forma una tabla como se muestra a continuación:

Tabla 2.3: Ejemplo de valores de probabilidad

Tipo de ciclón	P(i) leído en el mapa
DT	0.35
TT	0.3
H1	0.3
H2	0.05
H3	0
H4	0
H5	0

En este caso, la probabilidad de que ocurra una depresión tropical es 0.35; también se puede observar que la probabilidad de que se presente un huracán de los tipos 3, 4 y 5 es cero, lo cual quiere decir que en el punto analizado no se han registrado eventos de esta clase. Ahora se procede a obtener el número total de ciclones tropicales para el mismo punto, utilizando el mapa de interpolaciones de eventos totales (figura 2.23). Nuevamente se realiza una estimación visual del dato.

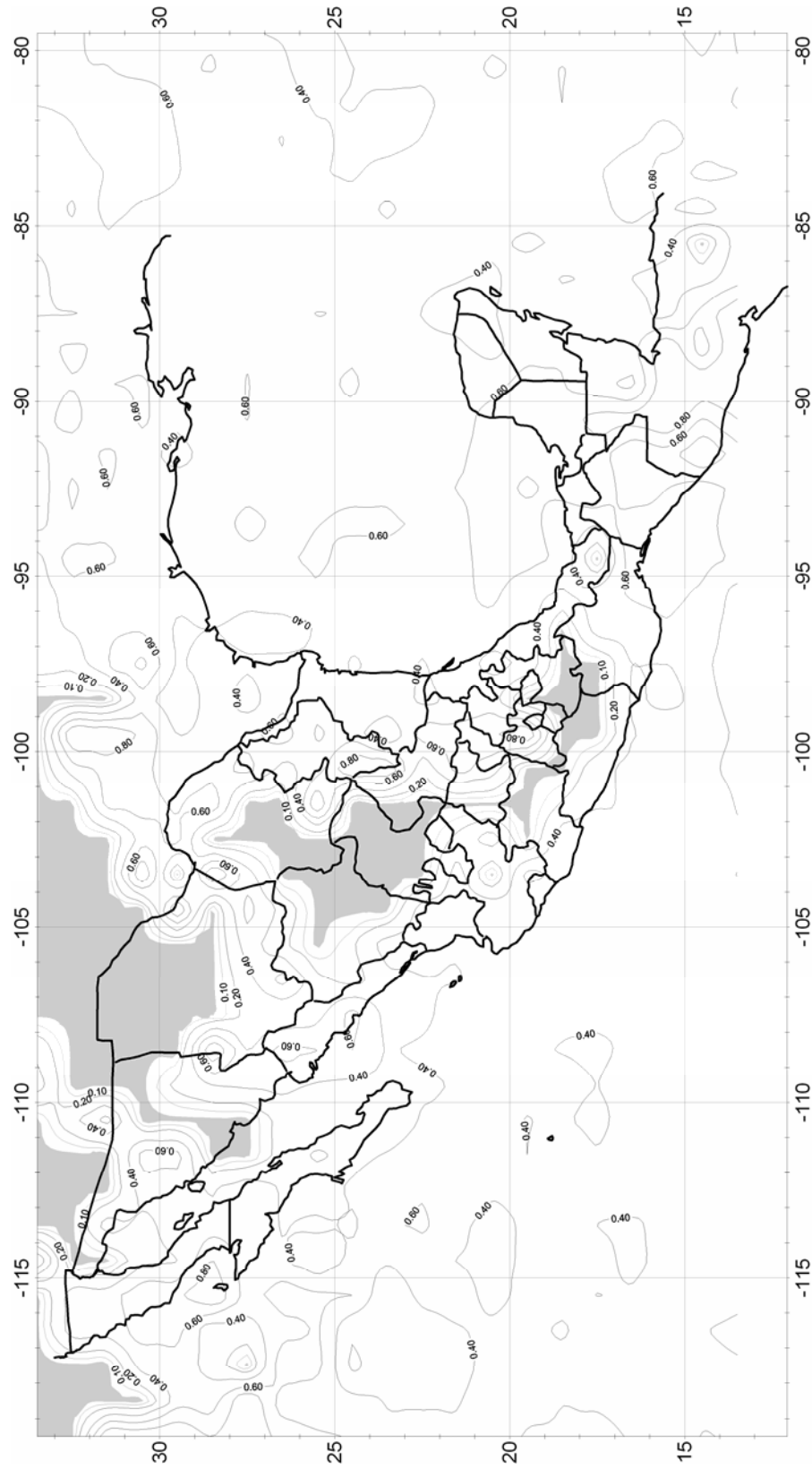


Figura 2.16 Probabilidad de ocurrencia de las depresiones tropicales en México

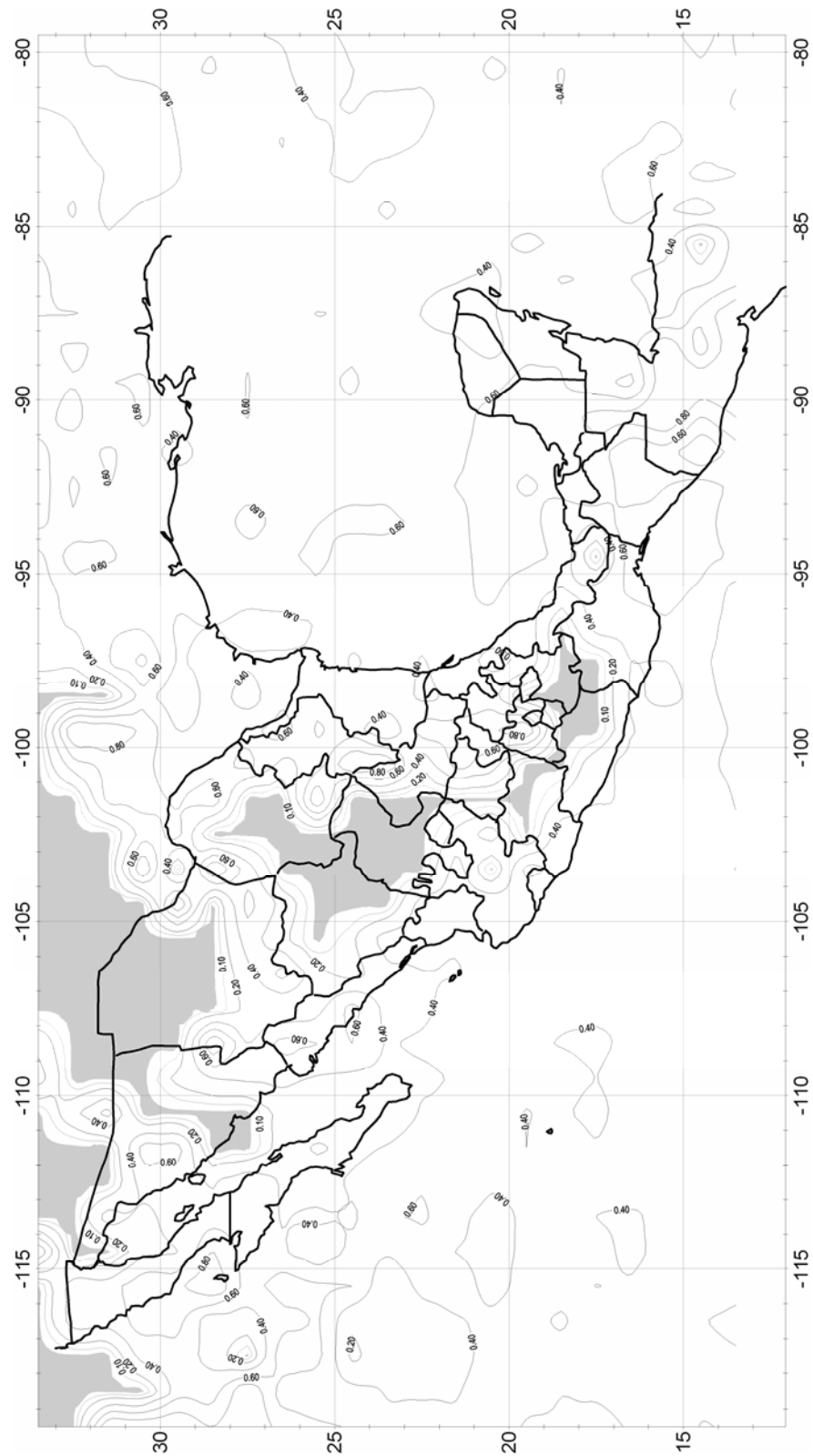


Figura 2.17 Probabilidad de ocurrencia de las tormentas tropicales en México

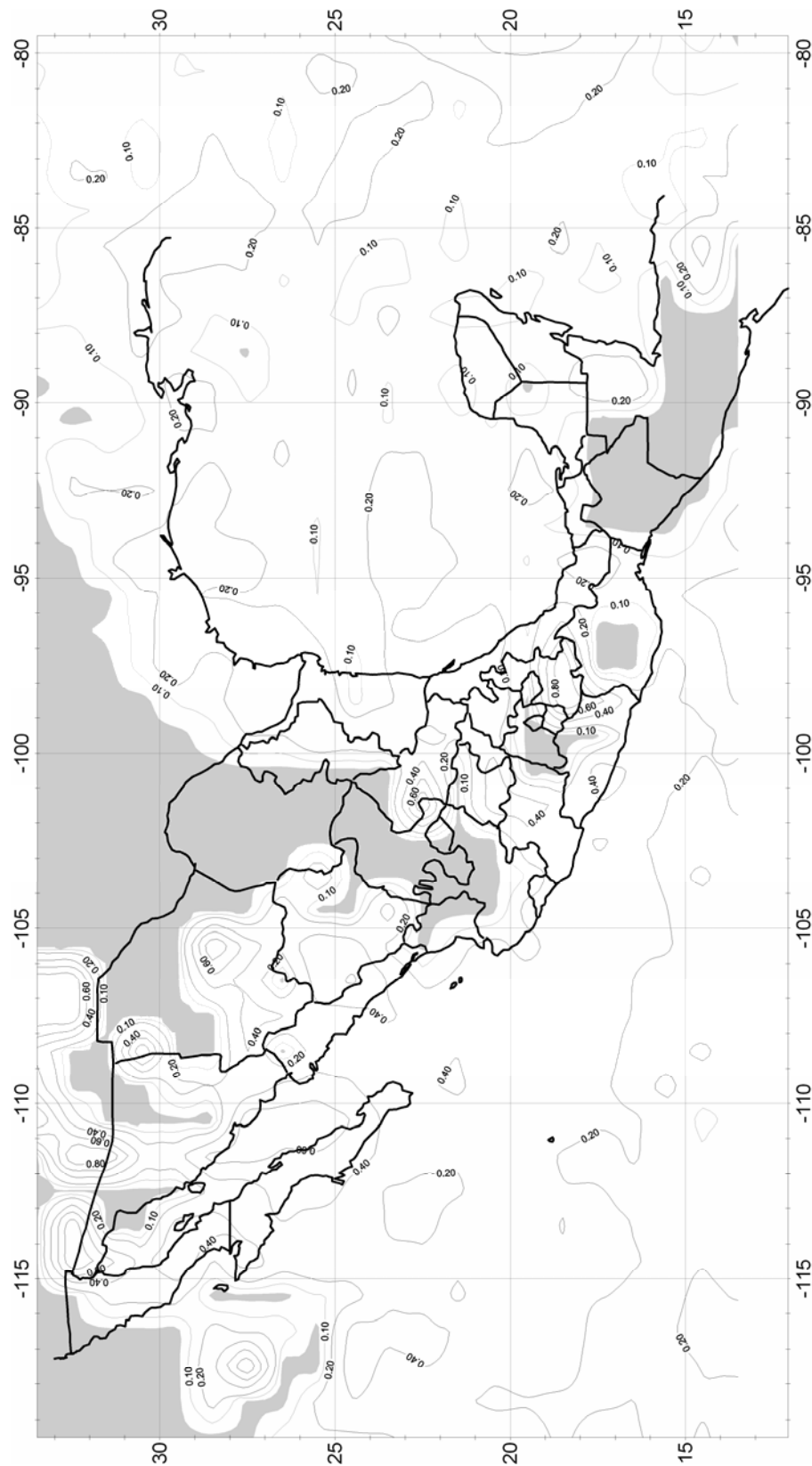


Figura 2.18 Probabilidad de ocurrencia de los huracanes categoría 1(H1) en México

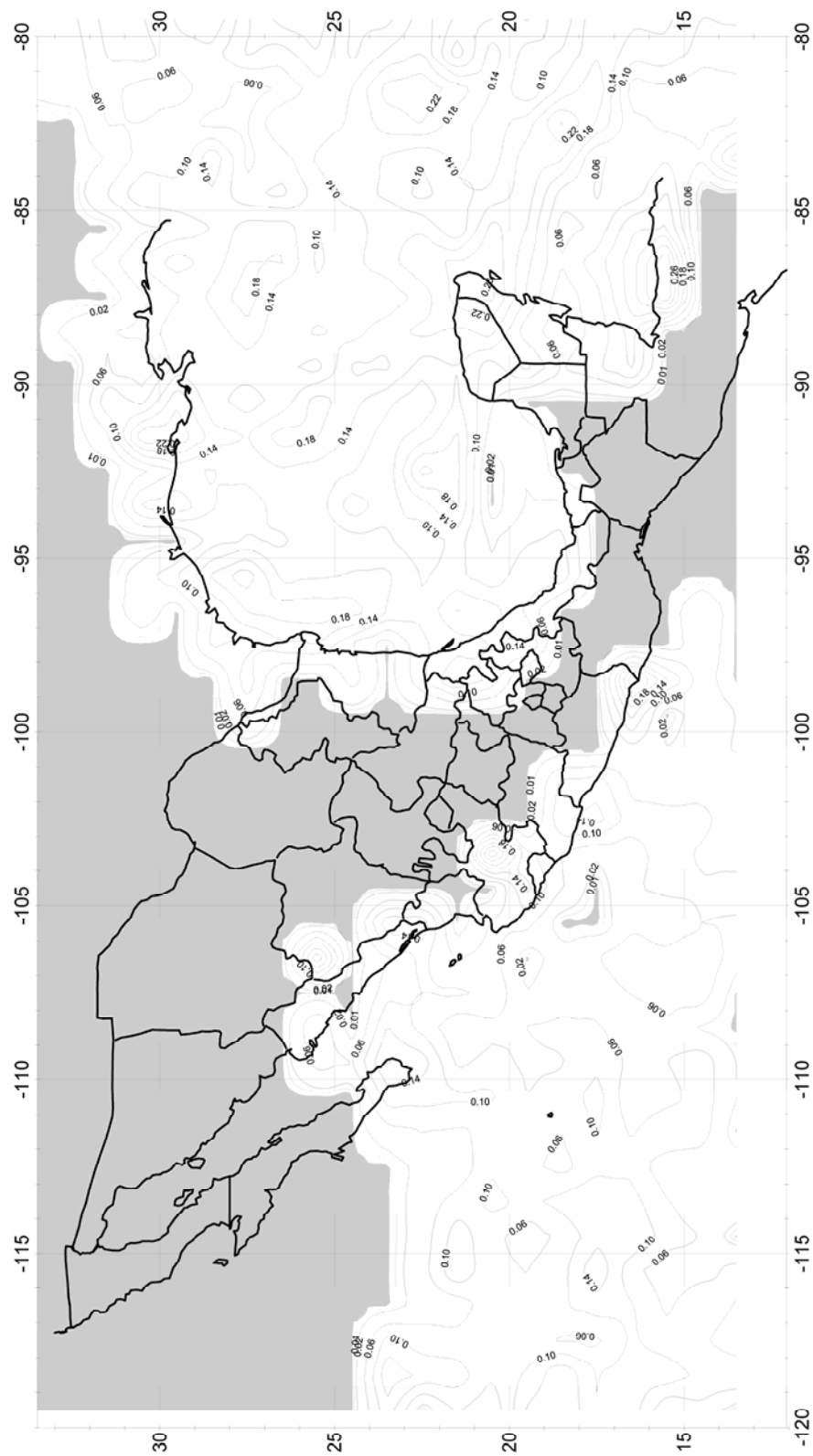


Figura 2.19 Probabilidad de ocurrencia de los huracanes categoría 2 (H2) en México

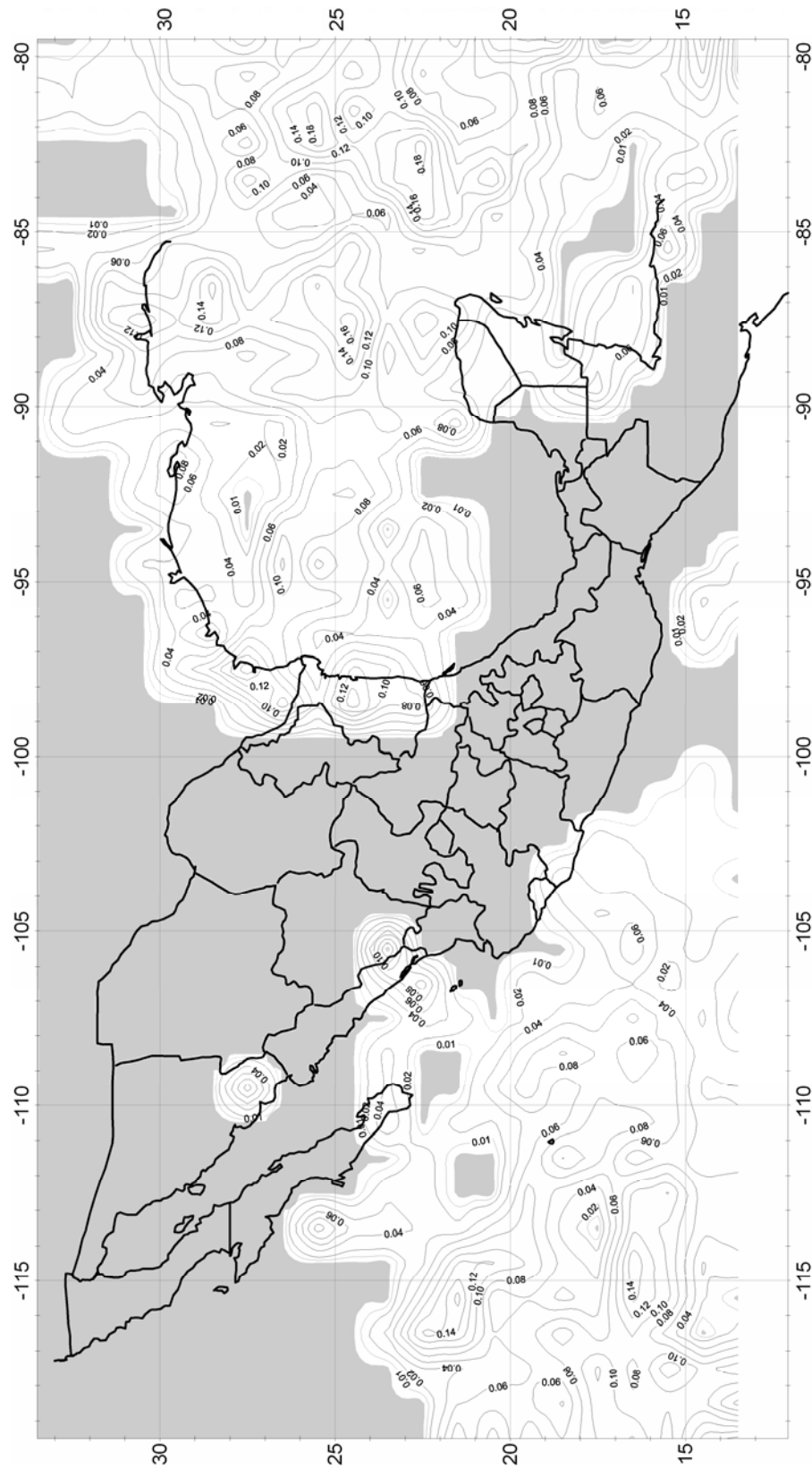


Figura 2.20 Probabilidad de ocurrencia de los huracanes categoría 3 (H3) en México

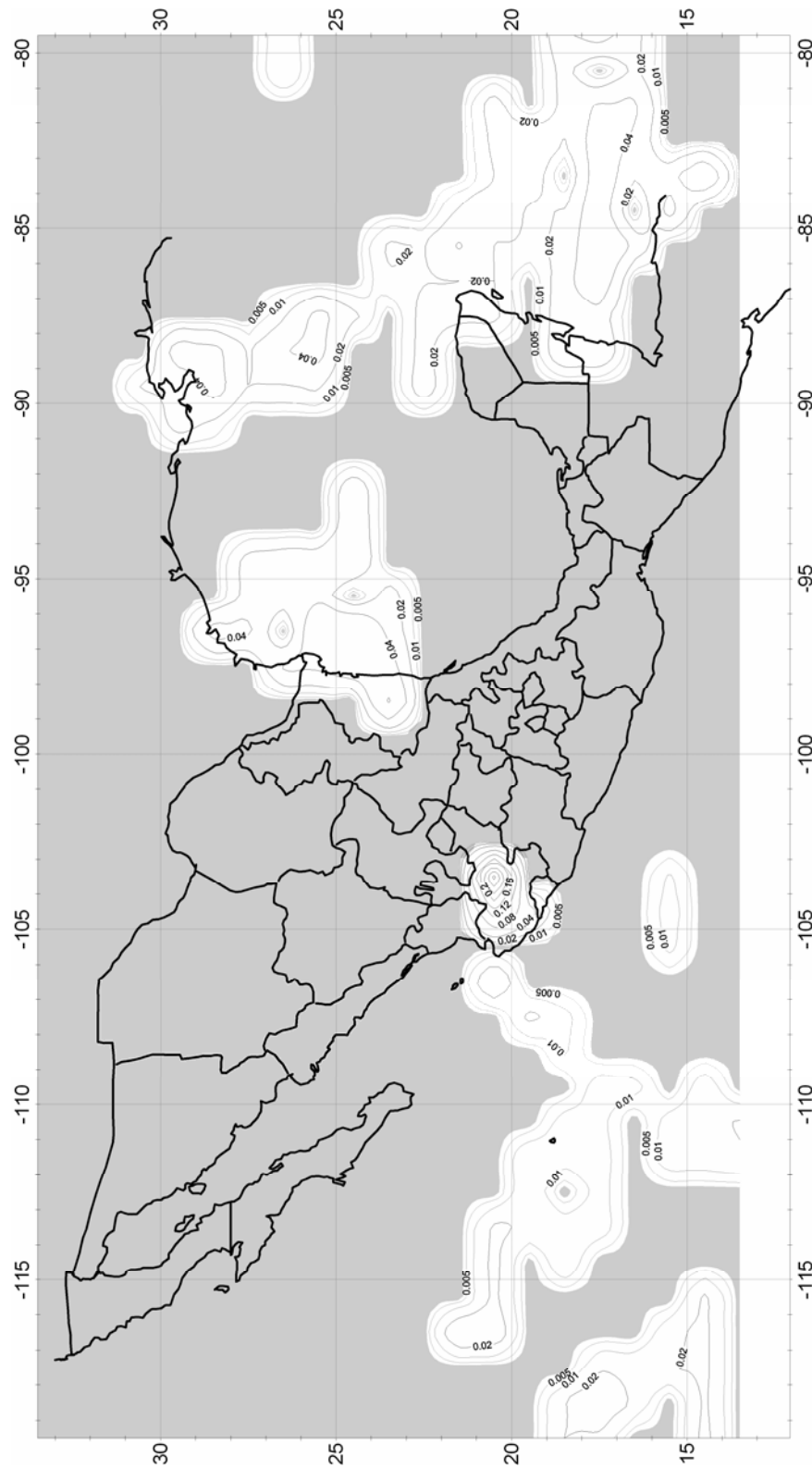


Figura 2.22 Probabilidad de ocurrencia de los huracanes categoría 5 (H5) en México

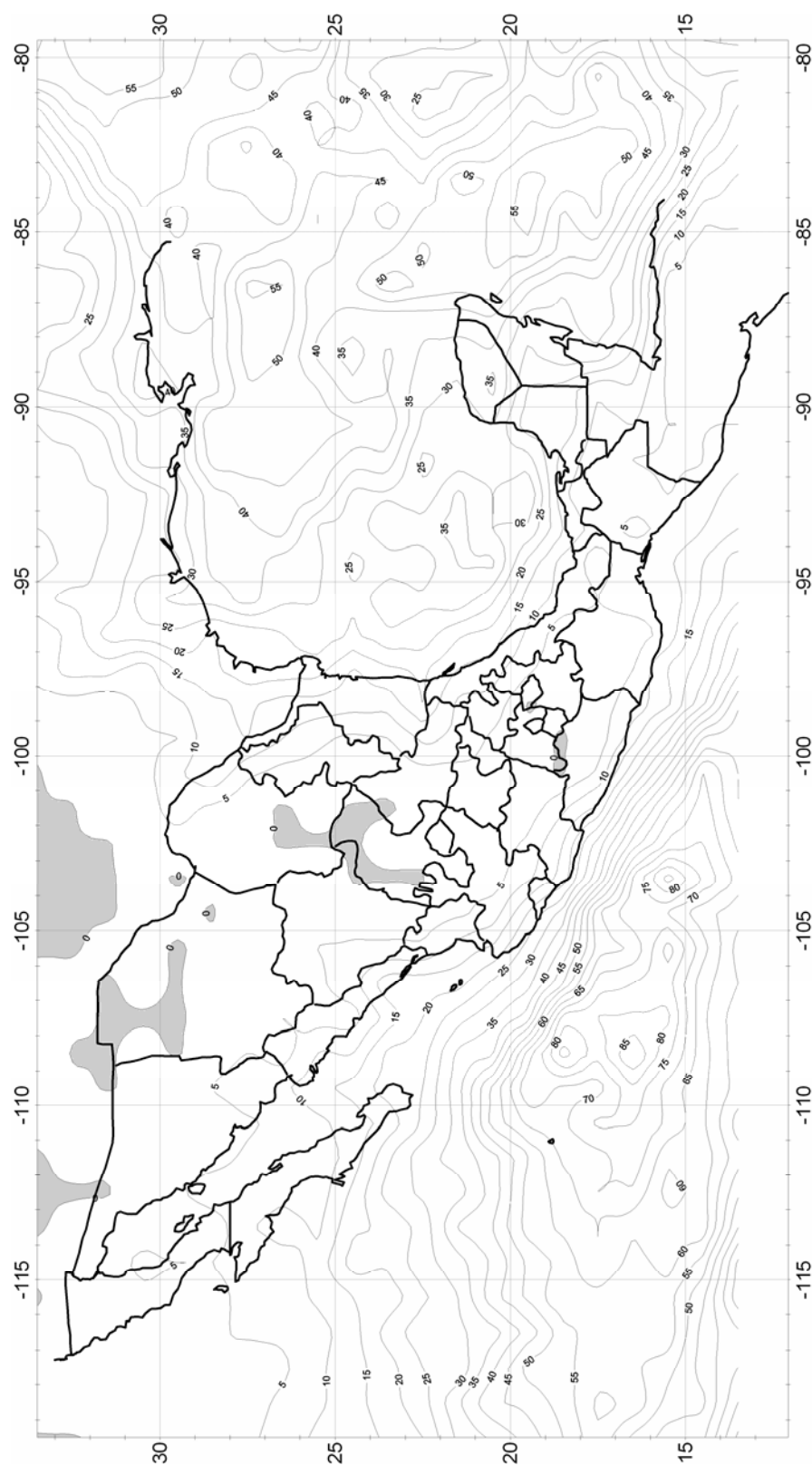


Figura 2.23 Número total de ciclones tropicales en México (golfo de México y mar Caribe de 1851-2005 y océano Pacífico de 1949-2005)

Mediante el conocimiento de estos datos, es posible obtener una función de peligro, la tasa de excedencia de los eventos y los periodos de retorno para cada una de las intensidades de los ciclones tropicales en los puntos que se analizaron.

Con el fin de simplificar los cálculos se ha elaborado un archivo de Microsoft Excel (que estará disponible en la versión electrónica) con nombre *Cálculo_Tr_Ciclones2005.xls*, en el cual se deben incorporar los datos obtenidos. Cuando se analiza un punto en la costa del océano Pacífico, se utilizará la hoja con el nombre *Pacífico* (figura 2.24) y si el punto en estudio está en el golfo de México o mar Caribe se procede a trabajar en la hoja *Atlántico* (figura 2.25).

Costa del Pacífico								
Cálculo del periodo de retorno								
Tipo	Intensidad	P(i) Inter.	P(i) Ajustada	P(i) Acum.	Eventos por tipo	$\mu(i)$ total	$\mu(i)$ anual	Tr(i)
DT	1	0.4	0.400	0.4000	1.6	4.00	0.0702	14.25
TT	2	0.4	0.400	0.8000	1.6	2.40	0.0421	23.75
H1	3	0.2	0.200	1.0000	0.8	0.80	0.0140	57.00
H2	4	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
H3	5	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
H4	6	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
H5	7	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
-	8	0	0	1.0000	0	0.00	0.0000	-
Suma		1		-	4		-	

Pegar valores en las celdas de fondo gris.

Número Total de ciclones	4	Años del periodo	57
--------------------------	---	------------------	----

Grado de confianza de la estimación de probabilidad
BUENO

Figura 2.24 Libro de Excel: *Cálculo_Tr_Ciclones2005.xls*, hoja correspondiente a la costa del Pacífico

Costa del Golfo de México y Mar Caribe								
Cálculo del periodo de retorno								
Tipo	Intensidad	P(i) Inter.	P(i) Ajustada	P(i) Acum.	Eventos por tipo	$\mu(i)$ total	$\mu(i)$ anual	Tr(i)
DT	1	0.4	0.400	0.4000	1.6	4.00	0.0258	38.75
TT	2	0.4	0.400	0.8000	1.6	2.40	0.0155	64.58
H1	3	0.2	0.200	1.0000	0.8	0.80	0.0052	155.00
H2	4	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
H3	5	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
H4	6	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
H5	7	0	0.000	1.0000	0	0.00	0.0000	-
-	8	0	0	1.0000	0	0.00	0.0000	-
Suma		1		-	4		-	

Pegar valores en las celdas de fondo gris.

Número Total de ciclones	4	Años del periodo	155
--------------------------	---	------------------	-----

Grado de confianza de la estimación de probabilidad
BUENO

Figura 2.25 Libro de Excel *Cálculo_Tr_Ciclones2005.xls*, hoja correspondiente a la costa del golfo de México y mar Caribe

Los datos se deberán ingresar en las celdas con fondo gris. Inmediatamente aparecerá el periodo de retorno (Tr) correspondiente a cada intensidad. Es importante señalar que la suma de las probabilidades debe ser cercano a 1, de lo contrario puede haber errores en la elección de los valores de probabilidad. El grado de aceptación expresa qué tan bueno es el estimado de la función de probabilidad que se esté ingresando.

La probabilidad de que ocurra una tormenta tropical o un huracán en una zona de interés en las costas de la República Mexicana se obtiene de las figuras 2.16 a la 2.22. En ellas se consignan las probabilidades de que se presente en un año un ciclón de intensidad de depresión tropical (DT), tormenta tropical (TT) y huracanes categoría 1 a 5 (H1, H2, H3, H4 y H5). Sin embargo, las lecturas se deberán corregir mediante las hojas de Excel, las cuales se pueden leer en la columna $P(i)$ Ajustada, éstas son las que se utilizarán para el cálculo de riesgo.

Ejemplo 2.3

Para el ciclón tropical del ejemplo 2.2, encuentre su probabilidad anual de presentación y su periodo de retorno

Solución:

De acuerdo con el valor de la presión central, en la escala Saffir-Simpson se trata de un huracán categoría 4.

Para las coordenadas del ojo del ciclón tropical, latitud 24°N y longitud 97°W , se ubica el meteoro en la figura 2.22, así se lee que el valor de la isolínea de probabilidad de ocurrencia de huracanes categoría 4 es $P=0.05$. Este valor se debe corregir mediante la hoja de Excel llamada Cálculo_Tr_ciclones2005.xls, por lo que la $P(i)$ Ajustada = 0.034; es decir, el resultado obtenido muestra que anualmente en esa área hay un 3.4% de probabilidad de que ocurra un huracán con intensidad cuatro.

Dado que el periodo de retorno (TR) está relacionado con la probabilidad de ocurrencia anual, se utiliza el archivo de Excel Cálculo_Tr_Ciclones2005.xls y la hoja correspondiente a la costa del golfo de México y mar Caribe. Sin embargo, en ésta se deben incluir todos los valores de los ciclones tropicales, desde depresiones hasta huracanes categoría 5, para ello se utilizan las figuras 2.16 a la 2.22. Además, con ayuda de la figura 2.23 se encuentra el número total de ciclones tropicales. De esta manera, la columna de la tabla donde se incorporan los datos es (P_i) Inter que aparece en color gris, así como el número total de ciclones, como se muestra en la figura 2.26.

Al ingresar los valores se calcula automáticamente el periodo de retorno para cada intensidad de ciclón tropical. El resultado del ejemplo muestra que para esa coordenada un huracán categoría 4 tiene un $\text{TR} = 115.8$ años.

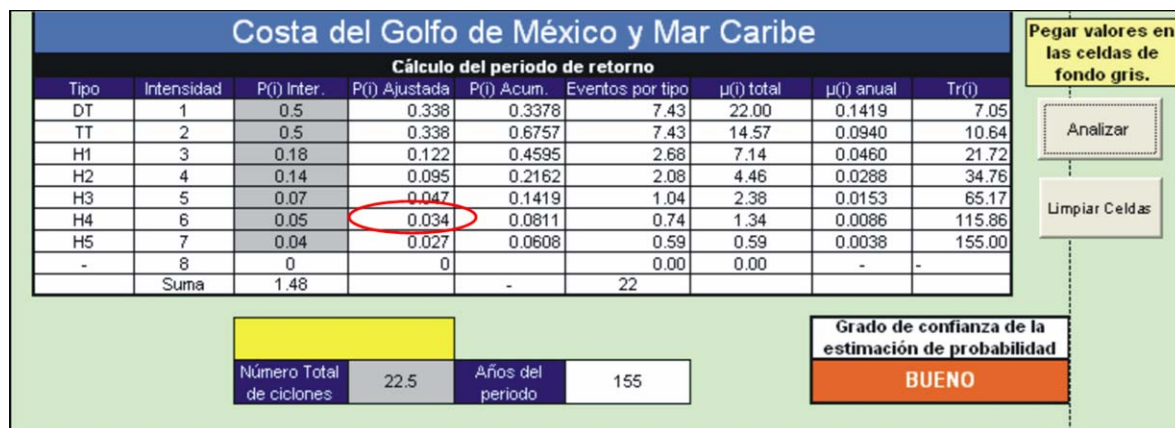


Figura 2.26. Cálculo para obtener el periodo de retorno de los ciclones tropicales correspondiente a la coordenada 97°W y 24°N

2.4. MAPA DE PELIGRO PARA EL FENÓMENO DE MAREA DE TORMENTA

Para elaborar mapas de peligro y riesgo de inundaciones por marea de tormenta se requiere de un plano topográfico que contenga a la zona de interés; de preferencia, que sea tres veces mayor que la zona en estudio, tratando que ella se localice en el centro del mismo.

El plano topográfico debe contar con curvas de nivel a cada metro o menos, entre las elevaciones 0 y 10 m. Éste puede construirse a partir de las cartas topográficas o los modelos digitales de terreno del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

El plano con curvas de nivel es indispensable para dibujar las áreas de inundación con agua marina. Ellas se forman por el ingreso de agua desde el océano, debido al ascenso del nivel medio del mar durante la ocurrencia de la marea de tormenta.

2.4.1 Metodología para elaborar el mapa de peligro por marea de tormenta

Un aspecto fundamental para la elaboración de los mapas de peligro o riesgo de inundación por marea de tormenta, es la asignación de la probabilidad de ocurrencia en un año de ciclones tropicales de cierta magnitud en las zonas costeras.

El método para construir los mapas de peligro por marea de tormenta consta de las partes siguientes:

- A) Preparación de los planos de trabajo
- B) Datos y cálculos auxiliares
- C) Determinación de la altura de marea de tormenta y las áreas de inundación
- D) Asignación de probabilidades a cada área inundada

Etapas A. Preparación de los planos de trabajo

Para disponer de los planos donde se dibujarán las zonas inundables por marea de tormenta se requiere realizar las siguientes actividades:

A.1 Selección del plano base

Se escoge un plano de la zona costera con elevaciones topográficas menores a 10 m, que contengan las áreas que pudiesen ser inundadas con agua del mar por marea de tormenta, donde se incluya al sitio de interés. A este plano se le llamará plano base.

A.2 Revisión del plano base

Se revisa que, en el plano base, estén definidas las curvas de nivel a cada metro entre las elevaciones 0 y 10 m, o en su defecto se interpola entre las existentes para dibujarlas en todo el plano. En caso de que las curvas de nivel del plano estén interrumpidas en alguna parte, se deberán completar para que se disponga de un trazo continuo de ellas.

Cuando se cuente con otros datos de topografía que marquen la elevación del terreno respecto al nivel medio del mar, conviene tomarlos en cuenta y, si procede, se modifica el trazo de las curvas de nivel.

A.3 Información relevante de la zona inundada por marea de tormenta

Se agrega al plano una leyenda con información relevante sobre la inundación por marea de tormenta. Puede ser utilizado el que se propone en la figura 2.27.

LEYENDA	
Lugar:	_____
Tipo de ciclón:	_____
Probabilidad de ocurrencia Anual:	_____
Periodo de retorno:	_____ años
Altura de la marea de tormenta:	_____ m
Identificación del plano:	_____

Figura 2.27 Datos para identificar el mapa de peligro de inundación por marea de tormenta

A.4 Reproducciones del plano base

Reproducir por lo menos seis veces el plano base. En cada una de las copias del plano se marcará la inundación que se produciría, debido a una tormenta tropical o un huracán entre las categorías 1 a 5. No se considera a los ciclones tropicales con intensidad menor a las de una tormenta tropical (depresión o perturbación tropical) ya que no producen ascensos de importancia del nivel medio del mar.

Etapas B. Datos y cálculos auxiliares

Para obtener la amplitud de la marea de tormenta y el área de inundación que provoca en tierra un meteoro, conviene reunir algunos datos y cálculos que son similares para los ciclones tropicales de distinta clase.

B.1 Longitud y latitud del lugar

Con base en la cartografía del INEGI se ubica el sitio donde interesa generar los mapas de peligro y se define la longitud y la latitud del punto en análisis.

B.2 Velocidad máxima de traslación del ciclón tropical

A partir de la longitud y latitud del lugar se obtiene de la figura 2.6 ó 2.7 la velocidad máxima de traslación del ciclón tropical V_d (en km/h) que será empleada en los cálculos de la velocidad máxima del viento sostenido (como se mostró en el ejemplo 2.1).

B.3 Factor correctivo de la marea de tormenta por dirección del viento

Se determina el ángulo que forma la trayectoria del ciclón tropical con respecto a la línea de costa cercana al sitio de interés. Para ello, se identifica la dirección de la trayectoria promedio que han presentado los ciclones tropicales cerca del lugar. Esto se hace con ayuda de la figura 2.13 ó 2.14 a partir de la latitud y longitud definidas en B.1.

Al encontrar el ángulo α que se forma entre la dirección de la trayectoria media de los ciclones tropicales y la línea de costa se obtiene el factor correctivo F , ya sea mediante la ecuación 2.4 o en la figura 2.12 (en el ejemplo 2.2 se señaló la manera de obtenerlo).

Etapa C. Determinación de la amplitud de la marea de tormenta y áreas inundables con agua marina

En esta etapa se determinan las zonas inundables por marea de tormenta debidas a tormentas tropicales y a huracanes de distinta categoría.

Como la inundación por marea de tormenta se desarrolla durante varias horas, se considera que la velocidad de los flujos de agua marina hacia el continente es pequeña. A ello se debe que la superficie libre de la inundación sea casi horizontal y que tenga una elevación similar a la amplitud de la marea de tormenta (tabla 2.4).

La marea de tormenta se clasifica, a partir de su amplitud, de la siguiente manera:

Tabla 2.4 Clasificación de la inundación generada por la marea de tormenta

Amplitud de la marea de tormenta (m)	Categoría
<0.5	Somera
0.51 a 1.00	Baja
1.01 a 2.00	Moderada
2.01 a 3.50	Alta
3.51 a 5.00	Muy alta
>5.00	Extraordinaria

En adelante, a la combinación de la amplitud de la marea de tormenta debida a un ciclón tropical con intensidad de tormenta tropical a huracán se denotará como h_{TT} , h_{H1} , h_{H2} , h_{H3} , h_{H4} y h_{H5} . De igual manera, las velocidades de viento máximo se indicarán con una notación semejante (V_{TT} , V_{H1} , V_{H2} , V_{H3} , V_{H4} y V_{H5})

C.1 Inundación costera provocada por marea de tormenta de una tormenta tropical

En la expresión de la velocidad de viento máximo sostenido (ecuación 2.1) de un ciclón tropical, se considera que la presión central de la tormenta tropical p_0 es igual a 985 mb (es la presión más baja dentro del intervalo de clase de tormentas tropicales de la escala Saffir-Simpson), por lo que tal velocidad se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_{TT} = 106.80 - 0.2618R \sin\phi + 0.50 V_d \quad (2.5)$$

Cuando no se dispone del valor del radio de máximo viento R , éste puede ser estimado con la ecuación 2.2, a partir de la presión central $p_0=985$ mb por lo tanto, se obtiene el valor de 61.69 km.

Se toma en cuenta a la latitud del lugar ϕ y a la velocidad de traslación del ciclón tropical V_d definidos en la etapa B. Con la ecuación 2.5 se obtiene la velocidad máxima del viento sostenido V_{TT} .

Mediante la ecuación 2.3 y con el radio de máximo viento R , la velocidad del viento máximo V_{TT} y el factor correctivo F (Etapa B), se calcula el valor de la amplitud de la marea de tormenta h_{TT} .

En una de las reproducciones del plano base, se colorea en rojo la zona comprendida entre la línea de costa y la elevación topográfica h_{TT} . A este mapa se le llama “inundación costera generada por la marea de tormenta de una tormenta tropical”.

La elevación h_{TT} y el tipo de ciclón tropical (en este caso es “Tormenta tropical”) se anotan en el cuadro de leyenda del plano (figura 2.27).

C.2 Inundación costera provocada por marea de tormenta de un huracán categoría 1

En la expresión para calcular la velocidad del viento máximo sostenido (ecuación 2.1), se considera que la presión central más baja que pueden tomar los huracanes categoría 1, según la escala Saffir-Simpson, sea p_0 igual a 980 mb, por lo que la velocidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{H1} = 115.95 - 0.2618 R \sen \phi + 0.50 V_d \quad (2.6)$$

Cuando no se dispone del valor del radio de máximo viento R , éste puede ser estimado con la ecuación 2.2, considerando que $p_0 = 980$ mb, por lo que el radio es igual a 58.23 km. Las literales ϕ y V_d se definieron en la etapa B.

Conocidos el radio de máximo viento R , la velocidad del viento máximo sostenido V_{H1} y el factor correctivo F (el cual quedó definido en la etapa B), se encuentra la amplitud de la marea de tormenta, h_{H1} con la ecuación 2.3.

En una reproducción del plano base, se colorea en café aquella zona comprendida entre la línea de costa y la elevación topográfica h_{H1} . El mapa obtenido corresponde al de la *inundación costera generada por la marea de tormenta de un huracán categoría 1*.

La amplitud h_{H1} y el tipo de ciclón tropical, en este caso *Huracán categoría 1* se anotan en el cuadro de leyenda de este plano (figura 2.27).

C.3 Inundación costera provocada por marea de tormenta de un huracán categoría 2

En la ecuación 2.1 se considera que la presión central más pequeña que pueden tomar los huracanes categoría 2 de acuerdo con la escala Saffir-Simpson, en este caso p_0 es igual a 965 mb. Al sustituir esta presión en dicha expresión se obtiene:

$$V_{H2} = 139.84 - 0.2618 R \sen \phi + 0.50 V_d \quad (2.7)$$

Cuando no se dispone del valor del radio de máximo viento R , éste puede ser estimado con la ecuación 2.2; en este caso para $P_0 = 965$ mb; el radio de máximo viento es igual a 48.96 km. La latitud ϕ y la velocidad de desplazamiento del huracán V_d fueron determinadas en la etapa B.

Con los valores del radio de máximo viento R , la velocidad del viento máximo sostenido V_{H2} y el factor correctivo F (encontrado en la etapa B), se calcula la amplitud de la marea de tormenta, h_{H2} con la ecuación 2.3.

En otra reproducción del plano base, se ilumina de color fusha la superficie adedaña al mar que está comprendida entre las curvas de nivel 0 y h_{H2} . A este dibujo se le refiere como *inundación costera generada por la marea de tormenta de un huracán categoría 2*

El valor de h_{H2} y *Huracán categoría 2* se escriben en el cuadro que contiene la leyenda del plano (figura 2.27) en los renglones de amplitud de marea y de tipo de ciclón tropical.

C.4 Inundación costera provocada por marea de tormenta de un huracán categoría 3

Esta inundación puede ocurrir sólo si en la zona de interés hay un valor para la probabilidad de ocurrencia anual de un huracán categoría 3; de otro modo, no procede la obtención de las zonas inundables por la marea de tormenta de huracanes categoría 3, 4 y 5.

En la ecuación 2.1 que proporciona la velocidad del viento máximo sostenido de un ciclón tropical se considera que la presión central P_0 es igual a la más baja que puede tener un huracán categoría 3, que de acuerdo con la escala Saffir-Simpson es de 945 mb, por lo que la ecuación 2.1 queda así:

$$V_{H3} = 166.44 - 0.2618R \operatorname{sen}\phi + 0.50 V_d \quad (2.8)$$

Cuando no se dispone del valor del radio de máximo viento R , al sustituir en la ecuación 2.2 a $p_0 = 945$ mb, se encuentra que $R = 38.85$ km.

Para la latitud del lugar ϕ y la velocidad de traslación del ciclón tropical V_d , obtenidos en la etapa B, y con la ecuación 2.6, se obtiene la velocidad máxima del viento sostenido V_{H3} .

Conocidos el radio de máximo viento R , la velocidad del viento máximo V_{H3} y el factor correctivo F (Etapla B), con la ecuación 2.3 se calcula el valor de la amplitud de la marea de tormenta, h_{H3} .

En otra reproducción del plano base, se colorea en naranja la zona colindante al mar donde la elevación topográfica está entre 0 y h_{H3} . Al plano obtenido se le identifica como *mapa de inundación costera generada la marea de tormenta de un huracán categoría 3*. La h_{H3} y el tipo de ciclón tropical, en este caso *Huracán categoría 3*, se anotan en el cuadro con información relevante (figura 2.27).

C.5 Inundación costera provocada por la marea de tormenta de un huracán categoría 4

Esta inundación puede ocurrir sólo si en la zona de interés se ha escrito un valor para la probabilidad de ocurrencia anual de un huracán categoría 4; de otro modo, no procede la obtención de las zonas inundables por la marea de tormenta de huracanes categoría 4 y 5.

En la ecuación 2.1 se considera que la presión central del huracán categoría 4 es la presión más pequeña que pueden tomar estos huracanes según la escala Saffir-Simpson, por lo que P_0 se hace igual a 920 mb. Al sustituir este valor en la ecuación anterior se llega a:

$$V_{H4} = 194.64 - 0.2618R \operatorname{sen}\phi + 0.50 V_d \quad (2.9)$$

Cuando no se dispone del valor del radio de máximo viento R , éste puede ser estimado con la ecuación 2.2 tomando en cuenta que $P_0 = 920$ mb; con lo cual este radio es igual a 29.10 km.

La latitud ϕ y la velocidad de desplazamiento del ciclón tropical V_d fueron definidas en la etapa B.

Con los valores del radio de máximo viento R , la velocidad del viento máximo sostenido V_{H4} y el factor correctivo F (etapa B) se sustituyen en la ecuación 2.3, para obtener la amplitud de la marea de tormenta de un huracán categoría 4, h_{H4} .

En una copia del plano base, se marca en color rosa la zona que se encuentra entre las curvas de nivel 0 y la elevación h_{H4} . Al dibujo se le llama plano de la *inundación costera generada por la marea de tormenta de un huracán categoría 4*. Esta amplitud y el tipo de ciclón tropical, en este caso *Huracán categoría 4*, se escriben en el cuadro con la leyenda de este plano (figura 2.27).

C.6 Inundación costera provocada por la marea de tormenta de un huracán categoría 5

Esta inundación puede ocurrir sólo si en la zona de interés se ha escrito un valor para la probabilidad de ocurrencia anual de un huracán categoría 5; de otro modo, no procede la obtención de las zonas inundables por la marea de tormenta de huracanes de este tipo.

En la expresión para calcular la velocidad del viento máximo sostenido (ecuación 2.1), se considera que la presión central del huracán categoría 5 es igual a la presión más pequeña que pueden tomar estos huracanes, sea $P_0 = 882$ mb (valor de la presión central más baja del huracán Wilma de 2005; asimismo, la más baja que se ha registrado cerca de México), por lo que la velocidad se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_{H5} = 231.01 - 0.2618R \operatorname{sen}\phi + 0.50 V_d \quad (2.10)$$

Cuando no se conoce cuál es el valor del radio de máximo viento R , éste puede ser estimado con la ecuación 2.2 con $P_0 = 882$ mb; encontrándose que es igual a 18.76 km.

La latitud ϕ y la velocidad de traslación del ciclón tropical V_d fueron definidas en la etapa B.

Con el radio de máximo viento R , la velocidad del viento máximo sostenido V_{H5} y el factor correctivo F (etapa B), con la ecuación 2.3 se obtiene la amplitud de la marea de tormenta, h_{H5} .

En una copia del plano base, se colorea de amarillo la superficie colindante con el mar donde la elevación topográfica se encuentra entre 0 y h_{H5} , donde esta elevación fue calculada con la ecuación 2.3, a este plano se le llama mapa de la *inundación costera causada por un huracán categoría 5*. La amplitud h_{H5} y el tipo de ciclón tropical, en este caso *Huracán categoría 5* se anotan en el cuadro de leyenda de este plano (figura 2.27).

Etapas D. Asignación de las probabilidades a las áreas de inundación

La inundación por marea de tormenta está relacionada directamente con los vientos del ciclón tropical, a ésta se le asigna la probabilidad de ocurrencia anual del fenómeno. Para ello, se ubica la

zona de interés en las figuras 2.16 a 2.22. En éstas se consignan las probabilidades de ocurrencia anual de tormentas tropicales y de huracanes que han ocurrido cerca de las costas de México.

Se define el punto del ciclón seleccionado en el océano Atlántico o Pacífico. Asimismo, los periodos de retorno de las tormentas tropicales y huracanes se obtienen con ayuda de la hoja de Excel para la costa del Pacífico o golfo de México y mar Caribe. Sin embargo, no siempre existen ciclones de intensidad huracán categoría 5 (H5), por ello, sólo se calculan si éstos están presentes.

D.1 Probabilidad de inundación por marea de tormenta debido a tormenta tropical

Se utiliza la figura 2.17 para conseguir la probabilidad p de ocurrencia anual de tormentas tropicales. Sin embargo, en el cuadro de leyenda (figura 2.27) del plano, se anota la probabilidad de ocurrencia anual $P(i)$ *Ajustada* calculada con la hoja de Excel y el valor del periodo de retorno se obtiene con la misma hoja.

D.2 Probabilidad de inundación por marea de tormenta debido a un huracán categoría 1

De la figura 2.18 se extrae la probabilidad p de ocurrencia anual de huracanes categoría 1. No obstante, en el cuadro de leyenda (figura 2.27) del plano, se registra la probabilidad de ocurrencia anual $P(i)$ *Ajustada* deducida con la hoja de Excel y el periodo de retorno se obtiene con ayuda de la misma.

D.3 Probabilidad de inundación por marea de tormenta debido a un huracán categoría 2

Con base en la figura 2.19 se obtiene la probabilidad p de ocurrencia anual de huracanes categoría 2. Aunque, en el cuadro de leyenda (figura 2.27) del plano, se escribe la probabilidad de ocurrencia anual $P(i)$ *Ajustada* derivada con la hoja de Excel y el periodo de retorno se obtiene con ayuda de la misma.

D.4 Probabilidad de inundación por marea de tormenta debido a un huracán categoría 3

Si es que se ha dibujado el área de inundación por marea de tormenta generada por un huracán categoría 3, se define la probabilidad a partir de la figura 2.20. Sin embargo, en el cuadro de leyenda (figura 2.27) del plano se escribe en el renglón de probabilidad de ocurrencia anual, el valor de $P(i)$ *Ajustada* calculada con la hoja de Excel y el periodo de retorno se obtiene con ayuda de la misma.

D.5 Probabilidad de inundación por marea de tormenta debido a un huracán categoría 4

Si es que se ha dibujado el área de inundación por marea de tormenta producida por un huracán categoría 4, se asigna la probabilidad con base en la figura 2.21. No obstante, en el cuadro de leyenda (figura 2.27) del plano, se anota el valor de $P(i)$ *Ajustada* deducida con la hoja de Excel y el periodo de retorno se obtiene con ayuda de la misma.

D.6 Probabilidad de inundación por marea de tormenta debido a un huracán categoría 5

Si es que se ha dibujado el área de inundación por marea de tormenta de un huracán categoría 5, se obtiene la probabilidad con base en la figura 2.22. Aunque, en el cuadro de leyenda (figura 2.27) del plano correspondiente, se escribe el valor de $P(i)$ *Ajustada* calculada con la hoja de Excel y el periodo de retorno se obtiene con ayuda de la misma.

2.5. EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA CALCULAR LA ALTURA DE LA MAREA DE TORMENTA

El ejemplo se aplicó al extremo oriental del estado de Quintana Roo. Se comenzó por localizar el mapa topográfico del INEGI e identificar las curvas de nivel 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 7.0 m. Además, se adicionó un recuadro para anotar los resultados de los cálculos antes descritos y con ello se formó el mapa base (figura 2.28).

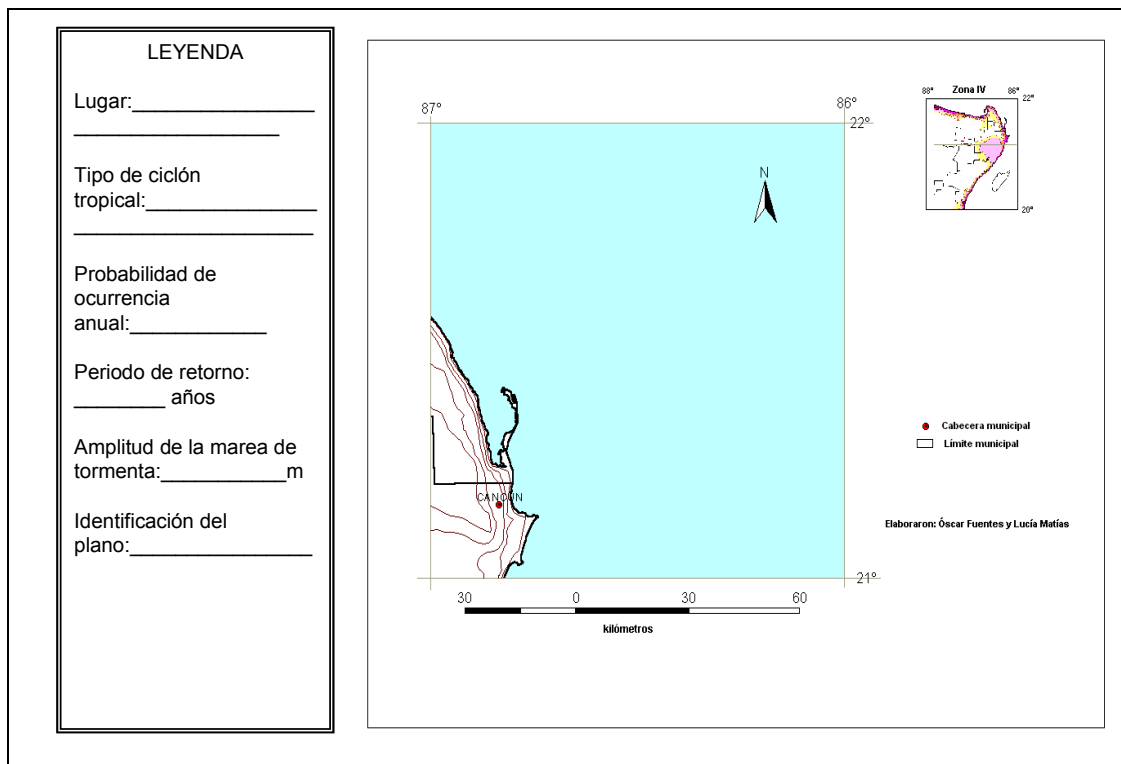


Figura 2.28 Mapa base

2.5.1 Primer plano

Una vez elaborado el mapa base se procede a determinar las áreas de inundación con agua marina, para ello es necesario obtener la probabilidad, el periodo de retorno y la amplitud de la marea de tormenta, para ello se dibuja en color rojo la altura de la inundación costera de una tormenta tropical a partir de la línea de costa hasta el valor de la amplitud de la marea. Después se completa la información que aparece en la leyenda, en la primera línea, se asigna el nombre de la región, estado, municipio o localidad, mientras que en el renglón tipo de ciclón tropical se indica que corresponde a una tormenta tropical.

La probabilidad de ocurrencia para las tormentas tropicales se obtiene de la figura 2.17. Las coordenadas correspondientes a Cancún son aproximadamente 87°W y 21°N; con base en ellas y consultando el mapa mencionado se obtiene la probabilidad de 0.37, sin embargo, el valor que se agrega al renglón de la leyenda es el de la probabilidad ajustada $P(i) = 0.311$ que calcula la hoja de Excel para el golfo de México y mar Caribe. El periodo de retorno se deduce con ayuda de esta misma donde resulta $Tr = 5.36$ años (figura 2.29).

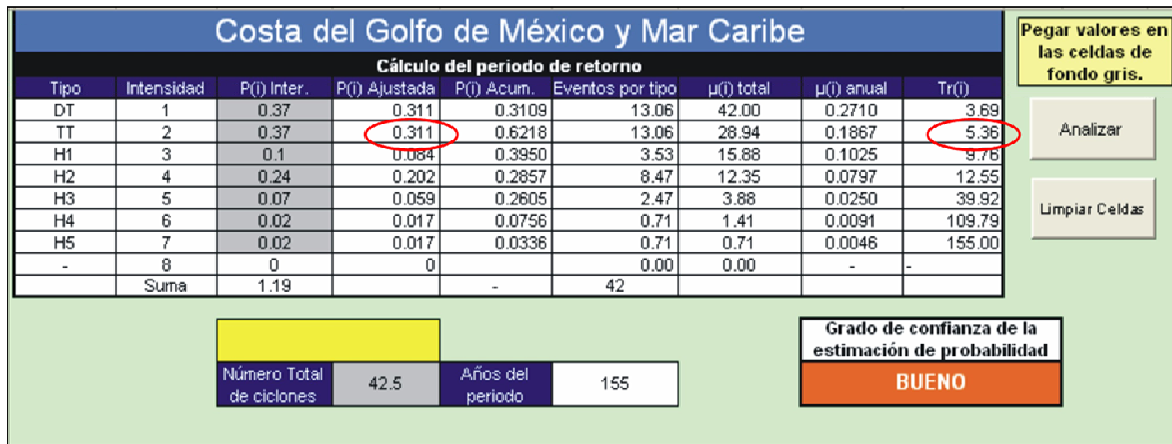


Figura 2.29 Cálculo de la probabilidad y periodo de retorno para las tormentas tropicales cerca de Cancún

La amplitud de la marea de tormenta para una tormenta tropical, se obtiene una vez encontrado el radio de máximo viento (R), los vientos máximos sostenidos (V_{TT}) y el factor correctivo (F), con las siguientes fórmulas:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

siendo la presión de 985 mb,

$$R = 0.0007 e^{0.01156 (985)}$$

$$R = 0.0007 e^{11.3866}$$

$$R = 61.7 \text{ km}$$

Los vientos máximos se calculan como:

$$V = 106.8 - 0.2618R(\sin \phi) + 0.50 V_d$$

$$V = 106.8 - 0.2618(61.7)\sin(21) + 0.50(30)$$

$$V = 106.8 - 16.1531(0.3584) + 15$$

$$V = 116.01 \text{ km/h}$$

El factor correctivo se obtiene de la siguiente manera:

$$F = 0.6(1 + \sin \alpha)$$

$$F = 0.6(1 + \sin 21^\circ)$$

$$F = 0.6(1 + 0.3584)$$

$$F = 0.6(1.3584)$$

$$F = 0.8150$$

Una vez estimadas las variables, se procede a calcular la amplitud de la marea de tormenta:

$$\begin{aligned}
 h &= (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \\
 h &= [0.03(61.7) + 0.000119(116)^2 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.8510 + 0.000119(13456) - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.8510 + 1.6013 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= 2.0102(0.8150) \\
 h &= 1.63 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Así se conoce que la amplitud de la marea de tormenta de una tormenta tropical en la región de interés es de 1.6 m, que corresponde a una marea *moderada* (tabla 2.4 y figura 2.30).

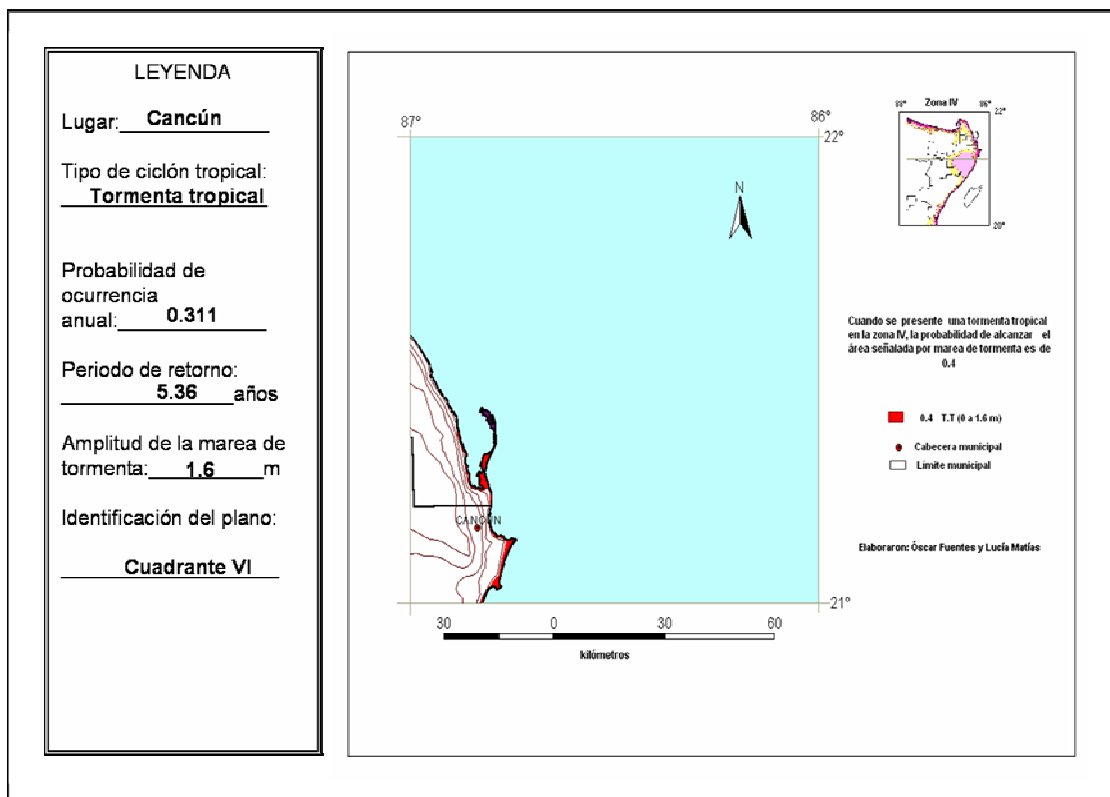


Figura 2.30 Peligro por la marea de tormenta tipo Moderada para una tormenta tropical en la región oriental del estado de Quintana Roo

2.5.2 Segundo plano

La obtención del segundo plano se determina por las áreas de inundación con agua marina, por lo que es necesario calcular la probabilidad, el periodo de retorno y la amplitud de la marea de tormenta y así colorear de café a partir de la línea de costa hasta el valor de la marea de tormenta. En la primera línea de la leyenda se asigna el nombre de la región, estado, municipio o localidad, mientras que en el renglón de tipo de ciclón tropical se indica que es la inundación costera de un huracán categoría 1.

La probabilidad de ocurrencia se determina con la figura 2.18, resulta que $P=0.1$. Sin embargo, el valor que se agrega al renglón de la leyenda es el de la probabilidad ajustada $P(i)=0.084$, el periodo de retorno se calcula con la hoja de Excel, obteniéndose un $Tr = 9.76$ años (figura 2.31).

Costa del Golfo de México y Mar Caribe								
Cálculo del periodo de retorno								
Tipo	Intensidad	P(i) Inter.	P(i) Ajustada	P(i) Acum.	Eventos por tipo	$\mu(i)$ total	$\mu(i)$ anual	Tr(i)
DT	1	0.37	0.311	0.3109	13.06	42.00	0.2710	3.69
TT	2	0.37	0.311	0.6218	13.06	28.94	0.1867	5.36
H1	3	0.1	0.084	0.3950	3.53	15.88	0.1025	9.76
H2	4	0.24	0.202	0.2857	8.47	12.35	0.0797	12.55
H3	5	0.07	0.059	0.2605	2.47	3.88	0.0250	39.92
H4	6	0.02	0.017	0.0756	0.71	1.41	0.0091	109.79
H5	7	0.02	0.017	0.0336	0.71	0.71	0.0046	155.00
-	8	0	0	0	0.00	0.00	-	-
Suma		1.19		-	42			

Pegar valores en las celdas de fondo gris.
Analizar
Limpiar Celdas

Número Total de ciclones: 42.5
Años del periodo: 155

Grado de confianza de la estimación de probabilidad
BUENO

Figura 2.31 Cálculo de la probabilidad y periodo de retorno para los huracanes categoría 1 cerca de Cancún

La amplitud de la marea de tormenta, para un huracán categoría 1, se obtiene una vez encontrado el radio de máximo viento (R), los vientos máximos sostenidos (V) y el factor correctivo (F) con las siguientes fórmulas:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

siendo la presión de 980 mb,

$$R = 0.0007 e^{0.01156 (980)}$$

$$R = 0.0007 e^{11.3288}$$

$$R = 58.22 \text{ km}$$

Los vientos máximos se calculan como:

$$V = 115.95 - 0.2618R(\sin \phi) + 0.50 V_d$$

$$V = 115.92 - 0.2618(58.22)\sin(21) + 0.50(30)$$

$$V = 115.95 - 15.2420(0.3584) + 15$$

$$V = 125.48 \text{ km/h}$$

El factor correctivo se obtiene de la siguiente manera:

$$F = 0.6(1 + \sin \alpha)$$

$$F = 0.6(1 + \sin 21^\circ)$$

$$F = 0.6(1 + 0.3584)$$

$$F = 0.6(1.3584)$$

$$F = 0.8150$$

Una vez estimadas las variables, se procede a calcular la amplitud de la marea de tormenta:

$$\begin{aligned}
 h &= (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \\
 h &= [0.03(58.22) + 0.000119(125.48)^2 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.7466 + 0.000119(15745.23) - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.7466 + 1.8737 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= 2.1782(0.8150) \\
 h &= 1.77 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Así, se conoce que la amplitud de la marea de tormenta de un huracán categoría 1 en la región de la figura 2.32 es de 1.77 m, que corresponde a una marea *moderada*.

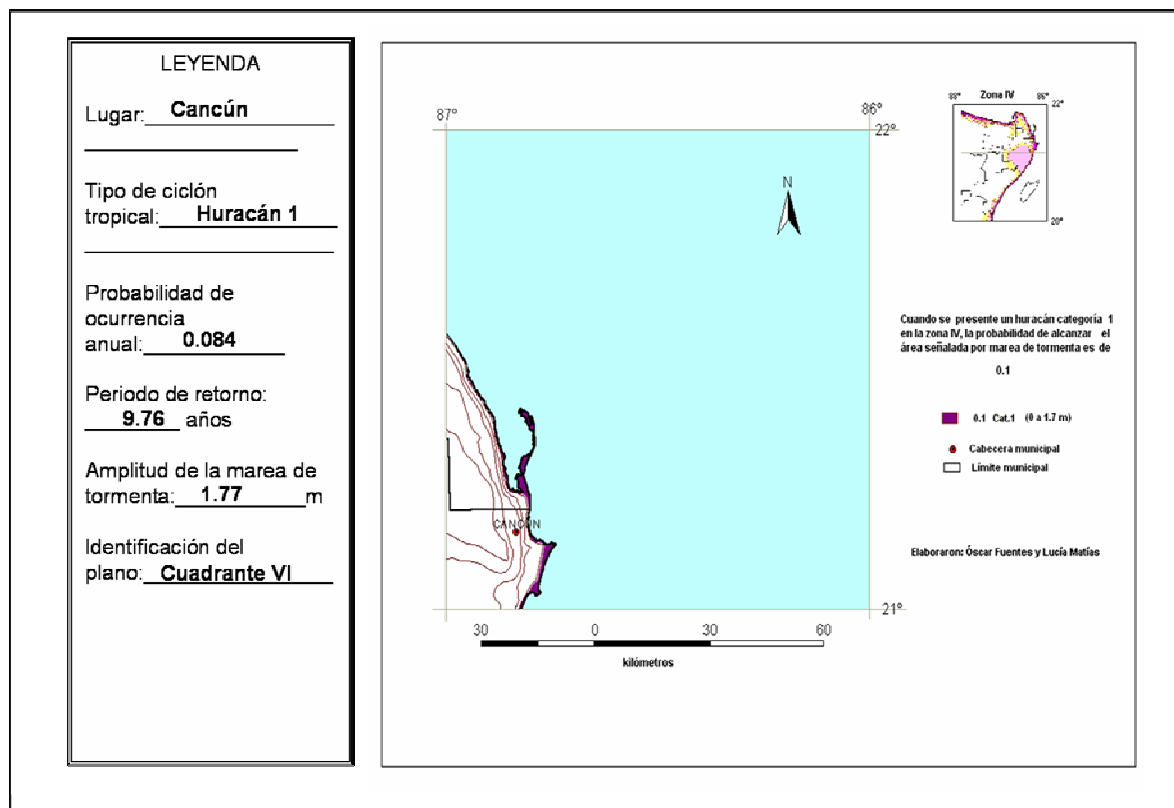


Figura 2.32 Peligro por marea de tormenta tipo “Moderada” para un huracán categoría 1 en la región oriental del estado de Quintana Roo

2.5.3 Tercer plano

Para generar el tercer plano se ilumina de color fiusha la franja entre la línea de costa y el valor obtenido por la amplitud de marea de tormenta; con ello se muestra el área inundada con agua marina generada por huracanes categoría 2. Asimismo, se procede con la búsqueda de la probabilidad que se apoya en la figura 2.19, que es de 0.24. Aunque en la leyenda se escribe el valor de la probabilidad ajustada $P(i) = 0.202$ y el periodo de retorno se calcula con la misma tabla de Excel (figura 2.33), donde se obtiene un $Tr = 12.55$ años.

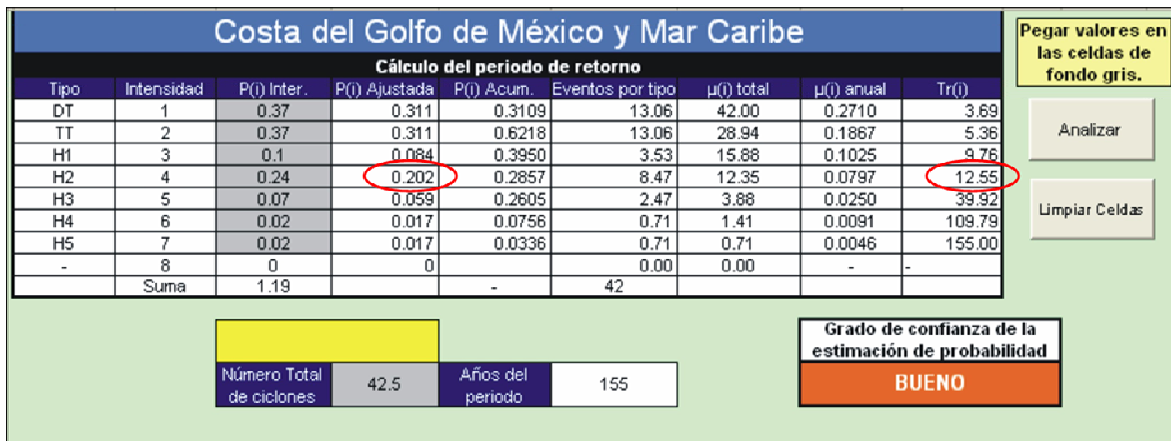


Figura 2.33 Cálculo de la probabilidad y periodo de retorno para los huracanes categoría 2 cerca de Cancún

La amplitud de la marea de tormenta para un huracán categoría 2 se calcula, una vez encontrado el radio de máximo viento (R), los vientos máximos sostenidos (V_{H2}) y el factor correctivo (F), con las siguientes fórmulas:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

siendo la presión de 965 mb,

$$R = 0.0007 e^{0.01156 (965)}$$

$$R = 0.0007 e^{11.1554}$$

$$R = 48.95 \text{ km}$$

Los vientos máximos se obtienen de la siguiente manera:

$$V = 139.84 - 0.2618R(\text{sen}\phi) + 0.50 V_d$$

$$V = 139.84 - 0.2618(48.95)\text{sen}(21) + 0.50(30)$$

$$V = 139.84 - 12.8173(0.3584) + 15$$

$$V = 150.24 \text{ km/h}$$

El factor correctivo se estima:

$$F = 0.6(1 + \text{sen}\alpha)$$

$$F = 0.6(1 + \text{sen}21^\circ)$$

$$F = 0.6(1 + 0.3584)$$

$$F = 0.6(1.3584)$$

$$F = 0.8150$$

Una vez obtenidas las variables se procede a calcular la amplitud de la marea de tormenta:

$$\begin{aligned}
 h &= (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \\
 h &= [0.03(48.95) + 0.000119(150.24)^2 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.4685 + 0.000119(22572.0576) - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.4685 + 2.6861 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= 2.7125(0.8150) \\
 h &= 2.21 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Finalmente, la amplitud de la marea de tormenta es de 2.21 m para un huracán categoría 2 en el cuadrante de interés, que es catalogada como “alta” (figura 2.34).

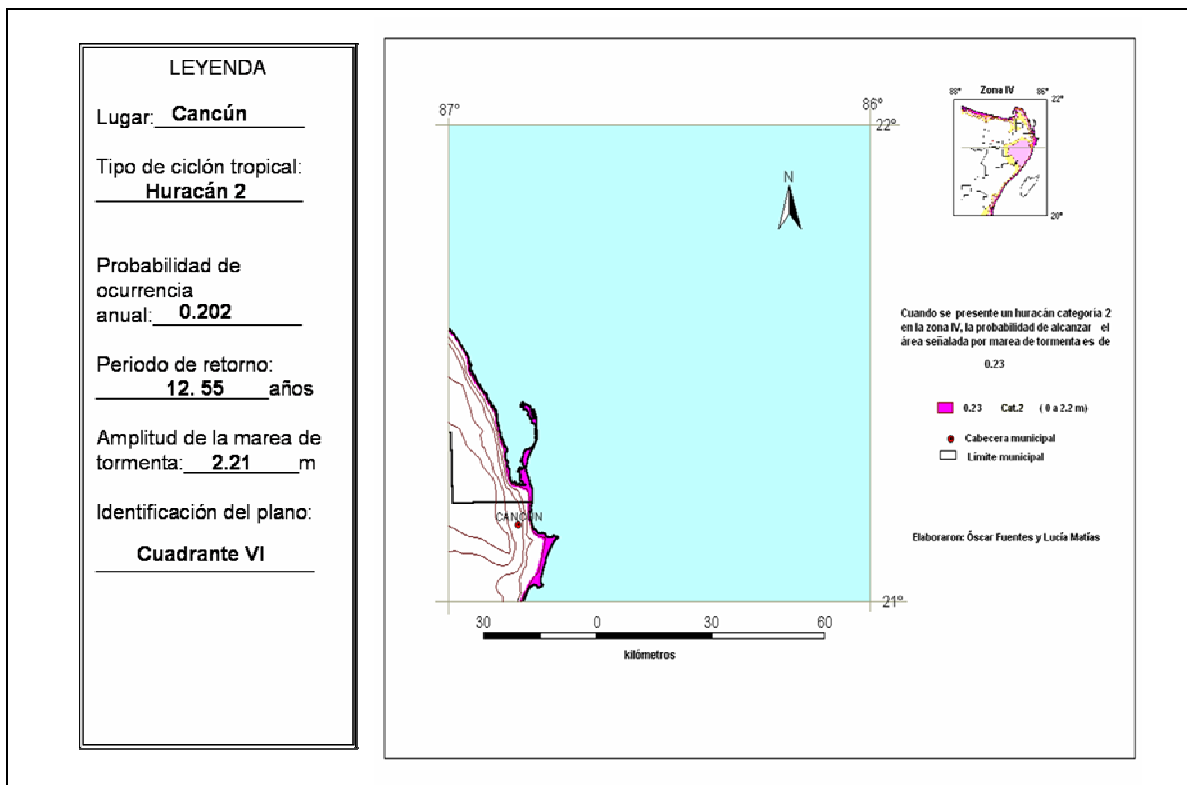


Figura 2.34 Peligro por marea de tormenta tipo “Alta” para un huracán categoría 2 en la región oriental del estado de Quintana Roo

2.5.4 Cuarto plano

El cuarto plano corresponde al mapa de peligro por marea de tormenta de un huracán categoría 3 en las cercanías de la localidad de Cancún, en el estado de Quintana Roo. Primeramente, se obtienen los cálculos de probabilidad, periodo de retorno y amplitud de la marea de tormenta, para iluminar de color naranja la zona comprendida entre la línea de costa y la amplitud de la marea de tormenta. Se procede a encontrar la probabilidad de que ocurra un huracán de categoría 3, en la zona de estudio. Este valor se busca en la figura 2.20 que es de 0.07. Sin embargo, se anota en la

leyenda el dato de la probabilidad ajustada $P(i) = 0.059$. El periodo de retorno se realiza con la misma hoja de Excel, así resulta que $Tr = 39.92$ años (figura 2.35).

Costa del Golfo de México y Mar Caribe								
Cálculo del periodo de retorno								
Tipo	Intensidad	P(i) Inter.	P(i) Ajustada	P(i) Acum.	Eventos por tipo	$\mu(i)$ total	$\mu(i)$ anual	Tr(i)
DT	1	0.37	0.311	0.3109	13.06	42.00	0.2710	3.69
TT	2	0.37	0.311	0.6218	13.06	28.94	0.1867	5.36
H1	3	0.1	0.084	0.3950	3.53	15.88	0.1025	9.76
H2	4	0.24	0.202	0.2857	8.47	12.35	0.0797	12.55
H3	5	0.07	0.059	0.2605	2.47	3.88	0.0250	39.92
H4	6	0.02	0.017	0.0756	0.71	1.41	0.0091	109.79
H5	7	0.02	0.017	0.0336	0.71	0.71	0.0046	155.00
-	8	0	0		0.00	0.00	-	-
Suma		1.19		-	42			

Pegar valores en las celdas de fondo gris.

Analizar

Limpiar Celdas

Número Total de ciclones: 42.5

Años del periodo: 155

Grado de confianza de la estimación de probabilidad: BUENO

Figura 2.35 Cálculo de la probabilidad y periodo de retorno para los huracanes categoría 3 cerca de Cancún

La amplitud de la marea de tormenta para un huracán categoría 3 se obtiene, una vez encontrando el radio de máximo viento (R), los vientos máximos sostenidos (V_{H3}) y el factor correctivo (F), con las siguientes fórmulas:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

siendo la presión de 945 mb,

$$R = 0.0007 e^{0.01156(945)}$$

$$R = 0.0007 e^{10.9242}$$

$$R = 38.85 \text{ km}$$

Los vientos máximos se calculan de la siguiente manera:

$$V = 166.44 - 0.2618R(\text{sen}\phi) + 0.50 V_d$$

$$V = 166.44 - 0.2618(38.85)\text{sen}(21) + 0.50(30)$$

$$V = 166.44 - 3.6453 + 15$$

$$V = 177.8 \text{ km/h}$$

El factor correctivo se obtiene:

$$F = 0.6(1 + \text{sen}\alpha)$$

$$F = 0.6(1 + \text{sen}21^\circ)$$

$$F = 0.6(1 + 0.3584)$$

$$F = 0.6(1.3584)$$

$$F = 0.8150$$

Una vez estimadas las variables, se procede a calcular la amplitud de la marea de tormenta:

$$\begin{aligned}
 h &= (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \\
 h &= [0.03(38.85) + 0.000119(177.8)^2 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.1655 + 0.000119(31612.84) - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [1.1655 + 3.7619 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= 3.4863(0.8150) \\
 h &= 2.8 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Por lo anterior, la amplitud de la marea de tormenta de un huracán categoría 3 en la región de la figura 2.36, es de 2.8 m, considerándose como inundación de tipo “alto”.

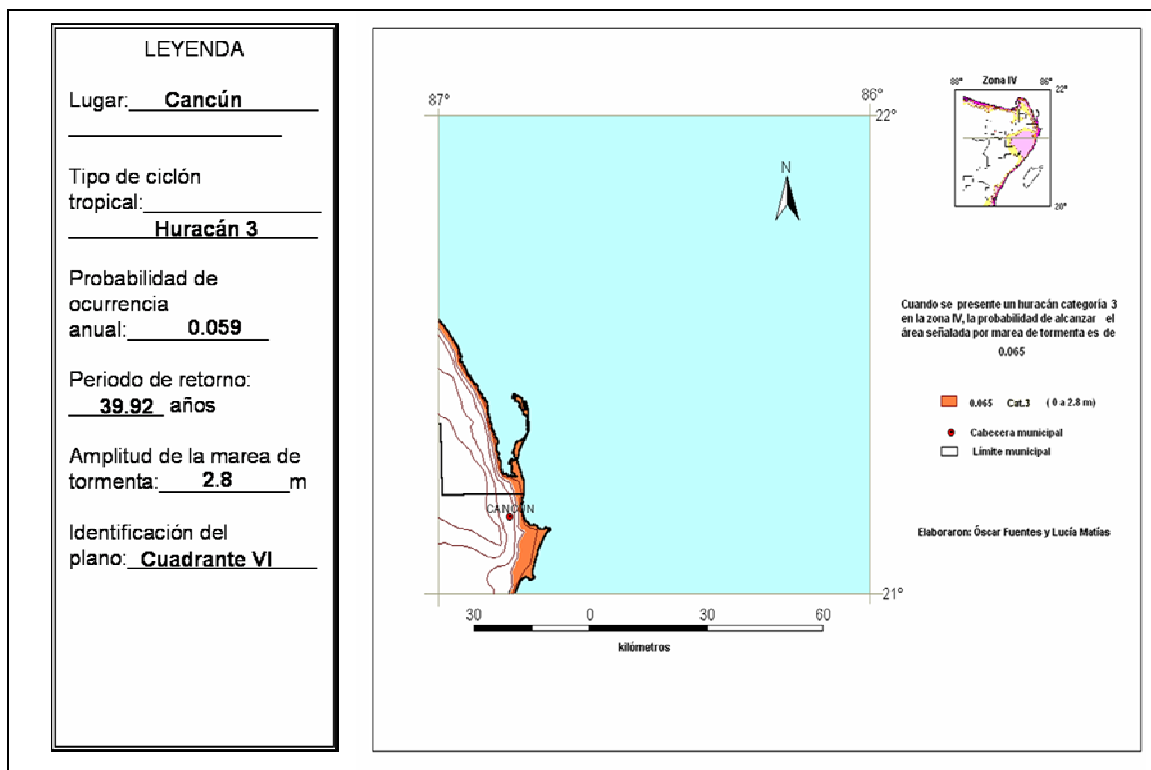


Figura 2.36 Peligro por marea de tormenta tipo “Alta” para un huracán categoría 3 en la región oriental del estado de Quintana Roo

2.5.5 Quinto plano

El mapa de peligro por marea de tormenta que corresponde a un huracán de categoría 4 en el extremo oriental del estado de Quintana Roo, se construye iluminando de color rosa el área comprendida entre la línea de costa y el valor de la amplitud de la marea de tormenta, que es la elevación promedio que podría alcanzar la inundación. La probabilidad de que ocurra una marea de tormenta de esta magnitud en un año se obtiene de la figura 2.21; el valor correspondiente, $P=0.02$, pero en la leyenda se anota la probabilidad ajustada $P(i)=0.017$. El periodo de retorno se calcula a partir de la hoja de Excel, obteniéndose $Tr=109.79$ años (figura 2.37).

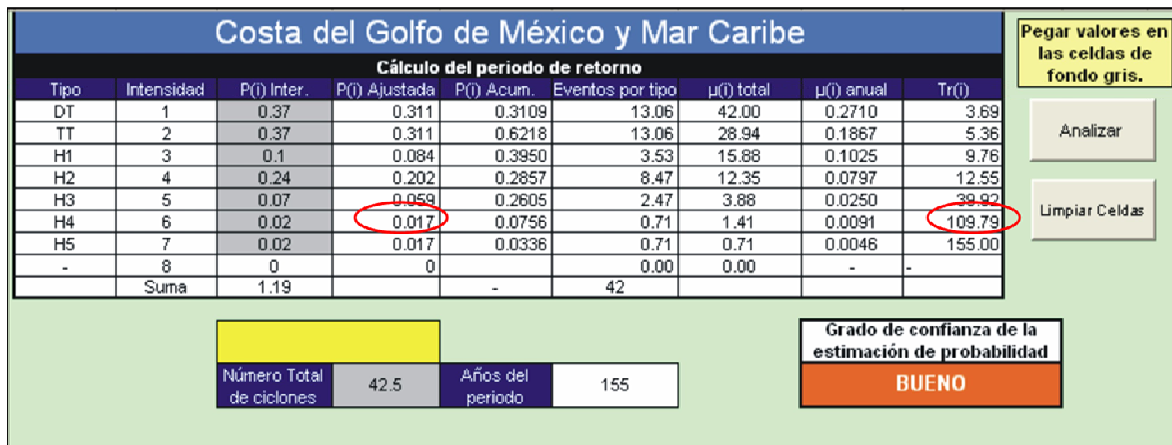


Figura 2.37 Cálculo de la probabilidad y periodo de retorno para los huracanes categoría 4 cerca de Cancún

La amplitud de la marea de tormenta para un huracán categoría 4 se obtiene, una vez encontrado el radio de máximo viento (R), los vientos máximos sostenidos (V_{H4}) y el factor correctivo (F), con las siguientes fórmulas:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

siendo la presión de 920 mb,

$$R = 0.0007 e^{0.01156 (920)}$$

$$R = 0.0007 e^{10.6352}$$

$$R = 29.1 \text{ km}$$

Los vientos máximos se calculan como:

$$V = 194.64 - 0.2618R(\text{sen}\phi) + 0.50 V_d$$

$$V = 194.64 - 0.2618(29.1)\text{sen}(21) + 0.50(30)$$

$$V = 194.64 - 2.7304 + 15$$

$$V = 206.9 \text{ km/h}$$

El factor correctivo se obtiene:

$$F = 0.6(1 + \text{sen}\alpha)$$

$$F = 0.6(1 + \text{sen}21^\circ)$$

$$F = 0.6(1 + 0.3584)$$

$$F = 0.6(1.3584)$$

$$F = 0.8150$$

Una vez estimadas las variables, se procede a calcular la amplitud de la marea de tormenta:

$$\begin{aligned}
 h &= (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \\
 h &= [0.03(29.1) + 0.000119(206.9)^2 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [0.8730 + 0.000119(42807.61) - 1.4421](0.8150) \\
 h &= [0.8730 + 5.0941 - 1.4421](0.8150) \\
 h &= 4.5250(0.8150) \\
 h &= 3.6 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Así se determina que la amplitud de la marea de tormenta de un huracán categoría 4 en la región de figura 2.38 es de 3.6 m, inundación catalogada como “muy alta”.

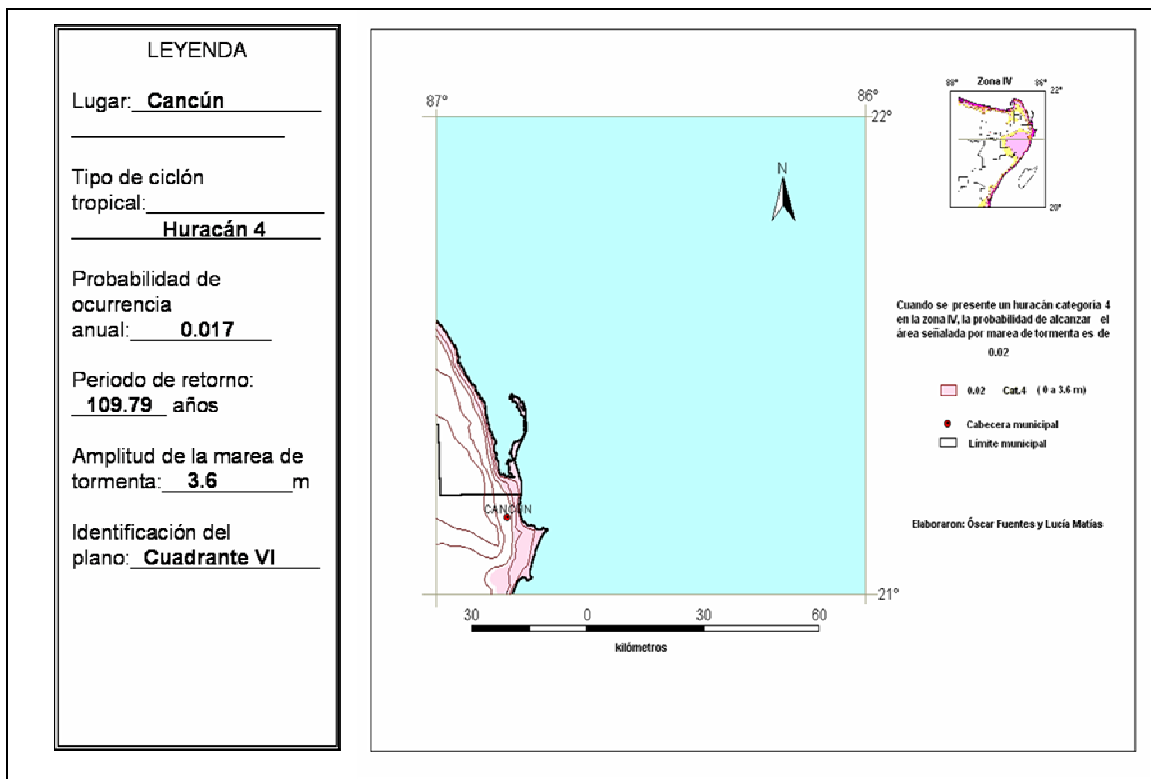


Figura 2.38 Peligro por marea de tormenta tipo “Muy alta” para un huracán categoría 4 en la región oriental del estado de Quintana Roo

2.5.6 Sexto plano

En el plano seis se dibuja en color amarillo el área comprendida entre 0 y 5.1 m, que es la elevación media de marea de tormenta que podría producir un huracán categoría 5. El valor de probabilidad se obtiene de la figura 2.22; es decir $P=0.02$, sin embargo, se escribe en la leyenda el dato de la probabilidad ajustada $P(i)=0.017$. El periodo de retorno se obtiene con ayuda de la hoja de Excel (figura 2.39), donde se muestra un $Tr=155$ años.

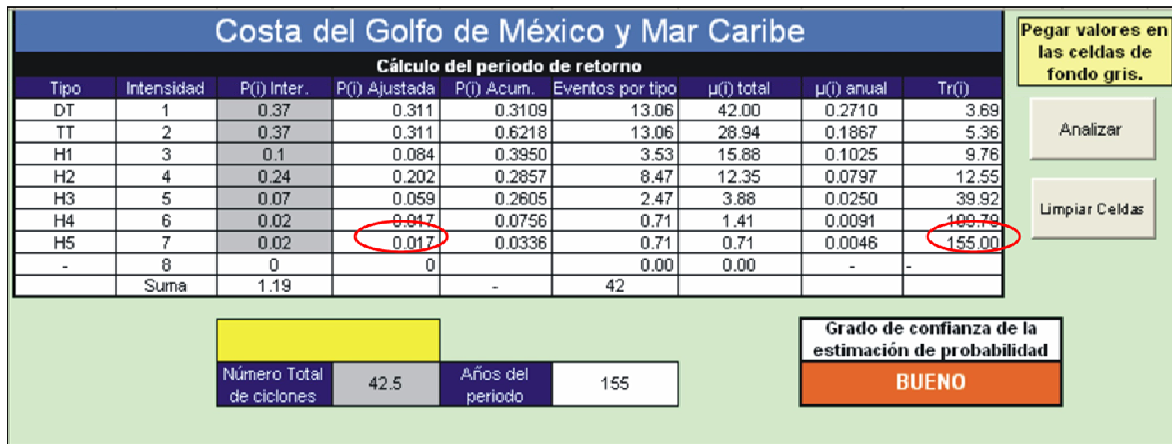


Figura 2.39 Cálculo de la probabilidad y periodo de retorno para los huracanes categoría 5 cerca de Cancún

La amplitud de la marea de tormenta para un huracán categoría 5 se obtiene, una vez encontrando el radio de máximo viento (R), los vientos máximos sostenidos (V_{HS}) y el factor correctivo (F), con las siguientes fórmulas:

$$R = 0.0007 e^{0.01156 p_0}$$

siendo la presión de 882 mb,

$$R = 0.0007 e^{0.01156 (882)}$$

$$R = 0.0007 e^{10.1959}$$

$$R = 18.75 \text{ km}$$

Los vientos máximos se calculan como:

$$V = 231.01 - 0.2618R(\sin\phi) + 0.50 V_d$$

$$V = 231.01 - 0.2618(18.75)\sin(21) + 0.50(30)$$

$$V = 231.01 - 1.7593 + 15$$

$$V = 244.25 \text{ km/h}$$

El factor correctivo se obtiene:

$$F = 0.6(1 + \sin\alpha)$$

$$F = 0.6(1 + \sin 21^\circ)$$

$$F = 0.6(1 + 0.3584)$$

$$F = 0.6(1.3584)$$

$$F = 0.8150$$

Una vez estimadas las variables, se procede a calcular la amplitud de la marea de tormenta:

$$h = (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F$$

$$h = [0.03(18.75) + 0.000119(244.25)^2 - 1.4421](0.8150)$$

$$h = [0.5625 + 0.000119(59658.0625) - 1.4421](0.8150)$$

$$h = [0.5625 + 7.0993 - 1.4421](0.8150)$$

$$h = 6.2197(0.8150)$$

$$h = 5.1 \text{ m}$$

La amplitud de la marea de tormenta de un huracán categoría 5 en la región de figura 2.40 es de 5.1 m. Se define este tipo de inundación para el extremo oriental del estado de Quintana Roo como del tipo “extraordinaria”.

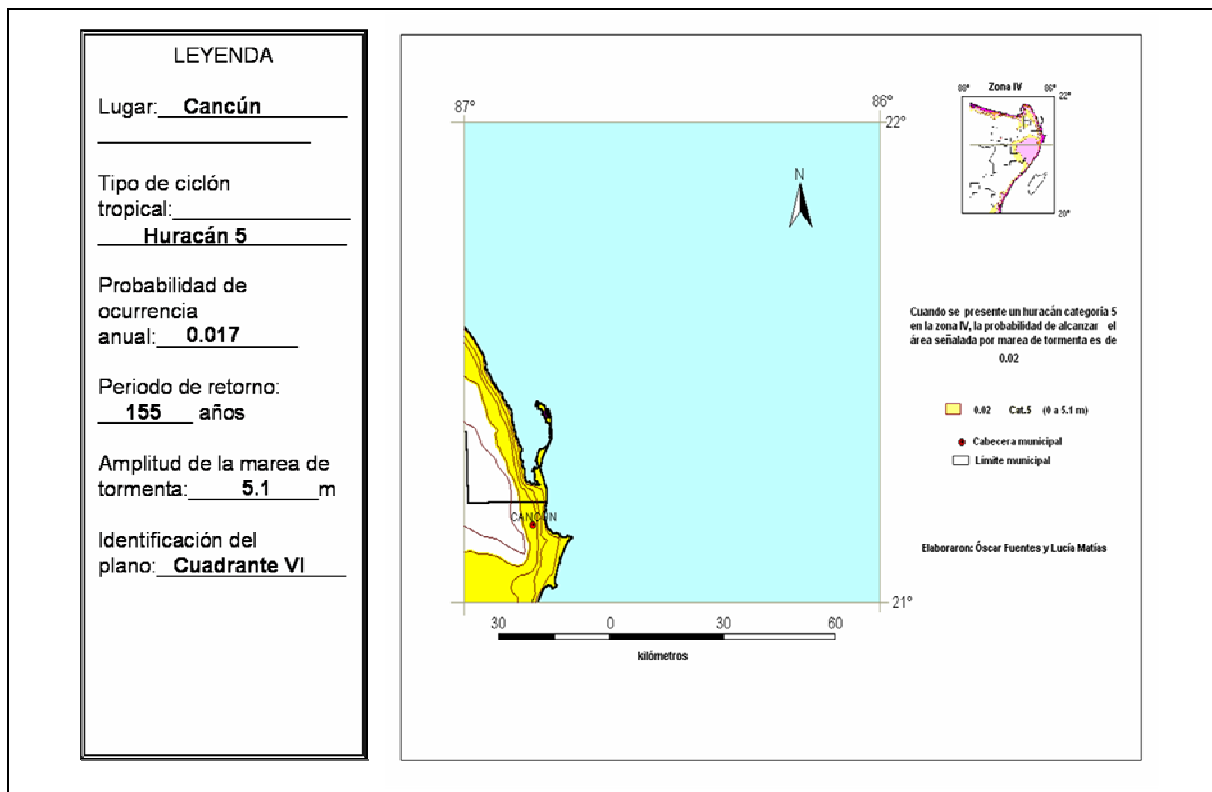


Figura 2.40 Peligro por marea de tormenta tipo “Extraordinaria” para un huracán categoría 5

2.6. FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD PARA LA MAREA DE TORMENTA

La vulnerabilidad se estimará en los mismos términos que se plantean en el capítulo 1.3, en el que el daño a las viviendas está en función de la profundidad de la inundación que se presentaría en ellas.

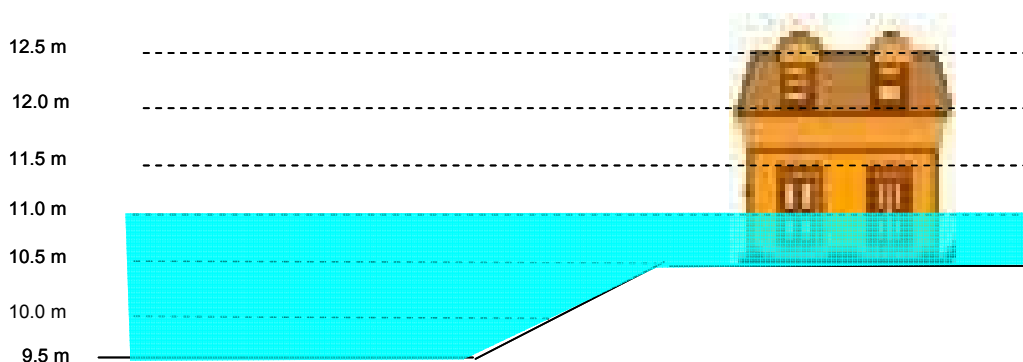
Se supondrá que las inundaciones costeras se forman poco a poco durante uno o más días, por lo que las corrientes del agua en la zona anegada son pequeñas (menores a 0.3 m/s) y no generarán fuerzas de arrastre o de impacto que las afecten estructuralmente. En una futura actualización de este documento se tomará en cuenta el caso en el que se presenten fuerzas adicionales debidas a oleaje o a corrientes.

2.6.1 Cálculo de la vulnerabilidad de las viviendas por inundaciones

En este documento se analizará al menaje existente en el interior de las viviendas como el elemento de riesgo, por lo que la vulnerabilidad se referirá únicamente a este aspecto. El daño al menaje se plantea en función de la profundidad de la inundación que se presentaría en ellas.

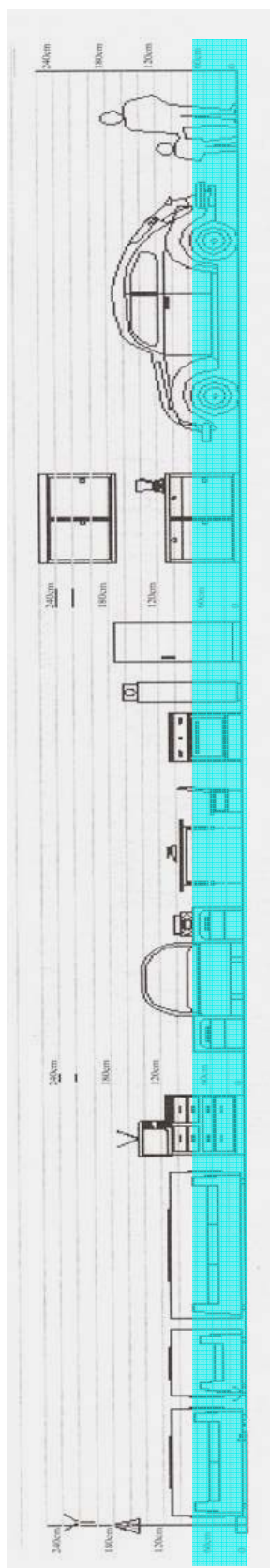
2.6.2 Determinación de la profundidad de inundación de las viviendas

Las viviendas existentes en la zona de interés se marcan en cada uno de los mapas de peligro, de acuerdo con la elevación del terreno en su desplante, se obtiene la profundidad de inundación dentro de la vivienda (figura 2.41).



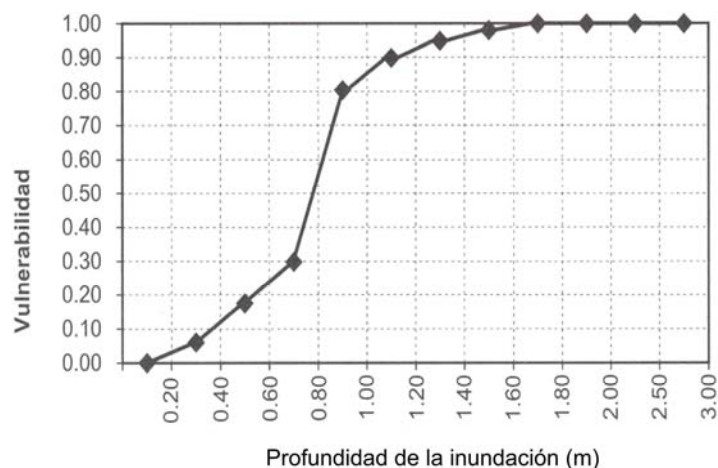
2.41 Profundidad de la inundación de 0.5 m en la vivienda

De acuerdo con la elevación del espejo de agua de la inundación que aparece en el mapa de peligro, se determina su espesor dentro de la vivienda (figura 2.42).



2.42 Profundidad de la inundación dentro de una vivienda

A cada profundidad de inundación dentro de la vivienda, le corresponde un porcentaje del daño total del menaje que existe en su interior. En la sección 1.3.2 de este tomo, se presentan las funciones de vulnerabilidad para cinco tipos de viviendas con base en los materiales utilizados en sus techos y muros. En la figura 2.43 se reproduce la función de vulnerabilidad de una vivienda tipo II, la cual comprende los hogares clasificados como clase baja, donde la casa puede ser de autoconstrucción o construida con materiales de la zona y la mayoría de las veces sin elementos estructurales. Respecto al menaje, las habitaciones cuentan con sus muebles propios y están más o menos definidos.



2.43 Función de vulnerabilidad para una vivienda tipo II

En la tabla 2.5 aparecen los valores del porcentaje del daño total del menaje de las viviendas tipo II. Además, para este tipo de viviendas se considera que el costo total del menaje es de \$50,000.

Tabla 2.5 Porcentaje de daño del menaje de una vivienda tipo II por inundación

Profundidad de la inundación (m)	Grado de vulnerabilidad (Porcentaje del valor total de daño)
0.1	0
0.3	0.07
0.5	0.18
0.7	0.30
0.9	0.80
1.1	0.90
1.3	0.95
1.5	0.98
1.7	1.0
1.9	1.0

2.6.3 Costo de la inundación para el grupo de viviendas desplantadas en cierto intervalo de elevación topográfica

Para la profundidad de inundación costera que aparece en el mapa de peligro en estudio se determina la vulnerabilidad de las viviendas. Esta corresponde al costo total de los daños a las viviendas ubicadas dentro de la zona inundada marcada en el mapa de peligro.

La descripción del cálculo de la vulnerabilidad de las viviendas por la inundación costera se realiza a través de un ejemplo. Para ello, se considera el mapa de peligro por inundación de la marea de tormenta asociado a un ciclón tropical de cierta intensidad.

En la figura 2.44 se muestra un mapa de peligro para una marea de tormenta generada por un huracán categoría 2, que de acuerdo con el método simplificado para calcular la amplitud de la marea de tormenta resultó ser de 2 m con una probabilidad de 0.15.

Las regiones se escogen de un tamaño tal que, dividan la zona de interés en por lo menos cinco partes en cada dirección.

En cada región se contó el número de viviendas de cada tipo y se clasificaron de acuerdo con la cota de su piso. Según el capítulo 1.3 el costo total del menaje para las viviendas tipo I es de \$12,500 y para las de tipo II es de \$50,000. En la tabla 2.6 se consignan estos datos.

En la tabla 2.6 se presentan los cálculos que permiten obtener la vulnerabilidad de las viviendas incluidas en el mapa de peligro del huracán categoría 2.

La columna 4 de la tabla 2.7 se obtuvo al restar a la amplitud de marea de tormenta (2 m), el valor de la elevación de desplante de la vivienda.

En la columna 6 se anotaron los costos totales de los menajes de las viviendas tipo I y tipo II.

En la columna 7 aparece el costo del deterioro por vivienda, que se encontró al multiplicar el porcentaje de daño por el valor total de perjuicio.

En la columna 8 se muestra el resultado expresado en millones de pesos, y resulta al multiplicar el daño en una vivienda (columna 7) por el número de viviendas (columna 1).

En la columna 9 se incluyen los daños dentro de cada región, que es igual a la suma de los daños en la región que se analiza, mismos que aparecen en la columna 8.

En la columna 10 se incluyen los resultados de dividir cada valor de la columna 9, entre el daño total que está escrito en la parte inferior de ella, con la intención de encontrar su riesgo relativo de daño. Este valor indica la proporción de daños en cada región del mapa de peligro, para señalar las zonas que tienen la mayor vulnerabilidad. En el caso del ejemplo fue la región A, ya que ahí la vulnerabilidad relativa fue de 0.47.

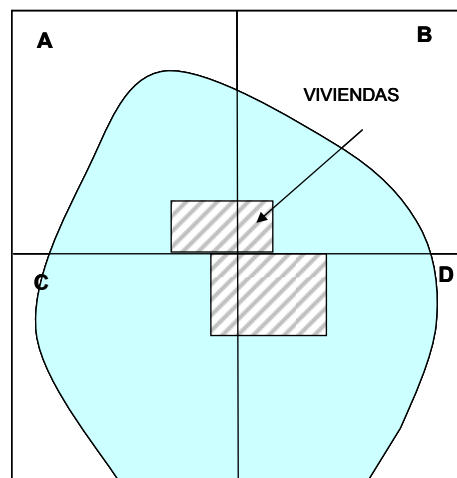


Figura 2.44 Mapa de peligro para un huracán categoría 2. La elevación de la inundación es de 2 m

Tabla 2.6 Viviendas en cada zona del mapa de peligro

Región	No. de viviendas	Tipo de vivienda	Elevación de desplante
A	80	I	0.5
	40	II	0.5
	30	II	1
B	20	I	1
	30	II	1
	35	II	1.5
C	10	II	0.5
	15	II	1
	20	II	1.5
D	10	I	0.5
	20	I	1
	25	II	1
Costo menaje de las viviendas tipo I: \$12,500			
Costo menaje de las viviendas tipo II: \$50,000			

Tabla 2.7 Huracán categoría 2 (la amplitud de la marea de tormenta es de 2 m)

Región	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	No. de viviendas	Tipo de vivienda	Elevación de desplante	Profundidad de la inundación	Porcentaje de daño	Costo total por vivienda	Daño en una vivienda	Daños (Millones de pesos)	Suma de daños en la región (Millones de pesos)	Riesgo relativo
A	80	I	0.5	1.5	95	12,500	11875	0.95		
	40	II	0.5	1.5	98	50,000	49000	1.96	4.185	0.47
	30	II	1	1	85	50,000	42500	1.275		
B	20	I	1	1	82	12,500	10250	0.205		
	30	II	1	1	85	50,000	42500	1.275	1.953	0.22
	35	II	1.5	0.5	27	50,000	13500	0.473		
C	10	II	0.5	1.5	98	50,000	49000	0.49		
	15	II	1	1	85	50,000	42500	0.638	1.398	0.16
	20	II	1.5	0.5	27	50,000	13500	0.27		
D	10	I	0.5	1.5	95	12,500	11875	0.119		
	20	I	1	1	82	12,500	10250	0.205	1.386	0.16
	25	II	1	1	85	50,000	42500	1.063		
<i>Total</i>								8.921	8.921	1

Para las tormentas tropicales y los huracanes categorías 1, 3, 4 y 5 se seguirá un proceso similar al anterior, para disponer en cada uno de ellos de una tabla muy parecida a la 2.7 que proporcione la vulnerabilidad.

2.7. ELABORACIÓN DEL MAPA DE RIESGO

El riesgo se calculará como se indica en el capítulo 1.4 de este libro, es decir,

$$R = C P V$$

siendo C el valor de los bienes expuestos, V el grado de vulnerabilidad y P la función de peligro de la marea de tormenta.

Con base en los costos de los daños al menaje de las viviendas por marea de tormenta, en cada una de las áreas de interés en los mapas de peligro, se obtiene el valor de los daños para cada región de los mapas de peligro con la siguiente expresión:

$$R = C \sum_{i=0}^N P_i V_i \quad (2.11)$$

siendo P_i la probabilidad de ocurrencia del ciclón tropical de intensidad i , V_i la vulnerabilidad asociada a este ciclón y N toma el valor de seis, porque es el número de intensidades de los ciclones tropicales analizados (TT, H1, H2, H3, H4 y H5). Las probabilidades aparecen en cada uno de los mapas de peligro y los valores de la vulnerabilidad en tablas similares a la 2.6.

En el ejemplo de aplicación de vulnerabilidad de la tabla 2.7 se obtuvo en la columna 9, la afectación por la profundidad de la inundación según el grado de vulnerabilidad de las viviendas en los cuadrados A, B, C y D, cuando se presenta un huracán categoría 2; a estos valores se les llamará V2A, V2B, V2C y V2D.

Cuando se dispone de una tabla similar a la 2.7 para tormentas tropicales se encuentran V0A, V0B, V0C y V0D; para un huracán categoría 1 serían V1A, V1B, V1C y V1D; para un huracán categoría 3 se tendría V3A, V3B, V3C y V3D; para el de categoría 4, V4A, V4B, V4C y V4D. Finalmente, para uno de categoría 5 quedarían V5A, V5B, V5C y V5D.

Por otra parte, en cada mapa de peligro aparece la probabilidad de ocurrencia anual de cierta clase de ciclón tropical. De ellos se definen P0, P1, P2, P3, P4 y P5, que son las probabilidades de ocurrencia anual de mareas de tormenta por tormentas tropicales, huracanes categoría 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente. Para el caso de huracán categoría 2 se tiene que $P2 = 0.15$.

Suponiendo que en la zona de interés sea posible incluir a todas las categorías de huracán, sería conveniente anotar en una tabla como la 2.8, en las primeras cinco columnas, información correspondiente a las probabilidades de ocurrencia anual de distintas clases de ciclones tropicales en la zona de estudio y las vulnerabilidades obtenidas apoyándose en los mapas de peligro y algunas características de las viviendas.

En las últimas cuatro columnas aparecen los productos de probabilidad por vulnerabilidad y las sumas de estos valores. Estas sumas corresponden al valor esperado de los daños en cada cuadrado.

Los daños por inundación pueden ser anotados en el plano que sirvió para construir los mapas de peligro y de esa manera construir el mapa de riesgo por inundaciones costeras. En la figura 2.45 se presenta un ejemplo de cómo quedaría el mapa de riesgo a partir del mapa de peligro de la figura 2.44.

En la tabla 2.8 se incluye los cocientes del costo esperado en cada cuadrado entre la suma de todos los valores esperados que aparecen en el renglón que dice *riesgo relativo*, ya que otra forma de representar el mapa de riesgo por inundaciones costeras consiste en anotar en él valores relativos al costo esperado de efectos máximos, y establecer algunos intervalos para calificar el grado de daños esperados.

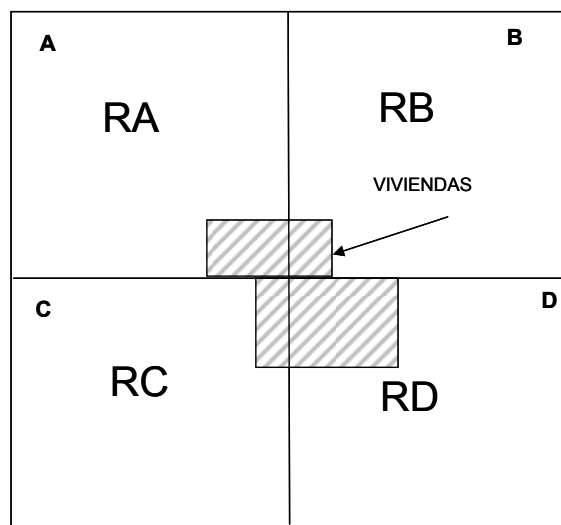


Figura 2.45 Mapa de riesgo por inundación costera

El grado de riesgo relativo en cada cuadrado podría mostrarse, por ejemplo, a intervalos entre 0 a 0.1 como riesgo mínimo e iluminar el cuadrado con gris; entre 0.1 y 0.3 como riesgo bajo y llenar con color azul el cuadrado; de 0.3 a 0.7 como riesgo moderado y colorear en verde el cuadrado; entre 0.5 a 0.7 como riesgo alto e ilustrar en naranja el cuadrado y de 0.7 a 1 como riesgo máximo con un sombreado con rojo. En la figura 2.46 se muestra una manera de cómo podría quedar el mapa de riesgo relativo de daño a las viviendas por inundación costera.

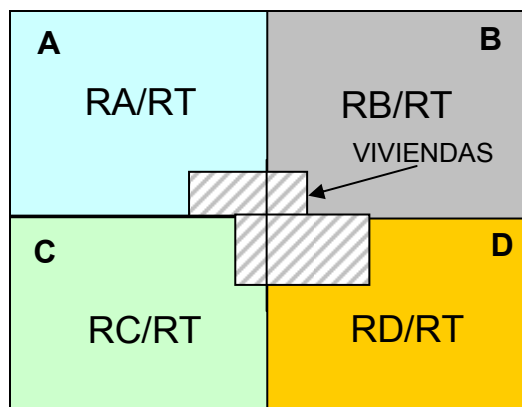


Figura 2.46 Mapa de riesgo relativo por inundación costera

Tabla 2.8 Cálculo del riesgo en cada cuadrado de las manas de neliaro

Categoría del ciclón	Probabilidad de ocurrencia	Vulnerabilidad Cuadro A		Vulnerabilidad Cuadro B		Vulnerabilidad Cuadro C		Vulnerabilidad Cuadro D		Riesgo Cuadro A	Riesgo Cuadro B	Riesgo Cuadro C	Riesgo Cuadro D
		V0A	V0B	V0C	V0D	(P0)\(V0A)	(P0)\(V0B)	(P0)\(V0C)	(P0)\(V0D)	(P1)\(V1A)	(P1)\(V1B)	(P1)\(V1C)	(P1)\(V1D)
Tormenta tropical	P0												
Huracán categoría 1	P1												
Huracán categoría 2	P2												
Huracán categoría 3	P3												
Huracán categoría 4	P4												
Huracán categoría 5	P5												
Suma:													
Suma de riesgos:													
Riesgo relativo													

CONCLUSIONES

Los mapas de riesgo que se pueden obtener con la metodología descrita pueden ser de gran utilidad en la reglamentación del uso de suelo en las zonas inundadas por marea de tormenta, o a encaminar acciones para mitigación del riesgo por parte de Protección Civil en las zonas con mayor probabilidad de sufrir daños.

Cuando se permite la construcción de viviendas en los sitios susceptibles a inundarse por marea de tormenta debe preverse en sus diseños que podría existir una inundación de cierta magnitud, para que los daños por este motivo sean nulos o mínimos. Una forma de hacerlo podría ser colocando el piso de las viviendas por encima de la elevación que alcanzaría el nivel del agua durante la marea de tormenta de huracanes categoría 2 y reducir al mínimo las construcciones en la primera franja adyacente a la costa.

Cuando se tenga información a un nivel de detalle, a una escala grande es recomendable emplear un Sistema de Información Geográfica y algún modelo matemático para calcular la marea de tormenta y realizar estimaciones más precisas de las zonas de inundación.

Se recomienda que se revise el trazo de las curvas de nivel de los planos de apoyo que se encuentran entre el nivel 0 y los 10 m. Es conveniente dibujarlas a cada metro desde la línea de costa hasta la de 10 m. Es muy importante conocer las elevaciones del piso de las viviendas para los municipios cuya elevación topográfica esté entre 0 y 10 m. En caso de tener duda de las zonas bajas, hacer un levantamiento topográfico en el lugar.

Para algunas costas del norte de México es importante la marea astronómica, cuyo ascenso máximo se debe adicionar al de la marea de tormenta.

La reforestación de la vegetación, como el caso del manglar en las márgenes de los ríos y los canales, así como frente a las costas reduce el efecto de la marea de tormenta y de las inundaciones. Si la vegetación de la costa es inexistente, se deberá utilizar la primera franja paralela a la costa para actividades recreativas relacionadas con la playa, y mantener sólo las instalaciones de servicio existentes y los espacios públicos con fines recreativos.

Los servicios básicos deberán ser concentrados hacia zonas más céntricas y alejadas de la costa y de los ríos.

En el futuro se deben obtener más funciones de vulnerabilidad que abarquen otros aspectos que pueden representar daños importantes, por ejemplo, sobre elementos estructurales tales como cimentaciones, muros o bien, elementos no estructurales como plafones, muros falsos, etc.

RECOMENDACIONES PARA REDUCIR DAÑOS POR MAREA DE TORMENTA

1. Difundir entre la población, la identificación de las zonas cercanas al mar, donde la elevación topográfica sea menor a 10 m, está expuesta a inundaciones por marea de tormenta.
2. En las viviendas ubicadas a menos de 5 m de elevación topográfica, tener previsto que pueden inundarse del orden de los 3.5 m, por lo que debe contarse con un plan alternativo para llevar muebles y equipos a elevaciones más altas.
3. En las construcciones ubicadas a menos de 5 m de elevación topográfica, tener previsto que pueden inundarse del orden de los 3.5 m, por lo que no deben instalarse plantas eléctricas ni otros equipos que puedan ser dañados por la acumulación de agua.
4. La población deberá dirigirse con anticipación hacia los refugios temporales y fuera de las zonas inundables, debido a que también se pueden presentar vientos intensos y lluvia fuerte.
5. La inundación costera puede contaminar las fuentes de agua potable, por lo que se debe prever una dotación suficiente de agua potable para 5 días o más.
6. Las construcciones habitacionales próximas al mar pueden estar expuestas a oleaje intenso durante el tiempo que el nivel medio del mar es alto, por lo que sería necesario evacuar a la población de estas zonas con suficiente antelación a la llegada del ciclón tropical.
7. Se debe tener cuidado con los muros o bardas de lindero cercanas a las construcciones porque tienen una alta probabilidad de socavación de sus cimientos y de ser derribados por el oleaje.
8. Prever que el nivel de la arena de la playa pueda disminuir en más de 1 m, lo que podría reducir el apoyo de los cimientos con el terreno.
9. Proteger la zona de cimentación más cercana al mar que pueda perder apoyo con el piso.
10. Evitar que las nuevas construcciones estén a menos de 3.5 m de elevación topográfica y considerar la llegada de olas a ellas cuando suba el nivel medio del mar del orden de los 3.5 m.
11. Conservar la vegetación original del lugar, sobre todo a elevaciones menores de 3.5 m.
12. Cuidar las zonas naturales de vegetación como manglares porque constituyen una defensa natural contra la marea de tormenta.
13. Conservar las dunas de arena que puedan existir en el lugar cercano al mar.
14. Revisar qué sucedería con la construcción en caso de que se incremente el nivel medio del mar hasta 3.5 m y ocurra una erosión de la playa, para que se disponga con suficiente anticipación de estructuras de protección adecuadas para la misma.
15. Disponer de mapas de peligro y riesgo de terrenos cercanos al mar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Coburn, A., R. Spence and A. Pomonis, "Vulnerabilidad y evaluación del riesgo". Programa de entrenamiento para el manejo de desastres. Cambridge, U.K., pp.69. 1991.
- De la Cruz-Reyna, S. "Propuesta de un código de alerta para potenciales erupciones del volcán Popocatepetl". Prevención, Cenapred, No.11, pp.8-10. 1995.
- Fuentes, O., V. Franco y L. Matías, "Guía metodológica para el análisis del peligro, vulnerabilidad, riesgo y pérdidas causadas por desastres naturales o antropogénicos y su reducción y prevención", SEGOB-UNAM, diciembre, pp. 99-132. 2003.
- Maisel Louis., "Probabilidad y estadística", Fondo Educativo Interamericano, S. A., U.S.A. 1977.
- Pérez-Hernández, A. "El ordenamiento territorial en la reducción de los desastres naturales en las zonas costeras cubanas", Gaceta ecológica, 76, pp. 73-82. 2005.
- Pielke, R. Jr. And Pielke, R. Sr. "Hurricanes Their Nature and Impacts on Society". John Wiley and Sons. England. pp. 279. 1997.
- Rosengaus, M., M. Jiménez y Ma. Vázquez. "Atlas climatológico de ciclones tropicales en México", Cenapred-IMTA. México, pp. 106. 2002.
- Roze, J. "Crisis, vulnerabilidad y desastres". La globalización en regiones periféricas de América Latina. Argentina. 1999.
- Salas M. y M. Jiménez. Fascículo "Inundaciones", Cenapred. México, pp. 53. 2004.
- Salas, I., R. Pérez, O. García, C. Rodríguez, A. Pérez, "Mapa de peligro por surgencias de ciclones tropicales". Boletín de SOMETCUBA, Vol.4, No. 1. 1998