



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**RE-ANÁLISIS DE OLEAJE PARA MÉXICO: 1948-2007**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

**GERMÁN DANIEL RIVILLAS OSPINA**

TUTOR:

**Dr. RODOLFO SILVA CASARÍN**

*A mi esposa e hijo:  
Diana y Sebastian,  
A mis padres:  
Consuelo y Tulio,  
A mis hermanos:  
Jhon y Juan,  
A Jesús y Ubaldina,  
A mi familia*

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la gran oportunidad que me dio, cumpliendo con esto uno de los objetivos fundamentales en mi vida.

A la Universidad EAFIT porque cimentó los pilares de mi educación.

A Integral S.A., por los maravillosos tiempos que allí gocé.

Al Dr. Rodolfo Silva por su apoyo incondicional, a Gregorio por sus valiosos consejos y a Gabriel por su amistad y soporte intelectual; en general, al Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al Dr. Ramón Domínguez, ya que sin su existencia no hubiera sido posible viajar a México.... Gracias infinitamente.

A Juan Hernando Cadavid, pues su amistad y enseñanza ha sido de gran valor para vida personal y profesional.

A Juan Guillermo Acevedo, por su lealtad, su apoyo incondicional y por enseñarme lo que significa la gratitud.

A Jesús Pérez, por su confianza.

A Gildardo Ospina, por el respaldo que siempre me ha brindado.

A Graciela, por su amor incondicional.

A todas y cada una de aquellas personas que han tenido parte en mi vida y de una u otra forma hicieron parte de este camino, aportando un granito de arena para que esta Maestría fuese posible. No es que los haya olvidado, sino que todos forman un solo conjunto, un solo sentimiento. Siempre voy a estar agradecido por lo que hicieron.

**Índice**

**Lista de Figuras**

**Lista de Tablas**

**Introducción**

**1. Conceptos Básicos y Marco Teórico**

**1.1. Conceptos Básicos de Probabilidad**

**1.2. Caracterización del Oleaje**

**1.3. Metodología**

**2. Modelo Híbrido de Generación de Oleaje**

**2.1. Modelo de Generación de Oleaje por Viento – WAM**

**2.2. Modelo de Generación de Oleaje por Viento Ciclostrófico – HURAC**

**2.3. Implementación Numérica**

**2.4. Validación del Modelo Híbrido**

**3. Modelo y Análisis de Resultados Particulares**

**3.1. Pre-Procesamiento de los Resultados**

**3.2. Caracterización de la Celda Frente a Cancún, Quintana Roo**

**4. Análisis Regional**

**4.1. Vertiente Atlántica**

**4.2. Vertiente Pacífica**

**Conclusiones**

**Futuras Líneas de Investigación**

**Bibliografía**

**A Apéndice 1**

**A.1 Mapas de Altura de Ola Significante para La Vertiente Atlántica**

**A.2 Mapas de Viento Sostenido para la Vertiente Atlántica**

**B Apéndice 2**

**B.1 Mapas de Altura de Ola Significante para La Vertiente Pacífica**

**B.2 Mapas de Vientos Sostenido para la Vertiente Pacífica**

**B.3 Análisis de Tormentas**



## Lista De Figuras

**Figura 2.1** Archivo de velocidad del viento en la componente u

**Figura 2.2** Posición geográfica de las boyas de la NOAA y trayectoria de 13 ciclones tropicales que afectaron el Golfo de México y la porción del Caribe mexicano durante 2005

**Figura 2.3** Esquematación de la metodología empleada para el punto ubicado en la coordenada (89.5° W, 26° N) A) Resultados con el modelo WAM, B) resultados del modelo Hurac y, C) resultados con el modelo híbrido WAM-Hurac.

**Figura 2.4** Comparación entre las presiones atmosféricas calculadas con el modelo híbrido versus registros de la boya 42056 del NDBC y del SMN en la Isla de Cozumel durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005)

**Figura 2.5** Comparación de los vientos calculados con el modelo híbrido y los datos estimados por el proyecto HRD durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005)

**Figura 2.6** Comparación de las presiones atmosféricas calculadas con el modelo Hurac versus registros de la boya 42056 del NDBC y los valores medidos en Puerto Morelos, Quintana Roo (reportados por Silva *et al.* (2007)) durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005)

**Figura 2.7** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42001, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42001, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados

**Figura 2.8** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42002, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42002, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados

**Figura 2.9** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42019, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42019, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados

**Figura 2.10** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42036, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42036, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados

**Figura 2.11** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42040, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42040, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados

**Figura 2.12** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42055, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42055, D) modelo; E) evolución temporal del

oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados

Figura 2.13 Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42056, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42056, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados

Figura 3.1 Malla de análisis para la vertiente atlántica

Figura 3.2 Malla de análisis para la vertiente pacífica

Figura 3.3 Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa

Figura 3.4 Probabilidad de excedencia de periodos medio de ola

Figura 3.5 Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y periodo medio de ola

Figura 3.6 Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y dirección de propagación

Figura 3.7 Rosas de oleaje

Figura 3.8 Ajuste de alturas de ola significativa caracterizado a través de la distribución Weibull

Figura 3.9 Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos

Figura 3.10 Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia

Figura 3.11 Rosa de vientos

Figura 3.12 Ajuste de velocidad de vientos sostenido (en 10 minutos) caracterizado a través de la distribución de Weibull para máximos

Figura 3.13 Rosa de oleaje de altura de ola significativa

Figura 3.14 Rosa de energía normalizada

Figura 3.15 Rosa de periodos de ola pico

Figura 3.16 Duración media de tormentas

Figura 3.17 Alturas de ola significativa por mes en todo el registro

Figura 3.18 Tormentas normalizadas por mes en todo el registro

Figura 3.19 Alturas de ola significativa por año en todo el registro

Figura 3.20 Tormentas normalizadas por año en todo el registro

Figura 4.1 Mapas de periodo de retorno de 5 años de altura de ola en el Golfo de México

Figura 4.2 Mapas de periodo de retorno de 5 años de viento en el Golfo de México

Figura 4.3 Análisis de tormentas de 1948-2007 para la vertiente atlántica

Figura 4.4 Número medio mensual de tormentas normalizadas, vertiente atlántica

Figura 4.5 Duración máxima de tormentas en horas

Figura 4.6 Duración media de tormentas en horas

Figura 4.7 Duración máxima de energía de tormentas

Figura 4.8 Duración media de energía de tormentas

Figura 4.9 Valores máximos históricos

Figura 4.10 Número máximo anual de tormentas

Figura 4.11 Número medio anual de tormentas

**Figura 4.12 Número máximo anual de tormentas con energía normalizada**

**Figura 4.13 Número medio anual de tormentas con energía normalizada**

**Figura 4.14 Mapas de periodo de retorno de 5 años de altura de ola para el Pacífico mexicano**

**Figura 4.15 Mapas de periodo de retorno de 5 años de viento para el Pacífico mexicano**

**Figura A.1 Mapas de periodo de retorno de 10 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.2 Mapas de periodo de retorno de 15 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.3 Mapas de periodo de retorno de 20 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.4 Mapas de periodo de retorno de 25 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.5 Mapas de periodo de retorno de 30 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.6 Mapas de periodo de retorno de 50 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.7 Mapas de periodo de retorno de 100 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.8 Mapas de periodo de retorno de 500 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.9 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de altura de ola en el Golfo de México**

**Figura A.10 Mapas de periodo de retorno de 10 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.11 Mapas de periodo de retorno de 15 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.12 Mapas de periodo de retorno de 20 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.13 Mapas de periodo de retorno de 25 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.14 Mapas de periodo de retorno de 30 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.15 Mapas de periodo de retorno de 50 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.16 Mapas de periodo de retorno de 100 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.17 Mapas de periodo de retorno de 500 años de viento en el Golfo de México**

**Figura A.18 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de viento en el Golfo de México**

**Figura B.1 Mapas de periodo de retorno de 10 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.2 Mapas de periodo de retorno de 15 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.3 Mapas de periodo de retorno de 20 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.4 Mapas de periodo de retorno de 25 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.5 Mapas de periodo de retorno de 30 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.6 Mapas de periodo de retorno de 50 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.7 Mapas de periodo de retorno de 100 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.8 Mapas de periodo de retorno de 500 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.9 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de altura de ola para Pacífico mexicano**

**Figura B.10 Mapas de periodo de retorno de 10 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.11 Mapas de periodo de retorno de 15 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.12 Mapas de periodo de retorno de 20 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.13 Mapas de periodo de retorno de 25 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.14 Mapas de periodo de retorno de 30 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.15 Mapas de periodo de retorno de 50 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.16 Mapas de periodo de retorno de 100 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.17 Mapas de periodo de retorno de 500 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.18 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de viento para Pacífico mexicano**

**Figura B.19 Análisis 1948-2006**

**Figura B.20 Número medio mensual de energía normalizada**

**Figura B.21 Duración máxima de tormentas en horas**

**Figura B.22 Duración media de tormentas en horas**

**Figura B.23 Valores máximos históricos**

**Figura B.24 Número máximo anual de tormentas**

**Figura B.25 Número medio anual de tormentas**

**Figura B.26 Número máximo anual de tormentas con energía normalizada**

**Figura B.26 Número medio anual de tormentas con energía normalizada**

**Lista de tablas**

**Tabla 1 Dominios de atracción de las distribuciones más comunes**

**Tabla 2 Funciones de punteo**

## INTRODUCCIÓN

A la fecha, se han desarrollado a escala mundial tres diferentes tipos de modelos numéricos para la estimación del oleaje en función de datos meteorológicos: de primera, segunda y tercera generación. La clasificación de estos depende de la forma como desarrollan el término fuente. Los modelos de primera generación no solucionan este término explícitamente, sino que la transferencia de energía de los componentes no lineales está expresada dentro de los términos de generación por viento y disipación por rotura. Los modelos de segunda generación manipulan la transferencia no lineal aplicando espectros de referencia (por ejemplo, JONSWAP o Pierson - Moskowitz) reorganizando el término fuente sobre las frecuencias. Los modelos de tercera generación calculan de forma directa la transferencia de energía entre componentes de oleaje; sin embargo, es necesario realizar aproximaciones analíticas y numéricas para llegar a la solución.

A pesar de que los modelos de primera y segunda generación arrojan resultados adecuados para diferentes condiciones de viento normales, subestiman los eventos extremos. En cuanto a los modelos de tercera generación, se tiene la limitante que el recurso computacional es muy alto pero calculan directamente todos los mecanismos de la evolución del oleaje. La principal diferencia entre los modelos de segunda y tercera generación radica en que los últimos solucionan la ecuación de balance de energía sin restricciones sobre la forma del espectro de oleaje.

Los modelos numéricos de retroanálisis y predicción de oleaje son considerados en los últimos años como un instrumento de gran utilidad para suplir las carencias que se tienen en cuanto a las bases de datos de información de oleaje. Se ha obtenido una apropiada y confiable base de datos de clima marítimo de todo el litoral mexicano, por medio del retroanálisis de 60 años (1948 - 2007).

En este trabajo se utilizó el modelo espectral de oleaje de tercera generación Wave Model (WAM) desarrollado por el grupo *Wave Model Development and Implementation Group (WAMDI)*, que se dio a la tarea de generar un modelo de predicción que describiera la evolución del espectro bidimensional de oleaje sin restricción alguna. Debido a que los campos de viento disponibles para forzar el WAM tienden a subestimar el valor de los vientos generados por eventos extremos como son los huracanes, se aplica el modelo HURAC para corregir la caracterización inicial generada por el WAM. El HURAC desarrollado por Silva *et al.* (2005) realiza el cálculo de los campos de presión, viento y oleaje. El WAM requiere de la batimetría de la zona y de los datos de viento. Con la información necesaria se corrió el modelo en el clúster del Instituto de Ingeniería de la UNAM y posteriormente a la información generada por el WAM se agrega la información obtenida del HURAC. Para el Golfo de México se utilizó una malla de cálculo de 871 celdas, mientras que el Pacífico consta de 1170 celdas.

Con la serie de datos obtenida se llevó a cabo el análisis medio, extremal y de tormentas para las vertientes atlántica y pacífica de México. El régimen medio relaciona diversos umbrales del estado de oleaje con la probabilidad de que dichos niveles no sean superados en un año promedio para representar las condiciones más frecuentes, puesto que su resultado es imprescindible para estudios de dinámica litoral, explotación de puertos y planificación de obras. El objetivo principal del análisis extremal es determinar las acciones de diseño a soportar por una obra marina determinada en función del riesgo y su vida útil. El estudio de las tormentas resulta muy útil para el análisis de escenarios cuando los modos de fallo son de tipo dúctil o relativos a estados límite de servicio, en otras palabras, cuando el daño es debido a la persistencia del oleaje.

Atendiendo a la necesidad de contar con información confiable, este trabajo tiene por objetivo la construcción de una base de datos de oleaje y viento para caracterizar los regímenes medio y extremal del clima marítimo del litoral mexicano.

La generación de la base de datos se obtuvo mediante la aplicación de un modelo numérico híbrido compuesto por modelos de generación de oleaje, uno energético y otro paramétrico. A lo largo del trabajo se hace especial énfasis en las condiciones de clima y energía del oleaje, elementos de vital importancia en la ingeniería marítima.

En primera instancia, se debe mencionar que en la actualidad no existe una base de datos de información fiable y que cubra un periodo estadísticamente representativo; en segundo lugar, la precisión en la estimación del oleaje y sus características energéticas asociadas están estrechamente relacionadas con la fuente de información con la cual se efectuó el análisis. En este sentido, la creación de un registro de variables oceánicas de buena calidad, de alta resolución espacio-temporal y dentro de un largo periodo de tiempo es un factor de gran importancia para determinar los fenómenos que se presentan en la dinámica costera, en el diseño, construcción y operación de estructuras marítimas y cálculo de los estados límite de éstas. De esta necesidad surge la importancia del presente trabajo, dado que a partir de una serie de datos adecuada es posible instituir metodologías para establecer las condiciones de modelado enfocadas al desarrollo de diversos proyectos relacionados con el entorno marino.

Ahora, en el mundo existen pocos trabajos de este tipo, un ejemplo de ellos es el proyecto HIPOCAS desarrollado en España, donde desarrollaron una serie de datos puntuales a partir del análisis retrospectivo de oleaje en un periodo de tiempo de 44 años (1958-2001) con el modelo espectral de oleaje WAM, sin embargo en su estimaciones no tuvieron en cuenta el análisis energético.

La aportación más importante de este trabajo de investigación es que con los datos generados se tiene un amplio marco de aplicación a nivel ingenieril, por la variedad de información que se puede obtener a partir de la caracterización del

clima marítimo, ya que los datos de oleaje se convierten en una herramienta útil en la ingeniería oceanográfica y costera.

El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro de 4 capítulos. En el primer capítulo se busca sentar las bases para el análisis a largo plazo y la estimación de los regímenes de altura de ola con su dirección y periodo asociados a una magnitud y dirección del viento. El segundo capítulo expone la descripción de los dos modelos utilizados, la metodología empleada para integrar los resultados y la validación del modelo híbrido. En el tercer capítulo se describen los cálculos realizados para la caracterización del oleaje a largo plazo en la celda de la malla de cálculo que contiene a Cancún, Quintana Roo. El último capítulo contiene los resultados relativos a la altura de ola significativa, seguido por los de velocidades de viento y terminando con el análisis de tormentas a nivel regional. En el anexo A y B se exponen los resultados de los mapas de diferentes periodos de retorno para el Océano Atlántico y Pacífico.

# 1 CONCEPTOS BÁSICOS Y MARCO TEÓRICO

Desde el punto de vista de la ingeniería, uno de los objetivos principales del análisis y caracterización de los procesos marinos es la determinación de las condiciones representativas de los estados de mar que eventualmente regirán el diseño de aprovechamientos defensas costeras. A través de series históricas del oleaje y viento locales, es posible evaluar los regímenes medio o de diseño operacional, extremal o de diseño de estados límites últimos y de tormentas o de diseño por persistencia.

En este sentido, el presente capítulo busca sentar las bases para el análisis a largo plazo y la estimación de los regímenes de altura de ola con su dirección y periodo asociados a una magnitud y dirección del viento que se presentan en los capítulos posteriores.

## 1.1 Conceptos básicos de probabilidad

Probabilidad es la medida de la ocurrencia de un suceso. Existen dos procedimientos por medio de los cuales se puede estimar la probabilidad de ocurrencia de un suceso.

- Enfoque a priori: Cuando un suceso puede ocurrir en  $h$  formas diferentes de un número total de  $n$  maneras posibles, todas igualmente factibles.
- Enfoque como frecuencia relativa o a posteriori: Cuando después de  $n$  repeticiones de un experimento, donde  $n$  es muy grande, un suceso ocurre  $h$  veces.

### 1.1.1 Distribución de probabilidad

Es un modelo teórico capaz de representar la forma en que se distribuye la ocurrencia de los resultados de un experimento aleatorio. Constituye la lista de resultados de un experimento con las probabilidades asociadas con cada uno. La función de probabilidad es la expresión con que se describe la relación biunívoca entre los valores de un experimento y su probabilidad.

### 1.1.2 Función de densidad de probabilidad

Se define como una función que mide la concentración de la probabilidad alrededor de los valores de una variable aleatoria continua, o bien en términos de oleaje, como la probabilidad de que la altura de ola significativa,  $H_s$ , se encuentre dentro de un intervalo fijo  $(h, h+dh)$ , es decir, el número de veces que  $H_s$  tendrá valores dentro de dicho intervalo. Lo anterior se puede escribir como:

$$P(H_s = h)dh = \frac{1}{T} \sum_i dt_i(h;dh) \quad (1.1)$$

donde  $\Delta t_i(h;dh)$  es el intervalo de tiempo en donde  $h < H_s < h + dh$ .

### 1.1.3 Periodo de retorno

El período de retorno se define como el tiempo que transcurre, en promedio, para que un evento de magnitud dada sea igualado o excedido por lo menos una vez.

$$T_r = \frac{1}{P(H_s > h)} = \frac{1}{[1 - P(H_s \leq h)]} \quad (1.2)$$

### 1.1.4 Probabilidad de excedencia

La probabilidad de excedencia  $P(H_s > h)$  es la probabilidad de que, al menos una vez, se presente un evento con características por encima de un umbral establecido. Se representa como:

$$P(H_s > h) = \frac{1}{T} \sum_i \Delta t_i(h) \quad (1.3)$$

donde  $\Delta t_i(h)$  es el intervalo de tiempo en el cual  $H_s$  excede el valor fijo establecido, y  $T$  es el tiempo total. En consecuencia, para estimar  $P(H_s > h)$  no es necesario analizar cada tormenta por separado sino que basta con contar el número de veces en que la altura de ola significativa ha excedido el umbral y dividir este valor entre el número total de mediciones.

### 1.1.5 Estadísticos de orden

Para entender el concepto de estadístico de orden, considérese una muestra procedente de una población  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Si los valores de dicha población se ordenan de forma creciente en magnitud  $(X_{1:n} \leq X_{2:n} \leq \dots \leq X_{r:n})$  entonces el miembro “errésimo” de esta nueva secuencia se denomina estadístico de orden  $r$  de la muestra dada. Nótese que el tamaño de la muestra,  $n$ , se incluye en la notación  $X_{r:n}$ , y cualquier estadístico de orden debe tener asociado el tamaño de la muestra. El estadístico de orden proporciona, como su nombre lo indica, información respecto del orden y de la longitud de la muestra. Para casos de valores extremos la clasificación de elementos debe ser ascendente, esto es, el último valor es el máximo y el primero es el mínimo. Estos valores pueden expresarse como:  $X_{n:n} = \text{Máx}(X_1, X_2, \dots, X_n)$  y  $X_{1:n} = \text{Mín}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , respectivamente. Estos dos valores son los de mayor interés para el análisis extremal.

### 1.1.6 Distribuciones asintóticas del máximo y el mínimo

Los puntos límite de una función de probabilidad acumulada son los valores mínimos y máximos que están asociados a la variable de estudio. Si la variable

aleatoria no está delimitada en alguno o ambos de sus extremos estos se transforman en  $-\infty$  y  $+\infty$ .

La función de distribución del máximo,  $Z_n$ , y del mínimo,  $W_n$ , de una muestra de tamaño  $n$  procedente de una población con función de distribución  $F(X)$  son:

$$H_n(x) = P[Z_n \leq x] = F_n(x) \quad (1.4)$$

$$L_n(x) = P[W_n \leq x] = 1 - [1 - F(x)]^n \quad (1.5)$$

La estructura de estas dos funciones muestra que los percentiles de máximos y mínimos se mueven hacia la derecha y hacia la izquierda, respectivamente, si se incrementa  $n$ . Aproximando los límites superior e inferior a infinito, se tiene:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } F(x) = 1 \\ 0 & \text{si } F(x) < 1 \end{cases} \quad (1.6)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 - [1 - F_n(x)]^n = \begin{cases} 0 & \text{si } F(x) = 0 \\ 1 & \text{si } F(x) \leq 1 \end{cases} \quad (1.7)$$

Esto significa que las distribuciones límites toman exclusivamente valores de 0 y 1, esto es, son degeneradas. Con objeto de evitar la degeneración se buscan transformaciones lineales del tipo  $y = a_n + b_n x$ , donde  $a_n$  y  $b_n$  son constantes que dependen de  $n$ .

$$\lim_{n \rightarrow \infty} H_n(a_n + b_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(a_n + b_n x) = H(x) ; \forall x \quad (1.8)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} L_n(c_n + d_n x) = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 - [1 - F_n(c_n + d_n x)]^n = L(x) ; \forall x \quad (1.9)$$

A estas nuevas distribuciones, ecuaciones (1.8) y (1.9), se les conoce como asintóticas del máximo y mínimo, respectivamente.

### 1.1.7 Dominios de atracción

Se dice que una distribución  $F(x)$ , pertenece al dominio de atracción para máximos de una distribución dada  $H(x)$ , cuando satisface la ecuación (1.8) para algunas sucesiones  $a_n$  y  $b_n \geq 0$ . De la misma forma, cuando  $F(x)$  satisface la ecuación (1.9) se dice que pertenece al dominio de atracción para mínimos de  $L(x)$ .

De acuerdo con Silva (2005) los únicos tres tipos de distribuciones para máximos y mínimos no degeneradas,  $H(x)$  y  $L(x)$ , que satisfacen las ecuaciones (1.8) y (1.9), respectivamente son Frechet, Weibull y Gumbel.

Castillo (1987) presenta de manera resumida los dominios de atracción para máximos y mínimos de las distribuciones más comunes, lo cual se resume en la Tabla 1.

**Tabla 1** Dominios de atracción de las distribuciones más comunes

| Distribución         | Dominios de atracción |         |
|----------------------|-----------------------|---------|
|                      | Máximos               | Mínimos |
| Normal               | Gumbel                | Gumbel  |
| Exponencial          | Gumbel                | Weibull |
| Lognormal            | Gumbel                | Gumbel  |
| Gamma                | Gumbel                | Weibull |
| Gumbel <sub>M</sub>  | Gumbel                | Gumbel  |
| Gumbel <sub>m</sub>  | Gumbel                | Gumbel  |
| Rayleigh             | Gumbel                | Weibull |
| Uniforme             | Weibull               | Weibull |
| Weibull <sub>M</sub> | Weibull               | Gumbel  |
| Weibull <sub>m</sub> | Gumbel                | Weibull |
| Cauchy               | Frechet               | Frechet |
| Pareto               | Frechet               | Weibull |

### 1.1.8 Papeles probabilísticos

La idea fundamental del papel probabilístico es modificar las escalas de una variable aleatoria  $X$ , y su probabilidad  $P$ , de tal manera que al representar de modo gráfico dicha variable contra cualquier función de distribución acumulada  $F(x)$ , perteneciente a esa familia, se obtenga una línea recta. Esto implica que el dibujo de cualquier función de distribución acumulada en este papel permite decidir si pertenece o no a esa familia y, en caso afirmativo, estimar sus parámetros.

En términos matemáticos dada  $F(x;\theta)$ , una familia paramétrica de funciones de distribución acumuladas donde  $\theta$  es el vector parámetro, se observa en la siguiente transformación que:

$$\begin{aligned} \xi &= g(x) \\ \eta &= h(y) \end{aligned} \tag{1.10}$$

Si la familia de funciones se transforma por la ecuación (1.10), se convierte en una familia de líneas rectas. En particular, si  $F(x;\theta)$  se puede escribir como:

$$y = F(x; \theta) = h^{-1}[ag(x) + b] \leftrightarrow h(y) = ag(x) + b \quad (1.11)$$

donde  $g(x)$  y  $h(y)$  son funciones y  $h(y)$  es invertible; entonces la transformación dada por la ecuación (1.10) convierte a  $y = F(x; \theta)$  en una familia de líneas rectas del tipo:

$$\eta = a\xi + b \quad (1.12)$$

donde la variable  $\eta$  es la llamada variable reducida. Esta técnica permite transformar funciones de probabilidad conocidas y construir papeles especiales en los que se puedan dibujar directamente las rectas correspondientes.

## 1.2 Caracterización del oleaje

### 1.2.1 Altura de ola

La altura de ola se define como la distancia vertical entre el valor más alto y más bajo de la elevación de la superficie de una ola.

En algunas ocasiones se utiliza el valor medio de la altura de ola ponderada para definir la altura de ola media cuadrática  $H_{ms}$ . Este valor de altura de ola, al representar la parte energéticamente más importante de un estado de mar es muy relevante para proyectos de diseño y aprovechamiento en los que la altura de ola es en parámetro reinante. Los valores de tendencia central de la altura de ola (media o media cuadrática) no son utilizados con frecuencia, pues guardan muy poca semejanza con la altura de ola en el momento de analizar visualmente los resultados. En lugar de ellos se utiliza la altura de ola significativa, que se define como el valor medio del tercio de olas más altas de un registro de oleaje.

### 1.2.2 Estado de mar

Un fenómeno físico se puede considerar estacionario si las características externas que influyen en él permanecen constantes durante un cierto periodo de tiempo, es decir, un tiempo durante el cual y, debido al tipo de fenómeno, existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen en el fenómeno, lo que mantiene su manifestación aproximadamente estacionaria. Este periodo de tiempo, en el caso del oleaje, es conocido como estado de mar.

### 1.2.3 Definición de tormenta

Se define como tormenta, para efectos de este trabajo, el grupo de estados de mar para los que la altura de ola significativa  $H_s(t)$  excede un umbral  $h_{crit}$  y que no estarán por debajo del mismo durante un periodo de tiempo continuo superior a 12 horas. En cuanto a la altura crítica (umbral)  $h_{crit}$  en la literatura se sugiere adoptar un valor de  $1.5h_{crit}$ , esto es, 1.5 veces la altura de ola significativa media anual.

### 1.2.4 Fuentes de información

La caracterización del oleaje es concebida como una descripción a largo plazo, que incluye los análisis de régimen medio y extremal de oleaje, o la descripción a corto plazo, basada en el estudio del oleaje irregular. En la descripción a corto plazo comúnmente se supone que el proceso es estacionario, aleatorio y gaussiano; mientras que el análisis a largo plazo refleja las características climatológicas existentes a lo largo de un periodo de tiempo multianual.

El estudio del oleaje supone obtener una base de información detallada del fenómeno (i.e. una serie temporal de oleaje o curva de estados de mar que es el reflejo histórico de las acciones que se han presentado en un lugar determinado). Existen diferentes bancos de datos sobre los que se puede realizar el análisis, y se agrupan en 3 categorías:

- **Datos instrumentales:**  
Son adquiridos por sensores, principalmente boyas de oleaje que pueden ser de dos tipos: a) direccionales; b) escalares (solo se obtiene información sobre la altura y periodo de oleaje). La ventaja de estos datos reside en la calidad de la información obtenida.
- **Datos visuales:**  
Proviene de observaciones realizadas por barcos en ruta a lo largo de todas las costas del mundo (World Meteorological Office) y son obtenidas de manera sistemática desde los años cincuentas, de forma que un observador recoge información de la altura, periodo y dirección de oleaje de estados de mar tanto SEA (mar de viento) como SWELL (mar de fondo). Una de las ventajas de este tipo de información es el gran tamaño del registro y la completa caracterización del evento de oleaje. No obstante, la información visual suele ser sesgada y es común que los episodios de mayor contenido energético no se registren puesto que los barcos tienden a evitar la acción de grandes temporales por el peligro que este supone para la navegación.
- **Modelación numérica:**  
Cuando no se dispone de información de ningún tipo o la serie de datos se encuentra incompleta, es posible reproducir el oleaje a partir de información meteorológica mediante el uso de modelos numéricos de predicción de oleaje. El problema de este se debe a la necesidad de calibrar los modelos y el gran costo computacional que suponen.

## 1.3 Metodología

En esta sección se presenta la metodología empleada en este trabajo para la caracterización del clima marítimo, misma que incluye el análisis a largo plazo y el análisis de tormentas.

### 1.3.1 Régimen medio

El régimen medio relaciona diversos umbrales del estado de oleaje (altura de ola y periodo) con la probabilidad de que dichos niveles no sean superados en un año promedio. Coloquialmente el régimen medio de oleaje es el grupo de estados de mar que ocurren con mayor frecuencia. Es práctica común describir el régimen medio en forma de una distribución estadística con la que se determina la probabilidad de que el estado de oleaje no exceda un valor determinado.

El objetivo de este análisis es representar las condiciones más frecuentes, puesto que su resultado es imprescindible para estudios de dinámica litoral, explotación de puertos y planificación de obras. En referencia a la explotación portuaria es necesario conocer el tiempo medio en que una estructura dada puede estar operativa para los procedimientos de atraque y entrada de barcos. Además, la construcción de cualquier obra marítima se realizará en aquellos momentos del año en el que las condiciones de agitación sean más favorables.

El estudio estadístico del análisis a mediano plazo se efectúa a través de regímenes de oleaje, rosas de oleaje y las relaciones entre alturas de ola y periodos. En este trabajo se presentan, adicionalmente, las distribuciones de probabilidad conjunta de altura de ola y dirección del oleaje, así como, velocidad y dirección del viento.

#### 1.3.1.1 Régimen de oleaje

En el régimen de oleaje se realiza un estudio de probabilidad de que un determinado valor de altura de ola no sea superado (no excedencia) en un periodo de tiempo igual a un año medio. Para ello se utiliza una función de distribución estadística que determine el tiempo que en un año medio de altura de ola no se exceda un valor dado.

Cuando se ha determinado el conjunto de datos de altura de ola y probabilidad de no excedencia, el paso siguiente consiste en la determinación de los parámetros de la función, cuyas técnicas se mencionan en el apartado siguiente.

##### 1.3.1.1.1 Técnicas de estimación de parámetros

Las formas teóricas para idealizar al oleaje se agrupan en modelos deterministas, paramétricos y estocásticos.

Un modelo determinista se obtiene a través de relaciones físicas y no requiere datos experimentales para su desarrollo. El modelo paramétrico puede ser asimilado como un modelo determinista en la estimación de sus parámetros, al arrojar la misma salida a partir de la información suministrada.

A diferencia del anterior, el modelo estocástico tiene la propiedad de brindar resultados en un sentido estadístico. Esto significa que el dato de salida no es el mismo dato de entrada pero conserva las mismas características estadísticas.

De acuerdo con lo anterior, cuando se aplica un modelo, es necesario estimar sus parámetros, los cuales son función de los valores de la muestra, que no son más que observaciones de una variable aleatoria. Esto refleja en última instancia que el parámetro estimado es aleatorio y tiene asociada una distribución de probabilidad.

### Método de los momentos

El método de los momentos es un procedimiento muy sencillo para encontrar un estimador de uno o más parámetros poblacionales. Consiste en plantear un sistema de ecuaciones, cuyo tamaño depende del número de parámetros a estimar. Esto se hace al igualar los momentos poblacionales con los muestrales. Los momentos poblacionales pueden obtenerse con respecto a la media o con respecto al origen. Los momentos muestrales, también conocidos como estadísticos muestrales, se obtienen con las siguientes expresiones:

Media

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.13)$$

Varianza Sesgada

$$S_{\text{sesg}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.14)$$

Varianza insesgada

$$S_{\text{insesg}}^2 = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.15)$$

Coefficiente de asimetría sesgado

$$g_{\text{sesg}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(S_{\text{sesg}}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1.16)$$

Coefficiente de asimetría insesgado

$$g_{\text{insesg}} = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)} g_{\text{sesg}} \quad (1.17)$$

Coefficiente de curtosis sesgado

$$k_{\text{sesg}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(S_{\text{sesg}}^2)^2} \quad (1.18)$$

Coeficiente de curtosis insesgado

$$k_{\text{insesg}} = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} k_{\text{sesg}} \quad (1.19)$$

Desviación estándar

$$S = \sqrt{S^2} \quad (1.20)$$

Coeficiente de variación

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} \quad (1.21)$$

Para obtener el estimador por momentos del parámetro  $\beta$  se emplea la función:

$$f(x) = \beta e^{-\beta x} \quad (1.22)$$

Al igualar el primer momento poblacional con el momento de la muestra

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad (1.23)$$

### Método de máxima verosimilitud

El objetivo de este método es maximizar la función de verosimilitud. Se considera para tal efecto una función de densidad de probabilidad con  $x$  parámetros y que la muestra es aleatoria.

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) \quad (1.24)$$

Este método estima los parámetros al maximizar la verosimilitud suponiendo que es la única que puede obtenerse al seleccionar  $n$  observaciones aleatorias a partir de:

$$f(x; a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1.25)$$

El procedimiento para estimar los parámetros o la determinación del punto donde la función alcanza su máximo, implica la diferenciación parcial de  $L$  con respecto a

cada parámetro e igualando a cero. Con eso se generan m ecuaciones con n incógnitas que pueden resolverse para los m parámetros desconocidos.

Los valores de los parámetros obtenidos se conocen como los estimadores por máxima verosimilitud. Inicialmente se obtiene un estimador por momentos y mediante una búsqueda de parámetros se llega a obtener los siguientes valores:

$$\frac{n}{\beta} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.26)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.27)$$

$$\frac{1}{\beta} = \bar{x} \quad (1.28)$$

### Método de Mínimos Cuadrados

El método obtiene el conjunto de parámetros al minimizar la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los valores observados y calculados.

$$S = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_o(i) - y_c(i)]^2 \quad (1.29)$$

Donde  $y_o(i)$  y  $y_c(i)$  son los valores observados y calculados de “y”.

Se plantea un sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} na_0 + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_2 + \dots + a_m \sum x_m &= \sum y_0 \\ na_0 + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_2 + \dots + a_m \sum x_m &= \sum y_0 \\ a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + \dots + a_m \sum x_1 x_m &= \sum x_1 y_0 \\ a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + \dots + a_m \sum x_2 x_m &= \sum x_2 y_0 \\ a_0 \sum x_m + a_1 \sum x_1 x_m + \dots + a_m \sum x_m^2 &= \sum x_m y_0 \end{aligned} \quad (1.30)$$

al resolverlo se tienen los estimadores.

### **1.3.1.2 Representación gráfica**

A continuación se describen las herramientas visuales que se seleccionaron para resumir los resultados del análisis de régimen medio de clima marítimo.

### 1.3.1.2.1 Probabilidad conjunta

En el análisis a largo plazo, es una práctica común determinar la distribución de probabilidad conjunta de altura de ola significativa  $H_s(t)$ , periodo medio  $\bar{T}_o$  y dirección media del oleaje  $\bar{\theta}$ . Adicionalmente en este trabajo se calculó la probabilidad conjunta de la velocidad  $V$  y dirección del viento  $\theta_V$ .

Esto se hace clasificando los valores del registro en marcas de clase con intervalos de 0.5 por sectores. Se determina posteriormente el periodo medio, la velocidad del viento y las direcciones tanto del viento como de oleaje asociados a cada tormenta. Finalmente se calcula la frecuencia de ocurrencia de estas características para diferentes épocas del año.

En general, para valores pequeños de la distribución de altura de ola el periodo es amplio, pero la distribución del periodo se cierra a medida que el valor de la altura se ola incrementa. La energía del oleaje se agrupa alrededor del periodo medio y disminuye hacia los extremos de bajos valores de altura de ola – periodo. Los valores más altos de oleaje y energía presentan curvas cerradas que no necesariamente coinciden con el periodo medio. Además, el periodo medio es ligeramente menor que el promedio de todas olas.

Debido a que el periodo medio se considera menos estable estadísticamente y por el hecho de que las alturas de ola son más importantes, en ocasiones es mejor utilizar el periodo significativo ( $T_s$ ) o periodo pico espectral ( $T_p$ ) como representativo del periodo para el espectro de oleaje.

### 1.3.1.2.2 Rosas

Una forma convencional de presentar la información de los registros históricos es en gráficos con un eje vertical y una escala concéntrica que permite representar la intensidad y frecuencia de aparición de parámetros como la altura de ola o la velocidad del viento considerando su dirección asociado. En una rosa el ancho de las clases indica la magnitud del fenómeno, mientras que su longitud indica la frecuencia con que aparece.

El procedimiento para la construcción de rosas consiste en clasificar los valores de acuerdo con su dirección y evaluar la frecuencia de cada clase. Finalmente se dibujan los intervalos de clase respectivos para las diferentes direcciones (“gajos”) indicando en la escala concéntrica la intensidad.

### 1.3.1.2.3 Histogramas

Los histogramas son útiles en muchas aplicaciones, pues el análisis estadístico de una serie de datos seleccionada puede utilizarse por ejemplo, para analizar la fatiga de una estructura. En este trabajo, para la construcción de los histogramas se identificó el número de tormentas en función de la altura de ola; a continuación, se cuantificó el número eventos en escalas de tiempo mensual y anual. Para la caracterización energética se determinó la energía asociada a cada suceso y se

desarrolló la clasificación de la misma manera que para la altura de ola; los resultados se presentan en un histograma de altura de ola, energía y duración contra número de ocurrencias.

### **1.3.2 Régimen extremal**

En la ingeniería oceanográfica, el análisis extremal es utilizado para seleccionar y, vía funciones de probabilidad, describir fenómenos con baja probabilidad de ocurrencia. En particular, se utiliza el llamado “periodo de retorno de un suceso extremo” definido como el tiempo promedio en años que debe ocurrir entre dos temporales cuya intensidad excede un determinado valor. Es conveniente señalar que en este tipo de caracterización, la duración de la tormenta no está involucrada, por lo que su aplicación, generalmente, está relacionada con modelos de fallo de tipo frágil o estados límite últimos.

El análisis extremal se centra en la caracterización de los eventos extremos. El objetivo principal de este tipo de análisis es determinar las acciones de diseño a soportar por una obra marina determinada en función del riesgo y su vida útil. El clima extremal también es utilizado para determinar las acciones máximas a soportar durante las distintas fases de ejecución de una obra y que son menores que las acciones de servicio de esta.

Los métodos más utilizados en el análisis extremal del oleaje son:

#### **a. Método de la muestra total**

Propuesto por Draper (1963), revisado por Goda (1979) y modificado por Medina y Aguilar (1986). Inicialmente definido cuando se dispone de pocos años de medida. El método parte de toda la información de oleaje registrada en un periodo determinado y se apoya en la función de distribución de probabilidad de no excedencia de un año climático medio.

#### **b. Método de los valores pico**

Es el más utilizado, aunque requiere un conjunto de datos extenso puesto que parte de valores máximos registrados en un periodo de tiempo determinado que puede ser anual o del máximo de una acción temporal. Se divide en dos grupos:

- **Método de los máximos anuales**  
Se determina el valor máximo de altura de ola para intervalos anuales. Este es el método que se empleó en este trabajo.
- **Método de los valores pico (POT, Peak Over Threshold)**  
Se define un valor mínimo o umbral a partir del cual se construye un subconjunto de datos temporales.

El régimen extremal requiere de la definición de un suceso extremo o de un estado de oleaje con un cierto contenido energético y por tanto se caracteriza por un cierto valor de altura de ola, por lo general, la altura de ola significativa ( $H_s$ ). Para su determinación se utilizan las técnicas que se mencionan a continuación:

### 1.3.2.1 Técnicas de punteo

La importancia del problema de punteo fue señalado por Kimball (1960), quien indicó que radicaba en el hecho de tener en mente el objetivo del papel probabilístico, el cual se encuentra generalmente incluido en alguno de los que se presentan a continuación:

1. Probar si la muestra proviene o no de una familia de distribución dada.
2. Para estimar los parámetros de la familia.
3. Para extrapolar de manera gráfica uno de los extremos.

El último procedimiento es el más utilizado en el caso de problemas de punteo de valores extremos. Se puede decir que la selección de la ecuación óptima para el punteo de datos depende del objetivo de la técnica con que se van a dibujar los mismos y del tipo de papel probabilístico que será utilizado. Por otro lado, es importante resaltar que los papeles probabilísticos fueron considerados para un ajuste visual de los valores dados por la función de distribución acumulada, a una línea recta; por lo que se puede decir que un ajuste visual de la ecuación de punteo a estos datos es un método adecuado para la selección de la fórmula de punteo por emplear. En la Tabla 2 se presentan las ecuaciones más comunes para el punteo de valores en papeles probabilísticos.

**Tabla 2** Funciones de punteo

| Ecuación del punteo                                | Autor             |
|--|-------------------|
| $x_{(i)}, \frac{i}{n+1}$                           | Weibull (1939)    |
| $x_{(i)}, \frac{i - \frac{3}{8}}{n + \frac{1}{4}}$ | Blom (1962)       |
| $x_{(i)}, \frac{i - \frac{1}{2}}{n}$               | Hazen (1930)      |
| $x_{(i)}, \frac{i - 0.44}{n + 0.12}$               | Gringorten (1963) |

Una vez definida la forma de punteo para el subconjunto de datos, se trata de ajustar esta muestra a una función de distribución de probabilidad de excedencia. Como observación se debe mencionar que desde el punto de vista ingenieril, resulta más conveniente hablar en términos de probabilidad de excedencia, es decir, el porcentaje de eventos de mayor magnitud que cierto valor de altura de ola. Weibull (Tabla 2) determina la frecuencia de punteo a partir de la media, siendo ésta la aproximación más utilizada en el método de los máximos anuales.

Existe en la literatura un amplio rango de modelos matemáticos y se debe seleccionar aquel que presente el mejor ajuste a la serie. Liu y Burchart (1998) proponen el uso de las funciones Gumbel y Weibull como aquellas que presentan los mejores ajustes.

Las distribuciones bi-paramétricas son ampliamente utilizadas en la ingeniería para el análisis a largo plazo. Sin embargo, entre mayor número de parámetros tenga la función mejor es el ajuste, pues con el incremento de estos se tiene por consiguiente, mayor número de grados de libertad en la expresión. Por lo tanto, es más aconsejable utilizar funciones tri-paramétricas.

En este trabajo se eligió la función de probabilidad de excedencia Weibull pues al ser tri-paramétrica presenta mejores resultados que la función Gumbel. Adicionalmente este modelo matemático tiene un mejor ajuste en los extremos de la función y dado que en la ingeniería de diseño se requieren los valores extremos (máximos y mínimos) a la hora de efectuar los cálculos para garantizar una adecuada respuesta de las estructuras, este proyecto se basa en las hipótesis sugeridas para sustentar la selección de la distribución de probabilidad Weibull.

El procedimiento de ajuste de la distribución consiste en ordenar los datos de mayor a menor; se establecen las marcas de clase; se determinan los grupos de valores que se encuentran dentro de cada intervalo (umbral) y, se le asigna a cada valor una probabilidad de excedencia. Una vez establecidos los valores de la probabilidad, se estiman los valores de los parámetros de la función por medio de diferentes técnicas.

Para realizar el ajuste de las funciones de probabilidad, es necesario determinar los parámetros de éstas, que para la ingeniería marítima los métodos más utilizados son:

- Método de los momentos muestrales, donde los valores pueden ser determinados a partir de un determinado número de momentos de la muestra, como la media, varianza o momentos superiores.
- Método de máxima verosimilitud que pretende encontrar los valores de los parámetros de forma que la probabilidad de encontrar el valor muestral sea el máximo.
- Método gráfico en el que se ajustan las funciones mediante el uso de variables reducidas a partir del empleo del método de mínimos cuadrados. Goda (1990) recomienda para datos de oleaje emplear la técnica de mínimos cuadrados.

En este trabajo se emplea el método de mínimos cuadrados; esto obliga a asignar un valor de probabilidad de excedencia a cada valor de altura de ola.

### **1.3.2.2 Metodología para la estimación de los parámetros y dibujo en papel probabilístico**

La distribución de probabilidad de la familia Weibull para máximos está dada por

$$y = F(x; \lambda; \beta; \delta) = \exp \left[ - \left( \frac{\lambda - x}{\delta} \right)^\beta \right]; \quad -\infty < x \leq \lambda \quad (1.31)$$

$x$ : Parámetro de localización

$\delta$ : Parámetro de escala

$\beta$ : Parámetro de forma

$\lambda$ : Parámetro umbral

Al aplicar logaritmos dos veces se obtiene:

$$-\log[-\log(y)] = -\beta \log \left( \frac{\lambda - x}{\delta} \right) = -\beta \log(\lambda - x) + \beta \log \delta \quad (1.32)$$

Al comparar las ecuaciones (1.10) y (1.11) se tiene

$$\begin{aligned} \xi &= g(x) = -\log(\lambda - x) \\ \eta &= h(y) = -\log[-\log(y)] \end{aligned} \quad (1.33)$$

Además

$$\begin{aligned} a &= \beta \\ b &= \beta \log \delta \end{aligned} \quad (1.34)$$

La familia de líneas rectas se convierte en

$$\eta = a\xi + b = \beta(\xi + \log \delta) \quad (1.35)$$

Para la determinación de los parámetros  $a$  y  $b$  en este trabajo, se aplica la técnica de mínimos cuadrados

$$a = \frac{N_{\text{datos}} \sum_{k=1}^N \xi_k \eta_k - \sum_{k=1}^N \xi_k \sum_{k=1}^N \eta_k}{N_{\text{datos}} \sum_{k=1}^N \xi_k^2 - \left( \sum_{k=1}^N \xi_k \right)^2} \quad (1.36)$$

$$b = \frac{-a \sum_{k=1}^N \xi_k + \sum_{k=1}^N \eta_k}{N_{\text{datos}}} \quad (1.37)$$

Se debe notar que la escala  $\eta$  coincide con la de papel probabilístico de Gumbel; la gradación  $\xi$  se encuentra en este caso en escala logarítmica en lugar de aritmética. Se debe observar que la distribución Weibull depende de tres

parámetros, uno más que la distribución Gumbel; éste es el parámetro umbral  $\lambda$ , que es desconocido y el cual normalmente no se puede inferir a través de fenómenos físicos. Para la estimación de  $\lambda$ , se recomienda presentar gráficamente los datos con un parámetro umbral propuesto que satisfaga la ecuación (1.31) y observar el ajuste de la recta a los valores de probabilidad dados. Este proceso se repite iterativamente hasta que se esté conforme con el ajuste realizado con la recta descrita por la ecuación (1.35). Dicho punteo debe hacerse para distintos valores del parámetro umbral, hasta que la tendencia lineal que se busca sea obtenida para el intervalo de interés.

Con el valor del parámetro umbral propuesto, se procede a estimar los parámetros restantes  $\beta$  y  $\delta$ , lo que se puede realizar notando que para  $\eta=0$  y  $\eta=1$ , se tiene

$$0 = \beta(\xi + \log \delta) \rightarrow \xi = -\log \delta \quad (1.38)$$

$$1 = \beta(\xi + \log \delta) \rightarrow \xi = \frac{1}{\beta} - \log \delta \quad (1.39)$$

En lo general el análisis extremal proporciona la distribución de probabilidades de excedencia de los sucesos extremos y por lo tanto, es muy común representar sus valores también con respecto al periodo de retorno.

La extrapolación de los datos presenta la probabilidad de que un valor dado sea excedido. Debido a que este procedimiento no indica cuando ocurrirá el suceso, la probabilidad se expresa en términos del periodo de retorno para ver que tan frecuente será su ocurrencia. El periodo de retorno se define como el intervalo de tiempo medio entre dos ocurrencias, o como el intervalo de tiempo medio en el cual la altura de ola significativa  $H_s(t)$  cruza un nivel establecido. El uso más común de este concepto se dirige a la elección de una acción de diseño al que debe ser resistente una determinada estructura marítima.

### 1.3.3 Análisis de ocurrencia de tormentas

El análisis de tormentas es un concepto de reciente aplicación y que se está utilizando cada vez con mayor frecuencia. Este análisis es análogo al estudio de inundaciones que, en hidrología, es conocido como caracterización de las intensidades-duración-periodo de retorno de las avenidas y resulta muy útil para el análisis de escenarios cuando los modos de fallo son de tipo dúctil o relativos a estados límite de servicio, en otras palabras, cuando el daño es debido a la persistencia del fenómeno. La caracterización de las tormentas se realiza de forma semejante al análisis de cruces por cero (Silva, 2005) y en éste lo que se evalúa es la energía acumulada para cada una de las tormentas que superan un umbral determinado.

Para definir y separar las tormentas se aplicaron los siguientes criterios:

- Un umbral mínimo de alturas de ola significativa de 2 metros de altura, que equivale a 1.5 veces la altura significativa cuadrática media en la celda de Cancún.
- Si las alturas de ola significativa que exceden el umbral permanecen durante un periodo continuo igual 12 horas, de acuerdo a la definición de tormenta presentada, se considera como la misma tormenta.
- Para el análisis se excluyeron los eventos con alturas de ola menores a 2 metros de altura.
- La energía total de cada tormenta se normalizó con una tormenta equivalente a 2 metros de altura de ola sostenida por un intervalo igual a 24 horas.

Los eventos se seleccionan haciendo algún tipo de clasificación. En el caso del presente trabajo se estableció un umbral de altura de ola y se tomaron todos los valores que estuvieran por encima de éste. El valor del umbral está definido para una altura de ola de 2m, el cual fue determinado a partir de la altura de ola media cuadrática ( $H_{rms}$ ).

$$\overline{H_s} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N} \quad (1.40)$$

$$H_{rms} = \sqrt{2\overline{H_s}} \quad (1.41)$$

$$H_U = H_{rms} + 0.5H_{rms} \quad (1.42)$$

$\overline{H_s}$  : Altura significativa

$H_i$  : Altura de ola del registro

$H_{rms}$  : Altura de ola media cuadrática

$H_U$  : Altura de ola umbral

Estos criterios se toman como hipótesis fundamentales para efectuar los análisis de tormentas que incluye: el análisis 1948 - 2007; el número medio mensual de energía normalizada; la duración media y máxima histórica de tormentas; los valores máximos históricos; el número medio y máximo anual de tormentas; la duración media y máxima histórica de energía normalizada; el número medio y máximo anual de tormentas con energía normalizada.

### 1.3.3.1 Análisis energético

La presencia del oleaje en la superficie implica que las partículas de agua se muevan de una posición a otra. El cambio de posición requiere que se realice un

trabajo donde se deben vencer las fuerzas gravitacionales, representando con esto la energía potencial. Adicionalmente, el movimiento de las partículas de agua representa la energía cinética.

La energía del oleaje es muy importante en el entendimiento de diversos fenómenos que incluyen procesos tales como la generación de energía por viento o los cambios a los que se ve sometido el oleaje cuando se propaga de aguas profundas hacia aguas someras.

Para el análisis energético se seleccionan los datos de la misma manera que para las alturas de ola, es decir, se establece un umbral. El valor de este umbral fue calculado a partir de la energía normalizada. Esta se determina, deduciendo inicialmente la energía específica para cada valor de altura de ola. Posteriormente se estima el valor de la energía correspondiente al valor de 2m de altura de ola en 24 horas, hallada para el umbral de altura de ola. Finalmente se dividen ambos datos calculados para obtener la energía normalizada.

$$E_{TN} = \frac{1}{8} \rho g H^2 ; H = 2m; 24 \text{ horas} \quad (1.43)$$

$$E_{TH} = \frac{1}{8} \rho g \sum H_i^2 \quad (1.44)$$

dividiendo,

$$E_N = \frac{E_{TH}}{E_{TN}} = \frac{\sum H_i^2}{96} \quad (1.45)$$

$E_{TN}$  : Energía específica para un valor de 2 m de altura de ola en 24 horas

$E_{TH}$  : Energía específica para cada valor de altura de ola en todo el registro

$E_N$  : Energía normalizada

El objetivo de la normalización es observar y analizar los datos de forma más eficiente. Esto se traduce en que la energía normalizada constituye un factor de energía de alturas de ola, lo que permite efectuar una clasificación energética entre rangos de valores de las tormentas con intervalos que dependen del valor más alto y más bajo obtenido de la normalización. La ventaja de este procedimiento es que se puede hacer una clasificación mensual y anual contra el número de eventos ocurridos, y representar los resultados en un histograma o gráficos que indican el número medio y máximo de tormentas que superan los diferentes valores del umbral de energía.

### **1.3.3.2 Número medio mensual de tormentas en función de la energía normalizada**

Del registro de oleaje se define una tormenta como una ola que supera el umbral. Posteriormente se calcula a partir de la sobre elevación del nivel medio la energía asociada a cada fenómeno. Se lleva a cabo la normalización deduciendo el valor de las componentes de la energía definida como valor límite y luego se dividen los datos estimados para obtener la energía normalizada. Los resultados se presentan en rosas para incluir las direcciones asociadas de donde provienen los temporales con mayor contenido energético y en histogramas que muestran el número de ocurrencias del contenido energético de las tormentas a escalas anuales y mensuales.

### **1.3.3.3 Duración media y máxima histórica de tormentas**

Cuando se realiza un diseño, es muy importante considerar no sólo el intervalo de tiempo probable de que se presente un evento extremo a lo largo de la historia o cuál será la magnitud de la tormenta que estará soportando la estructura, la playa, etc. Otra variable con gran influencia en la estabilidad de los elementos que se encuentran en la costa es la duración del temporal pues, independientemente de la energía con que se presente el oleaje o el viento, es el tiempo de persistencia de la tormenta el que va a determinar la magnitud del daño. Con esto se justifica el análisis de duración media y máxima histórica de tormentas para diferentes umbrales de altura de ola y energía normalizada, ya que este análisis brinda un amplio panorama de los fenómenos acaecidos durante los 60 años de estudio, permitiendo observar la distribución espacial de las máximas duraciones de las ocurrencias que se presentaron y ofrece la posibilidad de localizar las zonas que poseen las condiciones más adversas para cualquier época del año con diferentes duraciones.

La duración de la tormenta se define entre el tiempo en que el evento excede el valor del umbral hasta el tiempo en que la altura de ola cae bajo dicho límite. El procedimiento desarrollado consistió en determinar para toda la muestra cuántas veces se supera dicho umbral y establecer el tiempo de persistencia de cada fenómeno, con el objetivo de cuantificar la permanencia media y máxima de cada suceso. La duración media es básicamente el promedio de las deducciones encontradas en el cálculo anterior.

### **1.3.3.4 Valores máximos históricos**

Una metodología novedosa y poco convencional de este trabajo son los análisis históricos de los estados de mar asociados no solo a condiciones de oleaje normal sino también a los eventos extremos que se presentan en diferentes épocas del año (invierno, primavera, verano y otoño).

Los datos estimados se consideran como los valores más altos de la tormenta, es decir, se construye una gráfico donde se observan las características del oleaje que presentan los valores más elevados por evento, que coinciden en este caso

con la altura de ola significativa máxima; se selecciona el periodo pico asociado y se calcula para cada temporal la energía normalizada.

Estos resultados llevan inherente la propiedad de brindar al diseñador un marco general que le permite identificar la distribución de las mayores acciones ocurridas y determinar los puntos que presentan altos niveles de energía a nivel anual. Esto último tiene un gran significado a nivel ingenieril, ya que se pueden establecer con exactitud las áreas con mayor potencial energético, las rutas que suponen mayor dificultad para la navegabilidad y las épocas del año donde se presentarán los mayores niveles de erosión en las costas mexicanas.

#### **1.3.3.5 Número medio y máximo anual de tormentas**

La cantidad de eventos que se pueden tener para diferentes épocas, a nivel mensual o estacional para una base de datos anual, se obtiene al clasificar para los periodos donde deseo conocer las zonas de mayor concentración de sucesos, las alturas de ola significativa mayores de un umbral predeterminado. El procedimiento consiste en primera instancia, en determinar el número de veces que se supera el umbral para los rangos establecidos en las diferentes épocas del año; posteriormente se hace una valoración en categorías para diferentes alturas de ola. Finalmente se mide la duración de cada tormenta.

#### **1.3.3.6 Número medio y máximo anual de tormentas en función de la energía normalizada**

Como se ha mencionado, las condiciones energéticas son muy importantes en los diferentes procesos que se presentan en relación al oleaje y a la interacción de este con el litoral. Los valores medios y máximos anuales permiten determinar la peligrosidad de una zona, así como el rango de variación histórico.

## 2 MODELO HÍBRIDO DE GENERACIÓN DE OLAJE

El conocimiento de los estados de mar (concretamente la altura de ola representativa con su dirección y periodo) que se gestan en aguas profundas e intermedias se puede alcanzar por muy diversos medios. Una alternativa que en los años recientes ha tomado fuerza gracias, en buena medida, al mejoramiento de los recursos computacionales, es el uso de modelos numéricos de oleaje generado por viento. Es deseable que los modelos que se utilicen para conocer esta información sean capaces de considerar, además de la acción del viento, la rotura del oleaje por peralte, la interacción entre cuádruples o triadas de olas y en casos específicos, la acción de las corrientes y la interacción del oleaje con el fondo (refracción y fricción).

De acuerdo con el trabajo realizado por Bolaños (2007), el modelo de tercera generación conocido como WAM (*WAVE Model*) es el que mejor estima los estados de oleaje inducidos por la acción del viento. Sin embargo, y de acuerdo con Pérez, *et al.* (2008) una fuerte limitante de este modelo es su deficiencia en cuanto a la estimación del oleaje generado por vientos asociados a ciclones tropicales. Ante tal restricción y dada la frecuencia con que las costas mexicanas son afectadas por huracanes, se hizo necesario el uso de un segundo modelo de generación de oleaje para corregir los valores de los estados de mar extraordinarios. Para tal efecto se utilizó el modelo HURAC, desarrollado por Silva, *et al.* (2005), el cual es de tipo paramétrico, con lo que se obtuvo una buena aproximación del oleaje generado por ciclones.

La descripción de los dos modelos antes citados, la metodología empleada para integrar los resultados y la validación del, a partir de ahora, denominado modelo híbrido, son el objeto central de este capítulo.

### 2.1 Modelo de generación de oleaje por viento - WAM

El WAM (*WAVE Model*) es un modelo numérico utilizado para estimar las condiciones de oleaje generadas por la acción del viento. Se desarrolló inicialmente en la segunda mitad de la década de los ochenta, a partir del proyecto *Sea Wave Modelling Project (SWAMP)* bajo la dirección del grupo *Wave Model Development and Implementation Group (WAMDI)*, que se dio a la tarea de generar un modelo de predicción que describiera la evolución del espectro bidimensional de oleaje sin restricción alguna y respetando la forma de éste, proporcionando al final, la variación temporal del espectro direccional en el punto de análisis.

El WAM es un modelo de tercera generación que integra la ecuación de transporte de energía bajo un enfoque Euleriano, la cual gobierna la evolución del espectro de energía del oleaje con respecto a la frecuencia y dirección de propagación en función de las coordenadas geográficas:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \dot{\phi} F \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \dot{\lambda} F \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \dot{\theta} F \right) = S \quad (2.1)$$

donde  $F(f, \theta, \phi, \lambda, t)$  es la función de densidad espectral,  $f$  representa la frecuencia,  $\theta$  la dirección de propagación del oleaje, y  $S$  es la función fuente/sumidero que describe el cambio de energía de la propagación de un grupo de olas, es decir, éste término resume los procesos de generación por viento  $S_{in}$ , interacción no lineal entre componentes (ola - ola)  $S_{nl}$ , y la disipación por rotura en aguas profundas  $S_{ds}$ ; el término fuente/sumidero se denota como:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2.2)$$

La componente de generación de olas por la energía que el viento ejerce a la superficie del agua se refleja en un crecimiento de las componentes de oleaje, por efecto de la inestabilidad entre la interfase viento - agua. Este término fue propuesto por Janssen (1989) y viene dado por la siguiente ecuación:

$$S_{in} = \beta_s F \quad (2.3)$$

$F$  es la función de densidad espectral y  $\beta_s$  es un parámetro que escala la velocidad del viento mediante la variable asociada a dicha velocidad por efecto de la fricción, además relaciona la energía del viento con el crecimiento exponencial del oleaje en las altas frecuencias del espectro. Este parámetro fue propuesto por Snyder *et al.* (1981) y está definido por:

$$\beta_s = \max \left\{ 0.025 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( 28 \frac{u_*}{c} \cos \theta - 1 \right) \right\} \omega \quad (2.4)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.5)$$

donde:

$u_*$  : Velocidad de fricción

$\omega$  : Frecuencia angular

$\rho_a$  : Densidad del aire

$\rho_w$  : Densidad del agua

El segundo mecanismo que afecta el crecimiento del oleaje en aguas profundas, es la transferencia de energía de un componente del oleaje a otro gracias al efecto de resonancia; es decir, por el choque entre olas de diferente dirección y frecuencia. Este efecto es calculado mediante la teoría desarrollada por Hasselman (1960) en la cual los cambios de energía ocurren en diferentes

direcciones y componentes, por lo que evalúa su relación simultáneamente. La teoría sugiere que 4 componentes de oleaje interactúan cuando sus números de onda y frecuencia se igualan, cumpliendo con las condiciones de resonancia y habrá entonces una transferencia de energía entre las 4 componentes. El cálculo de las interacciones requiere considerables recursos de cómputo por lo que involucra un gran número de combinaciones, para ello el WAM adopta una aproximación de interacción discreta (DIA) desarrollada por Hasselman (1985). Formalmente, la aproximación de interacción discreta puede ser escrita de la siguiente manera:

$$S_{nl}^{di}(k_4) = \sum_{\gamma=1,2} A_{\gamma} w_4 \left[ n_1^{\gamma} n_2^{\gamma} (n_3^{\gamma} + n_4^{\gamma}) - n_3^{\gamma} n_4^{\gamma} (n_1^{\gamma} + n_2^{\gamma}) \right] \quad (2.6)$$

donde

$$n_i^{\gamma} = \frac{F(k_i^{\gamma})}{\omega_i^{\gamma}}, i=1,2,3, \gamma=1,2 \quad (2.7)$$

$A_{\gamma}$  : Coeficiente de acoplamiento

La energía del oleaje no se incrementa infinitamente y por esta causa cuando las olas alcanzan un grado de saturación específico, disipan su energía por rotura, aún en aguas profundas. El efecto disipativo de la rotura en la evolución del oleaje es local, altamente no lineal y medido sobre un gran número de olas es mucho menor. A pesar de la incertidumbre acerca de la relevancia de este fenómeno en la rotura del oleaje, en muchas hipótesis se considera en el término fuente. Dada la complejidad del fenómeno y el poco conocimiento que acerca de este se tiene, el WAM incorpora un mecanismo de ajuste que representa el fenómeno, por medio de la siguiente expresión:

$$S_{ds} = -2.33 \times 10^{-5} \hat{\omega} \left( \frac{\hat{\omega}_w}{\hat{\omega}} \right) \left( \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{pm}} \right)^2 F \quad (2.8)$$

$$\hat{\omega} = E^{-1} \iint F(f, \theta) \omega df d\theta \quad (2.9)$$

$$E = \iint F(f, \theta) df d\theta \quad (2.10)$$

$$\hat{\alpha} = E \hat{\omega}^4 g^{-2} \quad (2.11)$$

$$\hat{\alpha}_{pm} = 4.57 \times 10^{-3} \quad (2.12)$$

donde:

$\hat{\omega}$ : Frecuencia media

E : Energía total

$\hat{\alpha}$  : Parámetro de peraltamiento de la ola

$\hat{\alpha}_{PM}$  : Parámetro para el espectro Pierson – Moskowitz

Si se desea generalizar la ecuación de transporte para aguas someras, a la función fuente se le debe adicionar una función que represente la energía que se pierde debido a la fricción de fondo y a la percolación, y los otros términos deben ser modificados de forma conveniente para permitir la dependencia de la profundidad en la relación de dispersión, de donde:

$$\hat{\omega} = (gk \tanh KD)^{1/2} \quad (2.13)$$

$$S_{bf} = -\frac{\Gamma}{g^2} \frac{\omega^2}{\sinh^2 KD} F \quad (2.14)$$

$$\Gamma = 0.038 \frac{m^2}{s^3} \quad (2.15)$$

donde F es la función de densidad espectral

## 2.2 Modelo de generación de oleaje por viento ciclostrófico - HURAC

El modelo paramétrico de ciclones HURAC se basa en los modelos desarrollados por Hydromet – Rankin Vortex de Holland (1980) y Bretchsneider (1990). Este modelo se presenta como una versión simplificada numéricamente de trabajos anteriores realizados por Sánchez *et al* (1998), Silva *et al* (2000) y Silva *et al* (2002), donde se alcanza una mejora notable en la caracterización de los campos de viento y oleaje. El HURAC se encuentra compuesto por 3 submodelos que estiman los campos de presión, vientos y oleaje.

### 2.2.1 Modelo de presión atmosférica

Para obtener el valor de la presión, el modelo resuelve la siguiente ecuación:

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0) e^{\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (2.16)$$

en la que

$P_0$ : Presión en el centro del huracán

$P_r$ : Presión a una distancia radial  $r$

$P_N$ : Presión normal

$R$ : Radio de máximos vientos ciclostróficos

Las unidades de medida de las presiones de la ecuación (2.16) se encuentran en milibares y las distancias en kilómetros.

### 2.2.2 Modelo de viento

Para la estimación del campo de viento, se calculan los valores del gradiente máximo del viento y la velocidad que alcanza éste a diez metros sobre el nivel del mar. El máximo gradiente de vientos  $U_r$  (en km por hora), para un ciclón estacionario se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$U_R = 21.8(P_N - P_0)^{1/2} - 0.5fR \quad (2.17)$$

$$f = 2\omega \sin\phi \quad (2.18)$$

$$\omega \approx 0.2618 \frac{\text{rad}}{\text{h}} \quad (2.19)$$

siendo

$f$ : Parámetro de aceleración de Coriolis

$\omega$ : Velocidad angular de la tierra

$\phi$ : Latitud en grados

La velocidad del viento a diez metros sobre el nivel del mar, en km/h, para un ciclón en movimiento y para una distancia  $r$  medida desde el centro del ciclón, se determina por la siguiente ecuación:

$$W = 0.886 [F_V U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)] \quad (2.20)$$

$(\theta + \beta)$ : Ángulo total entre la velocidad de traslación

$V_F$ : (km/h)

$U_R$ : Velocidad del viento medida en (km/h) a una distancia radial  $r$ , desde el centro de la huracán y es positiva en el lado izquierdo.

$F_V$ : Es un factor de amortiguamiento que se evalúa como la relación de la velocidad del viento en  $r$ .

El factor de  $F_V$  es aproximado a través de las siguientes relaciones:

$$F_V = 1 - 0.971 \text{EXP} \left( -6.826 \left( \frac{r}{R} \right)^{4.798} \right); \frac{r}{R} < 1 \quad (2.21)$$

$$F_V = \text{EXP} \left[ A \ln^3 \left( \frac{r}{R} \right) \text{EXP} \left( B \ln \left( \frac{r}{R} \right) \right) \right]; \frac{r}{R} \geq 1 \quad (2.22)$$

donde,

$$A = -0.99(1.066 - \text{EXP}(-1.936N_c)) \quad (2.23)$$

$$B = -0.357(1.4456 - \text{EXP}(-5.2388N_c)) \quad (2.24)$$

### 2.2.3 Modelo de oleaje

Para evaluar la altura de ola significativa  $H_s$ , para un ciclón no estacionario, el módulo de oleaje aplica la siguiente ecuación:

$$H_s = 0.2887F_h \left( 1 - \frac{6.69N_c}{1 + 10.3N_c - 3.25N_c^2} \right) \sqrt{R(P_N - P_0)} \left( 1 + \frac{V_F \cos(\theta + \beta)}{2U_R F_V} \right)^2 \quad (2.25)$$

donde  $F_h$  es aproximado a través de la siguiente relación:

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + 0.742 \left( \frac{r}{R} - 1 \right) + 0.07382 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)^2}; \frac{r}{R} < 1 \quad (2.26)$$

$$F_h = \frac{1 + 0.8974 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + 0.742 \left( \frac{r}{R} - 1 \right) + 0.07382 \left( \frac{r}{R} - 1 \right)^2} - \frac{N_c \left( \frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + C \left( \frac{r}{R} - 1 \right) + \frac{N_c}{10} \left( \frac{r}{R} - 1 \right)^2}; \frac{r}{R} \geq 1 \quad (2.27)$$

donde,

$$C = \frac{00.37N_c^{2.55}}{0.13 + N_c^{2.55}} \quad (2.28)$$

En la cual  $N_c$  representa el número de Coriolis ciclostrófico  $\left(N_c = \frac{fR}{U_r}\right)$ . Una estimación muy aproximada del periodo de ola asociado a la altura de ola significativa se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$T_s = 12.1 \left( \frac{H_s}{g} \right)^{1/2} \quad (2.29)$$

En la anterior expresión,  $T_s$  se encuentra dado en segundos, la altura de ola significativa,  $H_s$ , en metros y la aceleración de la gravedad en metros sobre segundos cuadrados.

#### 2.2.4 Relaciones complementarias

Los modelos paramétricos de presión, viento y oleaje que se reportan en la literatura generalmente dependen de la siguiente información: posición del centro del huracán, presión central, valor de presión de la última isobata cerrada y del radio ciclostrófico, conocido también como radio de máximo gradiente. Debido a que no todos los reportes meteorológicos dan a conocer el valor de la presión central, el modelo HURAC fue diseñado para eliminar dicha deficiencia de información utilizando el criterio de Silva *et al* (2002), el cual propone dos curvas para estimar la presión central en función de la velocidad superficial máxima del viento, una para el océano Atlántico y la otra para el océano Pacífico, que son respectivamente:

$$P_0 = 1019.08 - 0.182V_v - 0.0007175V_v^2 \quad (2.30)$$

$$P_0 = 1017.45 - 0.143V_v - 0.00088V_v^2 \quad (2.31)$$

$P_0$ : Presión central del huracán en milibares (mb)

$V_v$ : Velocidad máxima del viento promedio en un minuto, en km/h; siendo esta última magnitud, la que normalmente se reporta en los boletines meteorológicos.

Actualmente, todos los parámetros que se requieren para la modelación de la interacción oleaje con viento ciclostrófico pueden encontrarse en muchos boletines climatológicos, con excepción del radio ciclostrófico que propiamente nunca se reporta. Después de analizar el comportamiento de 26 huracanes, Silva *et al* (2002) proponen la siguiente relación:

$$R = 0.4785P_0 - 413.01 \quad (2.32)$$

R: Radio ciclostrófico dado en kilómetros y puede tomar valores máximo y mínimo de 38 y 15 respectivamente para presiones centrales superiores a 880 milibares.

Los avisos meteorológicos y la ubicación de los puntos de interés para estimar los campos de presiones, viento y oleaje se reportan, generalmente, en coordenadas geográficas. Las ecuaciones (2.16) a la (2.32) utilizan unidades métricas (kilómetros) para definir distancias. Para evitar la transformación de coordenadas, el modelo utiliza la siguiente aproximación para calcular el radio  $r$

$$r = \left\{ E_x a \cos \left[ \sin(\phi_i) \sin(\phi_c) + \cos(\phi_i) \cos(\phi_c) \cos(\lambda_c - \lambda_i) \right] \right\} \quad (2.33)$$

$\lambda$  : Longitud

$\phi$  : Latitud

$i, j$  : Subíndices que indican las posiciones del punto de análisis y del centro del ciclón.

$E_x$  : Radio de la Tierra

El radio de la tierra para cualquier latitud está dado por la siguiente expresión:

$$E_x = \frac{E_{ra}^2 E_{re}}{(E_{ra} \cos \phi)^2 + (E_{re} \sin \phi)^2} \quad (2.34)$$

$E_{ra}$  : Radio de la tierra en el ecuador (6378.135 km.)

$E_{re}$  : Radio polar de la tierra (6356.75 km.)

$\beta$  : Ángulo que se circunscribe entre el centro de ciclón y la velocidad del viento en el punto de interés.

El ángulo  $\beta$  se evalúa con la siguiente relación:

$$\beta = a \text{Tan}2(\lambda_i - \lambda_v, \phi_i - \phi_c) \quad (2.35)$$

Los ángulos de incidencia del viento y el oleaje se calculan con una formulación análoga a la ecuación (2.35) donde se sustituyen los valores de las latitudes y longitudes para las componentes del viento ( $u$  oleaje) evaluadas a una distancia  $\Delta\phi$  y  $\Delta\lambda$ .

## 2.3 Implementación numérica

La integración de los datos en un solo modelo híbrido (WAM – HURAC) cuya funcionalidad será descrita más adelante, se llevó a cabo para el estudio de las vertientes Atlántica y Pacífica de México con el objetivo de hacer un re-análisis de vientos de una serie de 60 años y determinar por medio de las simulaciones, las características del clima marítimo en dicho lapso. Con los resultados numéricos se determinaron las características estadísticas del oleaje en condiciones medias, extremas y de tormenta.

Como datos de entrada para el modelo WAM se utilizaron los datos de viento obtenidos del National Center for Environmental Prediction/ Nacional Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Esta base de datos contiene información a partir de 1948 con datos espaciados temporalmente cada seis horas y espacialmente dos grados en latitud y longitud. De manera que para alcanzar una resolución adecuada para caracterizar los litorales mexicanos, se interpolaron los vientos hasta contar con la información cada 0.25 de grado.

La Figura 2.1 muestra, como ejemplo, un archivo correspondiente a los datos de vientos interpolados para la componente  $u$  del primero de enero de 1979.

WAM1979.TXT - Bloc de notas

FECHA: 1979010100

COMPONENTE U

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -1.19 | -1.23 | -1.23 | -1.18 | -1.11 | -1.00 | -0.86 | -0.69 | -0.49 | -0.28 |
| -0.07 | 0.14  | 0.33  | 0.50  | 0.63  | 0.70  | 0.72  | 0.67  | 0.57  | 0.41  |
| 0.20  | -0.06 | -0.37 | -0.73 | -1.13 | -1.56 | -2.01 | -2.47 | -2.94 | -3.41 |
| -3.85 | -4.27 | -4.66 | -5.00 | -5.28 | -5.49 | -5.62 | -5.65 | -5.59 | -5.42 |
| -5.14 | -4.78 | -4.34 | -3.83 | -3.27 | -2.66 | -2.02 | -1.36 | -0.71 | -0.08 |
| 0.49  | 0.99  | 1.39  | 1.67  | 1.81  | 1.83  | 1.75  | 1.59  | 1.37  | 1.13  |
| 0.87  | 0.63  | 0.42  | 0.22  | 0.01  |       |       |       |       |       |
| -1.07 | -1.11 | -1.10 | -1.05 | -0.96 | -0.84 | -0.69 | -0.50 | -0.30 | -0.07 |
| 0.15  | 0.38  | 0.58  | 0.75  | 0.89  | 0.97  | 0.98  | 0.94  | 0.83  | 0.67  |
| 0.45  | 0.18  | -0.15 | -0.52 | -0.93 | -1.38 | -1.85 | -2.33 | -2.81 | -3.29 |
| -3.75 | -4.17 | -4.56 | -4.90 | -5.18 | -5.38 | -5.50 | -5.53 | -5.46 | -5.27 |
| -4.98 | -4.61 | -4.16 | -3.64 | -3.06 | -2.45 | -1.81 | -1.15 | -0.50 | 0.11  |
| 0.68  | 1.16  | 1.55  | 1.81  | 1.93  | 1.93  | 1.83  | 1.64  | 1.41  | 1.14  |
| 0.86  | 0.61  | 0.38  | 0.16  | -0.05 |       |       |       |       |       |
| -0.95 | -0.99 | -0.97 | -0.91 | -0.81 | -0.67 | -0.51 | -0.31 | -0.09 | 0.15  |
| 0.39  | 0.62  | 0.84  | 1.02  | 1.16  | 1.24  | 1.26  | 1.22  | 1.11  | 0.94  |
| 0.71  | 0.43  | 0.09  | -0.29 | -0.72 | -1.19 | -1.67 | -2.17 | -2.67 | -3.16 |
| -3.63 | -4.06 | -4.46 | -4.79 | -5.07 | -5.27 | -5.38 | -5.40 | -5.32 | -5.12 |
| -4.83 | -4.44 | -3.98 | -3.45 | -2.87 | -2.26 | -1.61 | -0.96 | -0.32 | 0.29  |
| 0.84  | 1.31  | 1.68  | 1.93  | 2.03  | 2.01  | 1.89  | 1.68  | 1.43  | 1.14  |
| 0.85  | 0.58  | 0.33  | 0.11  | -0.12 |       |       |       |       |       |
| -0.83 | -0.86 | -0.83 | -0.76 | -0.65 | -0.50 | -0.32 | -0.11 | 0.12  | 0.37  |
| 0.63  | 0.87  | 1.10  | 1.29  | 1.44  | 1.52  | 1.55  | 1.50  | 1.39  | 1.21  |
| 0.98  | 0.69  | 0.34  | -0.06 | -0.50 | -0.98 | -1.49 | -2.00 | -2.52 | -3.02 |
| -3.30 | -3.94 | -4.33 | -4.67 | -4.95 | -5.14 | -5.25 | -5.27 | -5.18 | -4.97 |
| -4.67 | -4.28 | -3.81 | -3.28 | -2.70 | -2.08 | -1.44 | -0.79 | -0.16 | 0.44  |
| 0.98  | 1.43  | 1.79  | 2.02  | 2.11  | 2.07  | 1.92  | 1.70  | 1.43  | 1.12  |
| 0.82  | 0.53  | 0.28  | 0.05  | -0.18 |       |       |       |       |       |
| -0.72 | -0.73 | -0.70 | -0.62 | -0.49 | -0.33 | -0.13 | 0.09  | 0.34  | 0.60  |

Línea 1660020, columna 39

Figura 2.1 Archivo de velocidad del viento en la componente  $u$

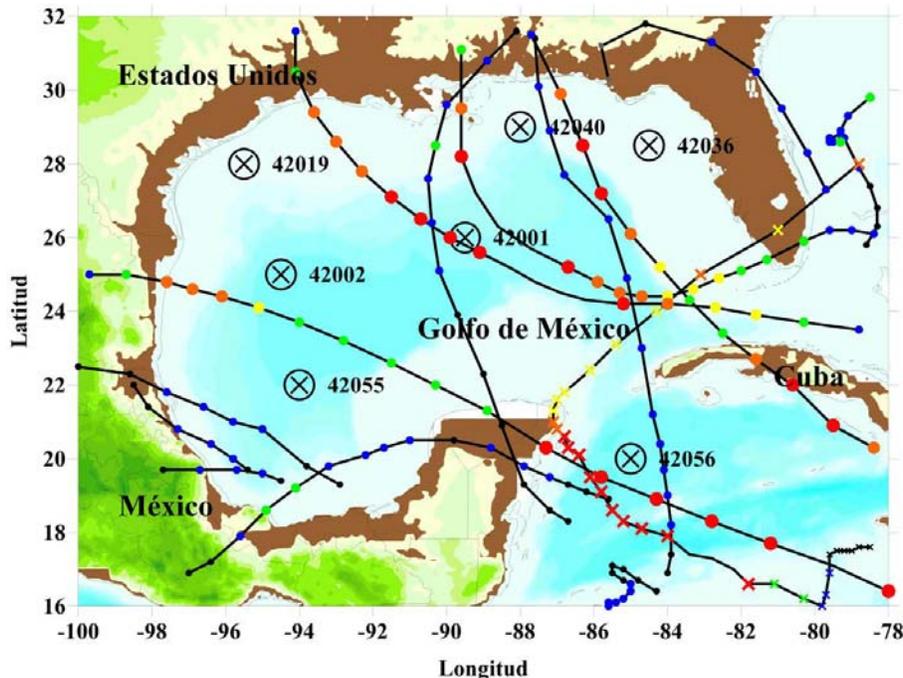
Las modelaciones fueron realizadas en una computadora con 16 procesadores y sistema linux, que se encuentra en el centro de informática y el grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La modelación numérica de un año, en promedio, tomó 12 y 18 horas para el Atlántico y para el Pacífico, respectivamente.

En este capítulo se presentan, como ejemplo, los resultados del modelo híbrido WAM – HURAC correspondientes al año 2005, en el cual se tuvo la afectación de 13 huracanes (Arlene, Bret, Cindy, Dennis, Emily, Pert, José, Katrina, Rita, Stan, Tammy, Wilma y Gamma) en la vertiente atlántica mexicana (Figura 2.2). La metodología que se siguió se describe a continuación:

1. El modelo WAM se implementó en una zona que cubre en su totalidad la extensión del Golfo de México y Mar Caribe. La batimetría que se empleó como dato de entrada para el modelo se obtuvo del BODC (British Oceanographic Data Center, [www.bodc.ac.uk/data/online\\_delivery/gebco/](http://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/)) y los campos de viento de la base de datos NCEP/NCAR. Continuando con esta metodología utilizada por Pérez *et al.* (2008), con estos datos de entrada el

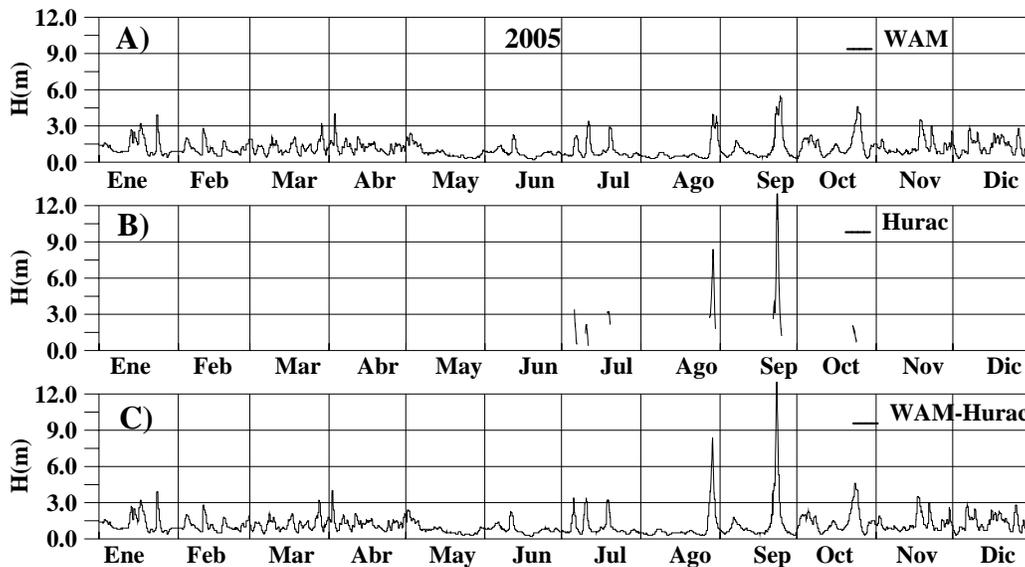
modelo se ejecutó y se obtuvieron los campos de oleaje correspondiente a todo el 2005.

2. Utilizando los boletines meteorológicos del NHC (National Hurricane Center de la NOAA, <http://www.nhc.noaa.gov/>), se identificaron ciclones tropicales que afectaron la zona de estudio (malla numérica). Una vez realizado este proceso, se interpolaron los resultados para tener la ubicación geográfica y presión central cada hora y con esta información se ejecutó el modelo HURAC, limitando su aplicación a un radio de 500 km medidos desde el centro del meteoro. De tal forma que se obtuvo, para todos los nodos de la malla numérica, un registro discontinuo en el tiempo de los datos de viento y oleaje.
3. Finalmente, los resultados obtenidos con el WAM, en las fechas correspondientes a la afectación de cada uno de los ciclones, fueron sustituidos por los datos generados con el modelo HURAC, si y solo si estos últimos fueran diferentes de cero.



**Figura 2.2** Posición geográfica de las boyas de la NOAA y trayectoria de 13 ciclones tropicales que afectaron el Golfo de México y la porción del Caribe mexicano durante 2005.

La Figura 2.3 esquematiza la integración de resultados del modelo híbrido para el año 2005.



**Figura 2.3** Esquemática de la metodología empleada para el punto ubicado en la coordenada (89.5° W, 26° N). A) Resultados con el modelo WAM, B) resultados del modelo Hurac y, C) resultados con el modelo híbrido WAM-Hurac.

A continuación se presentan las mallas de cálculo que se utilizaron para la caracterización del clima marítimo en cada una de las vertientes oceánicas mexicanas. Es de notar que el modelo híbrido se aplicó en cada uno de los nodos, lo que permitió en una segunda etapa, el análisis regional.

### 2.3.1 Vertiente Atlántica

La información de la caracterización de las variables de altura de ola y viento se encuentra comprendida dentro de una malla de cálculo de 10259 celdas que cubren en su totalidad la vertiente atlántica, con una resolución espacial de (0.25x0.25) grados tanto en x como en y.

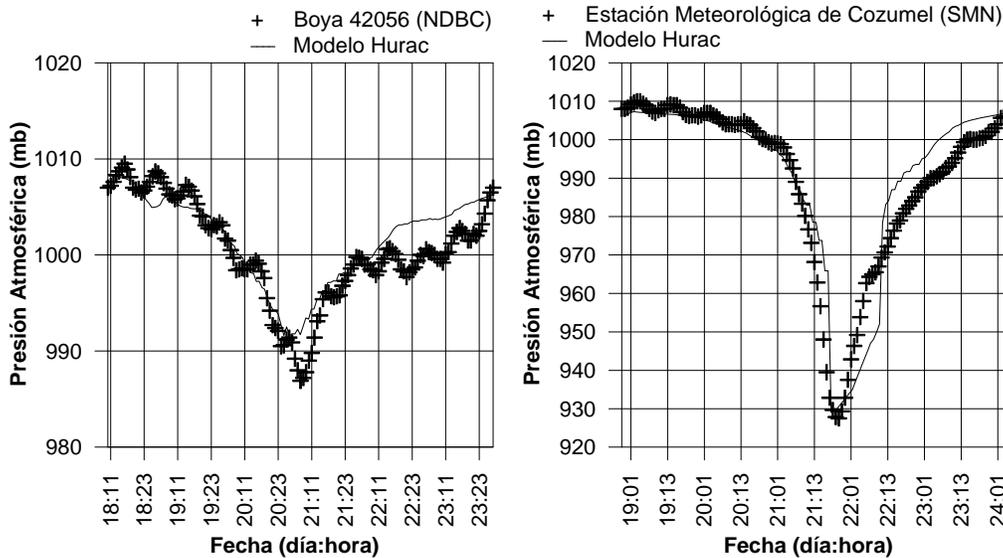
### 2.3.2 Vertiente Pacífica

La información de la caracterización de las variables de altura de ola y viento se encuentra comprendida dentro de una malla de cálculo de 8203 celdas que cubren en su totalidad la vertiente pacífica, con una resolución espacial de (0.25x0.25) grados tanto en x como en y.

## 2.4 Validación del modelo híbrido

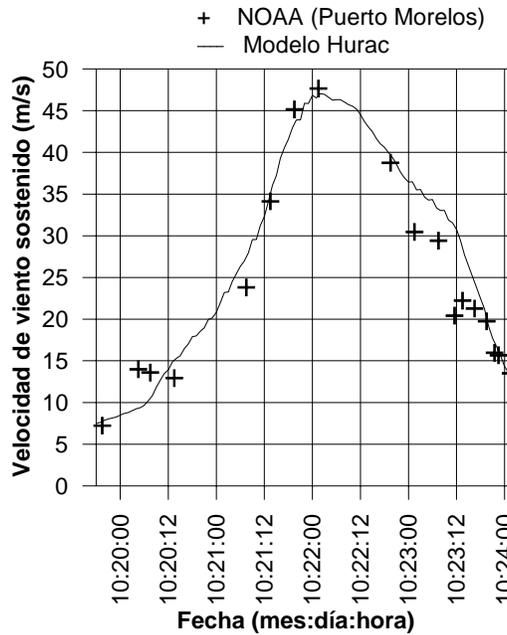
La validación de los resultados obtenidos por el modelo híbrido WAM – HURAC, se realizó mediante la comparación con los datos obtenidos de 7 boyas oceanográficas del NBDC que se vieron afectadas durante la trayectoria de los huracanes que ocurrieron en 2005. En la Figura 2.2 se presentaron la posición de las boyas, así como la trayectoria de los eventos.

En primera instancia se presenta la comparación entre los datos recuperados de diversas fuentes y los resultados del modelo híbrido exclusivamente durante el paso del huracán Wilma. Así, en la Figura 2.4 se presenta la validación para los valores de presión atmosférica estimados, al compararlos con los registrados por la boya 42056 de la NOAA (lado izquierdo) y la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional en Cozumel (lado derecho). La precisión en la aproximación es evidente, aunque es de notar que el modelo se aleja un poco de los datos medidos una vez que se ha superado el pico de la tormenta y durante el proceso de decaimiento.



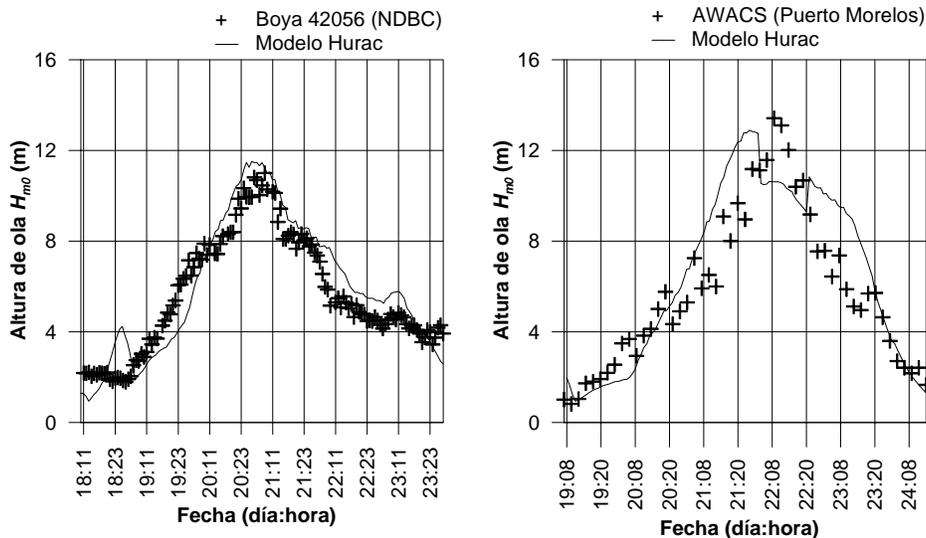
**Figura 2.4** Comparación entre las presiones atmosféricas calculadas con el modelo híbrido versus registros de la boya 42056 del NDBC y del SMN en la Isla de Cozumel durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).

Respecto del campo de viento, la Figura 2.5 muestra la comparación entre los datos obtenidos frente a Puerto Morelos, Quintana Roo y las estimaciones del modelo híbrido. Es claro que, salvo por algunos puntos, el ajuste entre ambas fuentes de información es razonablemente bueno.



**Figura 2.5** Comparación de los vientos calculados con el modelo híbrido y los datos estimados por el proyecto HRD durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005)

El campo de alturas de ola también fue sujeto de validación con un equipo que reportó datos *in situ* durante el paso del huracán Wilma. De manera que en la Figura 2.6 se muestran los valores que se obtuvieron con el modelo híbrido y los datos que registró, por un lado, la boya 42056 de la NOAA y por otro el equipo acústico AWACS, propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ambas aproximaciones son buenas excepto para el tiempo en que el equipo AWACS sufrió un leve asentamiento al paso de dicho huracán.



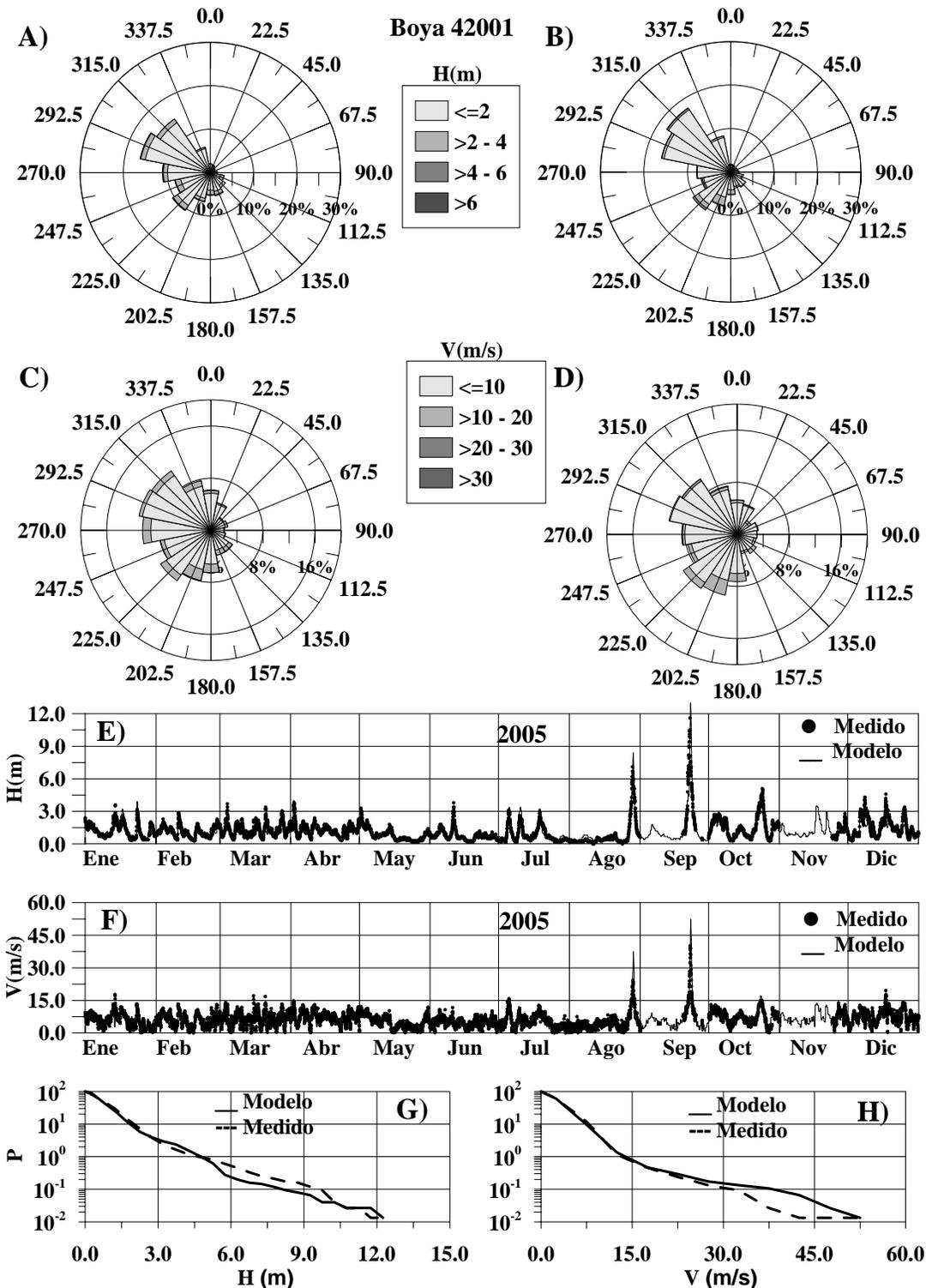
**Figura 2.6** Comparación de las presiones atmosféricas calculadas con el modelo Hurac versus registros de la boya 42056 del NDBC y los valores medidos en Puerto Morelos, Quintana Roo (reportados por Silva *et al.* (2007)) durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).

Con el fin de fortalecer la validación del modelo híbrido y la metodología de integración de resultados, en las Figura 2.7 a Figura 2.13 se muestran, en los incisos A, B, C y D las rosas de oleaje y viento de los datos medidos por las boyas que se muestran en la Figura 2.2, contrastadas con los datos calculados del modelo híbrido. Las gráficas correspondientes en los incisos E y F representan la evolución de las alturas significantes de oleaje y el comportamiento del viento, de los datos estimados por el modelo híbrido y los valores registrados por las boyas, a lo largo de los distintos meses del año 2005. Los incisos G y H presentan la comparación de las distribuciones de probabilidad de la altura de oleaje y la velocidad de viento calculadas contra las magnitudes medidas por las boyas.

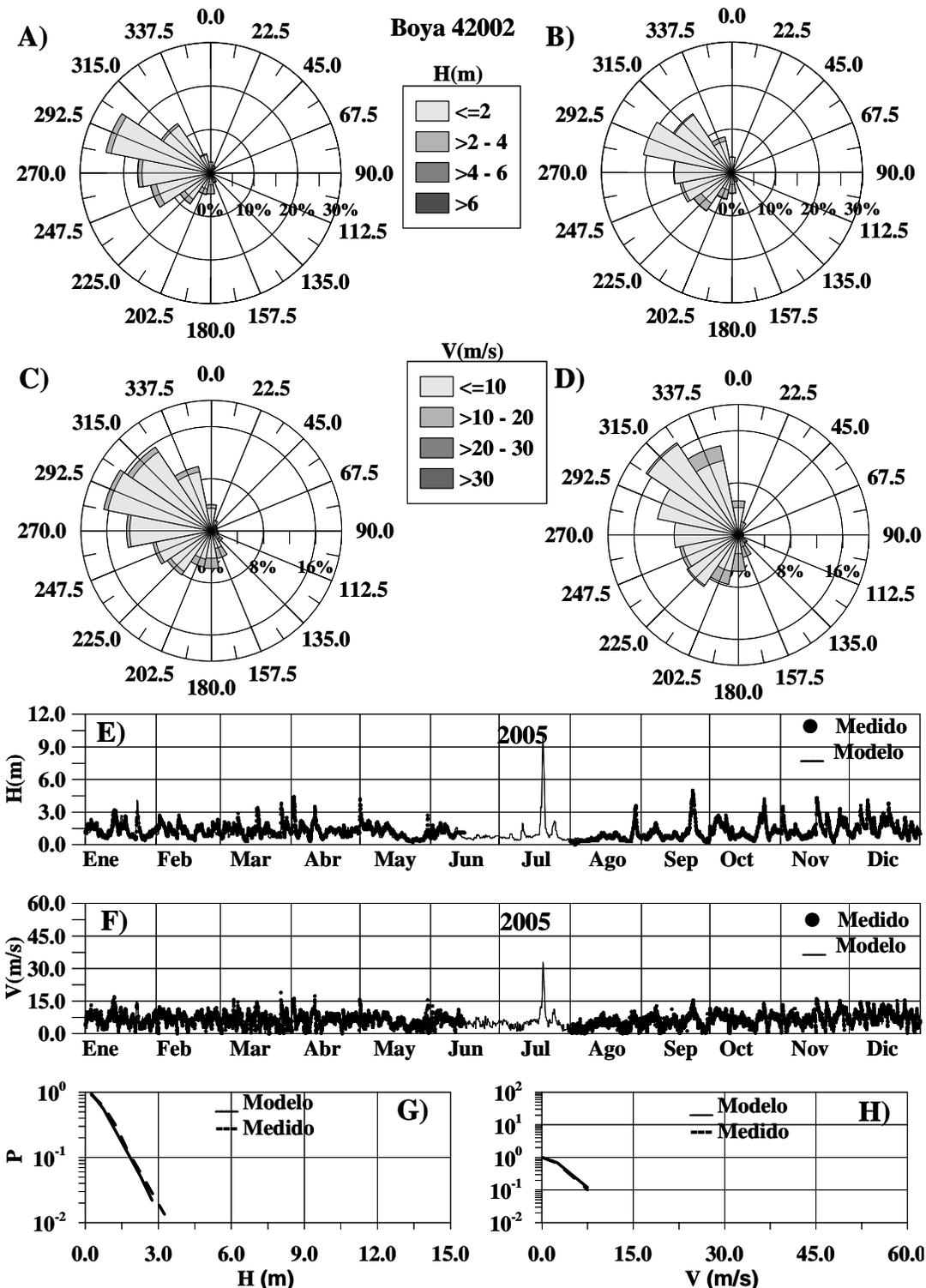
A partir de dichas comparaciones, se puede decir que el ajuste entre los datos medidos y los valores calculados, para las direcciones de oleaje y viento ocurridas en 2005 es muy bueno. En la verificación de la información de la boya y del modelo híbrido, se detectan algunas interrupciones en los datos que proporcionan las boyas. Esta pérdida de información suele deberse a fallas técnicas propias de los instrumentos de medición; aunque en determinados casos, las fechas en que se presentó la suspensión de la información, coinciden con los días en los cuales alguna tormenta o huracán pasó cerca de la boya, de donde la falta de datos podría también ser resultado de saturación del equipo.

En resumen, parte de las diferencias entre los datos obtenidos a través del modelo numérico y los registros por las boyas se deben principalmente a la calidad de los vientos utilizados para forzar el modelo WAM, la precisión de los modelos WAM y HURAC y la falta de información en los registros de las boyas.

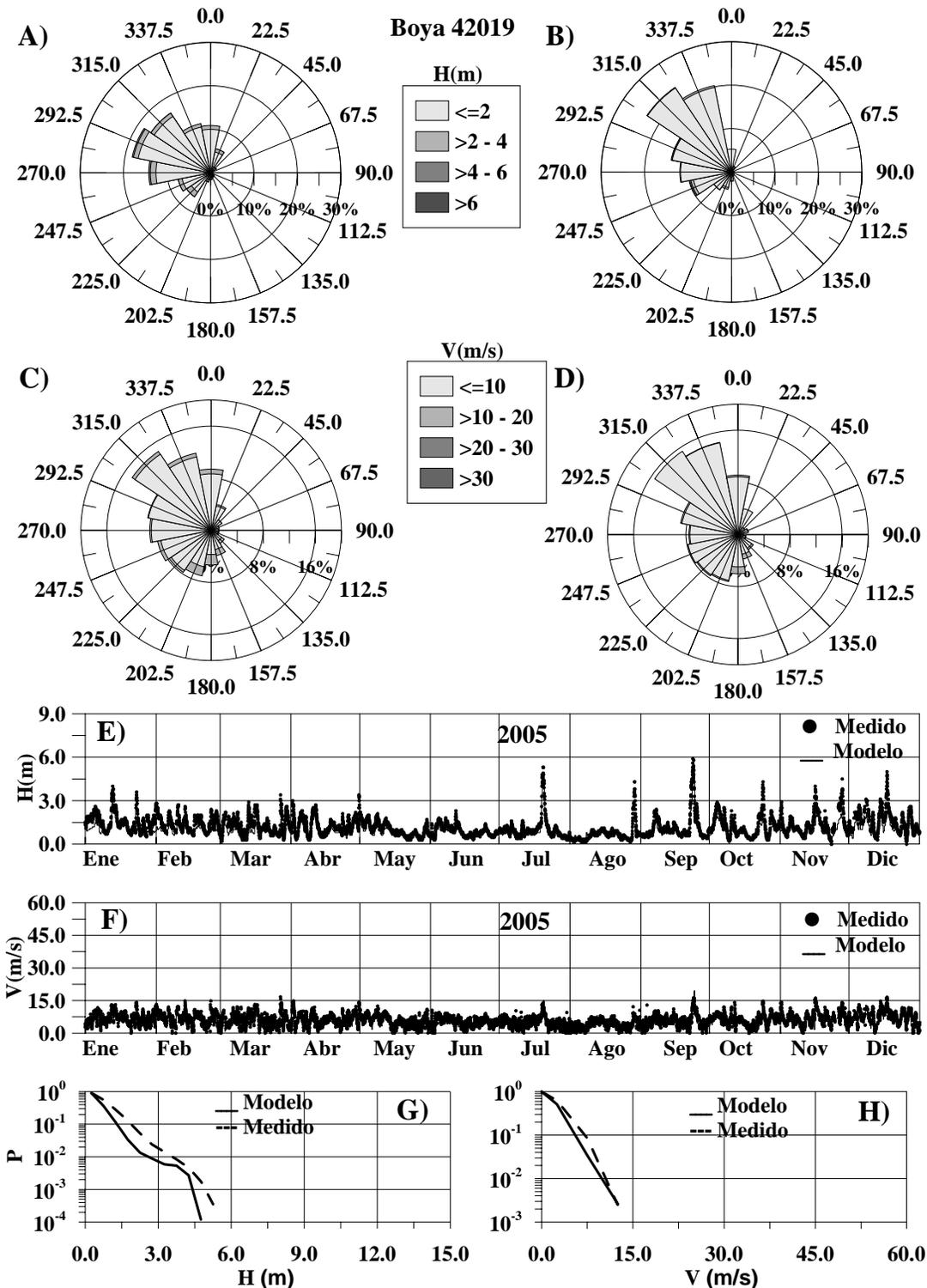
Se debe señalar que los resultados obtenidos a través del modelo WAM son muy sensibles a la calidad y resolución, tanto espacial como temporal de los vientos que se utilizan para forzar el modelo, tal como lo han verificado diversos autores, entre ellos Pérez *et al.* (2008). A pesar de ello y en virtud que para realizar un re-análisis de oleaje de más de 25 años son muy pocas las fuentes de información disponibles, y más aún las de libre acceso, el modelo híbrido resulta ser práctico y muy confiable.



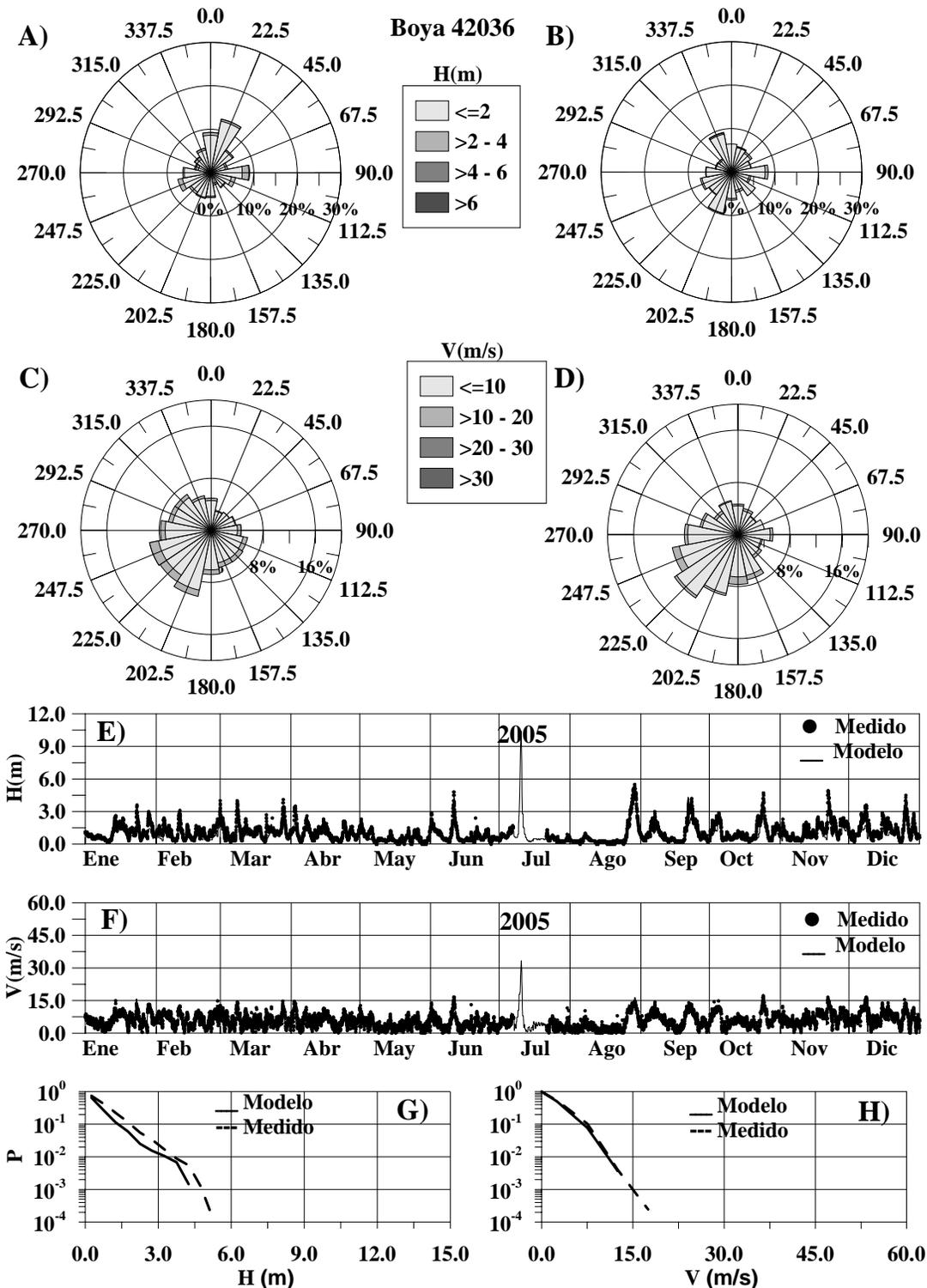
**Figura 2.7** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42001, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42001, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.



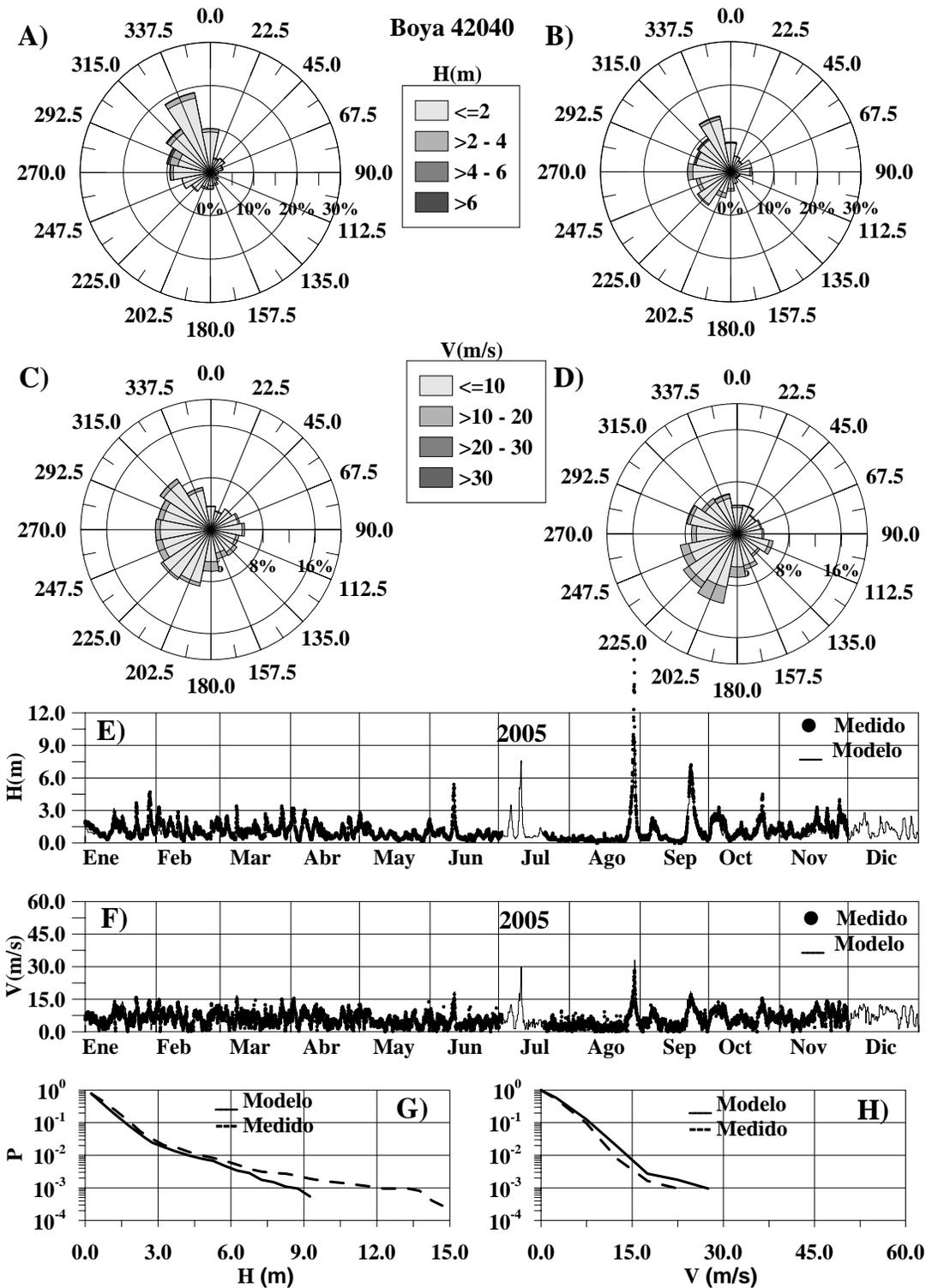
**Figura 2.8** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42002, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42002, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.



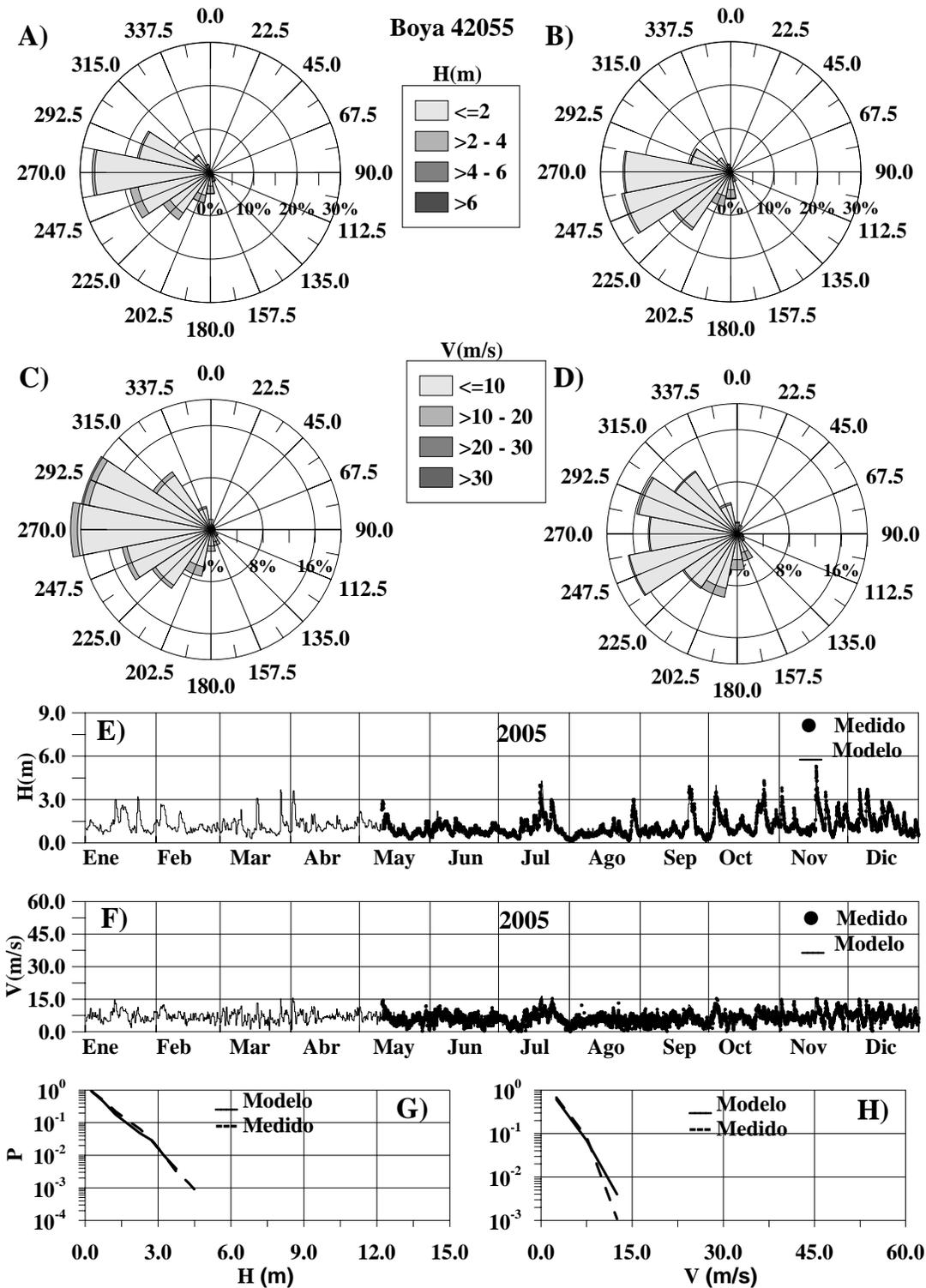
**Figura 2.9** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42019, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42019, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.



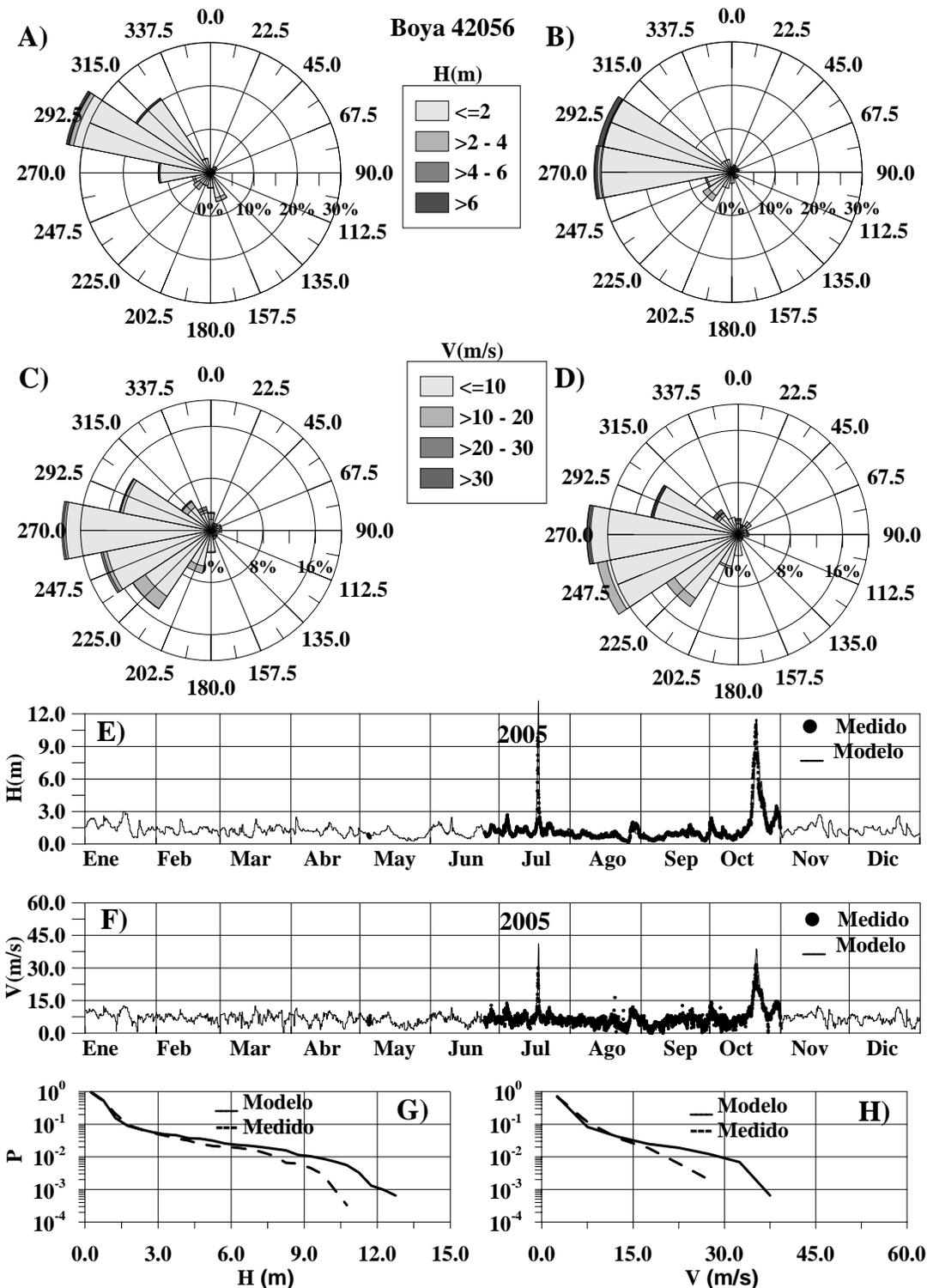
**Figura 2.10** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42036, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42036, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.



**Figura 2.11** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42040, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42040, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo; comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.



**Figura 2.12** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42055, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42055, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo, comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.



**Figura 2.13** Para el año 2005, las rosas de oleaje: A) boya 42056, B) modelo; las rosas de viento C) boya 42056, D) modelo; E) evolución temporal del oleaje medido y calculado con el modelo; F) evolución temporal del viento medido y utilizado con el modelo, comparación entre las distribuciones de G) alturas de ola y H) vientos medidos y calculados.

### 3 MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PARTICULARES

De acuerdo con lo presentado en el capítulo anterior, el procedimiento que se siguió para el procesamiento de los datos se puede resumir como sigue:

- Para establecer las condiciones de forzamiento del modelo WAM, se interpolaron los vientos del re-análisis del proyecto NCEP/NCAR con una resolución espacial de  $0.25^\circ$  y temporal de 10 min. Para cada una de las vertientes se generaron 60 ficheros individuales, uno por año.
- Se ejecutó el modelo WAM y se grabaron los resultados relativos a las condiciones de oleaje con una resolución temporal de 1 hora en toda la malla de cálculo.
- Por otro lado, se construyeron dos bases de datos con los avisos meteorológicos de los ciclones tropicales que han afectado las vertientes atlántica y pacífica mexicanas. Para la vertiente atlántica se consideraron 646 eventos, mientras que para la vertiente pacífica fueron 838 eventos. Los avisos meteorológicos se interpolaron con una resolución temporal de 1 hora.
- Para cada una de las celdas de las dos mallas de cálculo, se ejecutó el programa HURAC. Para ello solo se utilizó la información de la base de datos cuando la distancia relativa entre la celda en cuestión y la posición del centro del ciclón fuera menor que 500 km
- Una vez construidas las bases de datos asociadas a los resultados del WAM y del HURAC, se procedió a la hibridación utilizando la metodología presentada en el capítulo anterior.

#### 3.1 Pre-procesamiento de los resultados

Considerando los 60 años de re-análisis, la base de datos contiene 525960 grupos de información de oleaje y viento para cada una de las celdas de las mallas de cálculo. En virtud que a) muchas de las celdas corresponden a información sobre tierra y que no son de interés, b) por cuestiones de cálculo la malla incluye zonas que no son de interés para el análisis y c) que las variaciones de oleaje y viento entre celdas contiguas con una resolución espacial de  $0.25^\circ$  no es significativa, se decidió utilizar para el análisis de los resultados solo parte de la información calculada, tal y como se detalla más adelante.

### 3.1.1 Características de las mallas numéricas de análisis

Para ambas vertientes se decidió construir mallas de análisis con una resolución espacial de celda de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . En particular, la malla de la vertiente atlántica tiene una cobertura que va de las latitudes  $15^\circ$  N a la  $31^\circ$  N y de las longitudes  $80^\circ$  W a la  $98^\circ$  W, como se muestra en la Figura 3.1. En total esta vertiente está representada por 817 celdas marinas, las cuales para fines sólo de cálculo fueron numeradas de sur a norte y de oeste a este.

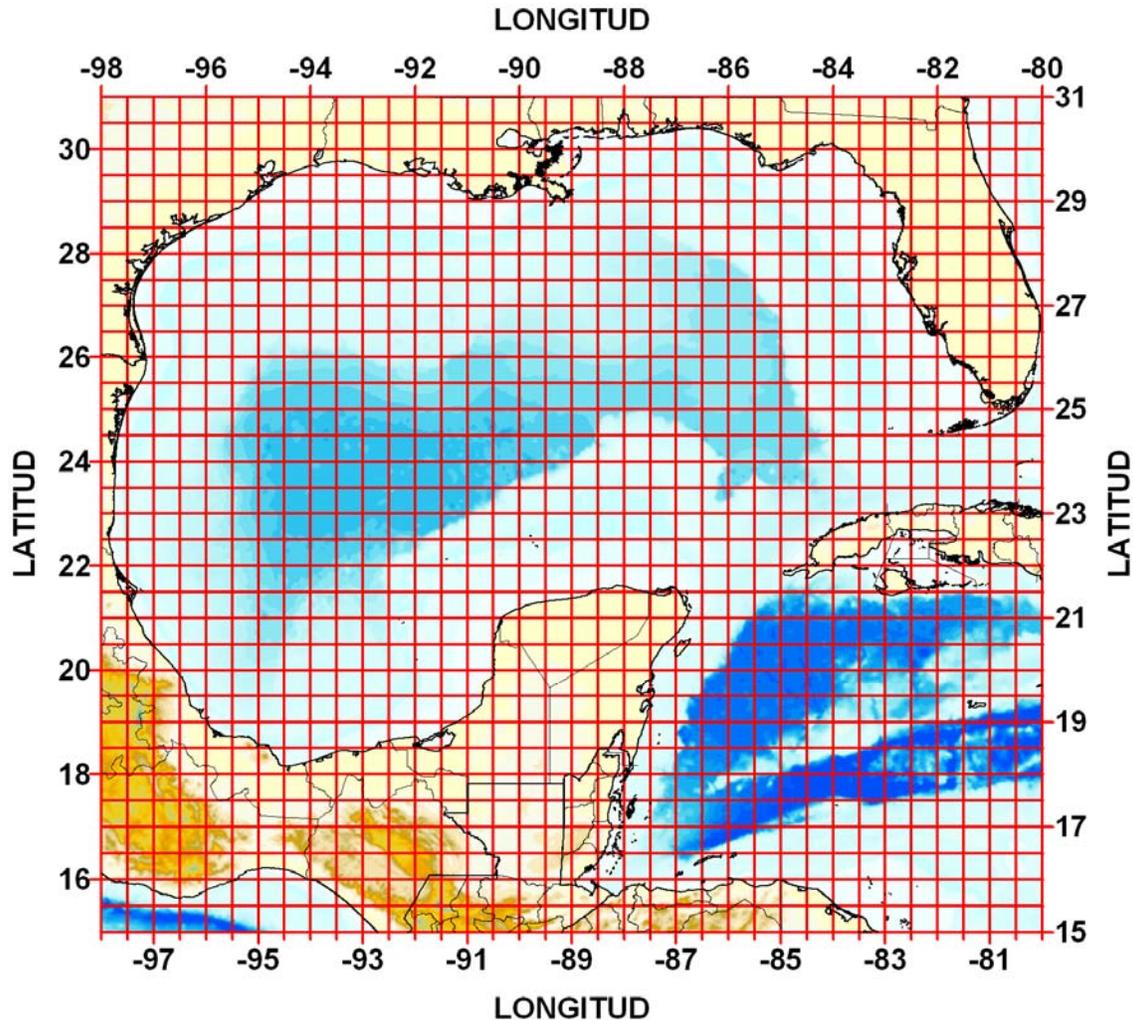


Figura 3.1. Malla de análisis para la vertiente atlántica

De manera análoga a la malla de la vertiente del atlántico se construyó la malla del pacífico. Esta última cubre la región comprendida entre las latitudes  $12.5^\circ$  N y  $33.5^\circ$  N y las longitudes  $90.5^\circ$  W y  $119.5^\circ$  W, integrando 1170 celdas marinas, ver Figura 3.2.

Para cada una de las celdas de trabajo se generó un fichero el cual contiene la siguiente información: fecha (año, mes, día y hora), viento (velocidad en m/s sostenida en un promedio de 10 mín. a 10 msnm, dirección de incidencia) y oleaje

(altura de ola significativa en metros y dirección y periodo de pico espectral en segundos, asociados a la altura de ola significativa).

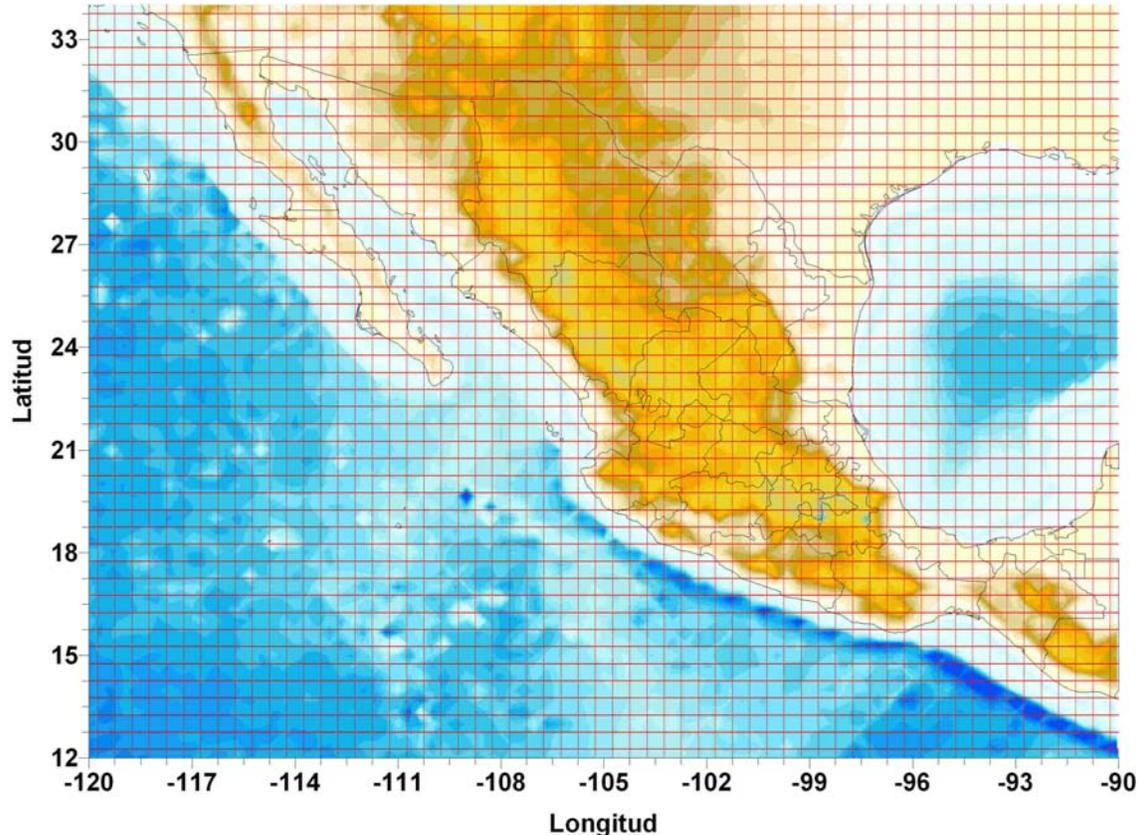


Figura 3.2 Malla de análisis para la vertiente pacífica

No obstante que la información del cálculo numérico fue reducida substancialmente, para el análisis de resultados se tienen 1987 celdas de análisis (817 en la vertiente atlántica y 1170 en la vertiente pacífica), 525960 horas con 9 datos asociados, es decir más de 5.5 mil millones de datos, entonces, presentar el análisis puntual de cada una de las celdas es inviable para los alcances del presente trabajo. Por tal motivo se decidió solo presentar detalladamente la celda ubicada en la longitud  $86.5^{\circ}$  W y latitud  $21.0^{\circ}$  N correspondiente a la vertiente atlántica y que está justo frente a la costa de Cancún, Quintana Roo. Un análisis regional de ambas vertientes en el cual se resumen los resultados del comportamiento histórico del oleaje y viento son presentados en el siguiente capítulo.

### 3.2 Caracterización de la celda frente a Cancún, Quintana Roo.

El procedimiento utilizado para el análisis del comportamiento a largo plazo del oleaje y viento en esta sección corresponde a la metodología desarrollada a lo largo del capítulo 1, por tal motivo no se presenta aquí y solo se muestran y examinan los resultados.

A continuación se describen los cálculos realizados para la caracterización del oleaje a largo plazo, clasificados de la siguiente manera:

### 3.2.1 Análisis de oleajes extremos y normales

Este comprende el análisis estadístico estacional (primavera, verano, otoño e invierno) y anual que incluye:

- Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa en una escala de cero a uno.

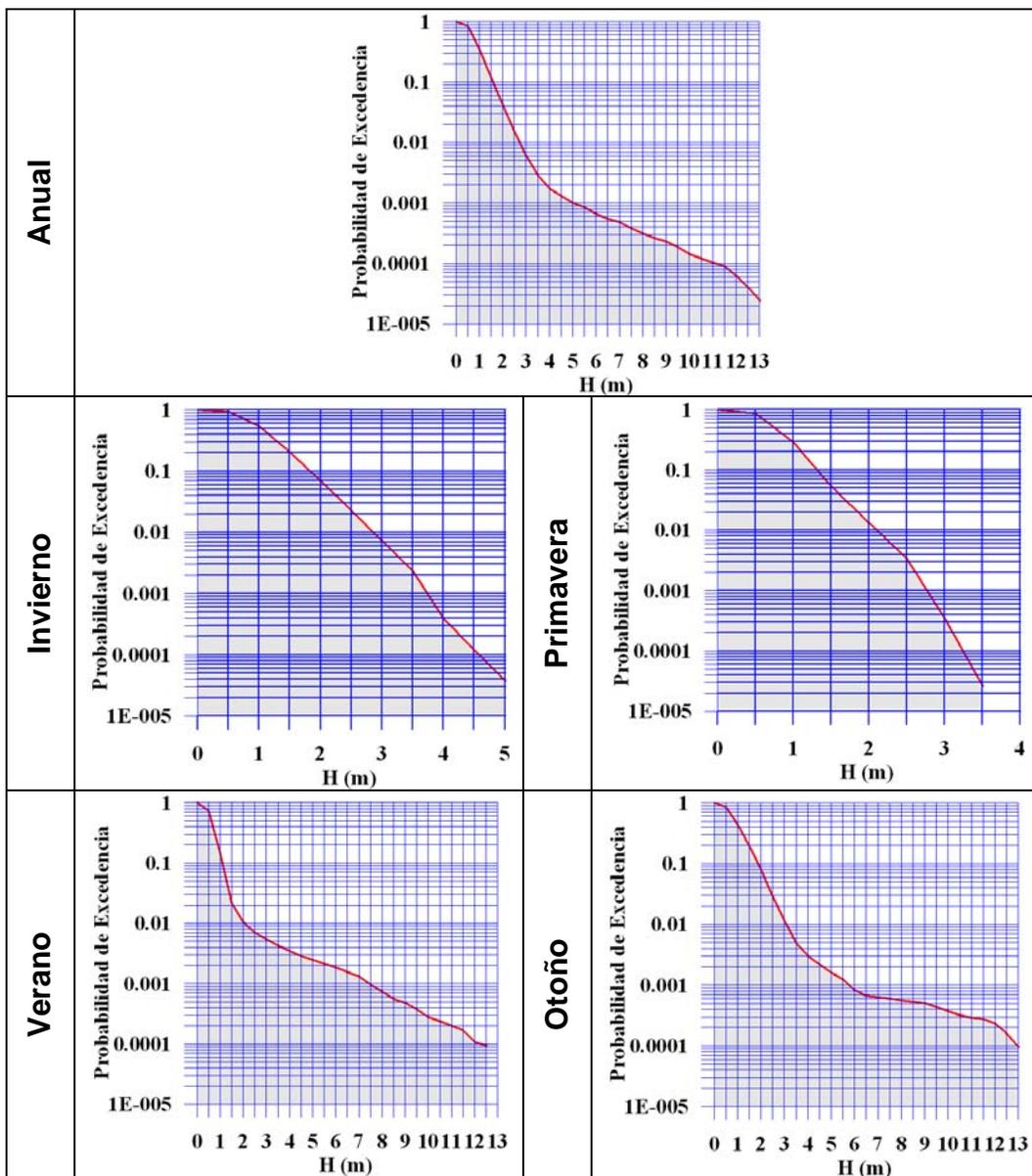


Figura 3.3 Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa

Se determinó la probabilidad de excedencia para las alturas de ola significativa, vientos sostenidos y periodo medio de oleaje, con el fin de obtener de forma rápida la probabilidad de que una tormenta (altura, viento y periodo) no supere un valor determinado en un año medio.

Con estos resultados es posible estimar, por ejemplo, que en un ciclo de tiempo se pueda presentar con una probabilidad de 0.03% una altura de ola de 8 metros con una velocidad de viento de 25 m/s en la costa, y un periodo medio asociado de 11.7 segundos.

- Probabilidad de excedencia de periodos medios de ola en una escala de cero a uno.

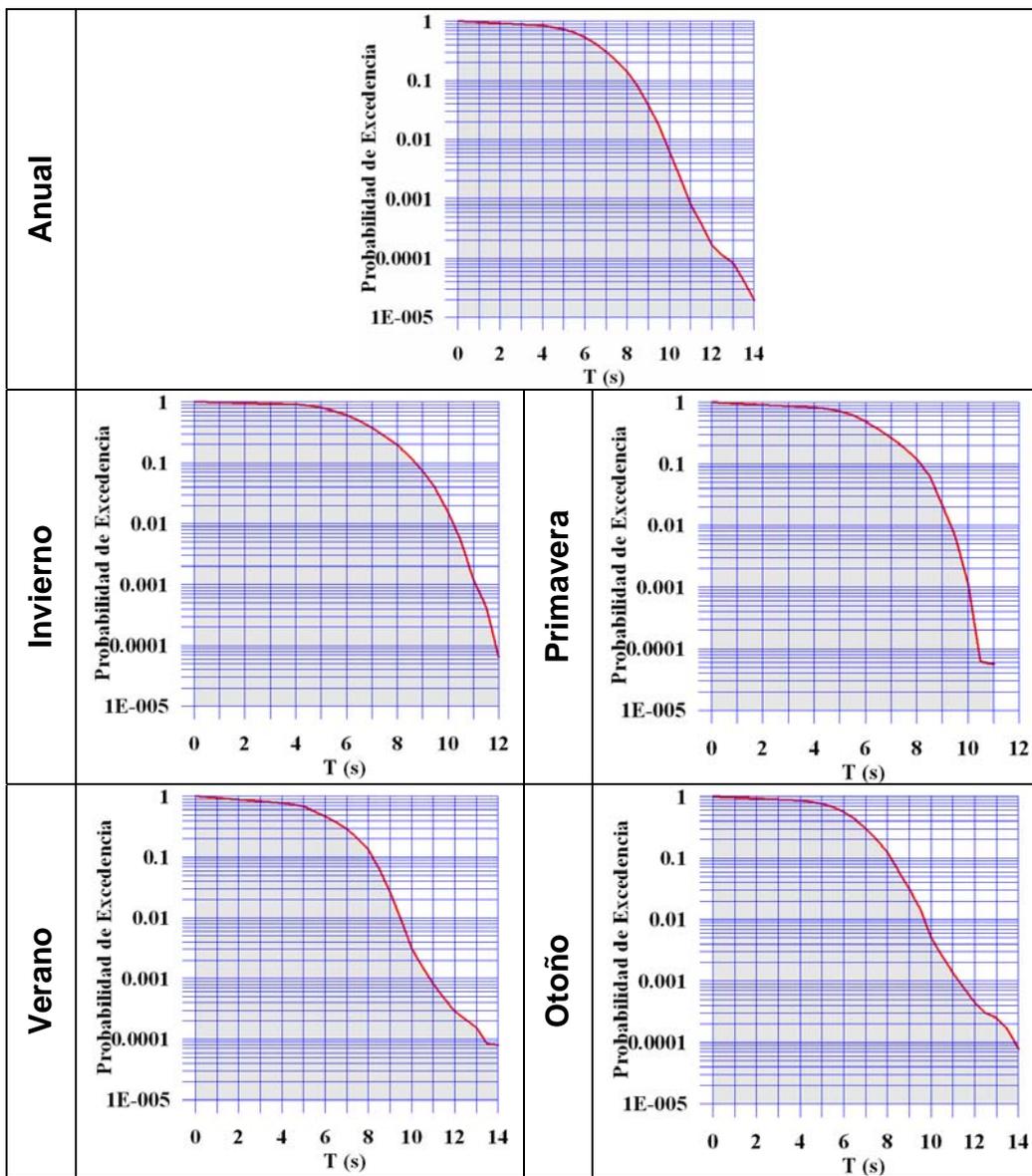


Figura 3.4 Probabilidad de excedencia de periodos medio de ola

Particularmente en Cancún, es esencial realizar los estudios a largo plazo desde la óptica estacional, puesto que la distribución de los temporales no es homogénea, es decir, no se presenta para todas las estaciones la misma cantidad de tormentas con igual intensidad. Se encuentran, por ejemplo, para la temporada de verano y otoño los valores más altos de las características del oleaje. Para dar una idea de ello, se toma de la Figura 3.3 la altura de ola más grande que se puede presentar (13m) y que corresponde a la estación de otoño. Esta tiene una probabilidad de ocurrencia del orden de 0.0001%. Una altura de ola de esta magnitud tiene un periodo medio de 13.8 segundos aproximadamente (Figura 3.4). En cuanto a los valores mínimos, la constante indica que su incidencia se da en los primeros meses del año, época donde los huracanes y los nortes no se presentan.

- Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y periodo medio de ola en porcentaje.

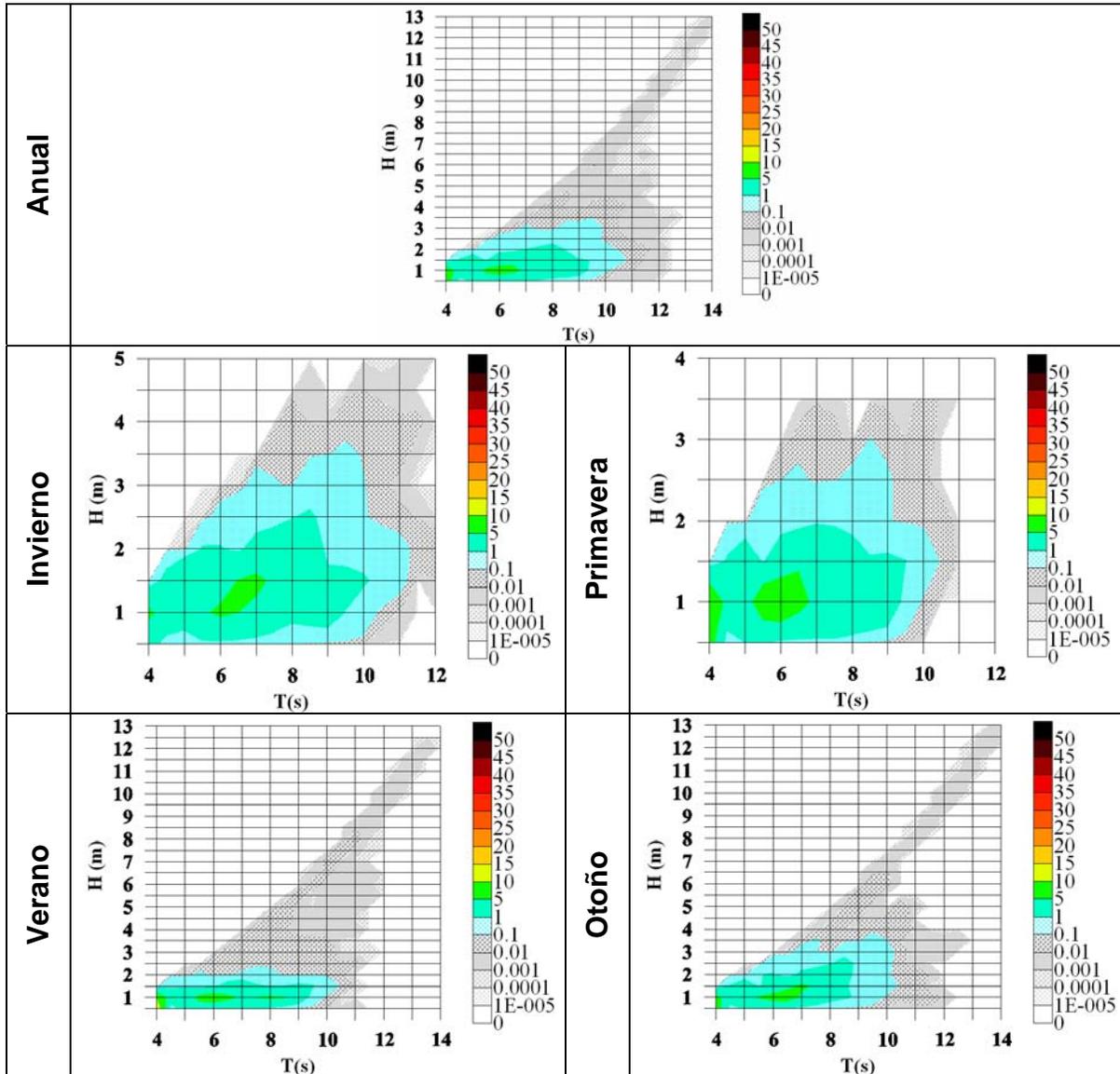


Figura 3.5 Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y periodo medio de ola

Las estimaciones de la frecuencia conjunta están comprendidas por las combinaciones de altura de ola significativa con dirección de propagación, altura de ola significativa contra el periodo medio y velocidad del viento con dirección de incidencia.

Generalmente, el oleaje que se propaga hacia la costa está gobernado por direcciones que varían desde el norte hasta el este-sureste ( $0-162^\circ$ ) para todas las épocas del año. Sin embargo, si se toma la altura de ola de un metro, el 15-20% de las veces el oleaje se propaga hacia la costa con un ángulo de  $90-112.5^\circ$  y con un periodo de 7 segundos (Figura 3.5), que corresponde a un tren de ondas

proveniente del este o este-sureste con una velocidad probable que varía de 9-10m/s en la época de invierno. En verano las olas aparecen en la misma dirección que en invierno pero con mayor probabilidad, entre un 20-25%, para un periodo de onda de 6 segundos y con velocidades comprendidas entre 5-5.8m/s. Para primavera las condiciones varían, pues el oleaje procede del este-sureste únicamente y en esta etapa se presenta la mayor probabilidad de aparición 25-30%, asociado a un periodo de 6 segundos y vientos sostenidos de 6 m/s. En otoño el oleaje incidente cambia su rumbo y se acerca del este con un periodo de 6.5 segundos y un 15% de frecuencia de aparición, generado por vientos aproximados de 9m/s (Figura 3.6).

- Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y dirección de propagación en porcentaje.

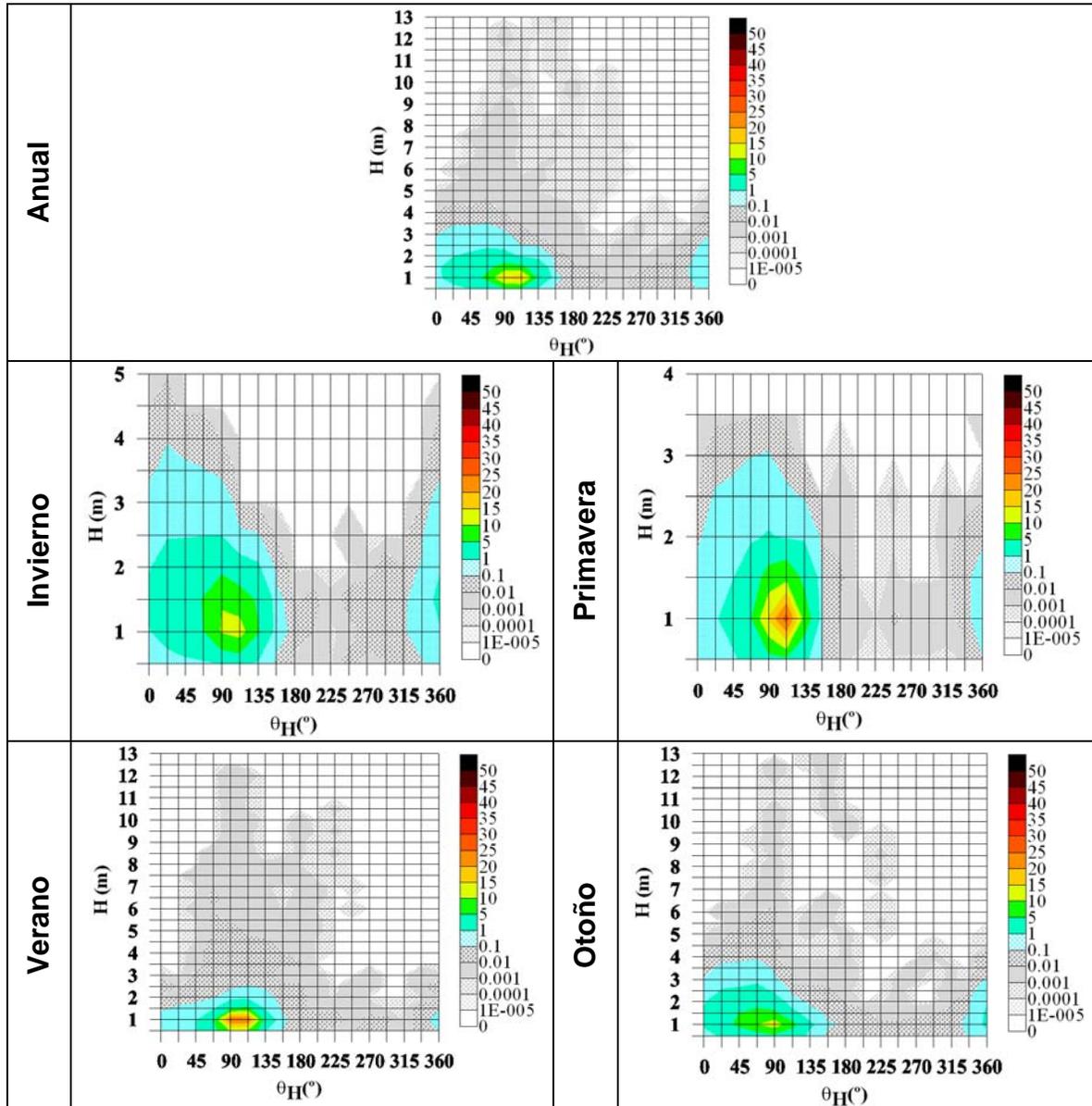


Figura 3.6 Probabilidad conjunta de altura de ola significativa y dirección de propagación

Ahora, los cálculos permiten observar que las máximas alturas de ola en condiciones reinantes se encuentran concentradas en valores que difieren significativamente según la época del año. Para invierno se alcanzan oleajes máximos de 5 m de altura con dirección noreste, un periodo de 8.5 segundos y vientos sostenidos de 8 m/s; para primavera llegan olas 3.5 m cada 8 segundos del sureste, cuya velocidad oscila entre 7.5-9.8 m/s; en verano el oleaje arriba a la costa con alturas del orden de 12.5 m del este, con un periodo de 13 segundos y una velocidad de 7.5 m/s; finalmente, otoño está gobernado por las condiciones

más desfavorables, con trenes de onda de 13 metros aproximándose desde el este y con periodos de 13.5 segundos, asociados a velocidades de 9.5 m/s.

- Rosa de oleaje definida como el porcentaje de olas que arriban de un sector en particular.

Se presentan, adicionalmente, las rosas de energía normalizada y periodo pico, para la celda de la malla de cálculo estudiada.

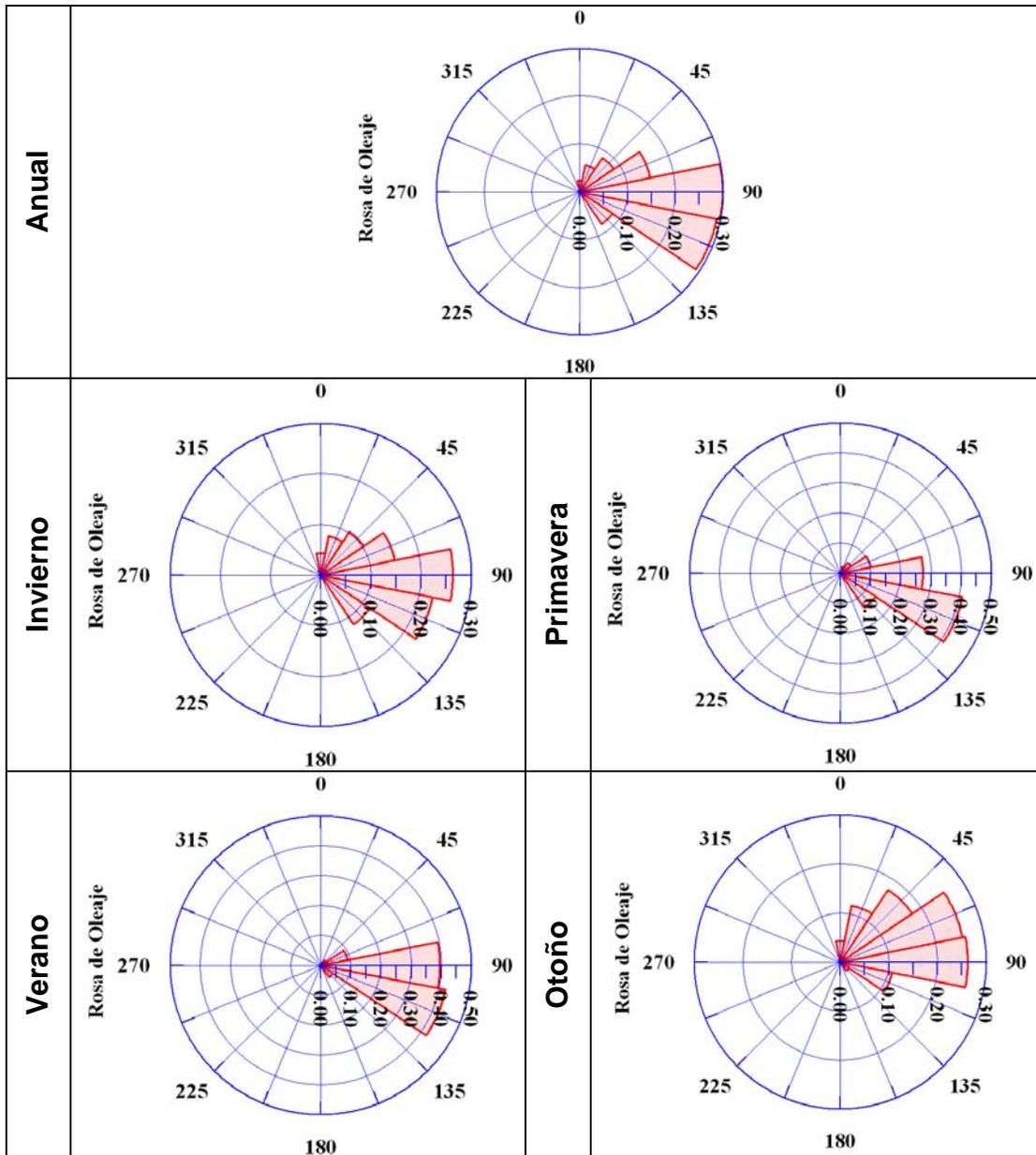


Figura 3.7 Rosas de oleaje

De los resultados se observa que la mayor parte del tiempo el oleaje procede del este y puede variar en función de la estación del año. Es de notar que en

primavera y verano hasta el 40% del oleaje proviene del este-sureste, mientras que en otoño cambian las condiciones del clima marino, así, el oleaje toma dirección este-noreste, para en invierno ser predominantemente del este (Figura 3.7).

- Régimen extremal de alturas de ola significativa caracterizado a través de la distribución Weibull para máximos.

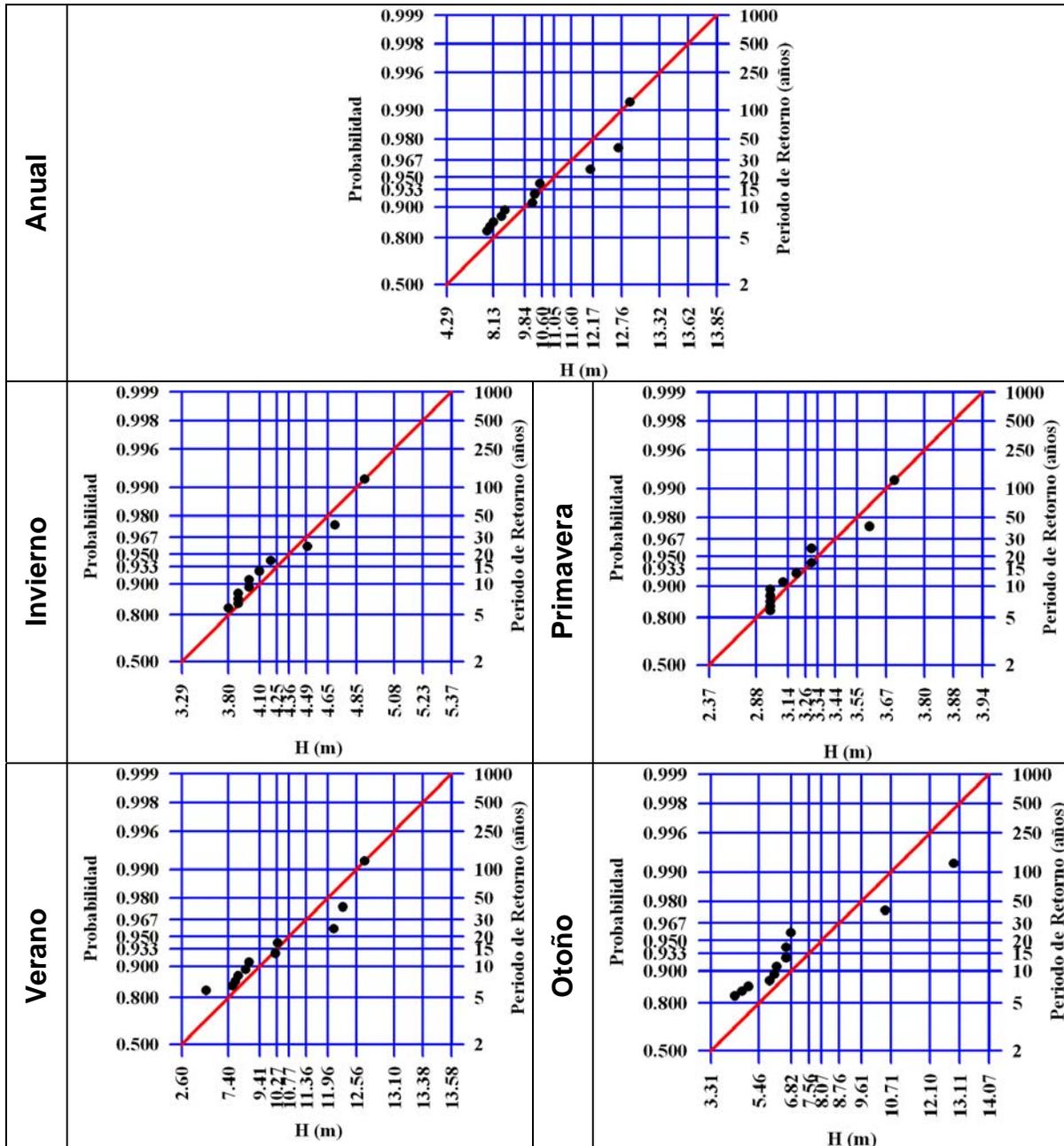


Figura 3.8 Ajuste de alturas de ola significativa caracterizado a través de la distribución Weibull

El estudio del régimen extremal finalmente se obtiene al extrapolar los datos de de la serie a una función matemática de distribución de probabilidad para diferentes periodos de retorno. Se encontró que de forma anual la mayor altura de ola que se puede presentar es aproximadamente de 12.8 metros con un periodo de retorno de 100 años (Figura 3.8), asociado a una probabilidad de 0.99, para un viento de 49.14 m/s, Figura 3.12. A nivel estacional se presenta una tendencia muy similar en el ajuste de los datos con algunas excepciones, por ejemplo, en otoño ocurre la mayor altura de ola, con un valor aproximado de 13.11 metros y gobernado por una magnitud de viento de 46.07 m/s. En virtud de que las épocas del invierno y primavera están por fuera del periodo de huracanes se manifiesta en los ajustes eventos de menor magnitud.

### 3.2.2 Análisis de vientos extremos y normales

Este contenido está compuesto por los siguientes cálculos:

- Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos (en 10 minutos) en una escala de cero a uno.

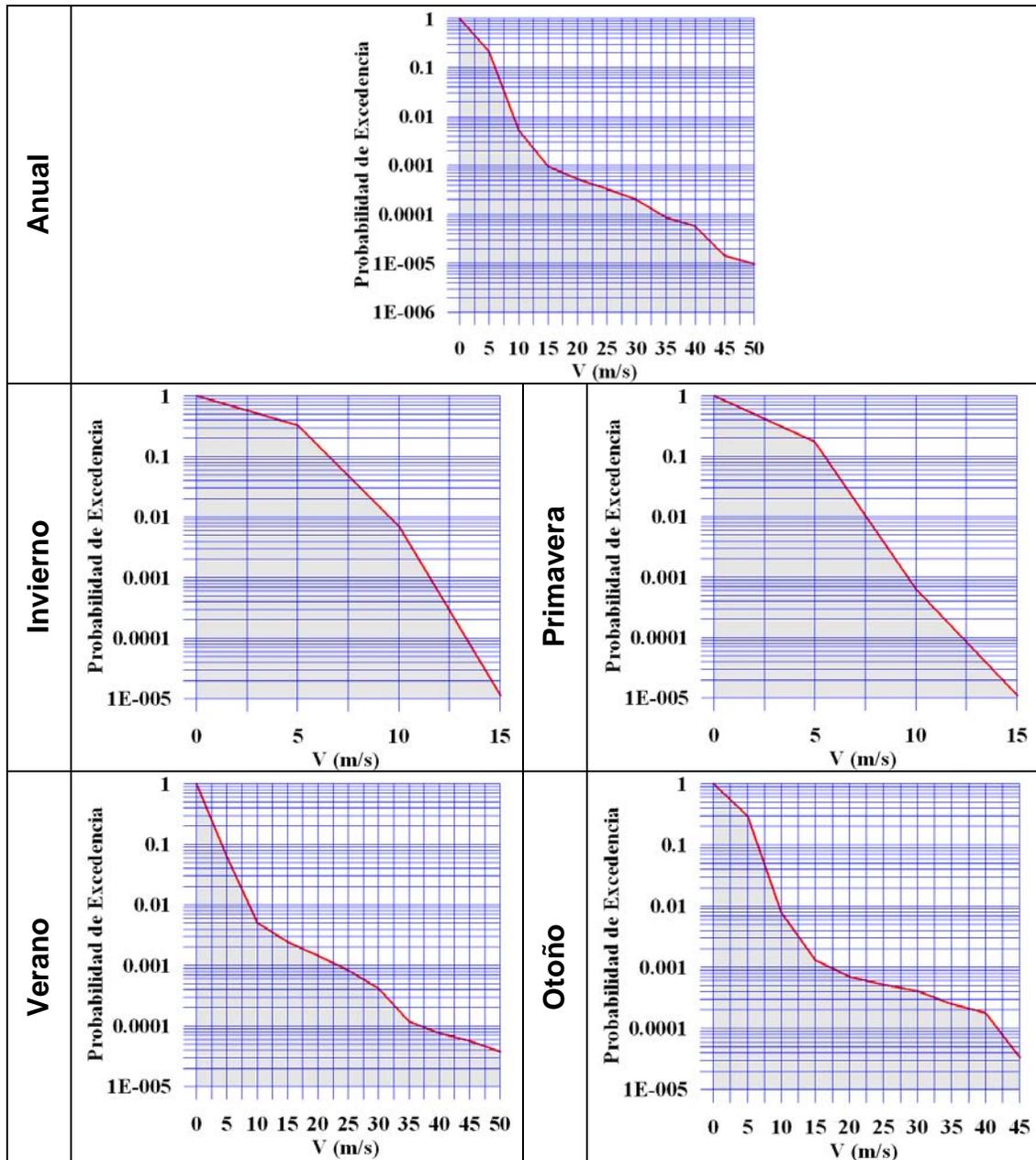


Figura 3.9 Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos

- Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia en porcentaje.

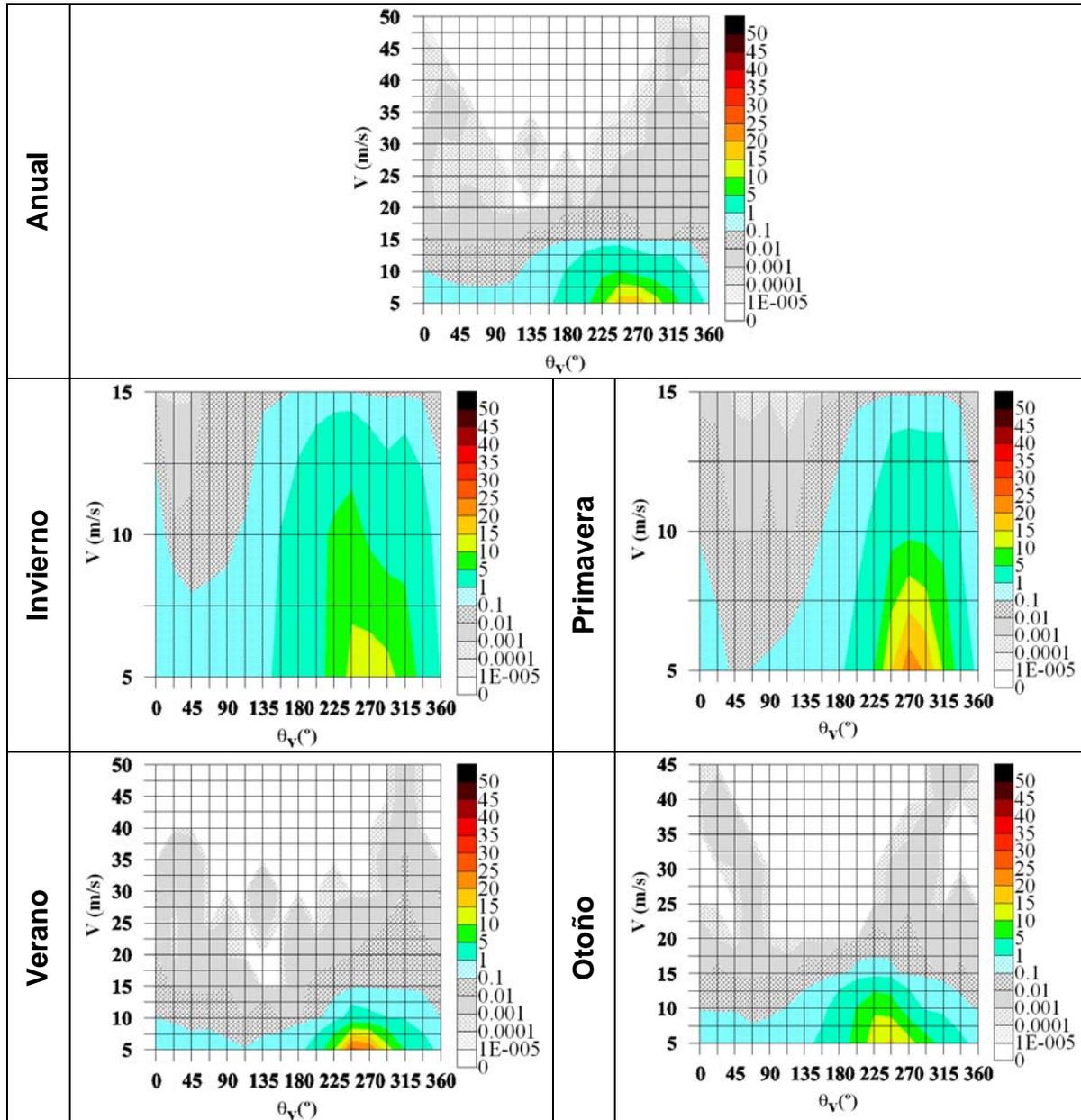


Figura 3.10 Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia

Continuando con el análisis, se observa que en invierno se originan vientos de 15m/s con frecuencias de aparición del 1% al 5% en dirección suroeste, pero cambia luego de trayectoria y se dan vientos sostenidos que marcan una ruta desde el sureste con la misma magnitud pero un porcentaje de aparición de 0.001%, Figura 3.10. En primavera se mantienen vientos de cuantía similar a los ocurridos en invierno, sin embargo difieren en la dirección de donde provienen pues la línea que marca su aparición se da en el oeste y noroeste con una periodicidad 1-5%. En verano se generan situaciones más adversas dado que

aparecen vientos de 50 m/s del noroeste con muy poca probabilidad de ocurrencia. Otoño está marcado con eventos de menor magnitud pero no por ello menos desfavorables; se tienen ráfagas de viento con velocidades de 45m/s desde el noreste.

En condiciones normales, las velocidades de viento más frecuentes están entre 6 y 7 m/s que para invierno, primavera y verano presentan aproximadamente la misma orientación, es decir, se producen vientos que aparecen del oeste o en su defecto del oeste-noroeste. En otoño los vientos varían un poco más hacia el norte.

En la Figura 3.10 las bandas de colores corresponden a valores de igual probabilidad de ocurrencia de altura de ola, dirección del oleaje y viento, velocidad del viento sostenido y periodo combinados. Se puede observar que para alturas de ola pequeñas la distribución de periodos de oleaje es algo amplia, pero esta se vuelve más estrecha conforme aumenta la altura de ola. La energía se agrupa alrededor del periodo medio y disminuye hacia los extremos de bajos y altos periodos.

- Rosa de vientos (en 10 minutos).

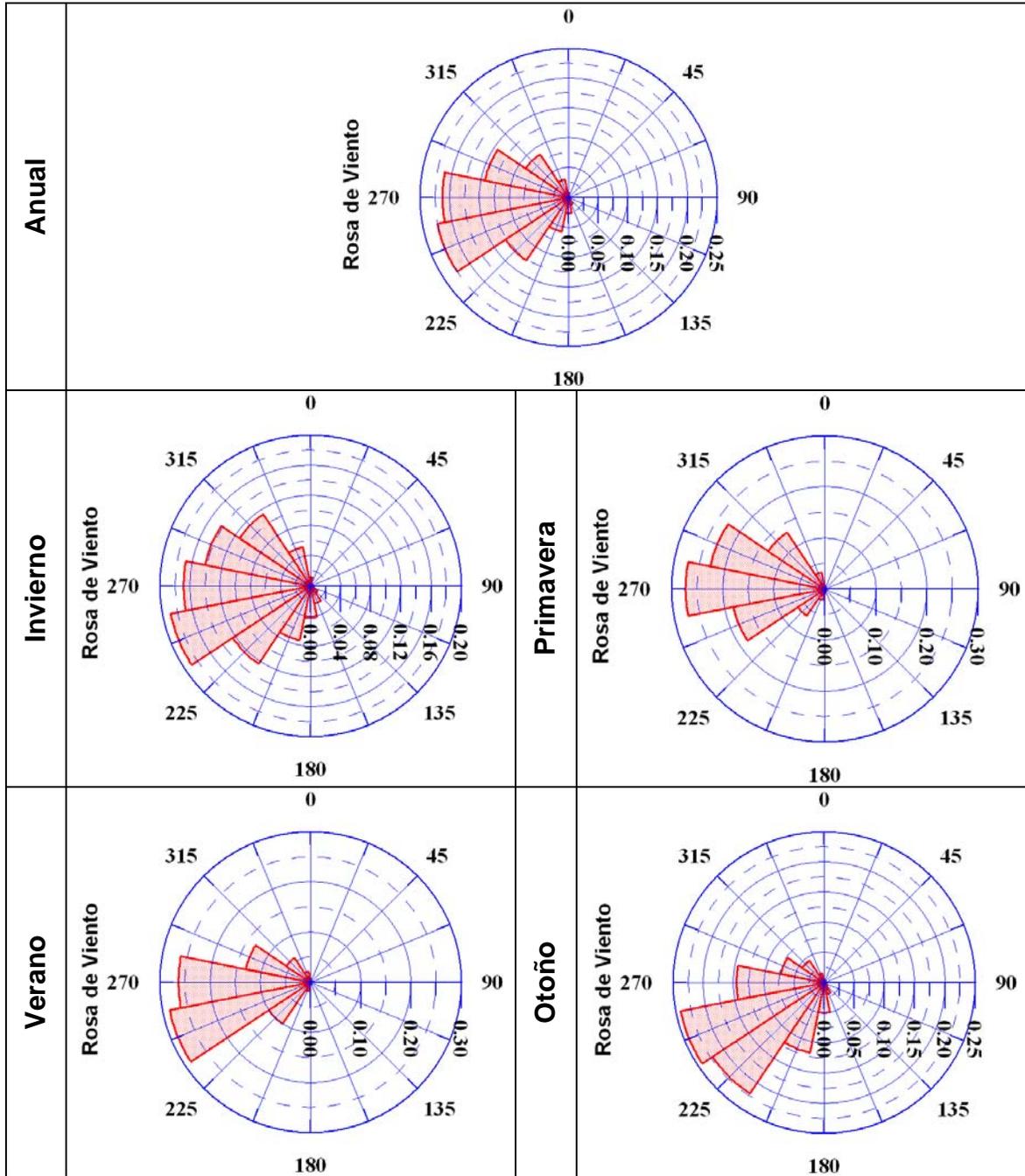


Figura 3.11 Rosa de vientos

En referencia al viento sostenido, las direcciones predominantes son del oeste-suroeste con excepción de la primavera, pues la dirección dominante es el oeste (Figura 3.11).

- Régimen extremal de velocidades de vientos sostenidos (en 10 minutos) caracterizado a través de la distribución de Weibull para máximos.

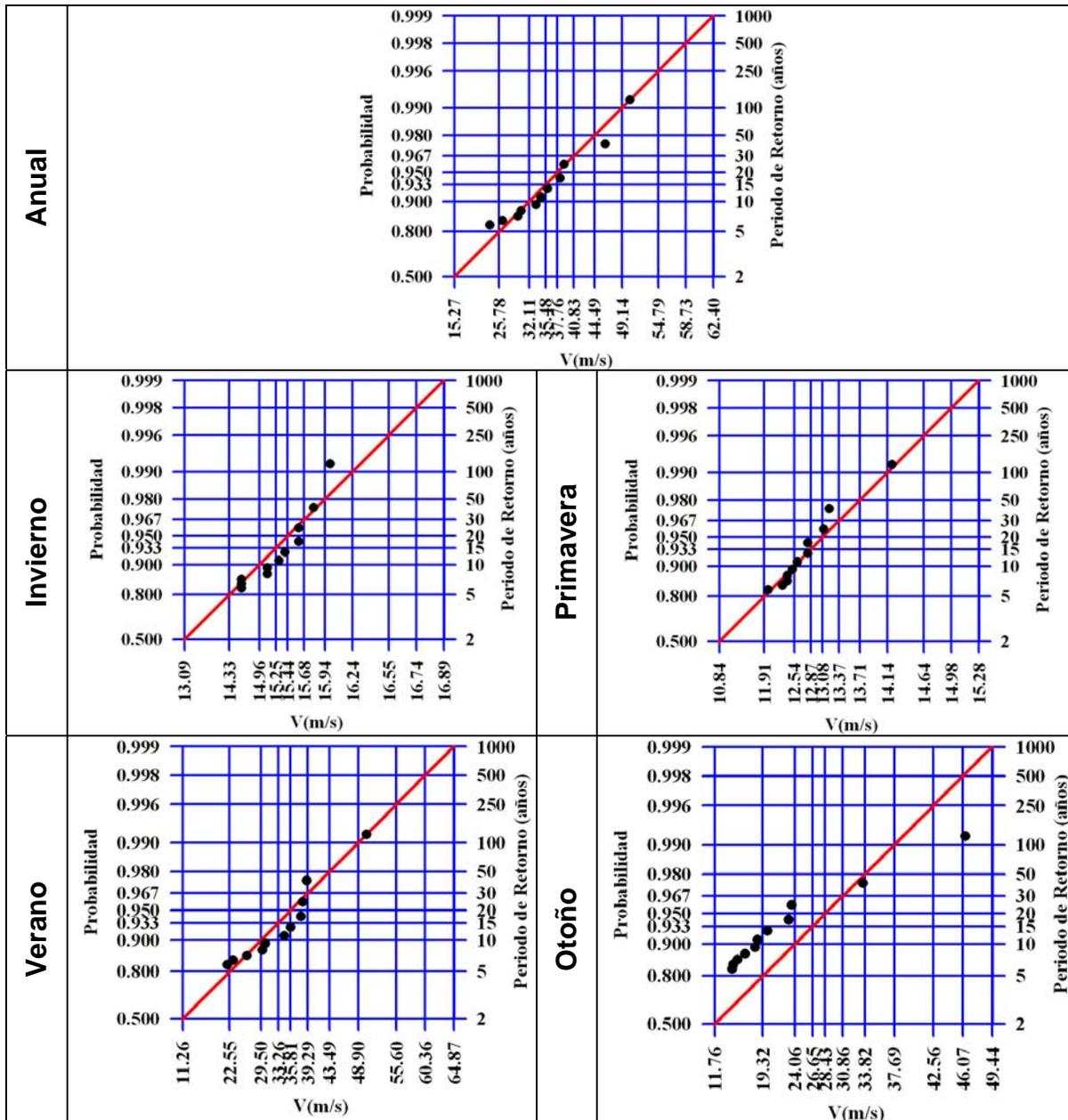


Figura 3.12 Ajuste de velocidad de viento sostenido (en 10 minutos) caracterizado a través de la distribución de Weibull para máximos

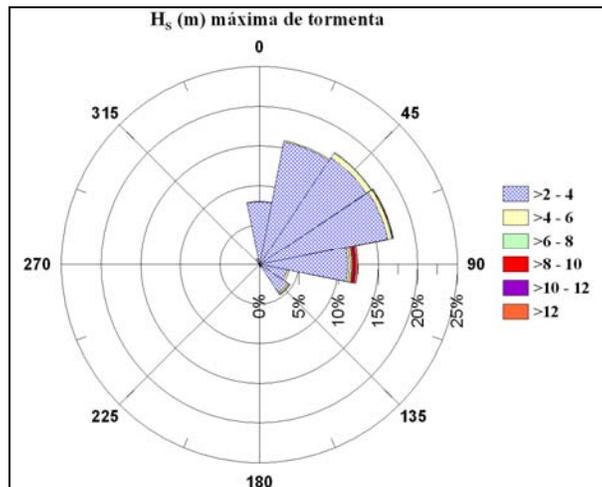
La mayor velocidad obtenida en el análisis extremal se presenta en verano (51m/s aproximadamente), época en la que ocurren los eventos ciclónicos y perdura hasta la terminación de la estación otoño. Esto indica que los tiempos donde se tienen las condiciones menos adversas son invierno y primavera y donde es posible realizar diversas operaciones relacionadas con las actividades marítimas.

Es importante señalar que el oleaje no presenta una relación lineal con el viento, pues como se observa, la altura de ola de 13.11 m tiene una velocidad de viento mucho menor de la calculada para el verano, asociada a una altura de 12.5 m. Esto se debe en primera instancia a que en la zona de generación los vientos llegan con diferentes direcciones; en segundo lugar, es muy importante tener en cuenta el tiempo de exposición al que está sometido el oleaje en la zona de generación. Estas dos variables son las que juegan un papel fundamental en la magnitud del evento y por lo tanto es posible que para alturas de ola mayores se tengan menores valores de velocidad del viento dado que el tiempo de exposición pudo haber sido mayor.

### 3.2.3 Análisis de tormentas

Este estudio tiene como alcances los siguientes resultados:

- Rosa de altura de ola significativa calculada energéticamente por tormenta.



Se observa que las alturas de ola significativa máximas provienen primordialmente del norte, las cuales son alcanzadas para 4 y 6 días de tormenta. Este resultado es importante para una estructura marítima en una localidad costera específica, pues se hace necesario conocer la incidencia de los temporales máximos que arribarán a la costa y que afectarán la obra durante las diferentes fases de construcción y operación.

- Rosa de energía normalizada calculada energéticamente por tormenta.

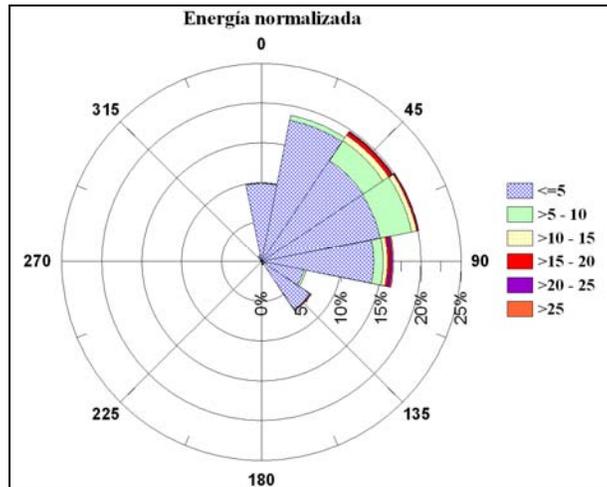


Figura 3.14 Rosa de energía normalizada

Con el objetivo de caracterizar las zonas que presentan los eventos con mayor componente energética, se presenta, en la Figura 3.14 la rosa de energía normalizada. En ella se observan eventos con duración menor a 5 días en buena parte del año y con dirección predominante del norte. Mientras que las tormentas de 15 a 20 días de duración inciden principalmente del noreste.

La importancia de este análisis consiste en localizar los puntos de la costa con mayor contenido energético, ya que los daños que algunas tormentas ocasionan en las costas suelen depender, además de la intensidad, del tiempo que se mantengan las condiciones adversas frente a los litorales.

- Rosa de periodos de ola pico calculada energéticamente por tormenta.

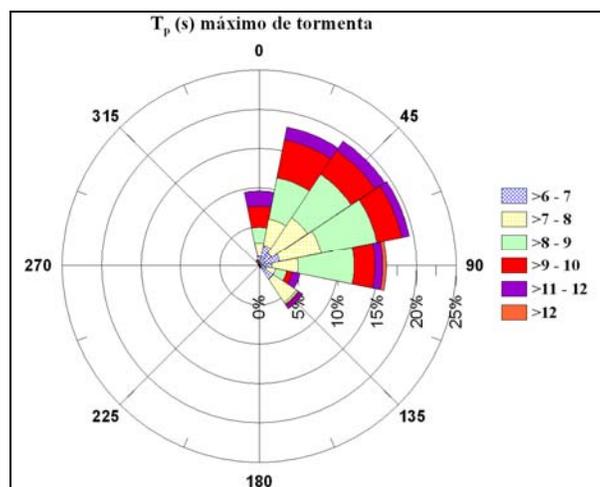


Figura 3.15 Rosa de periodos de ola pico

La rosa de periodos pico representa el valor del periodo asociado al evento máximo registrado por tormenta. A partir de este se puede observar el intervalo de tiempo de incidencia de los temporales y tratar de determinar el oleaje que arriba a la costa, efectuando un análisis combinado con el espectro de oleaje. Los máximos valores de incidencia del periodo son del 20% en las direcciones estenoreste, noreste y noroeste para un rango de 11 a 12 segundos. Las zonas de ocurrencia de los periodos están en concordancia con los fenómenos energéticos presentados en la rosa de energía normalizada (Figura 3.14) y con los máximos de altura significativa (Figura 3.13) ya que se relacionan directamente con la altura de ola significativa, Figura 3.15.

- Duración media de tormentas.

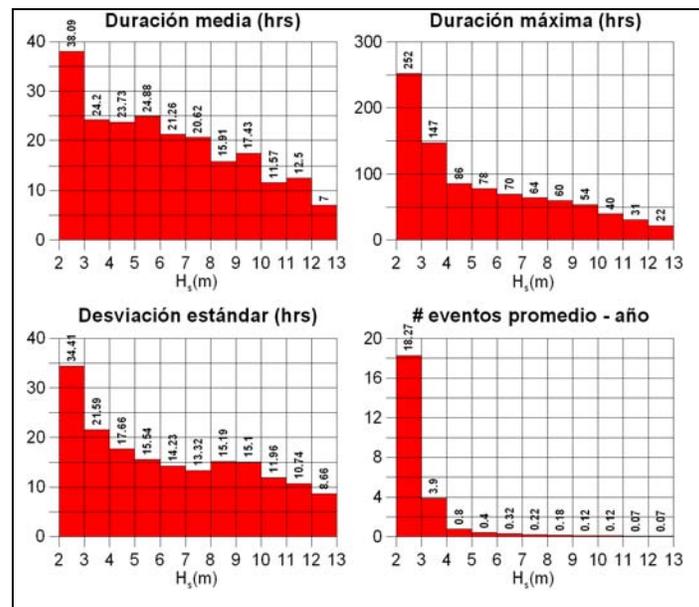


Figura 3.16 Duración media de tormentas

Cuando una estructura es afectada por un temporal, no sólo la magnitud del daño depende de la intensidad del fenómeno, también, el tiempo de exposición juega un papel importante en cuanto a la falla se refiere. Bajo esta justificación se expone la duración máxima y mínima de tormenta, así como el número de eventos que en promedio llegan a las costas de Cancún para diferentes valores de altura de ola, dada la importancia que representa conocer las condiciones medias de clima marítimo a la hora de elaborar un diseño, Figura 3.16. Para diferentes rangos que van desde 2 hasta 12 m de altura de ola, se determinó la duración. Se puede observar que las tormentas comprendidas entre 2 y 3 m de altura en promedio alcanzan duraciones de 38 horas. Las duraciones máximas están del orden de 252 horas y deben corresponder a eventos ciclónicos cuya duración puede ser de días y hasta semanas.

Adicionalmente, de acuerdo a los resultados se estima que en condiciones normales se presentan en promedio 18 eventos por año en la barra de Cancún.

- Presentación de alturas de ola significativa por mes en todo el registro.

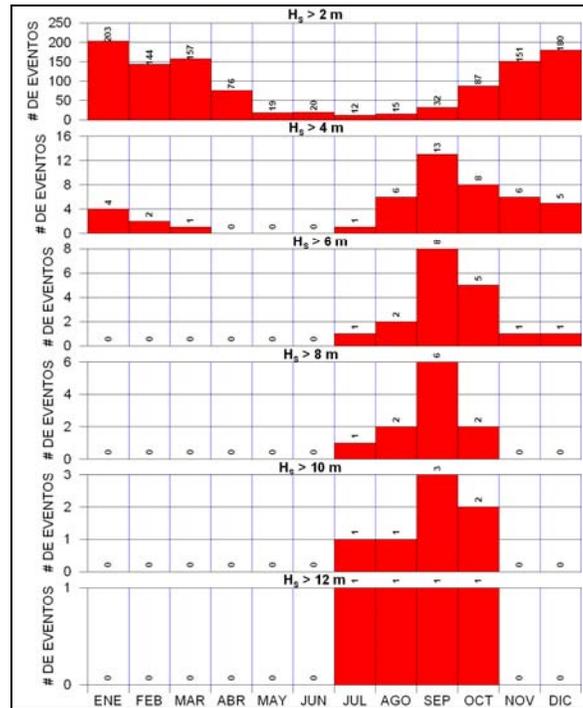


Figura 3.17 Alturas de ola significativa por mes en todo el registro

Una componente novedosa del estudio se debe al análisis de tormentas por valor específico de altura de ola asociado al número de ocurrencias a nivel mensual y anual, que permite la definición de umbrales temporales para la zona de Cancún.

Al efectuar esta búsqueda a escala mensual, se observa que los mayores eventos ocurren entre julio y octubre con valores de altura de ola mayores a 12 m. El mayor número se presenta en los tres primeros y tres últimos meses del año, con valores que oscilan entre 151 y 203 eventos por mes para alturas de ola mayores a dos metros, Figura 3.17.

El desarrollo de la revisión de la serie histórica, permitió cuantificar los eventos de mayor magnitud. Para la barra de Cancún se registró un evento extraordinario en el año 2005, que corresponde con la aparición del huracán Wilma, cuyas alturas de ola superaron los 12 m, Figura 3.19.

- Presentación de tormentas normalizadas por mes en todo el registro.

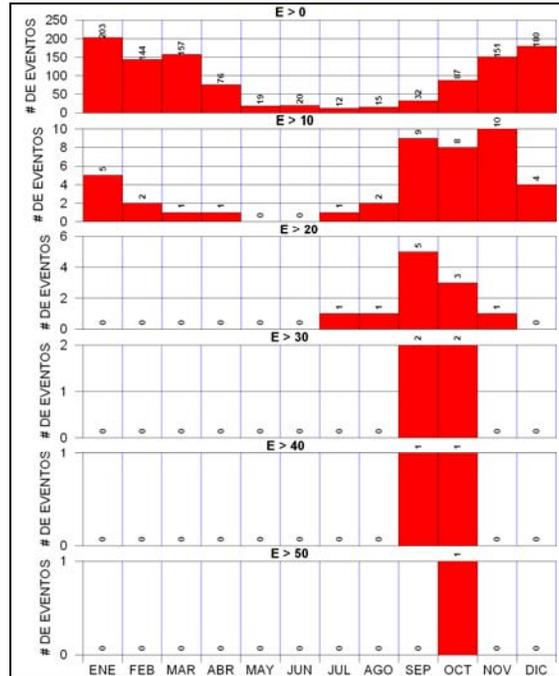


Figura 3.18 Tormentas normalizadas por mes en todo el registro

El procedimiento para este análisis es similar al cálculo del número de ocurrencias de alturas de ola a escala mensual. La diferencia radica en el cálculo de la energía a partir de las alturas significantes determinadas en el apartado anterior, y su objetivo está sustentado en el conocimiento de la energía que genera cada temporal.

Este tipo de análisis es muy importante porque permite realizar la investigación de las acciones históricas de mayor contenido energético. Precisamente se ejecutó el mismo tipo de análisis para determinar los periodos en que se presentan los estados de mar con mayor contenido activo, y este estudio mostró de manera directa la gran generación de energía asociada al ciclón tropical Wilma. Figura 3.18y Figura 3.20.

- Número de tormentas por rangos de altura de ola significativa y por año en todo el registro.

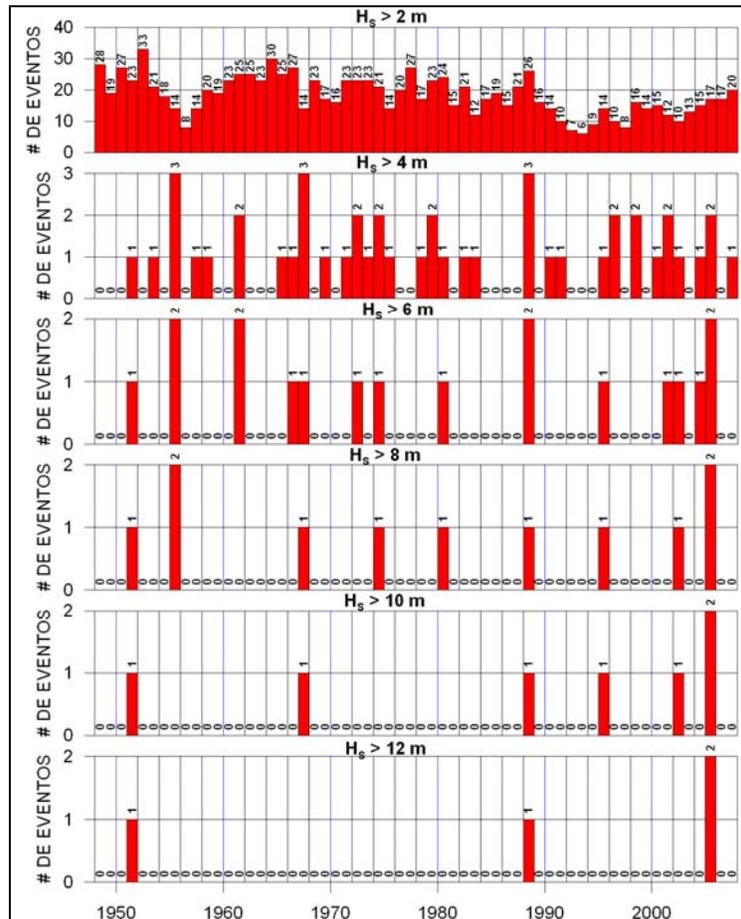


Figura 3.19 Alturas de ola significativa por año en todo el registro

En ingeniería se busca el análisis de los eventos anuales que en definitiva gobiernan en forma general el comportamiento de las todas las acciones que se originan en el año. Se calculó el número de eventos que se forman anualmente para rangos de 2 a 12 metros de altura de ola significativa. Se determinó que para las alturas de ola comprendidas entre 2 y 4 metros el año 1952 fue el más activo, con la presencia de 33 eventos, mientras que 1993 fue el año quizá de más calma pues solo se tienen 3 temporales por año en promedio. Al aumentar los rangos va disminuyendo el número de ocurrencias en cantidad pero los trenes de onda aumentan en magnitud, y como se mencionó en el apartado anterior, el año 2005 estuvo dominado por un evento de gran dimensión, asociado al huracán Wilma.

Este procedimiento permite establecer a futuro un análisis histórico de la serie de datos para determinar por ejemplo como va influyendo el cambio climático en el incremento de las alturas de ola, en el número de ocurrencias por año o en el aumento o disminución de la intensidad energética de los temporales. También para establecer los periodos óptimos para las actividades de navegación y construcción de obras marinas, por la presencia de menores condiciones de

agitación o la exposición de las estructuras a eventos más fuertes que las hagan inoperantes.

- Presentación de tormentas normalizadas por año en todo el registro.

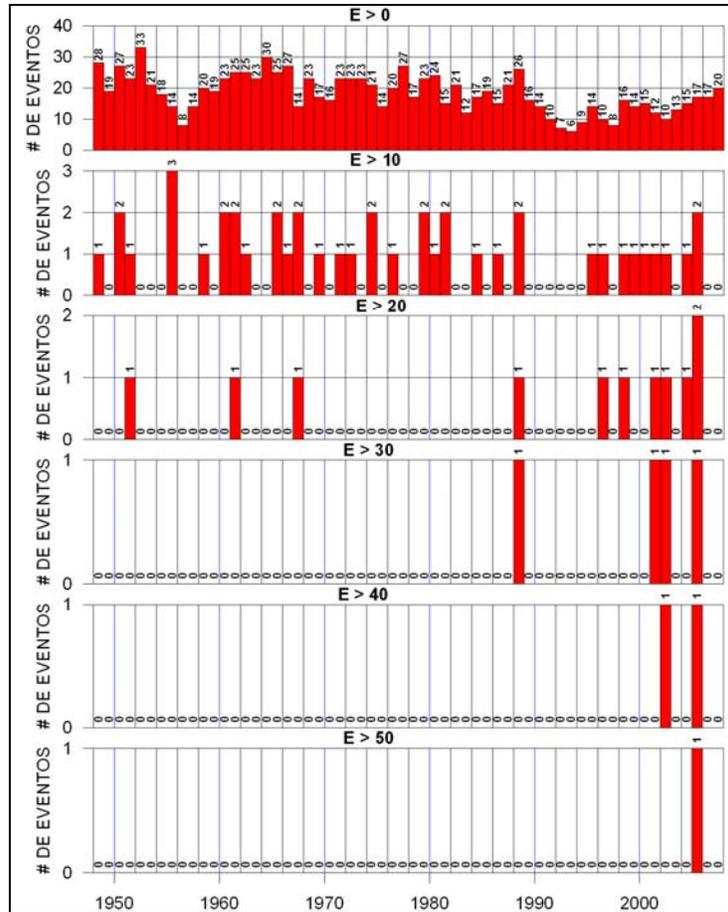


Figura 3.20 Tormentas normalizadas por año en todo el registro

Como se ha mencionado en el transcurso de este proyecto, la energía no es más que el reflejo de las condiciones generadas por los temporales que se propagan hacia la costa. Por lo tanto se construye este gráfico para observar la energía liberada por las tormentas que se obtuvieron en el análisis de alturas significantes en todo el registro.

## 4 ANÁLISIS REGIONAL

Tomando como base el procedimiento utilizado para determinar las propiedades estadísticas del oleaje en la celda frente a Cancún, desarrollado en el capítulo anterior. Se presenta de forma sintetizada el comportamiento del clima marítimo a nivel regional de las vertientes atlántica y pacífica mexicanas. El análisis integra el uso de los registros históricos de oleaje y viento de los 60 años que comprenden la base de datos. Los resultados se condensan en gráficos a nivel de mapas con los cuales se caracterizan los valores extremos, a través del uso del concepto de periodo de retorno y el comportamiento de las tormentas.

Los resultados de periodo de retorno que se consideraron fueron de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100, 500 y 1000 años tanto para altura de ola significativa como para velocidades de viento sostenido. Se incluyen los resultados del análisis considerando los datos que comprenden cada una de las estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño) y tomando en cuenta toda la base de datos.

Los cálculos del análisis de tormentas incluyen, de manera gráfica, la estadística sobre persistencia e intensidad del oleaje significativo para cada uno de los meses del año, así como el resumen general. Con el objeto de normalizar los resultados de las tormentas e incluir la duración de las mismas, se utilizó el valor de la energía de un estado de mar con duración de 24 horas y altura de ola significativa mayor de 2 m.

Los estudios de la interacción océano-atmósfera pueden realizarse bajo dos orientaciones muy bien definidas, una desde la óptica meteorológica y la otra desde una visión oceanográfica. En virtud que la orientación del presente trabajo es del tipo oceanográfico, se ha decidido primero presentar los resultados relativos a la altura de ola significativa, seguido por los de velocidades de viento y terminando con el análisis de tormentas.

### 4.1 Vertiente Atlántica

La malla de análisis para la vertiente atlántica es la misma que se describió en el capítulo anterior, delimitada en las latitudes  $15^{\circ}$  N a la  $31^{\circ}$  N y las longitudes  $80^{\circ}$  W a la  $98^{\circ}$  W, con una resolución de  $0.5^{\circ}$  por celda.

#### 4.1.1 Mapas de altura de ola significativa y viento sostenido para diferentes periodos de retorno

En este apartado se presentan los resultados relativos al análisis para cada una de las estaciones del año y se concluye el mismo presentando los resultados globales.

#### 4.1.1.1 Mapas de altura de ola significativa para diferentes periodos de retorno

Para la construcción de los mapas de altura de ola significativa asociados a diferentes periodos de retorno, se utilizó la técnica de mínimos cuadrados para ajustar los valores máximos anuales (globales o por estación climática) a la distribución de Weibull, tal y como fue descrito en el Capítulo 1. Los resultados se presentan en cinco paneles; de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se muestran los mapas asociados al invierno, primavera, verano, otoño y anual, respectivamente.

En la Figura 4.1 se presentan los resultados para alturas de ola significativa asociadas a un periodo de recurrencia de 5 años. Como puede observarse en esta ilustración, en invierno, los oleajes más intensos se presentan frente a las costas de Veracruz, con valores que alcanzan los 8 m. El oleaje es un poco menor en la parte central y norte del golfo, con alturas de ola de 5 m. Las zonas que presentan umbrales menos intensos están localizados en las proximidades de las costa de la Península de Yucatán, que dependiendo del segmento que se analice pueden variar entre los 2 y 4 m de altura de ola significativa. En lo general, observando el mapa correspondiente a la primavera, se ve que los oleajes son menos intensos a lo largo del litoral mexicano presentando valores que no superan los 4 m.

Durante el verano, cuando los estados de mar están gobernados por la presencia de ciclones tropicales, los valores de las alturas de ola significativa experimentan un aumento considerable, por ejemplo en el litoral de la península de Yucatán fluctúan alrededor de los 8 m y en la costa de Tamaulipas van desde los 4 a 8 m, sin embargo, en la parte más al sur de los estados de Veracruz y Tabasco las alturas de ola no superan los 3 m. Durante el otoño, cuando los frentes fríos inician su influencia, los valores de las alturas de ola disminuyen tanto en el litoral del caribe mexicano como en el de la costa de Campeche, mientras que en los estados de Tabasco y Veracruz aumentan considerablemente. Al integrar todas las estaciones climáticas del año, se puede observar que los oleajes más intensos se presentan en la costa del estado de Quintana Roo y la zona norte del estado de Yucatán, los oleajes menos intensos corresponden a la zona que va desde el norte del estado de Campeche hasta el sur del Estado de Tabasco y en el litoral de Veracruz y Tamaulipas experimentan valores relativamente altos.

Un aspecto que cabe resaltar de una simple observación de los mapas presentados en la Figura 4.1 es que los estados de mar no afectan de la misma forma la costa de la vertiente atlántica mexicana a lo largo del año, algunas zonas se ven más seriamente afectadas en verano, otras en el otoño y unas cuantas durante el invierno, siendo común estados de mar con intensidad muy inferior durante la primavera.

En el anexo A, de la Figura A1 a la Figura A18 se presentan los mapas asociados a los periodos de retorno de 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100, 500 y 1000 años,

respectivamente. En estas cartas se puede observar que durante el invierno la región ubicada frente a las costas del estado de Veracruz es donde se presentan los valores más intensos de altura de ola significativa, mientras que la zona costera de la Península de Yucatán es la que se ve menos afectada por estados de mar con alturas de ola muy grandes. Primavera es la estación del año con las mejores condiciones para las costas mexicanas ya que las alturas de ola de los temporales no superan los 6 m, con excepción de la costa de Louisiana donde se genera una región con alturas de ola muy intensas.

Definitivamente el periodo que ostenta las circunstancias más fuertes es verano, particularmente frente a Tamaulipas, Yucatán y Quintana Roo para periodos bajos, sin embargo se observa que para periodos de retorno altos, todo el golfo está sometido a eventos máximos cuyas magnitudes superan los 12 m de altura de ola y prácticamente se puede definir por inspección visual las trayectorias que han seguido los huracanes a lo largo de la historia.

Otoño no se puede comparar en términos de magnitud contra la estación de verano pero si se puede aseverar que por la influencia de los vientos que llegan en esta época tiene temporales más fuertes que invierno y primavera; sin embargo, se genera un cambio en la distribución de los máximos temporales al cotejarlos con verano pues en esta época las costas de Veracruz, Yucatán y Quintana Roo solo son las zonas más críticas.

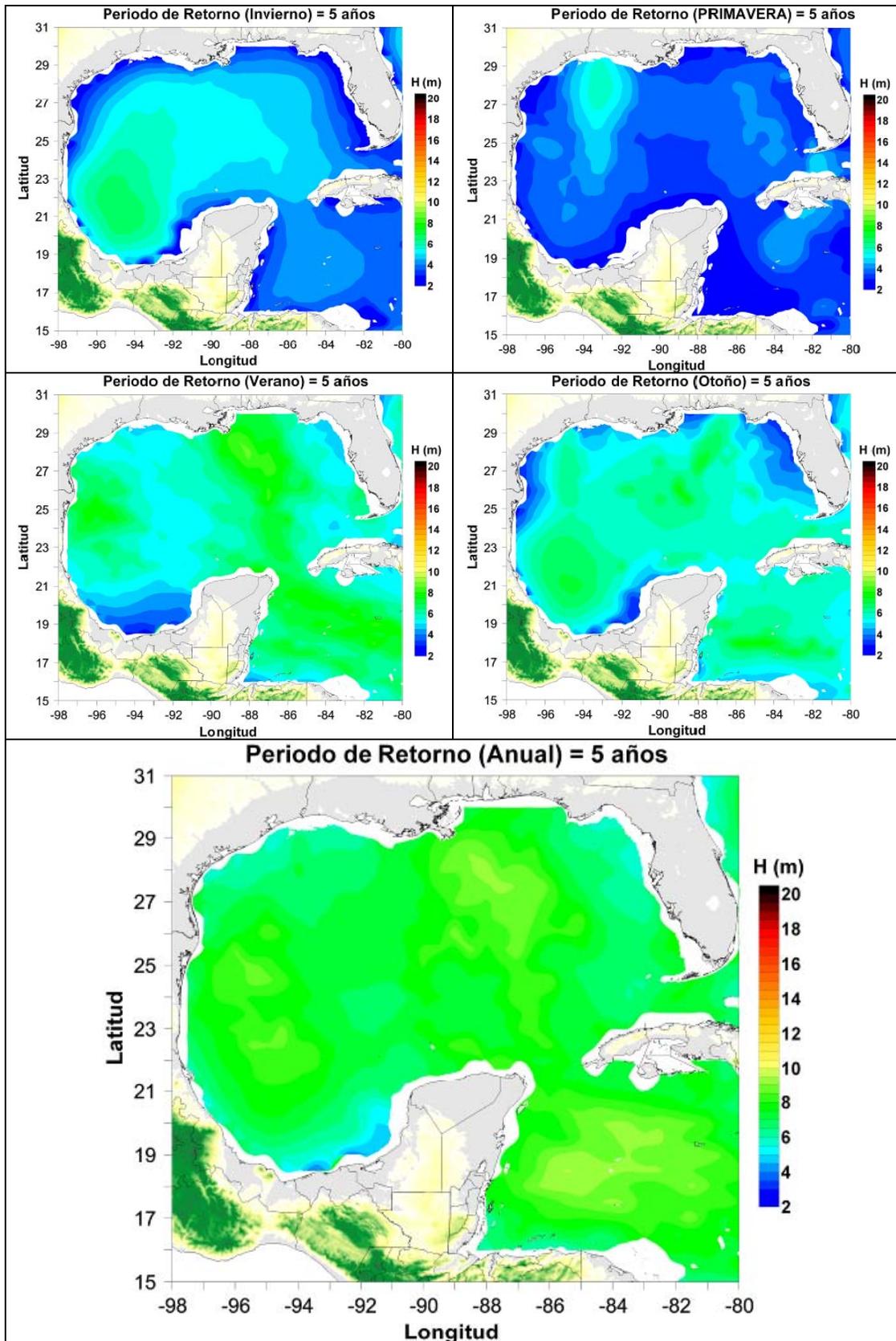


Figura 4.1 Mapas de periodo de retorno de 5 años de altura de ola en el Golfo de México

#### 4.1.1.2 Mapas de viento sostenido por estaciones del año

Los mapas de viento se construyeron de igual forma que los mapas de oleaje, seleccionando los ajustes con igual periodo de retorno. Los resultados obtenidos guardan gran similitud con la distribución espacial de las alturas de ola, dado que el viento es elemento forzador para la generación del último.

Las velocidades alcanzadas por los vientos están entre 25 y 275 km/h en todo el registro. En invierno los máximos valores de la velocidad del viento para un periodo de retorno de 5 años, son de 65 km/h en general para el golfo y el caribe de México, pero existe una franja que limita con el continente desde Texas hasta Veracruz con valores del viento ligeramente mayores, esto es, vientos de 75 km/h. Los menores datos calculados pueden presentarse para en las costas de Tabasco y Campeche, con resultados de 25 km/h, Figura 4.2. Para la llegada de la primavera los vientos máximos se dirigen hacia el norte del golfo con ráfagas de 80 km/h que llegan a las costas de Texas y Louisiana en Estados Unidos. Las condiciones de viento reinantes están en el orden de los 55 km/h para el golfo y para el caribe de 37 km/h, aunque se tienen diferencias con la parte sur de Cuba, donde los vientos alcanzan velocidades de 62 km/h.

Como es de esperarse en verano se dan las condiciones más críticas gracias a la aparición de los eventos ciclónicos. En general, se tienen unas condiciones de viento dominantes en toda el área para este periodo del año, no obstante, se tienen puntos específicos donde hay aumentos con cierta importancia y se llegan a tener velocidades de más de 100 km/h. Estas zonas son: La parte sur de estado de Quintana Roo, Belice, el norte de Veracruz y finalmente el estado de Alabama es donde se dan las condiciones más extremas, con velocidades entre 90 y 120 km/h. En otoño las magnitudes del viento se concentran en las mismas zonas que en verano, sin embargo disminuye la intensidad de los eventos, donde se reciben vientos de 75 km/h en condiciones normales y para los máximos se tienen localidades expuestas a tormentas de 100 km/h. Los mínimos valores del viento están distribuidos de forma similar a la presentada por las estaciones anteriores, ubicadas en las proximidades de las costas de Tabasco y Campeche, con ráfagas de viento de 38 km/h.

De la Figura A10 a la Figura A18 se exponen los mapas de viento para los diferentes periodos de retorno seleccionados y se puede concluir lo siguiente: En invierno las costas de Veracruz son las más afectadas por los fuertes vientos que allí se generan. En general en el golfo se dan velocidades del viento sostenido que van desde los 70 km/h hasta los 90 km/h. La zona que cubre desde Veracruz hasta el caribe mexicano están exenta de vientos fuertes y frecuentemente se generan allí temporales de 35 km/h, alcanzando quizás 50 km/h en los casos más desfavorables. A diferencia de la primera temporada, primavera está compuesta por condiciones de calma y no se observan eventos que constituyan mucho riesgo para las costas, con excepción de las playas de Tamaulipas que puede presentar algunos aumentos en las velocidades del viento para periodos de retorno muy

altos. Verano hace honor a la presencia de las tormentas tropicales que se generan en estos meses del año, impactando las playas de Cancún, Yucatán y Tamaulipas con vientos de hasta 275 km/h y presenta siempre el mismo patrón en las trayectorias en todas las estimaciones que se realizaron en cuanto al tiempo de aparición se refiere. En otoño los mayores vientos se dan en diferentes lugares a la misma vez de forma aleatoria, sin embargo solo las costas de Cancún y Yucatán son las que sienten más la presencia de los máximos temporales que se presentan en esta época, mientras que Campeche y Tabasco son los puntos más tranquilos en todo el año, pues debido a las condiciones orográficas los vientos no alcanzan sus fronteras, entre otros factores.

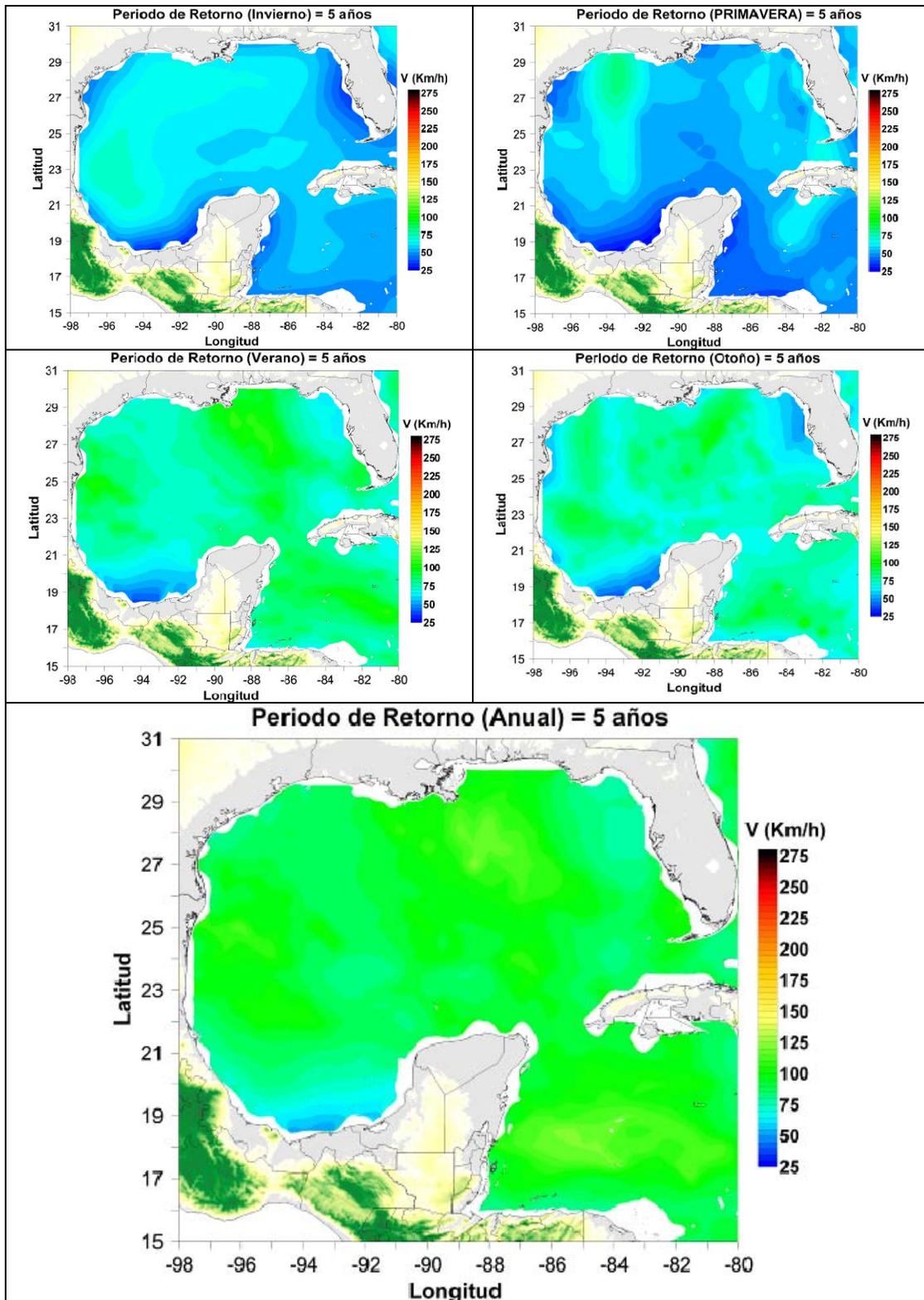


Figura 4.2 Mapas de periodo de retorno de 5 años de viento en el Golfo de México

A continuación se presentan los mapas que se generaron del análisis de tormentas con base en la metodología expuesta en el capítulo 1 y aplicada para el análisis puntual de Cancún en el capítulo 3. Se desea determinar la persistencia y número de fenómenos océano-meteorológicos que afectaron las costas mexicanas en los 60 años más recientes. Para ello se estableció un valor umbral constante de 2 m de altura de ola y la energía de un estado de mar en 24 horas. Con base en éstos parámetros se seleccionan las tormentas para llevar a cabo los análisis que se mencionan en este apartado, donde los resultados se exponen en mapas de oleaje y energía incluidos entre la Figura 4.3 y la Figura 4.13. El análisis se efectuó en la malla de análisis establecida para el Atlántico y los estudios están basados en escalas de tiempo mensual y anual.

El estudio de las tormentas está definido por el análisis de toda la serie histórica del registro de 60 años, además los mapas del número medio mensual de energía normalizada, duración media y máxima histórica de tormentas, los valores máximos históricos, el número medio y máximo anual de tormentas y el número medio y máximo anual de tormentas con energía normalizada.

#### **4.1.1.3 Resumen Regional del análisis por tormenta**

El análisis del registro completo corresponde a la selección de las tormentas para umbrales de 2, 4, 6, 8, 10, y 12 metros de altura de ola. El procesamiento de datos permite determinar la cantidad de temporales que se presentan a nivel mensual, a la vez que se tiene la opción de observar la distribución espacial del número de ocurrencias.

La Figura 4.3 muestra que históricamente los meses de noviembre a marzo ostentan la mayor actividad en cuanto a ocurrencia de eventos con alturas de ola mayores de 2 m. En enero se presenta la mayor cantidad de fenómenos localizados frente a los estados de Tamaulipas, Veracruz y frente a Cancún. La zona donde se presenta la menor cantidad de ocurrencias es el sur de Quintana Roo, además de los estados de Tabasco y Campeche. En marzo aparecen en el golfo 7 tormentas, constituyéndose como el máximo de número de incidencias en comparación con otros meses. Estos temporales se ubican fundamentalmente en Tamaulipas y Cancún, dado que en el resto del país las costas se encuentran en condiciones normales. Julio presenta condiciones de calma, dado que se dan en toda la vertiente Atlántica pocos temporales que superan 2 m de altura de ola.

Si se divide el golfo en cuadrantes de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, el cuadro de la parte superior izquierda que geográficamente está asociado a las costas que se extienden desde Veracruz hasta Nueva Orleans, es el que contempla los eventos de mayor incidencia y magnitud. Esto refleja la gran actividad que presentan las aguas en este sector del golfo y brinda un aporte significativo a la hora de realizar estudios que impliquen la construcción y operación de obras marinas, que están condicionadas a las épocas del año donde

se tienen las condiciones más adecuadas en cuanto a incidencia a la temporales se refiere.

Para cada una de las tormentas del análisis anterior se calculó la energía normalizada asociada y se clasificaron en rangos de 10, 20, 30, 40, y 50 unidades de energía normalizada. El comportamiento de las distribuciones energéticas debe ser similar al de las tormentas ya que la energía se calculó en función de la altura de ola. La diferencia entre ambos análisis estriba en que la caracterización energética, al tener asociada la duración de los eventos, puede ser de provecho en estudios de energía disponible en las costas, incluso para aprovechamiento de la misma.

En las Figuras de análisis energético, se puede observar que enero es un mes muy activo y los puntos de la malla que con mayor frecuencia se ven afectados por los temporales son Tamaulipas y Veracruz. En los meses siguientes la intensidad de los eventos varía muy poco, sin embargo las mayores cantidades de ocurrencias se van desplazando hacia el centro del golfo y para marzo el centro de este es el que exhibe las condiciones más intensas. Para el mes de abril la presencia de un número considerable de tormentas ya no es tan pronunciada dado que se aproxima la época de primavera y la incidencia de los frentes de viento es casi nula.

De acuerdo con la escala de magnitudes es posible discernir que en el Golfo de México los estados de Tamaulipas y parte de Veracruz son los que exhiben las condiciones energéticas más fuertes durante un periodo de tiempo comprendido entre los meses de noviembre a marzo (Figura 4.4) que corresponde a una época donde los frentes de viento tienen gran relevancia en las condiciones marinas; sin embargo, conforme termina la temporada de invierno la concentración de la energía se desplaza hacia el centro del golfo influenciada en este caso por un cambio en la dirección de los frentes fríos.

El estudio de la permanencia de las tormentas consiste en seleccionar para diferentes umbrales de altura de ola significativa las duraciones de cada tormenta y calcular a su vez la energía asociada del suceso. Los eventos de mayor duración se dan en el mar Caribe, cerca de las costas del sur de Cuba y corresponden a alturas de ola mayores de 2 m y con magnitudes de 500 horas. Les sigue en orden consecutivo los eventos que superan los 4m, ubicados frente a Yucatán, que posee una duración de 125 horas. A partir de las alturas que rebasan los 6m las permanencias se concentran en puntos cada vez más específicos, por ejemplo para  $H > 12m$ , la duración de la tormenta máxima solo alcanza 30 horas, Figura 4.5. Este procedimiento permite establecer que entre mayor es la magnitud de la tormenta su permanencia disminuye, concluyendo que no se cumple en todos los casos que la tormenta más grande puede llegar a ser la más nociva, pues en cuanto al análisis de tormentas se refiere, uno de los aspectos fundamentales es la persistencia del fenómeno y no su magnitud.

Las duraciones máximas que se presentan en las condiciones de oleaje reinantes se concentran básicamente en la región del caribe, llegando a tener hasta 40 horas de duración. Las tormentas dentro del golfo de México son del orden de 30 horas y se distribuyen uniformemente en todo su dominio. Los eventos mayores de 4 m son los que más se han presentado a lo largo de los 60 años para todo el litoral mexicano, y particularmente en las costas de Quintana Roo, Yucatán, Campeche y Veracruz se encuentran las tormentas de mayor persistencia. Las alturas de ola mayores a 12 m no son más que puntos dentro de la malla de análisis y pueden tener efectos poco dañinos por su corta duración. Este análisis permite concluir que a las costas de Quintana Roo es donde generalmente llegan los eventos de mayor duración, convirtiéndolas en la zona con las playas más vulnerables y el punto más susceptible de falla de las estructuras por las tormentas que allí arriban.

La duración de las tormentas más frecuentes en comparación con las máximas exhibe una tendencia muy similar, puesto que las mayores permanencias de los estados de mar ocurren en el estado de Quintana Roo y Tamaulipas. Se aprecia una diferencia en cuanto a la distribución de las mayores duraciones de los estados de mar, dado que para las condiciones climáticas medias son las alturas de ola mayores de 6 m las que presentan mayor persistencia con tormentas que pueden alcanzar hasta 30 horas de duración. Sin embargo este análisis muestra que las costas de la Riviera Maya, desde Cancún hasta Chetumal, están sometidas a las situaciones más difíciles sin importar la época del año o el umbral que se tome, Figura 4.6.

Para la energía máxima de tormentas se espera que manifieste un reflejo del comportamiento de las alturas de ola pues son una consecuencia de ésta. Sin embargo, si se analiza en detalle la Figura 4.7 se ve claramente que la energía expresa un comportamiento más uniforme y no tan local como el que se obtuvo con el análisis de los temporales. Ahora, sí existe una correspondencia en los puntos donde se obtienen las máximas duraciones asociadas a las alturas de ola significante. Estos mapas permiten observar que el punto de la malla de análisis donde se tienen las condiciones energéticas más grandes es el estado de Quintana Roo que puede alcanzar hasta 1000 horas de tormenta para energía mayores que 10 días de tormenta.

Las duraciones medias basadas en el análisis energético histórico sitúan a las costas de Tamaulipas y Veracruz con las situaciones más desfavorables con permanencias de 1500 horas, y son las máximas ocurridas para todo el Atlántico de México. En el Caribe se dan duraciones mucho menores y están acotadas a ocurrencias de 1500 horas para  $E > 0$ . Los resultados enseñan la constante presentada hasta ahora, que a medida que aumenta el valor del evento su duración disminuye. Esta exploración demuestra un comportamiento energéticamente homogéneo al referirlo a las duraciones de los temporales y la energía que liberan. Las costas del estado de Quintana Roo a pesar de no presentar unas condiciones muy desfavorables si pueden estar sometidos a eventos energéticos con duraciones considerables, Figura 4.8.

La Figura 4.9 permite señalar a las costas del estado de Quintana Roo como aquellas que durante los últimos 60 años han tenido las condiciones energéticas más críticas, pues parte de esta energía está asociada a los huracanes que anualmente afectan el litoral y son directamente los responsables en conjunto con otra serie de factores de los grandes problemas que a la fecha presenta la playa. Se tienen alturas históricas de hasta 15 m asociadas periodos de 16 segundos, que producen valores energéticos de hasta 90 días de tormenta. Este resultado es de vital importancia para establecer metodologías que permitan llegar a soluciones ingenieriles que permitan con el tiempo obtener una solución adecuada a los problemas actuales.

Finalmente a partir de la clasificación por año, se selecciona la ocurrencia eventos máximos y se determina adicionalmente el promedio de los eventos que suceden. Los resultados del análisis máximo (Figura 4.10 y Figura 4.12) demuestran que el mayor número de eventos acontece para fenómenos energéticos relativamente bajos, ya que se clasifican dentro del valor límite entre 0 y 10 horas. Estos se localizan en la parte superior del golfo de México siguiendo la constante de los análisis energéticos anteriores, donde la distribución de la energía se presenta frente a las localidades de Texas, Tamaulipas y Veracruz. La ocurrencia va disminuyendo y se localiza en pequeñas zonas conforme aumentan los valores límites de energía. Los mayores valores obtenidos se confinan en Quintana Roo y Belice.

En cuanto al número medio de tormentas con energía normalizada (Figura 4.13) los eventos que más se repiten son aquellos que superan los 2 m, dado que para las alturas de ola de mayor magnitud se tiene muy poca ocurrencia en todas las costas mexicanas. Estos estados de mar se localizan frente a Tamaulipas, que en resumen, es sitio del golfo de México que tiene la mayor presencia de estados de mar.

## 4.1.2 Análisis de tormentas

### 4.1.2.1 Análisis de tormentas de 1948 - 2007

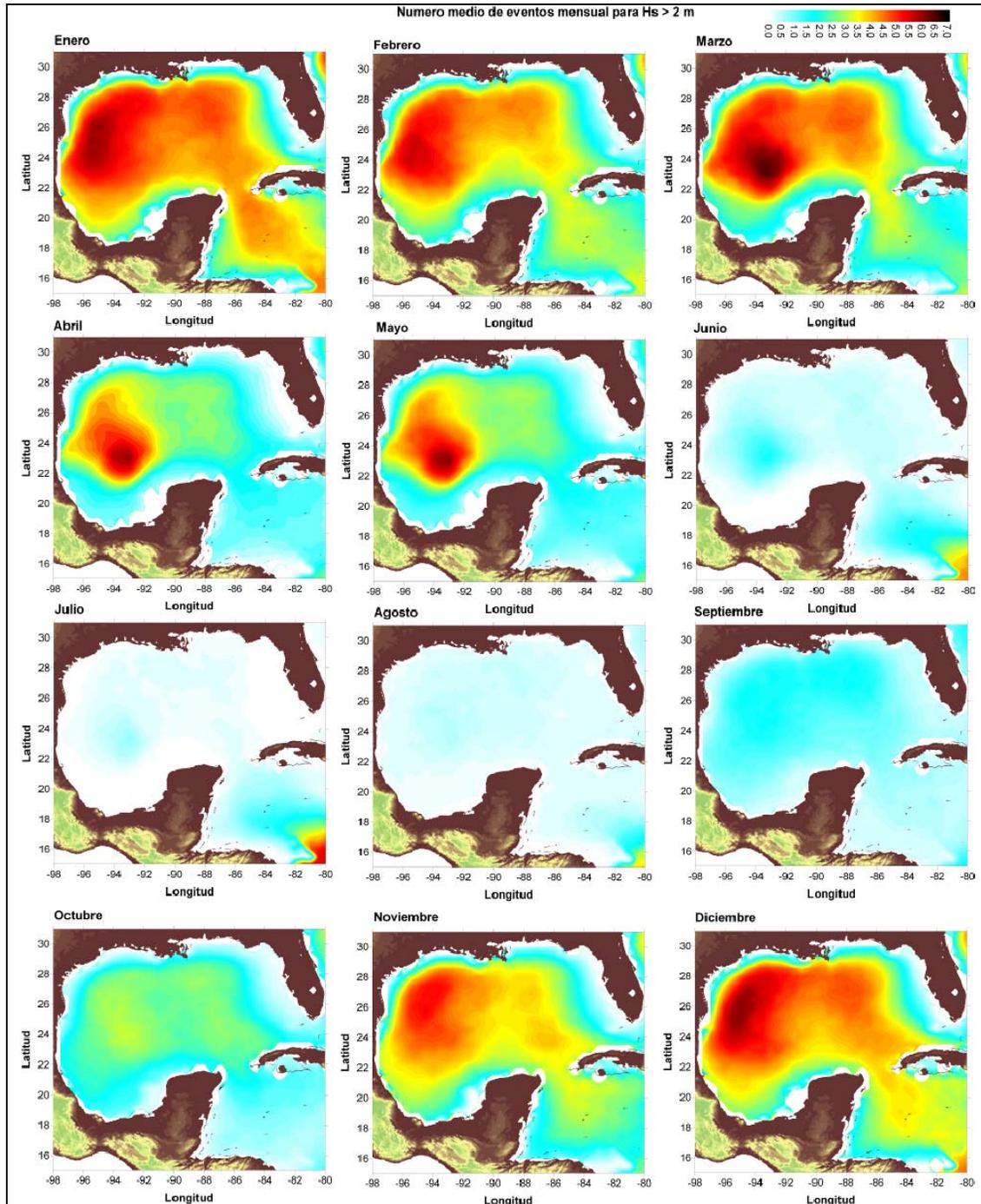


Figura 4.3 Análisis de tormentas de 1948 – 2007 para la vertiente atlántica

### 4.1.2.2 Número medio mensual de tormentas normalizadas

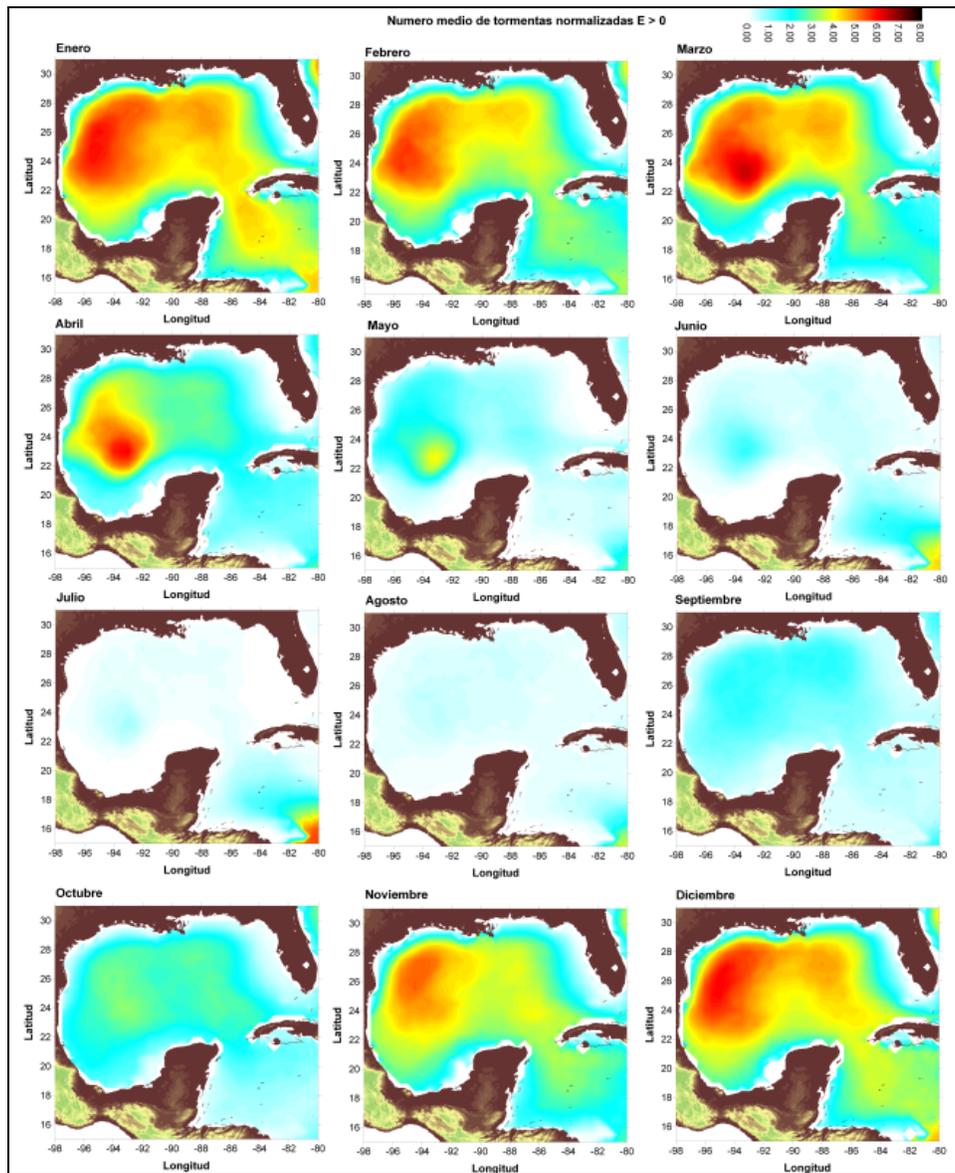


Figura 4.4 Número medio mensual de tormentas normalizadas, vertiente atlántica

### 4.1.2.3 Duración media y máxima histórica de tormentas

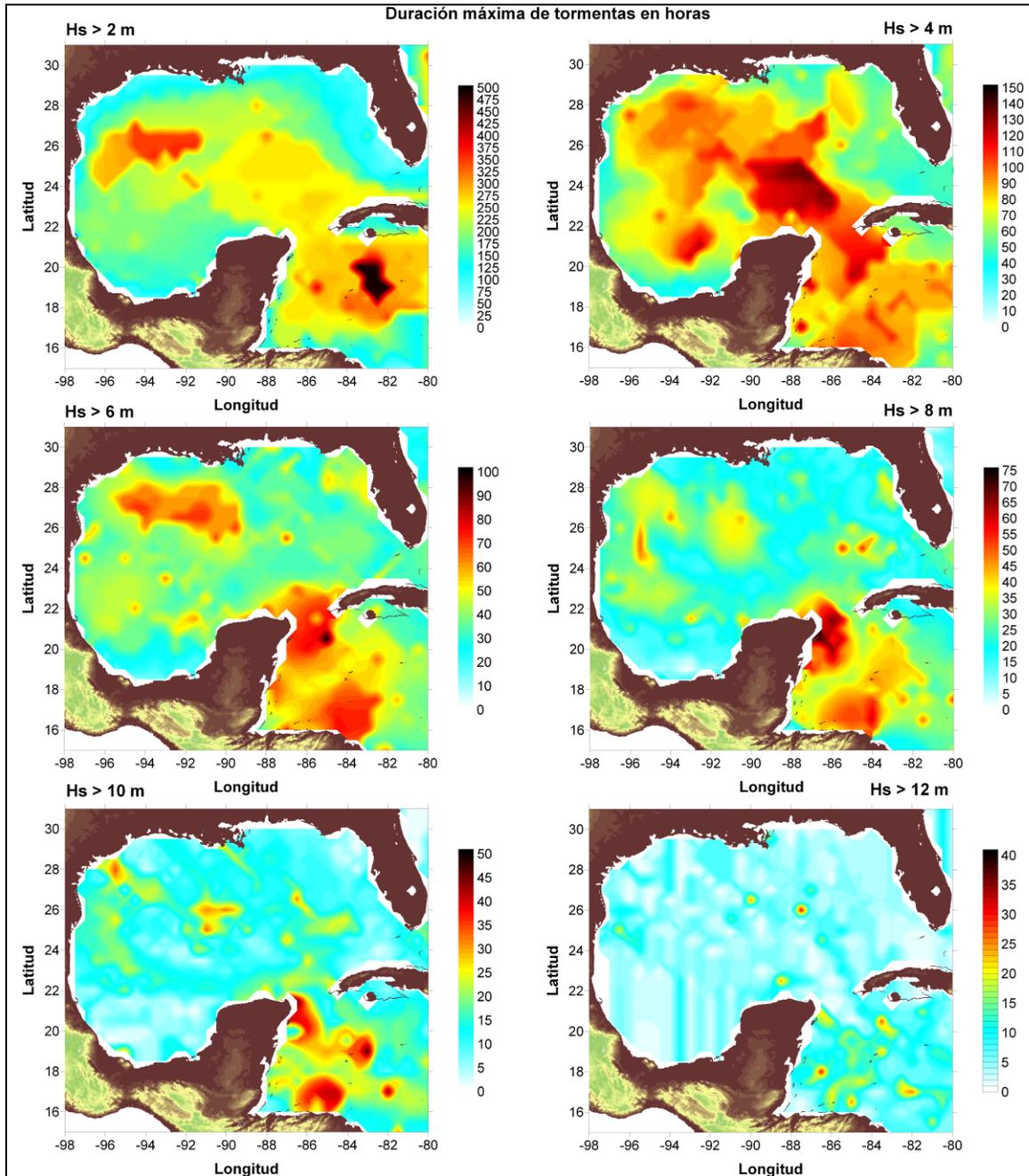
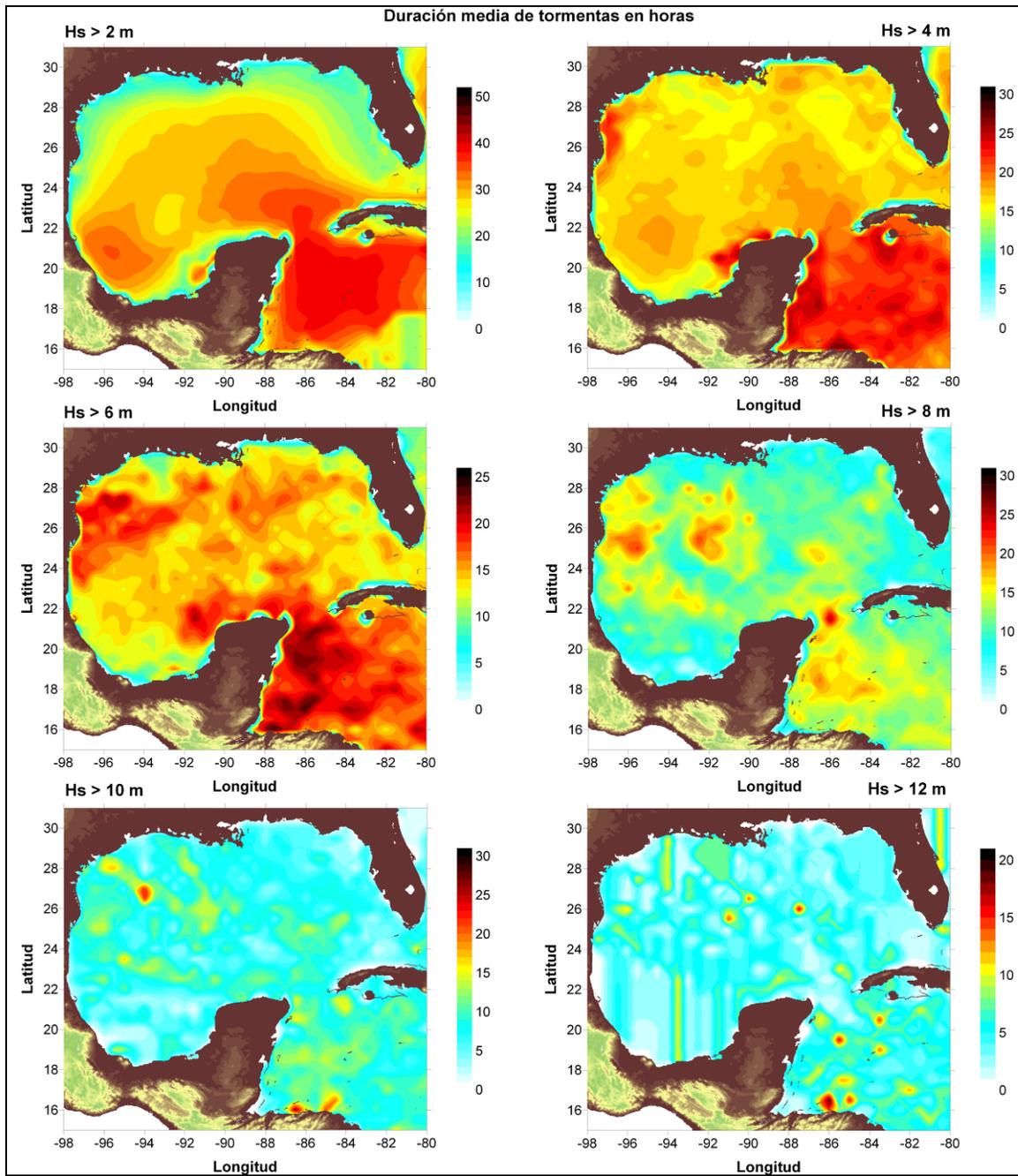
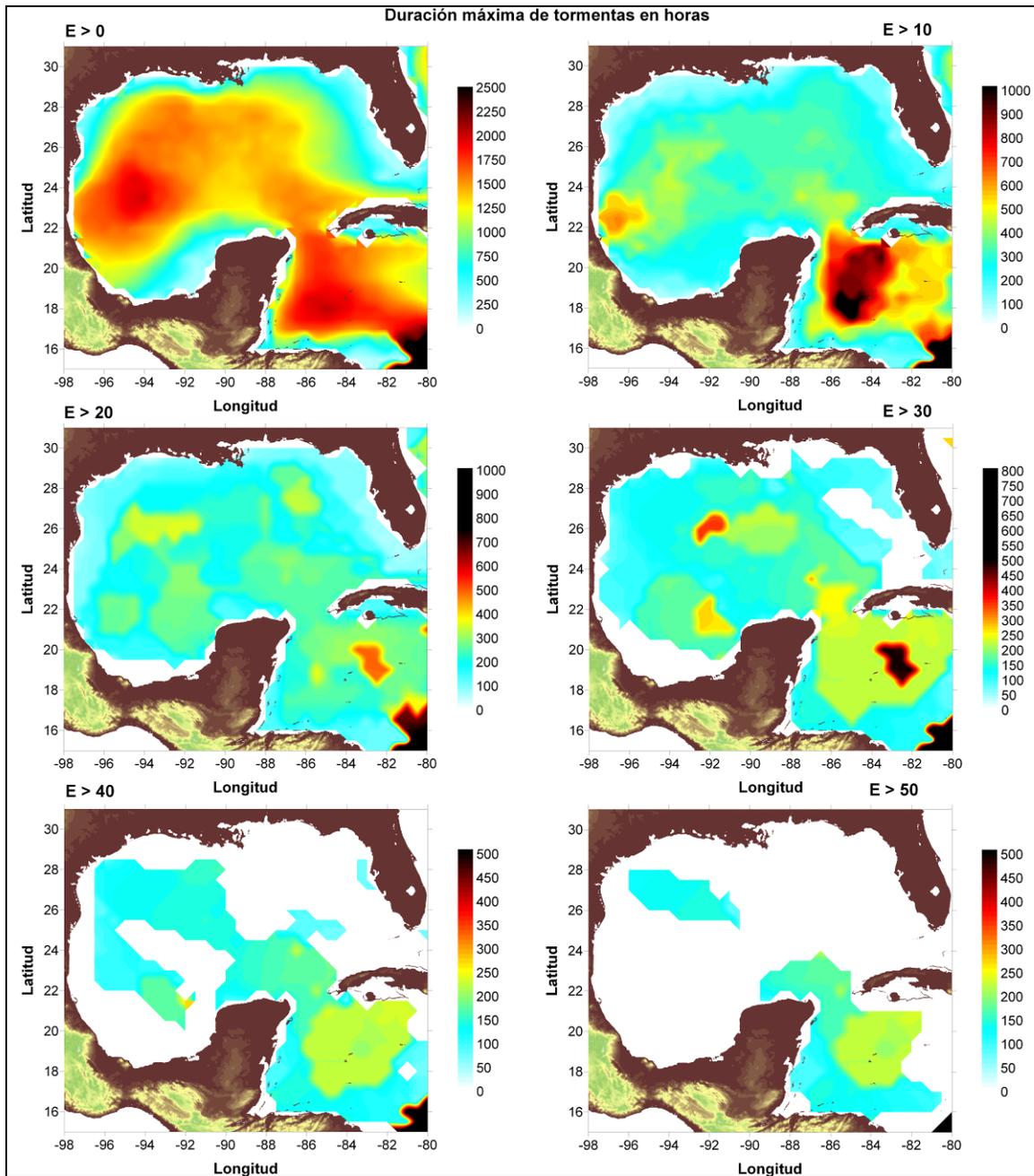


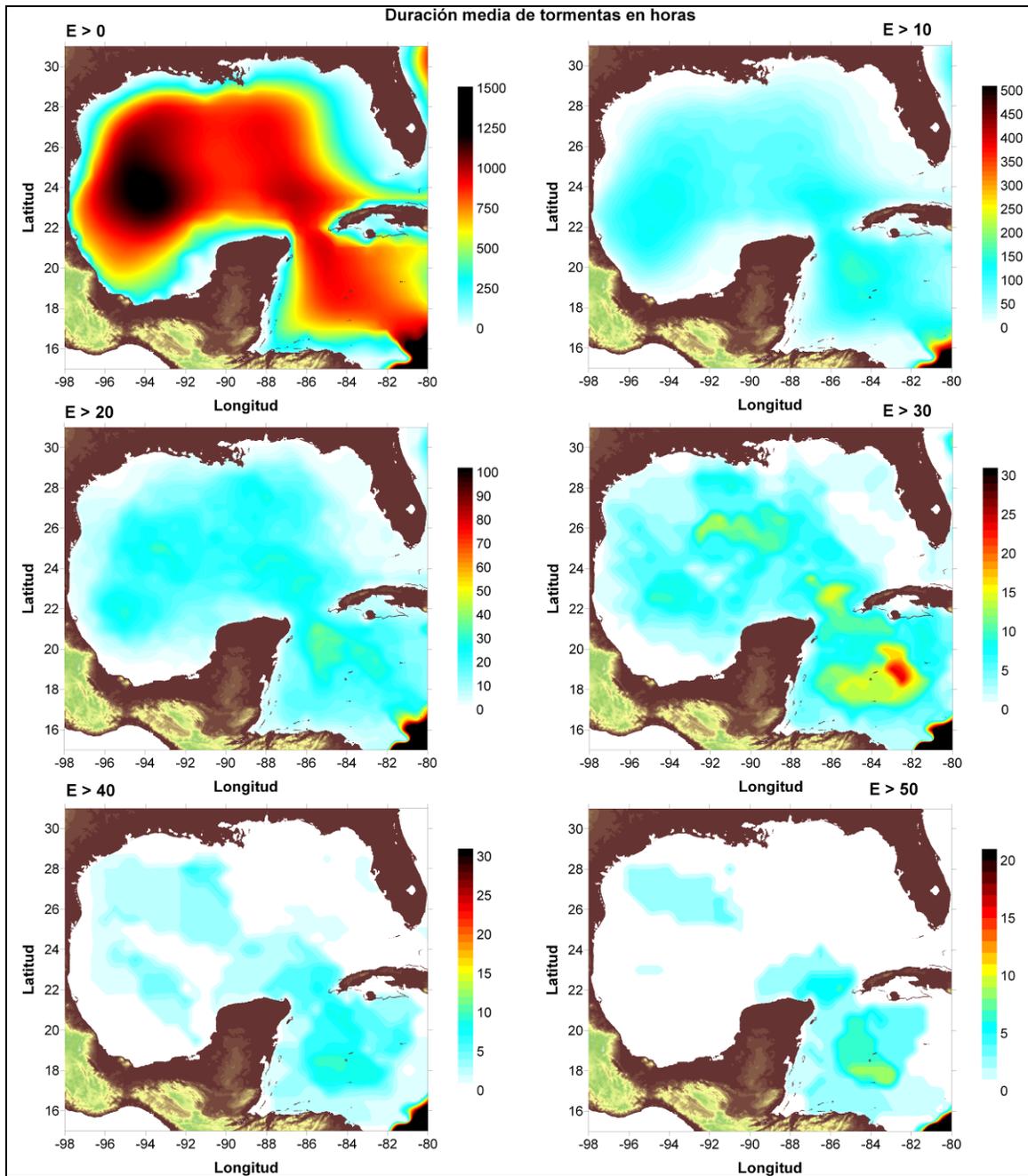
Figura 4.5 Duración máxima de tormentas en horas



**Figura 4.6** Duración media de tormentas en horas



**Figura 4.7** Duración máxima de energía de tormentas



**Figura 4.8** Duración media de energía de tormentas

#### 4.1.2.4 Valores máximos históricos

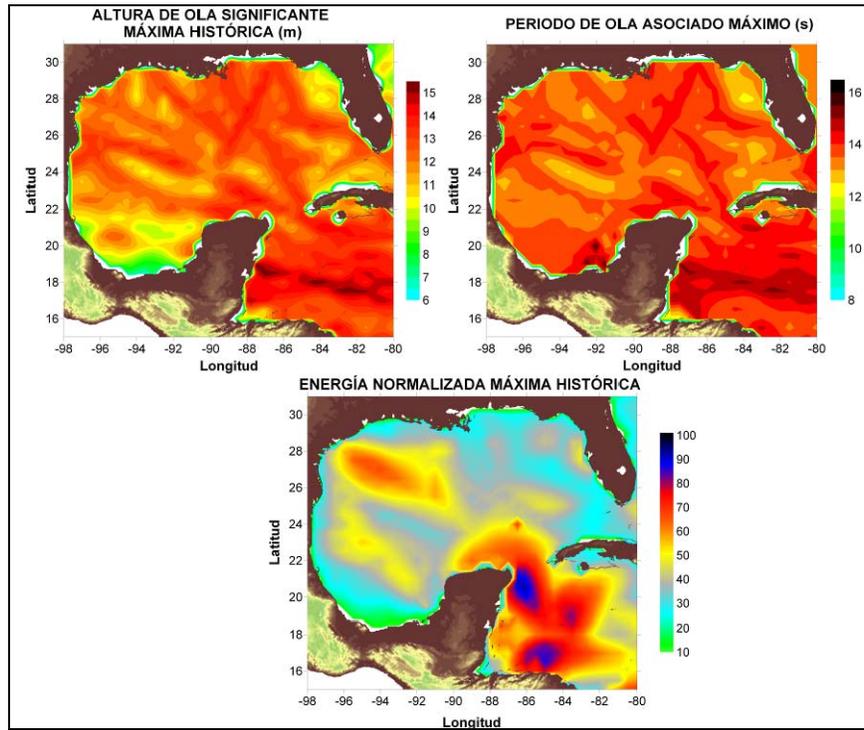


Figura 4.9 Valores máximos históricos

### 4.1.2.5 Número medio y máximo anual de tormentas

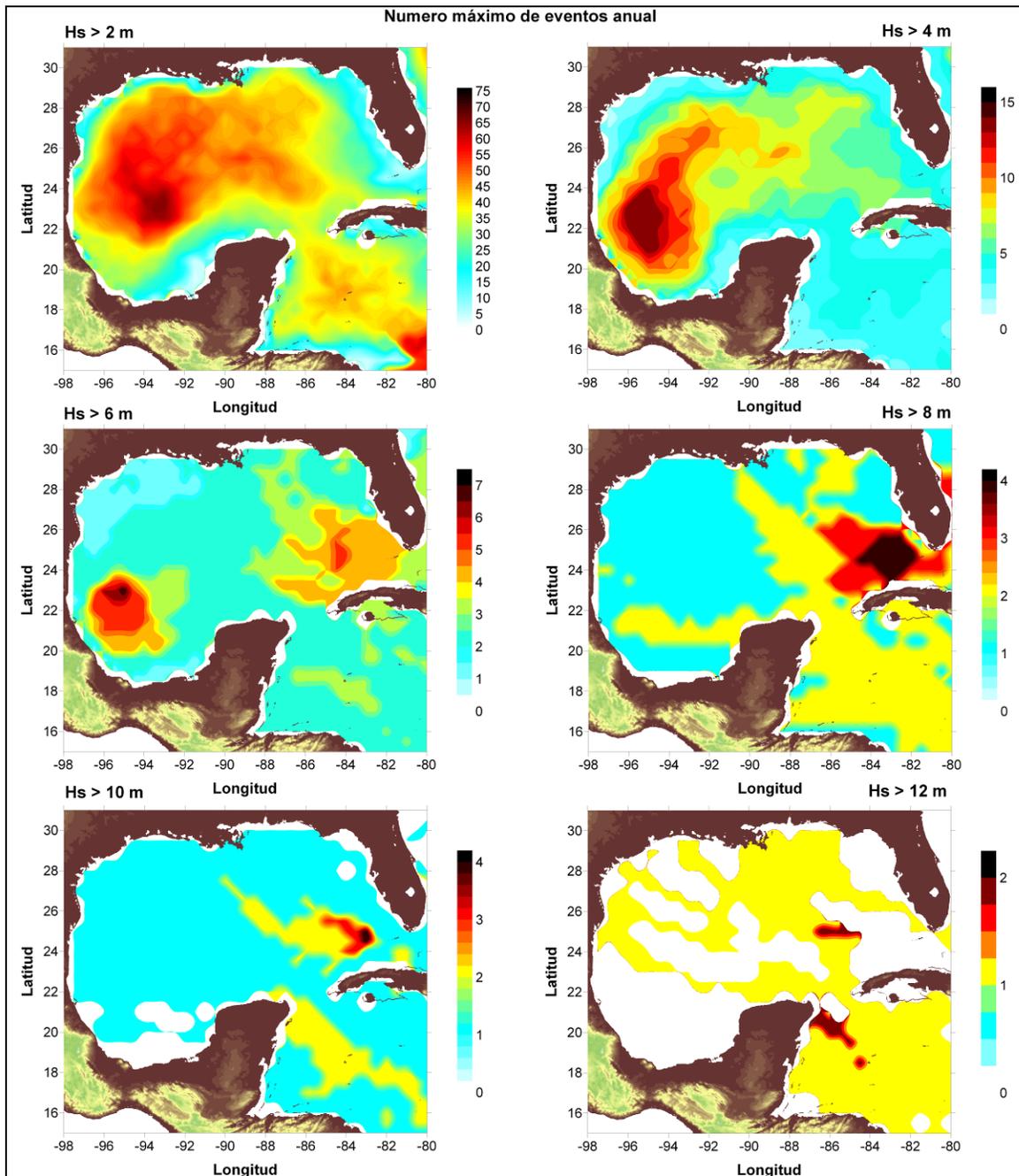


Figura 4.10 Número máximo anual de tormentas

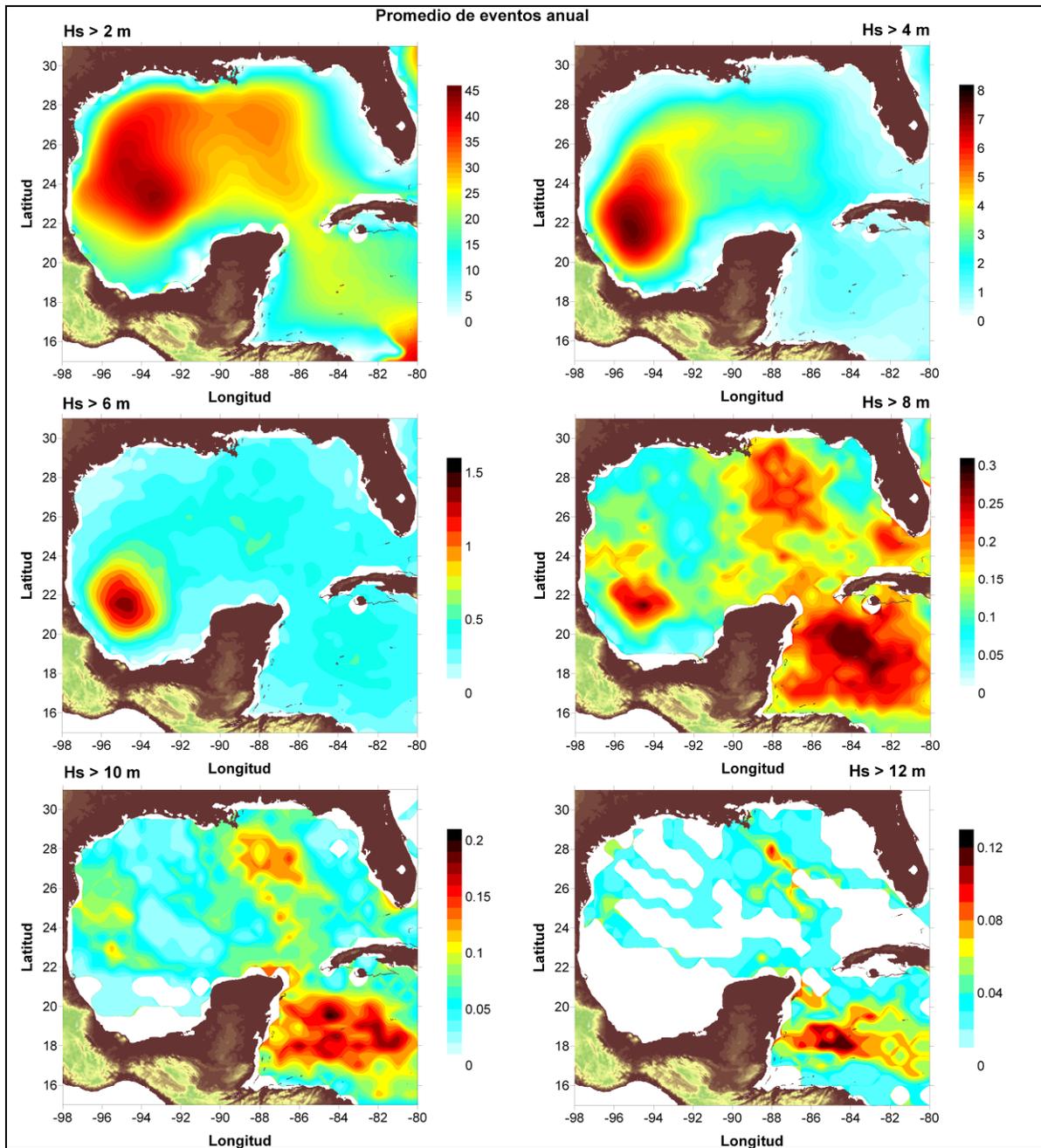


Figura 4.11 Número medio anual de tormentas

### 4.1.2.6 Número medio y máximo anual de tormentas con energía normalizada

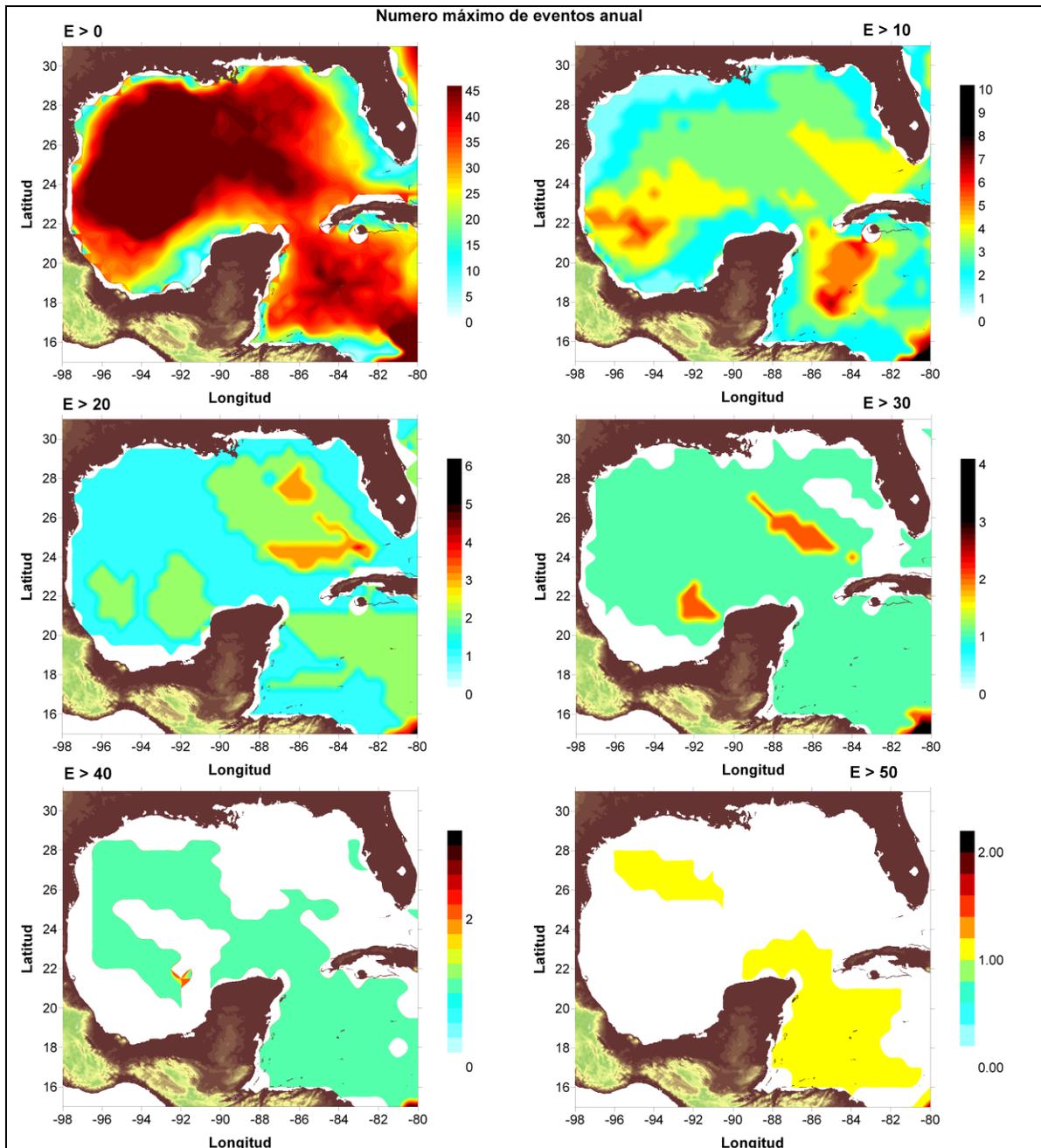
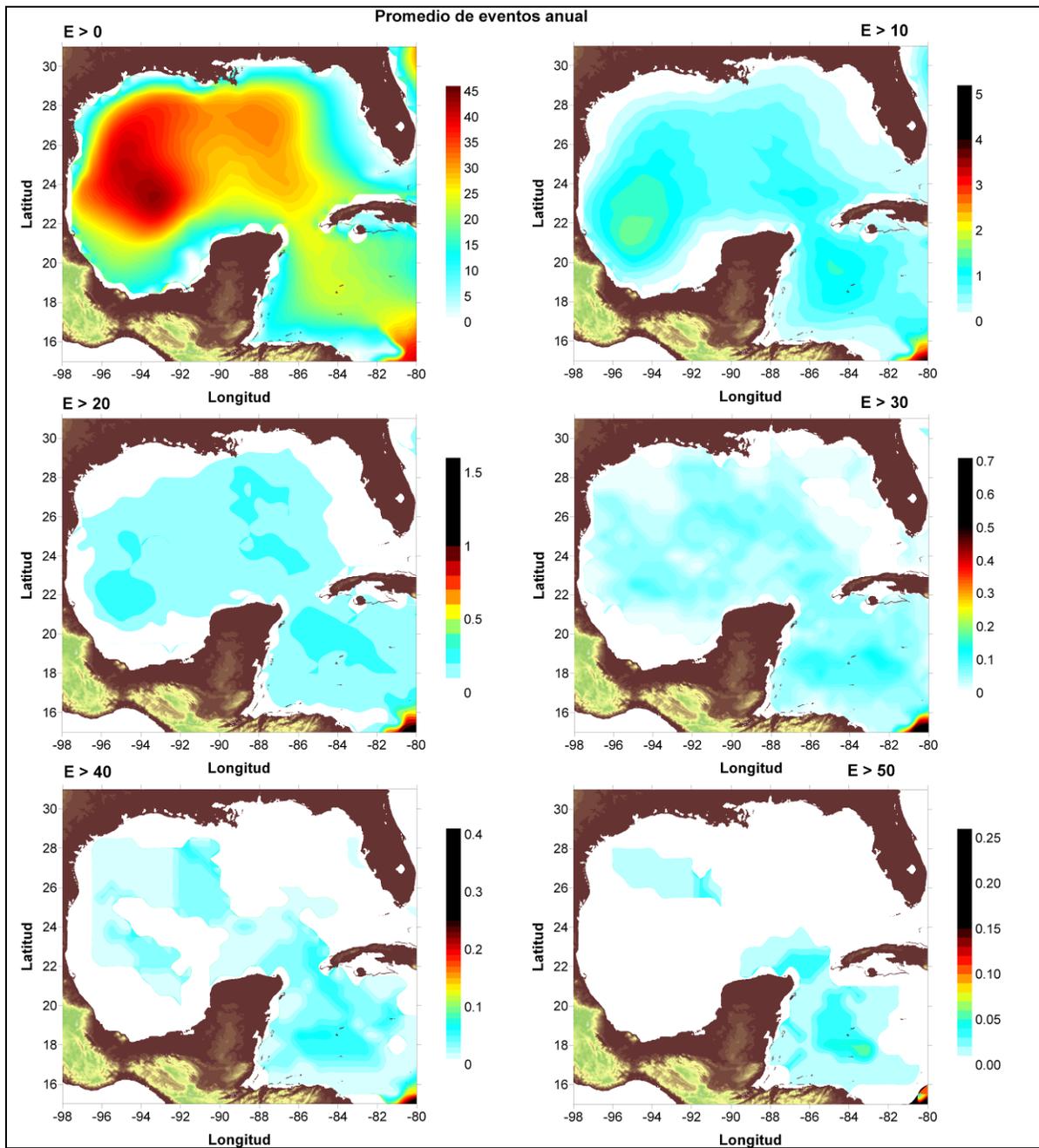


Figura 4.12 Número máximo anual de tormentas con energía normalizada



**Figura 4.13** Número medio anual de tormentas con energía normalizada

## 4.2 Vertiente Pacífica

La malla de análisis para la vertiente pacífica es la misma que se describió en el capítulo 3, y está delimitada en las latitudes 12.5° N a la 33.5° N y las longitudes 90.5° W a la 119.5° W, con una resolución de 0.5° por celda.

### 4.2.1 Mapas de altura de ola significativa y viento sostenido para diferentes periodos de retorno

#### 4.2.1.1 Mapas de altura de ola

En la malla de análisis del pacífico se tiene, para un periodo de retorno de 5 años, que en la temporada de invierno las costas tienen alturas de ola apenas mayores de 1 m. La estación de primavera trae grandes transformaciones en las playas, pues arriban estados de mar con alturas de ola significativa de 8 m desde Culiacán hasta Oaxaca; a Chiapas y Sonora llegan olas con alturas de 6 m, en el golfo de California se presentan alturas de 1 m y en Baja California sur los niveles oscilan entre 4 y 6 m. En verano, por los efectos de los huracanes se generan estados de mar con grandes alturas y se aproximan desde el suroeste con elevaciones de 12 m que impactan directamente con Baja California sur, Culiacán y en toda la costa que se extiende hasta Guerrero. Otoño tiene condiciones similares a las de primavera pues los eventos que se tienen son de la misma magnitud y chocan contra las costas de los estados de Culiacán en el norte hasta Oaxaca en el sur. En este periodo los menores temporales llegan a las costas de Baja California sur. Finalmente, se conoce con el análisis anual, que los puntos donde el oleaje incidente que se propaga hacia la costa tiene los mayores estados de mar son la zona sur de baja California, Nayarit, Guadalajara y Colima. El golfo de California y Chiapas tienen oleajes de 6m y los menores eventos se dan en Baja California Norte.

En el apéndice B, en los mapas que van de la Figura B1 a la Figura B18 se muestran los resultados obtenidos para el pacífico de México para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 500 y 1000 años. Se observa que el oleaje incide desde direcciones muy similares y las alturas de ola máxima y mínima se presentan siempre en frente a los mismos estados. La temporada de invierno es la que tiene los menores estados de mar y la época de verano los temporales con las mayores alturas de ola. En estos meses los valores mínimos de altura de ola se dan en casi todo el litoral con 2 m de elevación sobre el nivel medio del mar, y las máximas alturas alcanzadas están en Baja California, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, alcanzando alturas que oscilan entre 7 y 9 m según la posición. La estación de primavera presenta un cambio muy fuerte con respecto a la estación anterior y se alcanzan alturas máximas de 12 m que afectan casi todo el litoral a excepción de Baja California para periodos de retorno altos y 9 m para las recurrencias mínimas. Verano tiene las peores condiciones, pues el litoral se ve afectado en todo momento, aún más cuando se tienen periodos de retorno altos con alturas que

ostentan los 12 m, excluyendo solo a Chiapas donde se alcanzan tormentas de 9 m. Otoño presenta alturas de ola muy grandes pero que solo afectan a los estados que se encuentran en el centro del país, mientras que por ejemplo Baja California, Chiapas u Oaxaca aunque con alturas grandes no tienen las alturas de ola máximas.

En comparación con los resultados obtenidos en el Atlántico se observa que en invierno en el pacífico se tienen temporales mucho menores, pero en primavera los estados de mar alcanzan alturas de ola muy superiores a las del Atlántico. Para los periodos de verano y otoño las condiciones son mucho más fuertes en el pacífico dado que en el atlántico no se dan las alturas de ola que se alcanzan para el pacífico.

El análisis de las tormentas permite corroborar que a pesar de que en el pacífico el número de temporales es menor, si tienen mayor intensidad y por tanto liberan mucha más energía en comparación con los del atlántico. También es notorio que las tormentas del pacífico poseen menor duración, donde las mayores afectaciones se dan para el centro del país. Esto pone de manifiesto que cualquier obra marítima que se diseñe y construya en la vertiente en cuestión debe tener mejores especificaciones a diferencia de las que se utilicen para la otra región gracias a las magnitudes que se presentan. Estos resultados se exponen en el apéndice B, de la figura B19 a la figura B27.

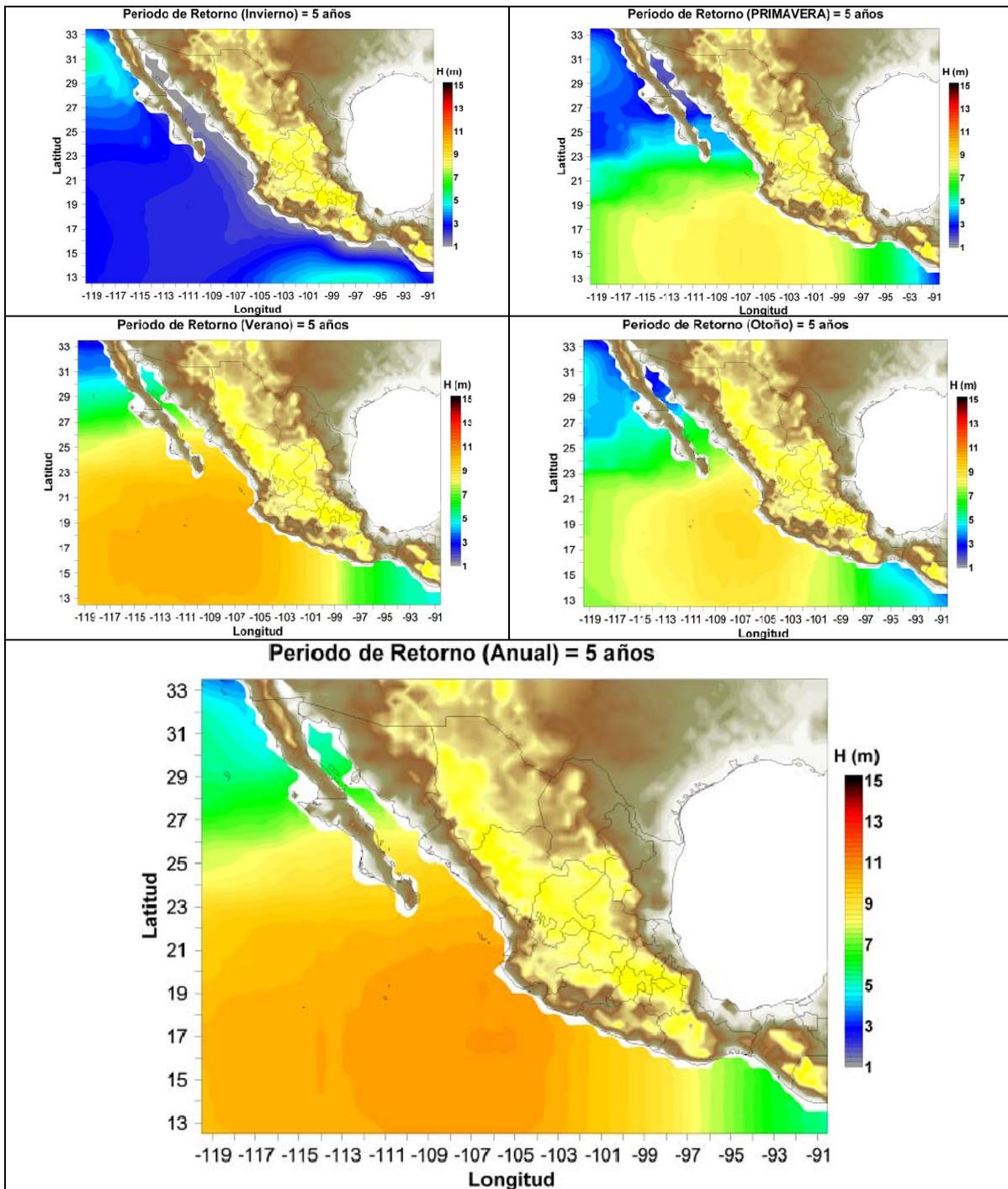


Figura 4.14 Mapas de periodo de retorno de 5 años de altura de ola para Pacífico Mexicano

### 4.2.1.2 Mapas de viento sostenido

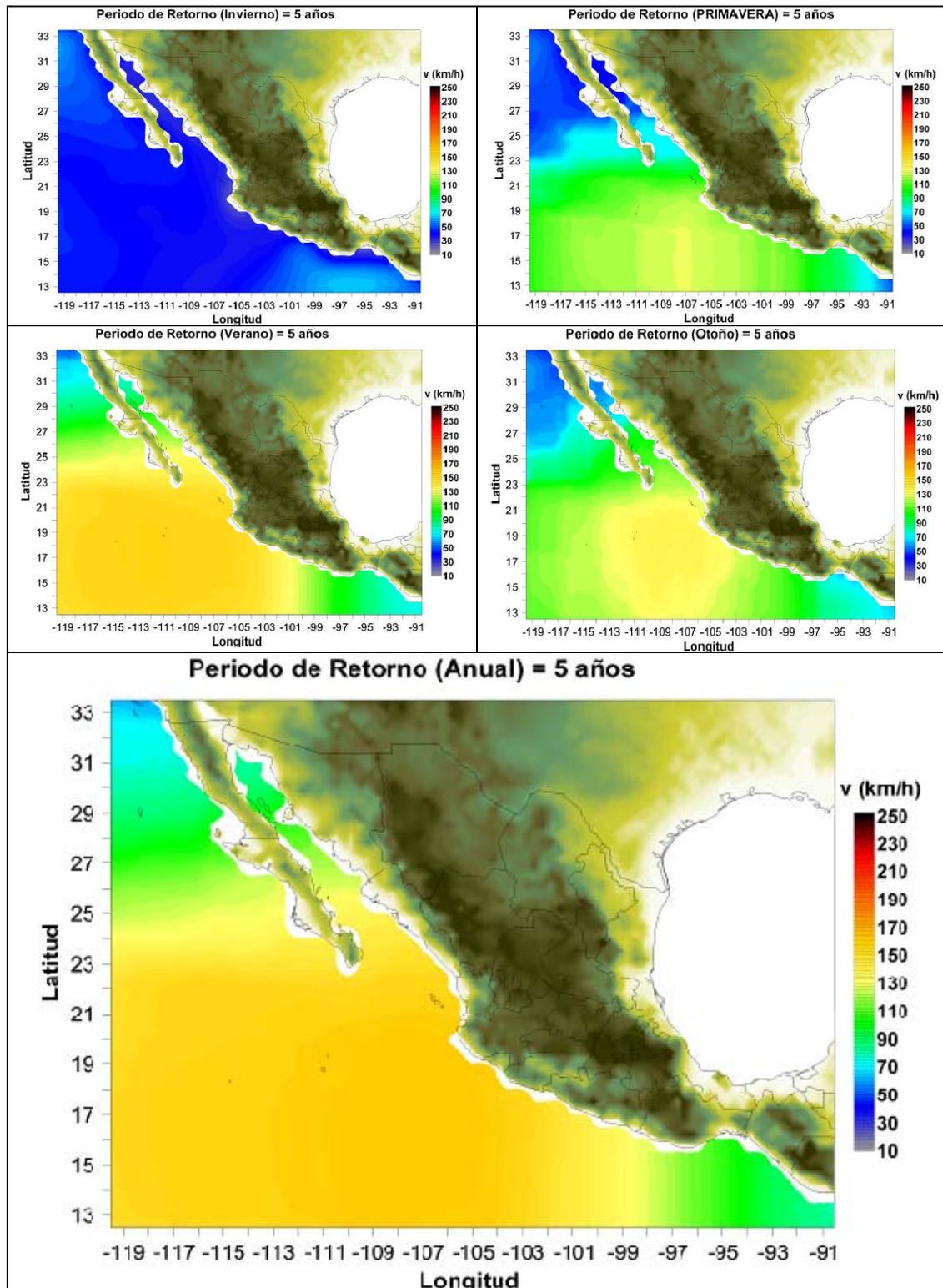


Figura 4.15 Mapas de periodo de retorno de 5 años de viento para Pacífico Mexicano

## CONCLUSIONES

Aprovechando las bondades del uso de modelos numéricos de generación de oleaje se ha desarrollado un análisis de eventos extremos para las características de los estados de mar, referidas a los temporales y a la energía del oleaje. Los fenómenos estudiados se encuentran integrados dentro de la técnica de *análisis a largo plazo, energía y de tormentas*, basada en la estimación de la intensidad y la duración con que un evento se repite en un tiempo medio en años y cuya intensidad excede un valor mínimo establecido, bien de altura de ola o energía. Los resultados descritos en este trabajo se clasifican de la siguiente manera:

- a) mapas de altura de ola para diferentes periodos de retorno a nivel estacional.
- b) mapas de velocidad del viento sostenido para diferentes periodos de retorno a nivel estacional.
- c) mapas de oleaje y viento anual para diferentes periodos de retorno.
- d) número medio mensual de energía normalizada.
- e) duración media y máxima histórica de tormentas.
- f) valor máximo histórico de energía normalizada.
- g) número máximo y medio anual de tormentas.

La importancia de estos análisis se centra en la localización de las zonas que presentan gran riesgo para todas y cada una de las actividades marítimas que se desarrollan dentro del Golfo de México y mar Caribe, que pueden ser de gran utilidad para el diseño, planeación y construcción de obras marinas. Sin embargo, su alcance no sólo se limita a diligencias ingenieriles, pues la virtud de estos asuntos adquiere gran relevancia para las entidades ambientales, turísticas y deportivas.

La técnica que se desarrolló constituye un novedoso y útil estudio, pues la metodología en sí es relativamente nueva, brindando un valor agregado en cuanto al análisis energético se refiere, dado que a la fecha ha sido poco estudiado este aspecto en lo concerniente al clima marítimo, y los riesgos que éste supone. También porque presenta en forma conjunta el análisis histórico de los fenómenos, brindando un panorama general acerca de la distribución energética de los estados de mar de forma espacial y temporal, alcanzando con ello una mejor perspectiva de la forma como se comportan las condiciones de oleaje en todo el caribe mexicano.

En las cartas se puede observar que durante el invierno la región ubicada frente a las costas del Estado de Veracruz es donde se presentan los valores más intensos de altura de ola significativa, mientras que la zona costera de la Península de Yucatán es la que se ve menos afectada por estados de mar con alturas de ola muy grandes. Primavera es la estación del año con las mejores condiciones para

las costas mexicanas ya que las alturas de ola de los temporales no superan los 6 m. Definitivamente el periodo que ostenta las circunstancias más intensas es el verano, particularmente frente a Tamaulipas, Yucatán y Quintana Roo para periodos bajos; sin embargo se tiene que para periodos de recurrencia altos todo el Golfo está sometido a eventos máximos cuyas magnitudes superan los 12 m de altura de ola y prácticamente se puede definir por inspección visual las trayectorias que han seguido los huracanes a lo largo de la historia. Los valores del oleaje de Otoño no se pueden comparar en términos de magnitud contra los de la estación de verano pero sí se puede aseverar que por la influencia de los vientos que llegan en esta época tiene temporales más fuertes que invierno y primavera; sin embargo, se genera un cambio en la distribución de los máximos temporales al confrontarlos con verano pues en esta época las costas de Veracruz, Yucatán y Quintana Roo solo son las zonas más críticas.

En el pacífico, la temporada de invierno es la que tiene los menores estados de mar y la época de verano los temporales con las mayores alturas de ola. En estos meses los valores mínimos de altura de ola se dan en casi todo el litoral con 2 m de elevación sobre el nivel medio del mar, y las máximas alturas alcanzadas están en Baja California, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, con valores que oscilan entre 7 y 9 m según la posición. La estación de primavera presenta un cambio muy fuerte con respecto a la estación anterior y se llegan a alturas máximas de 12 m que afectan casi todo el litoral a excepción de Baja California para periodos de retorno altos y 9 m para las recurrencias mínimas. El verano tiene las peores condiciones, pues el litoral se ve afectado en todo momento, aún más cuando se tienen periodos de retorno altos con alturas que ostentan los 12 m, excluyendo solo a Chiapas donde se alcanzan tormentas de 9 m. El otoño presenta alturas de ola muy grandes pero que solo afectan a los estados que se encuentran en el centro del país, mientras que Baja California, Chiapas u Oaxaca aunque con alturas grandes no tienen las alturas de ola máximas.

Finalmente se puede concluir que con los mapas tanto de oleaje como viento es posible analizar la distribución espacial de la duración asociada a cada tormenta para el golfo de México y mar Caribe, y el pacífico mexicano. Los umbrales que se definieron para caracterizar las duraciones asociadas a diferentes valores de energía asociados a eventos extremos están dados para 0, 10, 20, 30, 40 y 50 unidades de energía normalizada. De acuerdo al periodo de ocurrencia se cumple que a mayor intensidad del fenómeno este presenta menor duración; la distribución espacial de los eventos energéticos asociados a las duraciones máximas aumenta para periodos de retorno altos, proporcionalmente al valor de cada tormenta. Para las condiciones medias se tiene un comportamiento diferente, pues la duración de los temporales es superior y estos presentan mayor frecuencia de aparición. Se aprecia de igual modo, que existen valores altos de las duraciones máximas en las costas de Cancún, Quintana Roo. Esto último, permite establecer la vulnerabilidad a la que se encuentra sometida dicha zona y se explica entre otros aspectos, las altas tasas de erosión playera que se presenta en este lugar.

## **FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Hasta la fecha se cuenta con información de campo con cierto sesgo y de series de corta duración, por lo que se debe ampliar la instrumentación de las costas de México para contar con mayor cantidad de datos reales, y adicionalmente, que sean útiles para validar los modelos de predicción de oleaje existentes.

Es deseable realizar una investigación para determinar los valores umbrales que gobiernan las diferentes zonas del litoral mexicano y tener con esto mejores estimaciones en cuanto a la selección de las tormentas.

Conviene determinar el análisis a corto plazo, con el objetivo caracterizar completamente las vertientes oceánicas de México, y como resultado, disponer de un conocimiento más detallado del comportamiento del clima marítimo de las costas mexicanas.

Es pertinente llevar a cabo estudios más detallados en cuanto a energía se refiere, con el fin de localizar los puntos susceptibles de explotación energética y presentar con esto, opciones de generación de energía que contribuyan a satisfacer las necesidades del mercado.

## BIBLIOGRAFÍA

Battjes J., Groenendijk H. (2000). Weigh height distributions on shallow foreshores. *Coastal Engineering*. Vol. 40, pp. 161 – 182.

Bolaños R. Sánchez, Sánchez Arcilla, Cautera A., Cateura J. (2007) “*Evaluation of Two Atmospheric Models for Wind – Wave Modelling in the NW Mediterranean*”. *Journal of Marine Systems*.

Berg Robbie, Rhome Jaime (2005), “*Expecting the Unexpected Wave: How the National Weather Service Marine Forecasts Compare to Observed Seas*” *Marines Weather Log*, Vol. 49, No. 2, pp. 1-5.

Bretschneider C. L., (1990), “*Tropical Cyclones*”, *Hanbook of Coastal and Ocean Engineering*, Gulf Publishing Co, pp.249 – 370.

Callaghan D., Nielsen P., Short A., Ranasinghe R. (2008). Statical simulation of wave climate and extreme beach erosion. *Coastal Engineering*. Vol. 55, pp. 375 – 390.

Castillo E (1987) “*Extreme Value Theory in Engineering, Statical Modelling and Decision Science*”, Academic Press, Sn Diego, California, pp 389.

Cavanié A. et al. (1976), “*A Statistical Relationship Between Individual Height and Periods of Storms Waves*”, *Int. Conf. on Behavior of Offshore Structures*, Trondheim, BOSS’76.

Cunnane C. (1978) “*Unbiased Plotting Positions – A Rievew*” *Journal of Hydrology*, Vol. 37, pp. 205 – 222.

Draper L. (1963), “*Derivation of Design Wave from Instrumental Records of Sea Waves*”, *Proceedings Institution of Civil Engineers*.

Escalante Carlos, Reyes Lidia (2005), “*Técnicas Estadísticas en Hidrología*” UNAM, Facultad de Ingeniería, pp. 298.

Forristal G. Z. (1978) “*On the Statistical Distribution of Wave Height in a Storm*” *Journal of Geophysycal Research*, Vol. 83, No C5, pp. 2353 – 2358.

Goda Yoshimi (1976), “*Statical Variability of Sea State Parameters as Function of a Wave Spectrum*”, *Coastal Engineering en Japan*, 31 (1), pp. 39 – 52.

Goda Y. (1979), "*A Review on Statical Interpretation of Wave Data*", Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol. 18, pp. 5 – 32.

Goda Yoshimi (1990) "*Distribution of Sea State Parameters and Data Fitting*" Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Vol. 1, pp. 371 – 407.

Hasselmann K (1960) "*Grundgleichungen der Seegangsvorhersage*". Schiffstechnik, Vol. 7, pp. 191 – 195.

Hasselmann K (1985) "*Computations and Parametrizations of the nonlinear transfer integrals of the wave spectrum*". Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. J Phys. Oceanography, Vol. 15, pp. 1369 – 1377.

Hogben N. (1990) "*Long Term Wave Statistics in The Sea*" Ocean Engineering Science. Vol. 9-A ed. Bernard Le Méhauté y Daniel M. Hanes. John Wiley & Sons. USA.

Holland G. (1980), "*An Analytical Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes*" Monthly Weather Review, Vol. 108, pp. 1212 – 1218.

Holthuijsen, L.H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press. USA., 387 pag.

Isaacson Michael, ASCE M, MacKenzie Neil (1981) "*Long Term Distribution of Ocean Waves: a Review*" Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Vol. 107, No WW2, pp. 93 – 109.

Janssen P. (1989), "*Wave-Induced Stress and the Drag of Air Flow Over Sea Waves*", J. Phys. Oceanography, Vol. 19, pp. 745 – 754.

Kimball B. F. (1960), "*On the Choice of Plotting Positions on Probability Paper*", J Armer Statist ASSC, Vol. 55, pp. 546 – 560.

Kite G. W. (1968), "*Frequency and risk analyses in hydrology*", Water Resources Publication. USA. 275 pp.

Liste María, Olabarrieta Maitane (2004) "*Variaciones Hiperanuales de Parámetros Medios De Oleaje en el Litoral Mediterráneo Español en los Últimos Cincuenta Años: Efectos Sobre La Costa*" Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, nº 4, Santander, pp 1 – 12.

Liu Z., Burcharth H. (1998), "*Encounter Probability of Individual Wave Height*", Coastal Engineering Proceedings, Copenhagen, Denmark, Vol. 1, pp. 1027 – 1038.

Medina J, Aguilar J. (1986), *Discusión de “Wave Staties – Tical Uncertainties and Design of Breakwaters”*, by B. Le Méhauté and S. Wong, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 112 (5), pp. 609 – 612.

Menendez Melisa *et al.* (2004), *“Variaciones del Régimen Extremal de Clima Marítimo en el Litoral Español en el Periodo 1958 - 2001 ”*, Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, nº 4, Santander, pp.1 – 12..

Longuet – Higgins, M. S. (1975), *“On the Join Distribution of the Period and Amplitudes of Sea Waves”*, *J Geophys Res*, Vol. 80(2), pp. 2088 – 2094.

Massel S. R. (1996) *“Long Term Statistics for Ocean Surface Waves”*, *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol.11, World Scientific Singapore, pp. 368 – 388.

Mathiesen Martin, *“Recommended Practice for Extreme Wave Análisis”* *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, 1994, No. 6, pp. 803 – 814.

Ochi M. K. (1998) *“Análisis of Amplitude and Height”* *Ocean Waves. The Stockastic Approach*. Cambridge Ocean Technology Series, Vol. 6. Cambridge University Press. U.K. pp. 319.

Pérez, D.M., Bolaños, R., Silva, R. (2008). Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. En Imprenta. Fecha de publicación: abril-junio de 2008, Vol. XXIII, No. 2.

Ramachandra A., Hamed K. H. (2000) *“Flood Frecuency Analysis”*, CRC Press, USA, pp.353.

Ruiz, G., Silva, R., Pérez, D., Posada, G., y Bautista, G. (2008). Modelo híbrido para la caracterización del clima marítimo. *Ingeniería Hidráulica en México*. En revisión.

Sánchez *et al.* (1998), *“Comparison of a Wave Prediction Models, 5<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcast and Forecasting”*, Melburne, Florida.

Silva *et al.* (2000), *“Determination of the Oceanographic Risks from Hurricanes on the Mexican coast”*, 6<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcast and Forecasting”, Monterrey, California.

Silva *et al.* (2002), *“Oceanographic Vulnerability to Hurricanes on the Mexican Coast, International Conference on Coastal Engineering”*, Coastal Engineering, ASCE, Cardif, Wales.

Silva, R. (2005). *“Análisis y descripción estadística del oleaje”*. Serie Docencia 49. Instituto de Ingeniería, UNAM. México., 179 pag.

Snyder R. L. et al. (1981), "Array measurements at atmospheric Pressure Fluctuations Above Surface Gravity" *Journal Fluid Mech.*, Vol. 102, pp. 1 – 159.

Sorensen, M. (1993). *Basic wave mechanics for coastal and ocean engineers*. John Wiley and Sons. USA., 284 pag.

Stansell P., Wolfram J., Linfoot B. (2001). Effect of sampling rate on wave height statistics. *Ocean Engineering*. Vol. 29, pp. 1023 – 1047.

Tomás Antonio et al. (2004) "Bases de Datos de Oleaje y Nivel del Mar, Calibración y Análisis: El Cambio Climático en la Dinámica Marina en España" Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, nº 4, Santander.

Tucker M. J., piit E. G. (2001) "Estimating Extreme Wave Height" *Waves in Ocean Engineering*, Elsevier Ocean Engineering Book Series, Vol. 5 pp.161 – 473.

WAMDI Group. (1988). The WAM model – A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* Vol 18, pp. 1775-1810.

Ward Donald, Thompson Edward, Zhang Jun (2003) "Selection of a Design Wave Height for Coastal Engineering" *Advances in Coastal Structure Design*, ASCE, USA, pp. 116 – 180.

Weibull W. (1939), "A Statical Theory of Strenght of Materials", Ing. Vet. Ak Handl. (Stockholm), 151 pp.

World Meteorological Organization (1998). *Guide to Wave Analysis and Forecasting*, Geneva, pp 168.

## APÉNDICE 1

## A APÉNDICE 1

### A.1 Mapas de altura de ola significativa para la vertiente atlántica

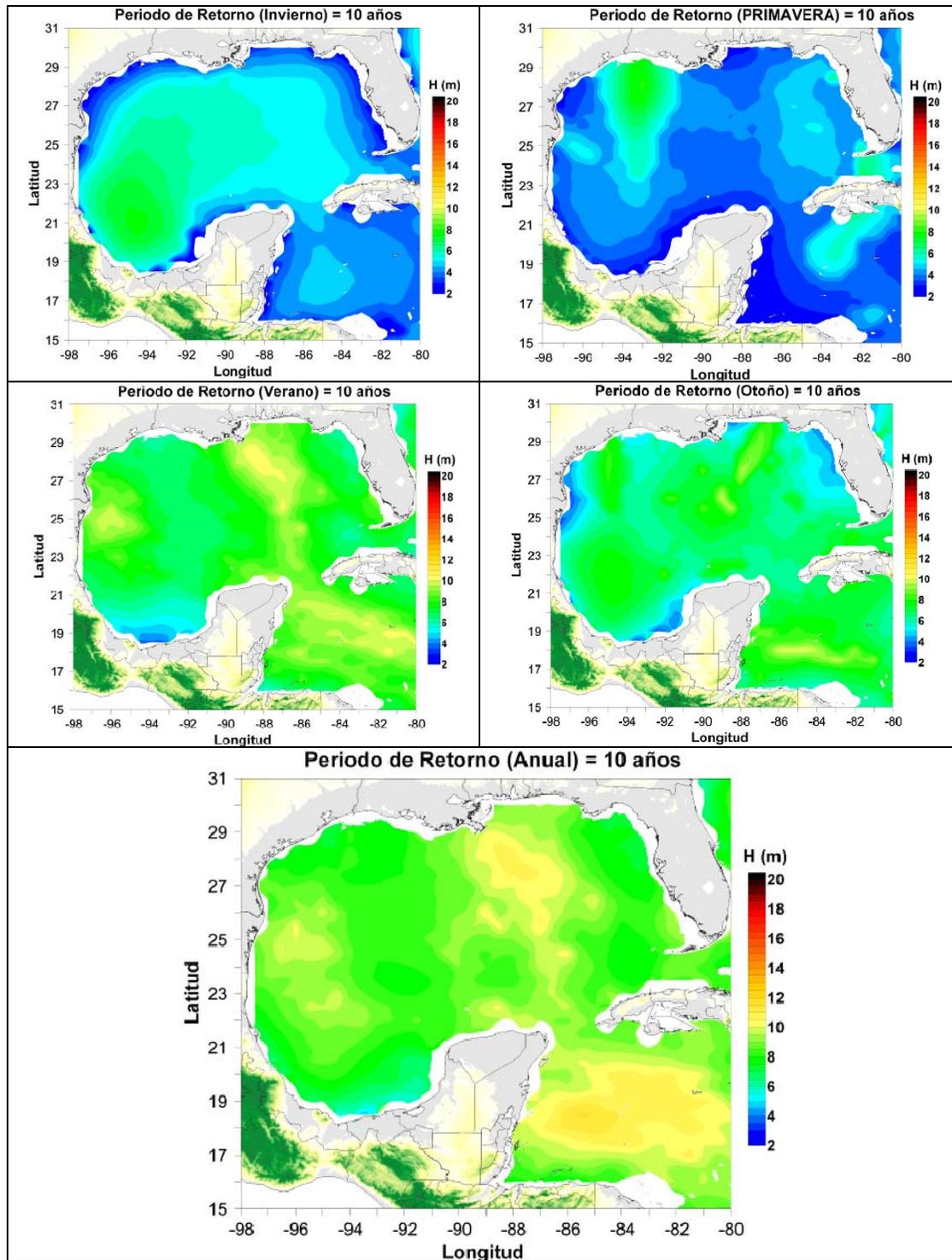


Figura A.1 Mapas de periodo de retorno de 10 años de altura de ola en el Golfo de México

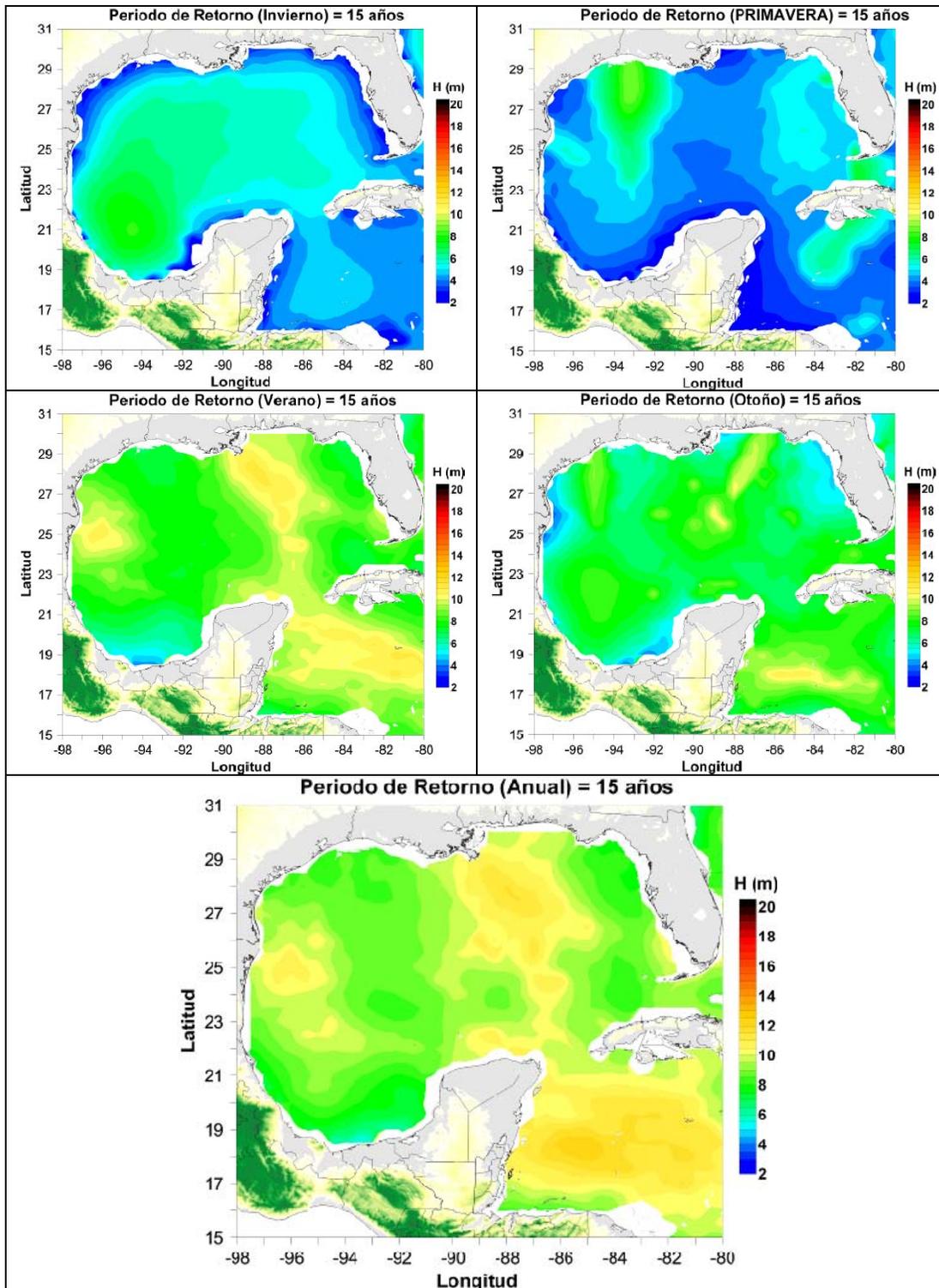


Figura A.2 Mapas de periodo de retorno de 15 años de altura de ola en el Golfo de México

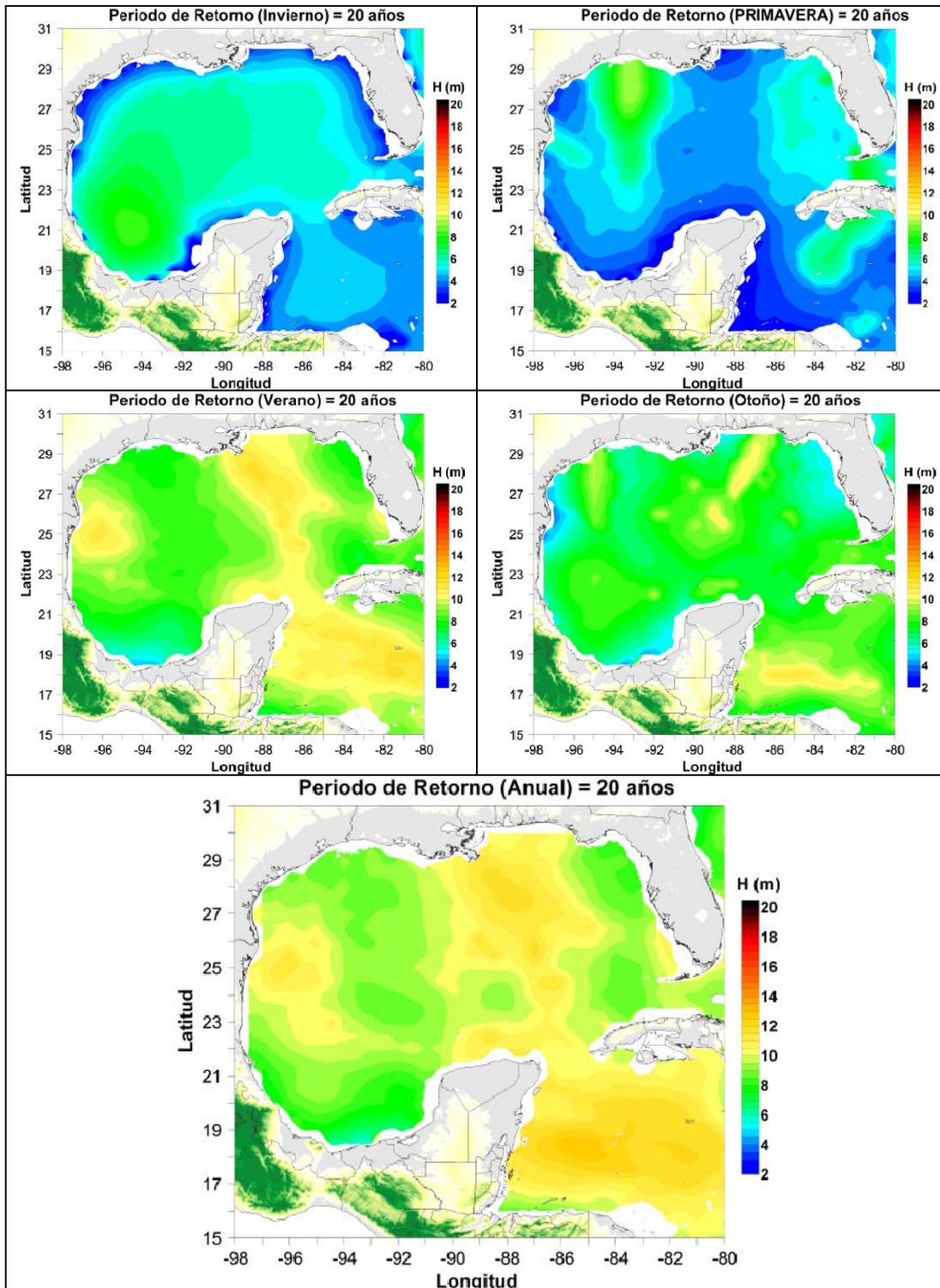


Figura A.3 Mapas de periodo de retorno de 20 años de altura de ola en el Golfo de México

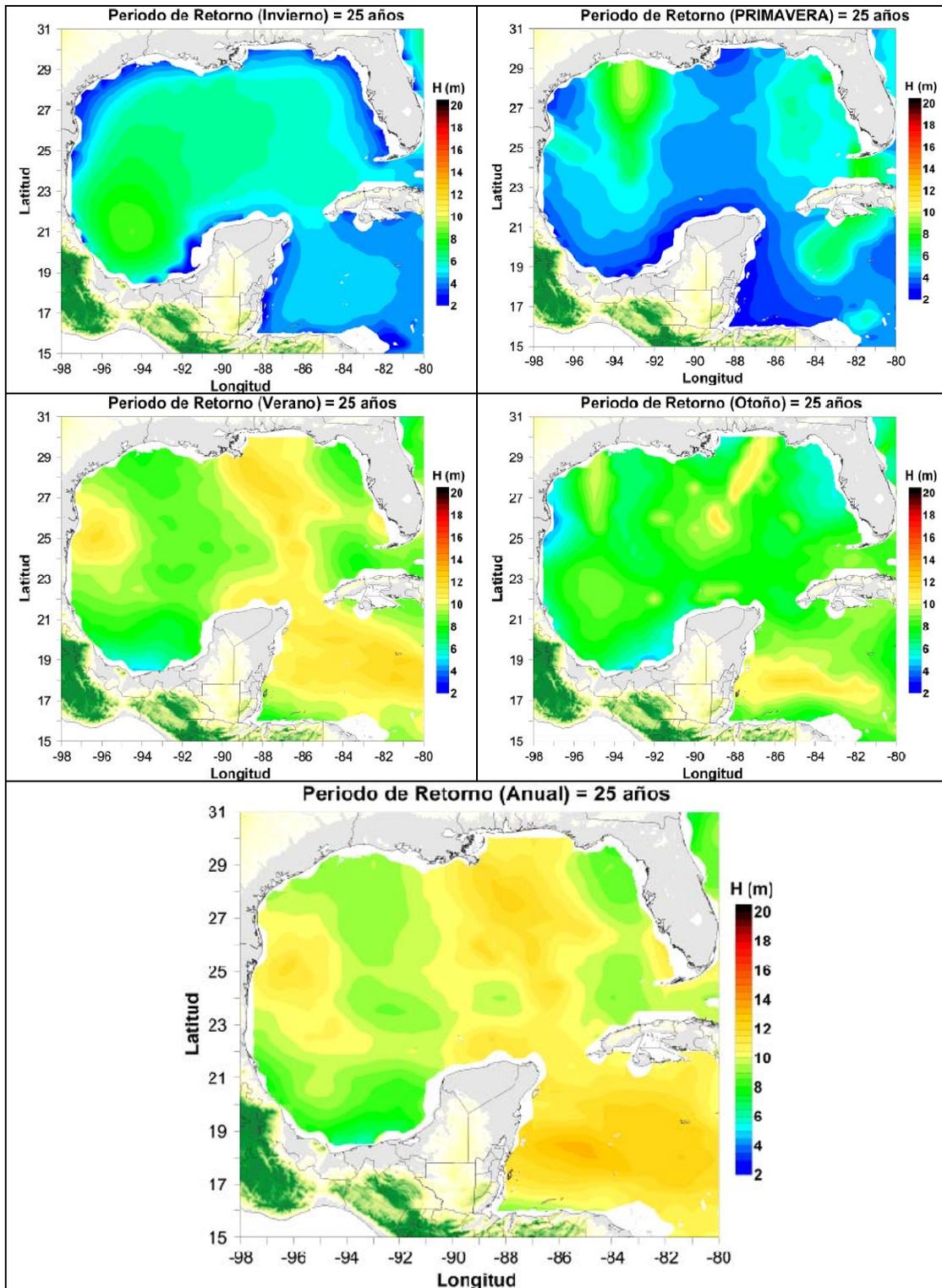


Figura A.4 Mapas de periodo de retorno de 25 años de altura de ola en el Golfo de México

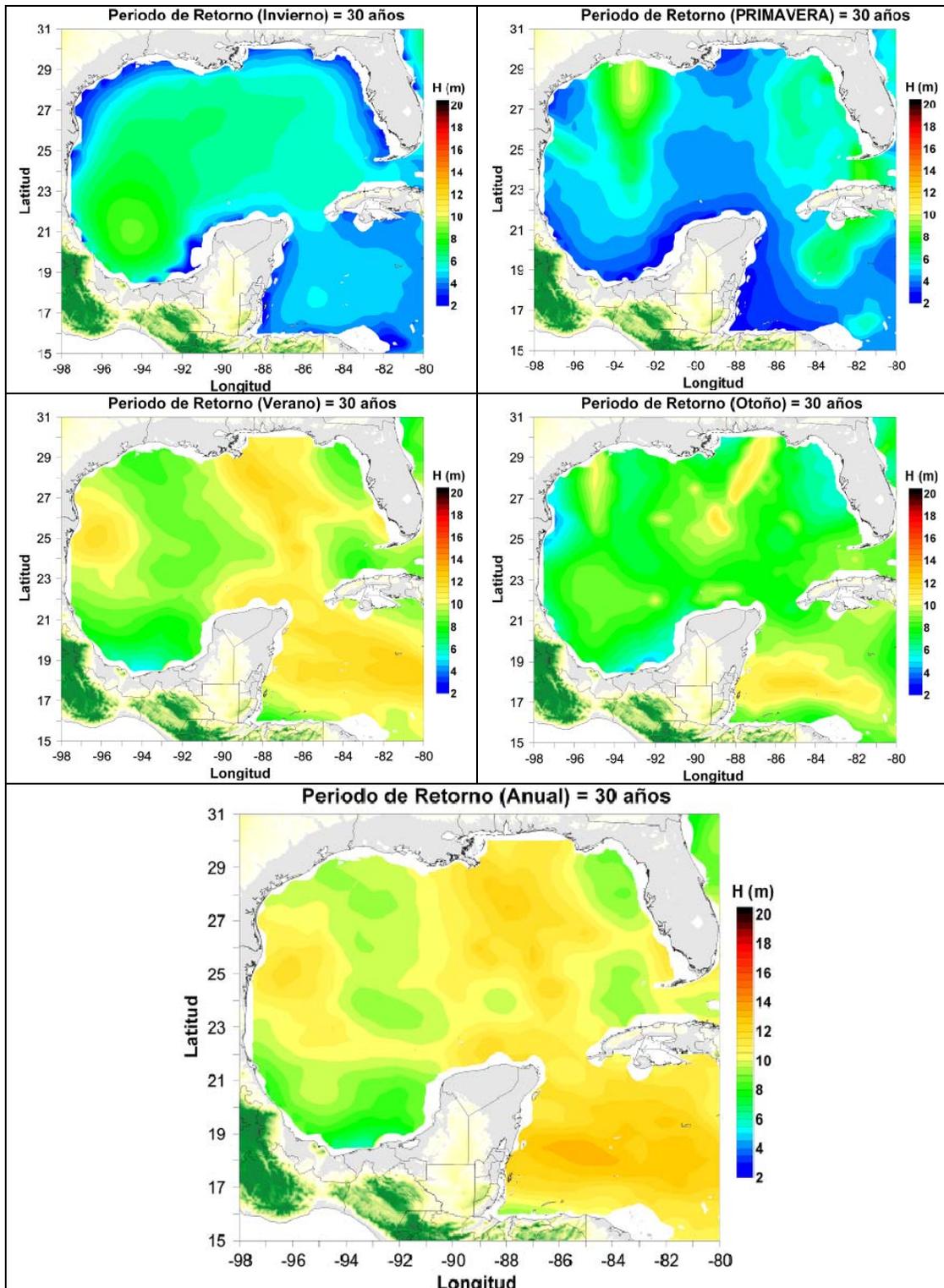


Figura A.5 Mapas de periodo de retorno de 30 años de altura de ola en el Golfo de México

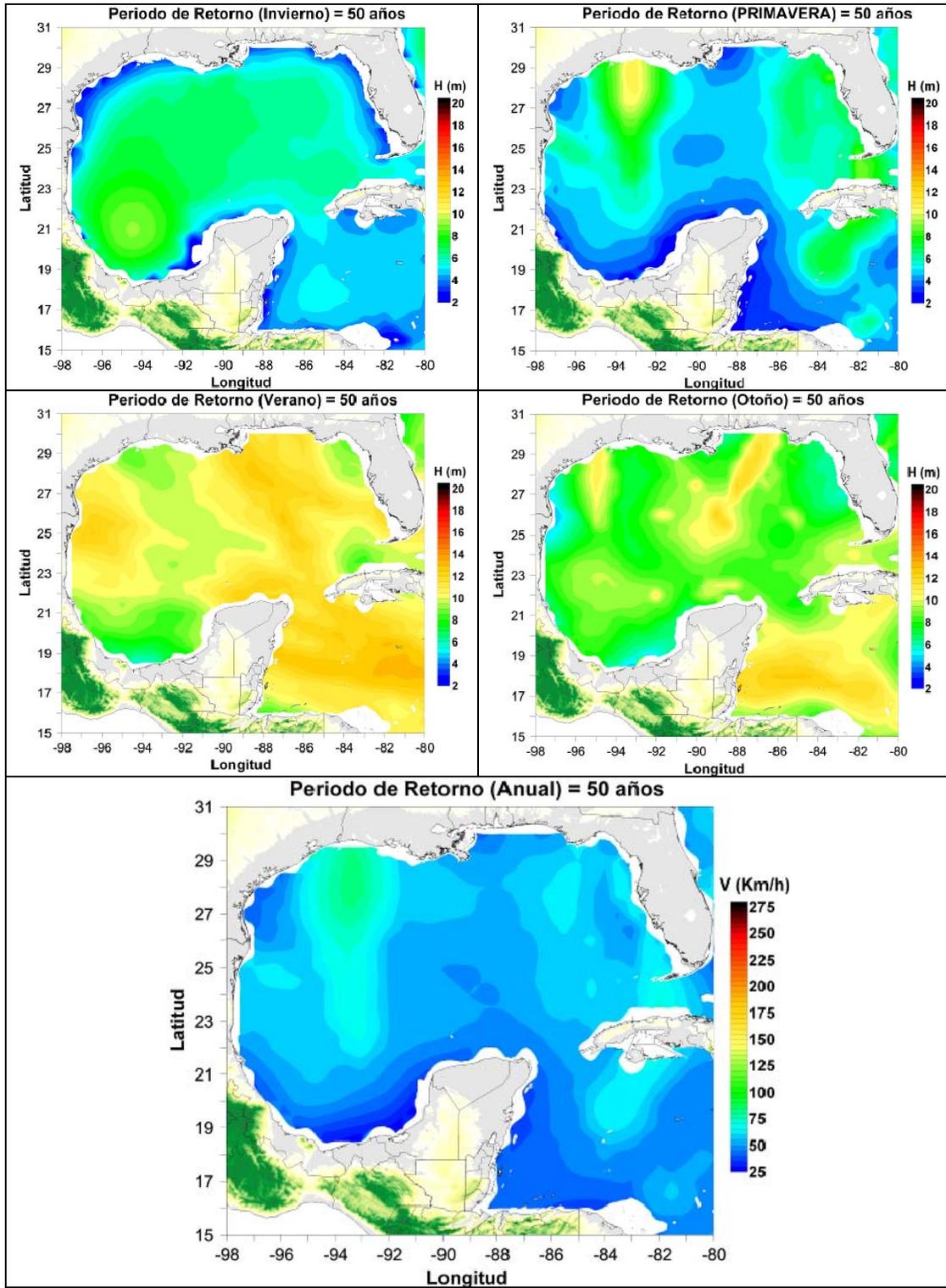


Figura A.6 Mapas de periodo de retorno de 50 años de altura de ola en el Golfo de México

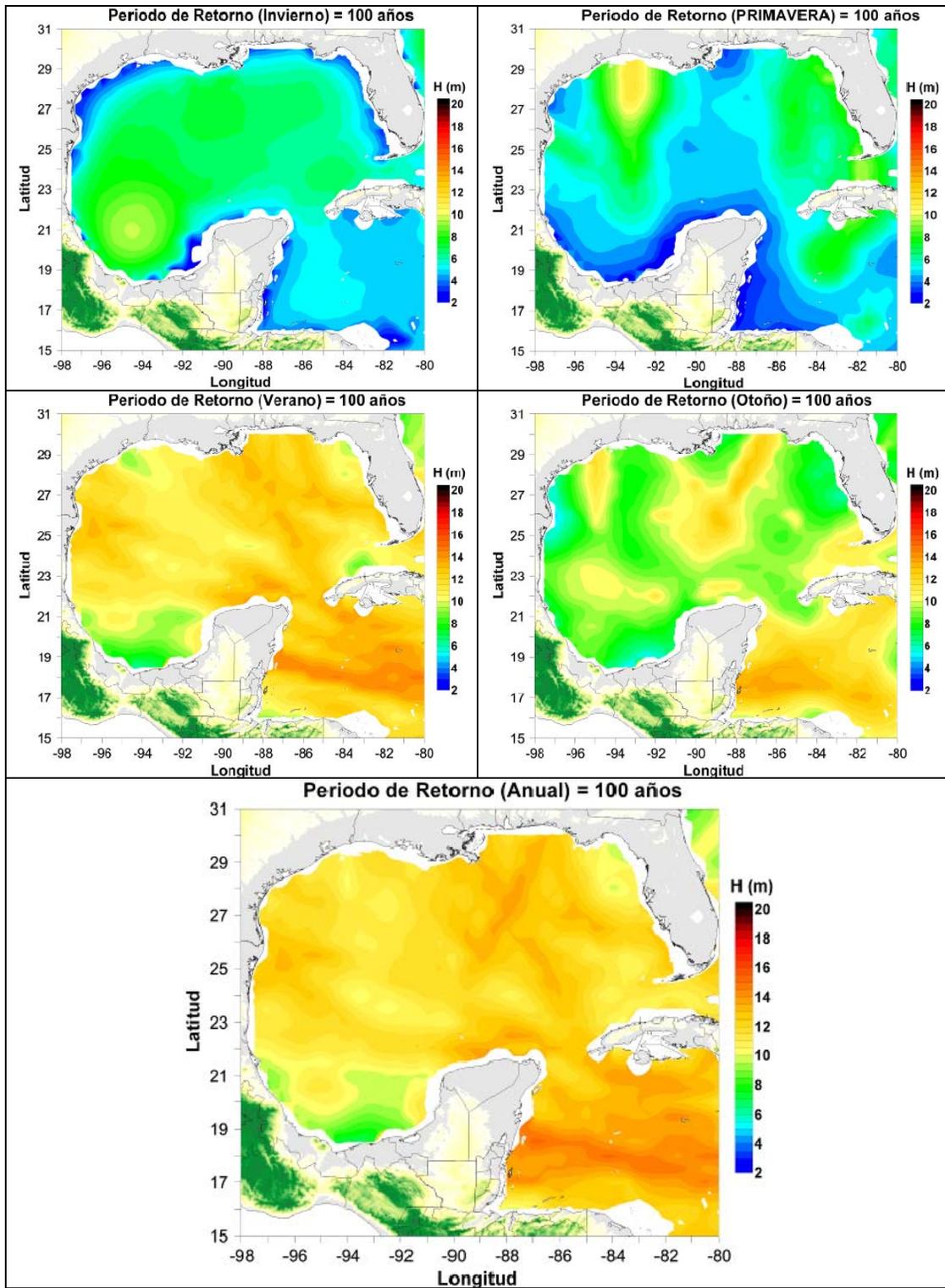


Figura A.7 Mapas de periodo de retorno de 100 años de altura de ola en el Golfo de México

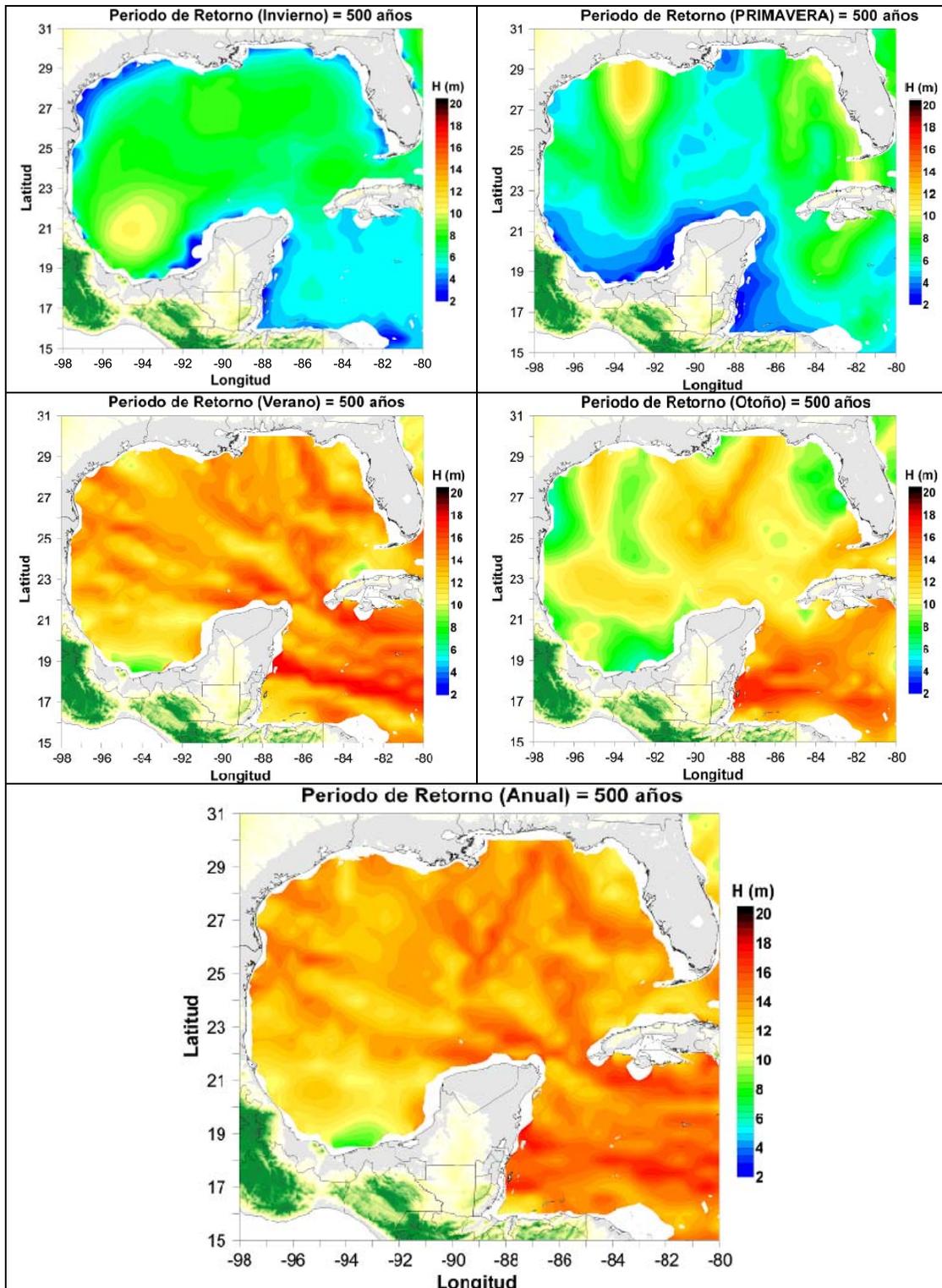


Figura A.8 Mapas de periodo de retorno de 500 años de altura de ola en el Golfo de México

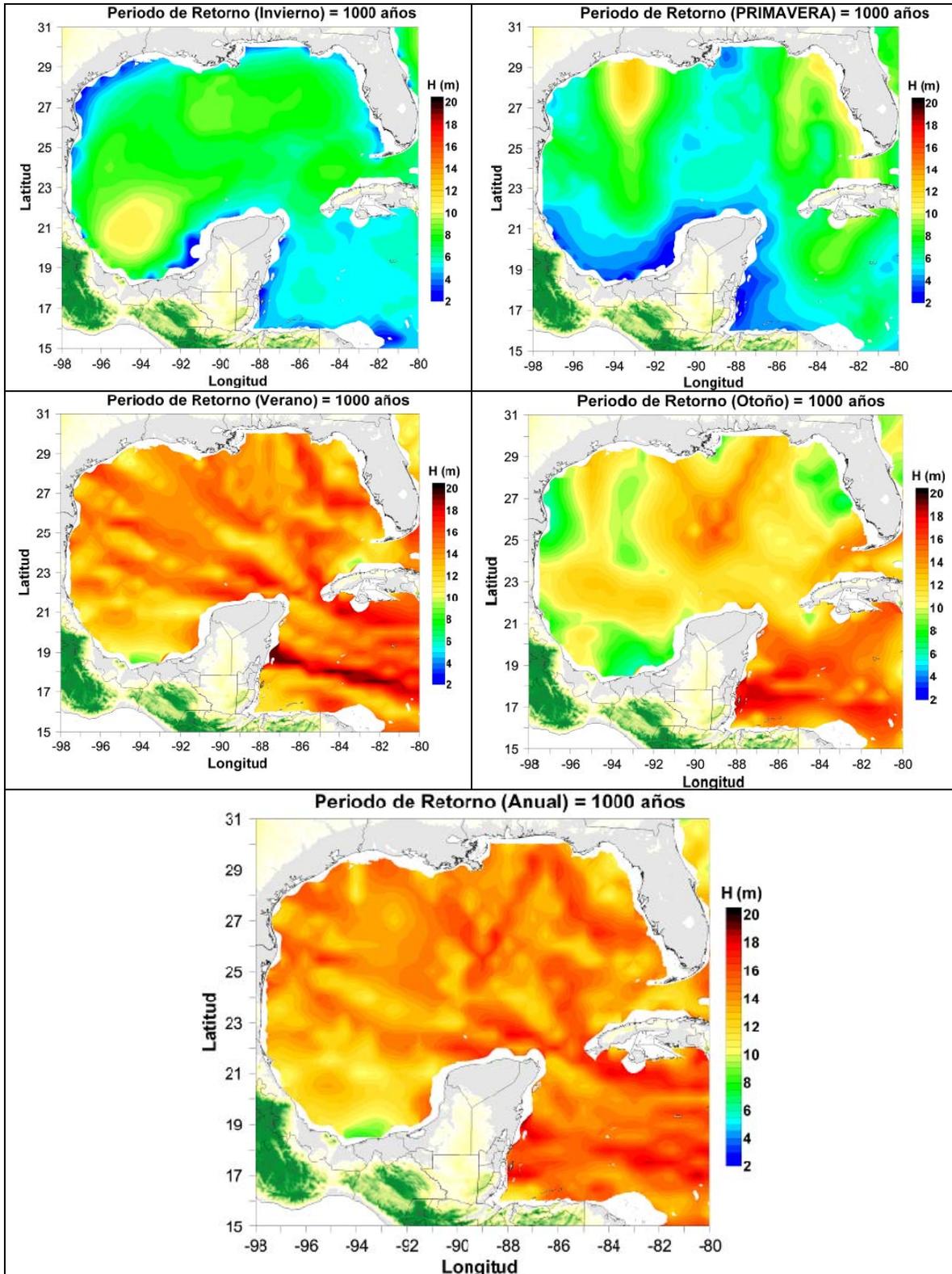


Figura A.9 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de altura de ola en el Golfo de México

## A.2 Mapas de viento sostenido para la vertiente atlántica

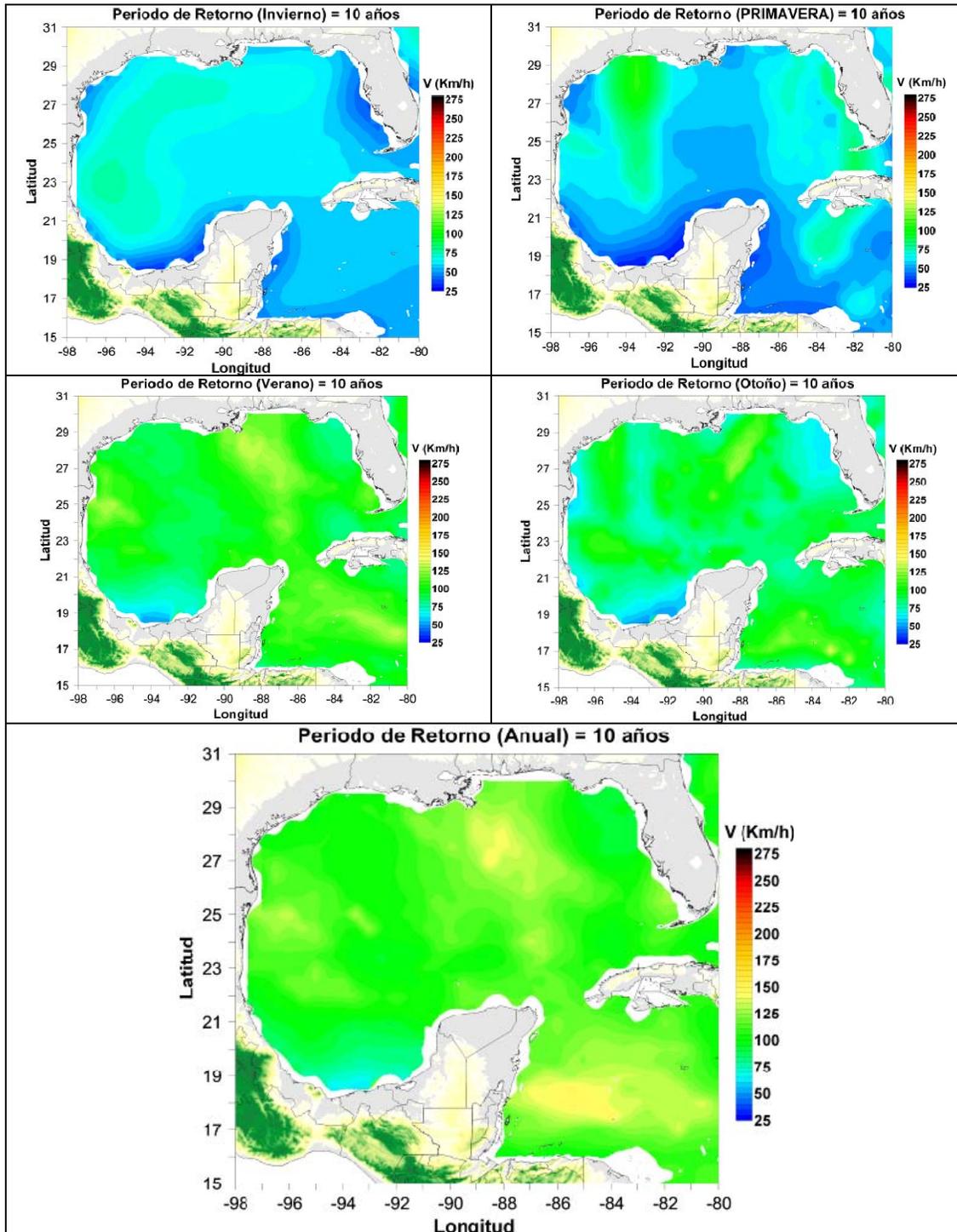


Figura A.10 Mapas de periodo de retorno de 10 años de viento en el Golfo de México

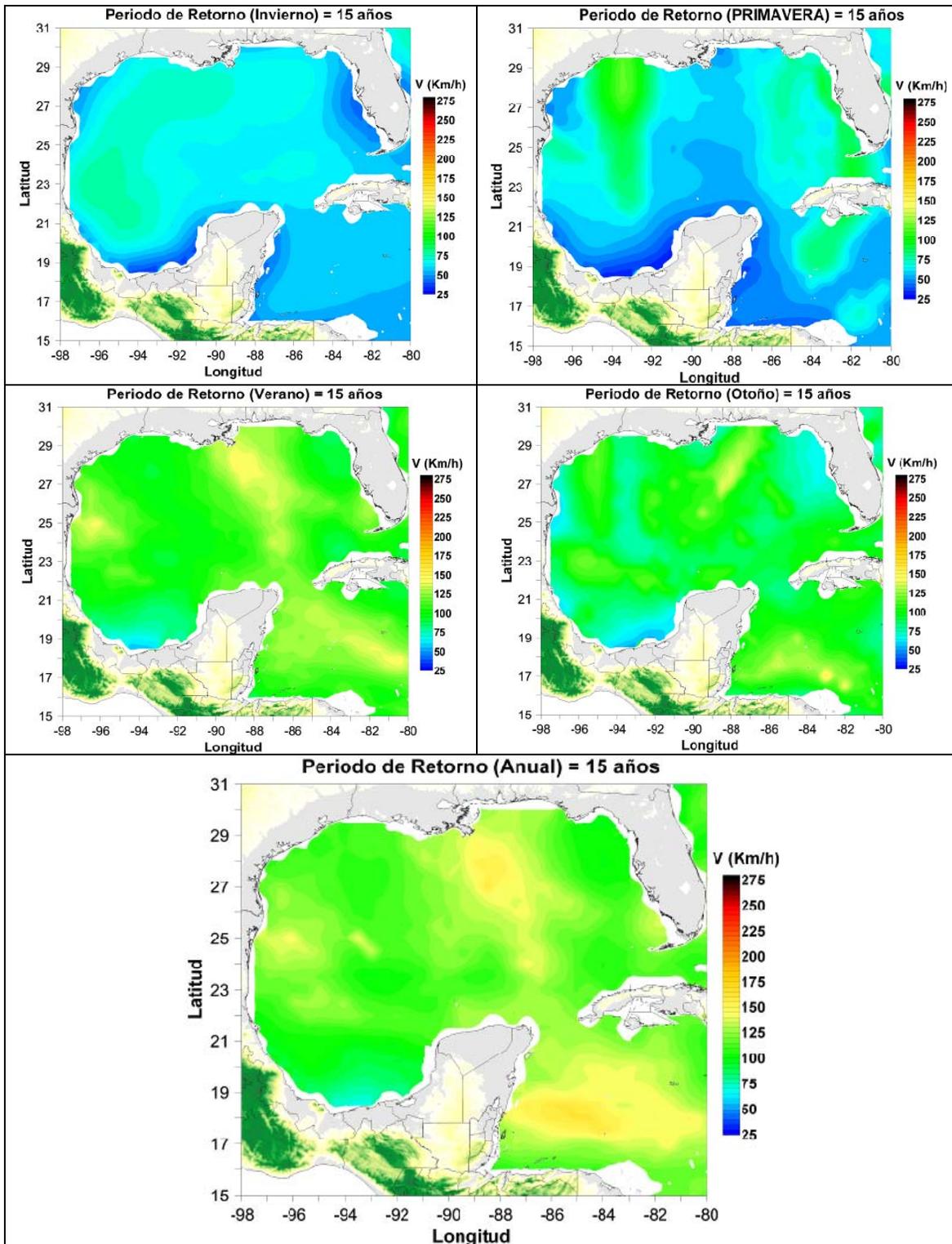


Figura A.11 Mapas de periodo de retorno de 15 años de viento en el Golfo de México

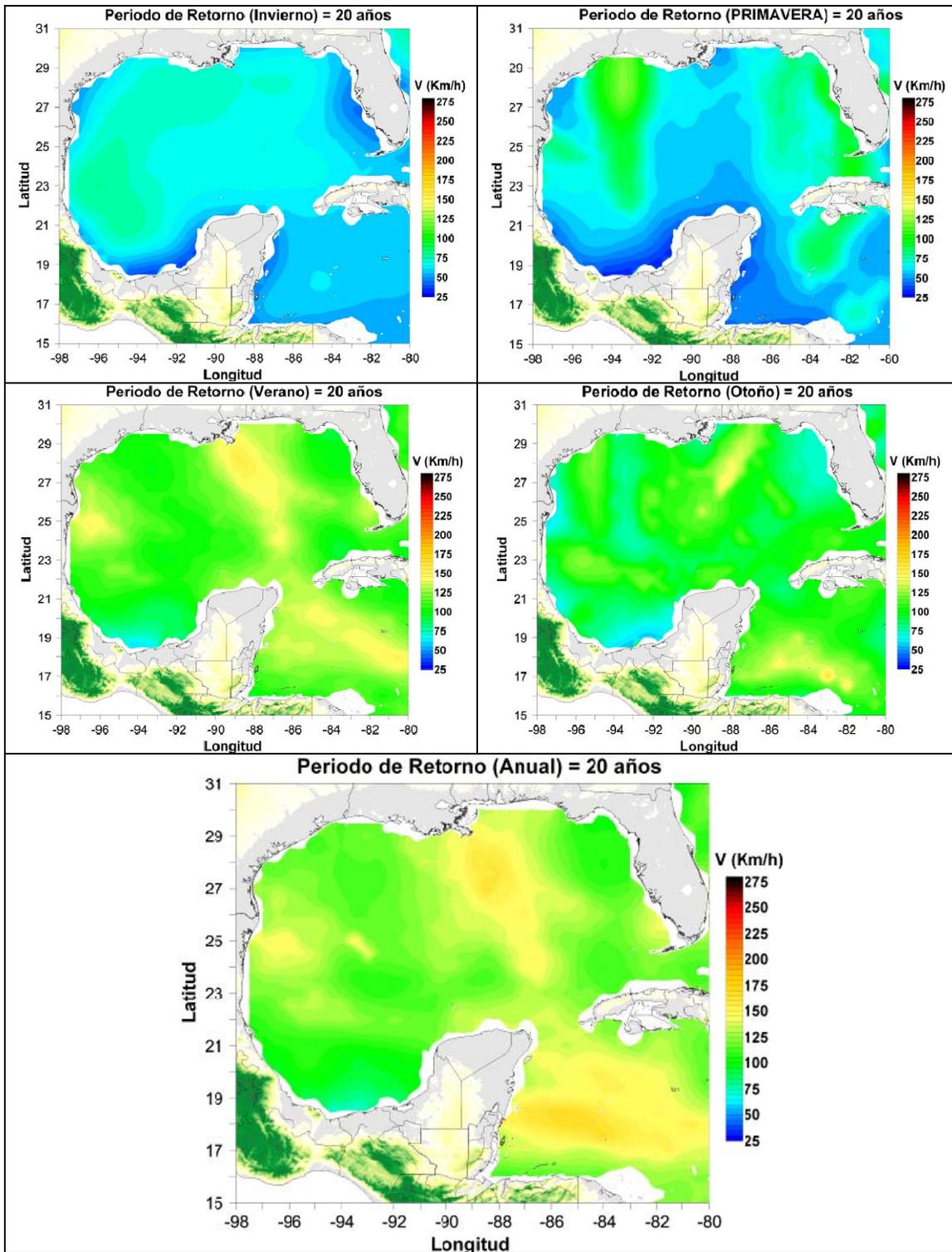


Figura A.12 Mapas de periodo de retorno de 20 años de viento en el Golfo de México

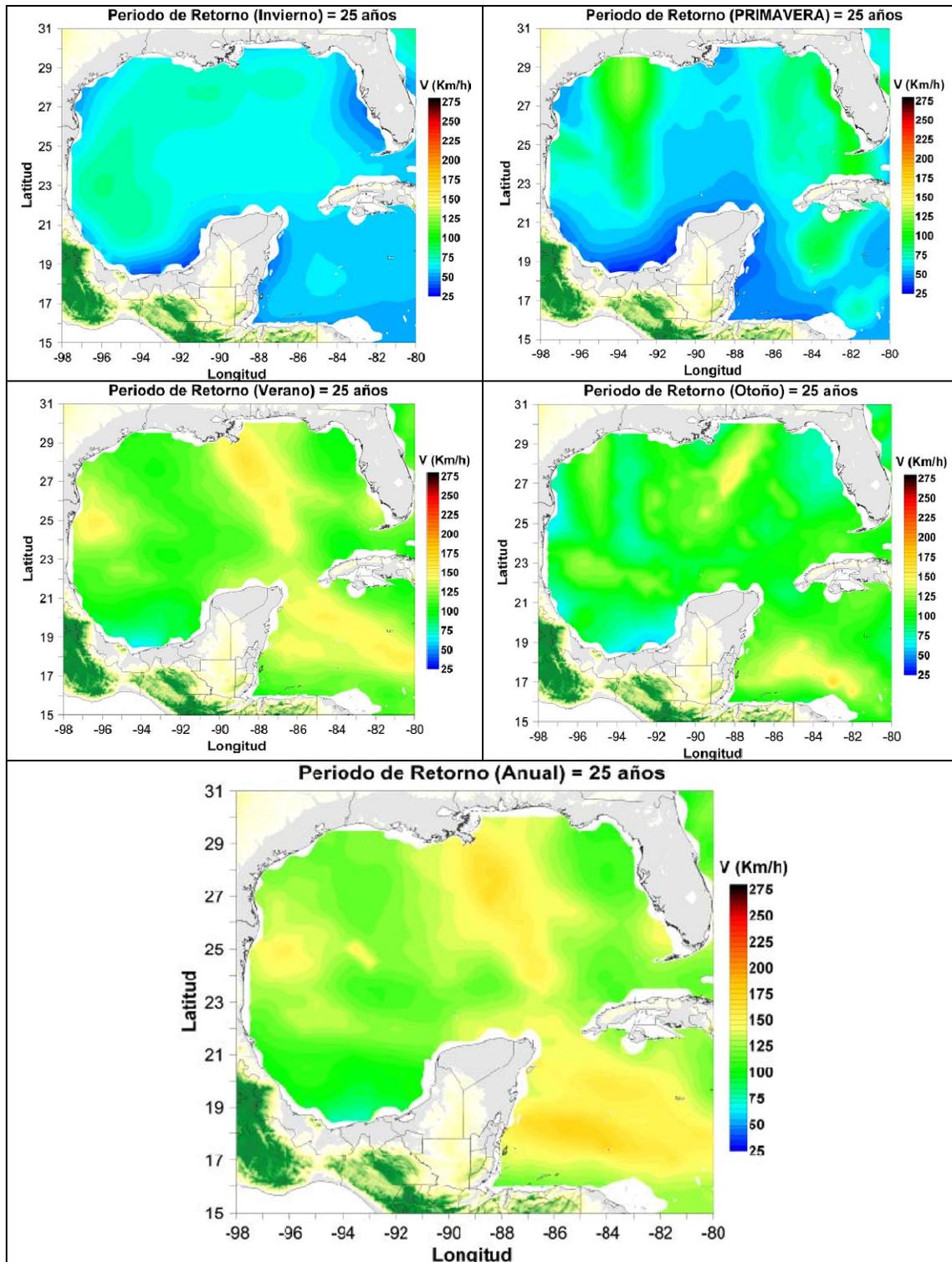


Figura A.13 Mapas de periodo de retorno de 25 años de viento en el Golfo de México

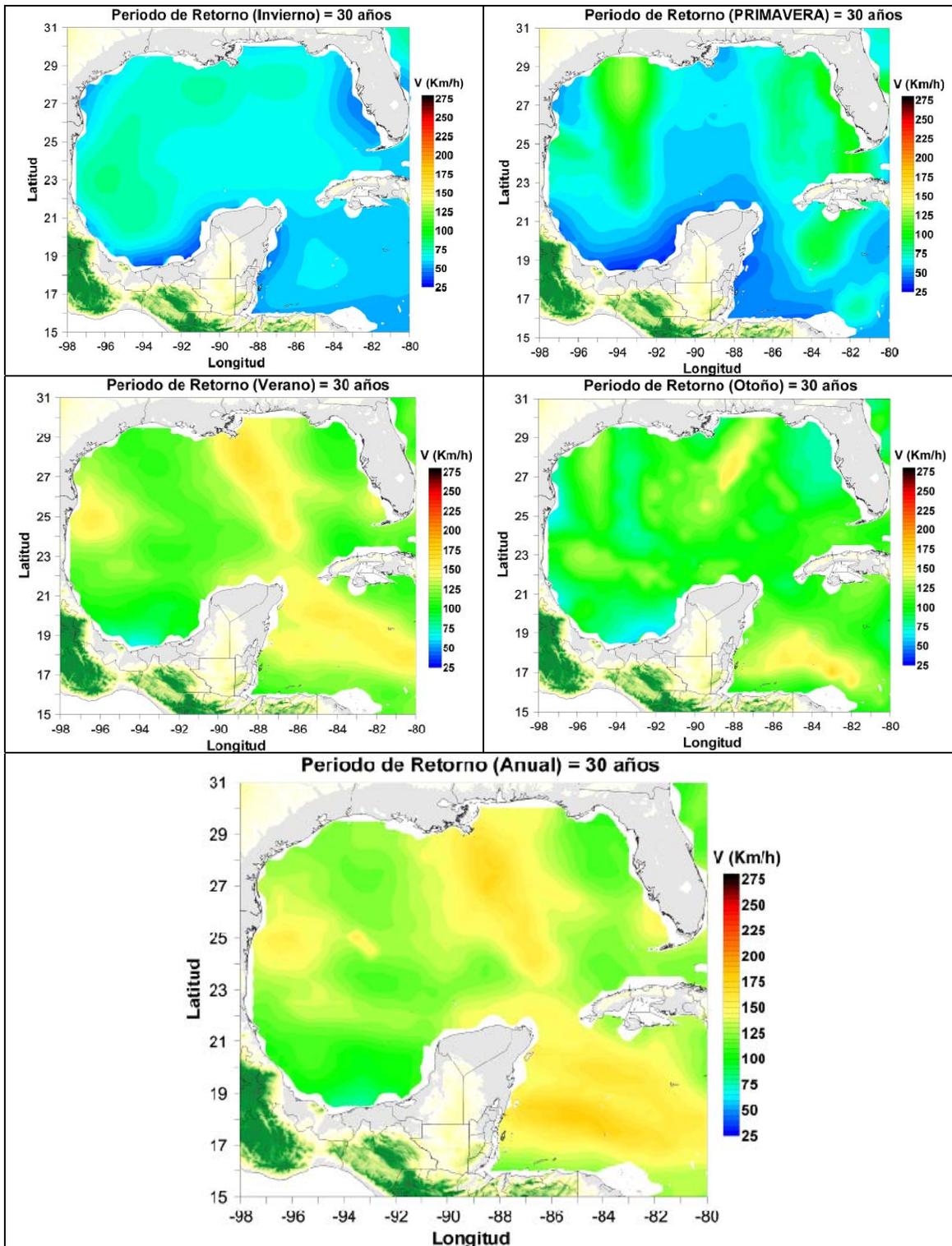


Figura A.14 Mapas de periodo de retorno de 30 años de viento en el Golfo de México

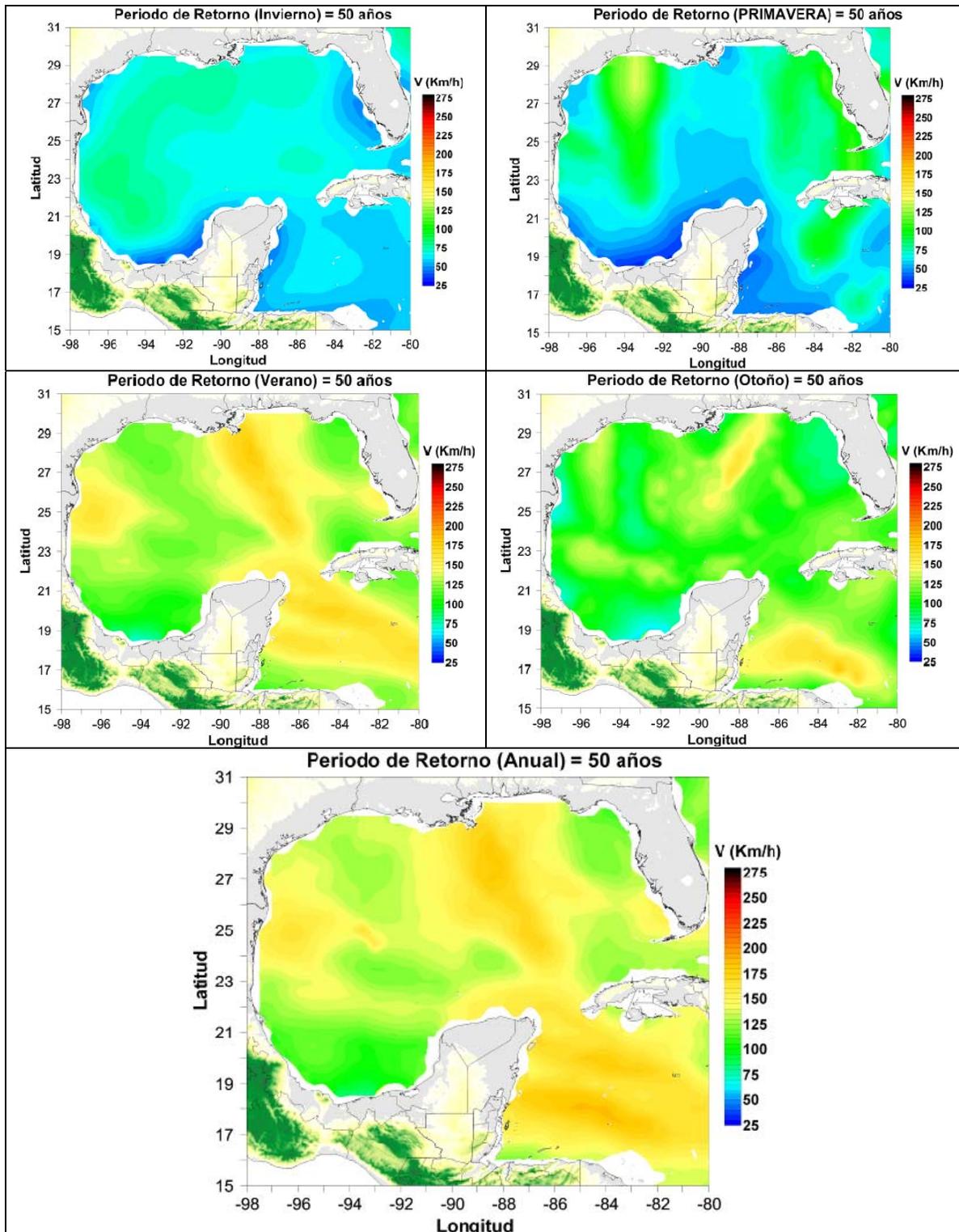


Figura A.15 Mapas de periodo de retorno de 50 años de viento en el Golfo de México

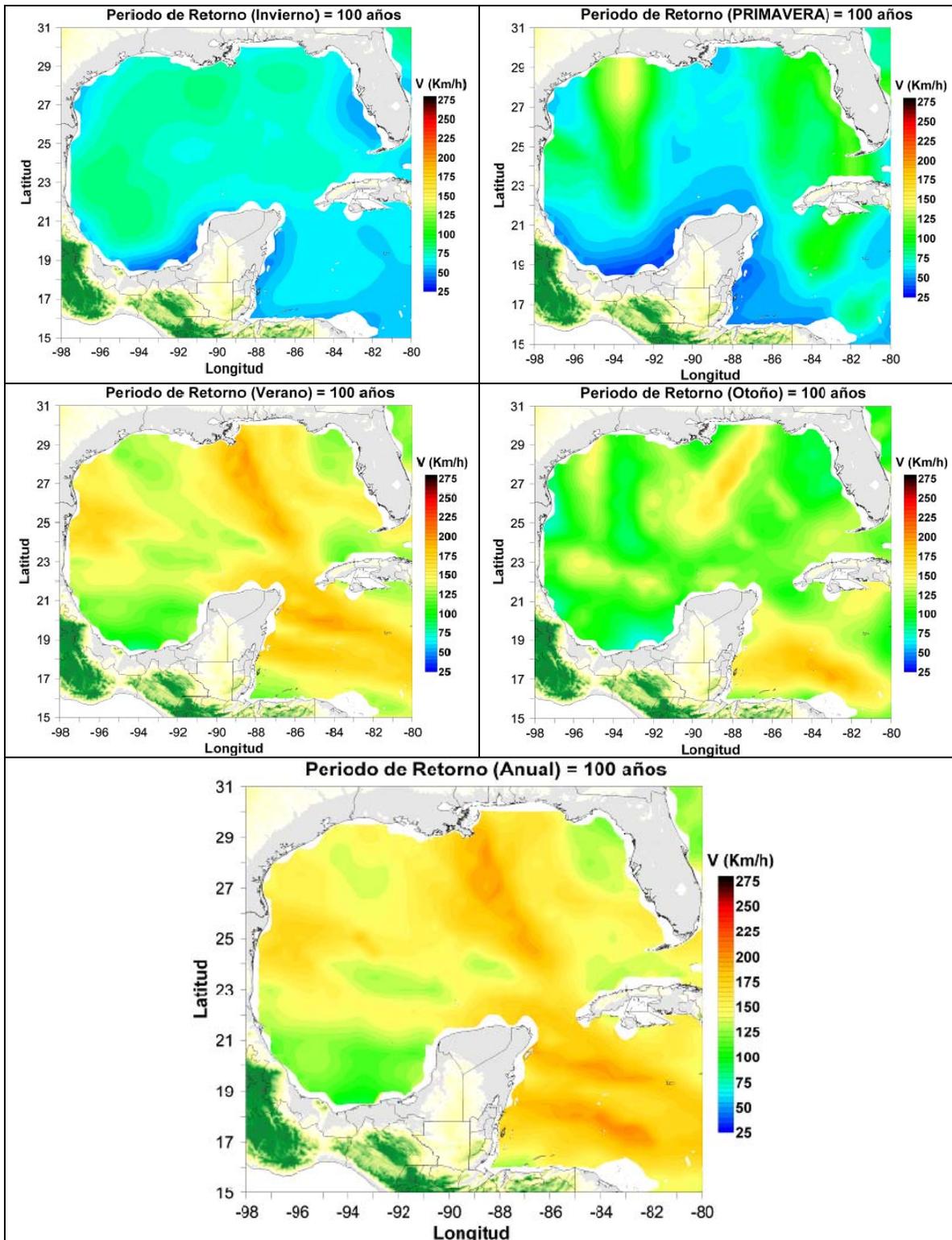


Figura A.16 Mapas de periodo de retorno de 100 años de viento en el Golfo de México

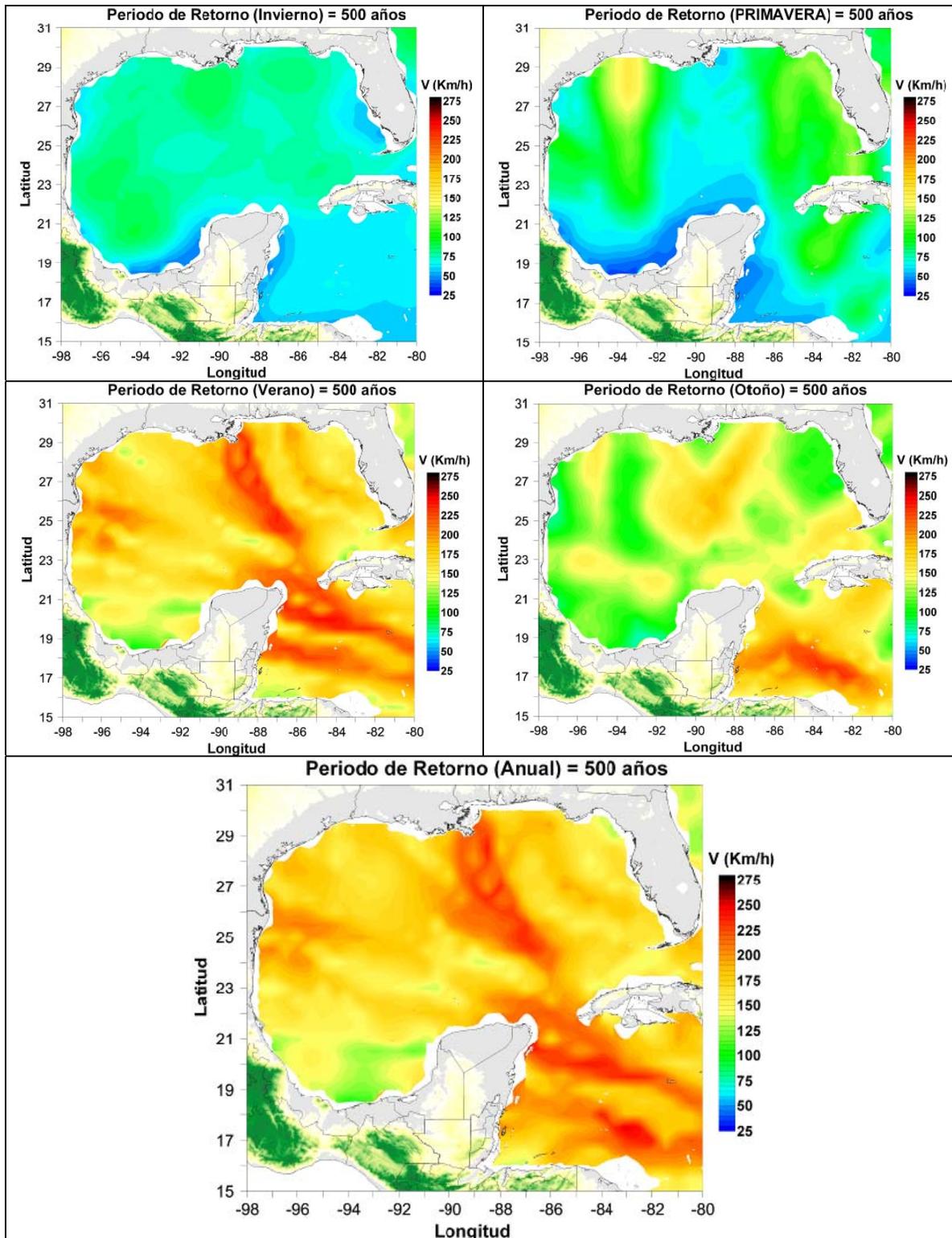


Figura A.17 Mapas de periodo de retorno de 500 años de viento en el Golfo de México

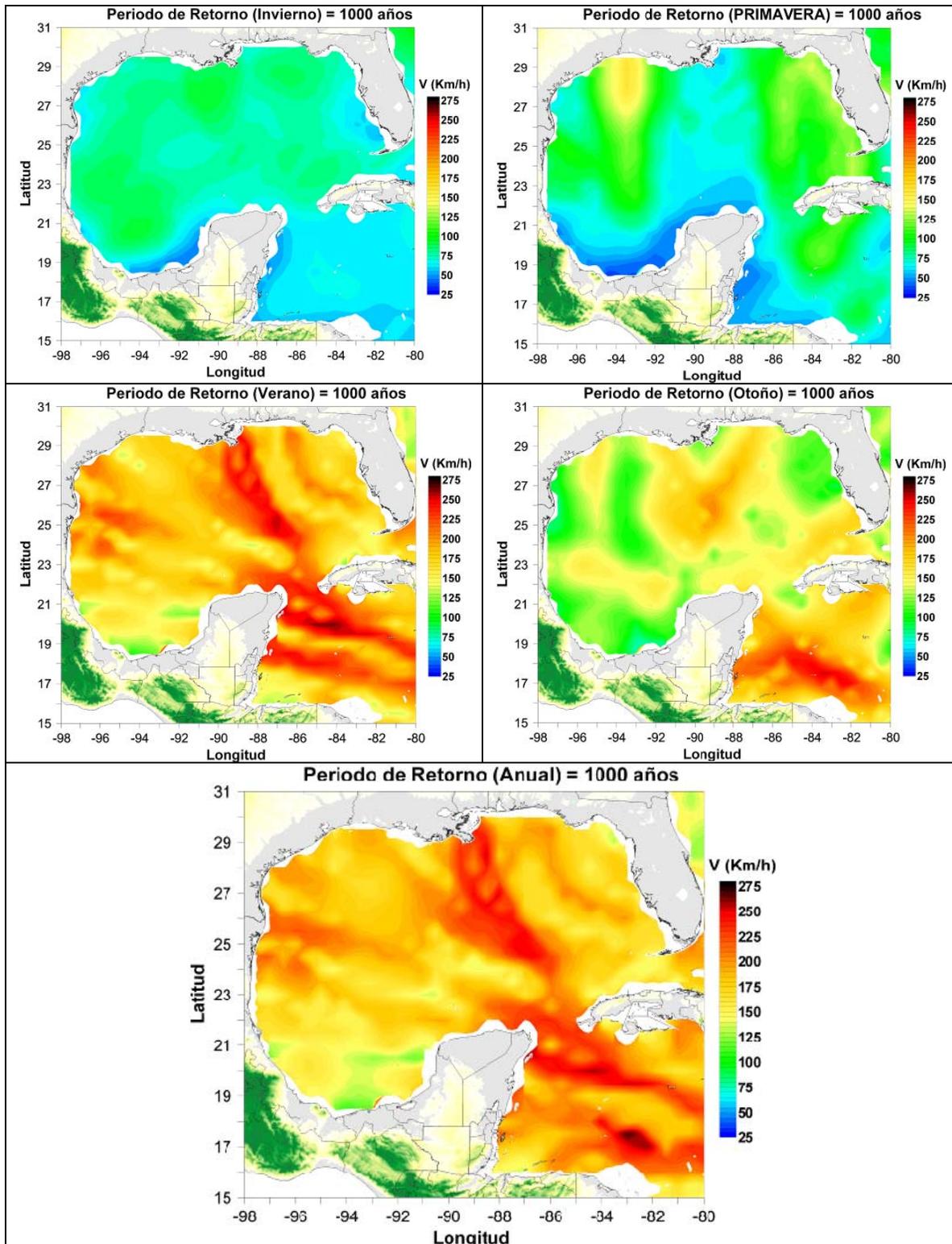


Figura A.18 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de viento en el Golfo de México

## APÉNDICE 2

## B APÉNDICE 2

### B.1.1 Mapas de altura de ola significativa para la vertiente pacífica

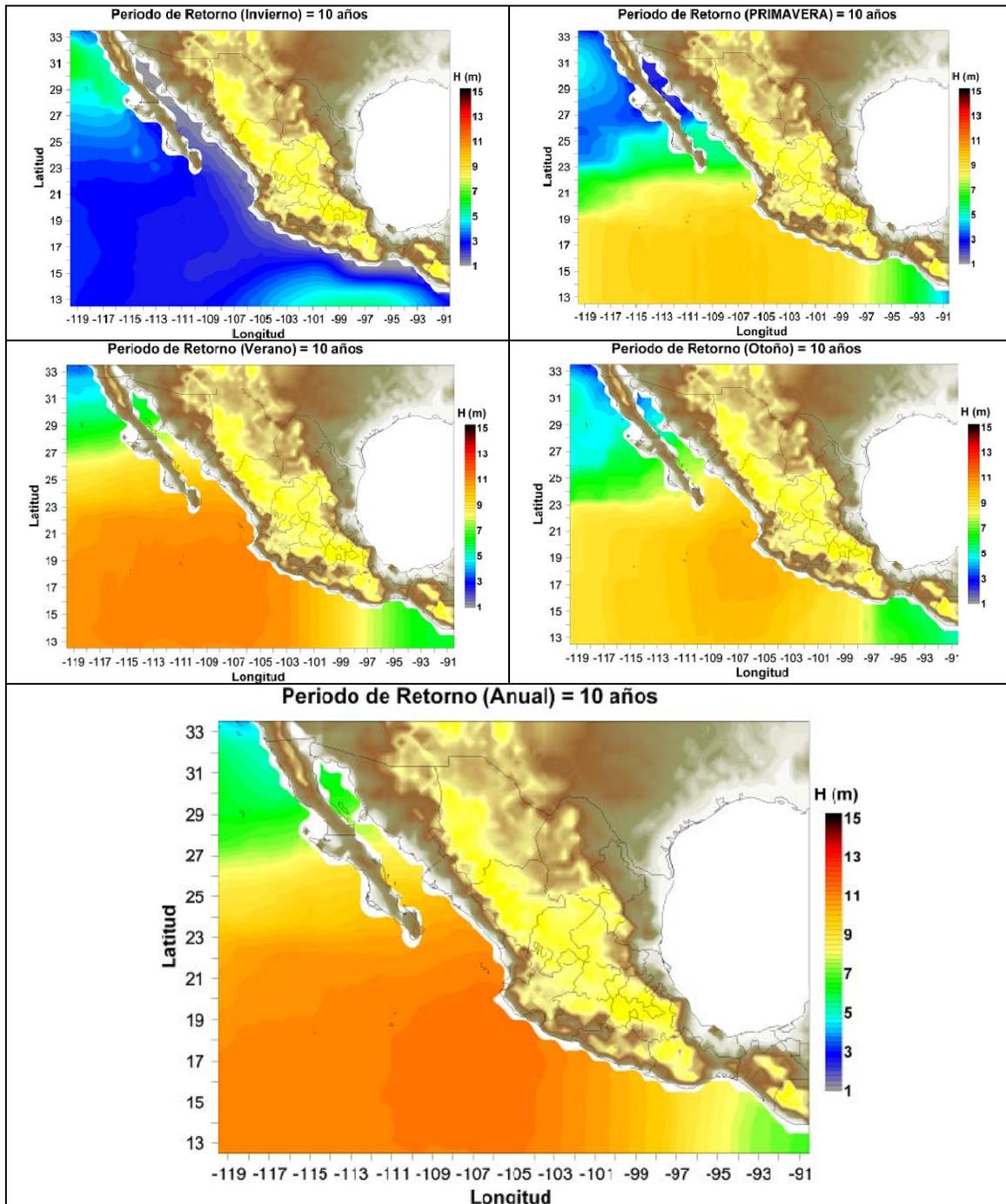


Figura B.1 Mapas de periodo de retorno de 10 años de altura de ola para Pacífico Mexicano

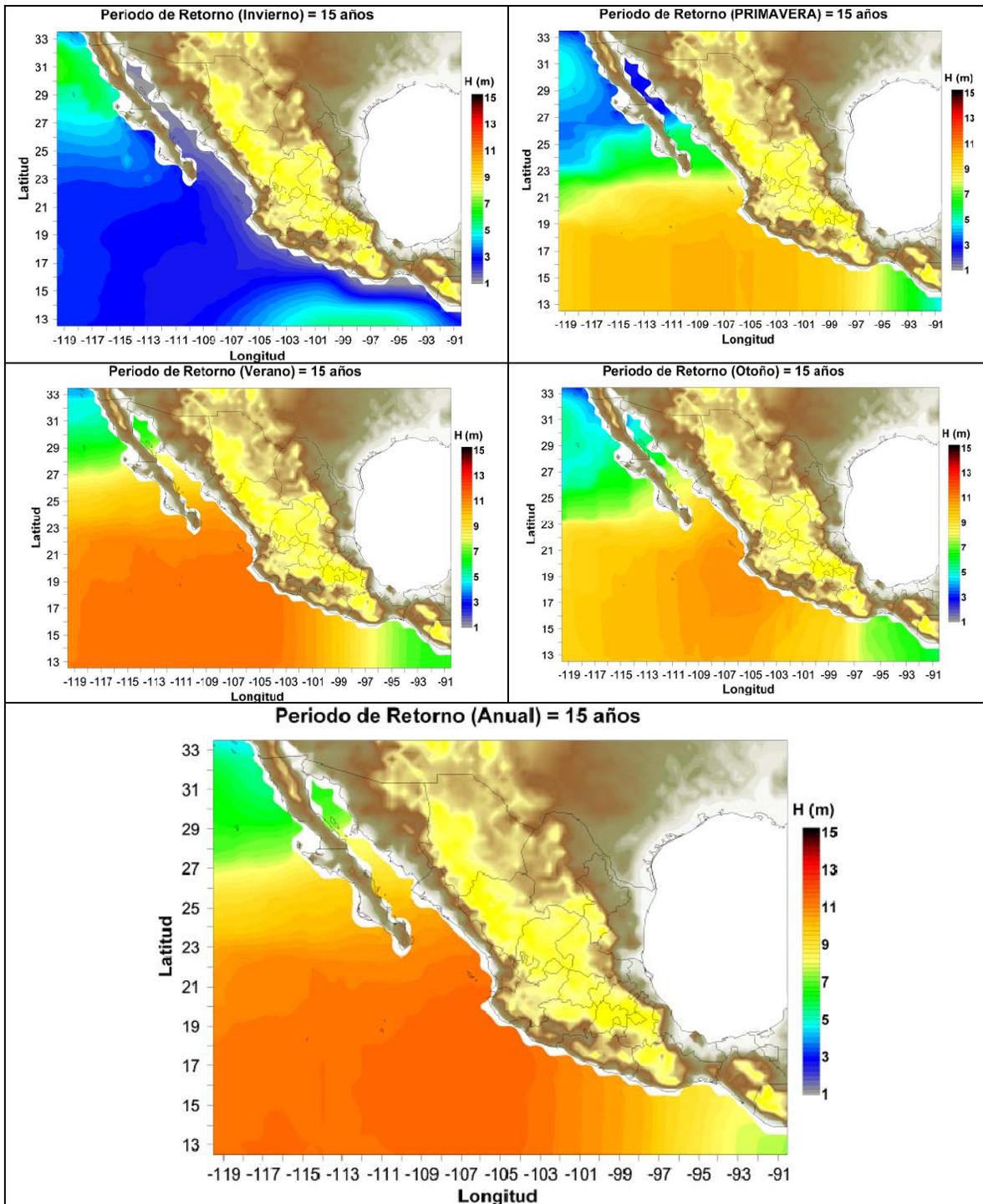


Figura B.2 Mapas de periodo de retorno de 15 años de altura de ola para Pacífico Mexicano

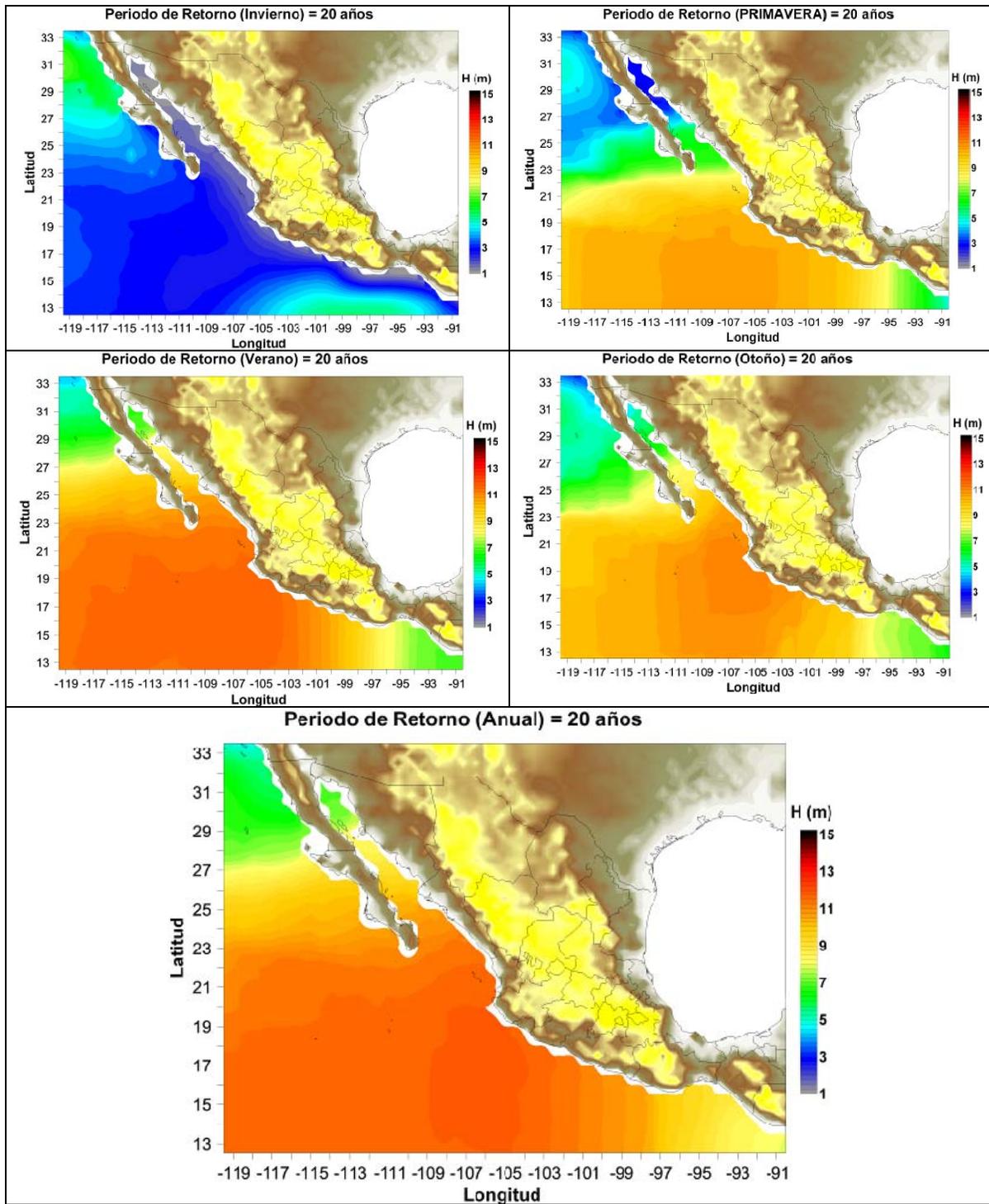


Figura B.3 Mapas de periodo de retorno de 20 años de altura de ola para Pacifico Mexicano

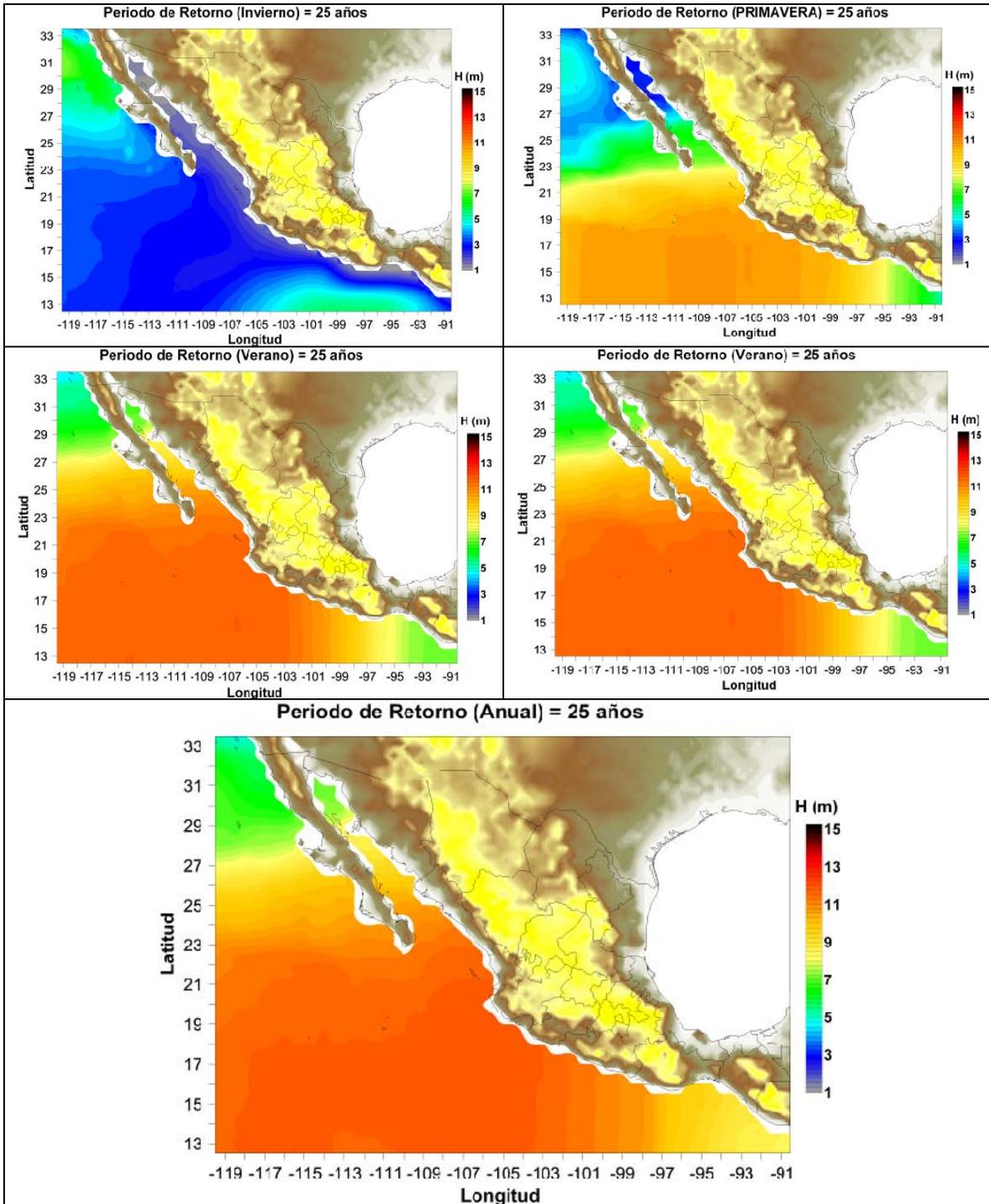


Figura B.4 Mapas de periodo de retorno de 25 años de altura de ola para Pacifico Mexicano

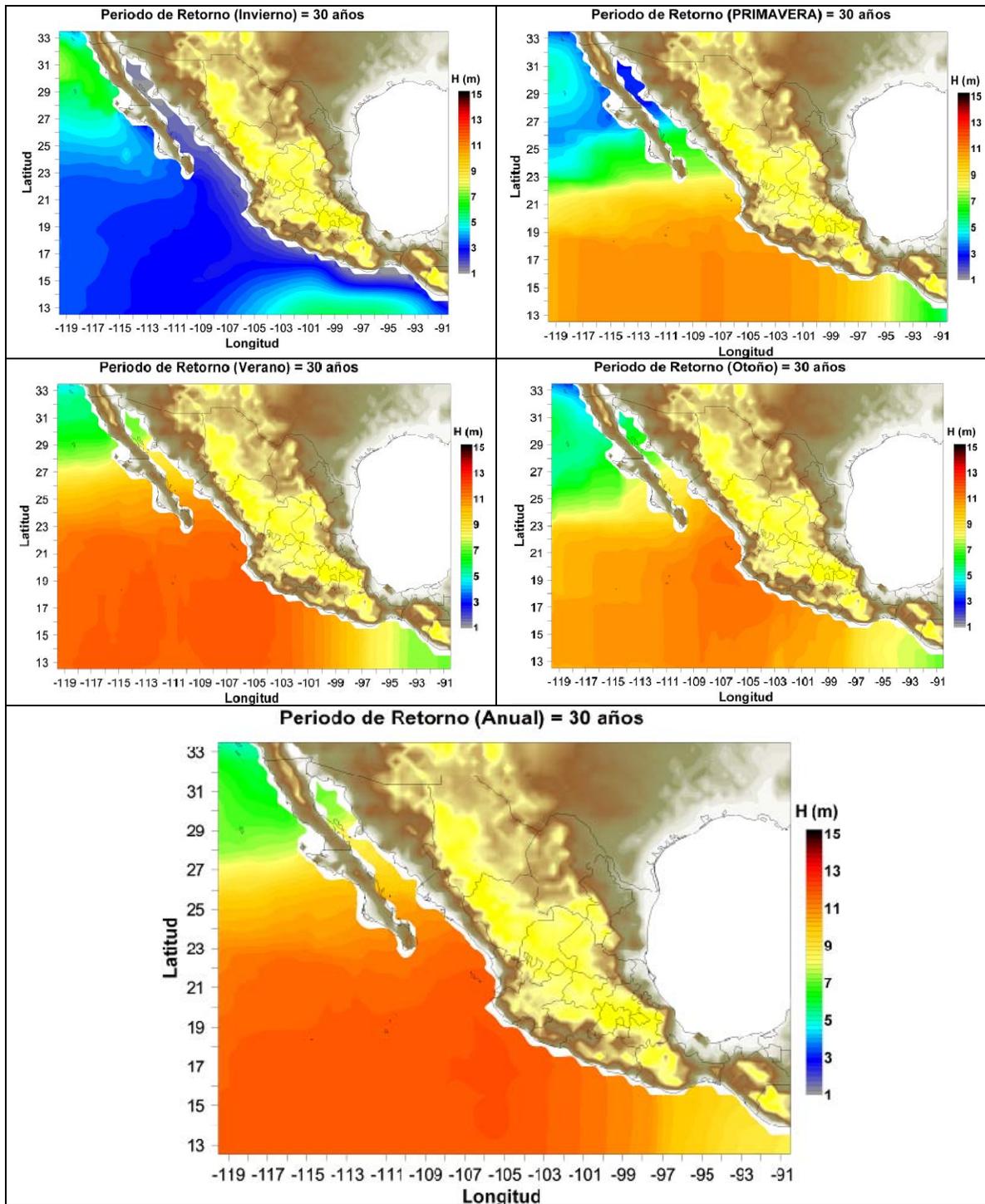


Figura B.5 Mapas de periodo de retorno de 30 años de altura de ola para Pacifico Mexicano

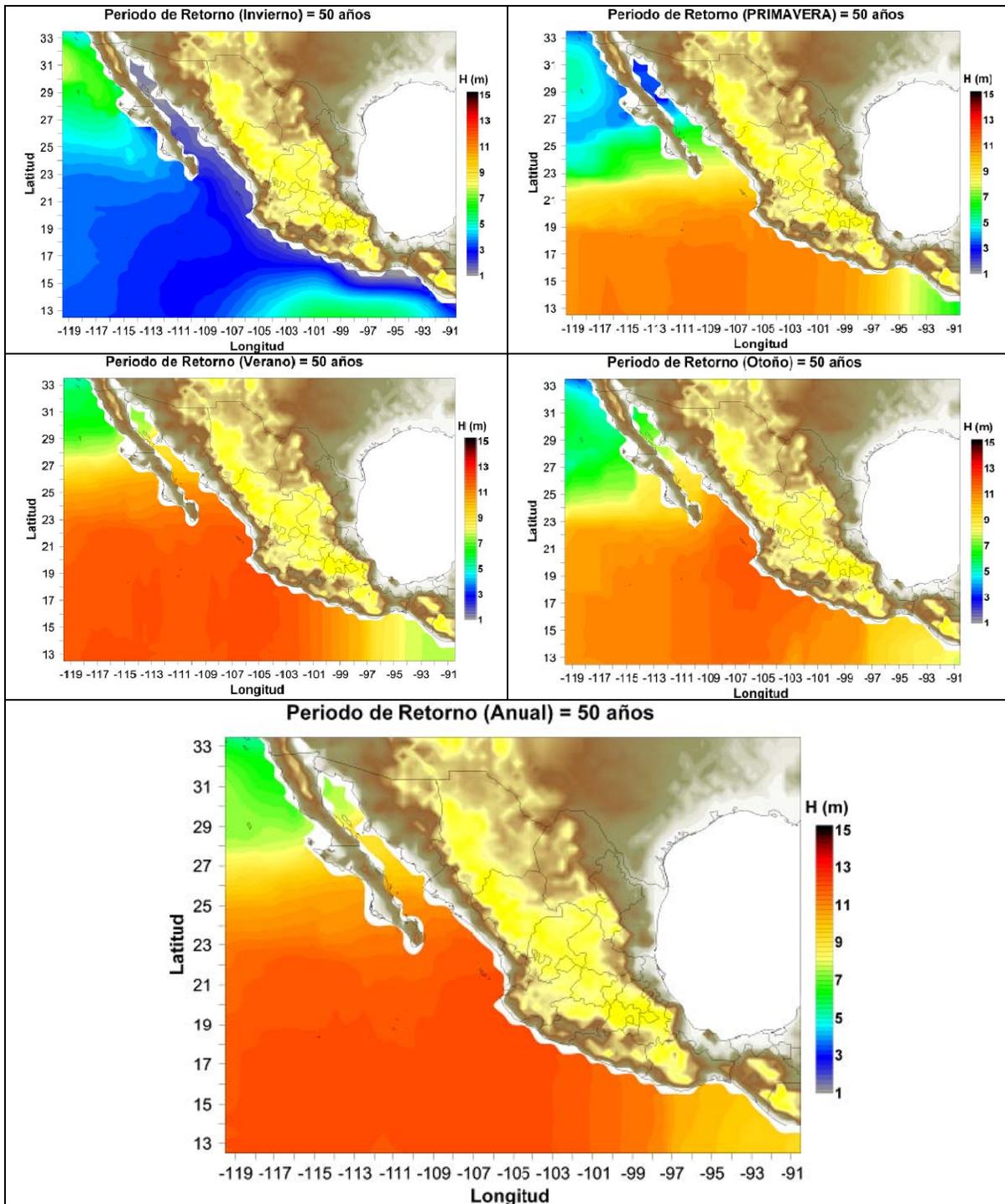


Figura B.6 Mapas de periodo de retorno de 50 años de altura de ola para Pacifico Mexicano

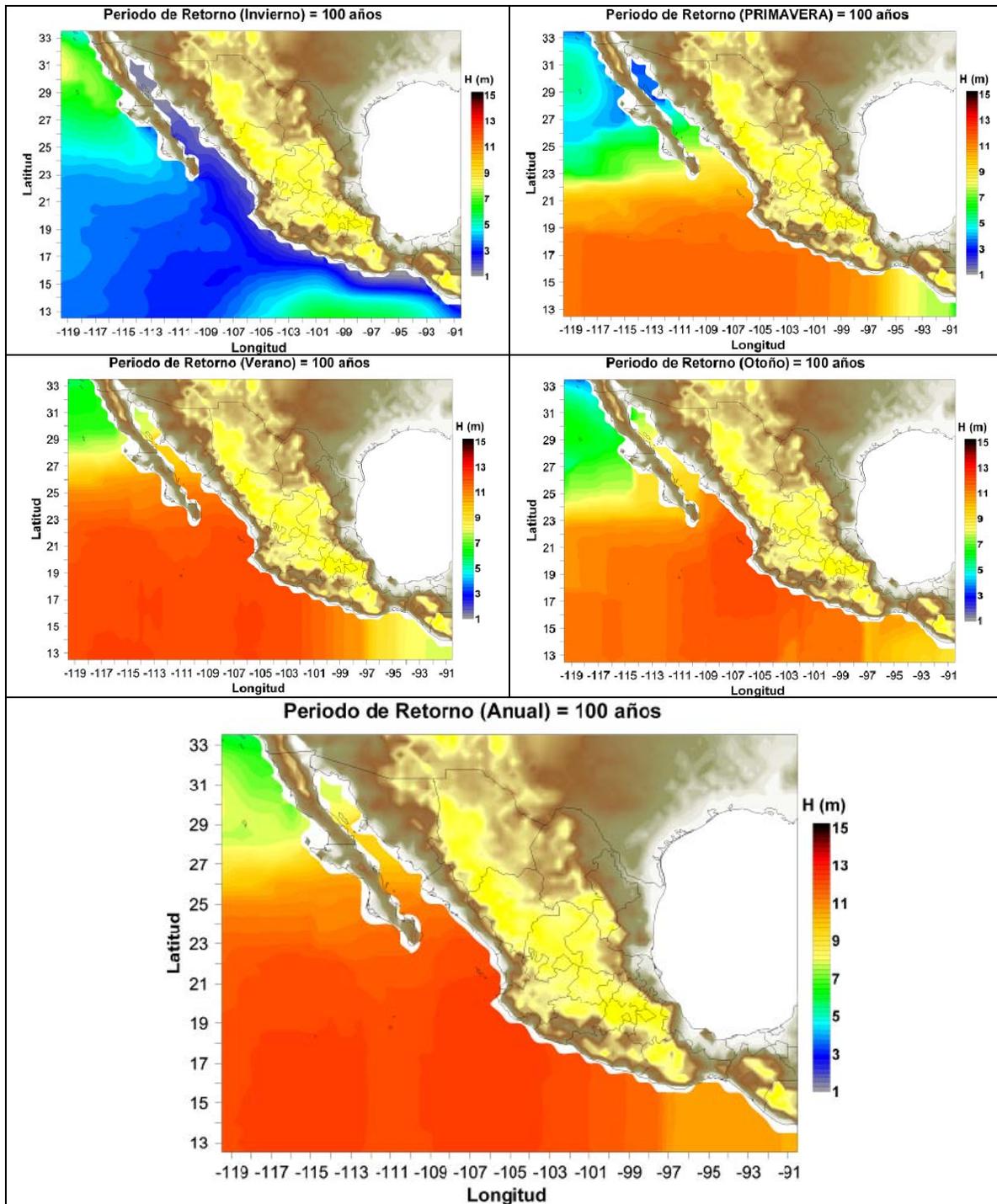


Figura B.7 Mapas de periodo de retorno de 100 años de altura de ola para Pacífico Mexicano

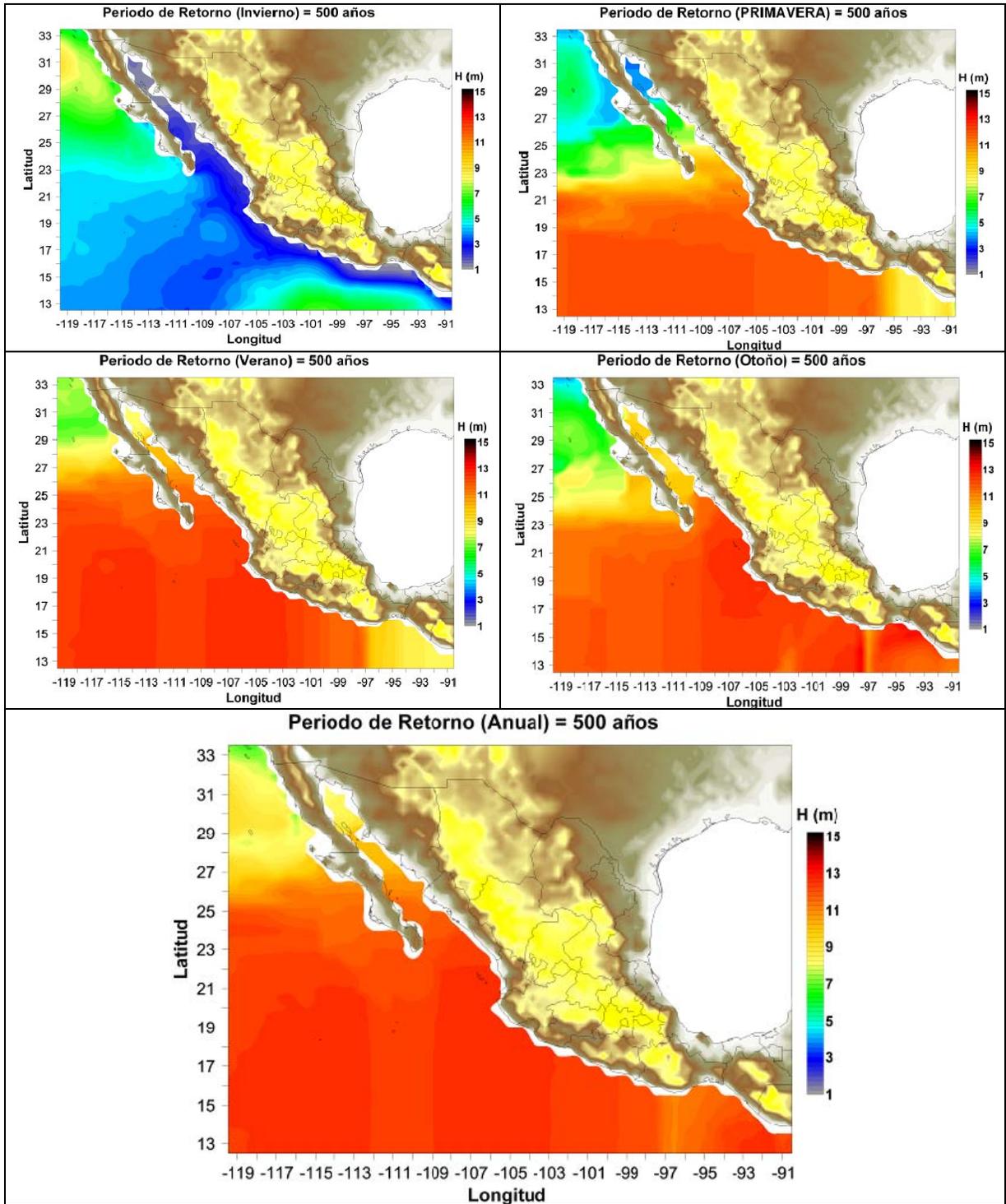


Figura B.8 Mapas de periodo de retorno de 500 años de altura de ola para Pacífico Mexicano

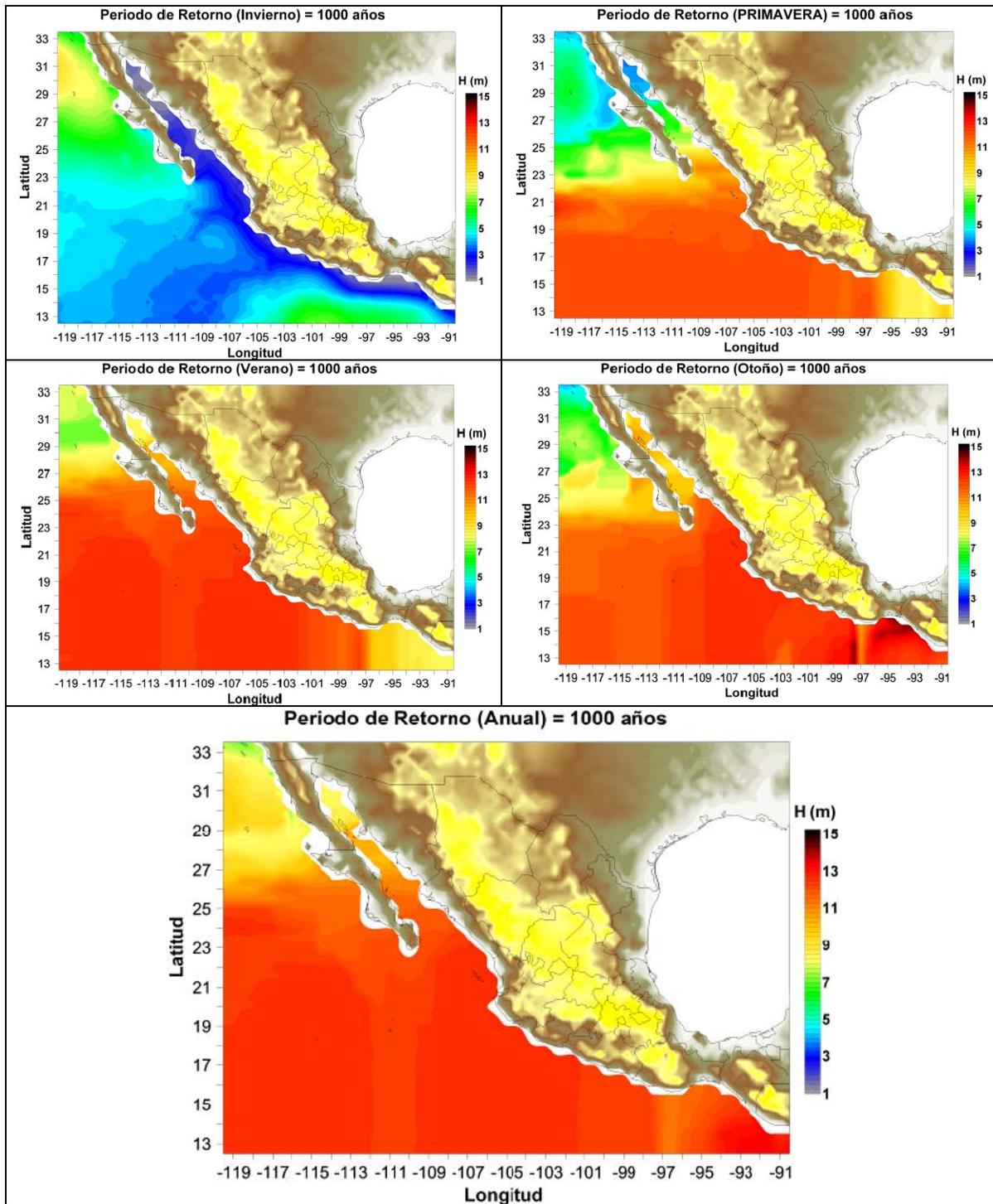


Figura B.9 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de altura de ola para Pacífico Mexicano

## B.2 Mapas de viento sostenido para la vertiente pacífica

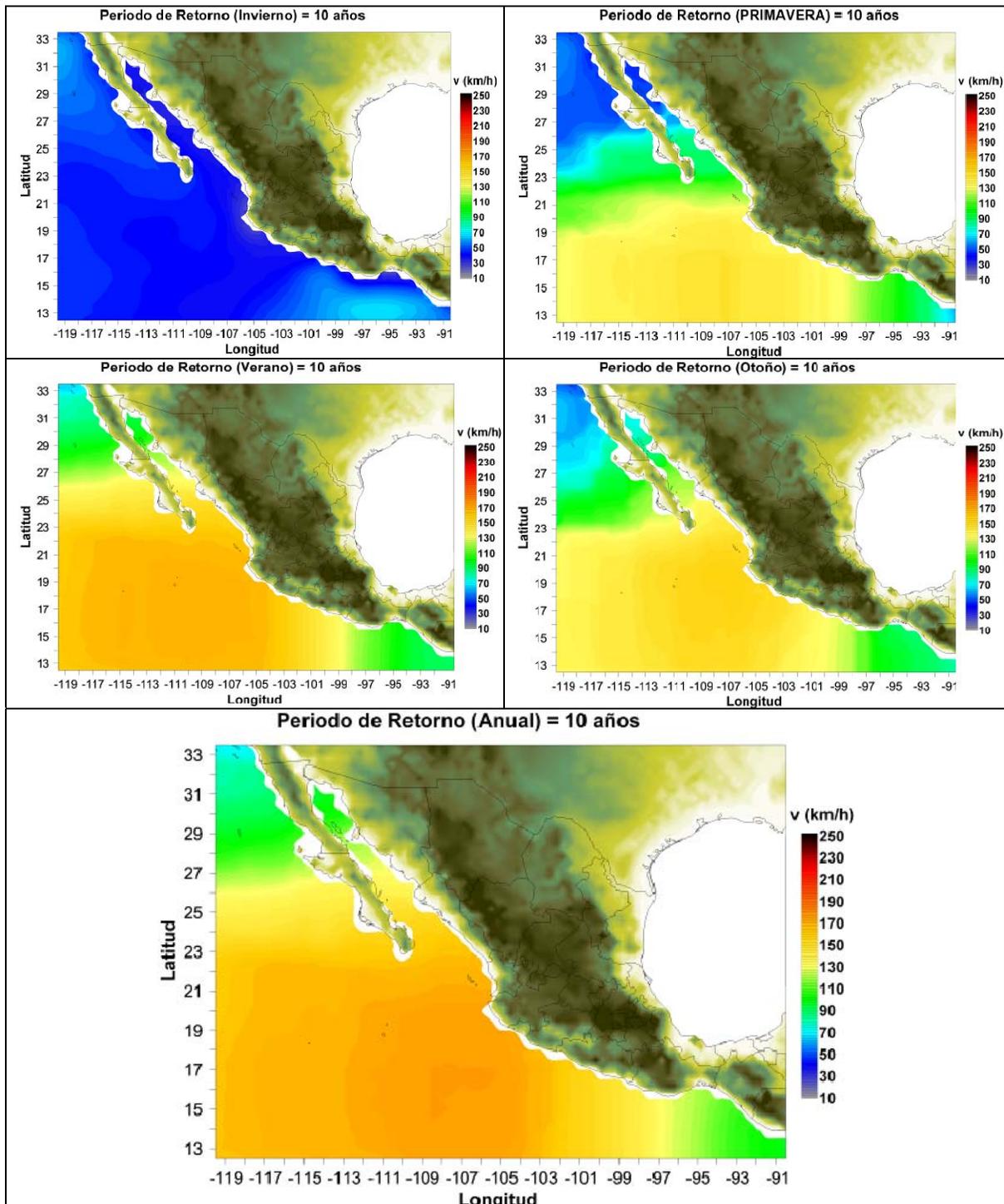


Figura B.10 Mapas de periodo de retorno de 10 años de viento para Pacífico Mexicano

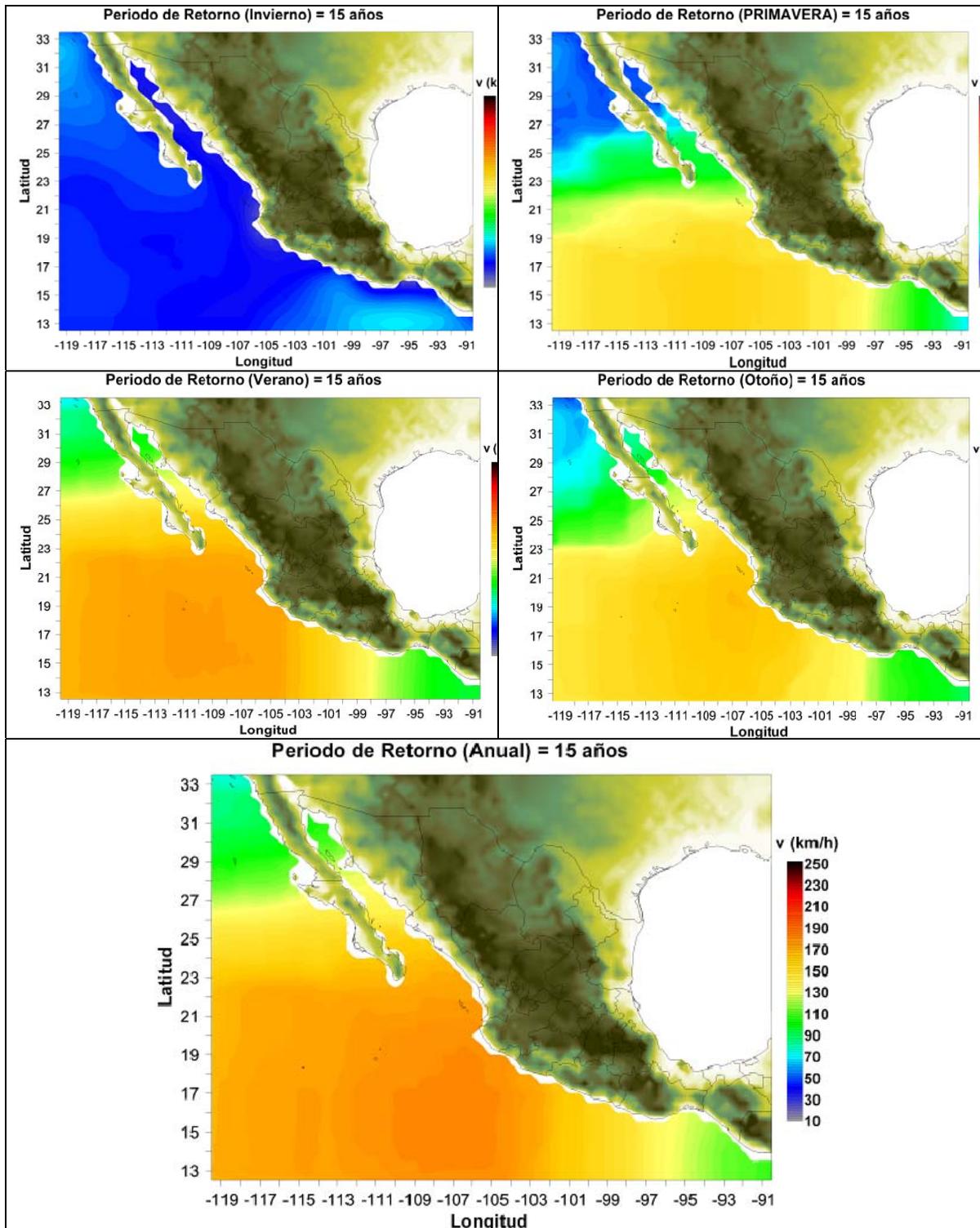


Figura B.11 Mapas de periodo de retorno de 15 años de viento para Pacífico Mexicano

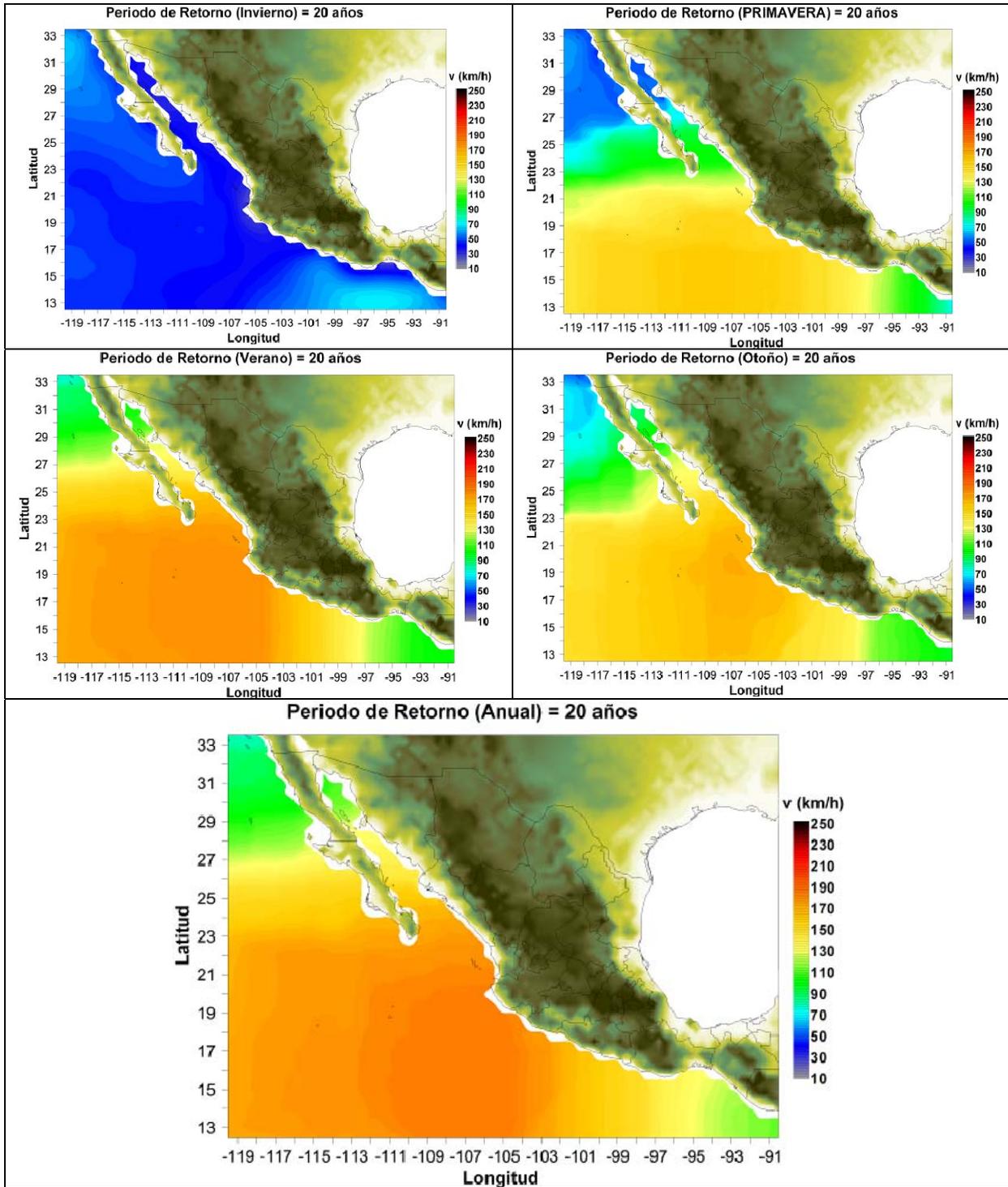


Figura B.12 Mapas de periodo de retorno de 20 años de viento para Pacífico Mexicano

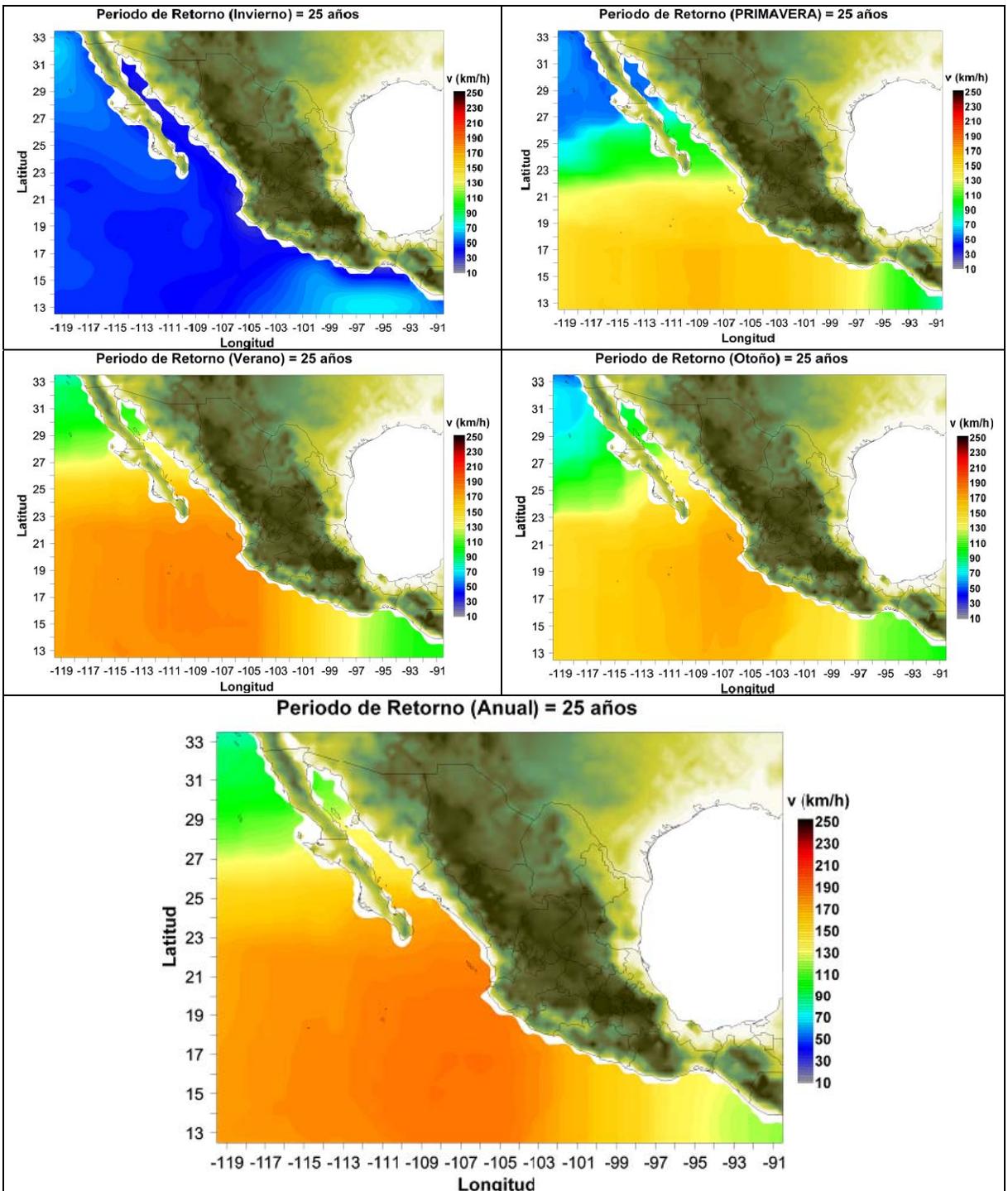


Figura B.13 Mapas de periodo de retorno de 25 años de viento para Pacifico Mexicano

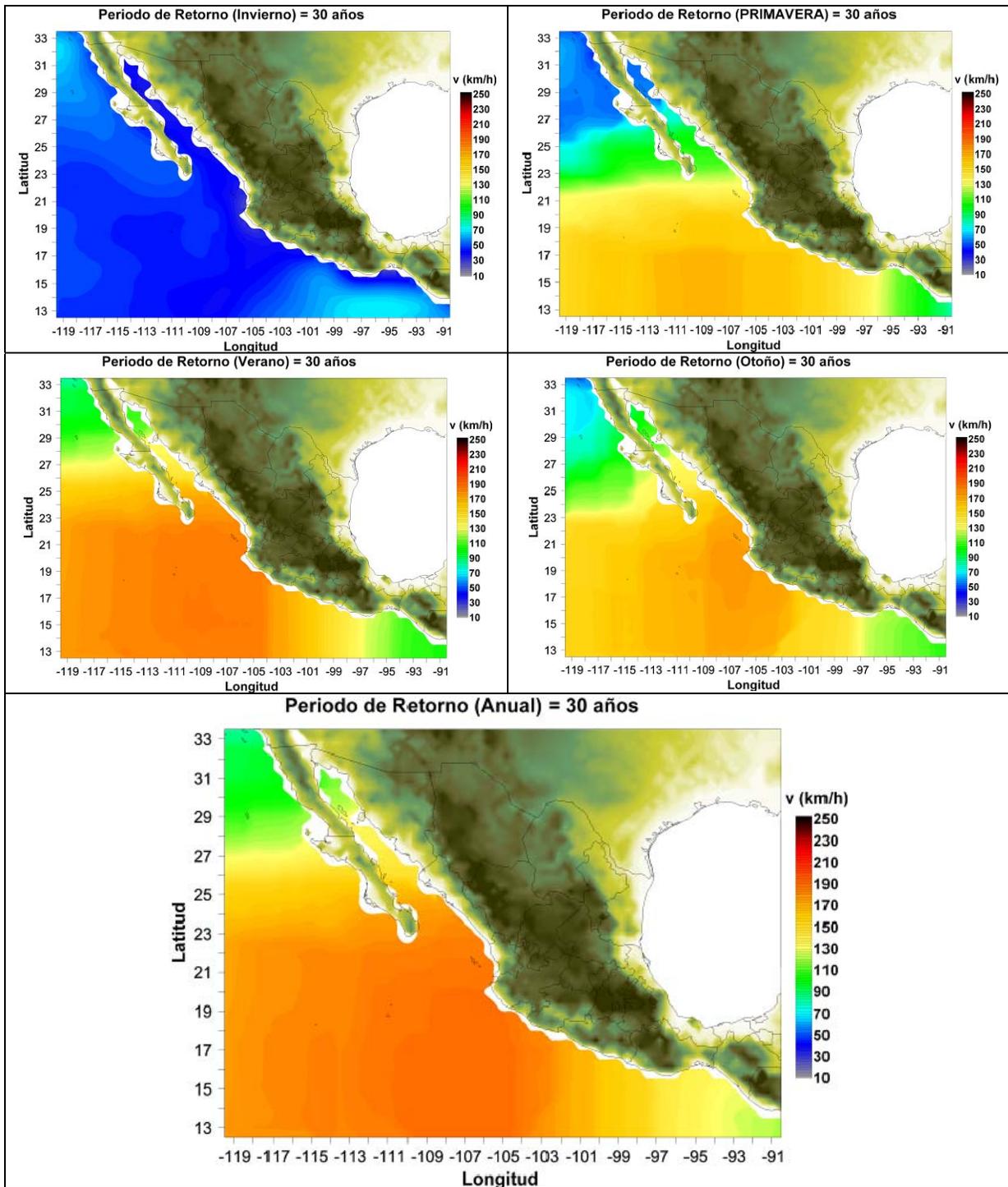


Figura B.14 Mapas de periodo de retorno de 30 años de viento para Pacífico Mexicano

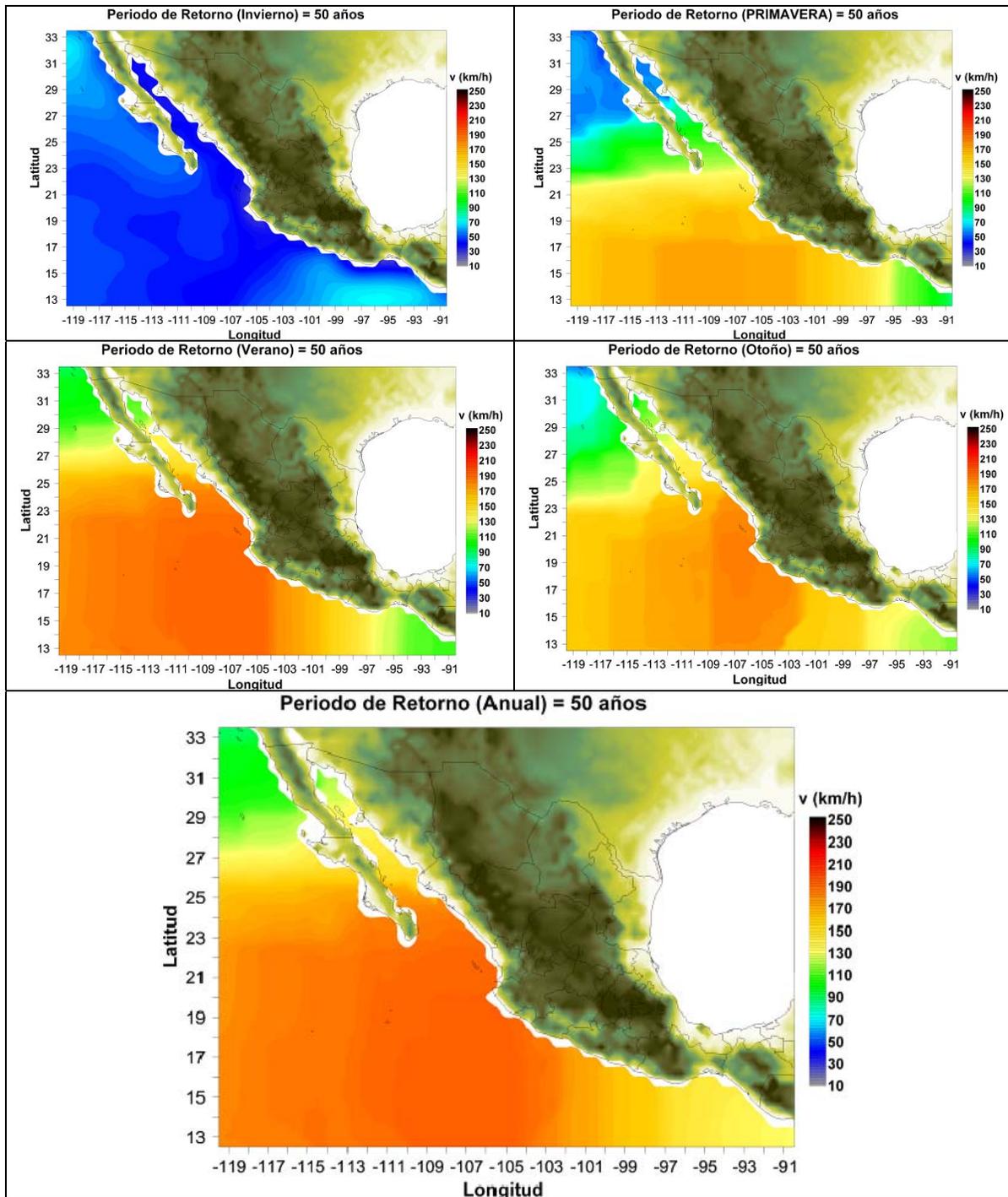


Figura B.15 Mapas de periodo de retorno de 50 años de viento para Pacífico Mexicano

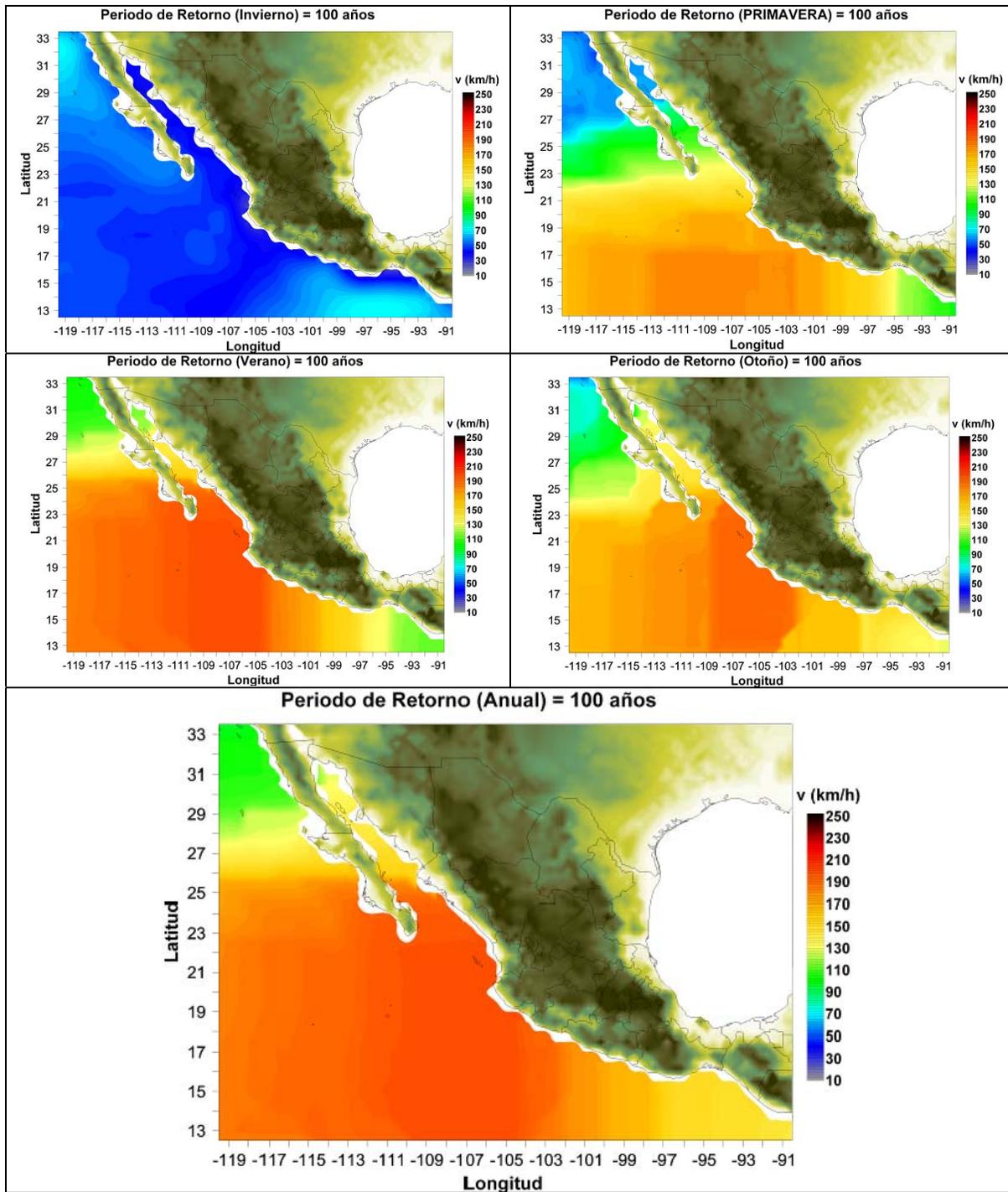


Figura B.16 Mapas de periodo de retorno de 100 años de viento para Pacífico Mexicano

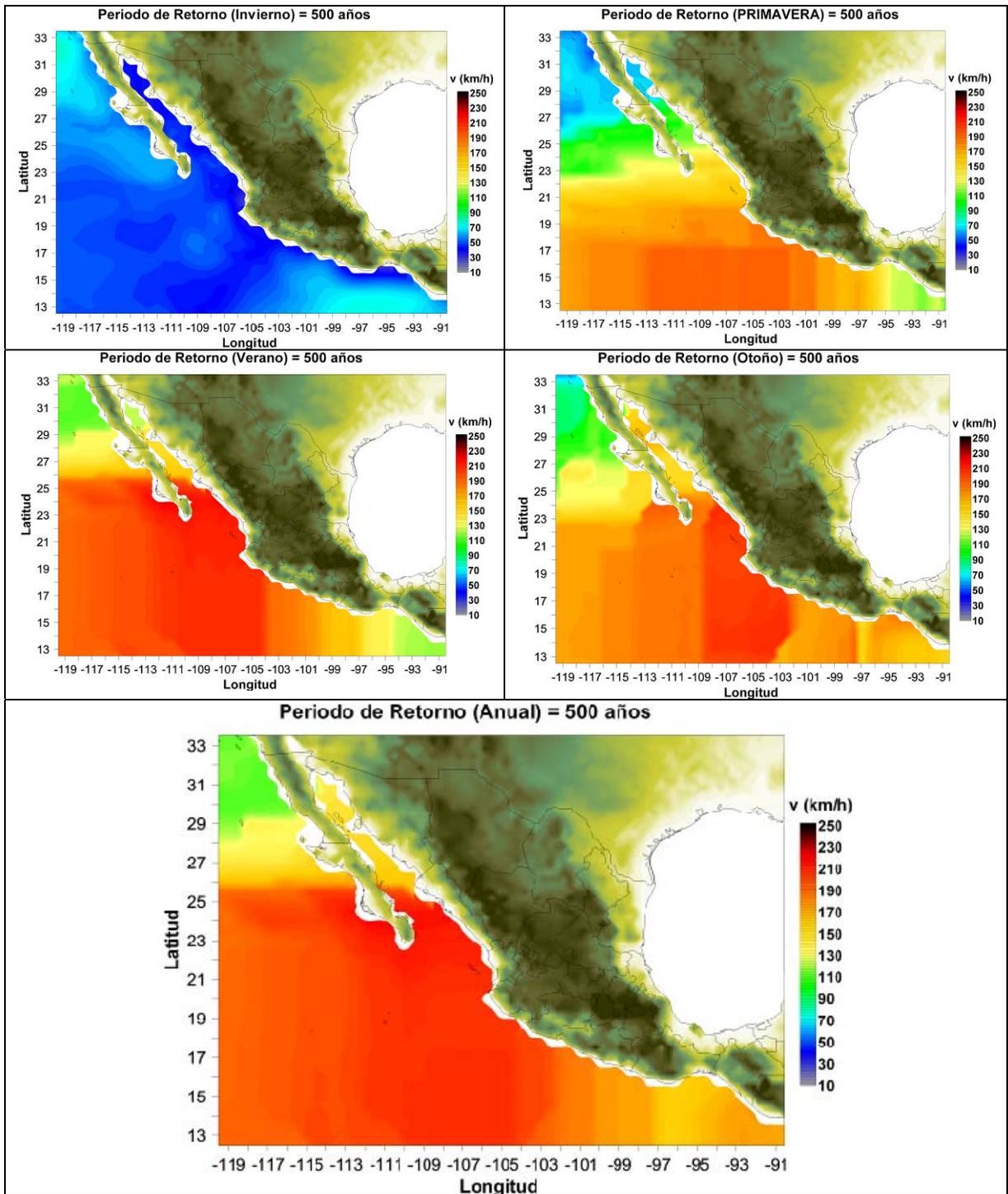


Figura B.17 Mapas de periodo de retorno de 500 años de viento para Pacífico Mexicano

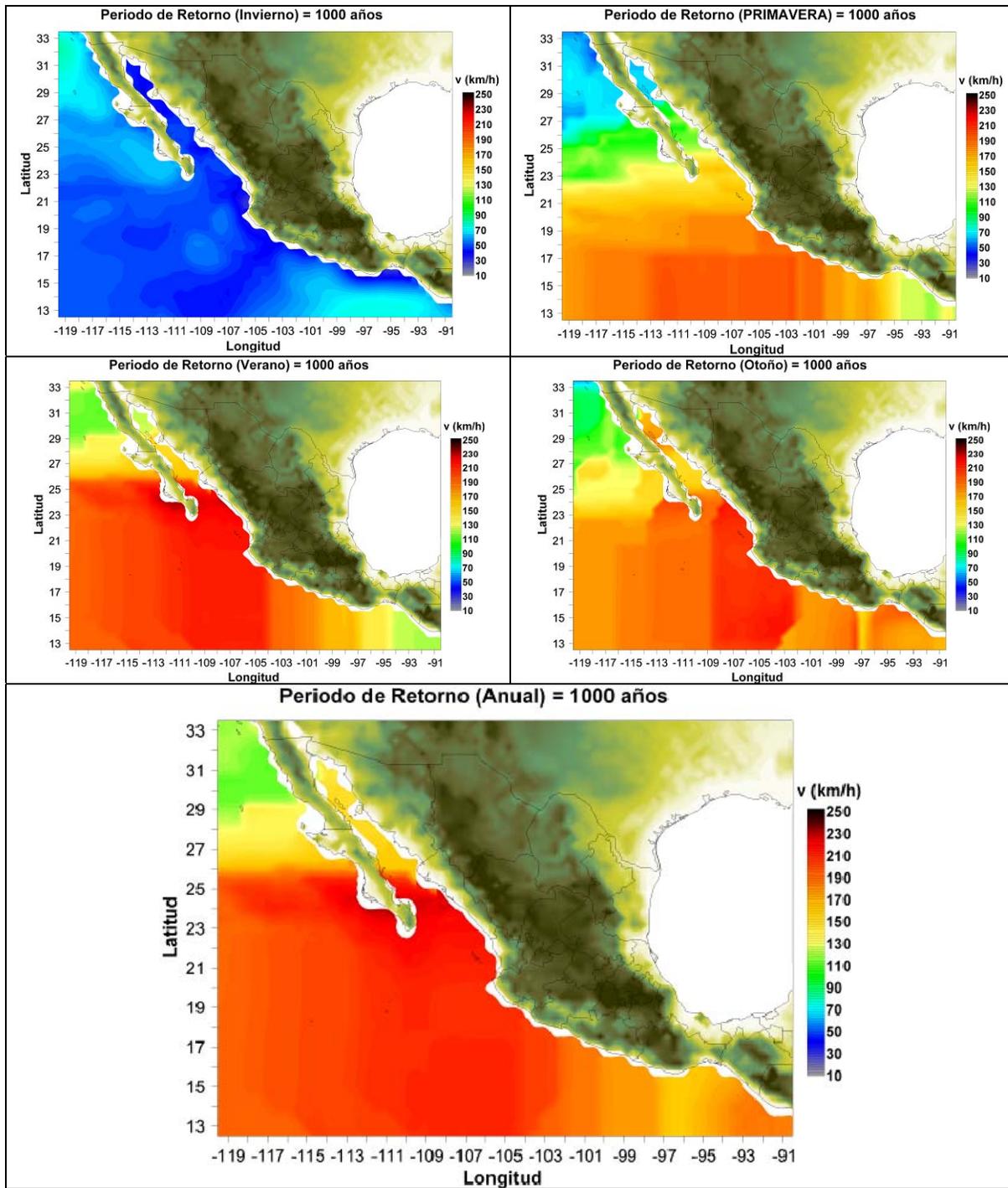


Figura B.18 Mapas de periodo de retorno de 1000 años de viento para Pacifico Mexicano

### B.3 Análisis de tormentas

#### B.3.1 Análisis 1948-2007

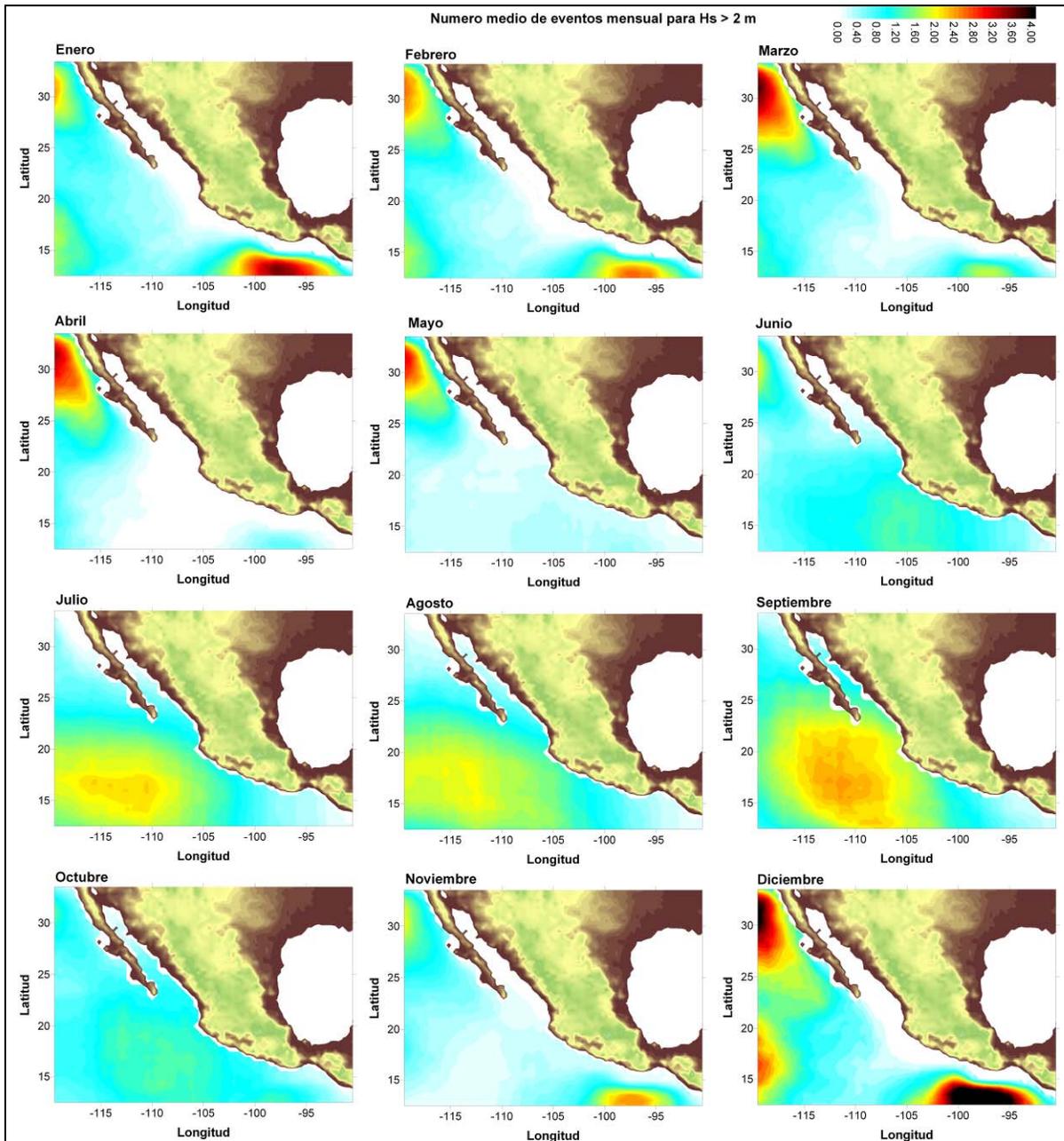


Figura B.19 Análisis 1948 – 2006.

### B.3.2 Número medio mensual de energía normalizada

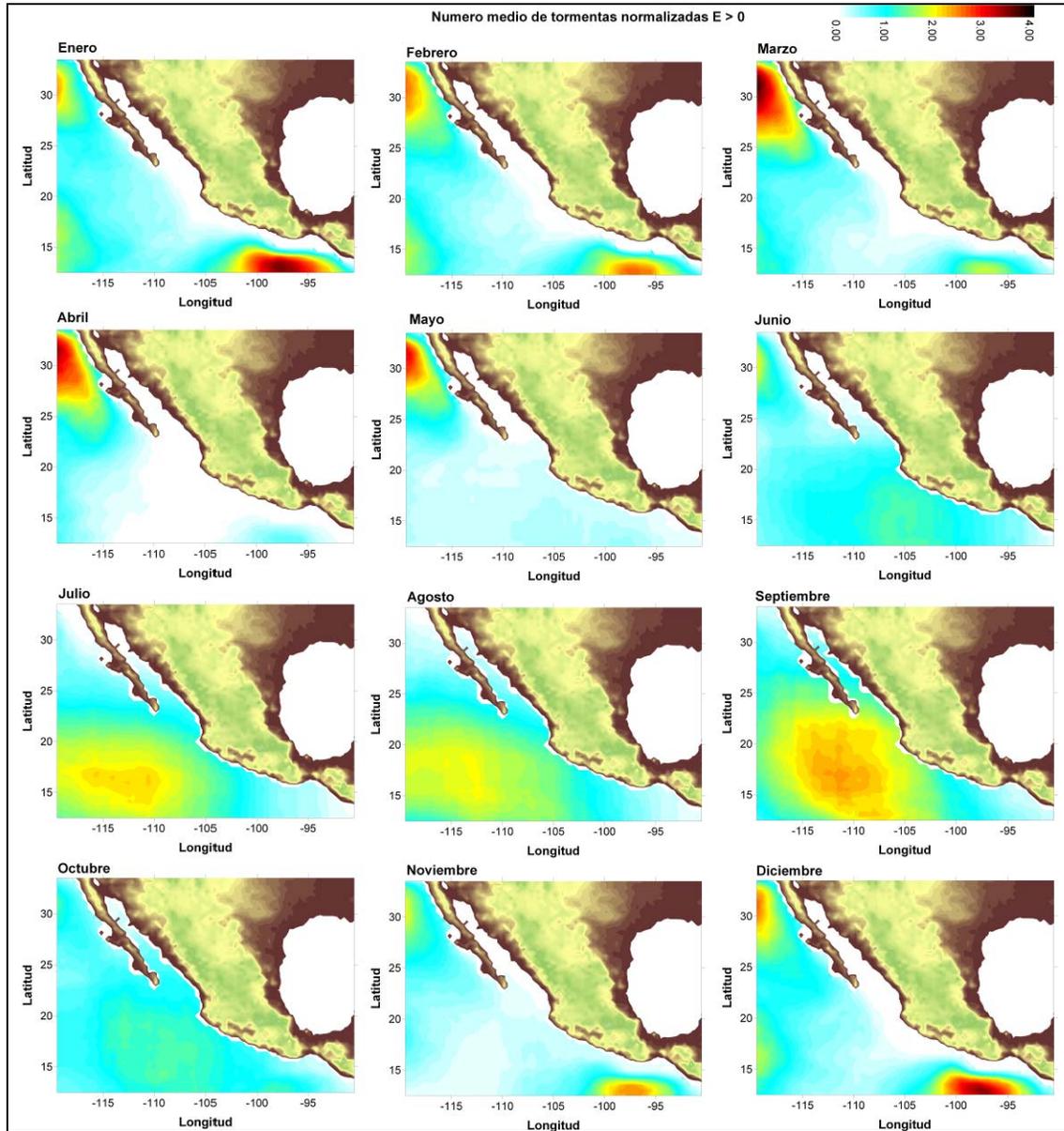


Figura B.20 Número medio mensual de energía normalizada

### B.3.3 Duración media y máxima histórica de tormentas

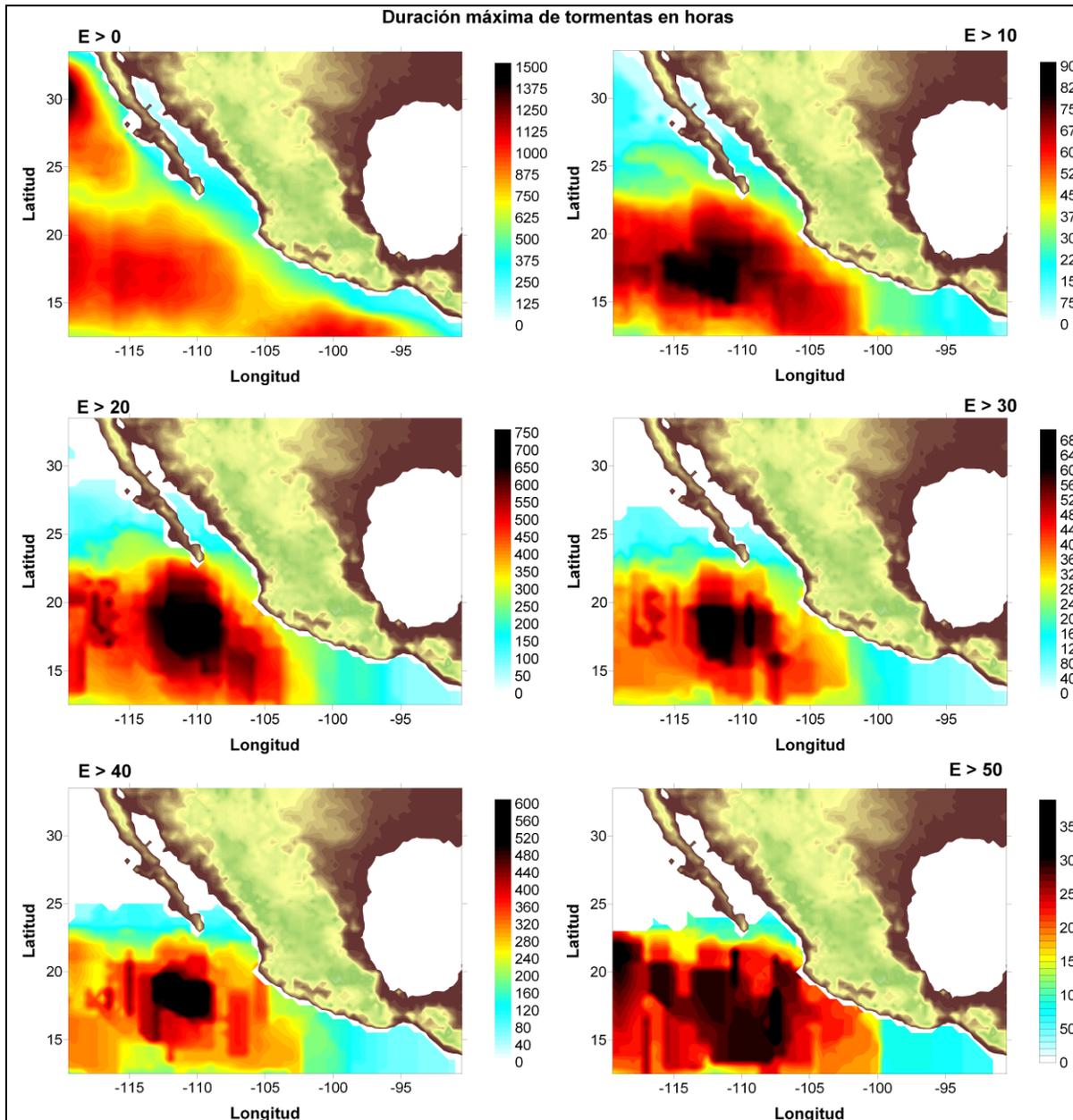


Figura B.21 Duración máxima de tormentas en horas

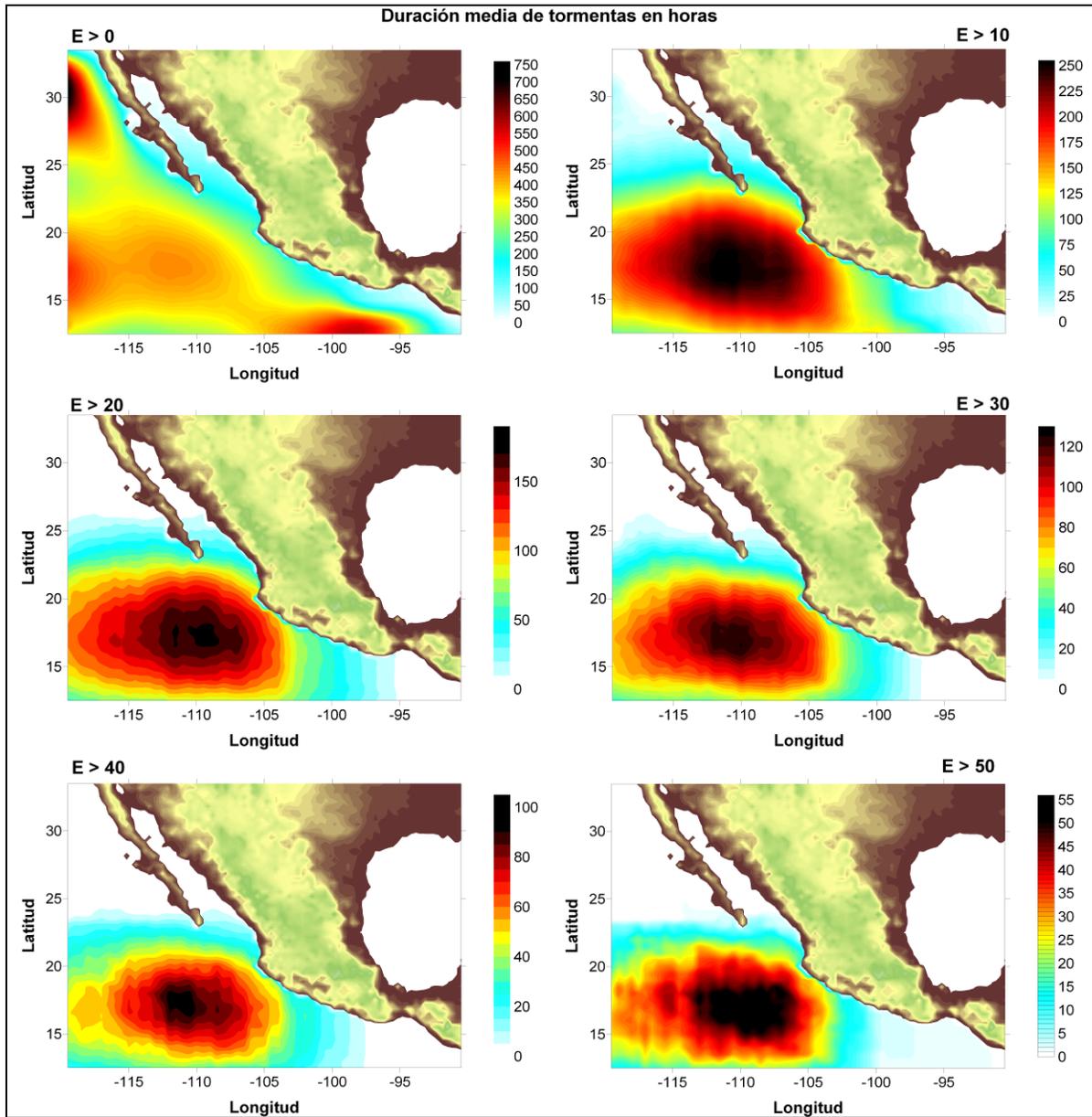


Figura B.22 Duración media de tormentas en horas

### B.3.4 Valores máximos históricos

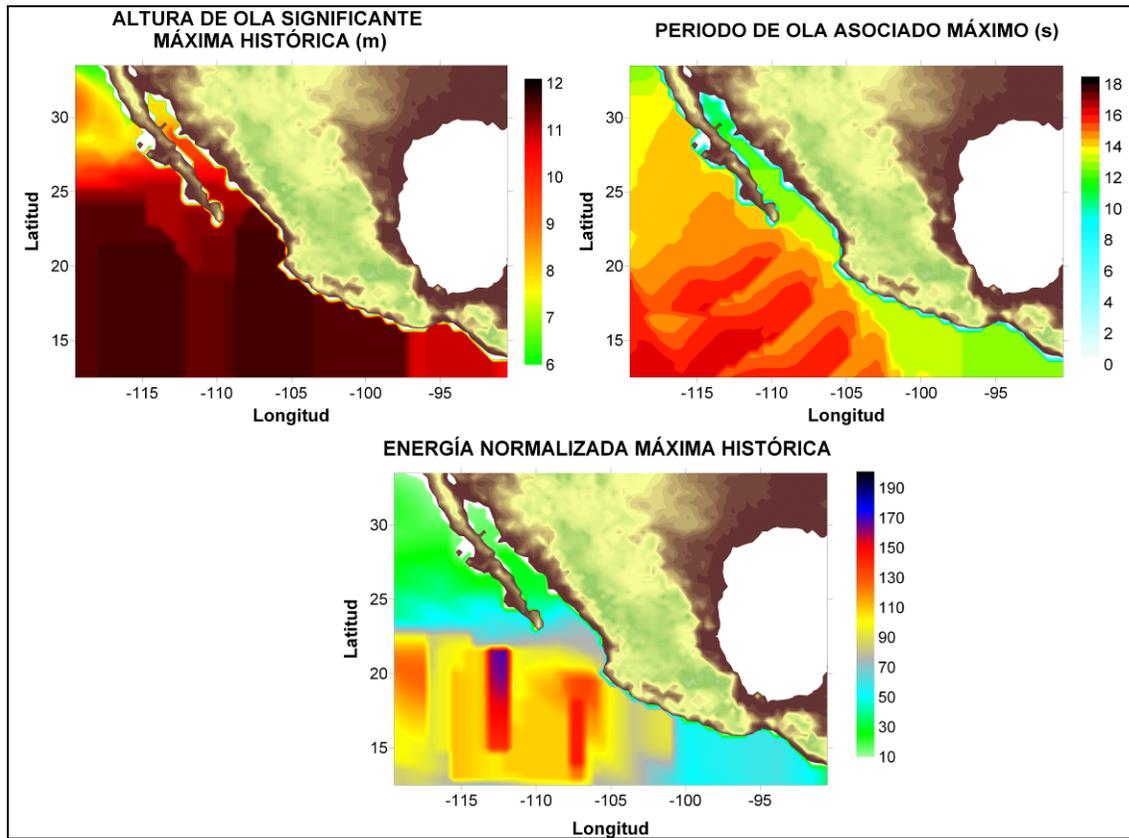


Figura B.23 Valores máximos históricos

### B.3.5 Número medio y máximo anual de tormentas

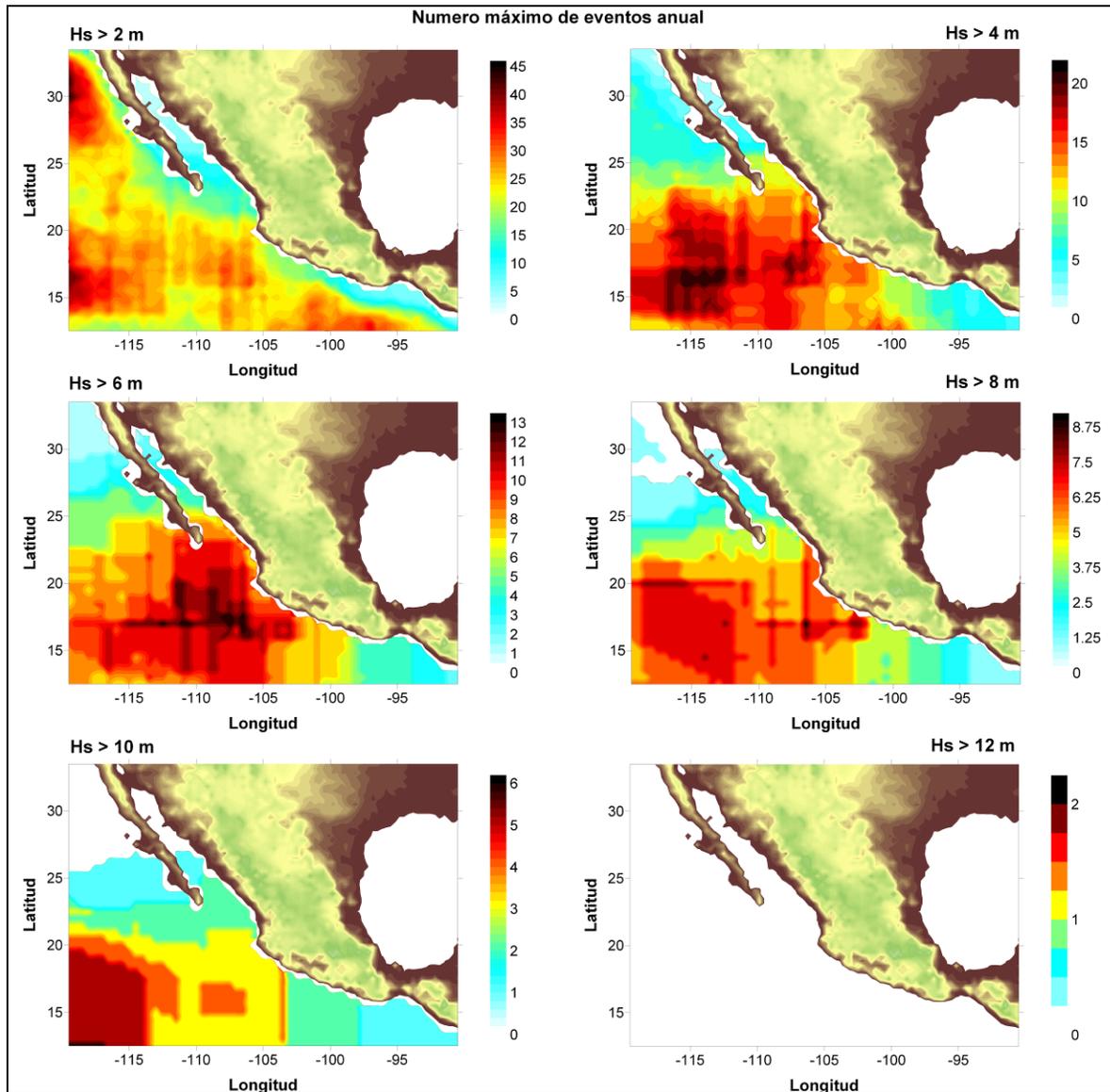


Figura B.24 Número máximo anual de tormentas

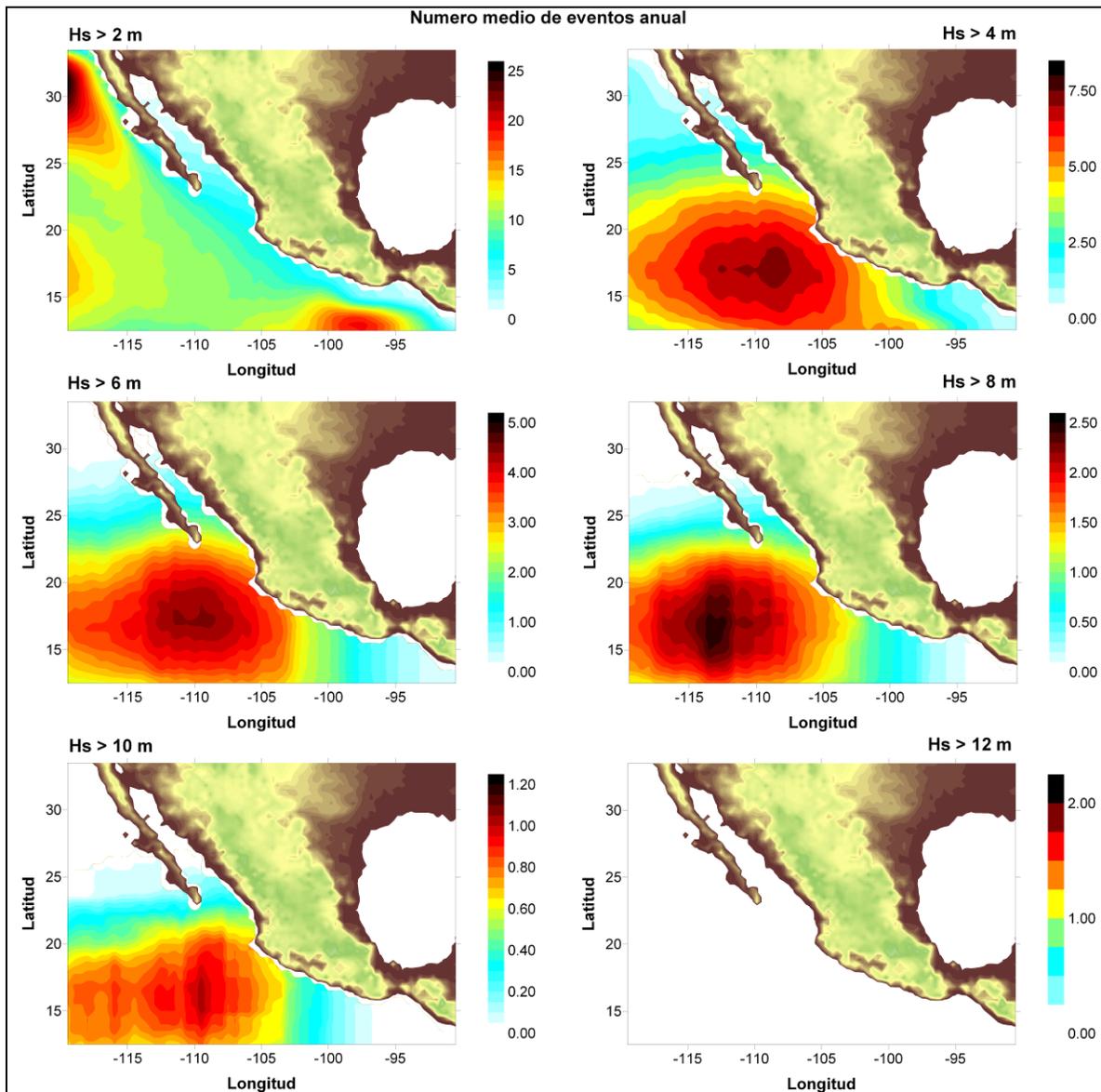


Figura B.25 Número medio anual de tormentas

### B.3.6 Número medio y máximo anual de tormentas con energía normalizada

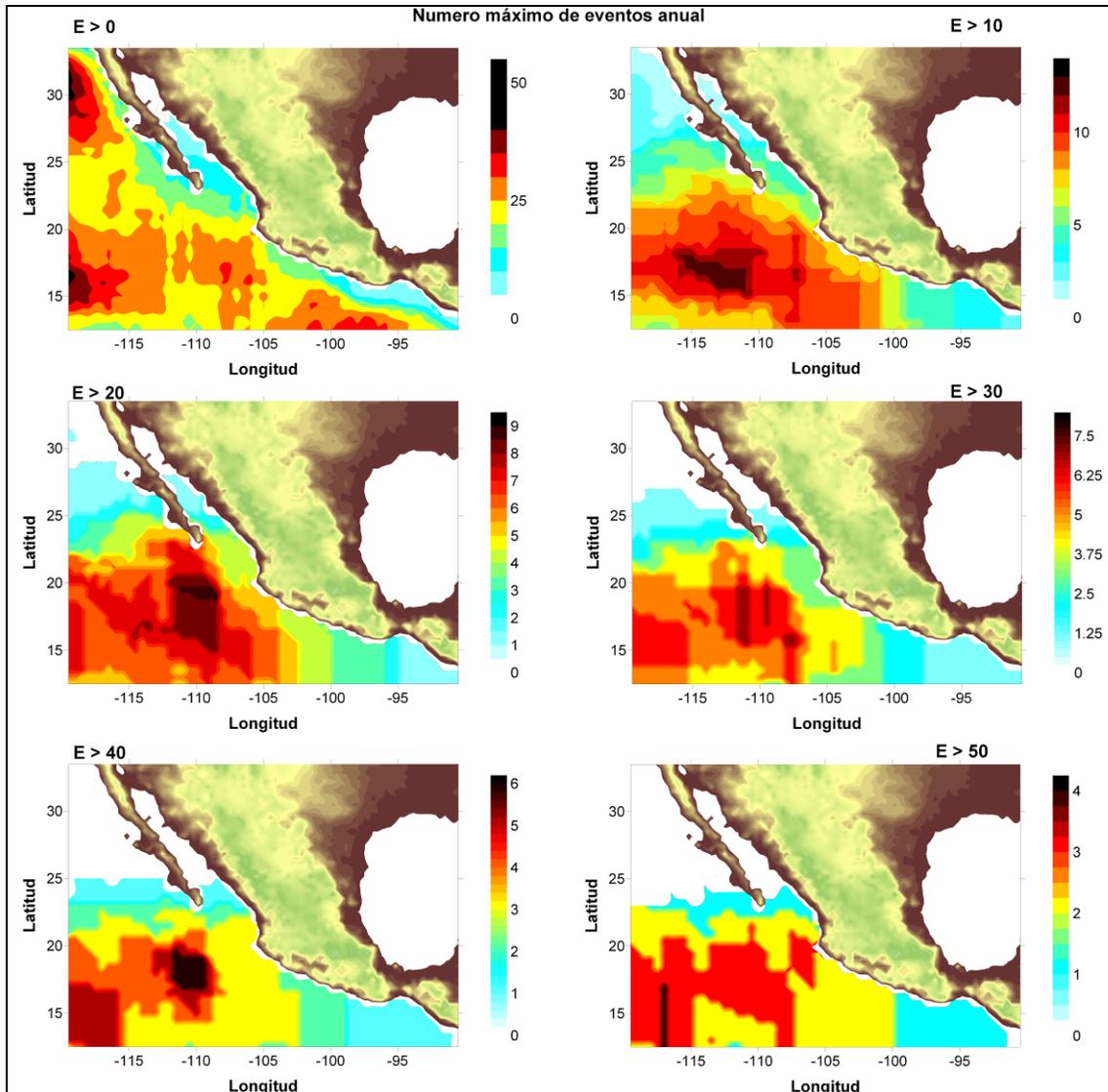


Figura B.26 Número máximo anual de tormentas con energía normalizada

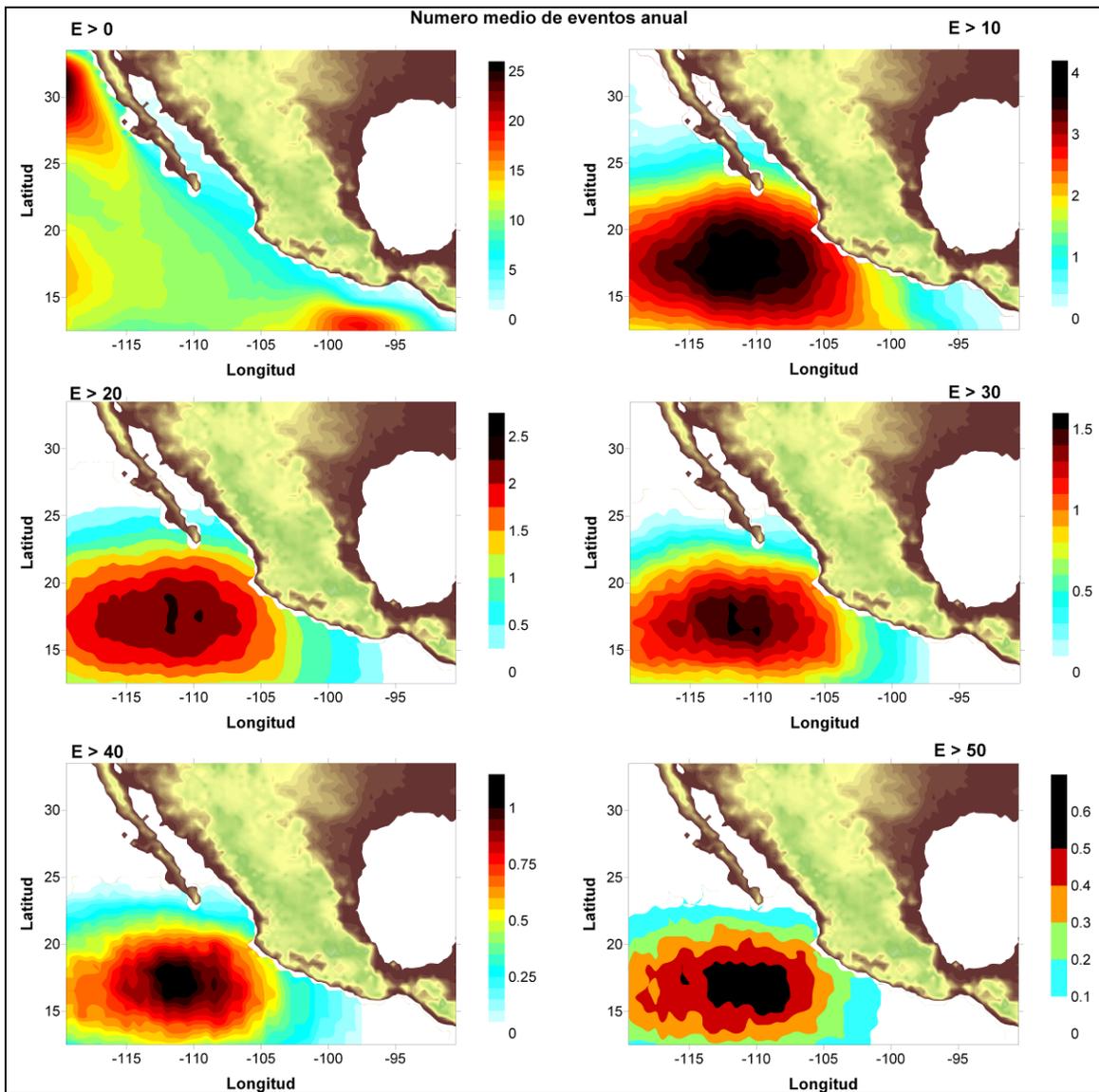


Figura B.27 Número medio anual de tormentas con energía normalizada