CARACTERIZACIÓN REGIONAL DE LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD POR EVENTOS TROPICALES EN EL GOLFO DE MÉXICO

Mendoza Grande Manuel, Ramírez Xicotencatl Rodolfo, Ocaña Espinosa de los Monteros Karina Griselda, Méndez Reyes María de Lourdes mmendoza@imt.mx, rramirez@imt.mx, kocana@imt.mx, mlm4@hotmail.com

RESUMEN

Los ciclones tropicales son sistemas rotatorios de tormentas y nubes que se originan sobre aguas tropicales o subtropicales de los océanos, cuentan con un centro de circulación cerrado en los niveles inferiores de la atmósfera y se clasifican de acuerdo con su intensidad y localización.

En este artículo se determinó el oleaje, mediante la reproducción numérica de 157 eventos extremos tropicales que han ocurrido en el Golfo de México de 1979 a 2022, y mediante un análisis de valores extremos.

A partir de los resultados se estimó una regionalización de las distribuciones de probabilidad que se presentan en el Golfo de México, sin embargo, para estudios en zonas específicas es recomendable realizar el análisis de valores extremos en forma local.

Los resultados presentados en este articulo deberán considerarse como una guía para los interesados en la materia y no pretende imponer criterios, ni suplir el juicio y experiencia del lector, teniendo como objetivo principal, proporcionar una estimación de las alturas de ola generadas por ciclones tropicales en el Golfo de México

Palabras clave: Eventos tropicales, oleaje, viento, macro áreas.

ABSTARCT

Tropical cyclones are rotating storm and cloud systems that originate over tropical or subtropical waters of the oceans, have a closed circulation center in the lower levels of the atmosphere and are classified according to their intensity and location.

In this article, the wave was determined, by numerically reproducing 157 extreme tropical events that have occurred in the Gulf of Mexico from 1979 to 2022, and by analyzing extreme values.

From the results, a regionalization of the probability distributions that occur in the Gulf of Mexico was estimated, however, for studies in specific areas it is advisable to perform the analysis of extreme values locally.

The results presented in this article should be considered as a guide for those interested in the subject and is not intended to impose criteria, nor to replace the

judgment and experience of the reader, having as main objective, to provide an estimate of the wave heights generated by tropical cyclones in the Gulf of Mexico

Key word: Tropical events, wave, wind, macro areas.

INTRODUCCIÓN

El Golfo de México es una región marítima del Océano Atlántico, contenida entre los litorales de México, Estados Unidos y Cuba. Anualmente esta zona experimenta una intensa actividad ciclónica durante el periodo de junio a noviembre, por lo tanto, comprender las condiciones de los fenómenos atmosféricos que se generan en el océano es esencial para la población y la infraestructura costera. Estos fenómenos se denominan ciclones tropicales y son de naturaleza puramente oceánica, se forman en aguas cálidas (entre las latitudes 25° Sur y 25° Norte), obtienen su energía de la condensación del aire húmedo, producen fuertes vientos y precipitaciones abundantes. La duración de los ciclones se mide en días, disminuyen en intensidad a medida que llega a tierra y su tiempo de vida termina debido a la pérdida de una fuente de humedad.

De acuerdo con su intensidad y localización, un ciclón tropical puede clasificarse en:

- Depresión tropical, es un ciclón tropical con vientos menores a los 63 km/h o menos.
- Tormenta tropical, comprende vientos mayores a los 63 km/h, pero limitados a los 119 km/h.
- Huracanes, tienen vientos sostenidos generalmente superiores a los 119 km/h durante largos periodos de tiempo.

Los sistemas post-tropicales son sistemas que no están lo suficientemente estructurados como para ser considerados ciclones tropicales, pero aún tienen el potencial de producir fuertes lluvias y ráfagas de viento.

Al definir un ciclón tropical se refiere a la naturaleza ciclónica de la tormenta, mientras que el término "tropical" describe su origen geográfico. Su rotación, de acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), es opuesta al de las agujas del reloj en el hemisferio norte y similar al de las agujas del reloj en el hemisferio sur.

Los ciclones tropicales tienen un impacto económico importante a nivel mundial, tanto en zonas marítimas como en zonas costeras y terrestres, y aunque los avances tecnológicos permiten acertadamente su pronóstico, seguimiento y monitoreo continuo, todavía ocasionan la pérdida de vidas humanas, que en algunas ocasiones pueden contarse en cientos o miles (Rosengaus et al. 2002).

En este sentido, existe la necesidad de comprender y caracterizar el oleaje extremo generado por los ciclones tropicales a fin de establecer protocolos con las medidas preventivas para mitigar el impacto de los ciclones tropicales en las comunidades costeras y los recursos naturales.

El propósito de este artículo es de proporcionar una regionalización de las funciones de distribución de probabilidad con los resultados del oleaje extremal que se presenta en el Golfo de México.

INFORMACIÓN HISTORICA DE LOS HURACANES

La información sobre las características de los huracanes, se tomó de la base de datos, disponible y de dominio público, denominada HURDAT2 (Hurricane Databases 2nd generation), publicada por el National Hurricane Center (NHC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), para el desarrollo de dicha base de información, el NHC realiza un análisis posterior a cada ciclón tropical para establecer una estimación oficial de la historia del ciclón, en este análisis se hace uso de todas las observaciones disponibles incluidas aquellas que aún no lo están. Además, el NHC lleva a cabo unas revisiones continuas de análisis retrospectivo de algunos ciclones tropicales y actualiza periódicamente el registro histórico para reflejar los cambios implementados a través del Comité Best Track Change.

La base de datos HURDAT2 contiene información a cada 6 horas de la ubicación (latitud y longitud), velocidad máxima de los vientos sostenidos y presión central, de las depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes, para el período comprendido entre 1851 – 2021 para el Océano Atlántico, sin embargo, dicha información está lejos de ser completa y precisa, debido a que, en la medida que uno retrocede en el tiempo, además de mayores incertidumbres, los sesgos se vuelven más pronunciados.

En este sentido, para el presente artículo se seleccionaron datos históricos de los eventos tropicales extremos en el Golfo de México y Mar caribe entre 1979 al 2021, los cuales incluyen 23 depresiones tropicales, 53 tormentas tropicales, 30 huracanes de categoría 1 de la escala Saffir-Simpson, 11 de categoría 2, 10 de categoría 3, 20 de categoría 4 y 10 huracanes de categoría 5.

INFORMACIÓN BATIMÉTRICA

Los datos batimétricos utilizados para el modelo numérico corresponden a la información del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 2022 de la National Geophysical Data Center de los Estados Unidos de Norteamérica (NGDC), el cual es un modelo de relieve global de 15 arco segundos de resolución geográfica de la superficie de la Tierra que combina la topografía terrestre y la batimetría oceánica, referenciado verticalmente al nivel medio del mar y horizontalmente al Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84).

De esta fuente de información, se obtuvieron las profundidades de la zona comprendida entre las coordenadas 14.5° de latitud Norte, 100° de longitud Oeste y 31.5° de latitud Norte, 78° de longitud Oeste (Figura 1).

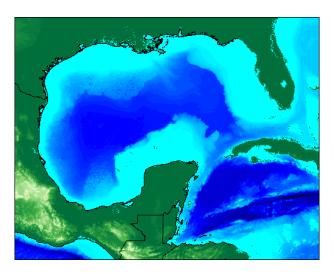


Figura 1 Información batimétrica de ETOPO 2022 utilizada en este artículo.

Los datos batimétricos de ETOPO 2022 se complementaron con la información de los Modelos Digitales Batimétricos (MDB) de relieve submarino de la Zona Exclusiva de México, desarrollados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los cuales tienen una resolución de 400 metros por pixel a una escala de 1:1'000,000.

De esta fuente de información, se obtuvieron las profundidades correspondientes al Golfo de México y Mar Caribe (Figura 2).

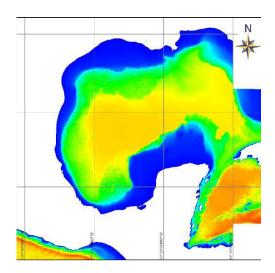


Figura 2 Información batimétrica de MDB utilizada en este trabajo.

MODELO NUMÉRICO

Se aplicó un modelo de espectro de oleaje de tercera generación para determinar el oleaje producido por los eventos tropicales antes señalados, forzado a partir de los campos de viento y de presión generados por cada uno de dichos eventos.

El cálculo de la generación y propagación del oleaje se realizó mediante el uso del modelo Spectral Waves, el cual simula el crecimiento, transformación y disipación del oleaje generado por el viento, y cuyas principales características son:

- Crecimiento del oleaje debido a la acción del viento.
- Interacción no lineal entre olas.
- Disipación debido al descrestamiento (whitecapping).
- Disipación debido a la fricción de fondo.
- Disipación por vegetación.
- Disipación por lodo.
- Disipación por asomeramiento induciendo la rotura del oleaje.
- Refracción y difracción debido a variaciones batimétricas.
- Interacción oleaje corriente.

Este modelo incluye dos tipos de formulaciones, una formulación paramétrica direccionalmente desacoplada, y una formulación totalmente espectral.

La formulación paramétrica direccionalmente desacoplada se basa en una parametrización de la ecuación de conservación del oleaje, de acuerdo con Holthuijsen (1989), dicha parametrización se realiza en el dominio de la frecuencia introduciendo como variables dependientes el momento cero y el primer momento del espectro del oleaje.

El modelo totalmente espectral se basa en la ecuación de conservación del oleaje descrita por Komen et al. (1994) y Young (1999), donde la frecuencia – dirección del espectro del oleaje es la variable dependiente.

La discretización de la ecuación gobernante en el espacio geográfico y espectral se realiza utilizando el método de volumen finito centrado. La integración de tiempo se realiza con un enfoque de pasos fraccionarios, donde se aplica un método explícito de múltiples secuencias para la propagación del oleaje.

Los campos de viento generados por un huracán a menudo pueden describirse mediante modelos paramétricos simples basados en algunos parámetros como la posición del ojo del huracán, el radio de los vientos máximos, etc.,

En este sentido, los campos de viento y de presión fueron creados a partir de la información de la velocidad del viento máximo y la presión central de los huracanes, se generaron los campos de viento y presión aplicando el modelo de vórtice de Rankine (1947), siendo dicho modelo el único que sigue una distribución de velocidad en la dirección radial, donde la velocidad del viento a una cierta distancia del centro del huracán se calcula utilizando las siguientes distribuciones de la velocidad, en dependencia de la distancia que exista entre el centro del huracán y el punto de interés.

MALLA DE CALCULO

Para realizar el modelo numérico se definió una malla de cálculo, mediante el método de mallas flexibles no estructuradas con elementos triangulares, dicho método permite la distribución óptima de los nodos de cálculo, en el cual, se adapta la resolución de las celdas a las características físicas del lugar y a las zonas de interés dentro del modelo numérico, lo que permite focalizar la mayor resolución a la zona de estudio y el resto del dominio con un espaciamiento amplio, y con ello se optimiza el rendimiento computacional.

Como se indicó anteriormente, la malla de cálculo quedó constituida por 110,451 celdas triangulares de diferentes tamaños que van de una resolución gruesa (aproximadamente 10 km entre nodo) hasta una resolución más fina (500 m entre nodos) cerca al litoral mexicano, cubre un área aproximada de 1'958,020 km², incluyendo todo el Golfo de México y parte del Mar Caribe (ver figura 3).

Una vez definida la malla de cálculo se agregó la información de profundidades del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 2022 y de los Modelos Digitales Batimétricos.

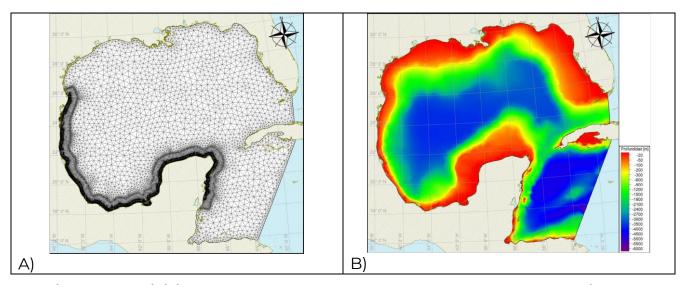


Figura 3 A) Definición de la malla de cálculo y B) Malla de cálculo con profundidades.

CAMPOS DE VIENTO Y PRESIÓN

A partir de la información obtenida de la base de datos HURDAT2 correspondiente a la velocidad máxima del viento y la presión central de los 157 eventos tropicales extremos seleccionados, se generaron los campos de viento y de presión en intervalos de una hora durante el tiempo que duró cada evento de tormenta.

A manera de ejemplo, para el huracán Gilbert, ocurrido del 8 al 19 de setiembre de 1988, se realizaron 270 mapas con los campos de viento y de presión en intervalos de 1 hora. En la figura 4, se muestra algunos mapas de los campos de viento y de presión generados por dicho huracán.

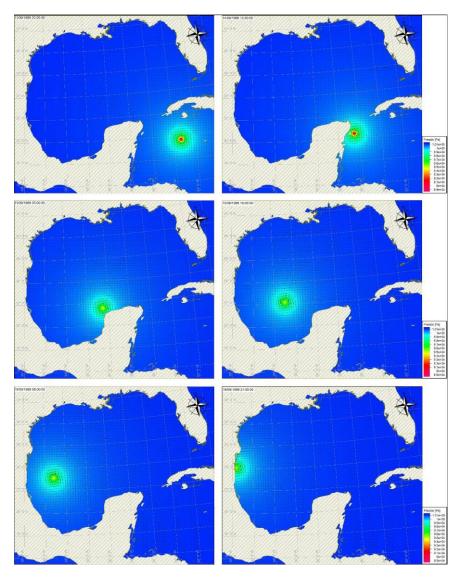


Figura 4 Campos de ciento y presión generados por el huracán Gilbert que se presentó en septiembre de 1988.

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Para calibrar el modelo numérico se realizó las modelaciones numéricas de 4 huracanes (Allen 1980, Gilbert 1988, Bret 1999 y Emily 2005), que se muestran en la figura 5, con los cuales se comparó la altura de ola obtenida de las modelaciones con las alturas de ola reportadas en la base de datos Wavewatch III Hindcast Phase 2, elaborada por la NOAA.

Los resultados de la calibración se muestran en las gráficas de la figura 6, donde los puntos corresponden a las alturas de ola reportadas por el Wavewatch III Hindcast Phase 2 en el sitio con coordenadas 23° de latitud y -94° de longitud y la línea continua corresponde a las obtenidas con el modelo numérico.

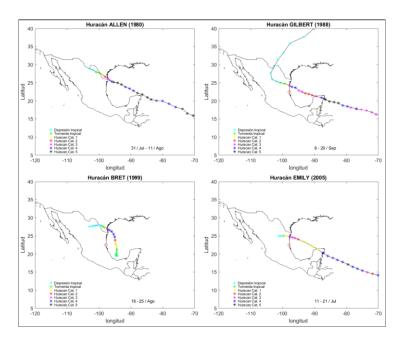


Figura 5 Trayectorias de los huracanes considerados para la calibración del modelo numérico.

Como puede observarse en las gráficas de la figura 6, las alturas de ola obtenidas por el modelo numérico presentan buena correspondencia con las alturas de ola de la base de datos Wavewatch, cabe señalar que se tomó dicha base de datos como referencia para la calibración del modelo, debido a que no se cuenta con mediciones de oleaje para las fechas en que se presentaron dichos huracanes.

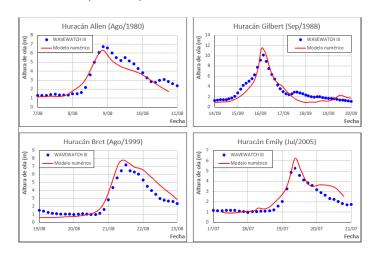


Figura 6 Resultados de la calibración del modelo numérico.

MODELACIONES NUMÉRICAS

Para determinar los mapas del oleaje extremal asociados con diferentes períodos de retorno, de los resultados de las modelaciones numéricas se obtuvo en cada celda del dominio de cálculo, las máximas alturas de ola generadas por cada uno de los eventos extremos, por ejemplo, como se puede observar en la figura 7, los resultados para los huracanes Allen (1980), Gilbert (1988), Bret (1999) y Emily (2005).

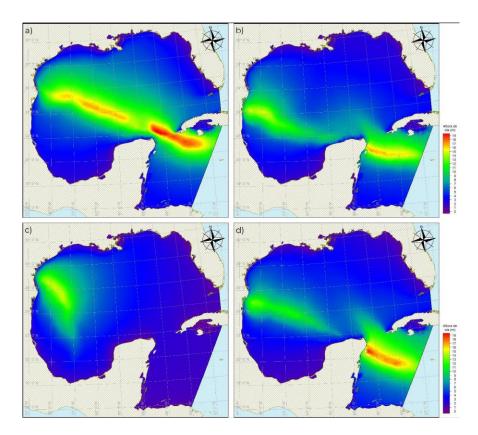


Figura 7 Alturas de ola máximas generadas por los huracanes: a) Allen (1980); b) Gilbert (1988); c) Bret (1999); d) Emily (2005).

Para cada celda de cálculo (110451 celdas) se crearon series con 157 datos de alturas de ola máxima (ver ejemplo en la figura 8) y para cada serie se determinó la altura de ola de diferentes periodos de retorno mediante un análisis de valores extremos.

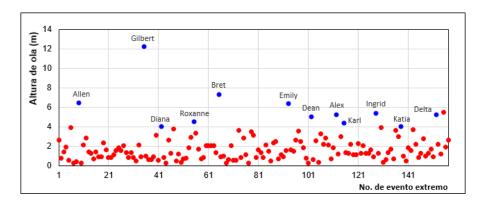


Figura 8 Series de alturas de ola máxima de los 157 eventos extremos, para la celda de cálculo ubicada en las coordenadas 23° de latitud y -94° de longitud.

Para ello se define cualquier altura de ola (que es parte del estadístico) en términos de probabilidad, es decir, la probabilidad de que un valor de altura de ola determinado sea mayor que una altura de ola determinada, para un conjunto de datos registrados en determinado tiempo, por lo que es necesario conocer el modelo de función de distribución de probabilidad que mejor represente a la muestra estadística.

Para el análisis de valores extremos, se consideraron 5 funciones de distribución de probabilidad: Exponencial, Gumbel o Fisher Tippett I, Weibull, Frechet o Fisher Tippett II y Rayleigh.

RESULTADOS

A partir de los resultados de análisis de valores extremos, considerando 5 funciones de probabilidad, se encontró que las alturas de ola y las funciones de distribución de probabilidad existe mucha variabilidad, por lo que, para elegir la función de distribución con la mejor aproximación a las alturas de ola generadas por los eventos extremos, se calculó el coeficiente de correlación lineal (ρ) utilizando la siguiente ecuación:

 $\rho = Cov(X,Y)\sqrt{Var(X)Var(Y)}$

Con base en lo anterior, se obtuvieron los coeficientes de correlación en todo el dominio de cálculo, los cuales se muestran en los mapas de las figuras 9 – 11.

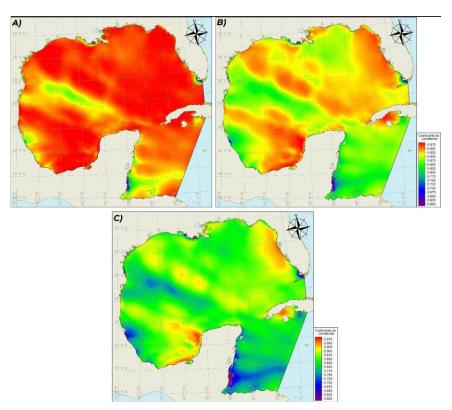


Figura 9 Mapas de los coeficientes de correlación para las funciones de distribución de probabilidad: A) Exponencial; B) Gumbel (FT-I); C) Rayleigh.

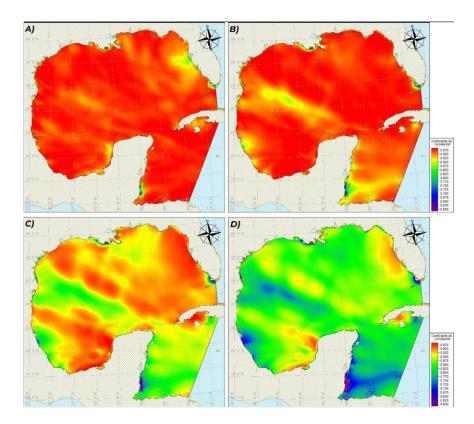


Figura 10 Mapas de los coeficientes de correlación para las funciones de distribución de probabilidad: A) Weibull con k = 0.75; B) Weibull con k = 1.0; C) Weibull con k = 1.4; D) Weibull

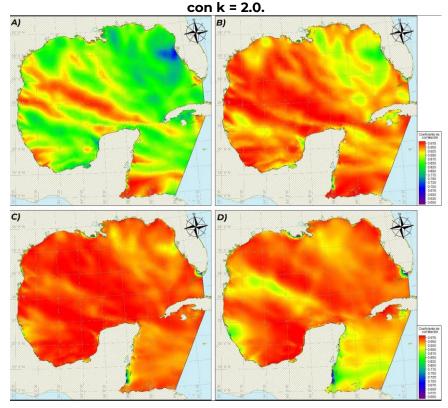


Figura 11 Mapas de los coeficientes de correlación para las funciones de distribución de probabilidad: A) Frechet con k = 2.5; B) Frechet con k = 3.3; C) Frechet con k = 5.0; D) Frechet con k = 10.0.

Como se puede ver en las figuras anteriores, la mejor distribución a nivel regional (Golfo de México y Mar Caribe) es la función de Weibull con el parámetro de forma k = 0.75, sin embargo, a nivel local, pueden ser otras las funciones de distribución con el mejor coeficiente de correlación.

Para definir que función es la más adecuada en determinadas zonas de estudio del Golfo de México y mar Caribe, se realizó una zonificación del dominio de cálculo conforme a las distribuciones con el mejor ajuste o coeficiente de correlación lineal (ver figura 12).

Cabe señalar que, los resultados presentados en este estudio deberán considerarse como una guía o fuente de consulta e información para los interesados en la materia y no pretende imponer criterios, ni suplir el juicio y experiencia del lector.

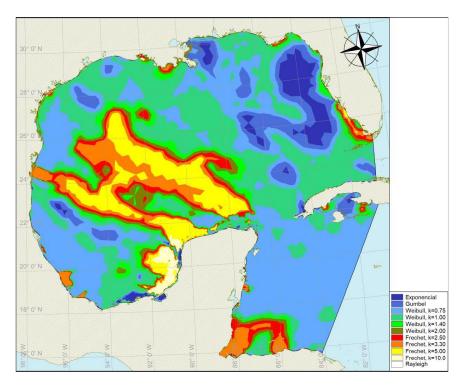


Figura 12 Mapas de la regionalización de las distribuciones de probabilidad con el mejor ajuste.

CONCLUSIONES

Para el presente artículo se recopiló la información histórica de la base de datos HURDAT2 de los eventos extremos tropicales que se presentaron en el Golfo de México y Mar caribe en el periodo comprendido de 1979 al 2021, resultando 23 depresiones tropicales, 53 tormentas tropicales y 30 huracanes categoría 1 de la escala Saffir-Simpson, 11 de categoría 2, 10 de categoría 3, 20 de categoría 4 y 10 huracanes de categoría 5.

Para el análisis de valores extremos, se consideraron 5 funciones de distribución de probabilidad: Exponencial, Gumbel o Fisher Tippett I, Weibull, Frechet o Fisher Tippett II y Rayleigh, para lo cual, primeramente, se obtuvieron las máximas alturas

de ola generadas por cada uno de los 157 eventos extremos en cada celda del dominio de cálculo (110,451 celdas), y mediante la técnica de mínimos cuadrados, se obtuvieron las alturas de ola asociadas a diferentes períodos de retorno.

A fin de identificar cual función es la más adecuada en determinadas zonas de estudio del Golfo de México, se realizó una zonificación del dominio de cálculo conforme a las distribuciones con el mejor ajuste o coeficiente de correlación lineal, la cual se muestra en la figura 12.

De conformidad con los resultados, se estimó que la función de distribución de probabilidad Weibull con el coeficiente de forma k = 0.75 es la que mejor ajuste presenta en el litoral comprendido al sur del estado de Tamaulipas, en el estado de Veracruz y en el estado de Quintana Roo, mientras que en el norte de Tamaulipas la función con el mejor ajuste es la Weibull con el coeficiente de forma k = 1.4.

En el litoral de los estados de Tabasco y Campeche, la función de distribución de probabilidad con el mejor ajuste corresponde a la Frechet con el coeficiente de forma k = 10.

Al Este del litoral del estado de Yucatán, el mejor ajuste lo presenta la distribución Frechet con k = 10, mientras que, al Oeste de dicho estado, el mejor ajuste lo presenta la distribución Weibull con el coeficiente de forma k = 1.0.

Por lo que respecta a la zona central del Golfo de México, la función de distribución de probabilidad con el mejor ajuste corresponde a la función Frechet con el coeficiente de forma k = 5, mientras que, en la mayor parte del mar Caribe, corresponde a la función Weibull con k = 0.75.

Es importante mencionar que, para estudios en zonas más específicas es recomendable realizar el análisis de valores extremos en forma local.

BIBLIOGRAFÍA

Córdova, L. y González, R. (2012). Simulación de los campos de viento y oleaje asociados a huracanes. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 33(2), 41-50. ISNN 1680-0338

Danish Hydraulics Institute [DHI]. (2023). Mike 21 Cyclone Wind Generation Tool. Scientific Documentation. [Archivo PDF]. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/CycloneTool_Scient ific_Doc.pdf

Danish Hydraulics Institute [DHI]. (2023). Mike 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation. [Archivo PDF]. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/M2ISW_Scientific_Doc.pdf

EcoExploratorio. Museo de Ciencias de Puerto Rico. (2020). Huracanes. [Consulta en línea]. https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/huracanes

Harper, Bruce & Holland, Greg. (1999). An updated parametric model of the tropical cy-clone. AMIS 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2023). Modelos digitales batimétricos con resolución de 400 metros del relieve submarino. https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/submarino/#Descargas

Landsea, C. y Franklin, J. (2012). Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. Monthly Weather Review 141, 3576-3592. https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00254.1

Lizano, O. (2006). Simulación de oleaje de huracán usando modelos de viento paramétricos en un modelo de olas de tercera Generación. Boletín Científico CIOH, 24, 36-47. http://doi.org/10.26640/22159045.147

Meza, J. (2015). Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en marea mexicanos. [Tesis para optar el grado Académico de Maestro en Ingeniería]. México: Universidad nacional Autónoma de México.

National Centers for Environmental Information. (2022): ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model. USA. http://doi.org/10.25921/fd45-gt74

National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2023). Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory. [Consulta en línea]. https://www.aoml.noaa.gov/

National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2022). National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane database 1980-2021. [Consulta en línea]. https://www.nhc.noaa.gov/

Ortiz, J. y Mercado, A. (2006). Estudio preliminar del impacto del oleaje de huracanes en la línea costera del Departamento del Atlántico. Boletín Científico CIOH, 24, 48-59 ISSN 0120-0542. https://doi.org/10.26640/01200542.24.48_59

Rosengaus, M., Jiménez, M. y Vásquez, M. (2014). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación. ISBN 970-628-633-0

Secretaría de Gobernación Coordinación Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres. [Cartel informativo]. [Archivo PDF]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/20231/107-CARTELCICLONESTROPICALES.PDF

Toledano, V., López, J., Ramírez, R., y Segura, D. (2021) Caracterización del estado de mar con las mediciones de oleaje de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas. [Publicación técnica No. 644]. México: Instituto Mexicano del Transporte [Archivo PDF]. https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt644.pdf

University of Rhode Island. (2020). Hurricanes: Science and Society. [Consulta en línea]. http://www.hurricanescience.org/science/science/climate/

Varona, H., Martínez, L., Pavón, J. y Hodelin, H. (2013). Estudio del oleaje generado por un huracán de categoría 5 en la costa sur de las provincias orientales de Cuba. Ciencias de la Tierra y el Espacio, 15 (1), 1-11, ISNN 1729-3790.