

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERIAS

Campus Guanajuato



**“DETERMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN
DEL CLIMA MARÍTIMO EXTREMO E INUNDACIÓN
COSTERA POR REBASE DE OLEAJE EN EL
PUERTO DE VERACRUZ, VERACRUZ”**

Tesis

Para obtener el título de

Ingeniería Civil

Presenta

Mariana Vázquez Alcocer

Directora

M.I. Felicitas Calderón Vega

Co-Director

Dr. Adrián David García Soto

Junio 2020

Guanajuato, Guanajuato

Agradecimientos:

Agradezco a mis padres, José Antonio y Ana Elena por el apoyo incondicional en cada decisión y proyecto que he emprendido, sin ustedes el culmino de este trabajo no habría sido posible. Con el mismo cariño, a mi hermana, Elena, por su complicidad y confianza.

Agradezco también a mi asesora, M.I. Felicitas Calderón Vega por haberme brindado la oportunidad de ser parte de este proyecto y por compartir conmigo sus conocimientos.

Y a cada una de las personas que estuvieron presentes en los cinco años de mi carrera universitaria.

Gracias a todos.

CONTENIDO

CAPÍTULO I. Introducción	1
1.1 Estructura de la tesis.....	1
1.2 Objetivos.....	2
CAPÍTULO II. Área de estudio	3
2.1 Región costera.....	4
2.2 Morfología costera	7
2.3 Puerto de Veracruz	7
2.3.1 Obras de protección del Puerto de Veracruz	8
CAPÍTULO III. Metodología	9
3.1 Análisis de datos.....	9
3.1.1 Descriptores de los datos	11
3.1.2 Régimen medio	11
3.1.3 Régimen extremal	15
3.2 Datos de Estudio.....	19
3.2.1 Descripción de medidas y unidades	19
3.2.2 Boyas de estudio	20
3.2.3 Información Periodística	22
CAPÍTULO IV. Resultados	43
4.1 Análisis Estadístico	43
4.1.1 Altura de ola significativa (Hs)	43
4.1.2 Temperatura.....	47
4.1.3 Viento	49
CAPÍTULO V. Discusión de resultados	53
5.1 Análisis de eventos máximos	53
5.2 Periodos de retorno.....	56
5.3 Rebase de oleaje	57
CAPÍTULO VI. Conclusiones	59
Referencias.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. Área de estudio.....	4
Figura 2.1. Zona costera de interés en Veracruz	6
Figura 2.3. Estructura del puerto de Veracruz.....	8
Figura 3.1. Estructura básica del programa “Caracterización de regímenes de oleaje”	10
Figura 3.1.2.1. Curva normal.....	12
Figura 3.1.2.2. Distribución logarítmica normal.....	14
Figura 3.1.3.1. Tipos de distribuciones dentro del método de máximos anuales.....	16
Figura 3.1.3.2. Distribuciones dentro del método de excedencias sobre un umbral	18
Figura 3.2.2. Ubicación de la boya 42055	21
Figura 3.2.3. Boya 42055.....	21
Figura 3.2.4. Localización de la boya VERV4	22
Figura 3.2.3.1 Seguimiento del huracán Item en 1950.....	26
Figura 3.2.3.2 Seguimiento de la tormenta tropical José en 2005	27
Figura 3.2.3.3 Seguimiento del huracán Stan en 2005	28
Figura 3.2.3.4 Seguimiento del huracán Dean en 2007.....	29
Figura 3.2.3.5 Datos de avión cazahuracanes de Dean en el segundo impacto sobre Veracruz.....	30
Figura 3.2.3.6 Seguimiento del huracán Kabrl en 2010.....	31
Figura 3.2.3.7 Seguimiento de la tormenta tropical Harvey en 2011.....	32
Figura 3.2.3.8 Seguimiento de la Tormenta tropical Helene en 2012	33
Figura 3.2.3.9 Seguimiento de la tormenta tropical Barry en 2013	35
Figura 3.2.3.10 Seguimiento de la tormenta tropical Fernand en 2013.....	37
Figura 3.2.3.11 Seguimiento de la tormenta tropical Danielle en 2016	38
Figura 3.2.3.12 Imagen en canal infrarrojo de la tormenta tropical Danielle en 2016	39
Figura 3.2.3.13 Seguimiento del huracán Earl en 2016.....	40
Figura 3.2.3.14 Seguimiento del huracán Franklin en 2017	41
Figura 3.2.3.15 Imagen de satélite del huracán “Franklin” del Océano Atlántico.....	42
Figura 4.1.1. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Hs de la boya 42055 (2005-2019).....	43
Figura 4.1.2. Histograma y función de distribución de la variable Hs de la boya 42055 (2005-2019).	44
Figura 4.1.3. Serie de la variable Hs de la boya 42055 (2005-2019)	44
Figura 4.1.4 Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Hs de la boya VERV4 (2010-2016).....	45
Figura 4.1.5. Histograma y función de distribución de la variable Hs de la estación VERV4 (2010-2016). 46	
Figura 4.1.6. Serie de la variable Hs de la estación VERV4.....	46
Figura 4.1.7. Dirección e intensidad de altura de ola media anual en el Golfo de México que abarca las dos boyas analizadas (Silva, et al)	47

<i>Figura 4.1.8. Histograma y función de distribución de la variable de la temperatura de la boya 42055 (2005-2019).</i>	48
<i>Figura 4.1.9. Serie de la variable de temperatura de la boya 42055 (2005-2019).</i>	48
<i>Figura 4.1.10. Histograma y función de distribución de la variable de la temperatura de la estación VERV4 (2010-2016).</i>	49
<i>Figura 4.1.12. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Viento de la boya 42055 (2005-2019).</i>	50
<i>Figura 4.1.13. Histograma y función de distribución de la variable de Viento de la boya 42055 (2005-2019).</i>	50
<i>Figura 4.1.15. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos del Viento de la estación VERV4</i>	51
<i>Figura 4.1.16 Histograma y función de distribución de la variable de Viento de la estación VERV4</i>	52
<i>Figura 4.1.17. Dirección e intensidad de la velocidad del viento media anual en el Golfo de México que abarca las dos boyas analizadas (Silva, et al)</i>	52
<i>Figura 5.1.1. Ajuste de los datos al método de Excedencias sobre un Umbral.</i>	56
<i>Figura 5.1.2. Ajuste de los datos al método de Máximos Anuales Gumbel.</i>	57

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Eventos registrados que han impactado en el Estado de Veracruz</i>	25
<i>Tabla. 2. Frentes fríos que impactaron en el puerto de Veracruz medidos en la estación VERV4 (2010-2016).</i>	55

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El estudio del clima marítimo extremo ha cobrado especial importancia en zonas costeras por las afectaciones que puede ocasionar en el corto, mediano y largo plazo en los puertos, los cuales representan un eje fundamental de la economía de los países. La incertidumbre generada por el cambio climático hace necesario un enfoque distinto en la gestión de los riesgos asociados al mar (Olcina, 2008; [IPCC], 2013). En este trabajo se determinan las situaciones de temporales extremos mediante el análisis de datos de oleaje en dos boyas localizadas en el golfo de México comparándolas con las notas de prensa que ubican los eventos en el tiempo y comentan los daños causados directamente en las zonas afectadas.

1.1 Estructura de la tesis

El presente trabajo de tesis está compuesto por seis capítulos. En el primer capítulo se encuentra la introducción, que describe la razón de la elaboración de esta investigación y nos plantea los objetivos que se buscan al realizar el análisis estadístico y periodístico de datos en el Puerto de Veracruz.

En el capítulo dos se define el área de estudio, desde su ubicación geográfica referente al país, así como el lugar específico donde se encuentra el puerto de Veracruz, dando a conocer que es el puerto marítimo comercial más antiguo y que representa una gran importancia económica para México. Se explicará sobre la región costera que representa, conocida como la región de Sotavento, gran polo de desarrollo industrial, comercial y turístico. A su vez, se hace una descripción de su geomorfología costera y posteriormente se hace una mención de la sobresaliente infraestructura del puerto, con un énfasis en las obras de protección, tomando en cuenta que son las obras factibles de rebase de oleaje.

En el tercer capítulo hace referencia al método estadístico sobre el que se basó para hacer el análisis de los datos, iniciando por una breve explicación de la estructura del programa, después se hace una descripción de los datos en los que se analizan con ayuda de histogramas, tablas estadísticas y rosas de oleaje. Este programa nos habla sobre dos regímenes de oleaje, el primero es el régimen medio que es fundamentado por cuatro distribuciones: normal, logarítmica-normal, Gumbel de máximos y de Weibull de mínimos, el segundo régimen es denominado como Extremal que nos da una explicación por el método de los Máximos Relativos sobre el Umbral (POT) y el método de los Máximos Anuales. A su vez, en este capítulo nos especifica las medidas y unidades que encontraremos en los datos a trabajar. Por otro lado, también se hace una descripción de las dos boyas usadas en este proyecto y un informe periodístico sobre los fenómenos que han afectado directamente al puerto de Veracruz, así como una reseña de ellos.

En el cuarto capítulo se realiza una interpretación del análisis estadístico obtenido, dando enfoque a la altura de olas, temperatura y viento.

En el quinto capítulo se muestra como discusión el análisis de eventos máximos, donde se pretende dar a conocer una contabilización de los eventos que más afectaron el puerto de Veracruz. A su vez se desarrolla una observación tomando los dos métodos para el cálculo de periodo de retorno, también se incluye una breve indagación sobre puntos donde podría haber una afectación del puerto por rebase de oleaje según el análisis obtenido.

Finalmente, con base a los resultados obtenidos, se emiten conclusiones y recomendaciones acerca de la importancia de los estudios para determinar el clima extremo en el Puerto de Veracruz.

1.2 Objetivos

- Caracterización de eventos máximos de clima marítimo mediante análisis estadístico y periodístico de datos de oleaje, viento y temperatura en el Puerto de Veracruz, Veracruz.
- Análisis de inundaciones costeras y rebase de oleaje en obras del puerto de Veracruz.

CAPÍTULO II

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de este proyecto se localiza en el estado de Veracruz, que está ubicado en la parte central de la vertiente del Golfo de México, cuenta con una superficie aproximada de 73 mil kilómetros cuadrados (3.7 por ciento del territorio nacional) y está compuesto por 212 municipios dentro de los cuales destaca el municipio de Veracruz.

Enfatizando en el municipio de Veracruz, el cual es la ciudad más grande e importante del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Tiene el puerto marítimo comercial más importante de México. Está ubicada a 90 km de distancia de la capital del estado Xalapa y a 400 km de distancia de la Ciudad de México. Su clima es tropical cálido, con una temperatura media anual de 25.3 °C y con una precipitación media anual de 1500 mm.

Las coordenadas geográficas extremas del estado de Veracruz son: Latitud Norte 22° 28' y Sur 17° 09'; Longitud Este 93° 36' y Oeste 98° 39'. La topografía de la entidad la podemos definir de grandes contrastes; la zona costera es llana y baja, de suelo aluvional con depósitos lacustres litorales.

Dentro del municipio de Veracruz se encuentra el puerto marítimo comercial más antiguo e importante del país, el cual es el objetivo principal de este trabajo y que se mencionará de manera detallada más adelante.

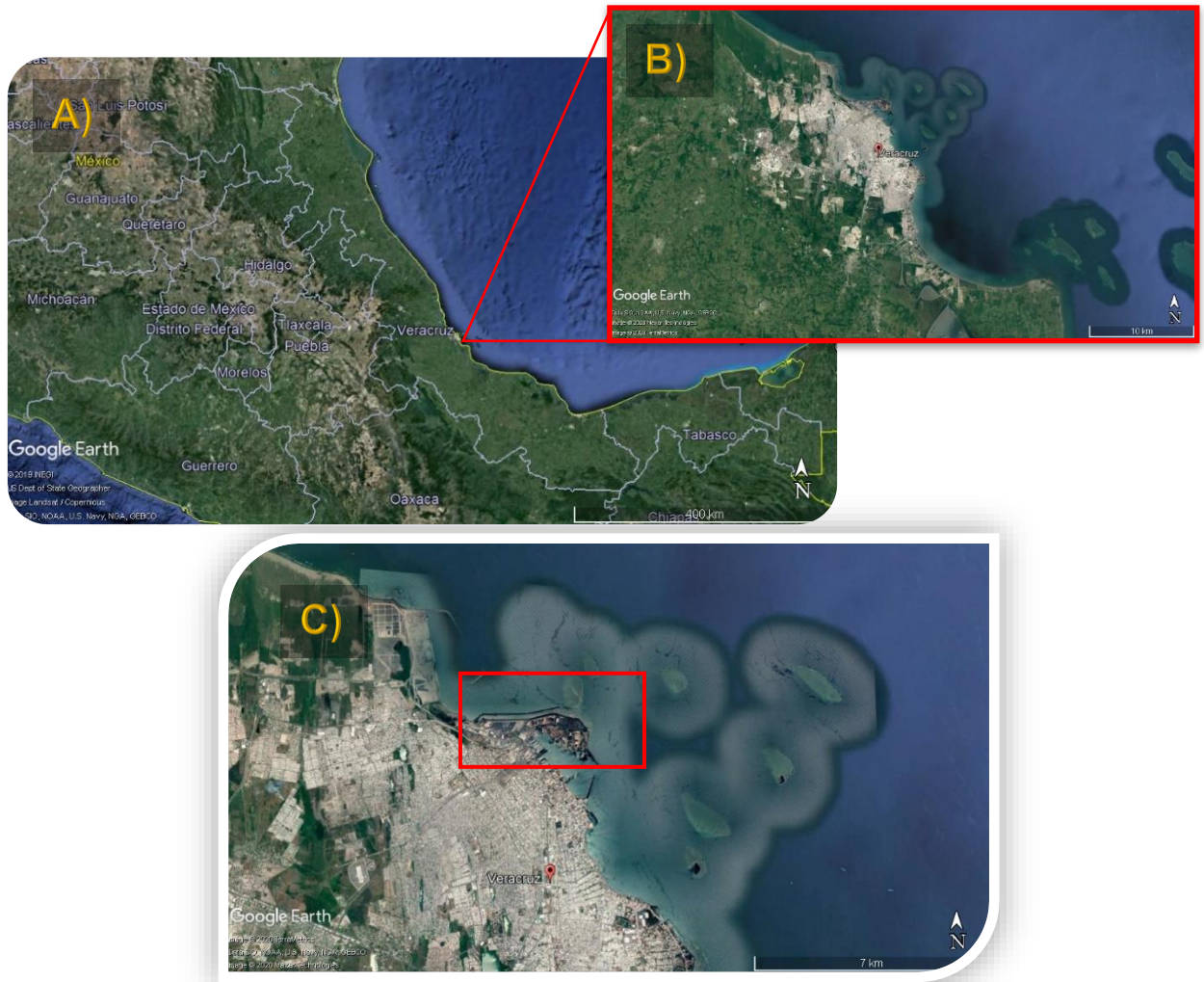


Figura 2. Área de estudio
A) *Estado de Veracruz, B) Localización del municipio de Veracruz, C) Ubicación del Puerto de Veracruz*

Fuente: Google Earth (2019)

2.1 Región costera

La zona costera constituye la interfase entre la atmósfera la hidrosfera y la litosfera lo que la hace especialmente dinámica y sensible a los cambios climáticos. El carácter de interfase confiere a la franja litoral una gran diversidad de ambientes y recursos y la convierte en un área especialmente atractiva para los asentamientos humanos tanto como lugar de residencia como por la gran

variedad de actividades productivas que se pueden implantar en ella. (Cendrero Uceda, 2005)

Las zonas costeras son definidas como aquellas en las cuales existe una marcada interacción entre el medio marino y el terrestre, considerando por lo tanto una porción del territorio “seca” y otra “mojada”, las cuales entran en contacto a través de lo que se conoce como el litoral. El referirse a la zona costera de Veracruz implica hablar de todo el estado.

El litoral de Veracruz representa el 29.3% de la costa mexicana del Golfo de México, casi la tercera parte, y el 4.7% del total de la cuenca del Golfo de México.

Con base a indicadores socioeconómicos y urbanos se han determinado diez regiones costeras, las cuales se mencionan a continuación:

- *La Región de la Huasteca Veracruzana* (que comprende la Huasteca Alta y la Huasteca Baja).
- *La Región Totonaca*
- *La Región Del Nautla*
- *La Región de La Capital*
- ***La Región del Sotavento***
- *La Región de Los Tuxtlas*
- *La Región Olmeca*

Para funciones de este estudio, la zona de nuestro interés es la región del Sotavento, dando una explicación breve de la zona:

- ***La Región del Sotavento:*** es cuna de los primeros asentamientos coloniales en Mesoamérica, de mucha historia y cultura; tierras irrigadas por caudalosos ríos y lagunas con un clima tropical. Sede del principal puerto de México y gran polo de desarrollo industrial, comercial y turístico; zona productora de alimentos importantes para el país como arroz, frijol, mango, plátano, e.g., además de contar con grandes extensiones dedicadas a la ganadería. El Puerto de Veracruz, Boca del Río, Cardel, Alvarado,

Cosamaloapan y Tlacotalpan, son las poblaciones más representativas de esta región.

Veracruz tiene el principal puerto comercial del país, que cuenta con terminales especializadas para el manejo de contenedores, automóviles, granos y minerales, por lo que la Aduana de este puerto se ha convertido en la segunda captadora de impuestos a nivel nacional. Cuenta con una amplia vocación turística e infraestructura que permite el arribo de cruceros y yates; es además un sitio propicio para la práctica de los deportes náuticos y la construcción de marinas ya que se ubica frente al sistema arrecifal veracruzano, uno de los más importantes y extensos de la República.



Figura 2.1. Zona costera de interés en Veracruz

Fuente: Coordinación de Proyectos Estratégicos del Gobierno del Estado de Veracruz

2.2 Morfología costera

La forma y orientación de una playa, eso es, su morfología, cambios como un resultado del movimiento de sedimentos. En efecto, la morfología de la costa es un resultado de muchos eventos individuales de transporte de sedimentos, causado por una sucesión de olas. En este sentido, la forma de la playa y región cercana a la costa puede pensarse que representa una forma de promediar con el tiempo. La estabilidad de la longitud de la costa dependerá de la diferencia entre los volúmenes de sedimento que salen y entran de esta sección debido a las olas, corrientes y al viento. (Reeve, Chadwick, & Fleming, 2004)

Al describir la morfología de Veracruz, nos encontramos que tiene una superficie plana, sin elevaciones notables, y con porciones bajas inundables. En esta zona se ubica un cordón litoral, donde se encuentran extensos campos de dunas, y una serie de planicies inundables y lomeríos que corresponden a deltas antiguos. La zona costera está sujeta a una influencia marina directa, a través de las acciones de vientos y corrientes de deriva litoral que transportan sedimentos, y que son depositados o removidos del litoral. Las playas cercas del puerto de Veracruz tienen una amplitud promedio de 28 m, con una pendiente del 3.19% y una altura promedio de 1.3 m.

2.3 Puerto de Veracruz

Para este trabajo, se pretende tener un interés específico en el puerto de Veracruz debido a su importancia para el país. El puerto se encuentra ubicado en la zona centro del estado, como se mencionaba anteriormente, en la región Sotavento en las coordenadas $19^{\circ} 12' 02''$ N, longitud $96^{\circ} 08' 15''$ W, a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de La Antigua y el Golfo de México; al sur con los municipios de Medellín y Boca del Río; al este con el Golfo de México y al oeste con los municipios de Manlio Fabio Altamirano y Paso de Ovejas.

2.3.1 Obras de protección del Puerto de Veracruz

Existen cuatro obras de protección al puerto principales que cuentan con rompeolas:

- *Rompeolas NW*: Marca el extremo S de la bahía de Vergara, con una longitud de 1,085 m., una corona de 6.5 m. de ancho y 4.3 m. de altura, construido de piedra y tetrápodos de concreto.
- *Rompeolas NE*: Se extiende hacia el SE desde el Arrecife la Gallega, tiene 7,389 m. de longitud, con una corona de 7.3 m. de ancho y 3.8 m. de altura, construido de piedra y tetrápodos de concreto.
- *Rompeolas SE*: En la entrada de la bocana, se extiende al NNE, desde el Arrecife Hornos, hasta el arrecife de la Lavandera; en el lado S de la entrada al puerto, con una longitud de 800 m., una corona de 4 m. de ancho y 2.6 m de altura, construido de piedra y tetrápodos de concreto.
- *Rompeolas Muro de Pescadores*: Al SE de la bahía, separa ésta del antepuerto, con 1,130 m. de longitud, una corona de 10 m. de ancho y 2.5 m. de altura, construido de piedra y bloques de concreto.



Figura 2.3. Estructura del puerto de Veracruz

Fuente: Secretaría de comunicaciones y transporte (SCT)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Las fuentes consultadas para la obtención de información oceanográfica de la zona fueron dos boyas del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration's), la prensa regional y nacional así como el Servicio Meteorológico (Mediport). La metodología empleada es de carácter cuantitativo y cualitativo, el análisis estadístico se efectúa sobre parámetros del oleaje aportados por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration's), tales parámetros son altura de ola significativa (H_s , metros), la velocidad del viento (V_w , m/s) y temperatura de la superficie del mar (T , °C). Además del análisis cualitativo en la prensa donde se informa de los percances ocurridos en el puerto debido a los eventos extremos presentados en la región.

3.1 Análisis de datos

El análisis de datos de las boyas se realiza con ayuda de un programa de caracterización de regímenes climáticos, el cual se ocupa de la determinación de variables oceanográficas definidas a partir de una serie temporal.

La estructura básica del programa consta de tres módulos:

- Información preliminar. Estadística descriptiva de los datos.
- Caracterización del régimen Medio de una determinada variable.
- Caracterización del régimen extremal de una variable.

Cada módulo contiene varias herramientas. La estructura de cada módulo se describe en el siguiente esquema:

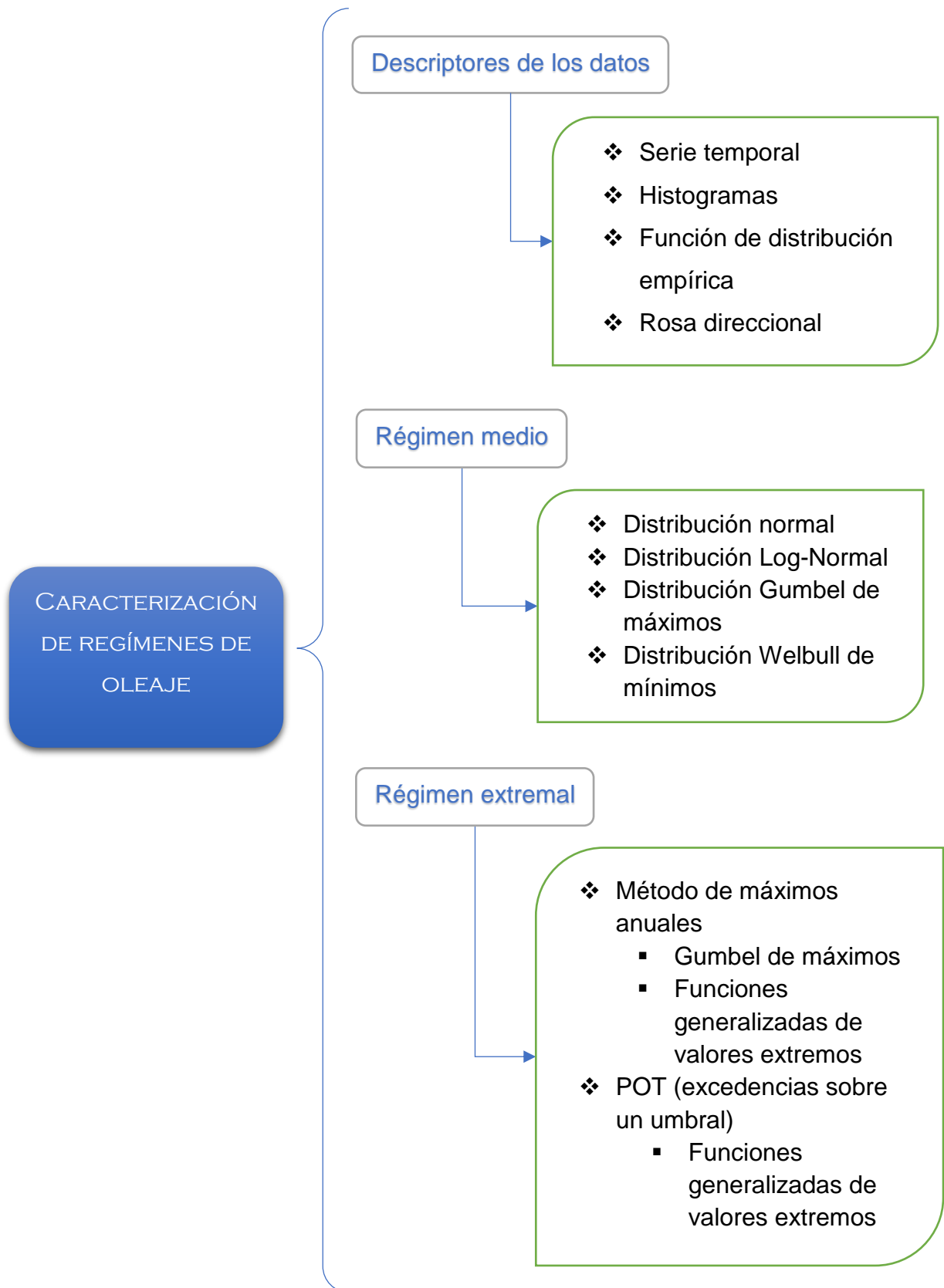


Figura 3.1. Estructura básica del programa "Caracterización de regímenes de oleajes"

3.1.1 Descriptores de los datos

Para el presente trabajo se presenta una descripción estadística de la serie de alturas significativas, temperaturas, direcciones del oleaje y de la serie de intensidades del viento y sus direcciones.

Se presentan diferentes estadísticas, cuando tenemos datos direccionales, se hace uso de las rosas direccionales, como es el caso del oleaje y del viento, en donde se usa.

Las distribuciones conjuntas muestran histogramas y tablas de contingencia para los parámetros estudiados. Las tablas de contingencia permiten cruzar la información de forma sectorial. En las rosas de oleaje se representan la altura y dirección del oleaje asociadas a su probabilidad de ocurrencia.

De forma análoga, para los estudios de viento se muestran distribuciones conjuntas y rosas que cruzan la información de la intensidad y la dirección del viento

3.1.2 Régimen medio

Se puede interpretar como régimen medio de una serie temporal al conjunto de estados de oleaje que más probablemente nos podemos encontrar.

El régimen medio, es representado de una forma gráfica, en una distribución teórica en la que se hace un ajuste teórico, con esto se permite obtener una expresión compacta que suaviza e interpola la información proporcionada.

Para este proyecto se hará un análisis bajo cuatro modelos: la distribución normal, distribución logarítmica-normal, distribución de Gumbel de máximos y la distribución de Weibull de mínimos, para describir el régimen medio y con el objetivo de tomar la distribución que más se acople a las series de oleaje, viento y temperatura.

3.1.2.1 Distribución normal

La distribución de probabilidad continua más importante en todo el campo de la estadística es la distribución normal. Su gráfica nos describe de manera aproximada muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación. Por ejemplo, las mediciones físicas en áreas como los experimentos meteorológicos.

En 1733, Abraham DeMoivre desarrolló la ecuación matemática de la curva normal, la cual sentó las bases sobre las que descansa gran parte de la teoría de la estadística inductiva. La distribución normal a menudo se denomina distribución gaussiana en honor de Karl Friedrich Gauss (1777-1855), quien también derivó su ecuación a partir de un estudio de errores en mediciones repetidas de la misma cantidad.

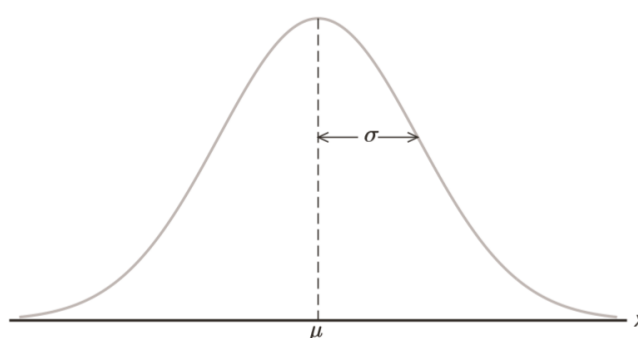


Figura 3.1.2.1. Curva normal

Una variable aleatoria continua X que tiene la distribución en forma de campana de la figura 3.1.2.1 se denomina variable aleatoria normal

La función de distribución Normal de una variable aleatoria x es:

$$y = F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx; -\infty < x < \infty$$

donde

$\Phi(z)$ es la función de distribución de la variable z normal estándar $N(0,1)$

μ es la media de la distribución normal

σ es la desviación típica de la distribución normal

3.1.2.2 Distribución Log-Normal

La distribución logarítmica normal se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones. La distribución se aplica en casos donde una transformación logarítmica natural tiene como resultado una distribución normal.

Se dice que una variable aleatoria χ es Log-normal si su logaritmo es normal. Haciendo uso del cambio de variable, se obtiene fácilmente que la función de distribución de χ es:

$$y = F(x) = \Phi\left(\frac{\log(x) - \mu^*}{\sigma^*}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^*} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x) - \mu^*}{\sigma^*}\right)^2\right] dx; -\infty < x < \infty$$

donde

$\Phi(z)$ es la función de distribución de la variable z normal estándar $N(0,1)$

μ^* es la media de la distribución normal original (parámetro de localización)

σ^* es la desviación típica de la distribución normal original (parámetro de escala)

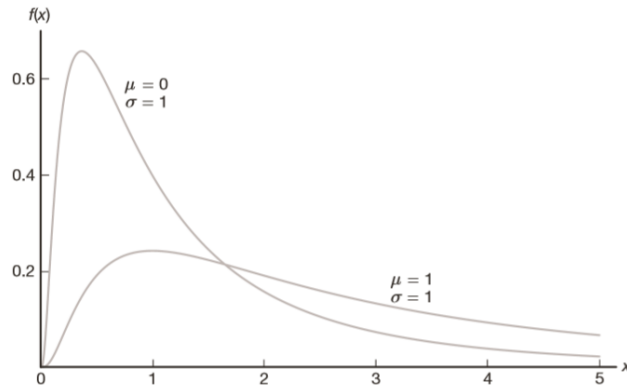


Figura 3.1.2.2. Distribución logarítmica normal

3.1.2.3 Distribución Gumbel de Máximos

Para la función de distribución ilimitada $F(x)$ donde la cola superior se cae de manera exponencial. La distribución de Gumbel tiene la propiedad útil de que la desviación estándar es independiente del período de referencia considerado (Havbro Faber, 2012).

La función de distribución Gumbel de máximos de una variable aleatoria χ es:

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

donde

λ es el parámetro de localización (es la moda de la distribución)

δ es el parámetro de escala (es proporcional a la desviación típica de la distribución, $\sigma^2 = \pi^2 \delta^2 / 6$)

3.1.2.4 Distribución Weibull de Mínimos

En teoría de la probabilidad y estadística, la distribución de Weibull es una distribución de probabilidad continua. Introducida por el físico sueco Waloddi Weibull en 1939 y la detalló hasta 1951.

En el caso donde la función de distribución acumulativa $F(x)$ está limitada hacia abajo en λ .

La función de distribución Weibull de mínimos de una variable aleatoria x es:

$$y = F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)^\beta\right]; -\infty < x \leq \lambda$$

donde

λ es el parámetro de localización (es el menor valor posible de la variable aleatoria x)

δ es el parámetro de escala

β es el parámetro de forma

3.1.3 Régimen extremal

Un régimen extremal, es precisamente, un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal de una cierta altura de riesgo

El método general utilizado para la estima de los regímenes extrémos escalares es el Método de los Máximos Relativos sobre el Umbral (POT) (Goda, 1988), al ser este método más fiable que el método de los Máximos Anuales sobre todo cuando la información disponible corresponde a un periodo inferior a 20 años.

3.1.3.1 Método de máximos anuales

Para datos por el método de máximos anuales, el análisis puede descansar parcialmente en los resultados del teorema de Fisher-Tippett-Gnedenko, lo cual conlleva usar distribuciones generalizadas de valor extremo para ajustar los datos. Sin embargo, en la práctica, se aplican varios procedimientos para escoger entre un rango más amplio de distribuciones. El teorema en cuestión relaciona las distribuciones límites para los máximos o mínimos de una gran colección de variables aleatorias independientes que tienen la misma distribución. Dado que el número de eventos aleatorios relevantes producidos en un único año pueden ser limitados, no es sorprendente que los análisis de datos agrupados por el método GEV frecuentemente conduzcan a distribuciones que se apartan de distribuciones de valor extremo generalizado

GEV

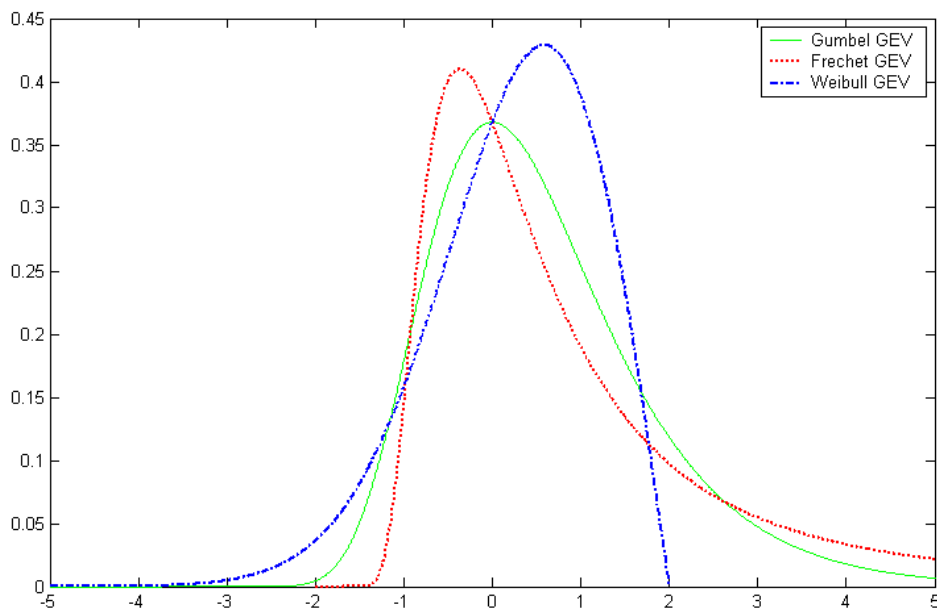


Figura 3.1.3.1. Tipos de distribuciones dentro del método de máximos anuales

$$H(x; \mu, \psi, \xi) = \exp \left\{ - \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\psi} \right)_+^{-1/\xi} \right\}$$

donde;

μ es el parámetro de localización

ψ es el parámetro de escala

ξ es el parámetro de forma

❖ *Gumbel de máximos*

$$H(x; \mu, \psi) = \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{x - \mu}{\psi} \right) \right] \right\}$$

3.1.3.2 *Método de excedencias sobre un umbral (POT = Peak Over Threshold)*

Para datos obtenidos por el método POT, el análisis involucra ajustar dos distribuciones: una para el número de eventos en cada período básico de tiempo y un segundo ajuste para la distribución de los excesos. Una asunción común para el número de eventos consiste en usar la distribución de Poisson, mientras que para los excesos se emplea una distribución generalizada de Pareto. En este caso se necesita alguna teoría adicional para estimar la distribución de los valores extremos más allá de los observados. Un objetivo alternativo podría ser estimar los costes esperados asociados a eventos inusuales durante un cierto período. (Castillo, Hadi, Balakrishnan, & Sarabia , 2005)

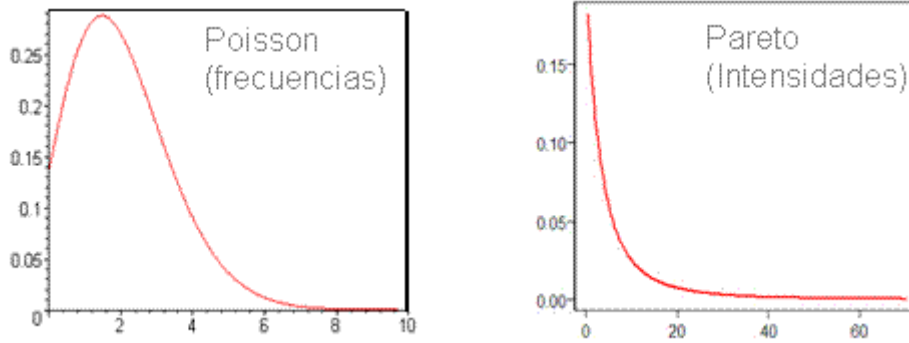


Figura 3.1.3.2. Distribuciones dentro del método de excedencias sobre un umbral

❖ *Intensidades; Pareto*

$$G(y; \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi y / \sigma\right)^{-1/\xi}$$

Donde;

σ es el parámetro de escala

ξ es el parámetro de forma

❖ *Frecuencias; Poisson*

Para definir la distribución de Poisson, partimos desde los experimentos de Poisson, los cuales producen valores numéricos de una variable aleatoria n , el número de resultados que ocurren durante un intervalo de tiempo determinado o en una región específica.

El número n de resultados que ocurren durante un experimento de Poisson se llama variable aleatoria de Poisson y su distribución de probabilidad se llama distribución de Poisson.

La distribución de probabilidad de la variable aleatoria de Poisson n , la cual representa el número de resultados que ocurren en un intervalo de tiempo dado o región específicos, es

$$P_{\lambda}(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$$

Donde

λ es el número promedio de resultados por unidad de tiempo, distancia, área o volumen

e es 2.71828...

3.2 Datos de Estudio

Para este trabajo se utilizarán datos de oleaje significativo, viento y temperatura tomados de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration's), el cual tiene un servicio meteorológico designado al diseño, desarrollo, operación y mantenimiento de una red de boyas para la recolección de datos y estaciones costeras, la NDBC (National Data Buoy Center).

La NOAA desarrolla y opera boyas en aguas costeras y en alta mar, en su mayoría de los EE. UU. Para proporcionar observaciones ambientales en tiempo real. Algunos investigadores científicos emplean los datos de la boya para la validación de modelos teóricos y los estudios de monitoreo del clima. Los informes de boyas de NDBC representan un conjunto único de datos ambientales.

Las boyas en el océano profundo son generalmente boyas de disco de 10 o 12 m; las boyas amarradas en las áreas cercanas a la costa son generalmente de 6 m y son de tipo bote.

3.2.1 Descripción de medidas y unidades

El conjunto de datos a usar en este trabajo está formado por parámetros de oleaje, viento y temperatura, que vienen descritos y determinados de la siguiente manera:

Viento

Para la dirección del viento, contemplando que es la dirección de la que proviene el viento en grados en sentido horario desde el N verdadero, durante el mismo período utilizado para la velocidad del viento.

Respecto a la velocidad del viento, viene medida en metros sobre segundos (m / s) y para cada dato se considera un promedió durante un período de ocho minutos para las boyas y un período de dos minutos para las estaciones terrestres, el cual es reportado por hora.

Oleaje

En el caso del oleaje, el dato que se registra es la altura de ola significativa, la cual tiene una metrología en metros (m) y se calcula como el promedio del tercio más alto de todas las alturas de ola durante el período de muestreo de 20 minutos.

Temperatura

Se considera que la temperatura sea de la superficie del mar, tomando como medida los grados Celsius (°C). Teniendo de referencia, que el tipo de equipo es una boya, aclarando que la profundidad se refiere a la línea de flotación del casco.

3.2.2 Boyas de estudio

Una de las boyas a utilizar, según la base del NOAA, es la estación 42055, con coordenadas 22.124 N 93.941 W (22 ° 7'25 "N 93 ° 56'26" W). Se encuentra a 214 millas náuticas al noreste del municipio de Veracruz. Contiene datos desde el año 2005 hasta el año 2019, teniendo 14 años de datos efectivos sobre la altura de ola. En la figura 3.2.2 se muestra la ubicación de la boya.



Figura 3.2.2. Ubicación de la boya 42055

Fuente: Google Earth (2020). Elaboración propia

La boya 42055 se describe como una boya de espuma de 3 metros y se encuentra al nivel del mar. La altura de la temperatura del aire es de 3.7 metros, contiene un anemómetro con una altura de 4.1 metro, ambos sobre el nivel del mar y un barómetro de 2.7 metros sobre el nivel medio del mar. Alcanza una profundidad de temperatura del mar de 1.5 metros debajo de la línea de flotación y con una profundidad del agua de 3624 metros.



Figura 3.2.3. Boya 42055

Fuente: NDBC (National Data Bouy Center)

La segunda boya es la estación VERV4, se localiza en las coordenadas 19.204 N 96.113 W (19°12'16" N 96°6'47" W). Es una estación operada por el Departamento US EPA y Gobierno mexicano mediante un programa de cooperación conjunta. Se encuentra al nivel del mar, la altura de toma de datos es a los 9.1 metros de la elevación, el anemómetro toma las medidas también a los 9.1 metros de altura. El barómetro mide al nivel del mar.

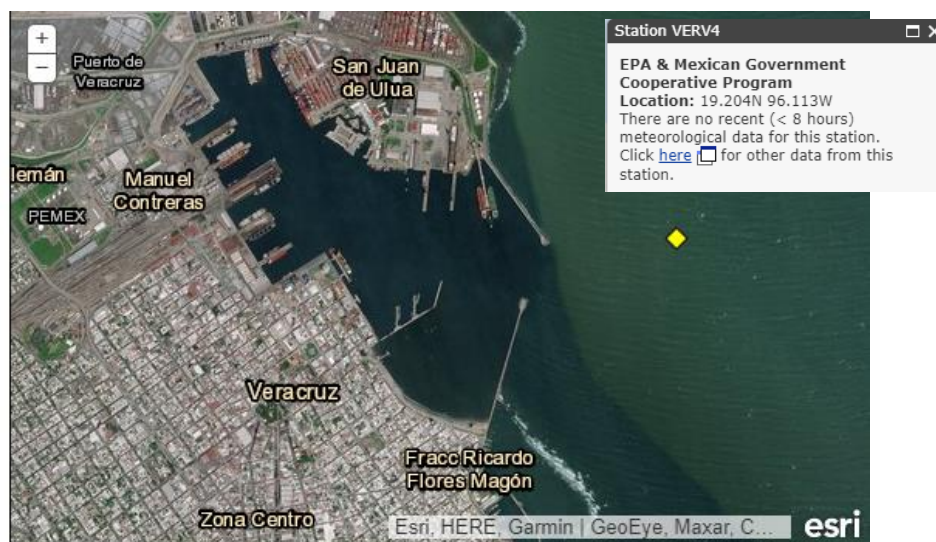


Figura 3.2.4. Localización de la boya VERV4
Fuente: EsriGeoEye. Elaboración propia

3.2.3 Información Periodística

La información periodística se trabaja mediante una base de datos específica, partiendo de la importancia que se atribuye a la prensa como medio que documenta, relata y analiza fenómenos naturales adversos, en función de sus secuelas ambientales, sociales y económicas (Díaz, 1995) (Máyer, 1999) (Yanes & Marzol, 2009).

En la tabla 1 Se presentan los fenómenos presentados en todo el Estado de Veracruz, de los cuales se tomarán en cuenta solo los que han afectado directamente las inmediaciones del puerto.

AÑO	FECHA		NOMBRE CICLÓN TROPICAL	ETAPA Y/O CATEGORÍA MÁXIMA	LUGAR DE IMPACTO EN EL LITORAL DE VERACRUZ
	INICIO	TÉRMINO			
1931	10/08/1931	18/08/1931	Tormenta Tropical 3	Tormenta Tropical	Centro
1931	5/09/1931	12/09/1931	Huracán # 5	Huracán 3	Norte
1931	8/09/1931	16/09/1931	Huracán # 6	Huracán 2	Centro-Sur
1932	25/09/1932	03/10/1932	Huracán # 7	Huracán 3	Centro
1933	14/07/1933	20/07/1933	Tormenta Tropical # 3 Sin Nombre	Tormenta Tropical	Norte
1933	26/08/1933	29/08/1933	Tormenta Tropical # 10. Sin Nombre	Tormenta Tropical	Norte
1933	10/09/1933	15/09/1933	Huracán # 14 Sin Nombre	Huracán 1	Norte
1933	16/09/1933	25/09/1933	Huracán # 15 Sin Nombre	Huracán 2	Norte
1934	26/08/1934	1/09/1934	Huracán # 5 Sin Nombre	Huracán 1	Norte
1935	30/08/1935	1/09/1935	Tormenta Tropical # 3 Sin Nombre	Tormenta Tropical	Centro-Sur
1936	28/08/1936	30/08/1936	Huracán # 10 Sin Nombre	Huracán 1	Norte
1941	23/09/1941	30/09/1941	Huracán # 4 Sin Nombre	Huracán 3	Centro
1944	16/08/1944	24/08/1944	Huracán # 4 Sin Nombre	Huracán 3	Norte
1944	19/09/1944	22/09/1944	Huracán # 8 Sin Nombre	Huracán 1	Sur
1946	25/08/1946	26/08/1946	Tormenta Tropical # 3 Sin Nombre	Tormenta Tropical	Norte
1949	20/09/1949	26/09/1949	Huracán # 8 Sin Nombre	Huracán 2	Centro-Sur
1950	8/10/1950	10/10/1950	Huracán Item	Huracán 2	Centro-Sur

1951	12/08/1951	23/08/1951	Huracán Charlie	Huracán 4	Norte
1951	20/09/1951	21/09/1951	Tormenta Tropical George	Tormenta Tropical	Norte
1954	11/09/1954	12/09/1954	Huracán Florence	Huracán 1	Centro-Norte
1955	4/09/1955	6/09/1955	Huracán Gladys	Huracán 1	Norte
1955	10/09/1955	20/09/1955	Huracán Hilda	Huracán 3	Norte
1955	21/09/1955	30/09/1955	Huracán Janet	Huracán 5	Centro-Norte
1956	25/07/1956	27/07/1956	Huracán Anna	Huracán 1	Norte
1956	10/09/1956	12/09/1956	Tormenta Tropical Dora	Tormenta Tropical	Norte
1961	13/06/1961	15/06/1961	Depresión Tropical	Depresión Tropical	Centro-Sur
1961	27/07/1961	31/07/1961	Depresión Tropical	Depresión Tropical	Norte
1966	20/09/1966	22/09//1966	Tormenta Tropical Hallie	Tormenta Tropical	Centro
1967	1/10/1966	4/10//1966	Huracán Fern	Huracán 1	Norte
1978	5/08/1978	8/08/1978	Tormenta Tropical Bess	Tormenta Tropical	Norte
1980	20/09/1980	26/09/1980	Tormenta Tropical Hermine	Tormenta Tropical	Sur
1988	11/06/1988	17/06/1988	Depresión Tropical	Depresión Tropical	Norte
1988	31/08/1988	8/09/1988	Huracán Debby	Huracán 1	Norte
1990	4/08/1990	9/08/1990	Huracán Diana	Huracán 2	Norte
1993	14/09/1993	21/09//1993	Huracán Gert	Huracán 2	Norte
1994	29/08/1994	31/08/1994	Depresión Tropical # 5	Depresión Tropical	Norte
1995	5/08/1995	7/08//1995	Depresión Tropical # 6	Depresión Tropical	Norte
1996	19/08/1996	24/08//1996	Huracán Dolly	Huracán 1	Norte
1999	2/07/1999	3/07//1999	Depresión Tropical 2	Depresión Tropical	Norte
2005	28/06/2005	30/06/2005	Tormenta Tropical Bret	Tormenta Tropical	Norte
2005	23/07/2005	25/07/2005	Tormenta Tropical Gert	Tormenta Tropical	Norte

2005	22/08/2005	23/08/2005	Tormenta Tropical José	Tormenta Tropical	Centro
2005	1/10/2005	5/10/2005	Huracán Stan	Huracán 1	Sur
2007	12/10/2007	13/08/2007	Huracán Dean	Huracán 5	Centro Norte
2008	06/10/2008	06/10/2008	Tormenta Tropical Marco	Tormenta Tropical	Centro Norte
2010	05/09/2010	09/09/2010	Tormenta Tropical Hermine	Tormenta Tropical	Centro Sur
2010	14/09/2010	18/09/2010	Huracán Karl	Huracán 4	Centro
2011	18/08/2011	22/08/2011	Tormenta Tropical Harvey	Tormenta Tropical	Centro
2011	07/09/2011	11/09/2011	Huracán Nate	Huracán 1	Norte
2012	01/08/2012	10/08/2012	Huracán Ernesto	Huracán 2	Centro Sur
2012	09/08/2012	18/08/2012	Tormenta Tropical Helene	Tormenta Tropical	Norte
2013	17/06/2013	20/06/2013	Tormenta Tropical Barry	Tormenta Tropical	Centro Norte
2013	25/08/2013	26/08/2013	Tormenta Tropical Fernand	Tormenta Tropical	Centro
2013	12/09/2013	19/09/2013	Huracán Ingrid	Huracán Categoría 1	Centro Norte
2016	19/06/2016	21/06/2016	Tormenta Tropical Danielle	Tormenta Tropical	Centro Norte
2016	2/08/2016	6/08/2016	Huracán Earl	Huracán Categoría 1	Centro
2017	07/08/2017	10/08/2017	Huracán Franklin	Huracán Categoría 1	Norte
2017	05/09/2017	09/09/2017	Huracán Katia	Huracán Categoría 2	Norte

Tabla 1. Eventos registrados que han impactado en el Estado de Veracruz

Los ciclones tropicales que han impactado el estado de Veracruz son diversos y las trayectorias que siguieron espacialmente desde su lugar de formación hasta su culminación, también lo fueron. En buena medida los ciclones tropicales que tocan tierra veracruzana y que nacen el Atlántico Norte tropical y en el Mar Caribe, previamente impactan en su recorrido en otros espacios continentales, entre ellos se encuentra la península de Yucatán y posteriormente entran al Golfo de México donde se incrementa el riesgo para dirigirse a la costa de Veracruz. En cambio, los ciclones tropicales que nacen el seno del Golfo de

México, si su recorrido lo hacen hacia la costa oriental de la República Mexicana, es muy probable que impacten en la entidad.

Tormentas que impactaron y causaron daños en el puerto de Veracruz:

1. Huracán Item (1950)

El golfo de México dio lugar a otra tormenta tropical a principios de octubre, esta vez el 8 de octubre, cerca de la península de Yucatán. Item se movió hacia el oeste al principio, a continuación, hacia el sudoeste, mientras se fortalecía en huracán con vientos de 175 km/h (109 mph). Golpeó Veracruz el 10, y se disipó ese mismo día. (Temporada de huracanes en el Atlántico de 1950, s.f.)



Figura 3.2.3.1 Seguimiento del huracán Item en 1950

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

2. Huracán Janet (1955)

El 28 de septiembre: el huracán Janet entra a tierra en la Península de Yucatán entre Corozal Town, Honduras Británica y Chetumal, México, a las 1700 UTC, devastando y dejando a más de 10,000 personas sin hogar y dejando más de 40 millones de dólares en daños. (1955, s.f.)

3. Tormenta Tropical José (2005)



Figura 3.2.3.2 Seguimiento de la tormenta tropical José en 2005

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

La tormenta tropical José fue una tormenta tropical de corta duración, que tocó tierra en el centro de México durante agosto de 2005. José era la décima tormenta con nombre, de la temporada de huracanes en el Atlántico del 2005 y el cuarto de seis ciclones tropicales predichos (tres huracanes y tres tormentas tropicales) que tocaron tierra en México en ese año.

La tormenta tropical José se formó en la Bahía de Campeche el 22 de agosto y llegó a tierra en el estado mexicano de Veracruz al día siguiente. Conservó sus características tropicales un día antes de disiparse, pero aun así llevó los niveles de precipitaciones fuertes en la región. Deslizamientos de tierra causados por las lluvias mataron a ocho personas, seis de ellos directamente, y causó \$ 45 millones (2005 USD) en daños. La tormenta se disipó al entrar en contacto en las altas cordilleras de este país. (Temporada de huracanes en el Atlántico de 2005. Tormenta Tropical José, s.f.).

4. Huracán Stan (2005)



Figura 3.2.3.3 Seguimiento del huracán Stan en 2005

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

El huracán Stan fue la decimoctava tormenta con nombre y undécimo huracán de la temporada de huracanes en el Atlántico del 2005. También fue el sexto de siete ciclones tropicales (tres huracanes, dos de ellos de gran intensidad, tres tormentas tropicales y una depresión tropical) que tocaron tierra en México. Stan fue una tormenta relativamente débil que sólo alcanzó brevemente categoría de huracán.

El huracán “Stan” siguió su trayectoria con rumbo hacia la costa de Veracruz, y poco antes de las 10:00 hora local, tocó tierra entre Punta Roca Partida y Monte Pío, Ver., a unos 20 km al Noreste de San Andrés Tuxtla, Ver., con vientos máximos sostenidos de 130 km/h. Al tocar tierra, “Stan” empezó a perder fuerza y así, unas horas más tarde, cuando se encontraba a 25 km al Este-Sureste de Villa Azueta, Ver., se degradó a tormenta tropical, con vientos máximos sostenidos de 105 km/h y rachas de 130 km/h (Hernández Unzón & Bravo, Resumen del huracán “Stan”, 2005).

La tormenta produjo lluvias torrenciales en Centroamérica, especialmente en Guatemala, El Salvador y en el sur de México, causando inundaciones y deslaves lo que concurrió a 1.628 víctimas mortales. A lo largo de los países afectados, la tormenta provocó daños

de US \$ 3.9 mil millones en daños. La tormenta se disipó en el interior del territorio mexicano. (Huracán Stan, s.f.)

5. Huracán Dean (2007)



Figura 3.2.3.4 Seguimiento del huracán Dean en 2007

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

El huracán Dean se originó como una fuerte onda tropical en la costa occidental de África en la segunda semana de agosto, se organizó rápidamente constituyendo un sistema de baja presión el 12 de agosto. El 13 de agosto se formó la Depresión Tropical N° 4 en el atlántico oriental proveniente de una onda tropical al sur de Cabo Verde. Las altas temperaturas superficiales del mar tuvieron como resultado un rápido desarrollo e intensificación de la depresión, que avanzó rápidamente hacia el oeste.

El 14 de agosto, la Depresión Tropical N° 4 fue elevada formalmente a Tormenta tropical recibiendo el nombre de Dean que continuó fortaleciéndose y ganando organización a medida que seguía su camino hacia el Caribe, el 16 de agosto se convirtió oficialmente en el primer huracán de la temporada de 2007.

Las previsiones meteorológicas lo llevaban hacia el mar Caribe atravesando las Antillas Menores, el 17 de agosto el huracán tocó Martinica y Santa Lucía con categoría 2, al entrar al Caribe, sus cálidas

aguas elevaron su intensificación y el 17 de agosto fue categorizado como un huracán de intensidad 4.

El 21 de agosto tocó tierra finalmente en la península de Yucatán, en México, con una magnitud de 5, con vientos máximos sostenidos de 130 km/h y rachas de 165 km/h. El ojo del huracán contactó territorio continental a 50 kilómetros al norte de Chetumal. (Temporada de huracanes en el Atlántico de 2007, s.f.)

El 22 de agosto a las 12:45, "Dean" impacta por segunda vez, ahora en categoría 2. Sus vientos máximos sostenidos alcanzan los 155 km/h con rachas de 195 km/h. El centro del huracán se localiza a 10 km al Suroeste de Barra de Tecolutla, Veracruz. (Hernández Unzón, Reseña del Huracán "Dean" del Océano Atlántico, 2007)

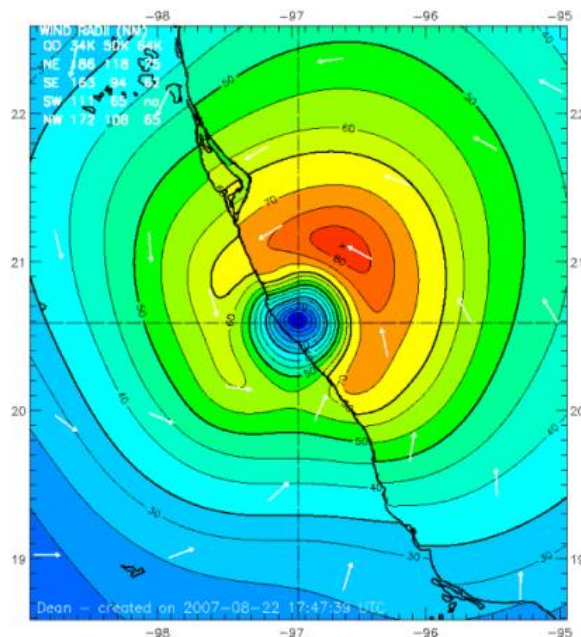


Figura 3.2.3.5 Datos de avión cazahuracanes de Dean en el segundo impacto sobre Veracruz

Fuente: NOAA/AOML/HRD

6. Huracán Karl (2010)



Figura 3.2.3.6 Seguimiento del huracán Kabrl en 2010

Fuente: Keith Edkin (WikiProject Tropical cyclones/Tracks)

Desde el 8 de septiembre, un área de baja presión localizada frente a las costas de Venezuela se mantuvo relativamente desorganizada, y luego estacionaria, durante varios días. El sistema, aunque en un entorno muy favorable para su desarrollo, no mostraba signos de circulación. Pero el día 14 de septiembre su organización mejoró, y un avión de reconocimiento confirmó la formación de una nueva tormenta tropical.

Karl tocó tierra en la península de Yucatán en la mañana del miércoles 15 de septiembre a 50 km al este-noroeste de Chetumal, con vientos de 100 km/h y ráfagas más fuertes. (Huracan Karl 2010 , s.f.)

El día 17 de septiembre a las 4:00 horas local, “Karl” era ya un huracán mayor con vientos máximos sostenidos de 195 km/h y rachas de 240 km/h, fuerza con la que alcanzó la categoría III en la escala Saffir-Simpson, a 110 km al Este-Noreste de Veracruz, Ver., convirtiéndose en un huracán extremadamente peligroso para las muy cercanas costas de Veracruz, mismas que ya eran fuertemente afectadas por las paredes del ojo del huracán.

“Karl” siguió su desplazamiento hacia el Oeste con vientos máximos sostenidos de 195 km/h, mientras sus bandas de intensa convección golpeaban fuertemente al estado de Veracruz. A las 11:00 horas, cuando el ojo del huracán se localizaba a 25 km al Nor-Noreste de

Veracruz, Ver., debido a su cercanía a la costa disminuyó ligeramente su fuerza, sin embargo, su fuerza lo mantenía como un huracán categoría IV y así, a las 12:00 horas local, el centro del extremadamente peligroso huracán “Karl” tocó tierra en la población de Playa Chachalacas, a 15 km al Norte de Veracruz, Ver., con vientos máximos sostenidos de 185 km/h y rachas de 230 km/h.

Al avanzar sobre tierra “Karl” empezó a perder fuerza por lo que a las 13:00 horas se encontraba como huracán de categoría II a 25 km al Oeste de Veracruz, Ver. “Karl” siguió debilitándose y a las 15:00 horas ya se encontraba a 50 km al Oeste-Suroeste de Veracruz, Ver., como huracán de categoría I, con vientos máximos sostenidos de 150 km/h y rachas de 185 km/h. (Hernández Unzón , Bravo, & Díaz, Reseña del Huracán “Karl” del Océano Atlántico, 2010)

7. Tormenta Tropical Harvey (2011)



Figura 3.2.3.7 Seguimiento de la tormenta tropical Harvey en 2011

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

Duración	18-22 de agosto 2011
Vientos máximos	100 km/h (durante 1 minuto)
Presión mínima	994 hPa

A mediados de agosto, una onda tropical moviéndose hacia el Oeste entró en el mar Caribe. Luego de fluctuaciones en su organización

ganó intensidad, transformándose en la Depresión tropical Ocho, el 18 de agosto. Al día siguiente, fue elevada de categoría y se convirtió en la Tormenta tropical Harvey. (Tormenta tropical Harvey (2011), s.f.)

Después de cruzar el estado de Tabasco, el día 21 por la tarde salió al mar en el Sur del Golfo de México, ubicándose a las 16:00 horas, a 75 km al Noreste de Coatzacoalcos, Ver. Mientras avanzaba hacia el Oeste-Noroeste con rumbo a la costa de Veracruz, la depresión tropical “Harvey” recuperó fuerza de vientos y así, a las 19:00 horas del día 21, se ubicó a 95 km al Nor-Noreste de Coatzacoalcos, Ver., con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h. “Harvey” siguió su trayecto hacia la costa de Veracruz y el 22 de agosto tocó tierra a 15 km al Oeste-Noroeste de Alvarado, Ver. con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h. Después de cruzar la parte Sur del estado de Veracruz, la depresión tropical “Harvey” avanzó sobre la sierra del Norte de Oaxaca. (Bravo Lujano & Hernández Unzón , Reseña de la tormenta tropical “Harvey” del Océano Atlántico)

8. Tormenta Tropical Helene (2012)



Figura 3.2.3.8 Seguimiento de la Tormenta tropical Helene en 2012

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

El 7 de agosto una onda tropical salió de África bajo el paralelo de 12° N, junto a una baja presión de 1009 hPa. Mientras el Centro Nacional de Huracanes empezó a monitorearla, dándole un 20% de probabilidad

de convertirse en un Ciclón tropical en las próximas 48 horas. Días después se aumentó la posibilidad de desarrollo al 70% el 9 de agosto. En el boletín de las 1600 UTC del mismo día, el CNH informó que se había formado la Depresión Tropical número 7 de la temporada. El sistema, a partir de allí, no se fortaleció más, y la tarde del sábado 11 de agosto, la depresión degeneró en una onda tropical por lo cual se había descontinuado los avisos de Tormenta Tropical para las islas de las Antillas Menores.

El domingo 12 de agosto, un avión cazahuracanes inspeccionó el área de la Onda Tropical, para ver si pudiera existir alguna posible regeneración de la extinta Depresión Tropical Siete; pero el avión la encontró muy desorganizada, y fue mantenida como Onda Tropical. Durante los próximos días se mantuvo así, dándole 0% de probabilidad de reorganización.

El día jueves 16 de agosto la NHC notó que los remanentes de esta, al llegar a la bahía de Campeche, se estaban organizando nuevamente, y le dio a este sistema un 40% de generación. Se envió un avión cazahuracanes, para inspeccionar más de cerca a este sistema, y éste encontró que la presión barométrica se encontraba a 1004 hPa, además poseía una circulación ciclónica bien definida, por esas razones, la NHC afirmó que este sistema era una tormenta tropical, y la nombró como Helene.

Mantuvo una trayectoria cerca de las costas del Este de México, y el día sábado 18 de agosto tocó tierra en el estado de Veracruz, mientras se la degradó a Depresión Tropical. Su impacto dejó como resultado, lluvias torrenciales y ciertos deslizamientos; para el domingo 19 de agosto, al entrar en contacto con las sierras del interior de México, se disipó. (Temporada de huracanes en el Atlántico de 2012, s.f.)

“La tormenta tropical Helene perdió fuerza este sábado y se convirtió en depresión al alcanzar la costa de Veracruz, en el Golfo de México, donde todavía miles de personas se recuperan de las inundaciones que trajo la semana pasada el huracán Ernesto.

El Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos en Miami informó que Helene, que se ubica a 40 kilómetros al noreste de Cabo Rojo, Veracruz, y a unos 50 kilómetros del sureste de Tampico, en Tamaulipas, tenía vientos máximos sostenidos de 55 kilómetros por hora.

Helene dejó una gran cantidad de lluvia en las zonas afectadas, según un reporte de la Comisión Nacional del Agua en Veracruz, donde los principales puertos de la zona centro y norte del estado se encuentran cerrados a la navegación menor debido a la presencia del meteoro”. (Redacción Animal Político, 2012)

9. Tormenta Tropical Barry (2013)



Figura 3.2.3.9 Seguimiento de la tormenta tropical Barry en 2013

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

Una onda tropical se formó al salir de Colombia el 15 de junio, estaba conformada por una amplia área de lluvias y tormentas eléctricas; los vientos de nivel alto hacían más conductivas la formación de un ciclón tropical. El 16 de junio por la tarde, ya ubicada al oeste del Mar Caribe paralelo a las costas de Nicaragua, la onda tropical aumentó su actividad de lluvias y tormentas eléctricas afectando a la parte noreste de Nicaragua y el este de Honduras. En la madrugada del 17 de junio se evidenció una circulación sobre el Golfo de Honduras. A las 15:00 UTC, el Centro Nacional de Huracanes informó que se había formado la Depresión tropical Dos a 95 kilómetros al este de Monkey River Town, Belice.

Tocando en el estado mexicano de Yucatán, las ráfagas de vientos mayores a 77 km/h acompañadas de lluvias torrenciales. Ya en tierra, la depresión no se esperaba ningún fortalecimiento. En la noche del 18 de junio, el sistema se desplazó a la costa, produciendo lluvias torrenciales y vientos huracanados.

Siguió su trayecto hacia el oeste con rumbo hacia la costa del estado de Veracruz y el día 19 de junio a las 13:45 horas, como resultado de las condiciones favorables que encontró en el suroeste del Golfo de México, se desarrolló a la tormenta tropical “Barry” con vientos máximos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/h a una distancia de 115 km al este-noreste de Veracruz, Ver. Mientras se acercaba a la costa del estado de Veracruz, “Barry” aumentaba gradualmente su fuerza y así, a las 19:00 horas, cuando se encontraba a 85 km al este-noreste de la ciudad de Veracruz, Ver., alcanzó la que sería su mayor fuerza, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 95 km/h, la cual conservó hasta después de su entrada a tierra.

La tormenta tropical “Barry” continuó su trayecto hacia la costa de Veracruz y el día 20 de junio tocó tierra en Playa La Mancha a 45 km al noroeste de Veracruz, Ver., con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 95 km/h. Al avanzar en tierra “Barry” empezó a debilitarse y a las 16:00 horas se ubicó a 60 km al noroeste de Veracruz, Ver., con vientos máximos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/h, fuerza que mantuvo hasta la tarde del mismo día, cuando se degradó a depresión tropical, con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h a 45 km al suroeste de Puebla. (Bravo Lujano, Reseña de la tormenta tropical “Barry” del Océano Atlántico, 2013)

Barry dejó como saldo tres muertos, cerca de dos mil quinientos damnificados y 20,994 casas dañadas en 31 municipios del Estado de Veracruz. (Temporada de huracanes en el Atlántico de 2013, s.f.)

10. Tormenta Tropical Fernand (2013)



Figura 3.2.3.10 Seguimiento de la tormenta tropical Fernand en 2013

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

Durante la tarde del 23 de agosto, la NHC empezó a monitorear una onda tropical sobre la península de Yucatán. Desplazándose al oeste, las condiciones atmosféricas eran favorables para un desarrollo, pero debido a su proximidad con tierra limitó el desarrollo de la onda.

El 25 de agosto, la actividad de lluvias y tormentas eléctricas empezaron a desarrollarse sobre un centro de nivel bajo a medida que entraba en contacto con la Bahía de Campeche. Luego las imágenes de satélite y radares evidenciaron en el sistema características ciclónicas, por eso la NHC empezó a emitir avisos sobre la Depresión tropical Seis. Dos horas después, datos del avión cazahuracanes indicaron que se habían desarrollado vientos de tormenta tropical cerca del centro, evidenciando el desarrollo de la Tormenta tropical Fernand, ubicado a 45 kilómetros al este de la ciudad de Veracruz con vientos máximos sostenidos de 75 km/h, rachas de 95 km/h. La tormenta tropical siguió moviéndose hacia el oeste y después hacia el oeste-noroeste, a las 23:45 horas del día 25 de agosto, “Fernand” tocó tierra a 5 km al norte de Zempoala, Ver., con vientos máximos sostenidos de 85 km/h y rachas de 100 km/h. Al dejar el mar y como resultado de la fricción con el terreno, empezó a debilitarse y a las 4:00 horas del día 26, ya se encontraba a 100 km al noroeste de Veracruz, Ver. con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 95 km/h. A las 10:00 horas del día 26, cuando se encontraba a 7 km al

este-noreste de Coyutla, Ver. se degradó a depresión tropical con vientos máximos sostenidos de 55 km/h y rachas de 75 km/h. (Bravo Lujano, Reseña de la tormenta tropical “Fernand” del Océano Atlántico, 2013)

El mayor impacto de la tormenta la sufrió en Veracruz, en donde más de 200 personas fueron evacuadas antes que la tormenta arribase y 13 personas murieron por deslizamientos de tierra. (Tormenta tropical Fernand, s.f.)

11. Tormenta Tropical Danielle (2016)



Figura 3.2.3.11 Seguimiento de la tormenta tropical Danielle en 2016

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

Una ola tropical emergió de la costa occidental de África el 8 de junio, llegando al suroeste del Mar Caribe el 15 de junio. La convección aumentó ese día y se organizó aún más después de que el sistema ingresara a la Bahía de Campeche tres días después, lo que condujo a la formación de una depresión tropical a las 12:00 UTC del 19 de junio. La depresión se intensificó en la tormenta tropical que fue nombrada Danielle a las 06:00 UTC del 20 de junio y alcanzó vientos máximos de 45 mph (75 km/h) seis horas después. La interacción con la tierra comenzó a debilitar la tormenta unas horas más tarde, y Danielle tocó tierra cerca de Tamiahua en México, con vientos de 40 mph (65 km/h). La tormenta se debilitó rápidamente a medida que avanzaba tierra adentro, cayendo a la

intensidad de la depresión tropical a las 00:00 UTC del 21 de junio y degenerando en un remanente bajo seis horas más tarde. El remanente bajo continuó tierra adentro antes de disiparse sobre las montañas del este de México ese mismo día.

Danielle arrojó fuertes lluvias en las regiones afectadas, particularmente en las áreas cercanas a Veracruz y Tamiahua, Ver. No se informaron las cantidades oficiales, sin embargo, la precipitación máxima que se observó fue de alrededor de 6.22 pulgadas (158 mm) en Cosautlán de Carvajal. El ciclón también trajo ráfagas de viento de hasta 45 mph (72 km/h), reportadas cerca de Tampico. En gran parte de Veracruz, los funcionarios suspendieron las actividades escolares y el puerto de Veracruz se cerró temporalmente. (Temporada de huracanes en el Atlántico de 2016, s.f.).

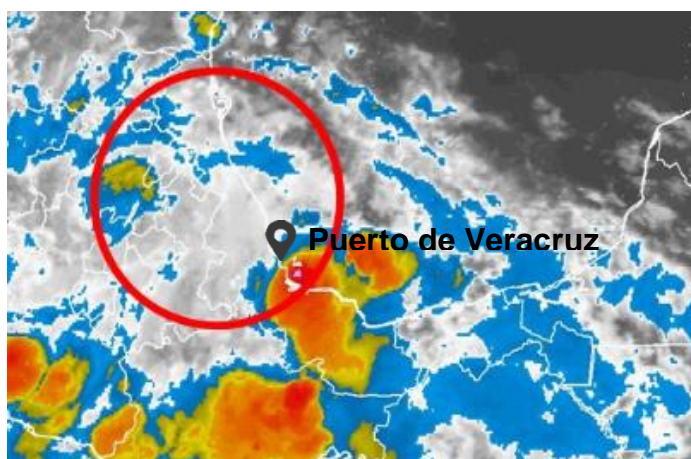


Figura 3.2.3.12 Imagen en canal infrarrojo de la tormenta tropical Danielle en 2016

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional

12. Huracán Earl (2016)



Figura 3.2.3.13 Seguimiento del huracán Earl en 2016

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

El 26 de julio, una ola tropical surgió en el Atlántico desde la costa oeste de África. Para el 2 de agosto, un avión de reconocimiento reportó una circulación cerrada y vientos de fuerza de tormenta tropical, como resultado, la perturbación se convirtió en la tormenta tropical “Earl” alrededor de las 06:00 UTC.

Dirigido generalmente hacia el oeste por una cresta sobre el sur de los Estados Unidos, Earl se intensificó en medio de las cálidas temperaturas del océano y el bajo cizallamiento, alcanzando una intensidad de huracán y alcanzando un pico de vientos de 85 mph (140 km/h) el 3 de agosto.

Earl golpeó el Cayo Turneffe en Belice alrededor del 04:00 UTC del 4 de agosto. Emergió en la Bahía de Campeche el 5 de agosto como una tormenta tropical mínima, manteniendo su desplazamiento hacia el oeste-noreste, con una trayectoria hacia las costas de Tabasco y Veracruz. A las 7:00 h “Earl” se mantenía a 105 km del este-noreste de Coatzacoalcos, Ver. y a 285 km al este-sureste del Puerto de Veracruz. Durante ese día presentó un desplazamiento hacia el oeste sobre el sur del Golfo de México, por lo que a las 22:00 h nuevamente tocó tierra a 40 km al sureste de la ciudad de Veracruz, con vientos máximos sostenidos

de 95 km/h y rachas de 110 km/h, sus bandas nubosas afectaron las costas de Veracruz. (Aguirrez Hernández, 2016)

En México, las inundaciones y los deslizamientos de tierra causaron daños graves y muchas muertes, especialmente en Puebla y Veracruz. En Veracruz, Earl y los deslizamientos de tierra resultantes dañaron unas 6.300 casas y 26 carreteras, mientras que ocurrieron 13 muertes. En general, Earl dejó daños por \$ 132 millones y 81 muertes en México, con otras 10 personas desaparecidas. (Huracán Earl, s.f.)

13. Huracán Franklin (2017)



Figura 3.2.3.14 Seguimiento del huracán Franklin en 2017

Fuente: WikiProject Tropical cyclones/Tracks

El 3 de agosto, el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) comenzó a monitorear una onda tropical que estaba ubicada en el sureste del mar Caribe. Un cambio relativamente pequeño en su trayectoria ocurrió en los siguientes dos o tres días a medida que se desplazaba hacia el oeste a una velocidad de 16 a 24 km/h, aunque los modelos globales siguieron indicando que podría desarrollarse más una vez llegase a la bahía de Campeche. Una boya en el oeste del Caribe, cerca de la perturbación, informó de vientos sostenidos de fuerza de vendaval, y combinada con imágenes satelitales que indican que la circulación se había definido mejor, indicó que la perturbación se convirtió en la tormenta tropical Franklin a las 03:00 UTC del 7 de agosto. Situado en un ambiente relativamente favorable, con el único factor inhibitorio de

proximidad a la tierra, Franklin se fortaleció a una intensidad máxima inicial de 95 km/h el 7 de agosto antes de moverse a tierra cerca de Pulticub, en México, a las 03:00 UTC el 8 de agosto.

El ciclón se debilitó considerablemente mientras permaneció en la península de Yucatán. Más tarde, Franklin emergió en la bahía de Campeche y de inmediato comenzó a fortalecerse de nuevo, convirtiéndose en un huracán categoría 1 a las 21:00 UTC del 9 de agosto. Alcanzó su máxima intensidad a las 00:00 UTC del 10 de agosto con vientos de 140 km/h y una presión de 981 hPa, poco antes de tocar tierra en Lechuguillas, municipio de Vega de Alatorre, Veracruz, cinco horas después., teniendo como zona de prevención por efectos de huracán desde el Puerto de Veracruz hasta Cabo Rojo, Ver. (Aguirre Hernández, 2017).

Este fue el primer huracán en golpear la región de Veracruz desde Karl en 2010. El ciclón se debilitó rápidamente en el terreno montañoso de México y se disipó poco después. (Temporada de huracanes en el Atlántico de 2017, s.f.).

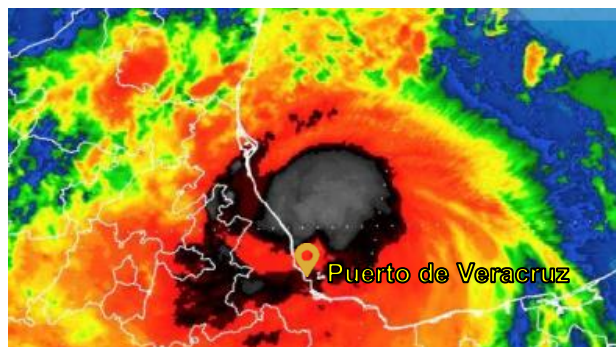


Figura 3.2.3.15 Imagen de satélite del huracán "Franklin" del Océano Atlántico

Fuente: CONAGUA-Servicio Meteorológicos Nacional

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

4.1 Análisis Estadístico

4.1.1 Altura de ola significativa (Hs)

Boya 42055

La Figura 4.1.1 representa la rosa de oleaje de los datos de la boya 42055, dentro del periodo 2005-2019, así como la información correspondiente a los estadísticos básicos de la variable altura de ola significativa de este registro de datos, con la probabilidad de ocurrencia asociada a cada una de las direcciones de procedencia del oleaje.

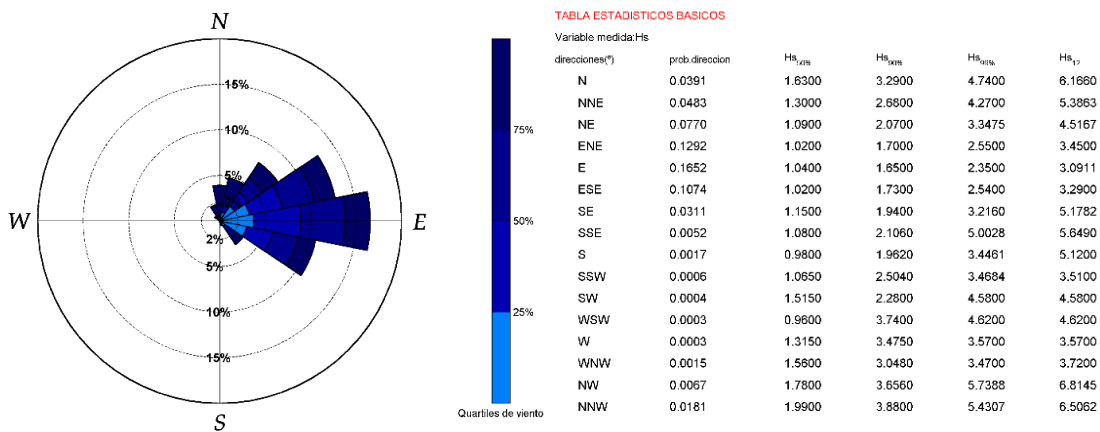


Figura 4.1.1. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Hs de la boya 42055 (2005-2019).

Los oleajes provienen del primer y segundo cuadrante, es decir que el oleaje principal resulta del este.

Para la variable de altura de ola significativa, Hs, se han obtenido además otros descriptores básicos, como el histograma y la función de distribución empírica, extrayéndose de esta última que la mitad del tiempo los oleajes en

aguas profundas del golfo de México presentan alturas de ola en torno a 1.07 m. El oleaje significativo con mayor frecuencia oscila entre 0.8 y 1.2 metros.

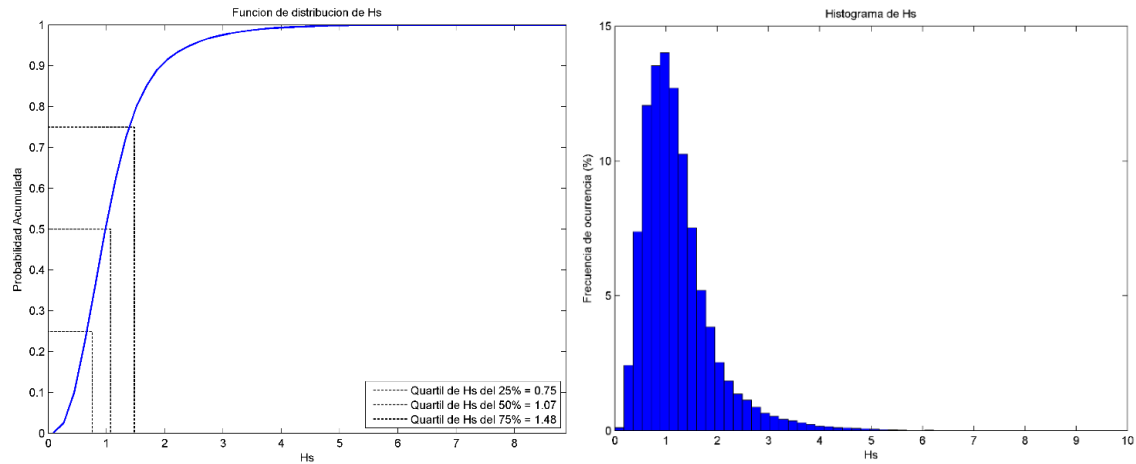


Figura 4.1.2. Histograma y función de distribución de la variable H_s de la boya 42055 (2005-2019).

En la figura 4.1.3 puede observarse el registro de una altura máxima de oleaje significativa de 8.89 metros provocada por el paso del huracán de grado 2 “DEAN” el 22 de agosto de 2007.

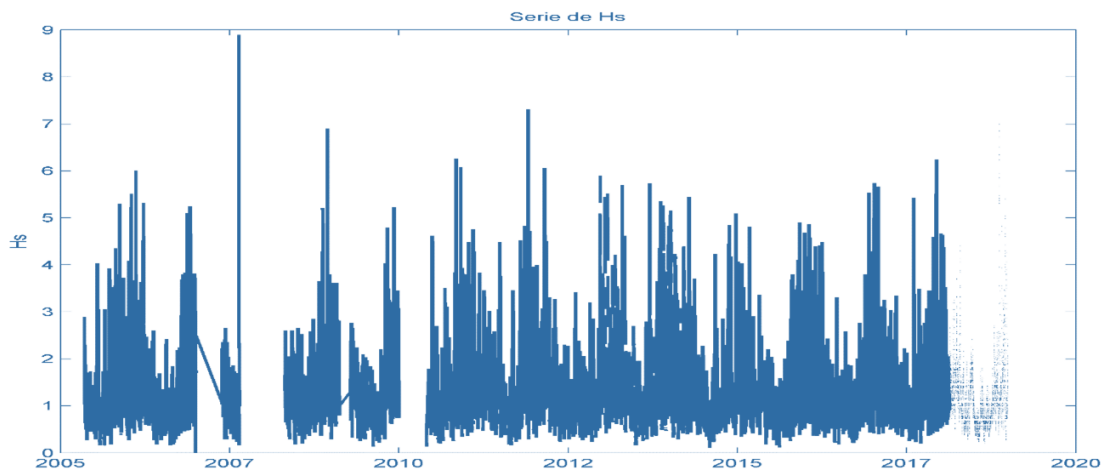


Figura 4.1.3. Serie de la variable H_s de la boya 42055 (2005-2019)

Estación VERV4

En esta estación se analizan los datos de viento y se utiliza el modelo de relación entre la H_s y Viento que recomiendan NATO - STANAG 4194 (1983) propuesta para aguas costeras:

$$U_W = 3.2H_S$$

El cual corresponde a la relación para el espectro JONSWAP para un fetch de $X= 360$ km (Elzbieta M. Bitner-Gregersen):

$$H_S = 0.0163XU_W$$

Donde H_s es altura de ola significativa en metros y U_w es el viento en m/s. Los resultados para la H_s calculada mediante este método se muestran en las siguientes figuras:

En la figura 4.1.4 se representa la rosa de oleaje de los datos de la estación VERV4, en el periodo 2010-2016, así como la información correspondiente a los estadísticos básicos de la variable altura de ola significativa de este registro de datos, con la probabilidad de ocurrencia asociada a cada una de las direcciones de procedencia del oleaje. Los oleajes provienen principalmente del Norte (Son los oleajes que inciden en el puerto de Veracruz)

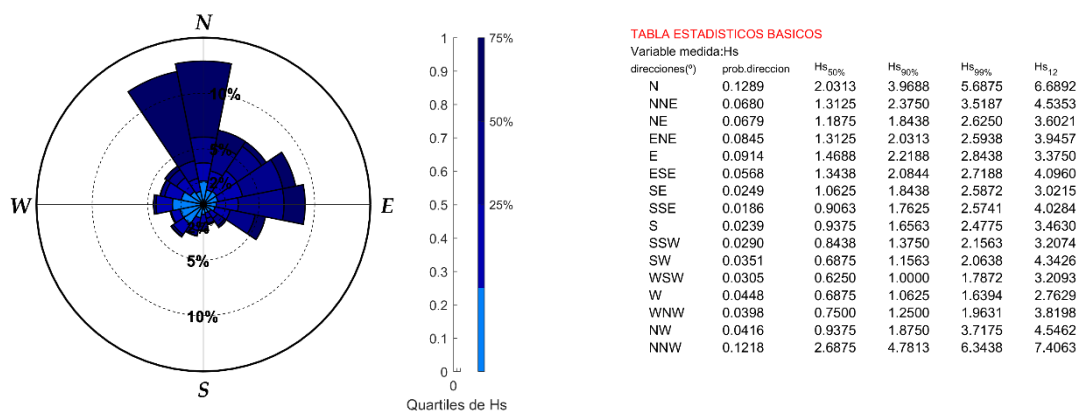


Figura 4.1.4 Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable H_s de la boya VERV4 (2010-2016).

En el histograma y la función de distribución empírica (figura 4.1.5), se muestra que la mitad de los oleajes es de 1.2 metros. El oleaje significativo con mayor frecuencia oscila entre 1.2 y 1.5 metros.

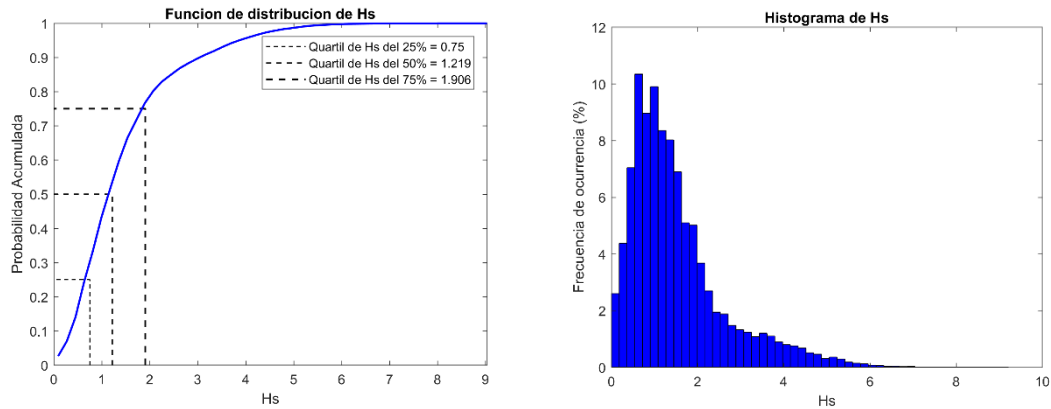


Figura 4.1.5. Histograma y función de distribución de la variable H_s de la estación VERV4 (2010-2016).

En la figura 4.1.6 se presentan las alturas de ola significativa y puede observarse que en este periodo de tiempo hubo varias alturas de ola debidas a eventos extremos como nortes y huracanes. La mayor altura de ola significativa calculada fue de 9 metros ocasionada por el huracán Karl el 17 de septiembre de 2010

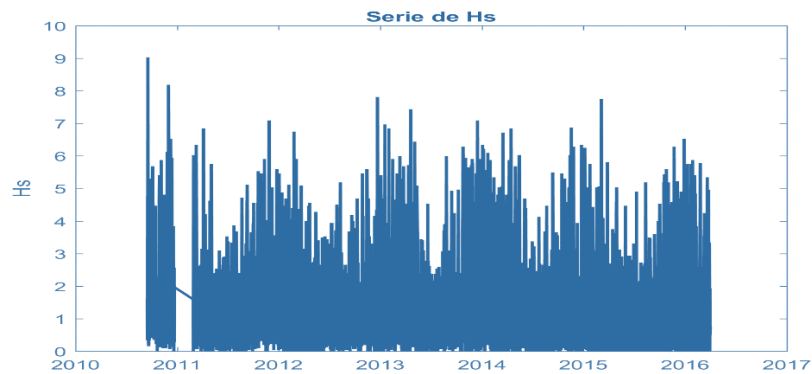


Figura 4.1.6. Serie de la variable H_s de la estación VERV4

En la figura 4.1.7 se observa el comportamiento general del oleaje en la zona de estudio. Puede observarse que el oleaje entra por el este en el golfo de

México y cambia de dirección en el proceso de refracción del oleaje y al llegar al puerto de Veracruz desde el norte.

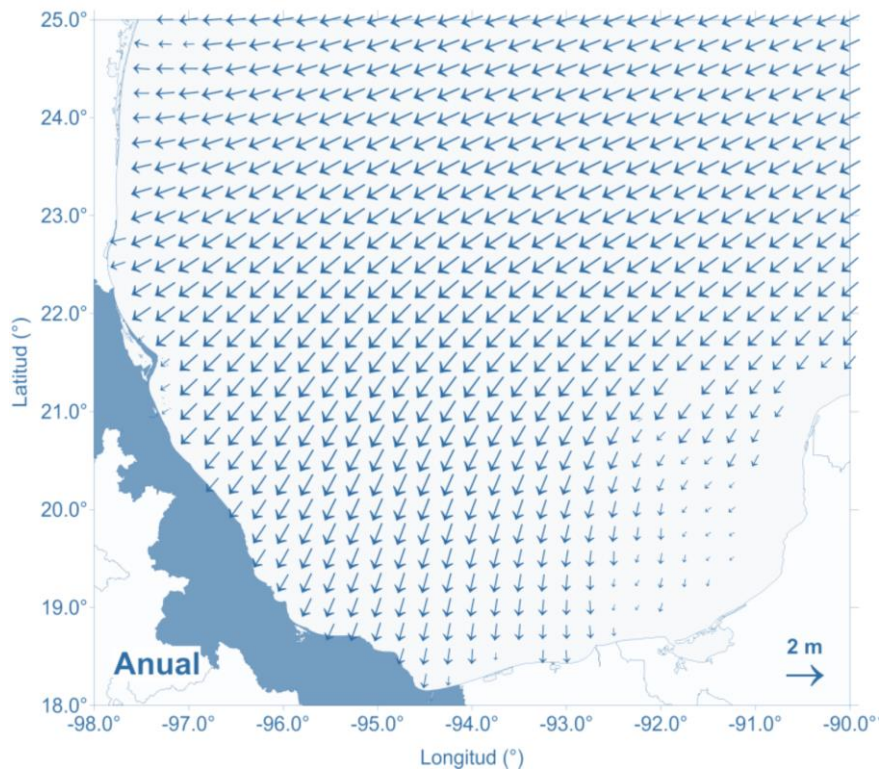


Figura 4.1.7. Dirección e intensidad de altura de ola media anual en el Golfo de México que abarca las dos boyas analizadas (Silva, et al)

4.1.2 Temperatura

Boya 42055

Para la temperatura se presenta la figura 4.1.8, donde se encuentra la función de distribución de temperatura y se puede observar que el cuartil de 50% es igual a 27.9 °C,

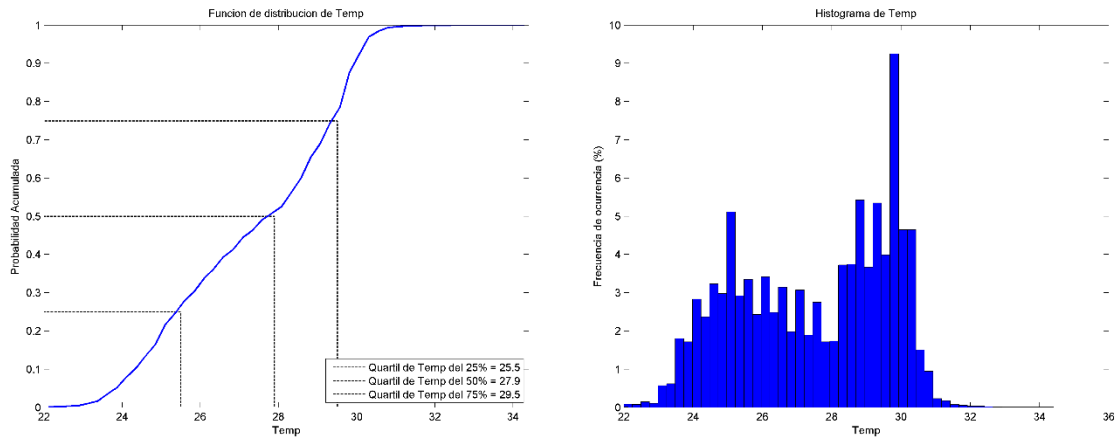


Figura 4.1.8. Histograma y función de distribución de la variable de la temperatura de la boya 42055 (2005-2019).

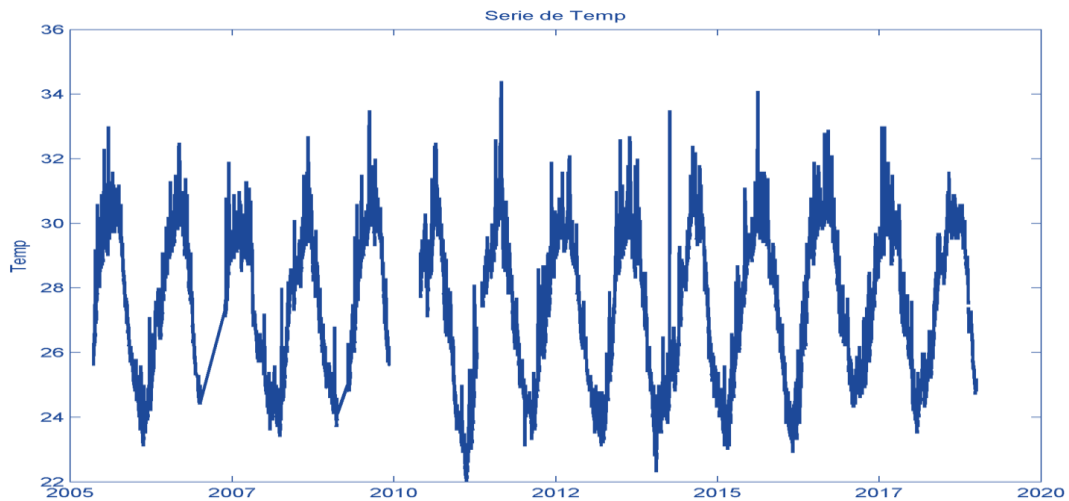


Figura 4.1.9. Serie de la variable de temperatura de la boya 42055 (2005-2019).

Para la temperatura de la boya 42055 (figura 4.1.9) se presenta una temperatura del agua máxima de 34.40 °C el 28 de agosto del 2011 y una temperatura de agua mínima de 22.00 °C el 13 de febrero del 2011. La temperatura con frecuencia esta alrededor de los 30 °C

Estación VERV4

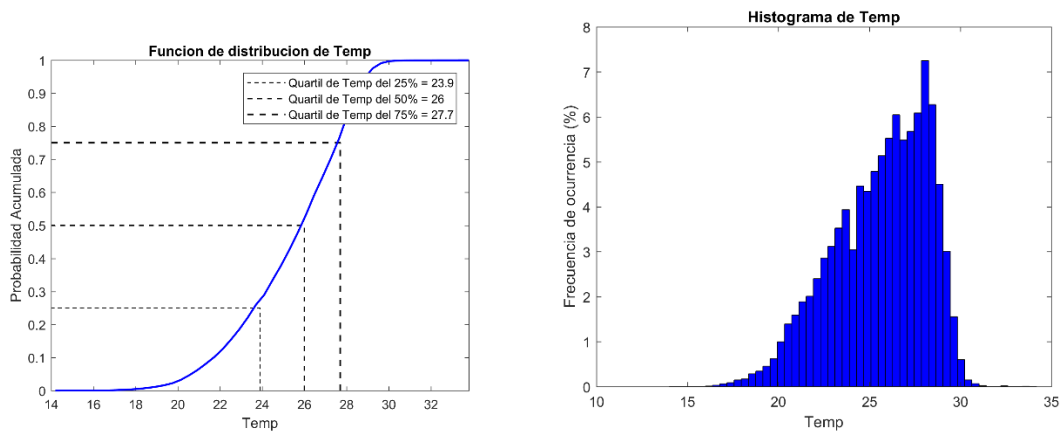


Figura 4.1.10. Histograma y función de distribución de la variable de la temperatura de la estación VERV4 (2010-2016).

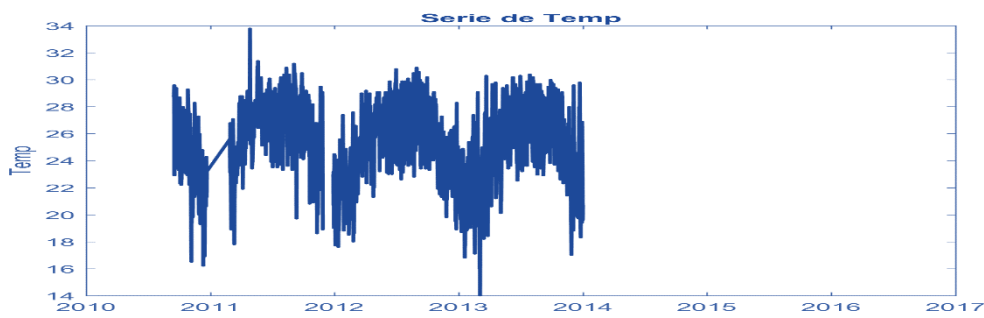


Figura 4.1.11. Serie de la variable de temperatura de la estación VERV4 (2010-2014)

4.1.3 Viento

Boya 42055

Análogamente se representa la distribución sectorial del viento, así como sus estadísticos básicos. Los vientos provienen principalmente del este y la frecuencia del viento oscila entre 5 m/s y 7 m/s.

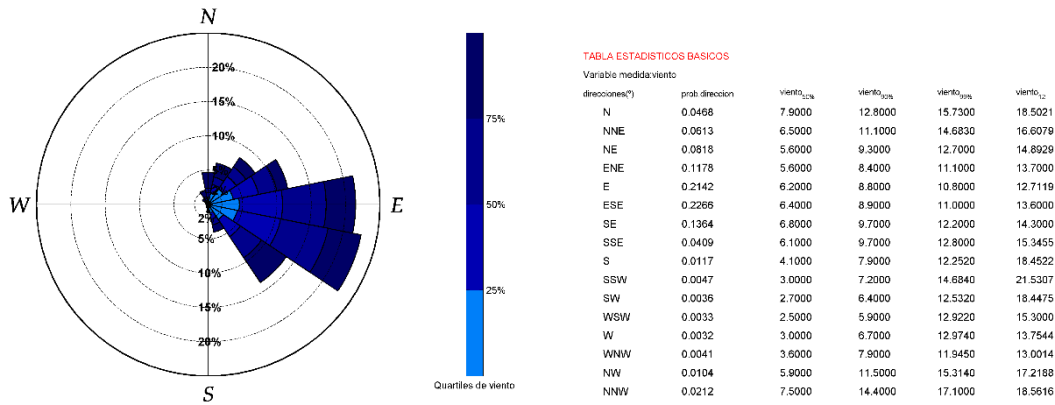


Figura 4.1.12. Rosa de oleaje y tabla de estadísticos básicos de la variable Viento de la boya 42055 (2005-2019).

Asimismo se representa el histograma del viento y su función de distribución empírica, de la que se extrae que el 50% del tiempo el viento es de 6.2 m/s (Figura 4.1.13).

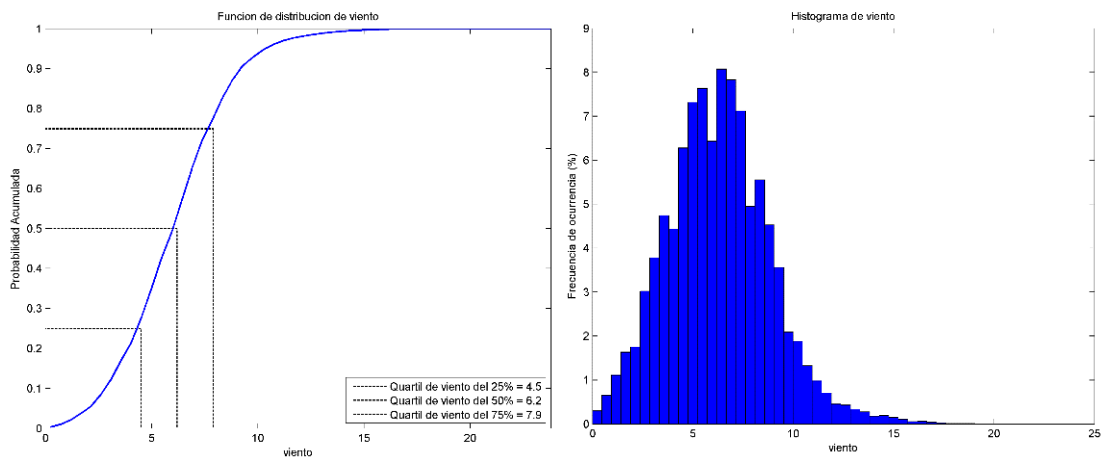


Figura 4.1.13. Histograma y función de distribución de la variable de Viento de la boya 42055 (2005-2019).

En la siguiente figura se muestra que la velocidad del viento máxima fue de 23.8 m/s el 22 de agosto del 2007 provocado también por el huracán DEAN.

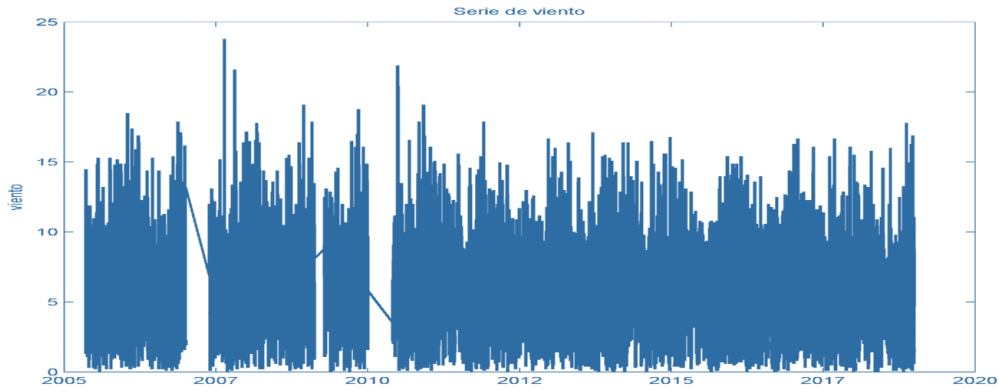


Figura 4.1.14. Serie de la variable de viento de la boya 42055 (2005-2019).

Estación VERV4

En la figura siguiente se muestra que en la estación VERV4 el viento proviene principalmente de la dirección Norte.

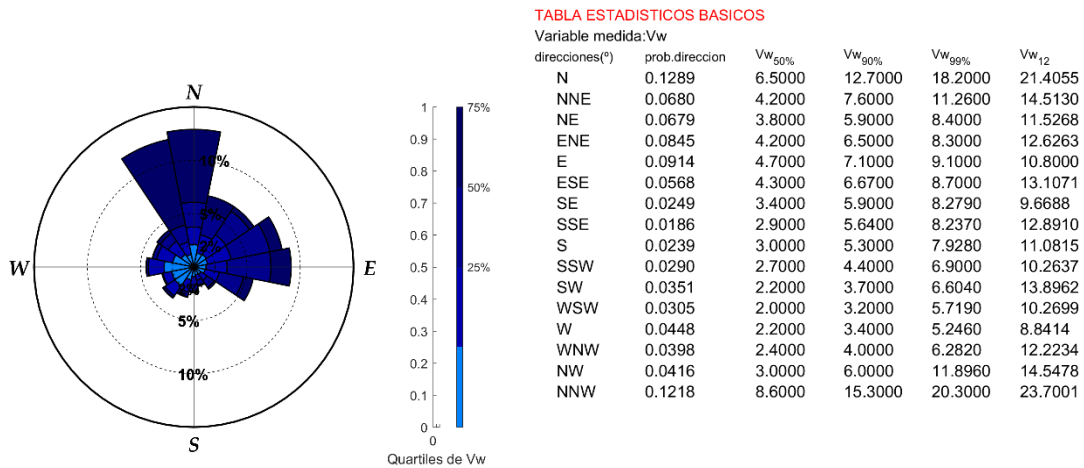


Figura 4.1.15. Rosa de oleaje y tabla de estadísticas básicas del Viento de la estación VERV4

En la función de distribución puede observarse que el 50% de los datos corresponden a una velocidad del viento de 3.9 m/s. El histograma de frecuencias muestra que los vientos más frecuentes son de 4.5 m/s

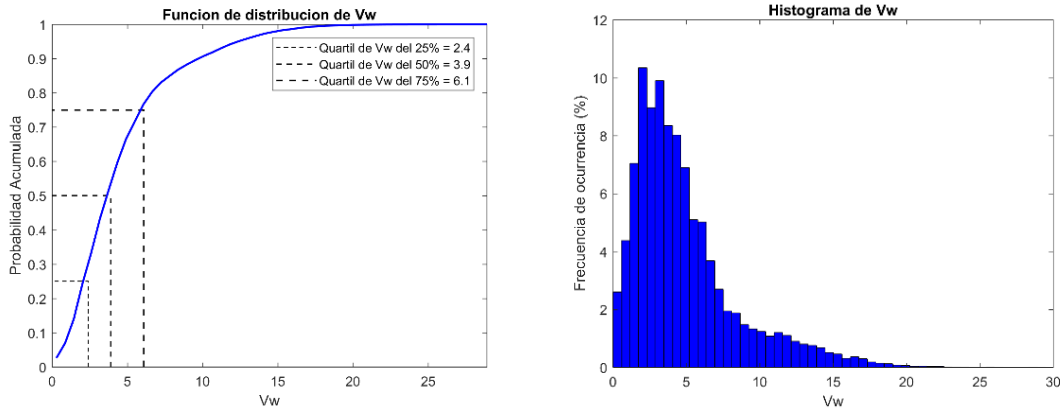


Figura 4.1.16 Histograma y función de distribución de la variable de Viento de la estación VERV4

En la figura 4.1.17 se puede observar que la dirección del viento se presenta desde el este en el centro del Golfo de México y cambia de dirección de tal manera que el viento se presenta desde el norte en la zona de estudio, lo cual confirma el análisis presentado.

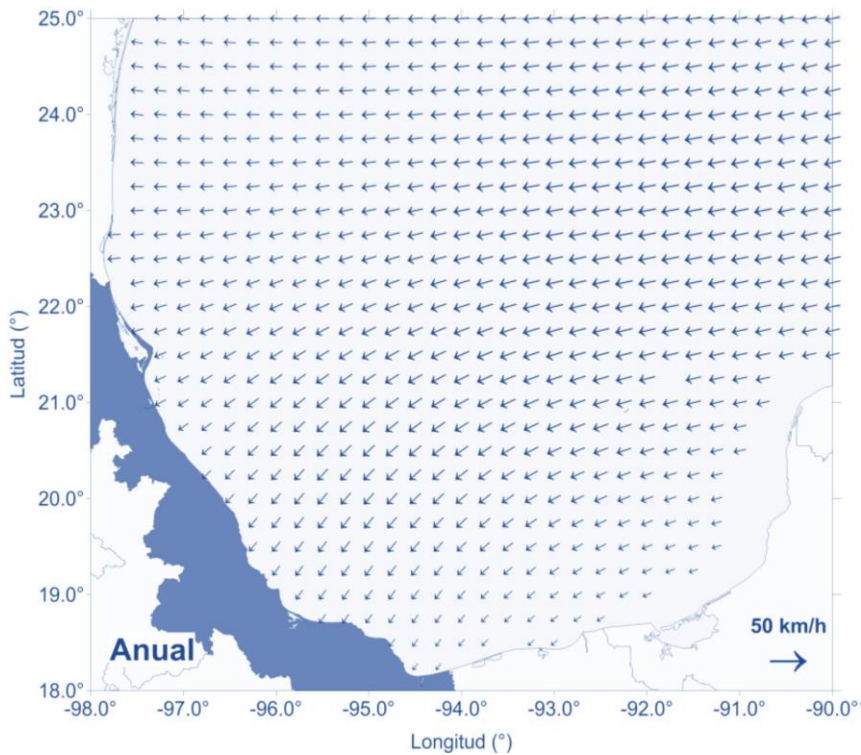


Figura 4.1.17. Dirección e intensidad de la velocidad del viento media anual en el Golfo de México que abarca las dos boyas analizadas (Silva, et al)

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Análisis de eventos máximos

Los ciclones tropicales que han impactado el entorno de Veracruz durante el periodo de 1930 al 2019 fueron 55 en total; de los cuales el 10.9 por ciento se desarrollaron como depresiones tropicales el 36.36 por ciento correspondieron a tormentas tropicales y el 52.77 por ciento a huracanes.

Los eventos que alcanzaron la categoría 1 fueron el 46.87 por ciento, los que la intensidad de sus vientos fueron del orden 2, cubrieron el 25 por ciento los de nivel 3 tuvieron el 15.62 por ciento y los que alcanzaron las categorías 4 fueron 6.25 y categoría 5 igual, 6.25 por ciento.

Los ciclones tropicales que se formaron en aguas del Atlántico Norte fueron el 20.93%, en el Mar Caribe el 23.25 por ciento y en la cuenca del Golfo de México el 55.81 por ciento. Con relación al lugar de impacto se destaca que el 65.11 por ciento entró a tierra por la parte norte del litoral veracruzano, el 11.62 por ciento por la parte central, el 16.27 por ciento arribaron por el centro-sur y el 6.97 por ciento únicamente ingresaron por el sur.

El estado de Veracruz durante el mes de septiembre tuvo el mayor ingreso de ciclones tropicales con el 39.53 por ciento en agosto el 34.88 por ciento en julio arriban el 11.62 por ciento, pero en junio y octubre solamente el 6.97 por ciento tocan tierra respectivamente.

En 48 años los ciclones tropicales no ingresaron al estado de Veracruz. Las depresiones tropicales se acentuaron en la década de 1990, aunque en 1961 se presentaron 2 en forma consecutiva en los meses de junio y julio. Asimismo, los años que tuvieron mayores impactos sobre la entidad fueron 1931, 1933, 1955 y 2005, 2007, 2010, 2011, 2012, 2013, 2016 y 2017. (En los últimos años han entrado más huracanes al Golfo de México y alcanzado el puerto de Veracruz).

En el análisis de los años consecuentes al 2005, puede observarse que en el año 2007 impactó el Huracán Dean, que causó graves daños al puerto. “Bajo una fuerte lluvia e intensas ráfagas, la ciudad de Veracruz, la mayor en la zona de influencia del huracán y uno de los principales puertos comerciales del país, tenía la mayoría de sus comercios cerrados. Las tiendas tapizaron sus ventanas con maderas, mientras hoteles ponían cintas en vidrios que daban al agitado mar y trasladaban huéspedes a habitaciones que no miran a la playa. De acuerdo con Protección Civil, unas 15,000 personas fueron evacuadas en refugios en el estado de Veracruz” (Periódico Expansión) Lo cual indica que el puerto fue cerrado durante los días que estuvo el Huracán activo. Por otro lado, la boya 42055 registró el día 22 de agosto de 2007 una ola máxima de 8.89 metros provocada por el paso del huracán. No se cuenta con registro en la estación VERV4 para constatar la velocidad de los vientos en el puerto, ya que esta estación aún no estaba en operación cuando ocurrió el huracán.

Los eventos que afectaron el puerto de Veracruz, en el cual se requirió el cierre al paso de los barcos y que tuvieron rebase de oleaje en el puerto, fueron: El Huracán Karl con una altura de ola de 9 metros, la tormenta Tropical Harvey el 22 de agosto con altura de ola significativa de 5 metros, tormenta tropical Barry el día 20 de junio de 2013, con una altura de 4.5 metros, la tormenta tropical Fernand el día 26 de agosto de 2013 con un altura de ola de 6 metros. Del huracán Earl no se tienen datos de oleaje ni de viento, sin embargo, tomando en cuenta los datos proporcionados por la prensa que enuncian que el huracán tocó tierra en el puerto de Veracruz a una velocidad de 26.38 m/s, el oleaje calculado sería de 8.2 metros. Bajo este mismo supuesto, la tormenta tropical Danielle habría llegado a la costa con una velocidad de 20 m/s, lo que provocaría una altura de ola cerca de los 6.25 metros. El huracán Franklin llegó por el norte y no se tienen datos precisos, sin embargo, en el diario El Financiero, se puede leer lo siguiente: " El huracán 'Franklin' tocó tierra firme en Veracruz alrededor de la media noche en la zona de Lechuguillas, municipio de Vega de Alatorre, en Veracruz, según el el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Esto podría provocar inundaciones y deslizamientos en las cuencas de Pánuco, Tuxpan, Nautla, Misantla, Cazones, Tecolutla, La Antigua, Jamapa y Cotaxtla. Aunque en menor cantidad, la zona sur de Veracruz también presentará lluvias y posibles

inundaciones. Además de que los puertos presentarán un fuerte oleaje de entre seis y ocho metros” (El Financiero).

Por otro lado, los nortes o frentes fríos que impactan en el estado de Veracruz en los meses de noviembre a mayo también provocan intensos vientos que suben las alturas de oleaje y contribuyen al rebase en las obras del puerto.

En el análisis de la estación VERV4 se midieron los siguientes frentes fríos que rebasaron los 6 metros de altura de ola significativa:

Número	Fecha	Hs máxima medida (m)
1	30/11/2010	8.0
2	25/04/2011	6.8
3	27/11/2011	6.9
4	21/12/2012	7.8
5	16/01/2013	6.9
6	30/01/2013	6.7
7	19/04/2013	7.4
8	03/05/2013	6.6
9	15/12/2013	6.2
10	03/01/2014	6.3
11	17/03/2014	6.7
12	15/04/2014	6.8
13	17/11/2014	6.6
14	04/01/2015	6.3
15	05/03/2015	7.7
16	22/11/2015	6.3
17	28/12/2015	6.53

Tabla. 2. Frentes fríos que impactaron en el puerto de Veracruz medidos en la estación VERV4 (2010-2016).

5.2 Periodos de retorno

De acuerdo al análisis realizado con dos métodos distintos, se puede observar que por el método de Excedencias sobre un umbral, siendo el umbral de 5.7 metros, el oleaje significativo de temporal esperado en 25 años ronda los 9.5 metros y en 50 años se esperaría que el oleaje rebase los 10 metros.

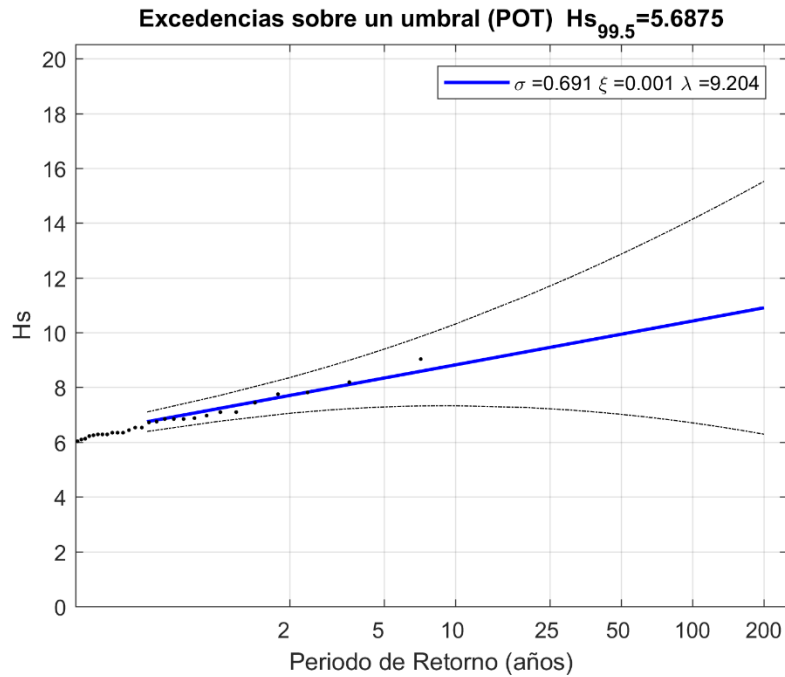


Figura 5.1.1. Ajuste de los datos al método de Excedencias sobre un Umbral.

Para el ajuste de extremos por Máximos anuales (GEV tiende a Gumbel), el oleaje de temporal esperado en 25 años sería de 9.6 metros y en 50 años se esperaría un oleaje de 10.2 metros.

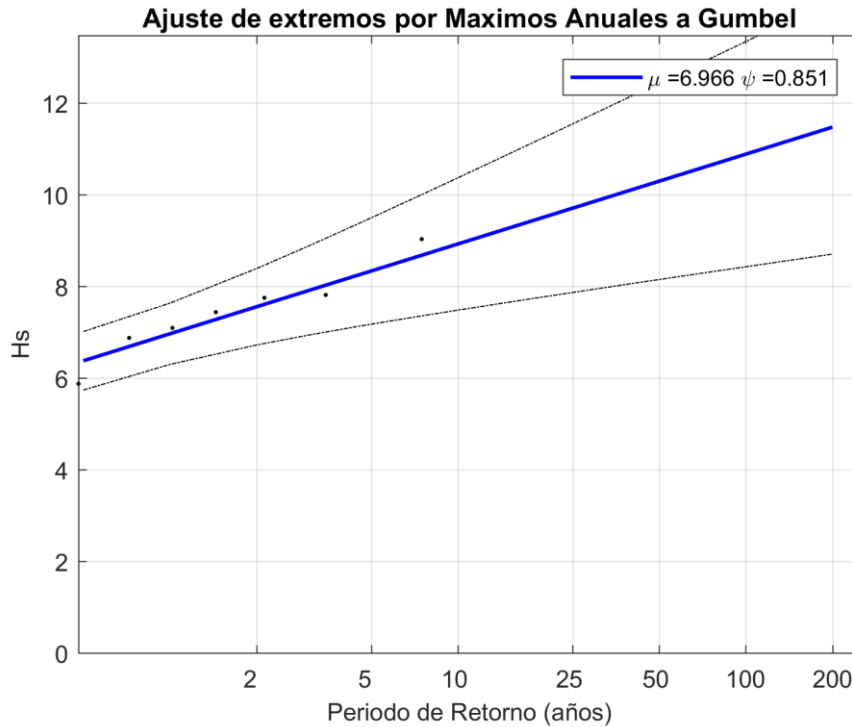


Figura 5.1.2. Ajuste de los datos al método de Máximos Anuales Gumbel.

5.3 Rebase de oleaje

La sobreelevación del nivel del mar debido a la marea meteorológica, los ciclones y frentes fríos constituye un fenómeno adverso en el puerto, ya que, una vez alcanzado el nivel máximo de diseño, se presenta el fenómeno de rebase sobre la obra de protección. De los episodios estudiados en el presente trabajo, se determina que los oleajes que rebasan los 7 metros de altura de ola significativa causarán rebase en las obras, lo que obligará al puerto a cerrar actividades. De acuerdo con diversos estudios antes mencionados, se prevé que debido al cambio climático se presente un aumento del nivel del mar en algunos años.

Los 13 huracanes analizados en el presente estudio más los frentes fríos en la temporada invernal muestran que al menos 2 veces al año el puerto permanece cerrado a la navegación por peligro de rebase de oleaje.

En el análisis de los valores extremos, se puede observar que en los últimos años los eventos ciclónicos y frentes fríos han aumentado en intensidad

y se esperan valores de altura de ola mayores. Las obras de protección del puerto están diseñadas para un rebase de oleaje de 7 metros, una vez alcanzado este nivel, se presenta un rebase de ola y el puerto debe cerrar operaciones, ya que se pierde el propósito de albergue con el cual son diseñados los puertos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos realizados a los datos de las boyas estudiadas, así como su comparación y cotejo con los datos presentados en la prensa hicieron posible que el presente trabajo se realizara de una manera pertinente y lo más completa posible. El Puerto de Veracruz es un lugar de intercambio económico y de servicios muy importante para el país y el paro o cierre del puerto en sí debido a rebases de oleaje en las obras de protección marítima significan grandes pérdidas económicas. Si bien es imposible tener el puerto abierto a la navegación los 365 días del año, es importante tomar medidas que puedan mitigar los efectos de los fenómenos que impactan en el puerto.

Debido a que los eventos analizados han impactado en el puerto en pocas ocasiones, tomando en cuenta el total del registro de datos estudiado, solo se recomienda realizar un estudio en las obras marítimas de protección del puerto para determinar la conveniencia de subir las cotas de coronación de las obras.

REFERENCIAS

- Aguirre Hernández, C. (2017). *Huracán "Franklin" del Océano Atlántico*. Obtenido de CONAGUA - Servicio Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2017-Franklin.pdf>
- Aguirre Hernández, C. (2016). *Huracán "Earl" del océano Atlántico*. Obtenido de CONAGUA-Servicio Meteorológico Nacional : <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2016-Earl.pdf>
- Beltrán, F. H. (s.f.). *Programa de rector del desarrollo litoral de estado de Veracruz de Ignacio de la Llave*. Veracruz de Ignacio de la Llave.
- Bravo Lujano, C. (2013). *Reseña de la tormenta tropical "Barry" del Océano Atlántico*. Obtenido de CONAGUA - Servicio Meteorológico Nacional : <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2013-Barry.pdf>
- Bravo Lujano, C. (2013). *Reseña de la tormenta tropical "Fernand" del Océano Atlántico*. Obtenido de CONAGUA - Servicio Meteorológico Nacional : <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2013-Fernand.pdf>
- Bravo Lujano, C., & Hernández Unzón, A. (s.f.). *Reseña de la tormenta tropical "Harvey" del Océano Atlántico*. Obtenido de SEMARNAT- Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional : <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2011-Harvey.pdf>
- Castillo, E., Hadi, A., Balakrishnan, N., & Sarabia, J. M. (2005). *Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and Science*. Wiley-Interscience.
- Cendrero Uceda, A. (2005). Impactos sobre las zonas costeras. En *Impactos del cambio climático en España*. España.

- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer.
- Díaz, E. (1995). Riesgos climáticos y la prensa: los efectos de los fenómenos meteorológicos sobre la agricultura en España, en el diario de La Vanguardia, entre 1985 y 1990. En *Situaciones de riesgo climático en España: trabajos presentados a la II Reunión del Grupo de Climatología de la Asociación de Geógrafos Españoles, celebrada en Jaca (Huesca), 15 a 17 de septiembre de 1995* (págs. 223-232). Instituto Pirenaico de Ecología.
- Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología. (s.f.). Obtenido de <https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioVeracruz.pdf>
- Elzbieta, M.-G. (2018). Comparison of wind and wave climate in open sea and coastal waters. En *Ocean Engineering 170* (págs. 199-208).
- Havbro Faber, M. (2012). *Statistic and Probability Theory: In Pursuit of Engineering Decision Support*. Lyngby: Springer.
- Hernández Unzón, A., Bravo, C., & Díaz, J. (2010). *Reseña del Huracán "Karl" del Océano Atlántico*. Obtenido de Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2010-Karl.pdf>
- Hernández Unzón, A. (2007). *Reseña del Huracán "Dean" del Océano Atlántico*. México: CONAGUA-Servicio Meteorológico Nacional.
- Hernández Unzón, A., & Bravo, C. (2005). *Resumen del huracán "Stan"*. Obtenido de CONAGUA-Servicio Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2005-Stan.pdf>
- Huracan Karl 2010*. (s.f.). Recuperado el 17 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2010#/media/Archivo:Karl_2010_track.png

- Huracán Stan*. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Stan
- Máyer, P. (1999). Un siglo de temporales en la prensa de Gran Canaria. *Vegueta* 4, 267-282. Obtenido de <http://revistavegueta.ulpgc.es/ojs/index.php/revistavegueta/article/view/178>
- NATO - STANAG 4194. (1983). Standard: NATO - STANAG 4194: Standardized Wave and Wind Environments and Shipboard Reporting of Sea Conditions. Publ. 1983-04-06.
- Nieves, A., & Domínguez, F. C. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería. Un enfoque moderno*. Mexico: McGraw-Hill.
- Olcina Cantos, J. (2008). Cambios en la consideración territorial, conceptual y de método de los riesgos naturales. *Scripta Nova. Revista Electronica de Geografía y Ciencias Sociales, XII (270 (24))*, s.p.
- Ortiz Lozano, L., Arceo Briseño, P., Granados Barba, A., Salas Monreal, D., & Jiménez Badillo, M. (2010). Zona Costera. *Zona Costera*. Gobierno del Estado de Veracruz.
- Periodico El Financiero. (agosto de 2017). Huracán 'Franklin' toca tierra en Veracruz. Obtenido de <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/huracan-franklin-a-punto-de-impactar-en-veracruz>
- Periodico Expansion. (Agosto de 2007). Dean azota al puerto de Veracruz. *Expansión*. Obtenido de <https://expansion.mx/actualidad/2007/8/22/dean-toca-tierra-en-las-costas-del-golfo>
- Redacción Animal Político. (18 de agosto de 2012). Recuperado el 17 de mayo de 2020, de Animal Político: <https://www.animalpolitico.com/2012/08/tormenta-tropical-helene-amenaza-la-costa-mexicana-del-golfo/>
- Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. (2004). *Coastal Engineering: Processes, theory and desing practice*. USA: Spon Pres.

Shigunov, V., & Bertram, V. (2014). Prediction of added power in seaway by numerical simulation. *Proceeding of the 9th International Conference on High-Performance Marine Vehicle HIPER2014* (págs. 102-113). Athens, Greece: National Technical University of Athens.

Temporada de huracanes en el Atlántico de 1950. (s.f.). Recuperado el 16 de Mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_1950

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2005. Tormenta Tropical José. (s.f.). Recuperado el 16 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atl%C3%A1ntico_de_2005#Tormenta_tropical_Jos%C3%A9

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2007. (s.f.). Recuperado el 17 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2007

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2012. (s.f.). Recuperado el 18 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2012

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2013. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2013

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2013. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2013

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2016. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre:

https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2016

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2016. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2016

Temporada de huracanes en el Atlántico de 2017. (s.f.). Recuperado el 19 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_Atlántico_de_2017

Tormenta tropical Harvey (2011). (s.f.). Recuperado el 18 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: [https://es.wikipedia.org/wiki/Tormenta_tropical_Harvey_\(2011\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Tormenta_tropical_Harvey_(2011))

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability and statistics for engineers and scientistc.* Pearson.

Wikipedia. (s.f.). Recuperado el 16 de mayo de 2020, de Wikipedia. La enciclopedia libre: <https://es.wikipedia.org/wiki/1955>

Yanes, A., & Marzol, M. (2009). Los temporales marinos como episodios de riesgo en Tenerife a través de la prensa (1985-2003). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22(1-2), 95-104. Obtenido de [http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/22\(1-2](http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/22(1-2)