

**ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DEL OLEAJE  
PROVOCADO POR EL HURACÁN HARVEY EN EL SECTOR NOR-OESTE DEL  
GOLFO DE MÉXICO**

ANDRÉS FELIPE GALLÓN GUARÍN

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE:

**OCEANÓGRAFO**

ASESORES:

**VLADIMIR G. TORO**

MAGÍSTER EN INGENIERÍA - RECURSOS HIDRÁULICOS.

DOCTOR EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA.

**BERNARDO ESQUIVEL TRAVA**

OCEANÓLOGO

DOCTOR EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

CORPORACIÓN ACADÉMICA AMBIENTAL

PREGRADO DE OCEANOGRAFÍA

TURBO, COLOMBIA

## AGRADECIMIENTOS

Son innumerables las personas que han contribuido en la realización de esta investigación. En primer lugar, agradecer al trabajo arduo de mis asesores Vladimir G. Toro Valencia, Bernardo Esquivel Trava por las sugerencias a lo largo de este proyecto, el apoyo profesional y emocionalmente fue fundamental para que concluyera esta investigación de manera satisfactoria.

Muy especialmente quiero agradecer a mis padres, hermanos quienes son los motores de mi vida en todo momento han apoyado incondicionalmente mis proyectos. A mi madre por estar dispuesta en acompañarme en cada noche de estudio, dándome siempre una voz de aliento, gracias a mi padre por el apoyo incondicional por siempre desear lo mejor en mi vida.

A mis profesores, que fueron parte fundamental en la formación como profesional y persona en especial a Alba Cecilia Bustamante, Jorge Velásquez, Raúl Montoya, Lennin Flórez, Karina Lugo, Héctor Bustos con cada aporte de sus conocimientos nos hicieron amar la ciencia y la investigación.

A mis compañeros, amigos por sus aportes y los buenos momentos vividos dentro del aula de clases, en especial a Ferney Orejuela y Sergio Padilla por sus aportes incondicionales en programación.

Rosa y Ramón, mi familia adoptiva que hicieron de mucho agrado mi estancia en mi bello México donde compartimos momentos increíbles e inolvidables y mostrar sus sentimientos puros.

Por último, al proyecto CIGoM por el acceso a los datos, a mis amadas Universidad de Antioquia y Universidad Autónoma de Baja California, por brindarme la oportunidad de hundirme en el mar de sus conocimientos.

***“El hombre lleva el peso de la gravedad en sus hombros. Sólo tiene que bajar al fondo del mar para sentirse libre” Jacques Cousteau***

## TABLA DE CONTENIDO.

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>10</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
<b>3. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>10</b>
3.1. ÁREA DE ESTUDIO .....	10
3.2 CONCEPTOS GENERALES DEL OLEAJE .....	11
3.3. HURACANES .....	12
3.3.1. HURACÁN HARVEY .....	13
3.4.2. DATOS DE OLEAJE .....	16
3.4.3. DATOS DEL CENTRO NACIONAL DE HURACANES .....	20
3.4.4. PROCESAMIENTO DE DATOS .....	20
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
4.1. CAMPOS DE VIENTOS .....	21
4.2. VIENTOS MÁXIMOS SOSTENIDOS .....	24
4.3. VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO.....	25
4.4. ALTURA SIGNIFICANTE .....	26
4.5. PERIODO ASOCIADO AL PICO ESPECTRAL .....	28
4.6. SERIE TEMPORAL DE ALTURA DE OLA RESPECTO A LA DISTANCIA DEL RECORRIDO DE HARVEY A LAS BOYAS .....	30
4.7. GRÁFICOS DE DISPERSIÓN.....	31
4.8. ESPECTROS DE FRECUENCIA.....	34
4.8.1. BOYA 42002.....	35
4.8.2. BOYA 42019.....	36
4.8.3. BOYA 42020.....	37
4.8.4. BOYA 42055.....	38
4.9. ESPECTROS DIRECCIONALES .....	39
4.9.1. BOYA 42020.....	39
4.9.2. BOYA 42002.....	43
4.9.3. BOYA 42055.....	46
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>50</b>
<b>6. TRABAJO FUTURO – RECOMENDACIONES</b> .....	<b>51</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>52</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Batimetría del área de estudio, Golfo de México. Datos tomados de GEBCO... 10	10
<b>Figura 2.</b> (a) Oleaje tipo sea. (b) Oleaje tipo swell. (Imágenes tomadas de google)..... 11	11
<b>Figura 3.</b> Trayectoria del huracán Harvey en agosto 2017..... 14	14
<b>Figura 4.</b> Diagrama del resumen de la metodología usada en este trabajo. .... 15	15
<b>Figura 5.</b> Localización de las boyas oceanográficas de la NDBC y su ubicación respecto al tránsito de huracán Harvey por el Golfo de México..... 16	16
<b>Figura 6.</b> Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 23 al 25 de agosto del 2017..... 21	21
<b>Figura 7.</b> Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 26 al 28 de agosto del 2017..... 22	22
<b>Figura 8.</b> Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 28 al 30 de agosto del 2017..... 23	23
<b>Figura 9.</b> Valores de velocidad máxima sostenida (m/s) del huracán Harvey..... 24	24
<b>Figura 10.</b> Velocidad del viento máxima. En color azul boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055)..... 26	26
<b>Figura 11.</b> Altura de onda significativa en color azul la boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055) instaladas en el Golfo de México. .... 27	27
<b>Figura 12.</b> Periodo de onda promedio en color azul la boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055) instaladas en el Golfo de México. .... 28	28
<b>Figura 13.</b> Serie temporal de la altura del oleaje y la distancia del recorrido de Harvey por el Golfo de México respecto a las boyas. En el eje Y derecho la distancia del huracán Harvey (kilómetros), en el eje Y izquierdo la altura del oleaje (metros). Las boyas están clasificadas por letras, A. Boya 42002, B. Boya 42019, C. Boya 42020, D. Boya 42055. . 30	30
<b>Figura 14.</b> Gráfico de dispersión de la altura de onda respecto a la velocidad máxima del viento..... 32	32
<b>Figura 15.</b> Gráfico de dispersión normalizada velocidad máxima del viento / máxima velocidad medida respecto Hs / Hs máximo con los respectivos estadísticos..... 33	33
<b>Figura 16.</b> Serie de tiempo del espectro de oleaje en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42002. .... 35	35
<b>Figura 17.</b> Serie de tiempo del espectro en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42019..... 36	36
<b>Figura 18.</b> Serie de tiempo del espectro en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42020..... 37	37
<b>Figura 19.</b> Serie de tiempo del espectro del oleaje en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42055. .... 39	39
<b>Figura 20.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México. .... 40	40
<b>Figura 21.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de huracán en el Golfo de México. .... 41	41
<b>Figura 22.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de huracán en el Golfo de México. .... 42	42

<b>Figura 23.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México. ....	42
<b>Figura 24.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México. ....	43
<b>Figura 25.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de huracán en el Golfo de México. ....	44
<b>Figura 26.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de huracán en el Golfo de México. ....	45
<b>Figura 27.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México. ....	46
<b>Figura 28.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42055 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México. ....	47
<b>Figura 29.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42055 en condición de huracán en el Golfo de México. ....	48
<b>Figura 30.</b> Espectros direccionales del oleaje para la boya 42055 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México. ....	49

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Escala Saffir-Simpson para clasificar la intensidad de los huracanes.....	13
<b>Tabla 2.</b> Información de las boyas de la NDBC utilizadas en esta investigación. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Distancias de las boyas 42002, 42019, 42020 y 42055 respecto al avance del huracán. En azul, la distancia más cercana, en rojo, la distancia más lejana.....	29
<b>Tabla 4.</b> Rangos de la correlación lineal. Estadística para ciencias del comportamiento de Haroldo Erloza, editorial Harla, México 1987.....	31

## RESUMEN

El huracán Harvey fue un evento muy dinámico, que ocurrió en el mes de agosto del 2017 en el océano Atlántico, presentó vientos intensos, oleaje de gran altura. Investigaciones recientes, se han concentrado en analizar eventos extremos de precipitación, evaporación, humedad y se ha abordado muy poco en el análisis espectral del oleaje, por tal motivo, se analizó las características espectrales del oleaje provocado por el huracán Harvey en el sector Noroeste del Golfo de México, durante el 23 al 31 de agosto del 2017, mediante datos *in situ* medido por cuatro boyas oceanográficas identificadas 42002, 42019, 42020 y 42055. Con el fin de describir el comportamiento de esta perturbación en términos de oleaje, se analizó series de tiempo para los campos de vientos, velocidad máxima sostenida del viento, velocidad máxima del viento, altura del oleaje y periodo de onda, de tal modo realizamos espectros en función de la frecuencia y dirección. Los datos fueron obtenidos mediante las boyas de la NDBC (National Data Buoy Center) y campos de vientos de CFSR, mientras que los datos para los espectros fueron proporcionados por el proyecto CiGOM. Se obtuvo los espectros direccionales mediante el cálculo del MEM (método de máxima entropía).

En condiciones de depresión tropical la velocidad máxima del viento y la altura del oleaje eran bajas respecto en etapa de huracán, con registros de velocidades del viento máxima muy intensas por tanto generó oleaje de gran altura. Por otro lado, los datos sugieren que valores inferiores a 15 m/s muestran una correlación perfecta entre la velocidad máxima del viento y la altura del oleaje. Los espectros en dirección mostraron sistemas monomodales para depresión y tormenta tropical, asociados a bajas energías, mientras que en huracán se observó que el sistema es bi y multimodal registrando los máximos valores de energía a bajas frecuencias asociados a oleaje local.

**Palabras claves:** Huracán Harvey, oleaje, espectro direccional, Golfo de México.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los huracanes son sistemas dinámicos que se originan sobre los océanos tropicales durante el verano-otoño, generados principalmente por las interacciones océano-atmósfera. Durante las últimas décadas estos sistemas han ocurrido con mayor frecuencia e intensidad, siendo los huracanes de categoría 3, 4 y 5 los que han presentado mayor actividad. Estas condiciones han sido más severas durante esta década producto del sobrecalentamiento en la superficie del océano y la atmósfera. Según Emanuel (2007, 2013) y Trenberth y Fasullo (2008), argumentan que habrá una mayor ocurrencia de huracanes siendo más intensos y frecuentes con el tiempo. De acuerdo con Knutson *et al.*, (2015), Knutti y Sedláček (2012) y Sobel *et al.*, (2016) estos podrían ser en promedio categoría 4 y 5.

El campo de vientos en un huracán es irregular principalmente por la dirección de avance del mismo Esquivel *et al.*, (2015). En las paredes del ojo del huracán se presenta una acumulación de tormentas convectivas que circundan el ojo, y producen condiciones extremas. Las zonas de vientos máximos se localizan específicamente al lado derecho del centro del ciclón, con respecto a la dirección de avance, producto a la sumatoria de la velocidad de avance del huracán y la velocidad del viento (Emanuel, 2003). Los vientos intensos, asociados a los huracanes, producen espectros complejos, registrando olas que se propagan cientos de kilómetros.

En términos del análisis espectral del oleaje para un huracán, Wright *et al.* (2001) estudió su variación espacial, encontrando alturas significantes de hasta 11 metros, y olas con alturas extremas de 19 metros de altura. Las olas con mayores alturas se observaron en el cuadrante Noreste, producto del avance de la tormenta y la velocidad de grupo de las olas propagándose en la misma dirección, por lo contrario, las olas más pequeñas se desplazaron en dirección Suroeste con alturas de hasta 5 metros. En este mismo estudio, el espectro direccional fue obtenido por datos de altímetro donde se reportaron sistemas trimodales al lado derecho del huracán (Castro, 2009).

En el caso específico del Golfo de México, Hu & Chen, (2011) estudiaron las características del espectro direccional del oleaje de 7 huracanes mediante observaciones *in situ* de 12 boyas. Los resultados de esta investigación sugieren que las direcciones principales del oleaje van en la dirección del huracán en los cuadrantes delanteros (derecha e izquierda) y uno trasero (izquierda). Además, que la mayoría de la energía se irradia desde la región a la derecha del centro del huracán y que en esa región los espectros son mono-modales.

Así mismo, Esquivel *et al.* (2015) realizaron un estudio sobre la estructura espacial del campo de olas durante condiciones de huracán en el Golfo de México. Analizaron los espectros direccionales del oleaje durante el tránsito de 14 huracanes utilizando como referencia el centro del huracán, la dirección de avance y el radio

de vientos máximos. Según los autores, en los cuadrantes derechos (con respecto a la dirección de avance del huracán) cerca de la región de vientos máximos, la energía dominante del oleaje es generada localmente, mientras que, en los cuadrantes izquierdos la energía dominante es generada en las otras regiones del huracán. Sus resultados sugieren que las olas generalmente se propagan a la derecha de la dirección del viento, excepto en la región de vientos máximos donde la diferencia con la dirección del viento es mínima.

En la temporada de huracanes del 2017, la actividad de las tormentas tropicales en el Océano Atlántico fue superior a lo normal Jacobs *et al.*, (2018), ocurriendo más de 15 tormentas donde 10 de ellas luego fueron huracanes. Entre los huracanes más intensos de la temporada 2017 se encuentran Irma, María y Harvey.

De acuerdo con los estudios realizados a los efectos que generó el huracán Harvey en el Golfo, diferentes autores (mencionados al final de este párrafo), presentó las siguientes características (vientos con velocidades superiores a 200 km (categoría cuatro), excesiva evaporación y humedad, precipitaciones extremas entre otras más) (Van Oldenborgh *et al.*, (2017), Risser, M. D., & Wehner, M. F. (2017), Jacobs *et al.*, (2018), Omranian, E. *et al.*, (2018)).

Es de notar que el recorrido de Harvey incluyó una primera incursión a tierra, luego un regreso al Golfo de México y por último un reingreso a tierra. Trayectoria que lo hace un huracán único. En este sentido el espectro del oleaje a escala temporal se vio influenciado por la entrada-salida-entrada a tierra del huracán, lo cual suponemos, configuró características únicas al espectro. En ese sentido, se planteó la siguiente pregunta de investigación ¿cuáles son las características espectrales del oleaje durante el tránsito del huracán Harvey cerca a las costas del estado de Texas, EE. UU? Teniendo en cuenta esta pregunta, se planteó la siguiente hipótesis, las características del oleaje varían significativamente con respecto al avance del huracán Harvey tras el tránsito por el Golfo de México.

Con el fin de comprobar esta hipótesis y teniendo en cuenta las condiciones antes mencionadas del huracán, en esta investigación se espera caracterizar el espectro direccional del oleaje durante el paso del huracán Harvey por el Golfo de México, mediante datos medidos *in situ*. Con este fin se analizaron los campos de vientos y vientos máximos que se registraron durante la evolución del huracán Harvey en su tránsito por el Golfo de México. Además, se analizaron las características espectrales del oleaje generado durante su evolución hasta llegar a un huracán de categoría cuatro en términos de los espectros en función de la frecuencia y dirección y su relación con la intensidad del ciclón. Es de notar que los datos analizados son provenientes del proyecto Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Caracterizar el espectro direccional del oleaje durante el paso del huracán Harvey por el Golfo de México, mediante datos medidos *in situ*.

### 2.2 Objetivos específicos

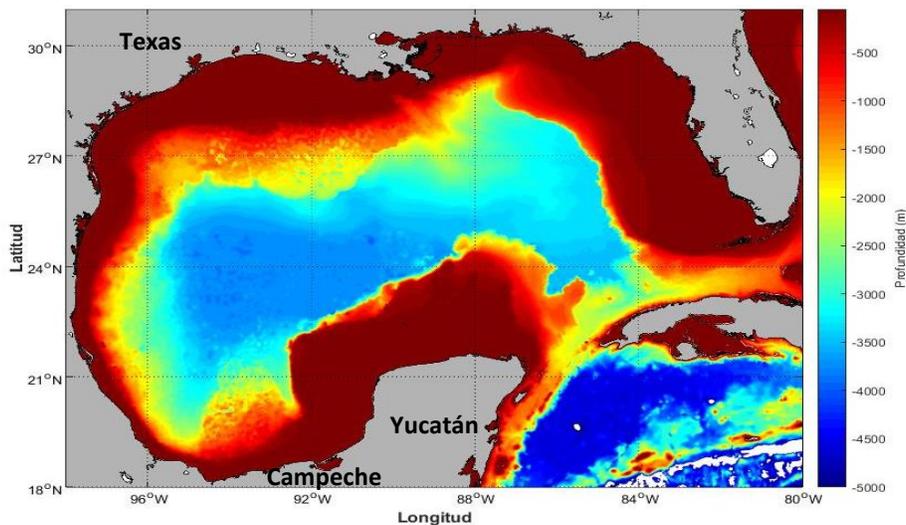
1. Describir los campos de vientos durante el tránsito de Harvey en el Golfo de México.
2. Determinar las variaciones de los parámetros integrales del oleaje durante la trayectoria de Harvey en el Golfo de México.
3. Analizar los espectros en frecuencia y dirección.

## 3. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

### 3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de México es un mar semicerrado ubicado en la región centro-occidental del Atlántico, localizado entre los 16° y 31° de latitud norte, y las longitudes 81° y 99° oeste. Este se ve delimitado por los estados americanos de Florida, Alabama, Misisipi, Luisiana, Texas, así como por los estados mexicanos de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán, otra parte por Cuba.

Esta cuenca tiene una profundidad máxima de 4,384 m y una superficie aproximada de 1,590,000 km<sup>2</sup>. De acuerdo Montoya *et al.*, (2013), el Golfo está compuesto en un 38% de aguas poco profundas, el 22% por plataforma continental, mientras el 40% restante se compone por aguas de profundidades mayores.



**Figura 1.** Batimetría del Golfo de México. Datos tomados de GEBCO.

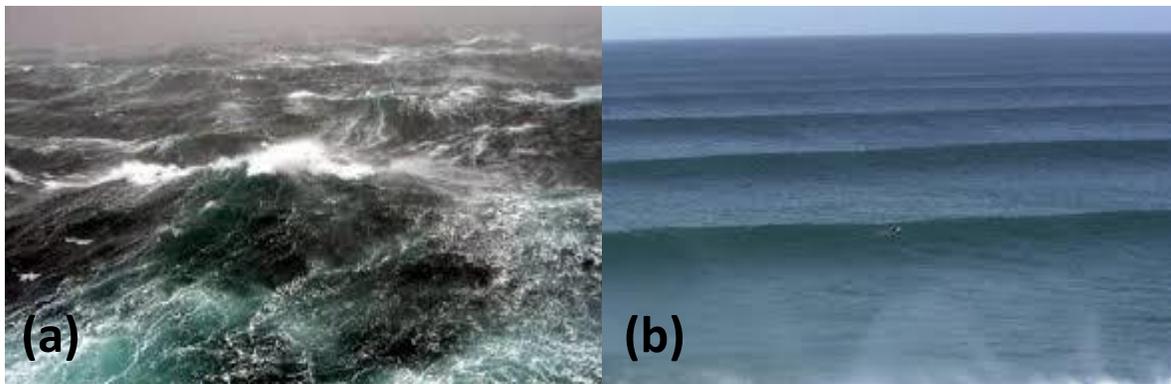
Con el fin de abordar de manera más efectiva las metodologías utilizadas, a continuación, se presentan algunos conceptos teóricos del oleaje y de los huracanes. Luego se presenta la metodología utilizada.

### 3.2 CONCEPTOS GENERALES DEL OLAJE

El oleaje son ondas de gravedad, originado principalmente por la transferencia de energía de la atmósfera hacia el océano, siendo el resultado del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar (Tovar y Yamá, 2009). Estas ondas se propagan con cierta dispersión angular de acuerdo a la dirección del viento. En este sentido, se denomina fetch a la región donde el oleaje se genera por la acción continua del viento sobre la superficie del océano. El oleaje se puede clasificar en dos tipos:

**Oleaje *wind-sea*:** también conocido como oleaje local, este se produce en la zona de fetch, donde el viento actúa continuamente sobre la superficie del mar. Este oleaje puede llegar a ser altamente energético debido a la acción continua del viento durante grandes periodos (figura 2a).

**Oleaje *swell*:** también llamado oleaje generado por tormentas lejanas, es aquel que abandona el área de generación y se propaga a través de la superficie del océano sin estar sometido a la acción del viento. Este oleaje presenta olas menos peraltadas comparadas con el oleaje local (figura 2b).



**Figura 2.** (a) Oleaje tipo sea. (b) Oleaje tipo swell. (Imágenes tomadas de google)

Una ola, y en general una onda, tiene como principales características: la cresta, (parte más alta), valle (la parte más baja), altura ( $h$ ) definida como la distancia entre una cresta y un valle, periodo ( $T$ ) tiempo en segundos que transcurren entre el paso de dos crestas o dos valles y longitud de onda ( $\lambda$ ) la distancia entre dos crestas o dos valles.

Por otro lado, el oleaje se puede caracterizar mediante los llamados parámetros integrales, entre ellos la altura significativa ( $H_s$ ), que se obtiene del espectro en

frecuencia  $E(f, \theta)$ , donde  $f$  es la frecuencia y  $\theta$  la dirección del oleaje, mediante la ecuación

$$H_s = 4\sqrt{\int E(f, \theta) d\theta df} \quad (1)$$

y es equivalente al promedio del tercio de olas más altas registradas en un periodo de tiempo. Otro parámetro es el periodo asociado al pico espectral ( $T_p$ ), obtenido del espectro en frecuencia y finalmente la dirección promedio obtenida del espectro direccional.

Sin embargo, los espectros permiten una descripción más adecuada de las características del oleaje. El espectro direccional, es la representación de la distribución de la energía en un rango de frecuencias y direcciones, y es la mejor representación estadística de un estado de mar. Debido a sus características un espectro direccional puede presentar varios sistemas de olas: uni, bi, tri o multimodal. En el primero de ellos la energía se presenta en un intervalo estrecho de frecuencia y dirección. Por otro lado, los oleajes bi, tri o multimodal presentan un sistema de olas principal y sistemas de olas de menor intensidad. En un campo de oleaje pueden estar presentes uno o más sistemas de olas que pueden viajar en distintas direcciones y presentar frecuencias diferentes, por ejemplo, un oleaje que está siendo generado por el viento local y un oleaje tipo *swell* los dos con direcciones diferentes.

### **Análisis direccional del oleaje**

El oleaje en el océano generado por el viento, se propaga en varias direcciones, siendo la energía asociada a las frecuencias con valor cercano a la frecuencia modal, donde se propaga respecto a la dirección del viento, mientras que la energía asociada con menores o mayores frecuencias, se distribuye principalmente sobre un rango de direcciones diferentes. Básicamente, para realizar un análisis direccional del oleaje se determina como es la distribución de su energía sobre frecuencias y direcciones de propagación.

### **3.3. HURACANES**

Los huracanes o ciclones tropicales son eventos naturales que ocurren durante el verano–otoño del hemisferio norte. Este fenómeno se desarrolla con algunas de las siguientes condiciones, temperatura superficial del mar (TSM) superior a 26°C, alto contenido de vapor de agua, débil cizalladura del viento, débil estabilidad estática y una perturbación atmosférica preexistente (Jacobs *et al.*, 2018). Sin embargo, la principal fuente de energía para los huracanes es el contenido de calor del océano.

La evolución de estos fenómenos se puede presentar en cuatro etapas, la primera de ellas se llama **perturbación tropical** y está definida por una zona de inestabilidad atmosférica asociada a una baja presión lo que propicia generación de vientos convergentes. La siguiente es la **depresión tropical**, donde los vientos superficiales incrementan su magnitud (hasta de 62 km/h) debido a la existencia del área de baja presión. La tercera etapa es la **tormenta tropical**, la cual presenta magnitudes del viento entre 63 y 118 km/h y en la que se puede observar una distribución de las nubes en forma de espiral. Por último, se encuentra la etapa del **huracán**, con vientos mayores a 119 km/h, la zona de nubes alcanza una extensión entre 500 y 900 km de diámetro y donde el ojo del huracán puede tener un diámetro entre 24 y 40 km. Los huracanes se clasifican por medio de la escala Saffir–Simpson como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**Tabla 1.** Escala Saffir-Simpson para clasificar la intensidad de los huracanes.

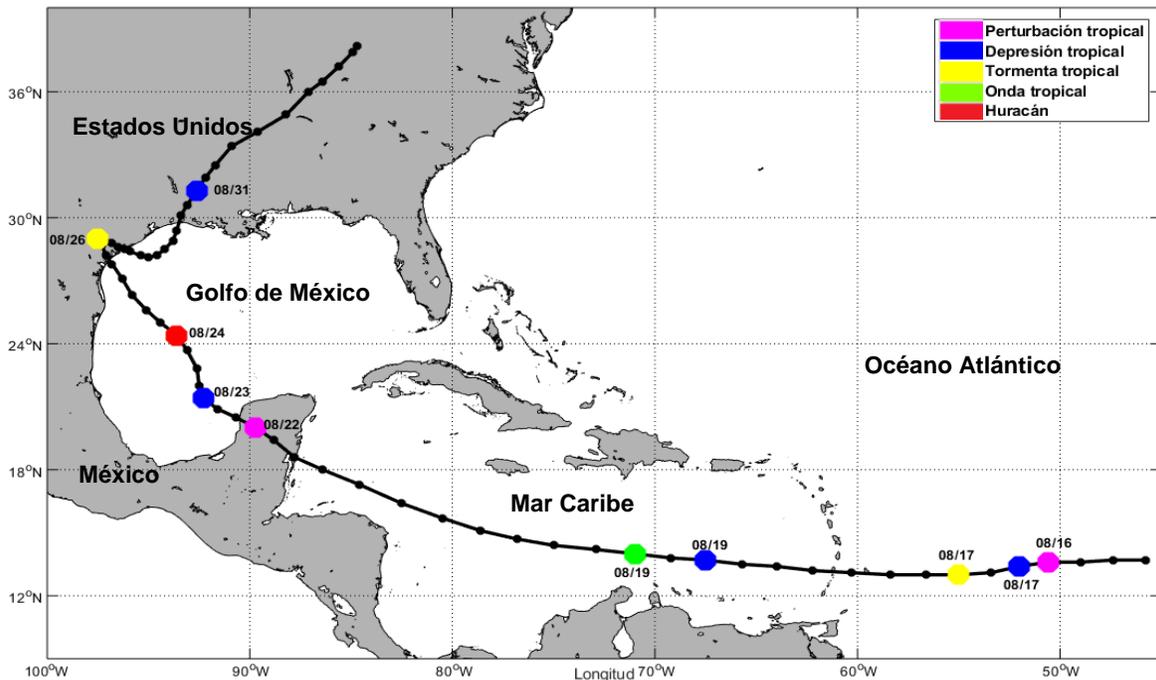
<b>Categoría</b>	<b>Vientos máximos (m/s)</b>
<i>Uno</i>	33 a 42.5
<i>Dos</i>	43 a 49
<i>Tres</i>	50 a 57
<i>Cuatro</i>	58 a 69
<i>Cinco</i>	>70

Con el aumento de la velocidad del viento, aumentan los flujos superficiales como la evaporación y el contenido de calor en la atmósfera, el cual permite la formación de grandes bandas nubosas en forma de espiral (Sitkowski *et al.*, 2012). A medida que el océano pierde calor por transferencia de energía hacia la atmósfera, este se enfría dejando un ambiente menos favorable para tormentas próximas (Brand, 1971; Lloyd & Vecchi, 2011). A continuación, mostraremos algunas de las principales características del huracán Harvey.

### **3.3.1. HURACÁN HARVEY**

En el océano Atlántico se cuenta por año con un registro promedio de 12 sistemas de tormentas donde 6 de ellos luego se convierten en huracanes. Sin embargo, para la temporada del 2017 superó la actividad promedio y ocurrieron 17 tormentas donde 10 de ellas fueron huracanes Jacobs *et al.*, (2018). Varios aspectos fueron anormales en esa temporada: registros de temperaturas superficiales muy elevadas y un alto contenido de calor en el océano. En estas condiciones se desarrolló el huracán Harvey.

El sistema Harvey ocurrió en el mes de agosto del 2017, comenzó como una onda tropical en la costa africana, con rumbo hacia el oeste del Océano Atlántico, posteriormente al recorrer por el océano gana intensidad siendo un sistema clasificado como tormenta tropical, trasladándose por el Mar Caribe hacia la península de Yucatán donde pierde intensidad al ingresar a la parte continental mexicana, convirtiéndose nuevamente en perturbación tropical.



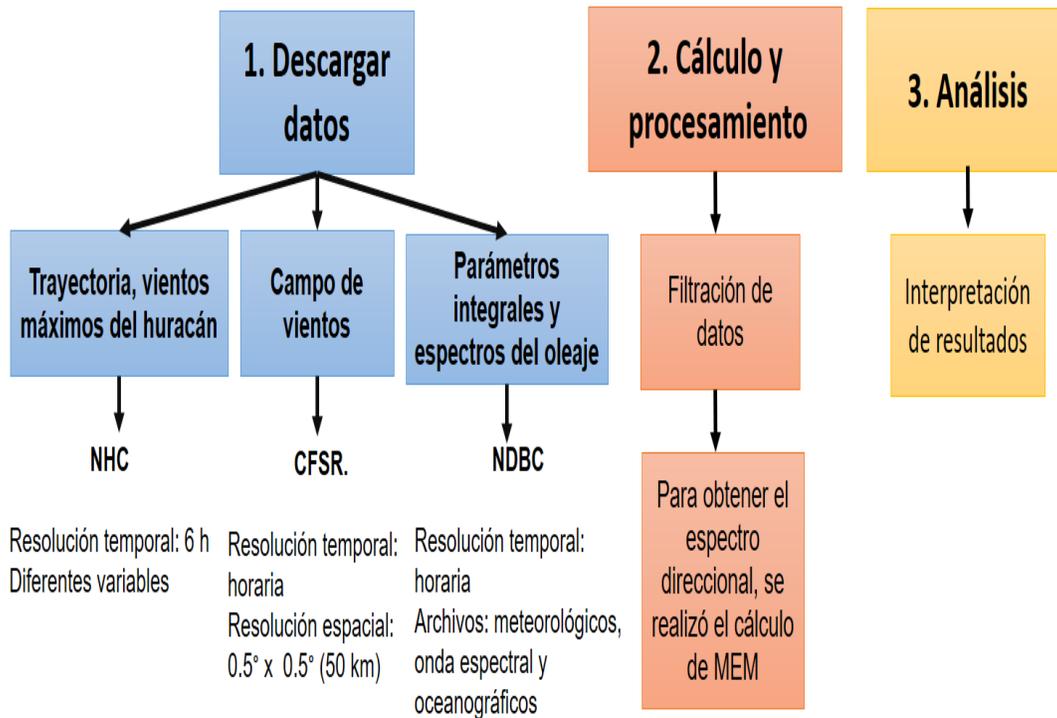
**Figura 3.** Trayectoria del huracán Harvey en agosto 2017.

Sin embargo, el día 23 de agosto esta perturbación ingresó a las aguas cálidas de la bahía de Campeche, donde encontró un alto contenido de calor, lo cual provocó una rápida intensificación convirtiéndose en huracán. Ya como huracán, se dirigió hacia el noroeste del Golfo de México donde la TSM y el contenido de calor eran elevados Jacobs *et al.*, (2018), lo cual propició una ganancia de energía convirtiéndose en un huracán categoría cuatro con vientos superiores a 200 km/h. El día 26 ingresó a la parte continental americana en Rockport (Texas), y unos días después reingresó al golfo debido a la alta humedad producto de la evaporación lo que le permitió ganar un poco de intensidad (ver Figura 3. Trayectoria del huracán Harvey en agosto 2017.).

### 3.4. METÓDOS

En primer lugar, serán descritos los campos de viento durante el periodo de ocurrencia del huracán a partir de información del Centro Internacional de investigación del Pacífico (IPRC, por sus siglas en inglés). Luego con el fin de

realizar una caracterización adecuada del oleaje dentro del Golfo de México, se utilizaron los datos medidos por las boyas del Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC, por sus siglas en inglés), de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). Por último, se realizará el procesamiento de la información mediante lenguajes de programación, en la (Figura 4.) se muestra un resumen de la metodología a utilizar en esta investigación.



**Figura 4.** Diagrama del resumen de la metodología usada en este trabajo.

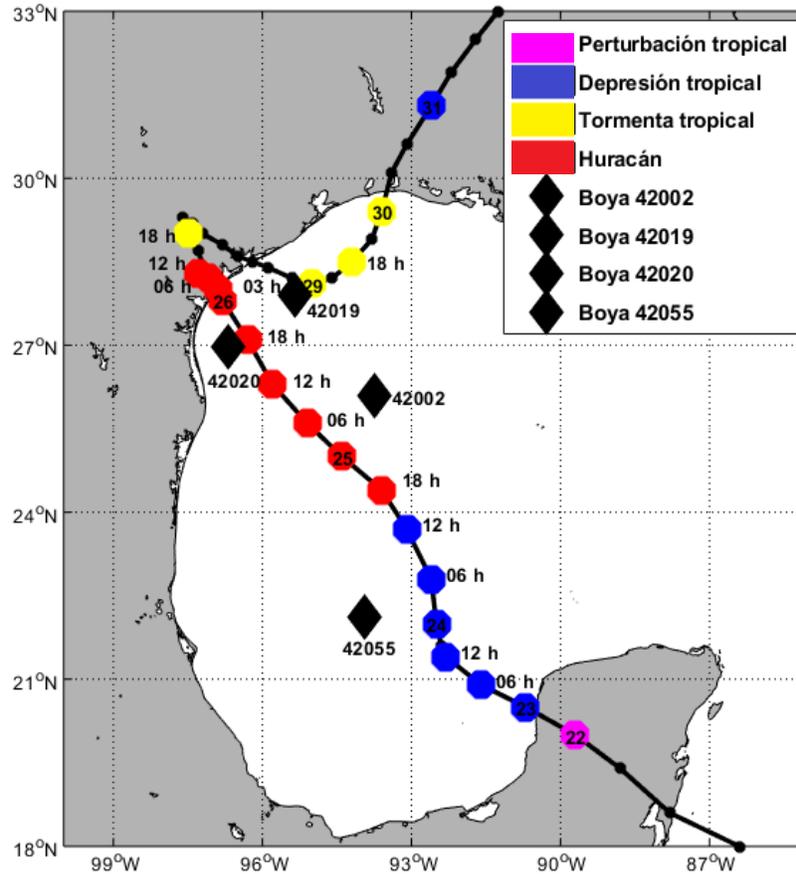
### 3.4.1. DATOS DE CAMPOS DE VIENTO

Los campos de viento fueron analizados a partir de datos del IPRC y fueron bajados utilizando el siguiente link <http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>. Este centro realiza investigación general sobre el clima global y entre las variables que tiene su base de datos se encuentran: temperatura del océano, salinidad, precipitación, nubes, presión atmosférica, humedad, vientos, entre otras.

Con el objetivo de describir el campo de vientos en condiciones del huracán Harvey, se utilizó de manera específica los datos Climate Forecast System Reanalysis (CFSR, por sus siglas en inglés) de valores a 10 m sobre el nivel del mar. La resolución temporal de estos datos es horaria y están distribuidos sobre una malla uniforme de 0.5° x 0.5° (50 km).

### 3.4.2. DATOS DE OLEAJE

La NDBC tiene una amplia red de boyas para el monitoreo marino – costero en el Golfo de México. Esta red cuenta con un conjunto aproximado de 90 boyas las cuales miden variables oceanográficas y meteorológicas. Este departamento cuenta con archivos históricos y en tiempo real.



**Figura 5.** Localización de las boyas oceanográficas de la NDBC y su ubicación respecto al tránsito de huracán Harvey por el Golfo de México.

Se utilizó información de cuatro boyas de la NDBC, elegidas por la proximidad con la trayectoria del huracán Harvey. En la (Figura 5.) se observa la distribución de las boyas en el Golfo de México y su posición respecto a la trayectoria de Harvey. Es de notar que las boyas 42019 y 42020 se encuentran en aguas poco profundas (menores a 90m) y cercanas a la costa, mientras las boyas 42002 y 42055 están en aguas profundas (mayores a 3000m) y alejadas de la costa. En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Los datos de las boyas de la NDBC, son el espectro de frecuencia  $S(f)$ , parámetros del espectro direccional  $F(f, \theta)$  y los parámetros integrales del oleaje ( $H_s, T_p$ ).

**Tabla 2.** Información de las boyas de la NDBC utilizadas en esta investigación.

No. Boya	Ubicación y configuración	Latitud	Longitud	Profundidad (m)
42002	Golfo Oeste	26.09 N	93.75 W	3125.1
42019	Freeport, Texas	27.90 N	95.35 W	82.2
42020	Corpus Christi, Texas	26.96 N	96.69 W	84.1
42055	Bahía de Campeche	22.12 N	93.94 W	3624

El método propuesto por el NDBC para obtener el espectro direccional es una aproximación del método de expansión de Fourier (FEM) desarrollado por Longuet-Higgins *et al.* (1963). A partir de las siguientes tres variables, aceleración vertical, ángulos de cabeceo (pitching) y balanceo (rolling) se puede obtener la elevación ( $\xi_1 = \eta$ ) y las pendientes de la superficie del mar en dirección E-O ( $\xi_2 = \partial\eta/\partial x$ ) y en dirección N-S ( $\xi_3 = \partial\eta/\partial y$ ) como función del tiempo. Con esta información es posible calcular los coespectros (**C11**, **C22**, **C33** y **C23**) y los espectros de cuadratura (**Q12** y **Q13**) los cuales están en función de la frecuencia (f, en Hz). De acuerdo con Longuet-Higgins *et al.* (1963) los coespectros se pueden calcular a partir de los coeficientes de la expansión dados por las ecuaciones (1) a (5):

$a_0 = \frac{C_{11}}{\pi}$	(2)
$a_1 = \frac{Q_{12}}{k\pi}$	(3)
$b_1 = \frac{Q_{13}}{k\pi}$	(4)
$a_2 = \frac{C_{22} - C_{33}}{k^2\pi}$	(5)
$b_2 = \frac{2C_{23}}{k^2\pi}$	(6)

Siendo **C11** el espectro en frecuencia determinado por las series de tiempo de las elevaciones. De acuerdo con Steele *et al.* (1985), el espectro direccional está dado por la ecuación:

$F(f, \theta) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\theta) + b_1 \sin(\theta) + a_2 \cos(2\theta) + b_2 \sin(2\theta)$	(7)
--	-----

El espectro direccional también puede escribirse como un producto entre el espectro en función de la frecuencia (S(f)) y una función de distribución direccional (D(f, θ) – DFS) de acuerdo con la ecuación 7:

$F(f, \theta) = S(f) D(f, \theta)$	(8)
------------------------------------	-----

La DFS se define mediante la ecuación 8:

$D(f, \theta) = \frac{0.5 + r_1 \cos(\theta - \alpha_1) + r_2 \cos(2(\theta - \alpha_2))}{\pi}$	(9)
---	-----

Donde r1, r2, α1 y α2, son los parámetros direccionales de expansión de Fourier y representan el primer y segundo coeficiente de Fourier, la dirección principal y la dirección promedio de las olas (Earle *et al.*, 1999). Estos parámetros se pueden definir mediante las ecuaciones 9 a 12:

$r_1 = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{a_0}$	(10)
--	------

$r_2 = \frac{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{a_0}$	(11)
--	------

$\alpha_1 = \frac{3\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{b_1}{a_1}$	(12)
---	------

$\alpha_2 = \frac{3\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{b_2}{a_2}$	(13)
---	------

A partir del método de Longuet-Higgins *et al.* (1963), se han propuesto varios métodos con el objetivo de mejorar la resolución en dirección. Benoit (1992, 1994) describió y comparó muchos de estos métodos, los cuales dividió en dos categorías

amplias: el método de máxima entropía (MEM, por sus siglas en inglés) y el método de máxima verosimilitud (MLM, por sus siglas en inglés).

El MEM es producto de la teoría de la probabilidad en el análisis de oleaje direccional, debido a las semejanzas entre la DSF y una función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). De hecho, tanto una DSF como una PDF son funciones positivas, y su integral es igual a 1. Una DSF puede verse como una PDF que describe la distribución de la energía de las olas sobre las direcciones de propagación (Benoit *et al.*, 1997). Por lo tanto, el MEM ha sido utilizado para obtener la DSF (Ewans, 1998; Ardhuin *et al.*, 2001; Wang y Hwang, 2001; Ardhuin *et al.*, 2003, 2007), cuando el campo de olas presenta varios sistemas. Como se mencionó anteriormente, se espera que en condiciones de huracán el campo de olas tenga propagación de la energía en diferentes direcciones (p.e. oleaje local y *swell*). En esta investigación se utilizó el método MEM para la obtención del espectro direccional.

El MEM define una función de entropía, que debe ser maximizada teniendo en cuenta las restricciones de las ecuaciones de los espectros cruzados. El método de Lygre y Krogstad (1986) hace una estimación de la distribución direccional de los coeficientes de Fourier en cada frecuencia y define la entropía ( $H(f)$ ) mediante la ecuación (13):

$H(f) = -Z \int_0^{2\pi} \ln(f(\theta)) d\theta$	(14)
--	------

Luego la  $H(f)$  debe maximizarse buscando que los dos primeros armónicos de la descomposición en series de Fourier sean idénticos a los obtenidos por los coespectros y espectros de cuadratura de las mediciones. Lygre y Krogstad (1986) establecen que la función que cumple estas condiciones se define mediante la ecuación (14):

$f(\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{1 - F1 c^*1 - F2c^*2}{ 1 - F1(\cos\theta - i \cdot \sin\theta) - F2(\cos2\theta - i \cdot \sin2\theta) ^2}$	(15)
---	------

Donde  $F1$  y  $F2$  son números complejos obtenidos de los coeficientes de Fourier de la DSF ( $c_n = a_n + i \cdot b_n$ ) y el asterisco denota el complejo conjugado.

Por otro lado, cabe resaltar que la investigación realizada por Montoya *et al.*, (2013) describió la presencia de picos artificiales en los espectros direccionales calculados con métodos como MLM o MEM. Consideramos que es un análisis que podría complementar este trabajo donde se espera que se pueda realizar en futuros trabajos

### **3.4.3. DATOS DEL CENTRO NACIONAL DE HURACANES**

El centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) es una dependencia del Servicio meteorológico Nacional de Estados Unidos. Tiene como principal función monitorear y predecir el comportamiento de depresiones, tormentas y ciclones tropicales. Los registros de la NHC contienen información de variables como la latitud, longitud, presión atmosférica, velocidad del viento y otros estadísticos meteorológicos sobre cada ciclón/huracán cada seis horas. Los datos están disponibles para el océano Atlántico, Pacífico oriental y Pacífico central.

### **3.4.4. PROCESAMIENTO DE DATOS**

Se utilizó diferentes bases de datos como: batimetría, campos de vientos, series de tiempo, trayectoria del huracán, vientos máximos sostenidos, espectros en función de la frecuencia y dirección, posteriormente, se realizó graficas de acuerdo a los objetivos planteado en esta investigación. La información proporcionada se procesó mediante los lenguajes de programación Matlab® y Phyton.

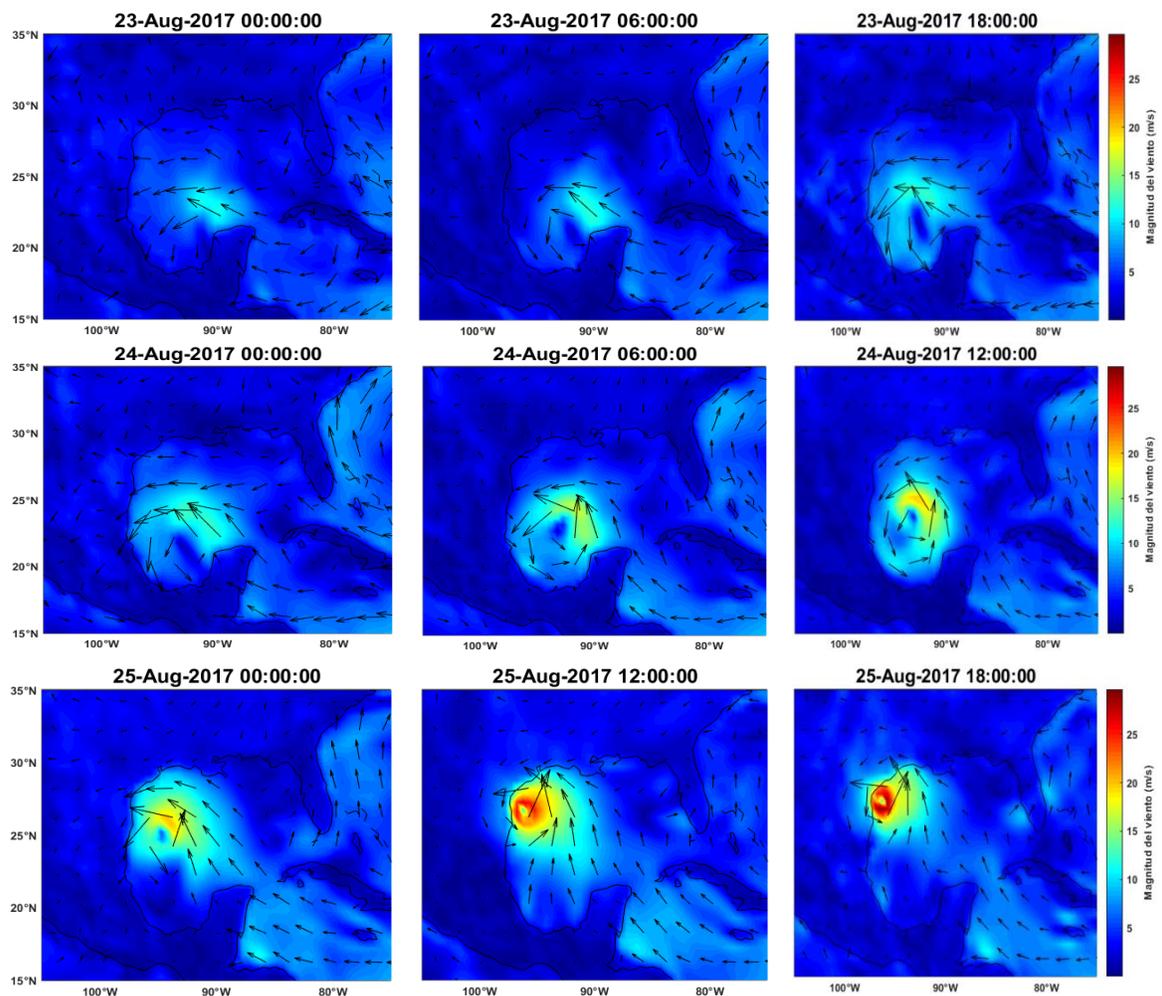
Primeramente, los datos del campo de vientos son de la componente U (este-oeste) y componente V (norte-sur) donde se calculó la magnitud del viento comprendidos para el Golfo de México y la parte continental, durante el 23 al 31 de agosto del 2017. Esta información es de gran relevancia debido a la intensidad que presentó Harvey, además se realizaron series de tiempo en la misma escala temporal del campo de vientos para los registros de las boyas donde se obtuvo gráficos de altura de onda, velocidad del viento máxima periodo de onda, a estos datos se les aplicó un filtrado a los valores NaN. Además, se realizó gráficos de dispersión entre la altura del oleaje respecto a la velocidad máxima del viento y se calculó el coeficiente de correlación, por otra parte, se realizó un segundo gráfico de dispersión pero este es normalizado, es decir, se encontró el valor máximo de la altura del oleaje y se dividió por los datos de esta variable, el mismo procedimiento se realizó a la velocidad máxima del viento, posteriormente se calculó el coeficiente de correlación, la desviación estándar, el BIAS y el RMS.

Por otro lado, para procesar los datos de los espectros de frecuencia construidos mediante los datos proporcionados por la NDBC, se utilizó a la escala temporal que se realizó en las series de tiempo anterior mencionadas, a una escala de colores igual para las cuatro boyas para ser comparadas, con frecuencias de 0.05 a 0.3 Hz. Finalmente, para los datos del espectro en función de la dirección proporcionados por el proyecto CiGOM, con los respectivos cálculos mediante el método del MEM realizado por Lygre y Krogstad (1986) y adaptada por Esquivel, 2015 en su tesis doctoral, limitando la escala temporal a partir del 24 al 30 de agosto.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 CAMPOS DE VIENTOS

A continuación, se presentan los campos de viento del 23 al 25 de agosto (figura 6). Se observan la magnitud y la dirección del campo de vientos (cada seis horas). Harvey ingresó desde el mar Caribe como una depresión tropical con vientos que no superaba los 12 m/s. Luego se convirtió en una perturbación atmosférica, cuya disminución en la intensidad está relacionada con la fricción debido a su tránsito por la península de Yucatán. Días posteriores este sistema se intensificó siendo un huracán de categoría cuatro con dirección hacia el Noroeste del Golfo, con vientos superiores a 25 m/s.



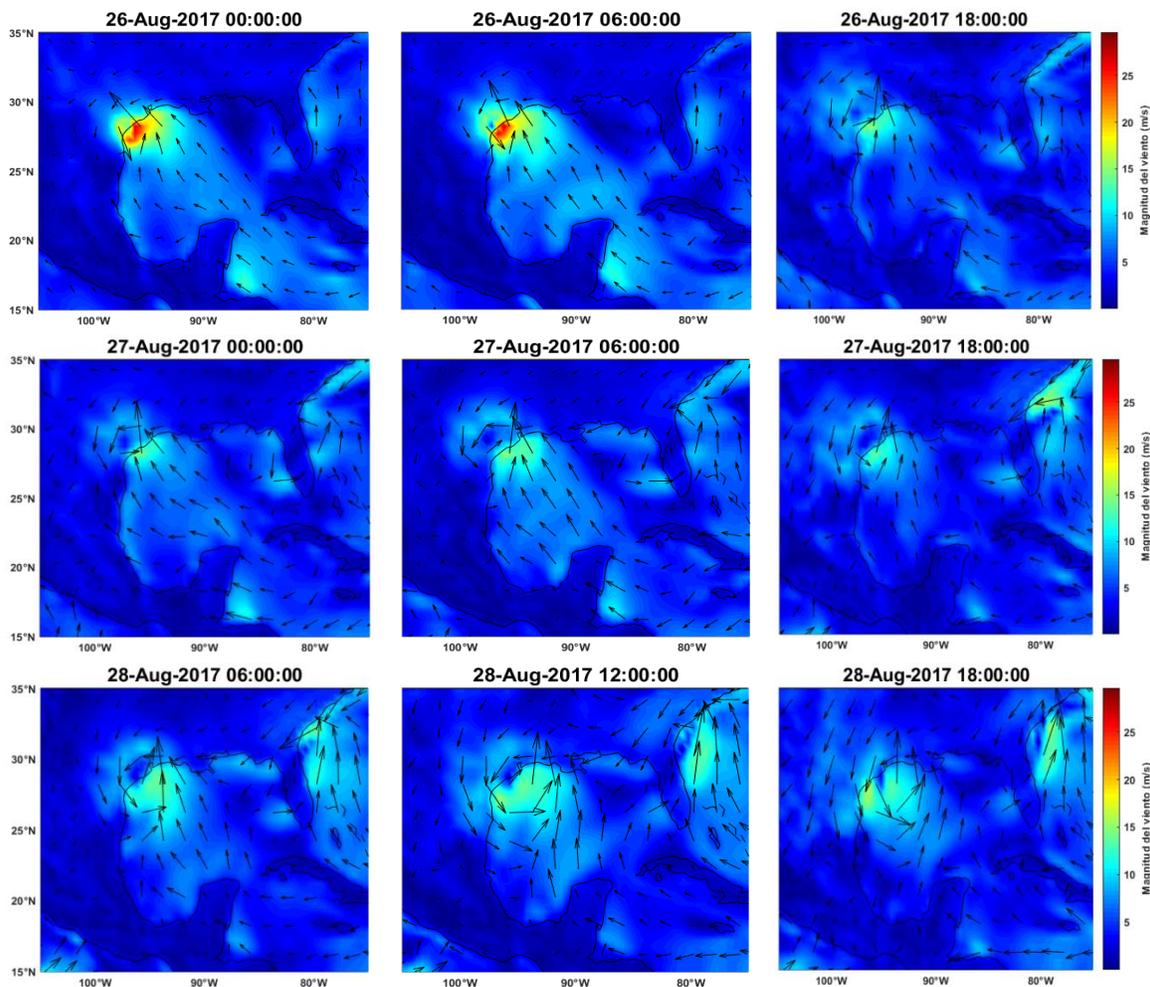
**Figura 6.** Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 23 al 25 de agosto del 2017.

Al ingresar a la bahía de Campeche el 23 de agosto a las 00:00 h la magnitud del viento es la más baja de los registros (entre 5 y 12 m/s) respecto a los días posteriores. Estas bajas magnitudes son producto de un sistema debilitado,

proveniente del continente. Luego, el sistema se intensificó debido al alto contenido de calor asociado a las altas temperaturas superficiales en la bahía de Campeche. Estas condiciones permitió que la perturbación se desarrollara rápidamente al salir de la bahía, presentando valores de magnitud superiores a 15 m/s (18:00 h).

Para el 24 de agosto, con la intensificación de los vientos Harvey se convirtió en una tormenta tropical bien desarrollada. En este día se evidenció una banda de vientos intensos al lado derecho con valores entre 15 y 20 m/s. Es de notar que la banda del lado izquierdo no está muy bien definida, teniendo magnitudes menores a 15 m/s. A las 18:00 h de este día, el sistema llegó a la clasificación de huracán.

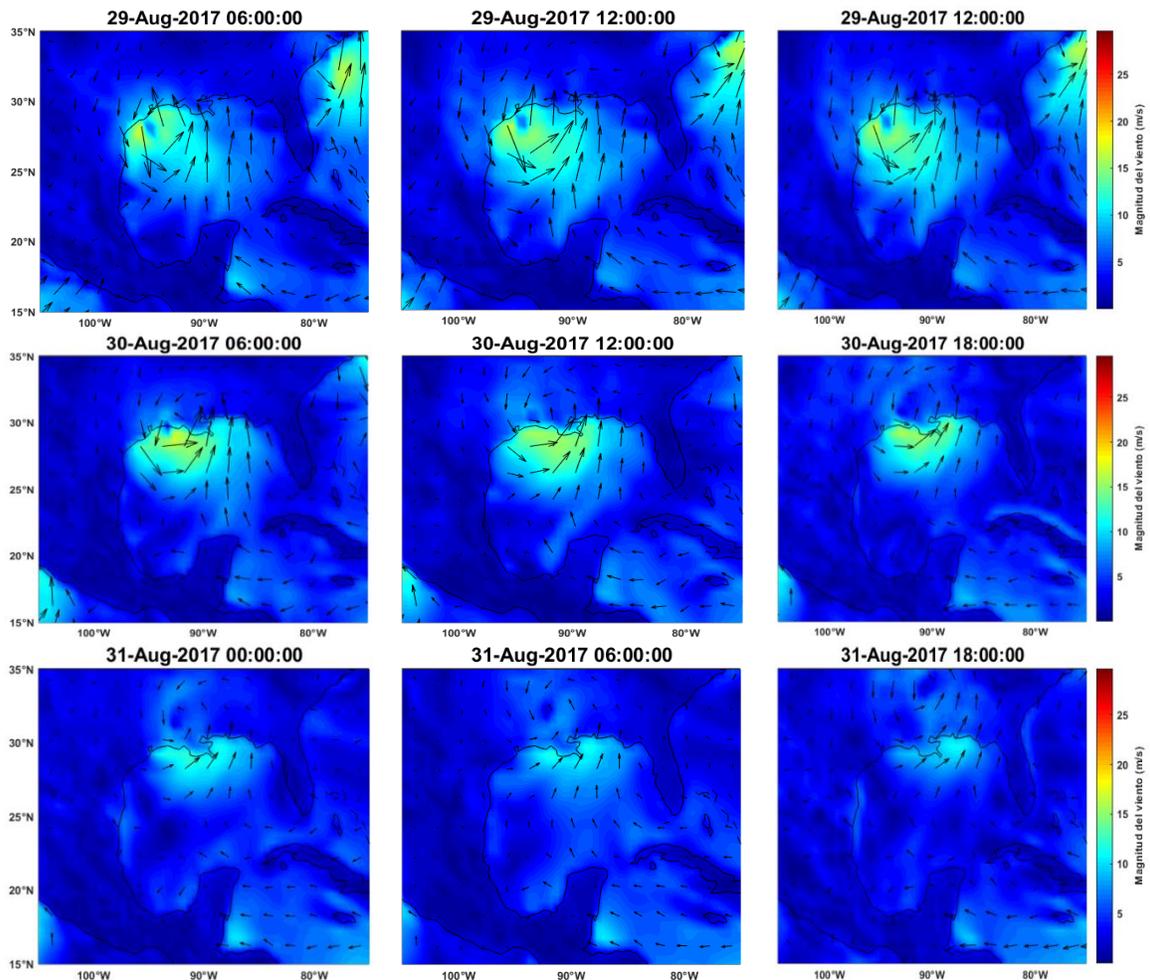
En el día 25, Harvey presentó un desarrollo más definido, donde se identificó claramente el ojo y las paredes del huracán. En el ojo, se observó magnitudes del viento menores a 12 m/s, mientras que en las paredes se presentó las velocidades más altas. La pared del lado derecho presentó los valores más altos con velocidades superiores a 25 m/s, mientras que en la pared izquierda no superó los 22 m/s.



**Figura 7.** Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 26 al 28 de agosto del 2017.

Para el día 26 de agosto a las 18:00 h (Figura 7. Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 26 al 28 de agosto del 2017.), Harvey era un huracán de categoría cuatro y se dirigía hacia el estado de Texas, EE. UU, con vientos intensos sostenidos. La parte frontal de este sistema Ingresó a Rockport (Texas) con vientos promedios de 20 m/s, mientras la parte trasera de la tormenta estaba sobre las aguas cálidas del Golfo con velocidades superiores a 25 m/s.

Luego del ingreso de Harvey al estado de Texas, el 27 de agosto este sistema nuevamente reingresó al Golfo de México como tormenta tropical, con vientos entre 10 y 15 m/s. El 28 de agosto debido a la alta evaporación, este sistema nuevamente ganó energía y salió de Texas dirigiéndose hacia el sur. Además, se observó como las mayores velocidades se presentó al lado derecho de la perturbación respecto a la dirección de avance de la tormenta, con vientos máximos de 20 m/s, mientras que en el lado izquierdo las velocidades no superó los 15 m/s.



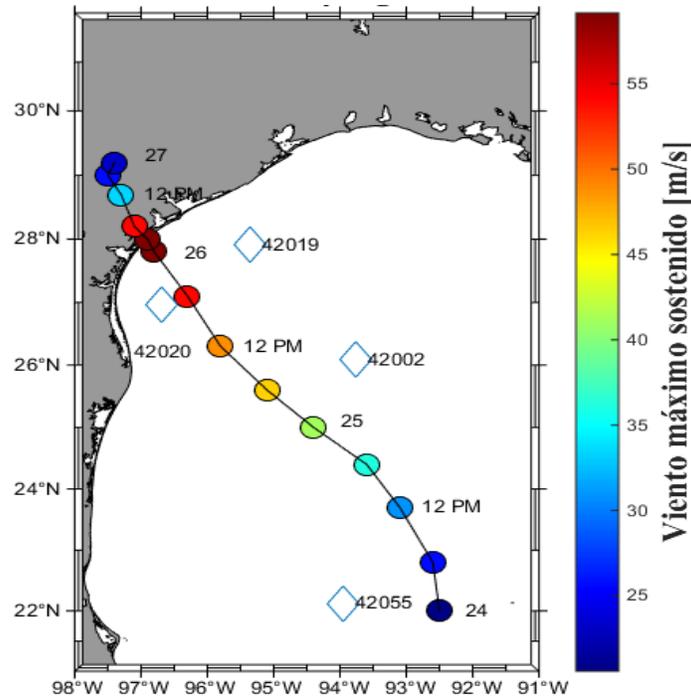
**Figura 8.** Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 28 al 30 de agosto del 2017.

El día 29 de agosto a las 18:00 h (*Figura 8. Campo de vientos durante el tránsito del Huracán Harvey en el Golfo de México durante los días 28 al 30 de agosto del 2017.*), Harvey ingresó al Golfo con dirección Sureste, se observó como las magnitudes del viento de la tormenta incrementó significativamente. La parte frontal de la tormenta que estaba sobre el océano tiene vientos que no superó los 15 m/s, mientras que la parte trasera que estaba sobre el continente, las magnitudes son a lo sumo de 10 m/s y por lo tanto se observó una disminución de la intensidad de la tormenta. Es de notar que para el 31 de agosto a las 00.00 h, la tormenta Harvey se dirigió hacia el Noreste del Golfo con vientos que no superó los 12 m/s. Posteriormente, a las 18:00 h el sistema ingresó nuevamente al continente presentando bajas magnitudes del viento (entre 5 y 10 m/s) lo que sugiere una disipación progresiva de la tormenta.

## 4.2 VIENTOS MÁXIMOS SOSTENIDOS

Los vientos máximos sostenidos reportados por el NHC tienen una frecuencia de 1 minuto a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar. Estos vientos solo son reportados para ciclones tropicales y huracanes siendo los vientos superficiales los más intensos en la circulación del sistema.

De acuerdo con la (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el 24 de agosto Harvey ingresó a la bahía de Campeche como tormenta tropical, con vientos sostenidos de 20 m/s transitando cerca de la boya 42055. Luego la tormenta avanzó en dirección Noroeste, donde tuvo un rápido incremento de la velocidad de los vientos máximos alcanzando los 30 m/s, estos incrementos en las velocidades máximas aumentaron a lo largo del tránsito de la tormenta probablemente a las altas temperaturas superficiales del océano. El 25 de agosto Harvey entre las 00:00 y 06:00 h se convirtió en huracán, con vientos superiores a 40 m/s transitando cerca de la boya 42002.



**Figura 9.** Valores de velocidad máxima sostenida (m/s) del huracán Harvey.

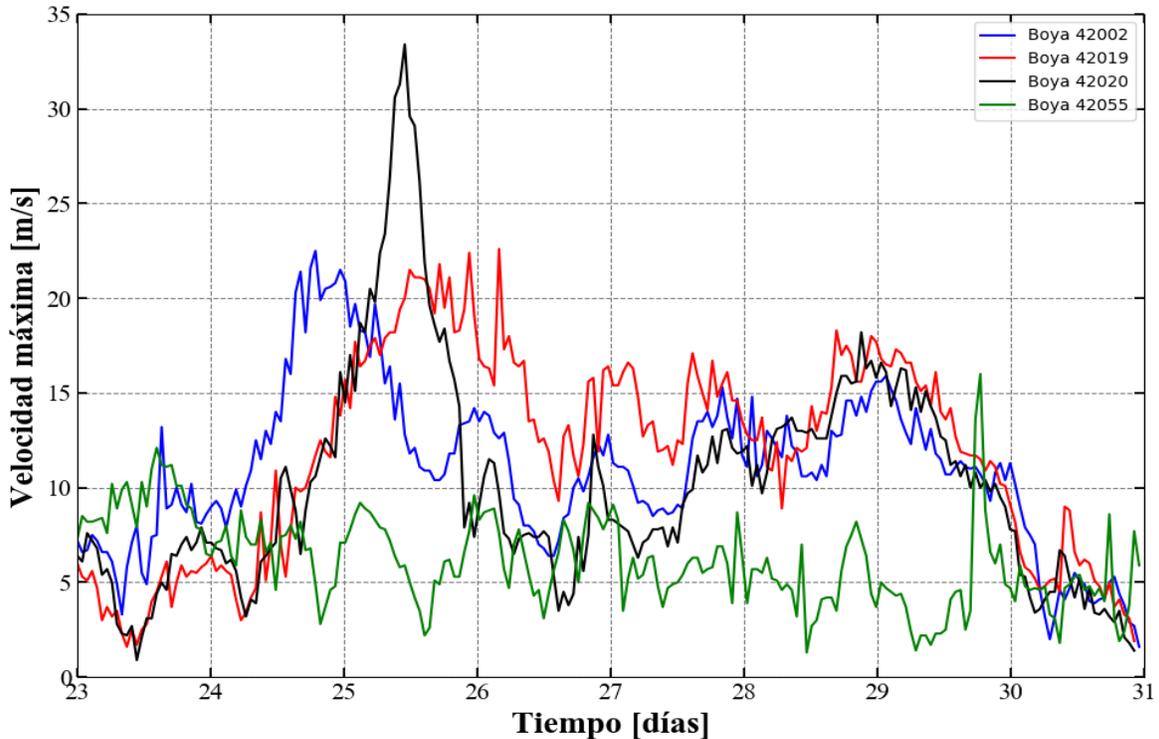
Posteriormente, Harvey como huracán de categoría cuatro se dirigió hacia el Noroeste pasando cerca de los estados de Tamaulipas (México) y Texas (EEUU), registrando vientos sostenidos superiores a 50 m/s. Los registros más altos de vientos máximos sostenidos, se reportaron el 26 de agosto entre las 00:00 y 06:00 h cerca de las costas de Rockport (Texas) con valores de hasta 60 m/s.

Luego el huracán se dirigió hacia el Norte-Noroeste, ingresando al continente donde se presentó una disminución de la intensidad de los vientos máximos con valores entre 30 – 35 m/s. Esta disminución le permitió clasificarse de nuevo como tormenta tropical. Durante su tránsito por el estado de Texas, Harvey se desvió reingresando al océano durante los días 28 y 29 de agosto pasando cerca de la boya 42019, siendo un sistema debilitado y clasificado como depresión tropical.

### 4.3. VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO

Se analizó los datos de la velocidad máxima del viento, medido por las boyas de la NDBC 42055, 42002, 42020 y 42019 (Figura 10. Velocidad del viento máxima. En color azul boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055).). En el día 23 de agosto, cuando Harvey ingresó al Golfo como depresión tropical, se registró valores menores a 10 m/s. Sin embargo, las boyas 42055 y 42002 fueron las primeras en registrar los efectos de este sistema mostrando picos máximos de 13 m/s y 14 m/s, respectivamente. Entre las 18:00 del día 23 y las 14:00 h del 24 de agosto,

además, se observó un incremento en las velocidades máximas en las boyas 42002, 42019 y 42020. El día 24 los registros más altos los muestra la boya 42002 con velocidades cercanas a 18 m/s, mientras que las velocidades más bajas fueron de 3.5 m/s registrados por la boya 42055.

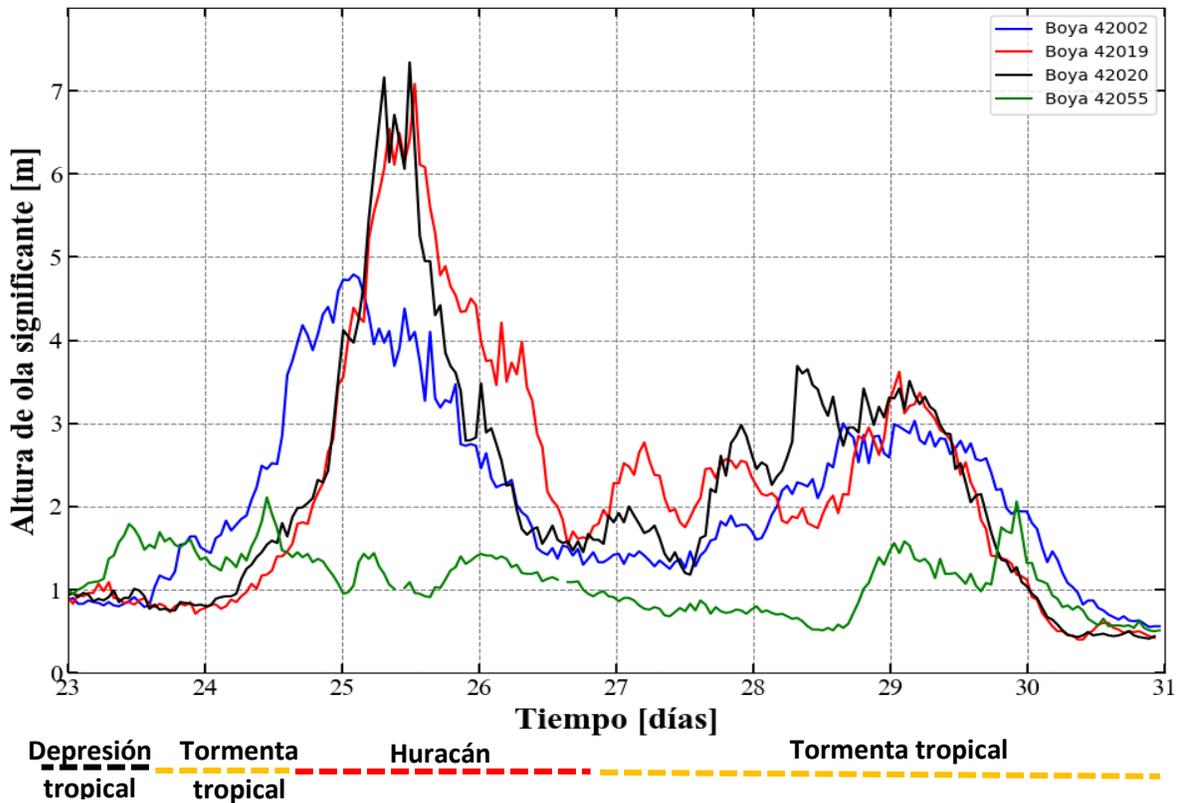


**Figura 10.** Velocidad del viento máxima. En color azul boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055).

Entre el 24 y el 26 de agosto, cuando Harvey se clasificó como un huracán, los picos más altos fueron reportados por las boyas 42002, 42019 y 42020 con valores de 23 m/s, 23 m/s y 30 m/s, respectivamente. Por otro lado, Harvey el 26 de agosto a las 14:00 h se convirtió en una tormenta tropical, donde disminuyó la intensidad de los vientos. Esto es evidente en los valores de las boyas 42002, 42019 y 42020, las cuales presentaron valores que no superaban los 17 m/s.

#### 4.4. ALTURA SIGNIFICANTE

En la (Figura 11.) se observan los valores de la altura significativa medidas a partir de las mediciones de las cuatro boyas mencionadas. La boya 42055 fue la primera en registrar un incremento en las alturas significantes con valores de hasta 1.8 m. Este valor es el más alto registrado el 23 de agosto entre las 00:00 h y 18:00 h. En la etapa de depresión tropical, los valores bajos de la altura significativa, están relacionados con valores similares (bajos) de la intensidad del viento.



**Figura 11.** Altura de onda signficante en color azul la boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055) instaladas en el Golfo de México.

Al salir de la bahía de Campeche, Harvey ganó intensidad convirtiéndose en tormenta tropical. En este punto se presentó un incremento en la magnitud del viento con velocidades mayores a 20 m/s (Figura 10. Velocidad del viento máxima. En color azul boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055).) lo cual concuerda con incrementos en la altura de onda de hasta 4.3 m en la boya 42002. Este incremento también se debió al tránsito de la tormenta, el cual es cercano a la boya. Por otra parte, las boyas que se encontraban al norte (42020 y 42019), registraron alturas promedio de 1.8 m lo cual se debe a la gran distancia entre su ubicación y el tránsito de la tormenta.

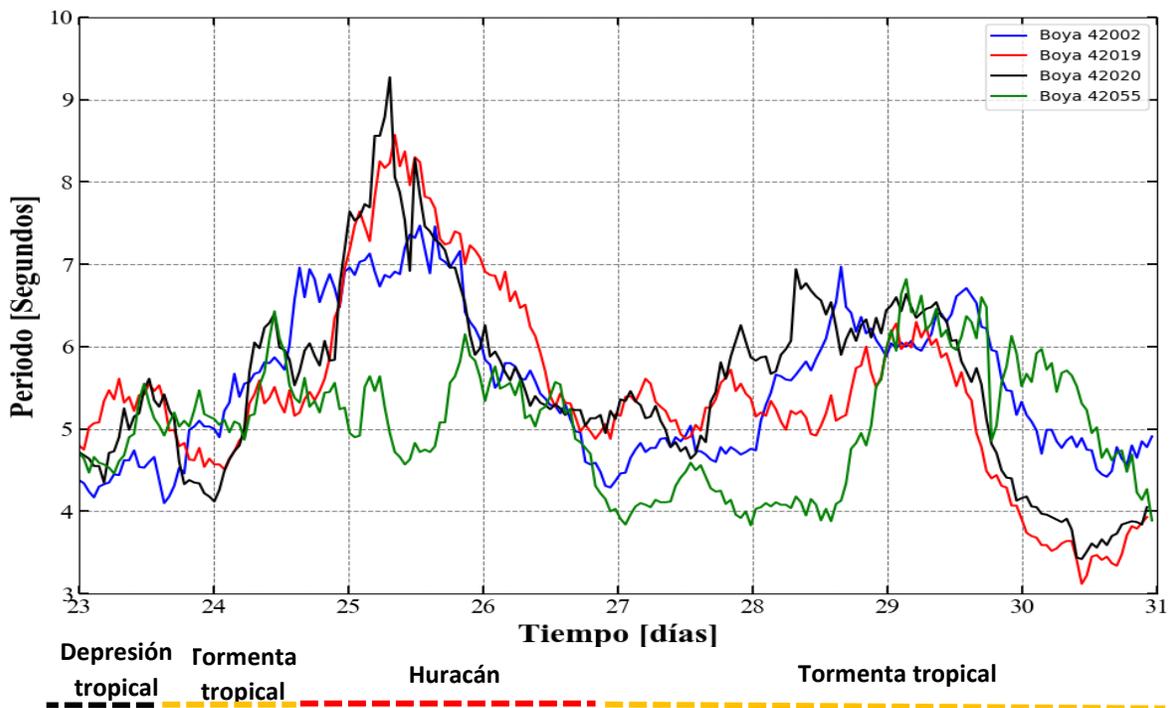
Entre el día 24 de agosto a las 18:00 h y el día 26 a las 12:00 h, Harvey se convirtió en huracán, con una dirección de avance hacia el noroeste. Del día 25 a las 18:00 h y el día 26 a las 12:00 h, el huracán pasó cerca a la boya 42020, donde registró alturas superiores a 7 metros. Asimismo, el día 25 de agosto a las 18:00 h la boya 42019 ubicada al Norte del Golfo, se observó alturas de ola con valores de hasta 7.1 m. En adición, se observó dos picos superiores a 7 m para las boyas 42019 y 42020 debido que el huracán se encontró más cerca a las boyas.

Cuando ingresó Harvey al continente entre el 26 de agosto a las 18:00 h y el 27 a las 00:00 h, perdió intensidad a tal modo se evidenció en la altura de onda con una disminución de valores entre 2.5 y 2.7 m en las boyas 42002 y 42019,

respectivamente. Harvey reingresó al Golfo el 28 de agosto a las 00:00 h, con vientos cercanos a 20 m/s, esto evidenció un incremento en las alturas de onda, donde se registró valores hasta de 3.8 m y 3.7 m para las boyas 42020 y 42019.

#### 4.5. PERIODO ASOCIADO AL PICO ESPECTRAL

La (Figura 12.), se observan los valores de la frecuencia asociada al pico espectral calculadas a partir de los datos de la NDBC.



**Figura 12.** Periodo de onda promedio en color azul la boya (42002), rojo (42019), negro (42020) y verde (42055) instaladas en el Golfo de México.

Harvey cuando ingresó a la bahía de Campeche como depresión tropical el día 23, generó olas con periodos entre 4.1 y 6.6 s registrados por las boyas 42019, 42020 y 42055. Mientras que la boya 42002 presentó valores entre 4.1 y 4.7 s. Posteriormente, entre el 23 de agosto a las 18:00 h y el día 24 a las 16:00 h el sistema incrementó la intensidad siendo una tormenta tropical, donde las boyas 42020 y 42055 mostraron periodos de hasta 6.4 s.

En condiciones de huracán, entre el día 24 a las 18:00 h y el 26 de agosto a las 14:00 h se registran los periodos más altos para toda la serie de tiempo. La boya 42020 registró valores de hasta 9.4 s, la boya 42019 valores de 8.7 s y la boya 42055 de 5.7 s. El 26 de agosto el huracán se dirigió hacia Texas, las boyas en el Golfo mostraron una disminución importante en el periodo con valores entre 5.0 a 5.8

s. No obstante, la boya 42019 que está ubicada al Norte registró periodos por encima de 6.5 s.

Para el 27 de agosto la parte delantera de huracán Harvey ingresó a Texas, pero la parte trasera aún estaba en el Golfo. Por tal motivo, las boyas 42002, 42019 y 42020 ubicadas al norte mostró periodos entre 4.7 y 5.6 segundos, más altos comparado con la boya 42055. Nuevamente durante el 28 al 29 de agosto, cuando Harvey reingresó al Golfo, se observó un incremento en el periodo del oleaje.

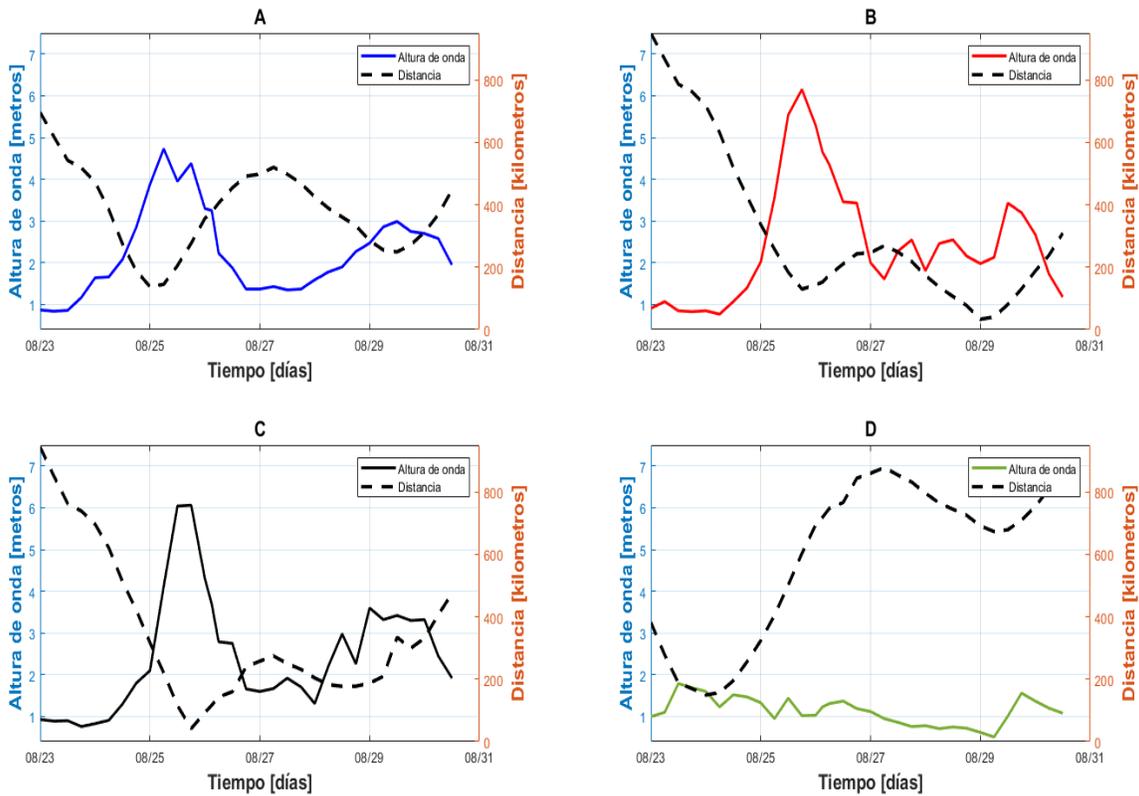
**Tabla 3.** Distancias de las boyas 42002, 42019, 42020 y 42055 respecto al avance del huracán. En azul, la distancia más cercana, en rojo, la distancia más lejana.

N°	TIEMPO		COORDENADAS		DISTANCIA DE LA BOYA AL HURACÁN (km)			
	Fecha	Hora	Longitud	Latitud	Boya 42002	Boya 42019	Boya 42020	Boya 42055
1	23/07/2017	0	-90.7	20.5	695.72	948.98	943.07	381.26
2	23/07/2017	6	-91.6	20.9	617.74	866.65	850.40	277.84
3	23/07/2017	12	-92.3	21.4	542.32	786.36	762.81	187.65
4	23/07/2017	18	-92.4	21.6	518.12	761.84	738.65	169.39
5	24/07/2017	0	-92.5	22.0	472.49	716.82	696.56	149.28
6	24/07/2017	6	-92.6	22.8	384.25	631.43	620.68	157.12
7	24/07/2017	12	-93.1	23.7	274.02	519.10	512.29	195.45
8	24/07/2017	18	-93.6	24.4	188.70	427.19	421.43	255.71
9	25/07/2017	0	-94.4	25.0	137.35	336.68	316.88	323.51
10	25/07/2017	6	-95.1	25.6	144.97	257.61	219.91	404.46
11	25/07/2017	12	-95.8	26.3	205.06	184.05	115.73	501.62
12	25/07/2017	18	-96.3	27.1	276.53	129.65	41.60	603.04
13	26/07/2017	0	-96.8	27.8	356.41	143.04	93.21	694.42
14	26/07/2017	3	-96.9	28.0	376.67	152.60	116.67	718.75
15	26/07/2017	6	-97.1	28.2	405.39	174.81	142.88	747.30
16	26/07/2017	12	-97.3	28.7	454.35	210.33	159.88	765.99
17	26/07/2017	18	-97.5	29.0	491.64	242.85	239.44	843.73
18	27/08/2017	0	-97.4	29.2	498.20	246.56	257.69	859.72
19	27/08/2017	6	-97.6	29.3	520.00	268.84	274.13	878.02
20	27/08/2017	12	-97.5	29.1	497.92	248.52	249.94	853.76
21	27/08/2017	18	-97.2	29.0	468.81	217.96	231.36	831.45
22	28/08/2017	0	-96.8	28.8	425.26	173.24	203.98	795.81
23	28/08/2017	6	-96.5	28.6	388.81	136.53	182.46	764.54
24	28/08/2017	12	-96.2	28.5	360.52	106.30	177.12	744.37
25	28/08/2017	18	-95.9	28.4	332.80	76.97	177.34	725.04
26	29/08/2017	0	-95.4	28.2	285.29	33.05	187.09	691.30
27	29/08/2017	6	-95.0	28.1	254.98	40.57	209.06	672.91
28	29/08/2017	12	-94.6	28.2	248.86	80.53	334.20	678.77
29	29/08/2017	18	-94.2	28.5	271.40	130.62	298.97	709.36
30	30/08/2017	0	-93.8	28.9	312.37	187.61	331.79	753.50

31	30/08/2017	6	-93.6	29.4	368.27	238.23	406.23	809.68
32	30/08/2017	12	-93.4	30.1	447.71	308.99	474.09	<b>888.44</b>

#### 4.6. SERIE TEMPORAL DE ALTURA DE OLA RESPECTO A LA DISTANCIA DEL RECORRIDO DE HARVEY A LAS BOYAS

La serie temporal presentada en la (Figura 13), muestra un gráfico con dos ejes Y, en el derecho, muestra la distancia del recorrido de Harvey respecto a las boyas y en el izquierdo, la altura de onda en (metros). La gráfica se realizó con datos proporcionados por la NHC cada seis horas de la trayectoria del huracán por el Golfo de México, mientras que los datos de altura de onda se tomó de la NDBC cada seis horas desde el 23 de agosto a las 00:00 h hasta 30 de agosto a las 18:00 h.



**Figura 13.** Serie temporal de la altura del oleaje y la distancia del recorrido de Harvey por el Golfo de México respecto a las boyas. En el eje Y derecho la distancia del huracán Harvey (kilómetros), en el eje Y izquierdo la altura del oleaje (metros). Las boyas están clasificadas por letras, A. Boya 42002, B. Boya 42019, C. Boya 42020, D. Boya 42055.

De acuerdo a la (Figura 13), la distancia que se encontraba Harvey respecto a las boyas fue importante para que se generara oleaje de menor o mayor altura. Se evidenció que Harvey al estar más cerca de las boyas, la altura del oleaje fue la mas alta, mientras que al aumentar la distancia entre Harvey y la boya los registros de

altura del oleaje fueron los más bajos. En la figura se muestra que las boyas 42002, 42019 y 42020 se evidenció una relación inversamente proporcional entre la distancia y la altura del oleaje, mientras para el inciso D, se evidenció que la altura del oleaje no era la mas alta del registro, debido en gran parte que el estado de evolución de Harvey dependió que se desarrollara grandes alturas, por tanto, en el punto más cercano que pasó por la boya 420055 fue una depresión y tormenta tropical con vientos poco intensos comparado con las boyas 42002, 42019 y 42020, donde se registró los vientos más intensos.

#### 4.7. GRÁFICOS DE DISPERSIÓN

A continuación, se presentarán los gráficos de dispersión de la altura del oleaje respecto a la velocidad máxima del viento. Los gráficos de dispersión cuantifican el grado de relación lineal existente entre las dos variables. Posterior a ello se realizarán cálculos de la correlación lineal, desviación estándar, BIAS y RMS (para la última gráfica).

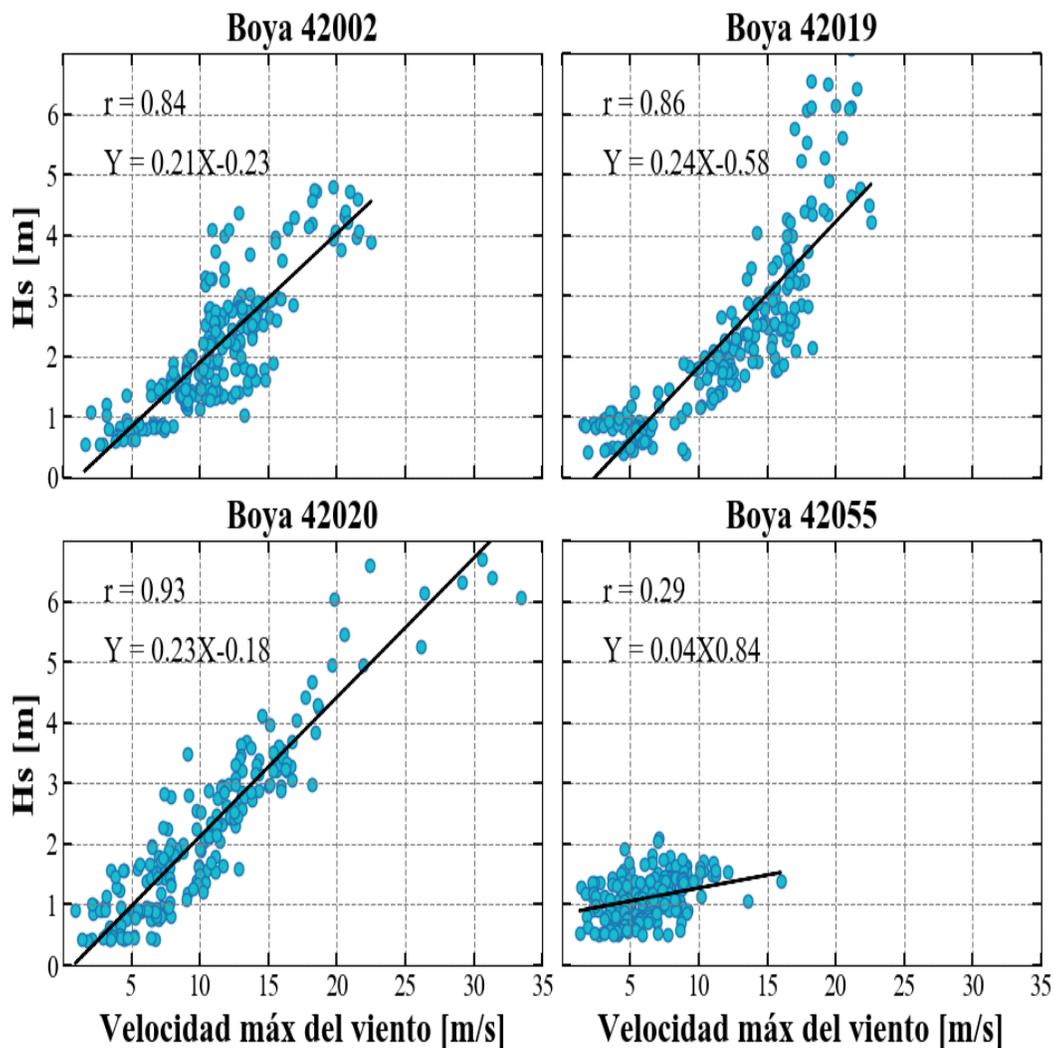
**Tabla 4.** Rangos de la correlación lineal. Estadística para ciencias del comportamiento de Haroldo Erloza, editorial Harla, México 1987.

RANGO		RELACIÓN LINEAL
0.96	1.0	<b>Perfecta</b>
0.85	0.95	<b>Fuerte</b>
0.70	0.84	<b>Significativa</b>
0.50	0.69	<b>Moderada</b>
0.20	0.49	<b>Débil</b>
0.10	0.19	<b>Muy débil</b>
0.09	0.0	<b>Nula</b>

En la (Figura 14), se realizó un ajuste lineal a los datos de la boya, para ver la relación de dependencia entre la altura de onda respecto a la velocidad máxima del viento, posteriormente se procedió a calcular el coeficiente de correlación.

Se evidenció que las boyas 42002, 42019 y 42020, tienen una correlación muy alta respecto a la boya 42055, quiere decir que al aumentar la velocidad máxima del viento la altura del oleaje es mayor, al disminuir la velocidad máxima del viento, disminuye la altura del oleaje.

Harvey cuando ingresó a la bahía de Campeche, era un sistema débil con vientos poco intensos debido que provenía de la península de Yucatán con velocidades máximas del viento que no superaban los 7 m/s, clasificándose como depresión tropical. Este sistema transitó cerca a la boya 42055, a una distancia de 149.28 Km el 24 de agosto a las 08:00 h, a medida que el huracán se alejaba de la boya ganaba intensidad, clasificándose como huracán el 24 de agosto a las 18:00 h, donde se encontraba a una distancia de 255.71 Km respecto a la boya. Esta boya presentó los valores más bajos de altura del oleaje y velocidad máxima del viento respecto a las boyas 42002, 42019 y 42020. La correlación es positiva, presentando un  $r = 0.29$  siendo una correlación débil.

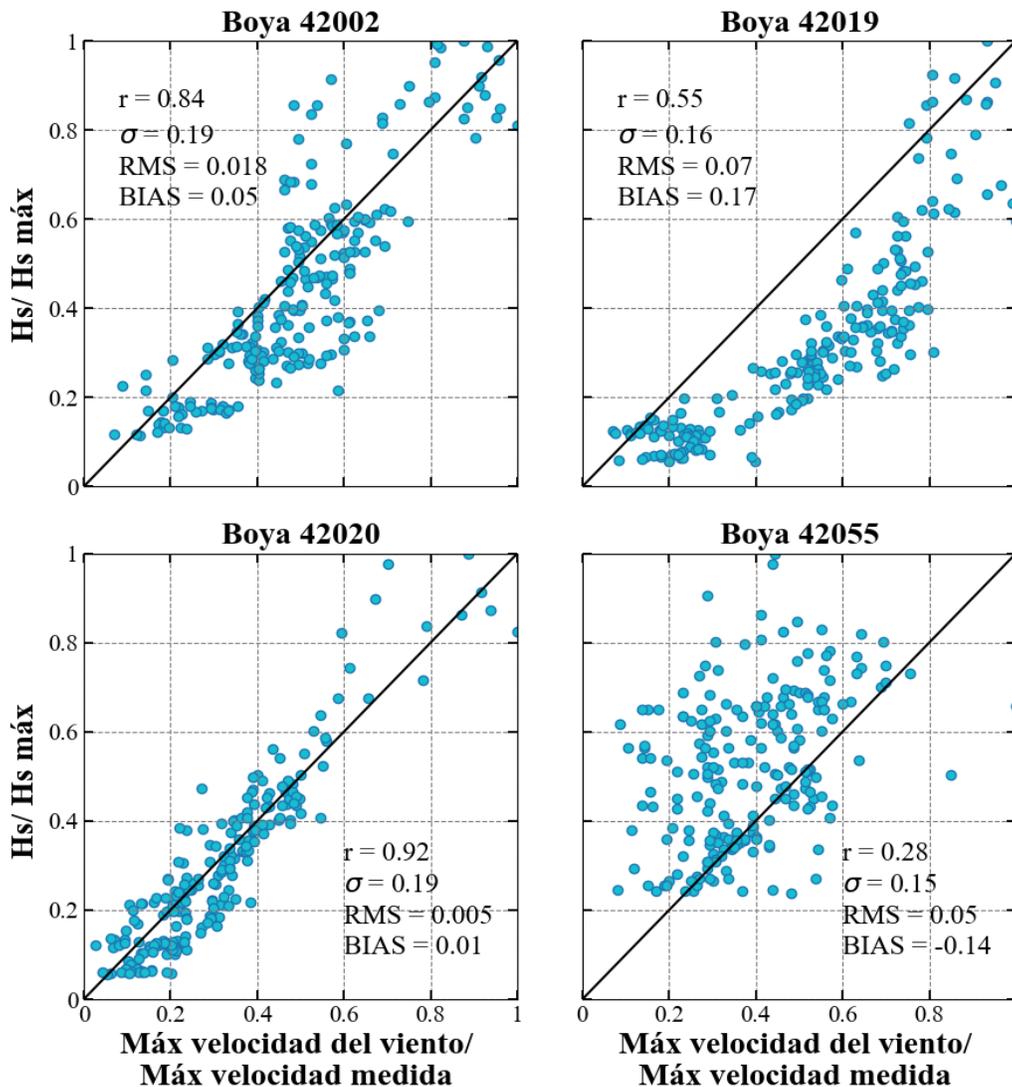


**Figura 14.** Gráfico de dispersión de la altura de onda respecto a la velocidad máxima del viento.

Al salir de la bahía de Campeche, Harvey era un sistema más intenso con velocidades máximas del viento superior a 15 m/s y altura del oleaje próximo a 2.5

m, registrado para la boya 42002 ubicada en la zona Oeste referenciado respecto a las otras boyas. El 24 de agosto a las 18:00 h la tormenta se clasificaba como huracán con vientos muy intensos y con una dirección de avance hacia el Noroeste, siendo la altura del oleaje dependiente de la velocidad máxima del viento como se evidencia en la (Figura 14) presentando un  $r = 0.84$  siendo una correlación significativa (Tabla 4), mostrando la dependencia de estas dos variables. Por otro lado, el ajuste lineal que se realizó para la boya 42019 es muy significativo, evidenciando una vez más dependencia de la altura del oleaje y la velocidad máxima del viento para la boya 42019, donde el coeficiente de correlación calculado es  $r = 0.86$  siendo una correlación fuerte.

La boya 42020 presentó el mejor ajuste respecto a las demás boyas, evidenciando la dependencia de la velocidad máxima del viento y la altura del oleaje, presentando un  $r = 0.93$  siendo una correlación fuerte.



**Figura 15.** Gráfico de dispersión normalizada velocidad máxima del viento / máxima velocidad medida respecto Hs / Hs máximo con los respectivos estadísticos.

En la (Figura 15), se realizó un ajuste lineal a los datos de la boya, para observar la relación de dependencia entre la altura de onda (normalizada) respecto a la velocidad máxima del viento (normalizada), posteriormente se procedió a calcular el coeficiente de correlación, la desviación estándar, el RMS y BIAS.

Las boyas que presentaron coeficientes de correlaciones más alto fue la 42002 y 42020 con un  $r = 0.84$  y  $r = 0.92$  siendo correlaciones significativas y fuerte, por otro lado, la boya 42019 presentó un  $r = 0.55$  siendo una correlación moderada, mientras que la boya 42055 presentó una correlación débil, siendo la más baja respecto a las demás boyas con valor de  $r = 0.28$ .

Siguiendo con los cálculos de los estadísticos, para este caso se realizó la desviación estándar para las cuatro boyas. La desviación estándar ( $\sigma$ ), es la medida que indica que tan dispersos están los datos respecto a la media. De acuerdo a la (Figura 15), las boyas 42002 y 42020 presentó el mismo valor de desviación  $\sigma = 0.19$ , mientras que la boya 42019 y 42055 tuvo una desviación similar con valores de  $\sigma = 0.16$  y  $\sigma = 0.15$ , siendo la boya 42055 el valor más bajo del registro.

La media cuadrática o RMS (Root Mean Square, por sus siglas en inglés) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable, es decir, que tan cercanos / lejanos están los valores de la línea de 45 grados (ajuste perfecto). Las boyas 42002 y 42020 presentó valores muy bajos,  $RMS_{42002} = 0.018$  y  $RMS_{42020} = 0.005$ , es decir presentó un ajuste casi perfecto, mientras que las boyas 42019 y 42055 presentó valores de RMS más altos respecto a las boyas anteriores.

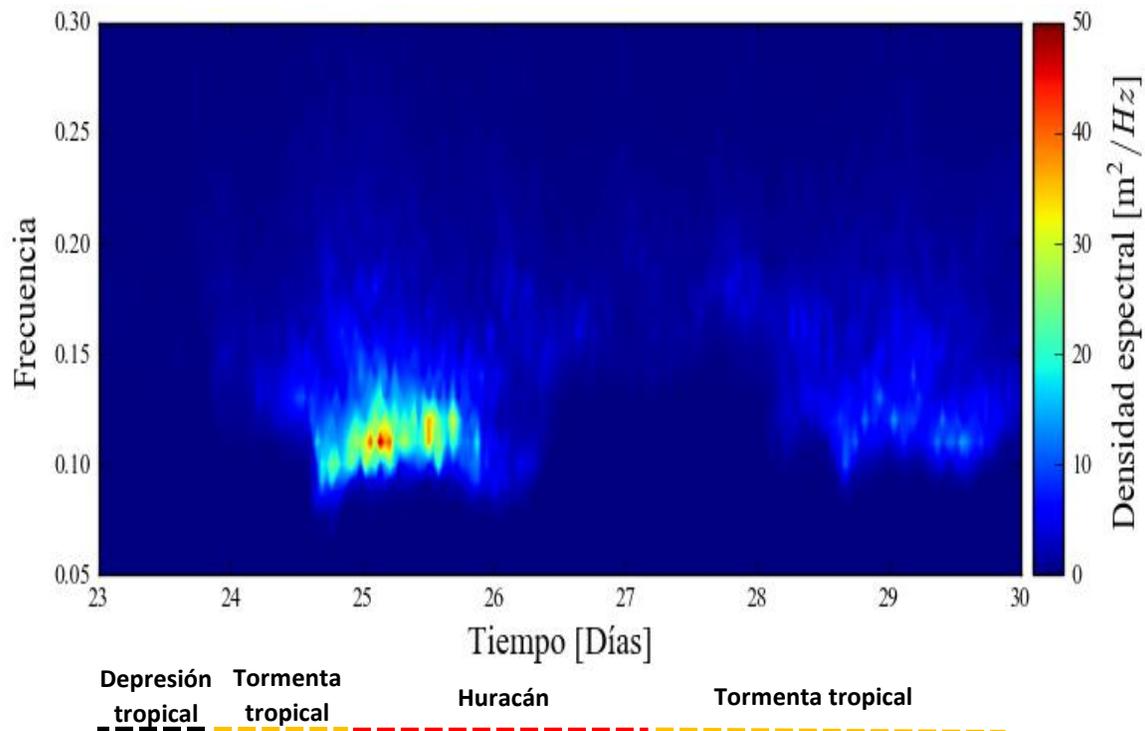
Por otro lado, se calculó el valor de BIAS, entre más pequeño sea este valor, más similares son las variables analizadas. Este estadístico básicamente muestra, si el valor de la velocidad máxima del viento es similar a la altura del oleaje. Si es positivo quiere decir que para un valor de la velocidad máxima del viento la altura del oleaje es menor, si es negativo quiere decir que para un valor de la velocidad máxima del viento la altura del oleaje es mayor. Por tanto, las boyas 42002 y 42020 presentó valores positivos con  $BIAS_{42002} = 0.05$  y  $BIAS_{42020} = 0.01$  y los más bajos respecto a las otras boyas, es decir estas variables son analizadas, mientras la boya 42019 presentó un  $BIAS = 0.17$ , es decir los registros para esta boya no son tan similares respecto a las mencionadas anteriormente. La boya 42055, presentó un valor negativo  $BIAS_{42055} = -0.14$ , es decir que para los valores de la velocidad máxima del viento la altura del oleaje es mayor.

#### 4.8. ESPECTROS DE FRECUENCIA

A continuación, se presentan los espectros del oleaje en función del tiempo y de la frecuencia para cada una de las boyas mencionadas, cabe resaltar que todas las boyas presentan la misma escala en la paleta de colores.

#### 4.8.1. BOYA 42002

En la (Figura 16) se presenta el espectro del oleaje en función de la frecuencia y del tiempo. Cuando Harvey entró en la bahía de Campeche como una depresión tropical, se registraron valores cercanos a cero de la densidad espectral. La depresión evolucionó a tormenta tropical entre el 24 de agosto entre las 6:00 y 14:00 h, donde la boya registró valores de energía entre 10 a 20  $m^2/Hz$  en un intervalo de frecuencias entre 0.13 y 0.16 Hz.



**Figura 16.** Serie de tiempo del espectro de oleaje en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42002.

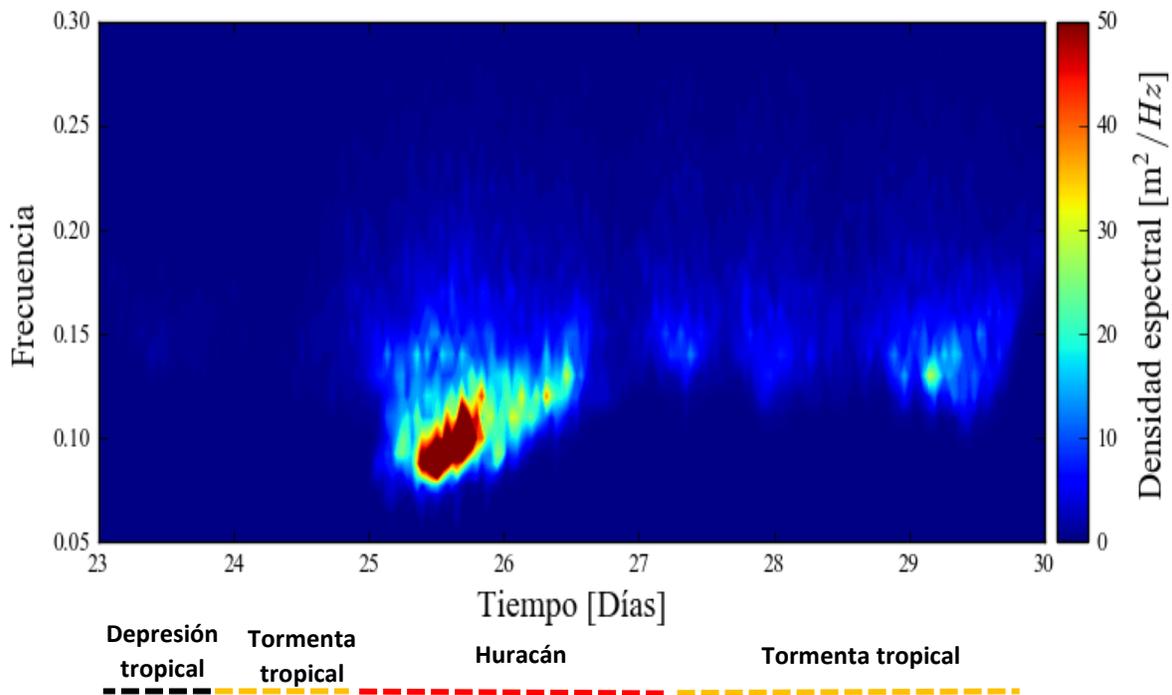
Harvey se intensificó debido a las condiciones favorables del Golfo, donde se evidenció dos picos de energía el día 25 de 40  $m^2/Hz$  entre las 00:00 y las 04:00 h y de 35  $m^2/Hz$  a las 12:00 h con frecuencias entre 0.11 y 0.12 Hz. Estos valores altos de energía se deben al paso del huracán cerca de la boya. Para el resto de los días en condiciones de huracán se observó valores de energía entre 10 y 20  $m^2/Hz$ .

Luego el día 26 a las 18:00 h Harvey fue nuevamente una tormenta tropical, los valores de densidad espectral estuvo alrededor de 0 a 10  $m^2/Hz$  con frecuencias entre 0.17 y 0.20 Hz, son bajos comparados con las condiciones de huracán. El día

28 entre las 08:00 y 20:00 h Harvey reingresó al Golfo donde hubo un incremento de energía con valores entre 5 y 15  $\text{m}^2/\text{Hz}$  y frecuencias entre 0.09 y 0.14 Hz.

#### 4.8.2. BOYA 42019

En la (Figura 17) se presentó el espectro en función de la frecuencia y del tiempo de la boya 42019. Es de notar que esta boya está ubicada en la parte Norte del Golfo de México. Se evidenció cuando Harvey fue depresión tropical, presentó la energía del oleaje más baja en el registro, con valores máximos de 10  $\text{m}^2/\text{Hz}$  y frecuencias entre 0.14 y 0.15 Hz. Posteriormente, Harvey como tormenta tropical produjo valores bajos de energía entre 0 y 10  $\text{m}^2/\text{Hz}$ , donde presentó los valores más altos cuando estaba en la transición a Huracán.



**Figura 17.** Serie de tiempo del espectro en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42019.

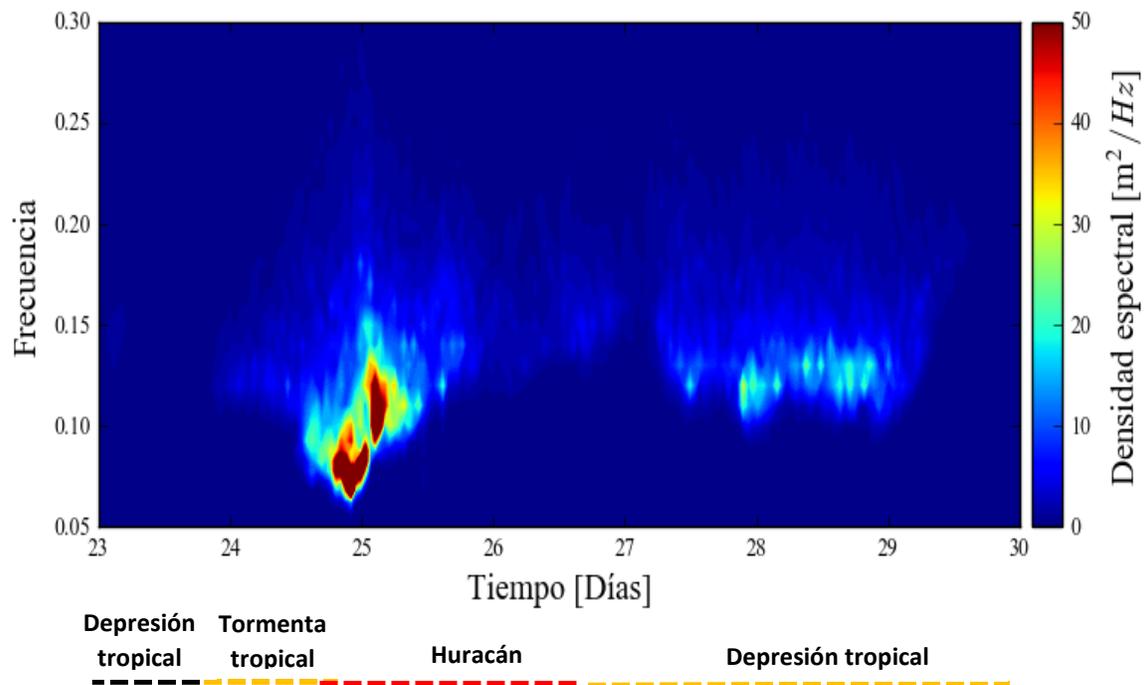
En condiciones de huracán, la energía del oleaje incrementó principalmente por el esfuerzo que produce los vientos intensos sobre la capa superficial del océano. Esto se evidenció el 25 de agosto entre las 8:00 h y las 16:00 h con valores de energía superiores a 50  $\text{m}^2/\text{Hz}$  con frecuencias entre 0.07 y 0.12 Hz relacionadas con oleaje local. De otro lado, se observó valores de energía entre 20 y 30  $\text{m}^2/\text{Hz}$  durante la fase de huracán con frecuencias entre 0.07 y 0.17 Hz. Debido el oleaje está fuera de la zona de fetch, se podría clasificar como oleaje tipo swell. Esto coincide con lo propuesto por Young (2006), quien propone, las olas que son generadas en la zona

de vientos máximos pueden propagarse con una velocidad mucho mayor que el avance del huracán.

Harvey al entrar al continente el 26 de agosto a las 18:00 h, se clasificó en tormenta tropical. Nuevamente esta tormenta reingresó al Golfo donde se registró valores de densidad espectral para los días 27 al 29 entre 10 y 25  $\text{m}^2/\text{Hz}$  con frecuencias entre 0.13 y 0.17 Hz, relacionados con bajas magnitudes del viento.

### 4.8.3. BOYA 42020

En la (Figura 18) se presenta el espectro en función de la frecuencia y del tiempo de la boya 42020. Es de notar que esta boya está ubicada en la zona Oeste del Golfo de México. Se evidenció que Harvey al ser depresión tropical, la energía del oleaje fue la más baja del registro encontrando valores máximos de 10  $\text{m}^2/\text{Hz}$  y frecuencias entre 0.14 y 0.15 Hz. Posteriormente, Harvey como tormenta tropical produjo valores bajos de energía entre 10 y 15  $\text{m}^2/\text{Hz}$ , a una frecuencia de 0.13 a 0.15 Hz presentando los valores más altos cuando este sistema estaba clasificado como Huracán.



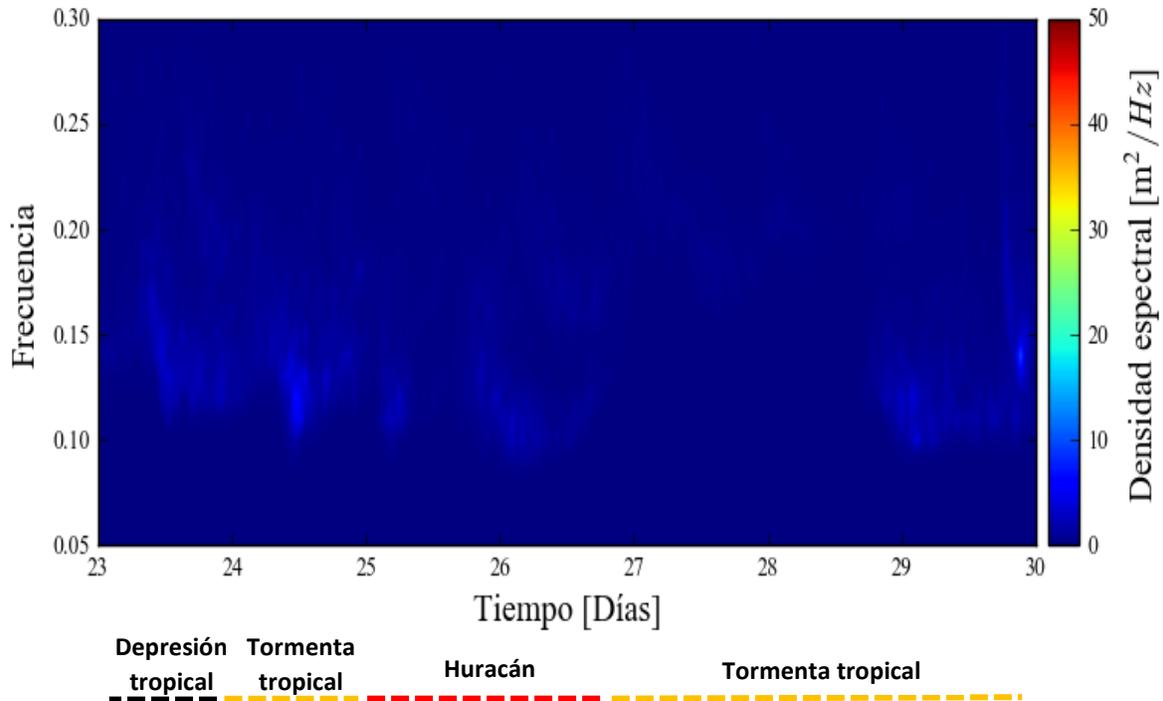
**Figura 18.** Serie de tiempo del espectro en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42020.

En condiciones de huracán la velocidad del viento fue superior a 25 m/s, de tal modo, la velocidad máxima sostenida del viento fue superior con registros mayores a 50 m/s, siendo la energía del oleaje incrementada principalmente por el esfuerzo que produce los vientos intensos sobre la capa superficial del océano.

Por otra parte, se evidenció finalizando el 24 de agosto como cambió drásticamente la energía en el espectro, encontrando valores superiores a  $50 \text{ m}^2/\text{Hz}$  a una frecuencia de 0.06 hasta 0.10 Hz relacionadas con oleaje local, no obstante, otra importante energía se observó a una frecuencia diferente, asociado a 0.09 a 0.14 Hz donde registró energía superior a  $50 \text{ m}^2/\text{Hz}$  a las 00:00 hasta las 04:00 h del día 25, la energía del espectro disminuyó comparado con el análisis anterior, a tal punto, la energía estaba en el rango de 20 a  $30 \text{ m}^2/\text{Hz}$  a una frecuencia de 0.10 a 0.14 Hz, en la serie de tiempo se evidenció que la energía del espectro disminuyó a partir del 26 al 27 de agosto, Harvey tenía una dirección de avance hacia el Noroeste, posteriormente ingresó al continente exactamente en el estado de Texas donde la intensidad del huracán disminuyó clasificándose como tormenta tropical, evidenciando una disminución en los registros de la energía comprendidos de 0 a  $10 \text{ m}^2/\text{Hz}$  a una frecuencia entre 0.13 a 0.20 Hz. Finalmente la tormenta reingresa al Golfo durante los días 27 al 29 entre 20 y  $30 \text{ m}^2/\text{Hz}$  con frecuencias entre 0.11 y 0.15 Hz, mientras para ese mismo periodo de tiempo se observó un oleaje tipo swell a una frecuencia de 0.15 a 0.25 Hz con energía que no superó  $10 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

#### **4.8.4. BOYA 42055**

En la (Figura 19), se observa el espectro en función de la frecuencia y del tiempo de la boya 42055. En esta boya se registraron las densidades espectrales más bajas debido que está ubicada en la zona más austral del Golfo. Cuando Harvey transitó cerca a esta boya solo era una depresión tropical. El día 23 a las 16:00 h se registró valores que no superó los  $10 \text{ m}^2/\text{Hz}$  con frecuencias entre 0.12 y 0.17 Hz. Posteriormente, Harvey se convirtió en una tormenta tropical registrando valores aproximados de  $20 \text{ m}^2/\text{Hz}$  para frecuencias entre 0.10 y 0.14 Hz.



**Figura 19.** Serie de tiempo del espectro del oleaje en función de la frecuencia y del tiempo para la boya 42055.

Por otro lado, Harvey se clasificó como huracán, los valores de densidad espectral para esta boya fueron muy bajos debido que el avance del huracán era en dirección Noroeste y la boya se encontraba relativamente lejos de la trayectoria. Por tanto, los registros fueron inferiores a  $10 \text{ m}^2/\text{Hz}$  con frecuencias entre 0.10 y 0.13 Hz. A medida que Harvey se dirigió hacia Texas, se observó valores de energía cercanos a cero. El día 28 de agosto, cuando reingresó este sistema al Golfo de México se observó un incremento en la densidad espectral, pero siguió siendo registros muy inferiores  $5 \text{ m}^2/\text{Hz}$ .

#### 4.9. ESPECTROS DIRECCIONALES

A continuación, se presentan los espectros direccionales asociados a cada boya. Con el fin de realizar una comparación adecuada, se presentan los espectros durante cada etapa del sistema (tormenta, huracán y tormenta).

Cabe resaltar, los resultados de los espectros direccionales para la boya 42019 no se presentó debido a un problema en el procesamiento de los datos, por tanto, solo se presentó para la boya 42002, 42020 y 42055.

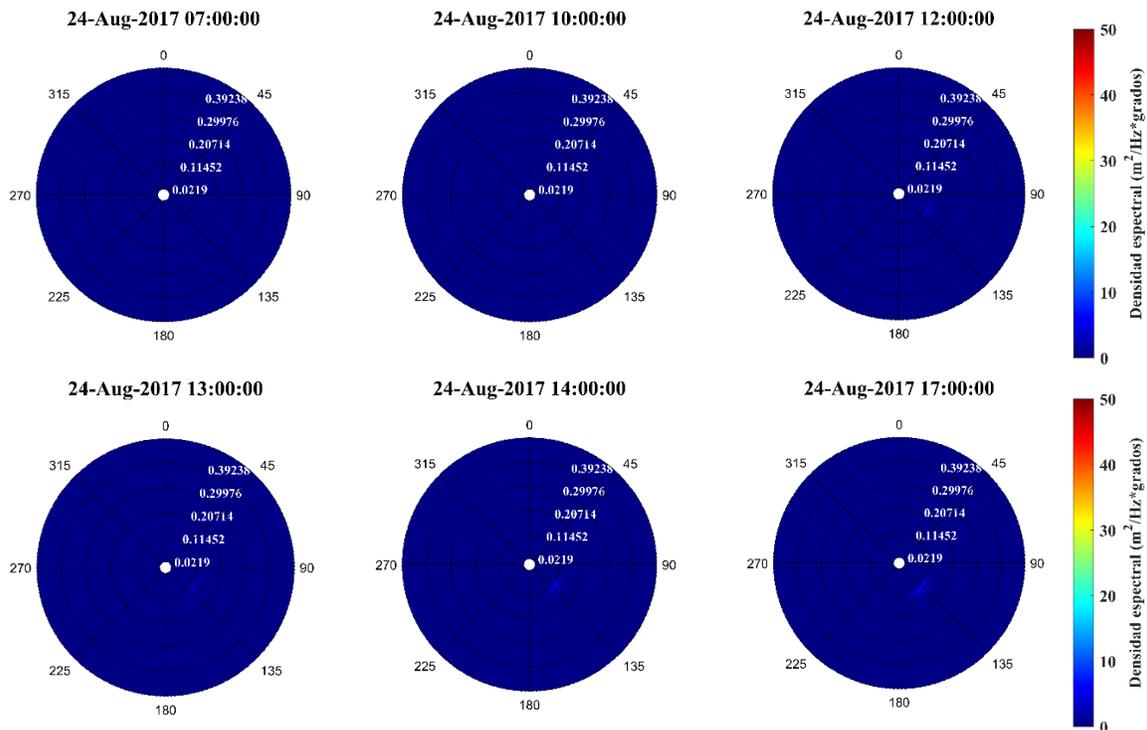
Los espectros direccionales para cada boya tienen diferentes escalas en la paleta de colores, debido que la energía de Harvey para algunas boyas fue más alta

(42002 y 42020) que la (42055) debido a las etapas de formación que tuvo el huracán.

#### 4.9.1. BOYA 42020

En la (Figura 20), se observan los espectros direccionales mientras que Harvey fue una tormenta tropical. Esto sucedió durante el 24 de agosto donde se registró vientos poco intensos. Durante esta época, se observó como los valores de energía del oleaje para esta boya no fueron muy significativos, debido que Harvey se encontró en la bahía de Campeche, muy alejado de la boya. Por lo tanto, los valores de la densidad espectral fueron los más bajos para la serie de tiempo.

A las 14:00 h del día 24, se evidenció un pequeño sistema de olas que se dirigió hacia el Sureste con una frecuencia promedio de 0.11 Hz y valores de energía aproximada de 15 m<sup>2</sup>/Hz deg. Por lo tanto, el espectro del oleaje en este caso es unimodal.

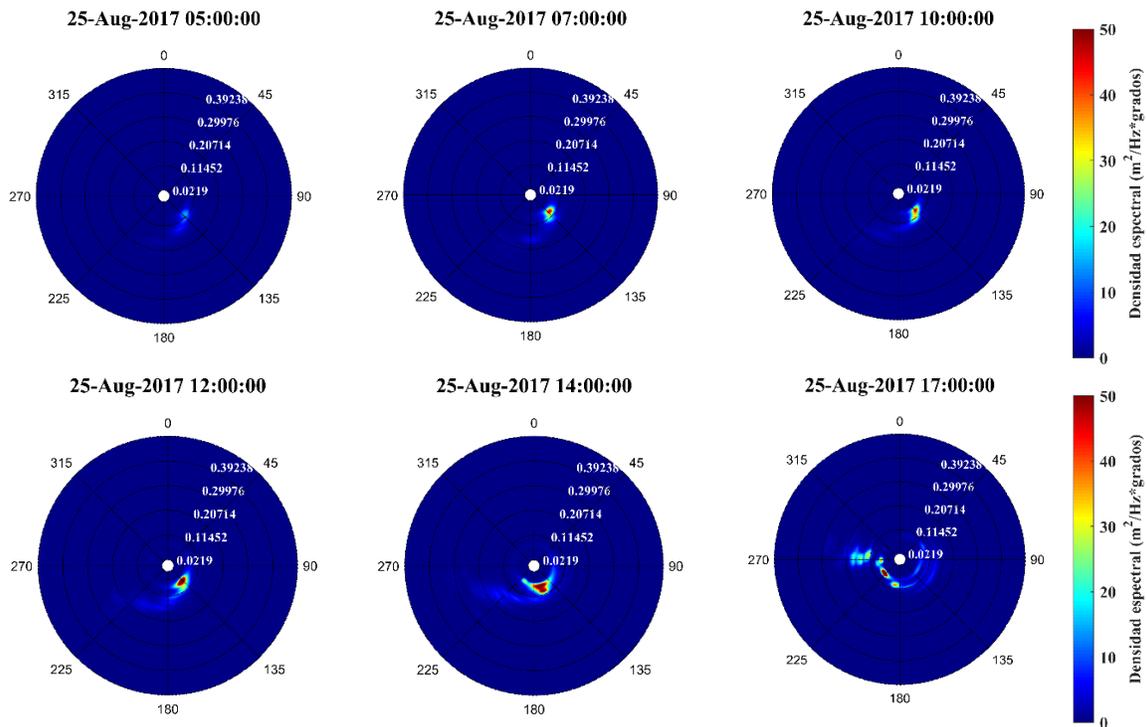


**Figura 20.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México.

Tras haber salido Harvey de la bahía de Campeche, el día 25 esta perturbación se intensificó aún más acompañado de vientos máximos sostenidos con velocidades superiores a 40 m/s y una dirección de avance hacia el Noroeste. El espectro

direccional presentó valores de densidad espectral cercanos a  $10 \text{ m}^2/\text{Hz deg}$  con dirección Sureste y frecuencias promedio de  $0.11 \text{ Hz}$ .

Por otra parte, durante el día 25 de agosto entre las 08:00 h y las 12:00 h, los espectros direccionales mostraron un incremento en la energía comparado con los espectros anteriores. Esto se debe a que Harvey se encontraba más cerca de la boya. En estos días se observó dos sistemas de oleaje, uno se dirige al Sureste y otro hacia el Sur. El oleaje que se dirige al Sureste es más energético que el otro con valores de  $50 \text{ m}^2/\text{Hz deg}$  a una frecuencia promedio de  $0.02$  y  $0.11 \text{ Hz}$ . Mientras que el oleaje que se dirigía al Sur tuvo valores de  $20 \text{ m}^2/\text{Hz deg}$  a una frecuencia promedio de  $0.11 \text{ Hz}$ .

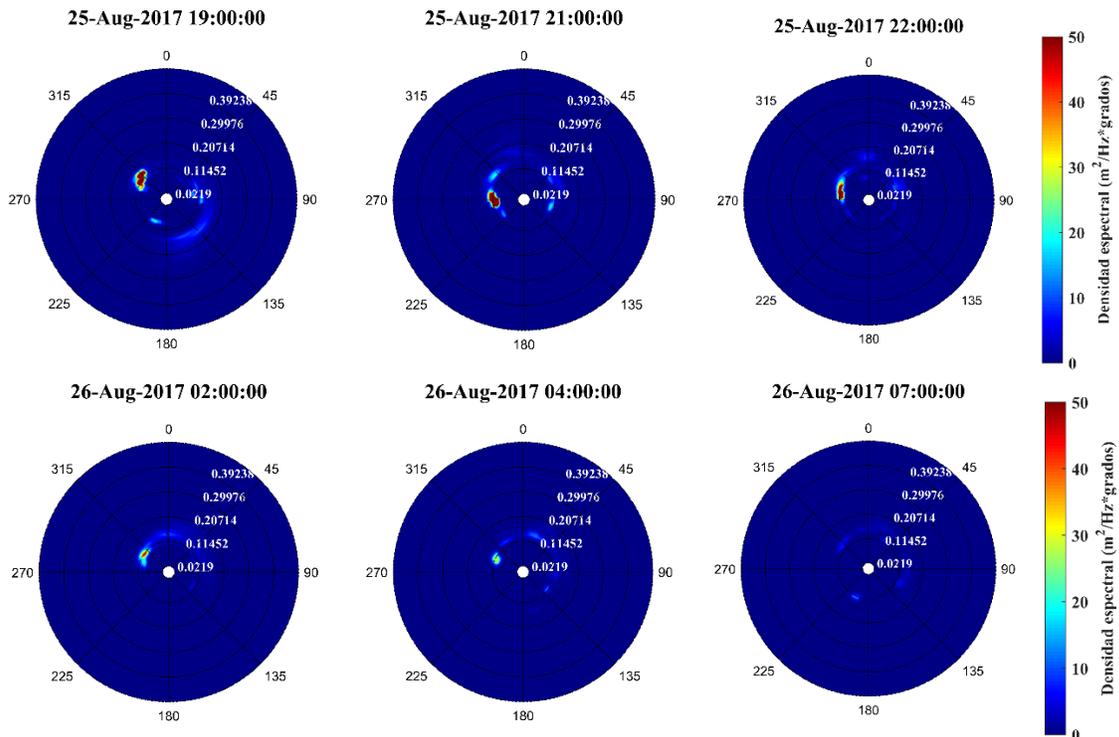


**Figura 21.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de huracán en el Golfo de México.

Para el día 25 de agosto a las 20:00 h, los espectros mostraron valores de energía en dirección noroeste, una densidad espectral de  $50 \text{ m}^2/\text{Hz deg}$  y una frecuencia de  $0.11 \text{ Hz}$ . Mientras a las 21:00 h la densidad espectral también presentan valores superiores a  $50 \text{ m}^2/\text{Hz deg}$  y una frecuencia promedio de  $0.02$  y  $0.11 \text{ Hz}$ . Nuevamente en este caso, el campo de oleaje es multimodal con sistemas de olas con direcciones predominantes hacia el noreste, este, sureste, suroeste, oeste y noroeste con una frecuencia promedio de  $0.11 \text{ Hz}$ .

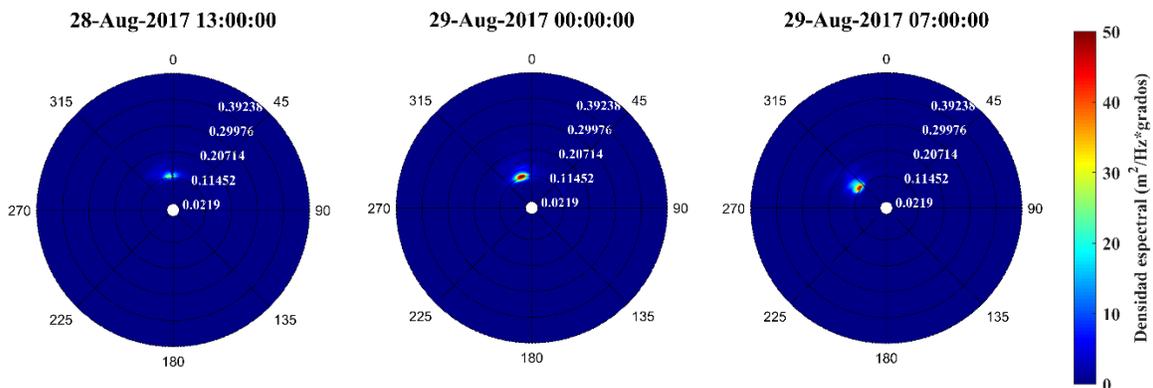
El 26 de agosto la energía del oleaje disminuyó sustancialmente, registrando valores entre  $30$  y  $40 \text{ m}^2/\text{Hz deg}$  a una frecuencia promedio de  $0.11 \text{ Hz}$  y una dirección Noroeste. Entre las 04:00 y 07:00 h se registró sistemas de olas con varias

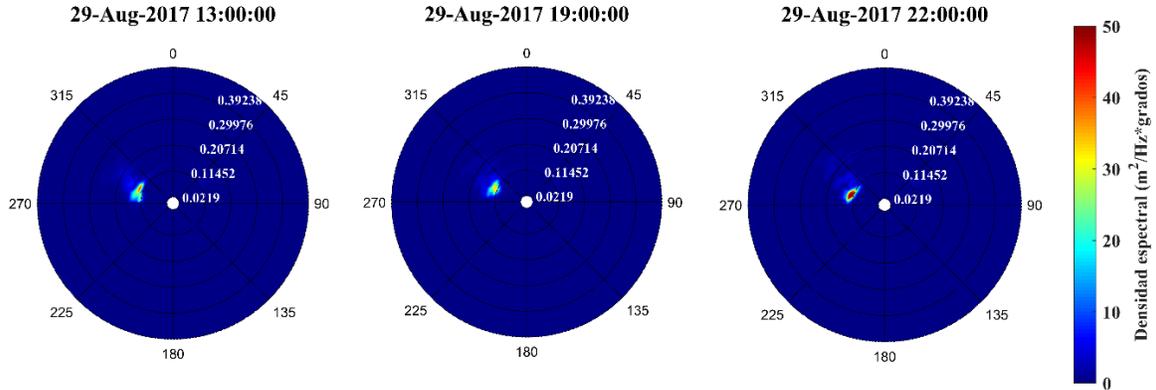
direcciones, dirigiéndose al Noroeste, Este y Sureste con frecuencia de promedio de 0.11 Hz.



**Figura 22.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de huracán en el Golfo de México.

Finalmente, Harvey reingresó al Golfo (el día 28) se convirtió de nuevo en tormenta tropical con valores de energía alrededor de 50 m<sup>2</sup>/Hz deg y una dirección promedio hacia el Norte, luego la dirección fue cambiando en la serie de tiempo con predominancia hacia el Nor-noroeste. Mientras que el día 29 se registró un sistema que la dirección es con tendencia hacia el Oeste y un incremento de energía de 40 m<sup>2</sup>/Hz deg a una frecuencia de 0.11 Hz.



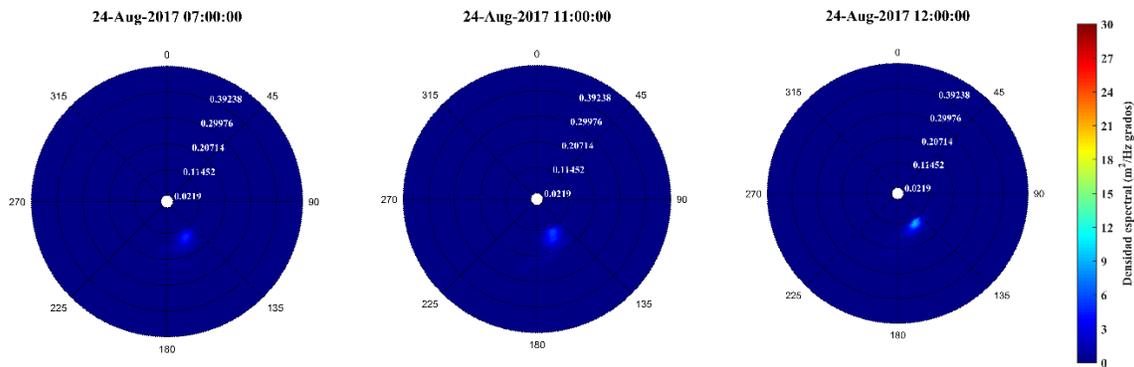


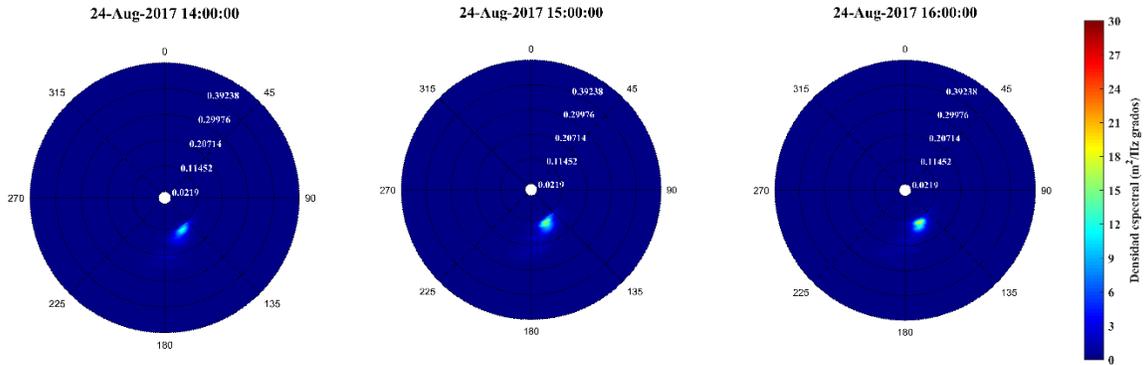
**Figura 23.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42020 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México.

#### 4.9.2. BOYA 42002

En las siguientes figuras se presentan los espectros direccionales de la boya 42002 para los diferentes estados de Harvey (tormenta, huracán, tormenta). En la (Figura 24) se observan los espectros direccionales asociados al estado de tormenta tropical. En este caso, para el 24 de agosto a partir de las 06:00 h se observó valores de magnitud del viento que no superó los 15 m/s y velocidad máxima sostenida de 25 m/s, respectivamente.

En el espectro direccional, se evidenció un sistema monomodal, con dirección hacia el Sur-Sureste, una frecuencia y valores de energía promedio de 0.11 Hz y 10 m<sup>2</sup>/Hz deg, el 24 de agosto a las 12:00 h donde la tormenta estuvo a una distancia respecto a la boya de 274 Km, la energía del espectro incrementó en la serie de tiempo entre 15 y 18 m<sup>2</sup>/Hz deg donde el sistema de oleaje siguió siendo monomodal a 0.11 Hz de frecuencia.

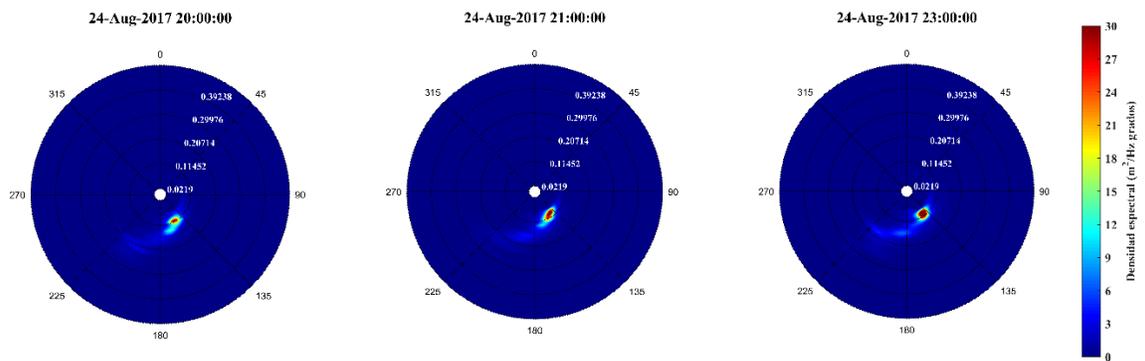


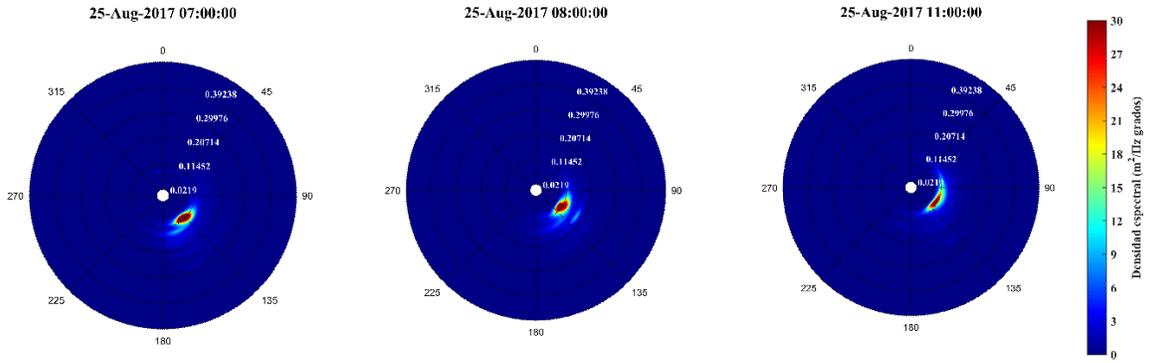


**Figura 24.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México.

Como se ha mencionado este sistema se intensificó y dejó de ser una tormenta tropical para convertirse en un huracán. En la (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se observó los espectros direccionales del oleaje para Harvey durante su condición de huracán. Se evidenció que es un sistema de olas multimodal, modulado por vientos con velocidades superiores a 25 m/s y velocidades máximas sostenidas de 55 m/s y una dirección de avance de la tormenta hacia el Oeste-Noroeste.

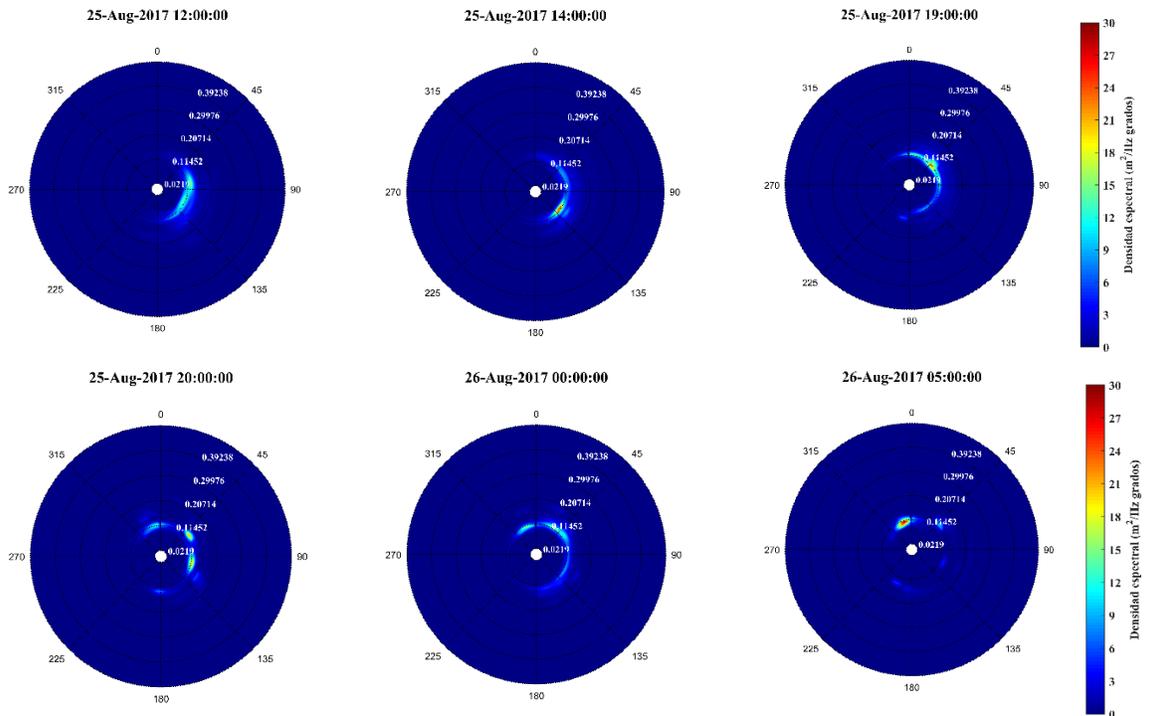
El 25 de agosto entre las 00:00h y las 08:00 h, se evidenció como la energía incrementó respecto a la tormenta tropical, registrando valores superiores a 30  $m^2/Hz$  deg asociado a una frecuencia de 0.02 Hz y dirección promedio Sureste, respectivamente. Mientras el día 24, entre las 08:00 y las 11:00 h, los espectros siguió presentando incremento de energía asociado a una dirección promedio hacia el Este-Sureste a frecuencias entre 0.02 y 0.11 Hz. Este incremento en la energía se debió, a la intensidad de los vientos en esta zona debida que la tormenta se encontraba a una distancia aproximada de 200 Km de la boya 42002.





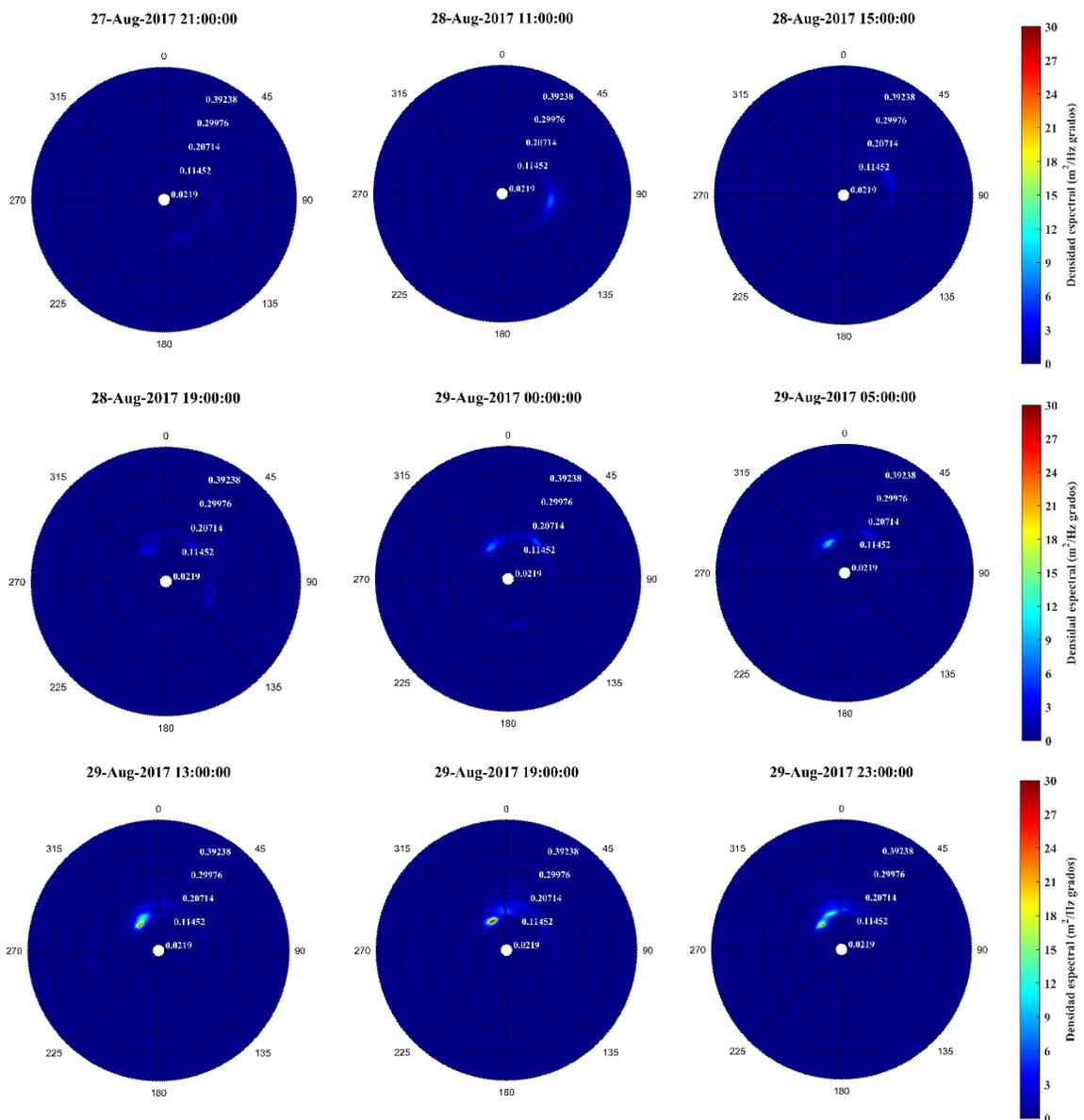
**Figura 25.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de huracán en el Golfo de México.

El 25 de agosto entre las 19:00 h y las 20:00 h y el 26 de agosto a las 00:00 h, el sistema de olas presentó direcciones hacia el Noreste, Este y Sureste a una frecuencia promedio de 0.02 y 0.11 Hz. Es de notar que a las 20:00 h se observó un incremento en la energía con valores superiores a 30 m<sup>2</sup>/Hz deg. Mientras, el día 25 a las 20:00 h hasta el día 26 a las 05:00 h, se observó un sistema multimodal que se dirigió hacia el Noreste, Sureste y Nor-noreste con valores de densidad espectral entre 20 a 30 m<sup>2</sup>/Hz y frecuencias entre 0.02 y 0.11 Hz.



**Figura 26.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de huracán en el Golfo de México.

Finalmente, en la (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se presentan los espectros direccionales de Harvey en su condición nuevamente de tormenta tropical, para el día 28 los valores de densidad espectral continuó disminuyendo, ya que esta tormenta ingresó al continente con olas que viajaron en dirección Noreste y Este a una frecuencia promedio de 0.11 Hz. Es necesario recordar que Harvey reingresó al Golfo de México con vientos hasta de 20 m/s. Por lo tanto, para el 29 de agosto la densidad espectral incrementó nuevamente encontrando registros superiores a 25 m<sup>2</sup>/Hz deg a una dirección Noroeste y frecuencia de 0.11 Hz, respectivamente.

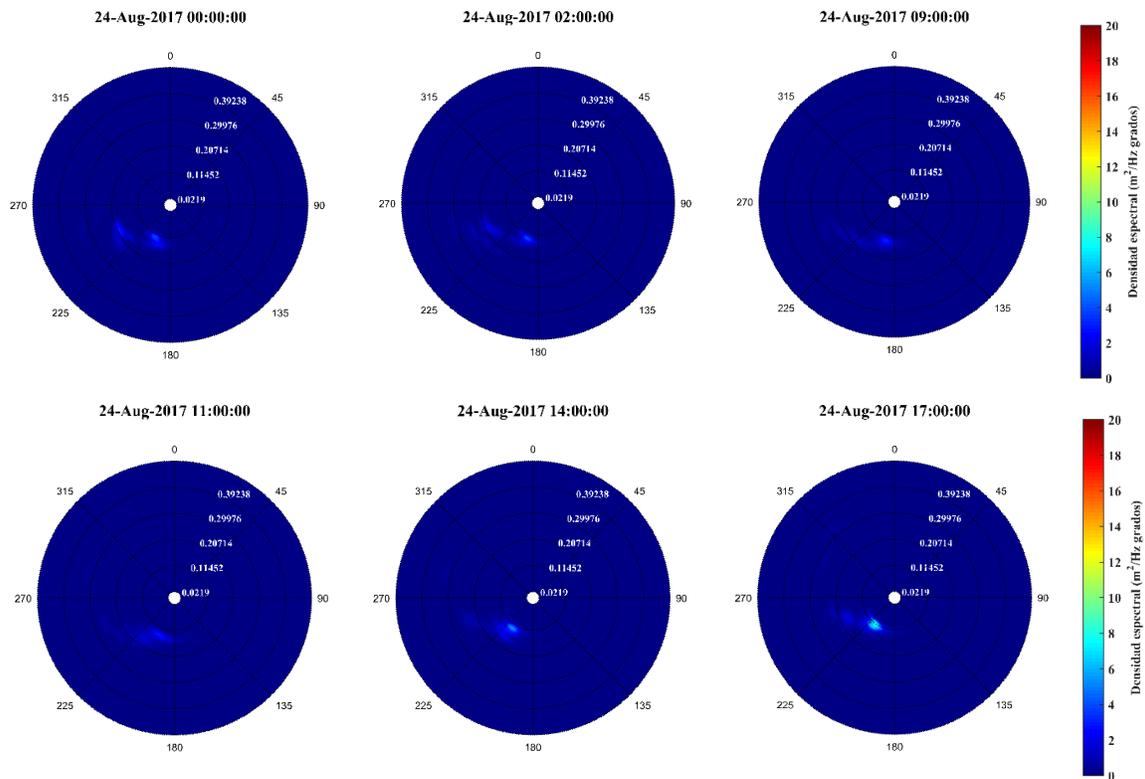


**Figura 27.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42002 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México.

### 4.9.3. BOYA 42055

En las siguientes figuras se presentan los espectros direccionales asociados a la boya 42055 para los estados de tormenta, huracán y tormenta. En la (Figura 28) se presentan los espectros de Harvey en su condición de tormenta tropical. Se observó cómo Harvey ingresó al Golfo de México siendo una depresión tropical, luego en tormenta tropical asociado a una dirección promedio de avance hacia el Nor-noroeste, el oleaje se dirigió en dirección Suroeste a una frecuencia y energía promedio de 0.11 Hz y 8 m<sup>2</sup>/Hz deg, respectivamente.

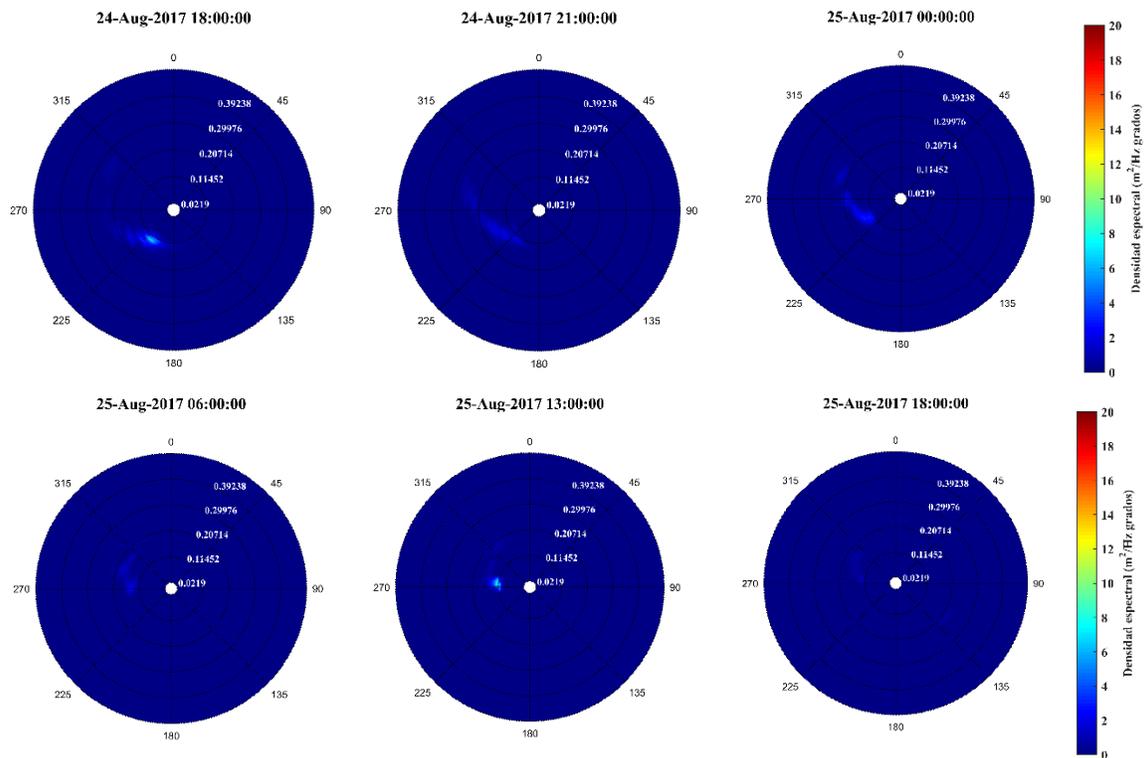
La distancia más cercana de Harvey respecto a la boya se registró el 24 de agosto a las 00:00 h, estando a 149.28 Km, evidenciando que la densidad espectral fue la más alta respecto a las otras etapas del huracán en la serie de tiempo, cabe resaltar que el registro más alto en perturbación tropical fue el 24 de agosto a las 17:00 h estando Harvey a una distancia aproximada de 200 km respecto a la boya, donde obtuvo registro de la densidad espectral entre 8 a 10 m<sup>2</sup>/Hz deg a una frecuencia de 0.11 Hz.

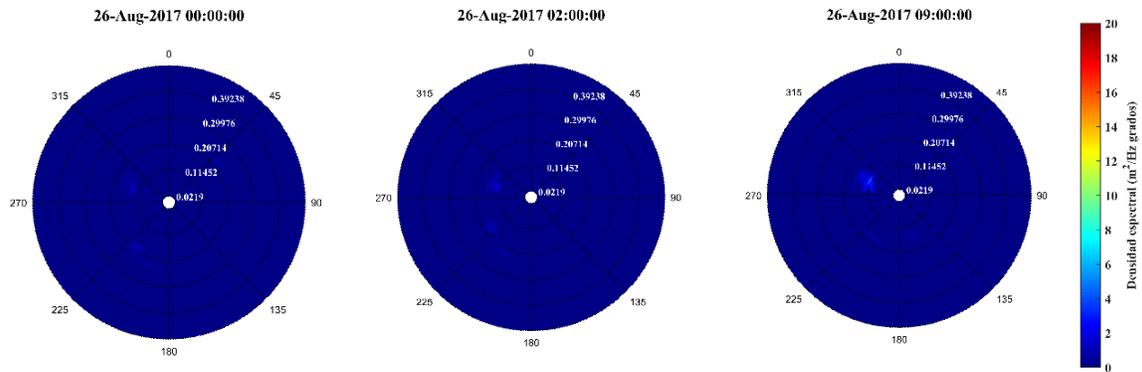


**Figura 28.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42055 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México.

En la (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se presentan los espectros direccionales de Harvey en estado de huracán. Harvey se alejó de la boya debido a su avance hacia el Noroeste del Golfo, siendo la distancia mínima del huracán respecto a la boya es de 255.71 Km el día 24 a las 18:00 h asociada a una densidad espectral de 8 m<sup>2</sup>/Hz deg a una frecuencia de 0.11 Hz, el oleaje se dirige hacia el Suroeste.

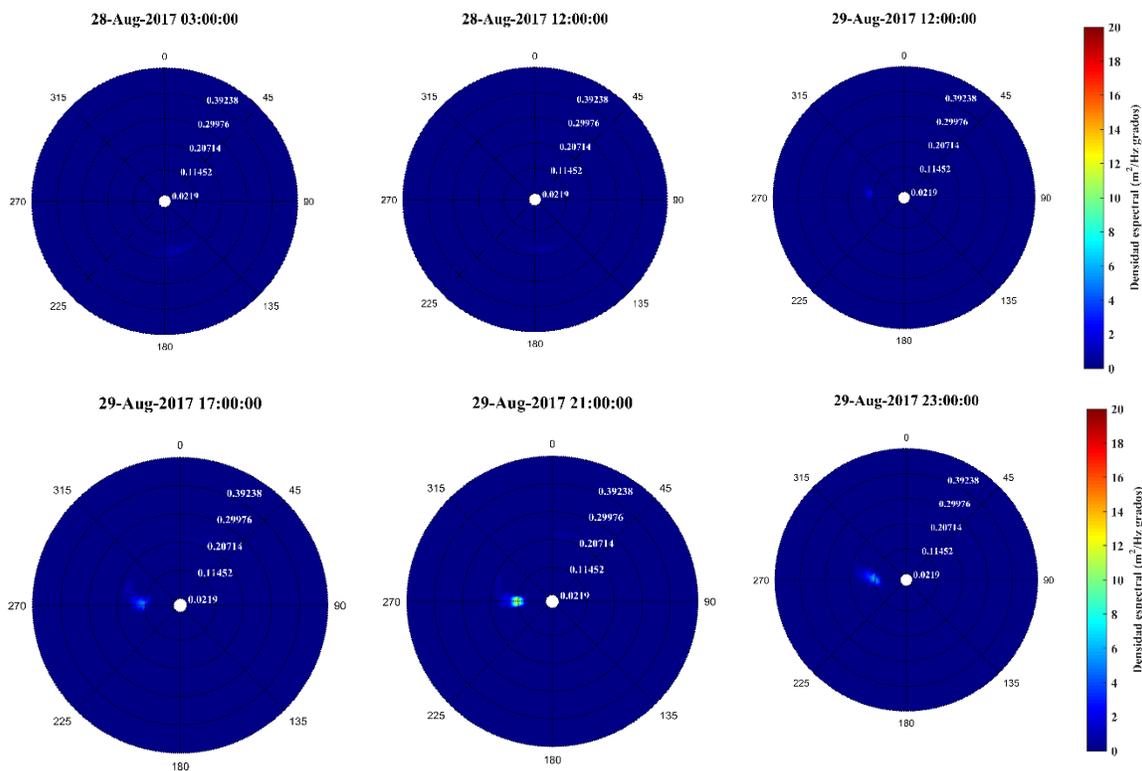
En la serie de tiempo del espectro direccional se observó como el oleaje se dirigía hacia el Suroeste, va cambiando de dirección entre Oeste y Noroeste a la frecuencia de 0.11 Hz. Además, se observó como el espectro cambió de mono modal a bimodal para el 25 de agosto a las 18:00 h, Harvey estando a una distancia aproximada de 610 Km de la boya, con una densidad espectral de 2 a 4 m<sup>2</sup>/Hz deg más baja respecto al anterior análisis a una frecuencia de 0.11 Hz.





**Figura 29.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42055 en condición de huracán en el Golfo de México.

En la (Figura 30) se presentan los espectros direccionales en condiciones de tormenta tropical. El 28 de agosto de 3:00 a 12:00 h Harvey presentó un sistema mono modal que se dirigió hacia el Sur a una frecuencia de 0.11 Hz con densidad espectral que no supera los 2  $m^2/Hz\ deg$ , la dirección del oleaje se ve modificada en la serie de tiempo evidenciando, un cambio hacia el Oeste ocurriendo un incremento en la densidad espectral a partir del 29 de agosto a las 17:00 h hasta las 23:00 h obteniendo registros superiores a 10  $m^2/Hz\ deg$  el día 29 a las 21:00 h, este aumento en la energía es debido al reingreso de Harvey al Golfo, donde la boya toma registros de este efecto, estando a una distancia respecto al huracán mayor a 710 Km.



**Figura 30.** Espectros direccionales del oleaje para la boya 42055 en condición de tormenta tropical en el Golfo de México.

## 5. CONCLUSIONES

El campo de vientos producido por un sistema depresión-tormenta-huracán fue asimétrico durante el recorrido por el Golfo de México, presentando magnitudes muy severas en la parte derecha del huracán según su dirección de avance, encontrando velocidades superiores a 200 km/h, las altas velocidades se deben a la sumatoria entre la velocidad de avance de la tormenta con la velocidad del viento alrededor del ojo, mientras que en la parte izquierda de la tormenta los vientos por lo general eran débiles.

Durante el tránsito de Harvey, presentó una amplia variabilidad en los valores de vientos máximos sostenidos en las diferentes etapas de formación, se distinguió tres fases dos débiles y una intensa. En la primera, Harvey provenía de la Península de Yucatán como una depresión tropical, esta perturbación estaba debilitada debido a la fricción de la tormenta con el continente presentando velocidades del viento máximos sostenidos inferiores a 24 m/s, mientras que en la fase intensa Harvey durante el recorrido hacia el noroeste del Golfo, registró velocidades que superaban los 55 m/s en cercanías a las costas de Texas, posteriormente este sistema se debilita nuevamente producto al contacto con el continente.

Durante condiciones de huracán el viento es intenso y muy variante, produciendo olas complejas que cambian respecto al espacio y el tiempo. Harvey siendo una depresión tropical, con vientos débiles, registró alturas de oleajes más bajas con valores inferiores a 2 m, mientras que este sistema se fortalecía incrementando la velocidad de los vientos en el Golfo, se observaron olas de mayor altura (hasta 7 m), como se evidenció cuando Harvey era huracán. Respecto al periodo de oleaje, los valores más bajos se observaron cuando Harvey era una depresión tropical, mientras que los periodos más altos se presentaron cuando este sistema es un huracán.

Los datos de las boyas 42002, 42019 y 42020 tienen mayor correlación lineal respecto a la boya 42055 siendo la correlación más baja en los gráficos de dispersión de la altura del oleaje respecto a la velocidad máxima del viento de igual forma en el normalizado. La altura del oleaje depende en gran medida de la intensidad de los vientos, se evidenció que en perturbación tropical con vientos poco intenso se desarrolló oleaje de poca altura, mientras que en condiciones de huracán los vientos registrados son los más intensos, por tanto, el oleaje desarrolló las alturas más altas en el registro.

En términos de los espectros de frecuencias, mostraron que Harvey siendo una depresión tropical su densidad espectral fue la más baja en la serie de tiempo con

valores que no superaban 10 m<sup>2</sup>/Hz. Las densidades espectrales más altas se registraron en condiciones de huracán con frecuencias entre 0.07 a 0.12 Hz.

Los resultados obtenidos con los espectros direccionales sugieren que la distribución de la energía y dirección a la que viaja el oleaje depende de la dirección de avance del sistema (depresión/tormenta/huracán). Se observó como la energía del oleaje depende de la distancia al sistema, siendo las variaciones espacio temporales del espectro direccional dependientes a la posición del ojo del huracán.

Harvey siendo una depresión tropical, presentó el sistema de oleaje condiciones mono modales. A pesar del incremento de energía cuando Harvey era tormenta tropical el sistema mantenía la condición monomodal, pero con mayores valores de energía. Sin embargo, cuando Harvey era huracán se observaron sistemas tri y multimodales, en términos de energía espectral los registros eran superiores que las otras etapas de formación.

## **6. TRABAJO FUTURO – RECOMENDACIONES**

Diversos autores sugieren que viviremos en un ambiente más cálido y húmedo, donde se prevé que la temperatura superficial del océano y el contenido de calor aumenten en el futuro y contribuyen a una mayor actividad de perturbaciones atmosféricas como huracanes (IPCC, 2013), por tanto, recomiendo a futuros estudiantes que se involucren en proyectos que traten este tipo de temas que son de suma importancia caracterizarlos debido que aumentarán su frecuencia e intensidad en el tiempo. Caracterizar estos sistemas permitirán tomar buenas decisiones que contribuyan a la seguridad operacional, infraestructura marítima, industrias pesqueras, procesos costeros (erosión).

Sugiero que realicen investigaciones que complementen los vacíos de información como:

1. Eventos extremos como precipitación, vientos, oleaje entre otras variables para el Mar Caribe en las últimas temporadas de huracanes, realizar comparaciones entre temporadas y cuál ha sido la tendencia.
2. Comparación de la transformación del oleaje tras el paso de huracanes de categoría 1,2,3 y 4, 5 en la escala Saffir-Simpson.
3. Mayor caracterización del oleaje con más boyas oceanográficas, que monitoreen desde el mar Caribe hasta el Golfo de México tras el tránsito de un huracán.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ardhuin, F., Herbers, T. H. C., y O'Reilly, W. C. (2001). A Hybrid Eulerian Lagrangian Model for Spectral Wave Evolution with Application to Bottom Friction on the Continental Shelf. *J. Phys. Oceanogr.*, 31(6): 1498–1516.
- Ardhuin, F., O'Reilly, W. C., Herbers, T. H. C., y Jenssen, P. F. (2003). Swell transformation across the continental shelf. Part I: attenuation and directional broadening. *J. Phys. Oceanogr.*, 33(9): 1921–1939.
- Ardhuin, F., Herbers, T. H. C., Watts, K. P., van Vledder, G. P., Jensen, R., & Graber, H. C. (2007). Swell and slanting-fetch effects on wind wave growth. *Journal of Physical Oceanography*, 37(4), 908-931.
- Benoit, M. (1992). Practical comparative performance survey of methods used for estimating directional wave spectra from heave-pitch-roll data. In *Coastal Engineering 1992* (pp. 62-75).
- Benoit, M. (1994). Extensive comparison of directional wave analysis methods from gauge array data. In *Proc. 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis (ASCE)* (pp. 740-754).
- Benoit, M., Frigaard, P., y Schäffer, H. A. (1997). Analyzing multidirectional wave spectra: a tentative classification of available methods. En: *Proceedings of the 1997 IAHR conference.*, San Francisco. p. 131–158.
- Brand, S. (1971). The effects on a tropical cyclone of cooler surface waters due to upwelling and mixing produced by a prior tropical cyclone. *Journal of Applied Meteorology*, 10(5), 865-874.
- Castro, D. A. (2009). *Simulación del oleaje generado por el huracán WILMA en el mar Caribe con el modelo numérico SWAN*. Ensenada, Baja California, México.

- Earle, M. D., Steele, K. E., y Wangc, D. W. C. (1999). Use of advanced directional wave spectra analysis methods. *Ocean. Engng.*, 26(12): 1421–1434.
- Emanuel, K. (2003). Ciclones tropicales. *Revisión anual de las ciencias de la tierra y del planeta*, 31 (1), 75-104.
- Emanuel, K. (2007). Environmental factors affecting tropical cyclone power dissipation. *Journal of Climate*, 20(22), 5497-5509.
- Emanuel, K. A. (2013). Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30), 12219-12224.
- Esquivel-Trava, B., Ocampo-Torres, F. J., & Osuna, P. (2015). Spatial structure of directional wave spectra in hurricanes. *Ocean Dynamics*, 65(1), 65–76. <http://doi.org/10.1007/s10236-014-0791-9>.
- Estadística para ciencias del comportamiento de Haroldo Erloza, editorial Harla, México 1987.
- Ewans, K. C. y van der Vlugt, T. (1999). Estimating bimodal frequency-direction spectra from surface buoy data recorded during tropical cyclones. *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 121(3): 172–180.
- Holthuijsen, L. H., Powell, M. D., & Pietrzak, J. D. (2012). Wind and waves in extreme hurricanes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(9), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2012JC007983>
- Hu, K., & Chen, Q. (2011). Directional spectra of hurricane-generated waves in the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 38(19), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2011GL049145>
- IPCC (2013). Climate change 2013: The physical science basis. In T. F. Stocker, et al. (Eds.), *Intergovernmental Panel on Climate Change* (1535 pp.). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press
- Jacobs, P., Fasullo, J., Zhang, Y., Trenberth, K. E., & Cheng, L. (2018). Hurricane

- Harvey Links to Ocean Heat Content and Climate Change Adaptation. *Earth's Future*, 6(5), 730–744. <https://doi.org/10.1029/2018ef000825>
- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Zhao, M., Tuleya, R. E., Bender, M., Vecchi, G., et al. (2015). Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios. *Journal of Climate*, 28, 7203– 7224. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0129.1>
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2012). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3, 269– 273. <https://doi.org/10.1038/nclimate1716>
- Lloyd, I. D., & Vecchi, G. A. (2011). Observational evidence for oceanic controls on hurricane intensity. *Journal of Climate*, 24, 1138– 1153. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3763.1>
- Longuet-Higgins, M. S., Cartwright, D. E., y Smith, N. D. (1963). Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. *Ocean Wave Spectra*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ, 111-136 pp.
- Montoya, R. D., Arias, A. O., Royero, J. O., & Ocampo-Torres, F. J. (2013). A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds. *Ocean Engineering*, 67, 100-118.
- Omranian, E., Sharif, H., & Tavakoly, A. (2018). How well can global precipitation measurement (GPM) capture hurricanes? case study: Hurricane Harvey. *Remote Sensing*, 10(7), 1150.
- Risser, M. D., & Wehner, M. F. (2017). Attributable human-induced changes in the likelihood and magnitude of the observed extreme precipitation during hurricane Harvey. *Geophysical Research Letters*, 44(24), 12-457.
- Sitkowski, M., Kossin, J. P., Rozoff, C. M., & Knaff, J. A. (2012). Hurricane eyewall replacement cycle thermodynamics and the relict inner eyewall circulation. *Monthly Weather Review*, 140, 4035– 4045. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00349.1>castro

- Sobel, A. H., Camargo, S. J., Hall, T. M., Lee, C.-Y., Tippett, M. K., & Wing, A. A. (2016). Human influence on tropical cyclone intensity. *Science*, 353, 242–246. <https://doi.org/10.1126/science.aaf6574>
- Steele, K. E., Lau, J. C. K., y Hsu, Y. H. L. (1985). Theory and application of calibration techniques for an NDBC directional wave measurements buoy. *IEEE J. Oceanic Eng.*, OE10(4): 382–396.
- Trenberth, K. E., & Fasullo, J. (2008). Energy budgets of Atlantic hurricanes and changes from 1970. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, Q09V08. <https://doi.org/10.1029/2007GC001847>
- Tovar, M.F., Yamá, L.F. Análisis de prefactibilidad para la generación de energía eléctrica mediante energía undimotriz en Tumaco (Nariño). Universidad de La Salle, Bogotá D.C, Colombia. (2009).
- Van Oldenborgh, G. J., Van Der Wiel, K., Sebastian, A., Singh, R., Arrighi, J., Otto, F., ... & Cullen, H. (2017). Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017. *Environmental Research Letters*, 12(12), 124009.
- Wang, D. y Hwang, P. (2001). Evolution of the bimodal directional distribution of ocean waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 31(5): 1200–1221.
- Wright, C. W., Walsh, E. J., Vandemark, D., Krabill, W. B., Garcia, A. W., Houston, S. H., ... & Marks, F. D. (2001). Hurricane directional wave spectrum spatial variation in the open ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 31(8), 2472-2488.
- Young, I. R. (2006). Directional spectra of hurricane wind waves. *J. Geophys. Res.*, 111(C8): 1–14.

