

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**Simulación del oleaje generado por el huracán WILMA
en el Mar Caribe con el modelo numérico SWAN.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

DENNISE ALEJANDRA CASTRO OSUNA

Ensenada, Baja California, México, Septiembre de 2009.

TESIS DEFENDIDA POR
DENNISE ALEJANDRA CASTRO OSUNA
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Pedro Osuna Cañedo
Codirector del Comité

Dr. Francisco J. Ocampo Torres
Codirector del Comité

Dr. Julio Candela Pérez
Miembro del Comité

Dra. Paula Pérez Brunius
Miembro del Comité

Dr. Enrique Gómez Treviño
Miembro del Comité

Dr. Manuel Figueroa Rodríguez
*Coordinador del programa de
posgrado en Oceanografía Física*

Dr. David H. Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

Septiembre de 2009

RESUMEN de la tesis de **DENISE ALEJANDRA CASTRO OSUNA**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Oceanografía Física. Ensenada, Baja California. Septiembre de 2009.

Simulación del oleaje generado por el huracán WILMA en el Mar Caribe con el modelo numérico SWAN.

Resumen aprobado por:

Dr. Pedro Osuna Cañedo
Codirector del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Codirector del Comité

Se realizaron cinco experimentos numéricos con el modelo SWAN para simular el oleaje generado por el huracán Wilma en el Mar Caribe durante el periodo del 16 al 25 de octubre de 2005. Los parámetros integrales del oleaje simulados fueron: altura significativa H_s , periodo T_p y dirección $PkDir$ asociados al pico espectral, además de espectros en función de la frecuencia, espectros direccionales y los términos fuente involucrados en el balance de acción. Las primeras dos simulaciones numéricas fueron forzadas con los vientos del reanálisis NARR: la primera con la versión original del modelo y la segunda con un coeficiente de arrastre (C_d) limitado; y las otras dos con los vientos de HRD, una con la versión original y otra con el C_d limitado; las cuatro simulaciones fueron en modo estacionario. Por último, se realizó una simulación en modo no estacionario con el C_d limitado y los vientos del NARR. Los resultados se compararon con mediciones *in situ* en dos puntos del área de estudio. Con los vientos del NARR y en modo estacionario se subestimaron las H_s con respecto a las medidas mientras que con el modo no estacionario las H_s fueron mejor simuladas mostrando un coeficiente de correlación alto; con los vientos de HRD las H_s simuladas presentaron los coeficientes de correlación más altos, en los dos puntos de comparación. El T_p mejor simulado durante la tormenta fue a partir de los experimentos con vientos de HRD. La $PkDir$ en las cinco simulaciones estuvo acertada durante la tormenta. Los espectros simulados durante la tormenta fueron unimodales y estrechos tanto en frecuencia como en dirección. Los términos fuente que tuvieron efecto fueron: el suministro de energía por el viento, el rompimiento en aguas profundas, como fuente y sumidero de energía, respectivamente, y las interacciones no lineales como distribuidoras de la energía en las distintas frecuencias. Los espectros direccionales alrededor del ojo del huracán mostraron ser unimodales. Del lado derecho con respecto a la trayectoria del huracán se presentaron las H_s mayores y del lado izquierdo las menores. El modelo SWAN mostró la capacidad de reproducir la estructura espacial del campo de alturas y direcciones del oleaje observadas en huracanes así como los parámetros integrales, aunque se recomienda seguir con el estudio de la simulación numérica del espectro direccional del oleaje generado por huracanes.

Palabras Clave: Oleaje simulado, modelo SWAN, Huracán Wilma, espectros direccionales simulados, términos fuente.

ABSTRACT of the thesis presented by **DENNISE ALEJANDRA CASTRO OSUNA** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Physical Oceanography, Ensenada, Baja California, México, August, 2009.

Simulated Waves by SWAN model under Hurricane Wilma wind fields in the Caribbean Sea.

Five numerical experiments were made with the SWAN model to simulate waves generated by Hurricane Wilma wind fields in the Caribbean Sea for the period from October 16th to 25th in 2005. The results obtained were: wave parameters (significant wave height H_s , peak period T_p and peak direction $PkDir$), frequency and directional spectra and the source terms involved in the action balance. Two simulations were forced by winds from NARR: the first one in the original version of the model and the second with a limitation in the drag coefficient (C_d); another two simulations were made with HRD winds, one in original version and the other with C_d limited. The fifth simulation was carried out in non stationary mode and a C_d limited with NARR winds. The results were compared with *in situ* data in two points of the study area. The H_s with NARR winds and stationary mode was underestimated while in non stationary mode were well predicted showing a high correlation coefficient; with HRD winds the simulated H_s showing the highest correlation coefficient, in both points. The best simulated T_p during the hurricane was made by the experiments with HRD winds. The $PkDir$ in the five simulations were accurately predicted during the storm period. Simulated spectra during the hurricane were uni-modal and narrow both in frequency and direction. The source terms that had an effect were the wind input and whitecapping as source and sink of energy, respectively; and the non-linear interactions as distributors of energy among frequencies. The directional spectra around the hurricane eye were uni-modal. In the right side of the hurricane, the highest H_s were found. The SWAN model showed the capacity to simulate the wave field structure and the integral parameters of wind waves observed in hurricanes, but it is recommendable to continuing studying the numerical simulation of the directional spectrum generated by hurricanes.

Key words: Simulated wind waves, SWAN model, Hurricane Wilma, simulated directional spectra, source terms.

A mi familia...!!!

Agradecimientos.

A los Drs. Francisco Ocampo y Pedro Osuna por su gran dirección en el presente trabajo de tesis, sus consejos, paciencia y apoyo para la realización de este estudio.

A los miembros del comité de tesis, Dra. Paula Pérez, Dr. Julio Candela y Dr. Enrique Gómez, gracias por sus consejos y todas las aportaciones durante el desarrollo de la tesis.

Al proyecto Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management realizado en conjunto por el Departamento de Oceanografía Física y la UNAM por el acceso a los datos de oleaje.

A todo el personal de CICESE, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Departamento de Oceanografía Física por permitirme continuar con mis estudios y por el apoyo económico suministrado.

A NOAA, HRD, NARR por los datos usados en este estudio, además de permitir que sean del dominio público.

A mis compañeros de CICESE por los momentos compartidos en todo este tiempo, y sobre todo en los eventos deportivos...!!!

Muy en especial a mi familia por su apoyo durante toda mi vida estudiantil y profesional.

A mis compañeros del gimnasio por su amistad y momentos agradables que hemos pasado durante nuestra vida laboral... y a todos mis alumnos!!!

CONTENIDO

	Página
Capítulo I. Introducción	1
I.1 Antecedentes	2
I.2 Simulación del oleaje con vientos de huracán.	3
I.3 Huracán Wilma	7
I.4 Objetivos	9
Capítulo II. Modelo Numérico SWAN	10
II.1 Introducción	10
II.2 Funcionamiento del modelo	10
II.3 Ecuación de balance de acción	11
II.4 Suministro de energía por el viento	12
II.5 Interacciones no lineales entre olas	14
II.5.1 Método DIA	15
II.6 Rompimiento en aguas profundas	16
II.7 Rompimiento inducido por la profundidad	16
II.8 Disipación de energía por fricción con el fondo	17
II.9 Esquema de propagación	17
Capítulo III. Área de Estudio y Metodología	19
III.1 Área de estudio	19
III.2 Metodología y campos de viento	21
III.2.1 Vientos NARR	22
III.2.2 Vientos HRD	24
III.3 Modificación al modelo SWAN	26
III.3.1 Versión Original (VO)	26
III.3.2 Versión Modificada (VM)	26
III.4 Simulaciones Numéricas	28

CONTENIDO (continuación)

Capítulo IV. Resultados	29
IV.1 Simulación del campo de oleaje	29
IV.2 Series de tiempo de algunos parámetros integrales	34
IV.3 Espectros en función de la frecuencia y direccionales	51
IV.4 Análisis de los términos fuentes en el balance de acción	58
Capítulo VI. Conclusión	68
Referencias	71

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1	Serie de tiempo de la presión atmosférica del Huracán Wilma. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.	8
2	Serie de tiempo de la velocidad del viento máxima en el Huracán Wilma. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.	8
3	Localización geográfica del Mar Caribe.	19
4	Batimetría del Mar Caribe. Trayectoria del huracán Wilma. Localización de la boya 42056 del NDBC. Localización del punto PM.	20
5	Dominio espacial del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR).	23
6	Representación gráfica de los campos de viento de NARR utilizados en las simulaciones con el modelo SWAN.	24
7	Representación gráfica de los campos de viento de HRD utilizados en las simulaciones con el modelo SWAN.	25
8	Coefficiente de arrastre (C_d) en función de la velocidad del viento (U_{10}).	27
9	Campos de altura significativa, H_s , correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 12:00 hrs.	31
10	Campos de altura significativa, H_s , correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hr.	32
11	Acercamiento del campo de viento correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 12:00 hr de la Figura 6.	33

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
12	Serie de tiempo de U_{10} y H_s , en el punto 42056.	35
13	Regresión lineal y coeficiente de correlación entre H_s medidos y simulados en el punto 42056. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.	36
14	Regresión lineal y coeficiente de correlación entre H_s medidos y simulados en el punto 42056. Periodo del 19 al 24 de octubre de 2005.	38
15	Serie de tiempo de T_p en el punto 42056.	39
16	Regresión lineal y coeficiente de correlación entre T_p medidos y simulados en el punto 42056. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.	40
17	Regresión lineal y coeficiente de correlación entre T_p medidos y simulados en el punto 42056. Periodo del 19 al 24 de octubre de 2005.	41
18	Serie de tiempo de $PkDir$ en el punto 42056.	42
19	Serie de tiempo de H_s en el punto PM.	44
20	Regresión lineal entre y coeficiente de correlación entre H_s medidos y simulados en el punto PM. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.	45
21	Regresión lineal entre y coeficiente de correlación entre H_s medidos y simulados en el punto PM. Periodo del 19 al 23 de octubre de 2005.	46
22	Serie de tiempo del T_p en el punto PM.	47
23	Regresión lineal y coeficiente de correlación entre T_p medidos y simulados en el punto PM. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.	48
24	Regresión lineal y coeficiente de correlación entre T_p medidos y simulados en el punto PM. Periodo del 19 al 23 de octubre de 2005.	49

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
25	Serie de tiempo de $PkDir$ en el punto PM.	50
26	Espectros en función de la frecuencia medido por la boya 42056 y simulados. Día 17 de octubre de 2005 a las 03:00 hr.	52
27	Espectro direccional medido por la boya 42056 y simulados. Día 17 de octubre de 2005 a las 03:00 hr.	54
28	Espectros en función de la frecuencia medido por la boya 42056 y simulados. 21 de octubre de 2005 a las 06:00 hr.	55
29	Espectro direccional medido por la boya 42056 (superior derecho) y simulados. Día 17 de octubre de 2005 a las 03:00 hr. Día 21 de octubre de 2005 a las 06:00 hr.	57
30	Campo de H_s correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hr.	59
31	Acercamiento del campo de H_s correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hr.	60
32	Espectro de densidad de energía, S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en función de la frecuencia. Espectro Direccional y S_{tot} direccional. Punto 2.	61
33	Espectro de densidad de energía, S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en función de la frecuencia. Espectro Direccional y S_{tot} direccional. Punto 5.	63
34	Espectro de densidad de energía, S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en función de la frecuencia. Espectro Direccional y S_{tot} direccional. Punto 13.	64

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
35	Espectro de densidad de energía, S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en función de la frecuencia. Espectro Direccional y S_{tot} direccional. Punto 21.	65
36	Espectro de densidad de energía, S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en función de la frecuencia. Espectro Direccional y S_{tot} direccional. Punto 29.	67

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>		<i>Página</i>
I	Ubicación de la Boya 42056 y el perfilador acústico, punto PM, en el Mar Caribe.	21
II	Cobertura espacial del reanálisis NARR.	22
III	Simulaciones numéricas realizadas con el modelo SWAN.	28

Capítulo I

Introducción

El oleaje, son las ondas generadas por la acción del viento al soplar sobre la superficie del mar, una vez generadas, su permanencia y propagación se deben a la gravedad que actúa como fuerza restauradora. Los principales parámetros que describen la naturaleza de una ola son su longitud de onda, altura, periodo y dirección de propagación (Kinsman, 1984).

En la actualidad, ha aumentado el interés sobre el estudio, la simulación y la predicción del oleaje durante eventos extremos, como huracanes, por los daños que causan éstos sobre la infraestructura, las actividades humanas, la navegación y la modificación de la línea de costa. Las características del oleaje así como sus parámetros integrales son modificados drásticamente por la variación repentina de los huracanes y las altas velocidades del viento dentro de ellos.

El Mar Caribe ha sido una de las zonas por donde han pasado varios huracanes de gran intensidad durante los últimos años, y las costas mexicanas en esta región han sufrido grandes daños. El interés de este trabajo es la simulación del oleaje generado por los vientos del huracán Wilma en el 2005 en esta zona, para conocer su comportamiento espectral y sus características integrales bajo condiciones de vientos extremos utilizando el modelo numérico SWAN (Simulating WAVes Nearshore, Ris, *et al.* 1999).

I.1 Antecedentes

En la actualidad la predicción del oleaje se realiza mediante el uso de modelos numéricos que simulan la generación, el desarrollo y la propagación del oleaje sobre la superficie del mar. Estos modelos han sido clasificados como modelos de primera, segunda y tercera generación.

Los modelos de primera generación, 1G, se desarrollaron en los sesentas y hacían una descripción sobre el crecimiento del oleaje de manera lineal. Además los procesos físicos: generación o suministro de energía por el viento, interacciones no lineales entre las olas y procesos de disipación de energía, no eran descritos (Komen, *et al.* 1994).

A mediados de los setentas se introdujeron los modelos de segunda generación, 2G, los cuales hacían una representación del balance de energía en forma espectral así como una descripción simple y parametrizada de las interacciones no lineales (Hasselmann, 1991).

Más adelante se desarrollaron los modelos de tercera generación, 3G, donde los procesos físicos de la evolución del oleaje y las interacciones no lineales, están representados de manera explícita. Estos modelos nos brindan una descripción aún más completa del oleaje, por medio del espectro bidimensional (Komen, *et al.* 1994). El espectro bidimensional del oleaje, mejor conocido como “Espectro Direccional”, representa la distribución de la densidad de energía con respecto a la dirección y la frecuencia.

Los modelos numéricos 3G para la predicción del oleaje han sido validados en varias regiones costeras alrededor del mundo por medio de simulaciones del oleaje comparadas con mediciones *in situ*, a partir de condiciones normales de viento. El uso de estos modelos, para predecir o simular campos de oleaje y parámetros integrales (como la altura significativa, periodo y dirección de propagación), ha creado el interés y llevado a la investigación sobre su capacidad de reproducir de manera satisfactoria el campo de oleaje influenciado por eventos extremos (Jensen, 2006).

I.2 Simulación del oleaje con vientos de huracán.

Uno de los primeros trabajos que se realizaron sobre la predicción del oleaje generado por tormentas fue el de Cardone *et al.* 1996, utilizaron cuatro modelos numéricos de oleaje en distinta generación, el modelo Oceanweather's en 1G y 2G (OWI1G y OWI2G), el modelo desarrollado por Resio y Perrie en 1989 (Resio2G) y el modelo Wave Model en 3G (WAM3G), para simular el oleaje producido por las tormentas "Halloween Storm" en 1991 y "Storm of the Century" en 1993. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con datos medidos por boyas ancladas en aguas profundas cerca de las costas de Nueva Escocia, Canadá, y mostraron de manera general una subestimación de las alturas del oleaje. La diferencia de las alturas de olas calculadas con respecto a las medidas varió en cada modelo; para OWI1G se observó una diferencia de 3.2m, para OWI2G de 2.2m, para Resio2G de 1.9m y para WAM3G de 1.5m. El estudio muestra el avance en el mejoramiento de los modelos de 1G a 2G y la introducción de los de 3G. En este estudio los modelos de 2G y 3G mostraron una ligera ventaja sobre los de 1G en lo que se refiere a la altura del oleaje. Mencionan que para estudios donde no se tenga acceso a una súper-computadora y los errores en los campos de viento son pequeños, aun se pueden utilizar los modelos de 1G y 2G para simular solamente parámetros integrales del oleaje como: altura significativa, periodo y dirección promedio. Concluyen que esta subestimación en las alturas posiblemente se deba a los errores en los campos de vientos.

El estudio o investigación sobre el oleaje generado por los huracanes ha crecido aún más, se trata ya no solamente en conocer las magnitudes de la altura significativa, periodo promedio y dirección media de propagación, sino también simular la forma espectral del oleaje.

Wright *et al.* 2001, estudiaron la variación espacial del espectro direccional del oleaje medido por un altímetro montado en un avión caza-huracanes, durante el huracán Bonnie (1998) en su trayectoria por mar abierto. Mencionan que las alturas significantes fueron aproximadamente de 11 m, y reportan olas de hasta 19 m de altura. En cuanto a la

distribución espacial de las alturas, comentan que las olas más altas y largas se observaron en el cuadrante superior derecho del huracán como resultado del avance de la tormenta y la velocidad de grupo de las olas propagándose en la misma dirección. En cambio, las olas más pequeñas se ubicaron en el cuadrante inferior izquierdo, con valores cercanos a los 5 m. Sobre el espectro direccional mencionan que las observaciones realizadas por el altímetro reportaron espectros no sólo de un pico o dos, sino que también reportó un sistema trimodal del lado derecho del huracán. Walsh *et al.* 2002, analizaron la variación espacial del espectro direccional generado por el huracán Bonnie en aguas someras y contrastaron estos resultados con los del estudio de Wright *et al.* 2001. Encontraron una disminución drástica de las alturas significantes debido a la presencia de la plataforma continental y también observaron espectros direccionales del oleaje con uno, dos y tres picos espectrales.

A partir de estos dos estudios, Moon *et al.* 2003 realizaron las simulaciones numéricas de parámetros integrales del oleaje así como del espectro direccional con el modelo de tercera generación WAVEWATCH III (Tolman, 1999) implementado en aguas profundas, con alta resolución espacial, utilizando los campos de viento correspondientes al huracán Bonnie. Para validar el modelo en aguas profundas y someras, los resultados fueron comparados con datos de boyas y con los resultados del altímetro de los dos estudios anteriormente mencionados (Wright *et al.* 2001 y Walsh *et al.* 2002). En cuanto a la longitud de onda y la dirección de propagación del oleaje, éstas fueron simuladas satisfactoriamente en los cuatro cuadrantes del huracán.

En lo que se refiere al espectro direccional en aguas profundas, el modelo realizó excelentes simulaciones del espectro al compararlos con los espectros del altímetro. Aunque en algunos casos el modelo produce espectros más suavizados y con una dispersión direccional más angosta. En aguas someras el modelo no reproduce correctamente el espectro direccional, no hay concordancia con la longitud de onda del pico espectral ni en la forma espectral, los autores mencionan que se debe a las limitaciones del modelo para simular el oleaje en aguas someras. Otro punto en particular, es que el

modelo reportó espectros direccionales con un sólo pico espectral tanto en aguas profundas como cercanas a la costa.

En el 2006, Jensen y colaboradores realizaron una investigación sobre el funcionamiento de los modelos OWI3G, WAM4.5 y WAM4.5 con un coeficiente de arrastre limitado (WAM 4.5CAP) para simular las alturas significantes y periodos, comparar los resultados de los modelos con mediciones tomadas por boyas ancladas durante distintos huracanes (Camilla, Lili, Iván, Dennis, Katrina y Rita). Los valores simulados por los tres modelos para el huracán Lili, mostraron buena concordancia en la altura, el periodo y la dirección del pico espectral con las mediciones hechas por las boyas. El modelo WAM4.5 sobrestima la altura significativa en un 30% mientras que los modelos WAM4.5CAP y OWI3G un 10% con respecto a las observaciones. Además, mencionan que la adopción del coeficiente de arrastre limitado en el modelo WAM4.5CAP mejora el funcionamiento del modelo en situaciones de vientos extremos y puede ser usado mientras se realiza un desarrollo más completo del término fuente sobre la generación y/o suministro de energía por el viento durante condiciones extremas.

Otro estudio relacionado con la modelación numérica del oleaje durante eventos extremos es el realizado por Xu *et al.* 2007. Utilizan dos modelos numéricos, el WAVEWATCH III y el SWAN, para simular el oleaje generado por el huracán Juan (2003). Compararon los resultados con mediciones *in situ* de boyas y un ADCP. La altura significativa modelada, muestra una muy buena aproximación a las medidas, tanto en aguas profundas como someras, mientras que los periodos del pico espectral modelados se encuentran subestimados por ambos modelos. En lo que se refiere al espectro en función de la frecuencia, los espectros simulados por el modelo WAVEWATCH III concuerdan de manera positiva con los medidos por las boyas. Los espectros direccionales modelados por SWAN muestran una dispersión mucho más amplia de la energía tanto en dirección como en frecuencia comparada con los medidos, estos últimos son más angostos. Los autores de este estudio mencionan que el coeficiente de arrastre, C_d , es función del estado del mar, la estabilidad atmosférica y la velocidad del viento, U_{10} . Además, que las mediciones de

campo recientes, datos de laboratorio y teóricos muestran que el C_d aumenta con el incremento de las velocidades del viento cercanas o hasta 30 m/s, y que este coeficiente deja de crecer o aumentar para vientos más fuertes, como los que se presentan en huracanes (Powell *et al.* 2003; Donelan *et al.* 2004; Moon *et al.* 2004). Mencionan que estos vientos fuertes hacen que las olas experimenten un rompimiento intenso, causando de manera cuantitativa un comportamiento diferente de las propiedades friccionales de la superficie del mar, comparado con condiciones de vientos moderados. En condiciones de huracán, el aire está lleno de brisa, el mar también está cubierto de brisa y la rugosidad de la superficie se ve afectada por el rompimiento del oleaje.

I.3 Huracán Wilma.

El huracán Wilma comenzó su aparición el 15 de octubre de 2005, mediante una combinación de zonas de baja presión atmosférica en el Océano Atlántico y zonas de tormentas eléctricas en el Mar Caribe. El 17 de octubre a las 0900 UTC al sur de Jamaica, se fue desarrollando lentamente un área con clima perturbado hasta que una depresión tropical fue creada, todo esto en un lapso de 24 horas y posteriormente convirtiéndose en una fuerte tormenta tropical.

El 18 de octubre, Wilma comenzó una rápida intensificación con una caída en la presión atmosférica de 78 mb, desde 970 mb hasta 892 mb (Figura 1), en un periodo de 10 horas. Wilma se reforzó desde los 30.83 m/s (Figura 2), siendo una tormenta tropical, hasta los 77.22 m/s convirtiéndose en un huracán categoría 5. Atravesó por la Península de Yucatán con categoría 4, y pasó por el Golfo de México llegando a Florida el 24 de octubre con categoría 3. Siguió su camino hacia el Atlántico Norte disminuyendo su intensidad hasta llegar a ser tormenta extratropical al sureste de las costas de Nueva Escocia, Canadá, donde sucumbió debido a condiciones atmosféricas no favorables y puso fin a su trayectoria el 26 de octubre (Pash *et al.* 2006).

Wilma ha sido el huracán más intenso en el noroeste del Mar Caribe registrado hasta la fecha. Este huracán presentó el centro de presión más bajo (882 mb) entre los huracanes formados en el Océano Atlántico, de aquí el interés en el estudio de este huracán.

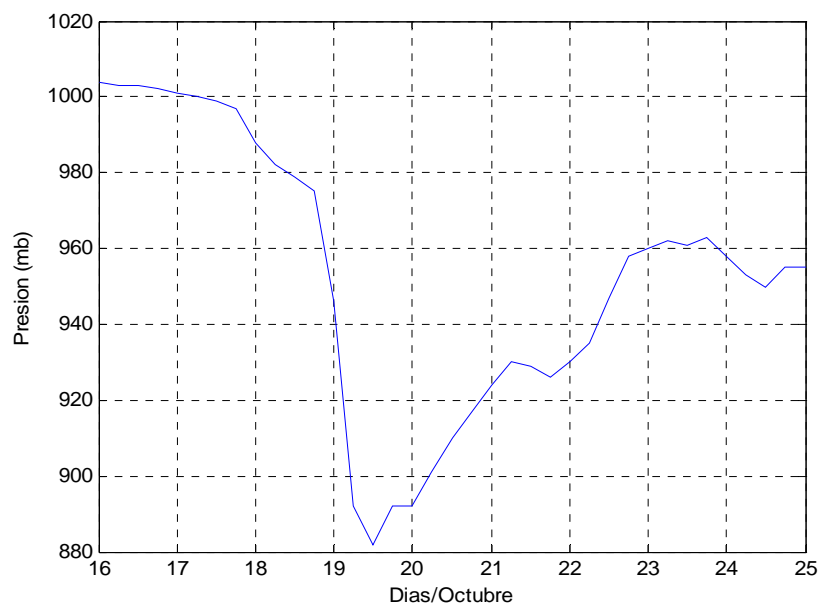


Figura 1. Serie de tiempo de la presión atmosférica del Huracán Wilma, durante el periodo del 16 al 25 de octubre de 2005, durante su paso por el Mar Caribe. Presión en mb. Datos proporcionados por el NHC (Centro Nacional de Huracanes, EUA).

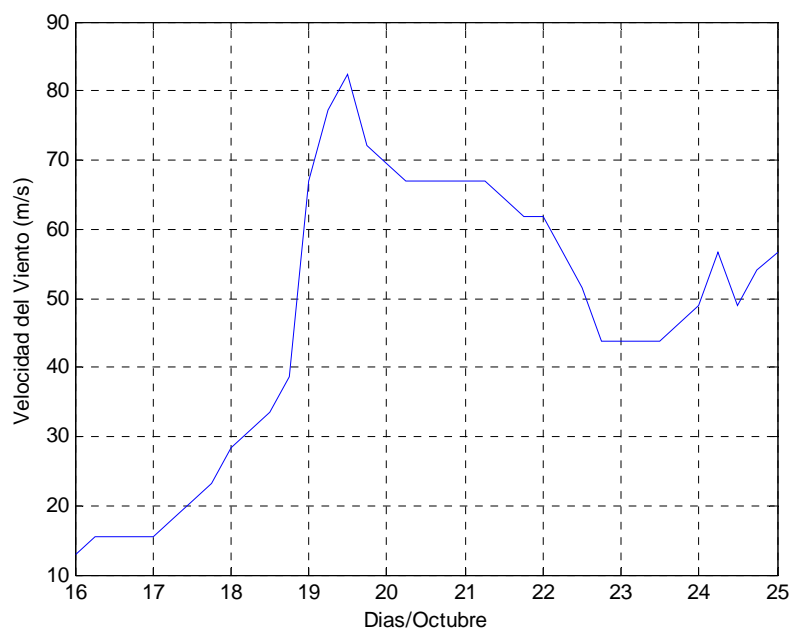


Figura 2. Serie de tiempo de la velocidad del viento máxima en el Huracán Wilma, durante el periodo del 16 al 25 de octubre de 2005, durante su paso por el Mar Caribe. Velocidad del viento en m/s. Datos proporcionados por el NHC (Centro Nacional de Huracanes, EUA).

I.4 Objetivo.

El objetivo general de este trabajo es simular con el modelo SWAN el oleaje generado por el Huracán Wilma a su paso por el Mar Caribe.

Los objetivos particulares son evaluar la capacidad del modelo para simular ante condiciones extremas los parámetros integrales y la forma espectral del oleaje durante el huracán, así como analizar la influencia de los términos fuente en el balance de acción alrededor del huracán.

Capítulo II

Modelo Numérico SWAN

II.1 Introducción.

El modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) fue desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft, para estimar las condiciones del oleaje en zonas costeras, estuarios, canales, planicies maréales, islas de barrera, lagos, y así como a escalas regionales a partir de vientos locales y corrientes ambientales. Es una extensión de los modelos de tercera generación de aguas profundas para aguas someras.

Es un modelo de tercera generación que describe la evolución de la energía del oleaje por medio de la ecuación de balance de acción a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría. Además reúne los procesos físicos sobre la generación del oleaje, interacciones no lineales entre olas y la disipación de energía en aguas profundas e interacción con el fondo, en un código numérico que es eficiente para escalas pequeñas y con aplicaciones de alta resolución. Es un modelo con un esquema de propagación implícito basado en diferencias finitas (Booij *et al.* 1999).

II.2 Funcionamiento del modelo.

En los procesos de propagación del oleaje se incluyen: propagación en el espacio geográfico y espectral, refracción y asomeramiento debido a las variaciones de la profundidad y la presencia de corrientes, obstrucción del oleaje por corrientes opuestas y su transmisión a través de un obstáculo.

Los procesos de generación y disipación que se incluyen son los asociados al suministro de energía por parte del viento, la disipación por el rompimiento en aguas profundas, la disipación por la fricción con el fondo y por el rompimiento inducido por el fondo, así como los relacionados con la redistribución de la energía por las interacciones no lineales entre las componentes del espectro.

El modelo se puede utilizar en modo estacionario o no estacionario. En el modo estacionario se parte del reposo y se elimina la variable tiempo de la ecuación de balance de acción. El cálculo se realiza de forma iterativa para un campo de oleaje que se supone tiene un tiempo de residencia corto en el área de simulación. En el modo no estacionario se utiliza la ecuación de balance de acción con todos sus términos, incluido el temporal.

II.3 Ecuación de balance de acción.

Las olas en el océano están descritas por el espectro bidimensional o direccional de la densidad de energía, $E(\sigma, \theta, \varphi, \lambda, t)$, como función de la frecuencia angular relativa (σ), dirección de propagación (θ), latitud (φ), longitud (λ) y tiempo (t). El modelo SWAN se basa en la ecuación de balance de acción, $N(\sigma, \theta, \varphi, \lambda, t) = E(\sigma, \theta, \varphi, \lambda, t)/\sigma$, para describir la evolución del espectro de oleaje en coordenadas esféricas y en el espacio frecuencia-dirección, representada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_\lambda N}{\partial \lambda} + \cos^{-1} \varphi \frac{\partial c_\varphi \cos \varphi N}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}, \quad (1)$$

en donde el primer término del lado izquierdo representa la razón de cambio local de la densidad de acción (N) en el tiempo, el segundo y el tercero representan la propagación de N en el espacio geográfico (con velocidades de propagación c_φ y c_λ en el espacio latitud y longitud, respectivamente), el cuarto término representa el cambio del transporte de acción

en el espacio de frecuencias (con una velocidad de propagación c_σ en el espacio σ) y el quinto término representa la refracción inducida por corrientes y cambios en la profundidad (con velocidad de propagación c_θ en el espacio θ).

Del lado derecho de la ecuación (1) tenemos el término fuente neto, S_{tot} , donde se incluyen los procesos de generación, interacción entre componentes y disipación del oleaje, presentado como:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} , \quad (2)$$

donde S_{in} incorpora los efectos de la generación y el crecimiento de las olas por el efecto del viento, S_{nl} representa la transferencia de energía debido a interacciones no lineales entre las componentes del espectro, $S_{ds,w}$ y $S_{ds,br}$ responden al rompimiento del oleaje en aguas profundas y al inducido por la profundidad, respectivamente, y el último, $S_{ds,b}$, está relacionado al decaimiento de la energía del oleaje por fricción con el fondo.

II.4 Suministro de energía por el viento.

El término fuente correspondiente para este mecanismo es comúnmente descrito como la suma de un crecimiento lineal y uno exponencial:

$$S_m(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) , \quad (3)$$

en donde A representa el crecimiento lineal (mecanismo de resonancia de Phillips, 1957) y B el crecimiento exponencial (retroalimentación de Miles, 1957), los cuales dependen de la frecuencia y dirección del oleaje así como de la velocidad y dirección del viento.

El crecimiento lineal (A) está representado por:

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2\pi g^3} (U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H, \quad (4)$$

donde θ_w es la dirección del viento, H es un filtro para eliminar el crecimiento del oleaje a frecuencias menores que la frecuencia Pierson-Moskowitz y está descrito por:

$$H = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*}\right)^{-4}\right\}, \quad (5)$$

donde σ_{PM}^* es la frecuencia pico del estado del mar completamente desarrollado de acuerdo a Pierson y Moskowitz (1964) y reformulado en términos de la velocidad friccional:

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi. \quad (6)$$

El crecimiento exponencial (B) está representado por la expresión propuesta por Komen *et al.* (1984):

$$B = \max\left[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1\right)\right] \sigma, \quad (7)$$

donde c_{ph} es la velocidad de fase y ρ_a y ρ_w son la densidad del aire y el agua, respectivamente.

Para la generación del oleaje el usuario alimenta el modelo con la velocidad del viento a 10 metros de altura de la superficie (U_{10}), pero el procedimiento computacional lo lleva a cabo el modelo con la velocidad friccional (U_*). La U_* es calculada por el modelo por medio de:

$$U_*^2 = C_d U_{10}^2, \quad (8)$$

donde C_d , es el coeficiente de arrastre producido por el viento sobre la superficie del mar. En el modelo SWAN, este coeficiente de arrastre se calcula a partir de la expresión lineal obtenida por Wu (1982):

$$C_d(U_{10}) = (0.8 + 0.65U_{10}) \times 10^{-3}. \quad (9)$$

II.5 Interacciones no lineales entre olas.

En aguas profundas las interacciones entre olas (S_{nl4} , cuádrupletas), dominan la evolución del espectro, transfieren energía de frecuencias altas a bajas, ocasionando el movimiento del pico espectral hacia frecuencias más bajas (Young, 1999).

El procesamiento completo de las interacciones entre cuádrupletas, requiere demasiado tiempo computacional y no es conveniente para un modelo operacional. Sin embargo, SWAN cuenta con dos opciones para el cálculo de las interacciones en aguas profundas. El primero es llamado DIA y el segundo XNL.

II.5.1 Método “DIA”

En este trabajo se utilizó el método DIA, Discrete Interaction Approximation ó Aproximación Discreta de las Interacciones, por sus siglas en inglés, y fue propuesto por Hasselmann *et al* (1985).

En este método (DIA), se consideran dos cuádrupletas con dos números de onda cada una, ambas con frecuencias σ_1 y σ_2 , σ_3 y σ_4 :

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma \\ \sigma_3 &= \sigma(1 + \lambda) = \sigma^+ \quad , \\ \sigma_4 &= \sigma(1 - \lambda) = \sigma^-\end{aligned}\tag{10}$$

donde λ , es un coeficiente constante con un valor de 0.25. Para satisfacer las condiciones de resonancia de la primera cuádrupleta, los vectores número de onda con frecuencia σ_3 y σ_4 están a un ángulo de $\theta_1 = -11.5^\circ$ y $\theta_2 = 33.6^\circ$ de los vectores número de onda idénticos con frecuencia σ_1 y σ_2 . La segunda cuádrupleta es el espejo de la primera (los vectores número de onda con frecuencia σ_3 y σ_4 están a un ángulo de $\theta_3 = 11.5^\circ$ y $\theta_4 = -33.6^\circ$). Dentro de esta aproximación el término fuente S_{nl4} está dado por:

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad ,\tag{11}$$

donde S_{nl4}^* se refiere a la primera cuádrupleta y S_{nl4}^{**} a la segunda.

II.6 Rompimiento en aguas profundas.

La transferencia de energía del viento a las olas provoca un aumento en la amplitud de la ola. Este proceso continúa hasta que la ola llega a ser inestable y rompe. Esta forma de rompimiento es generalmente llamada *white-capping*, está controlada por la pendiente de la ola, en contraste con el rompimiento por la profundidad limitada, la cual podría ocurrir en la playa (Young, 1999). Este rompimiento se manifiesta como la espuma blanca que se forma en la cresta de las olas.

La formulación de este término está basada en el modelo de Hasselmann (1974) y adaptada por el grupo que creó el modelo WAM (WAMDI, 1988):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad , \quad (12)$$

donde Γ es un coeficiente dependiente de la pendiente, k es el número de onda, $\tilde{\sigma}$ y \tilde{k} son la frecuencia promedio y el número de onda promedio, respectivamente. $E(\sigma, \theta)$ es el espectro de densidad de energía.

II.7 Rompimiento inducido por la profundidad.

La disipación de energía inducida por la profundidad se lleva a cabo cuando las olas se propagan hacia profundidades menores, ocasionando un aumento en la altura de la ola, cuando este aumento de la altura de la ola en relación con la profundidad, es muy grande, la ola rompe y su energía se disipa rápidamente (Vega, 1999).

En el modelo SWAN se calcula este término fuente con la siguiente expresión:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad , \quad (13)$$

donde E_{tot} es la energía total del oleaje, D_{tot} (negativa) es la razón de disipación de la energía total debido rompimiento del oleaje de acuerdo a Battjes y Janssen (1978) y $E(\sigma, \theta)$ es el espectro de densidad de energía.

II.8 Disipación de energía por fricción con el fondo.

Cuando el oleaje interactúa con el fondo disipa su energía de varias formas: por la fricción con el fondo, por percolación y/o por irregularidades del fondo, esta disipación se representa en el modelo a partir de:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad , \quad (14)$$

donde C_{bottom} es un coeficiente de fricción con el fondo y depende del valor cuadrático medio de la velocidad orbital del fluido en el fondo, g representa la gravedad, d es la profundidad, k es el número de onda y $E(\sigma, \theta)$ es el espectro de densidad de energía.

II.9 Esquema de propagación.

El método numérico que se utiliza para resolver la ecuación de balance de acción en el modelo SWAN es un esquema de diferencias finitas hacia atrás en espacio y tiempo, llamado BSBT, y se aplica en las cinco dimensiones: tiempo, espacio geográfico (latitud y longitud) y espectral (frecuencia y dirección). Este esquema describe primero la

propagación del oleaje sin los términos fuente de generación, disipación e interacciones entre las olas (Booij *et al*, 1999). En el modelo el oleaje se propaga a través del espacio geográfico (rectilíneo con C_x y C_y) y a través del espacio espectral (refracción con C_θ).

El esquema BSBT (Backward Space, Backward Time ó hacia atrás en el espacio y en el tiempo, en español) utilizado para modo estacionario y no estacionario; resuelve la ecuación de balance de acción de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{N^{i_t} - N^{i_t-1}}{\Delta t} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta}^n \\
& + \left[\frac{(c_{g,x} N)_{i_x} - (c_{g,x} N)_{i_x-1}}{\Delta x} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n} + \left[\frac{(c_{g,y} N)_{i_y} - (c_{g,y} N)_{i_y-1}}{\Delta y} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n} \\
& + \left[\frac{(1-\nu)(c_\sigma N)_{i_\sigma+1} + 2\nu(c_\sigma N)_{i_\sigma} - (1+\nu)(c_\sigma N)_{i_\sigma-1}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\theta}^{i_t, n} \\
& + \left[\frac{(1-\eta)(c_\theta N)_{i_\theta+1} + 2\eta(c_\theta N)_{i_\theta} - (1-\eta)(c_\theta N)_{i_\theta-1}}{2\Delta\theta} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma}^{i_t, n} = \left[\frac{S}{\sigma} \right]_{i_x, i_y, i_\sigma, i_\theta}^{i_t, n^*}
\end{aligned} \tag{15}$$

donde i_t es el índice de paso en el tiempo, i_x , i_y , i_σ y i_θ son contadores de la malla y Δt , Δx , $\Delta\sigma$ y $\Delta\theta$ son el incremento en el tiempo, espacio geográfico y espectral, respectivamente. El número de la iteración se indica con el índice n o n^* (el índice de iteración n^* es igual a n o $n-1$, dependiendo del termino fuente). Los coeficientes ν y η determinan el tipo de esquema en el espacio espectral, $\nu=0$ ó $\eta=0$ para esquema central implícito (difusión numérica ≈ 0). $|\nu|=1$ ó $|\eta|=1$ para un esquema con mayor difusión y menos preciso produciendo valores negativos de densidad de acción, los cuales son igualados a cero en cada barrido (Holthuijsen, 2008).

Capítulo III

Metodología

III.1 Área de Estudio.

El Mar Caribe es un mar abierto y tropical, localizado en el Océano Atlántico aproximadamente entre los 90° y 55° de longitud Oeste y los 10° y 23° latitud Norte (Figura 1).

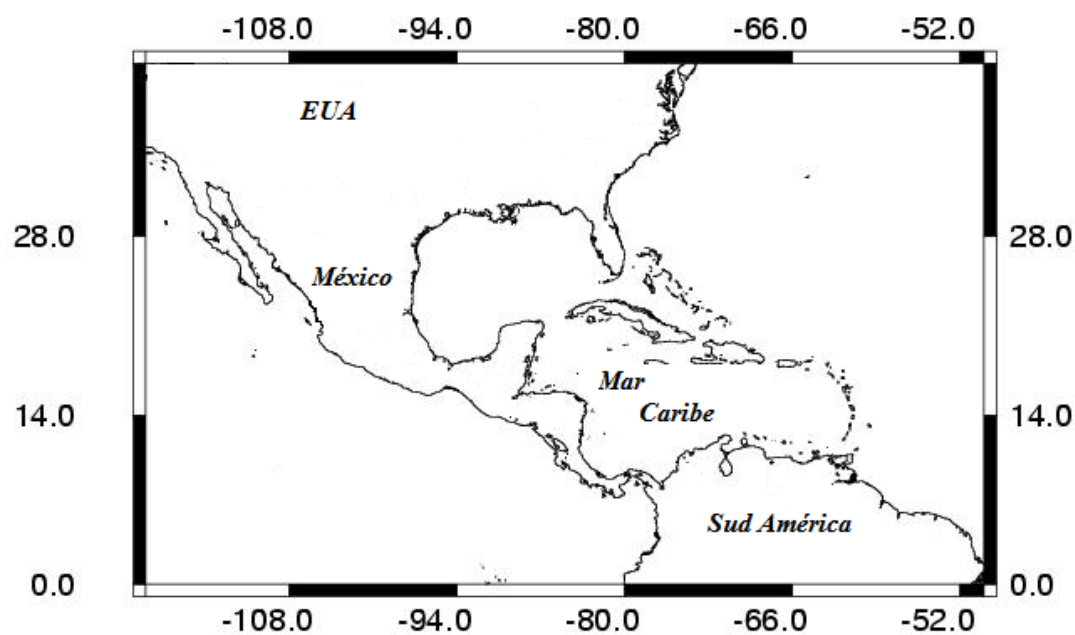


Figura 3. Localización geográfica del Mar Caribe.

Presenta una profundidad promedio de 4400 m y un área aproximada de 2 754 000 km² (Figura 2). Es el lugar de origen de algunos huracanes del hemisferio occidental, donde su temporada es predominantemente durante los meses de junio a diciembre, siendo en agosto y septiembre la de mayor fuerza (Guerrero, 2005).

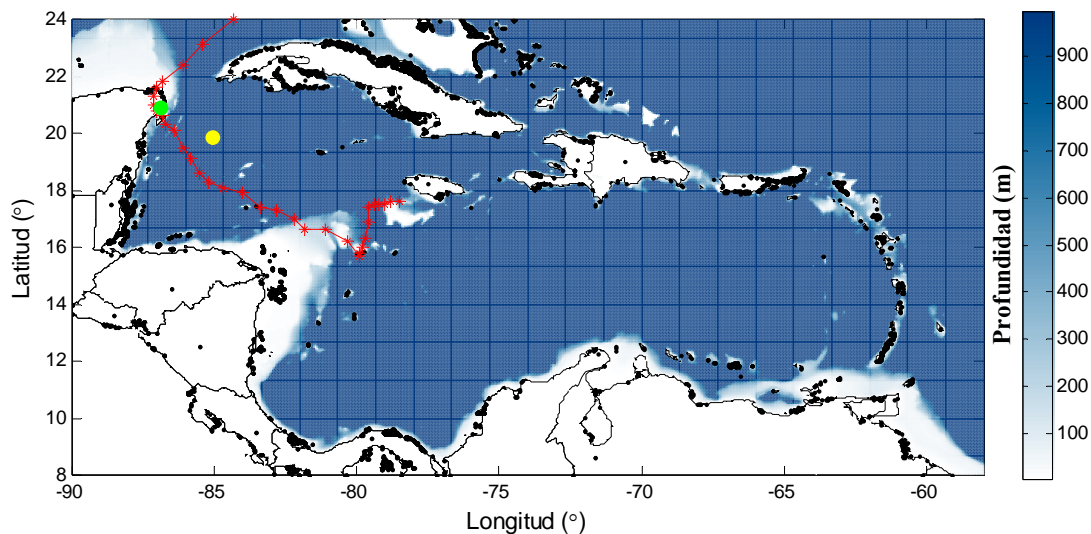


Figura 4. Batimetría del Mar Caribe, escala de profundidad en metros. Trayectoria del huracán Wilma, en rojo. Localización de la boya 42056 del NDBC, en amarillo. Localización de la estación PM, en verde.

La trayectoria del huracán Wilma se muestra en la Figura 4 con una línea roja y asteriscos indicando la posición del ojo del huracán, del 16 al 25 de octubre de 2005. La posición de la boya 42056 del NDBC (punto amarillo) y la de un perfilador acústico de corrientes (punto verde) Nortek Aquadopp anclado a 22 m de profundidad, del proyecto “Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management” desarrollado por el Departamento de Oceanografía Física de CICESE y la UNAM. La Tabla 1 nos indica la posición (latitud y longitud) de la boya y el perfilador acústico, así como la profundidad en cada punto.

Tabla I. Ubicación de la Boya 42056 y el perfilador acústico (punto PM) en el Mar Caribe. Profundidad de cada punto en metros (m).

Punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad(m)
PM	20.86 N	86.85 W	22
Boya 42056	19.87 N	85.06 W	4446

III.2 Metodología

Se empleó el modelo SWAN (versión 40.72), en coordenadas esféricas para simular el oleaje generado por el Huracán Wilma a su paso por el Mar Caribe. Se simularon los campos de oleaje del 16 al 25 de octubre de 2005, en toda el área de estudio en modo estacionario y no estacionario. Además en pequeñas mallas computacionales siguiendo la trayectoria del huracán en modo estacionario solamente.

Estas simulaciones se llevaron a cabo en un cluster llamado CORA compuesto de 4 nodos PowerEdge DELL con procesadores Intel Xeon de 3 Ghz. Cada nodo cuenta con 2 GB de memoria RAM y con dos procesadores. El sistema operativo utilizado es Linux CentOS 4.4.

Se utilizó la batimetría del Mar Caribe (Figura 2) tomada de eTOPO 2 (<http://www.ngdc.noaa.gov>), con una resolución espacial de 2' x 2' en latitud y longitud, respectivamente. A partir de esta malla, el modelo generó una malla computacional del área de estudio con una resolución de 0.05° en latitud y 0.05° longitud, sobre la cual se obtuvieron los resultados. Como forzamiento atmosférico para generar el oleaje se utilizaron los campos de viento de las fuentes de NARR y HRD, posteriormente descritos.

Los procesos físicos que se incluyeron en las simulaciones fueron: generación del oleaje por el viento, interacciones no lineales (cuadrupletas), pérdida de energía por fricción con el fondo, rompimiento en aguas profundas y rompimiento inducido por la profundidad.

Los resultados que se solicitaron en cada simulación fueron series de tiempo de parámetros integrales del oleaje como altura significativa, periodo y dirección asociados al pico espectral; espectros en función de la frecuencia y direccionales tanto en el punto de la boya 42056 como en el punto PM. Así como los términos fuentes en 34 puntos alrededor del ojo del huracán y su espectro direccional.

III.2.1 Vientos NARR

El Reanálisis Regional de América del Norte (NARR, North America Regional Reanalysis), consiste en un reanálisis de observaciones atmosféricas históricas, con un dominio espacial que incluye principalmente a América del Norte y parte de los océanos Pacífico y Atlántico (ver Figura 5). El periodo del reanálisis comprende de octubre de 1978 a la fecha con una resolución temporal de 3 horas y espacial de 32 km.

Tabla II. Cobertura espacial del reanálisis NARR.

Frontera	Latitud/Longitud
Norte	85° N
Sur	8° N
Oeste	150° E
Este	15° W

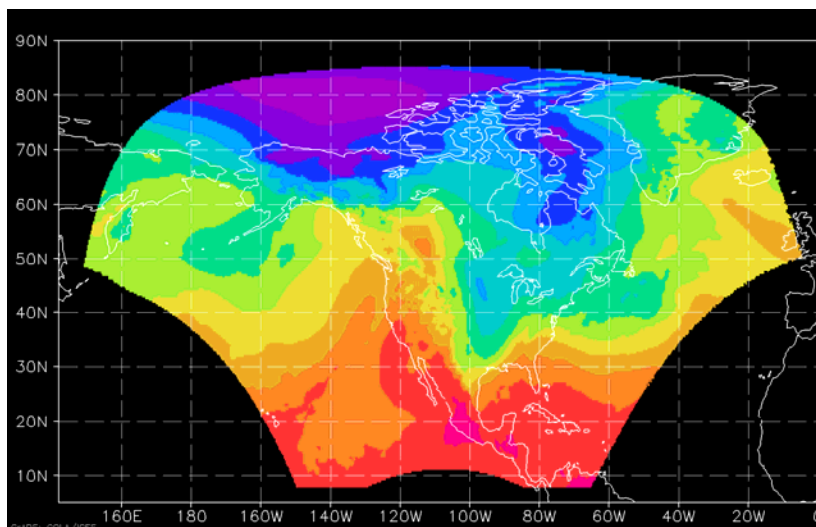


Figura 5. Dominio espacial del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR).

Las ventajas del uso de los vientos del NARR son: que cubre todo el dominio espacial del área de estudio y que el periodo del reanálisis abarca la temporada del huracán Wilma.

Los archivos con los datos de viento de NARR, con resolución temporal de 3 horas (00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 y 21:00), sirvieron como forzamiento atmosférico en el modelo SWAN y para realizar las simulaciones del oleaje del 16 al 25 de octubre de 2005. Estos vientos, con una resolución espacial de 32 km, se interpolaron a una nueva resolución espacial de 0.05° (≈ 5.5 km) para coincidir con la malla computacional y poder compararlos con los resultados simulados utilizando los vientos de HRD.

Un ejemplo del campo de viento se muestra en la Figura 6, correspondiente al 20 de octubre de 2005 a las 12:00 horas. La escala de la velocidad del viento se proporciona en m/s. La línea roja describe la trayectoria mejor estimada del Huracán Wilma por el Centro Nacional de Huracanes (NHC), indica posiciones del ojo del huracán cada 6 horas, 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 (Pash, *et al.* 2006).

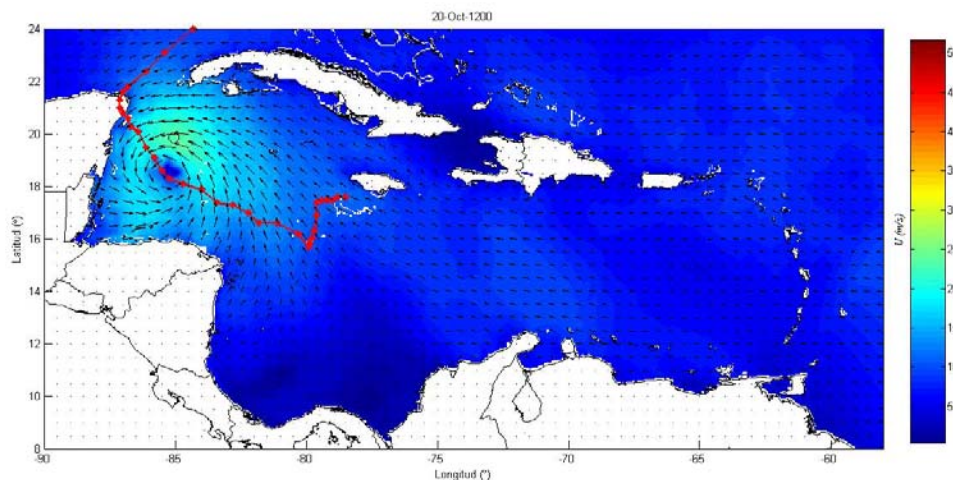


Figura 6. Representación gráfica de los campos de viento de NARR utilizados en las simulaciones con el modelo SWAN. Resolución de 0.05° en latitud y longitud. Escala de colores en m/s. Campo de viento correspondiente al 20 de octubre de 2005 a las 12:00 hr. Dirección del viento indicada con flechas negras. La trayectoria del Huracán Wilma está indicada por la línea roja.

III.2.2 Vientos HRD

El sistema de análisis de vientos de la División de Investigación de Huracanes (HRD, Hurricane Research Division), se lleva a cabo mediante la recopilación de mediciones de plataformas marinas, terrestres, espaciales, aéreas; sirve como guía y ayuda para los meteorólogos en determinar la intensidad de los vientos en el pronóstico y alerta de huracanes además ha sido usado para la predicción del oleaje (Powell *et al.* 1998).

Los análisis son producidos a partir de la composición de toda la información u observaciones disponibles relativas al centro de la tormenta. Estos campos de viento cubren un área aproximada de $8.6^\circ \times 8.6^\circ$ con una resolución de 0.05° (≈ 5.5 km) tanto en longitud como en latitud, siguiendo la trayectoria del huracán.

Estos campos de viento se introdujeron al modelo SWAN en mallas de 160×160 celdas con una resolución espacial de 0.05° en latitud y longitud, el centro de las mallas

corresponde al ojo del huracán y sólo se hicieron simulaciones con los campos de viento disponibles para el Huracán Wilma. En la Figura 7 se muestra un campo de viento, correspondiente al 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hr. La U_{10} en m/s, se muestra en colores indicando su intensidad de menor (azul) a mayor (rojo). La dirección de los vientos es indicada por las flechas negras.

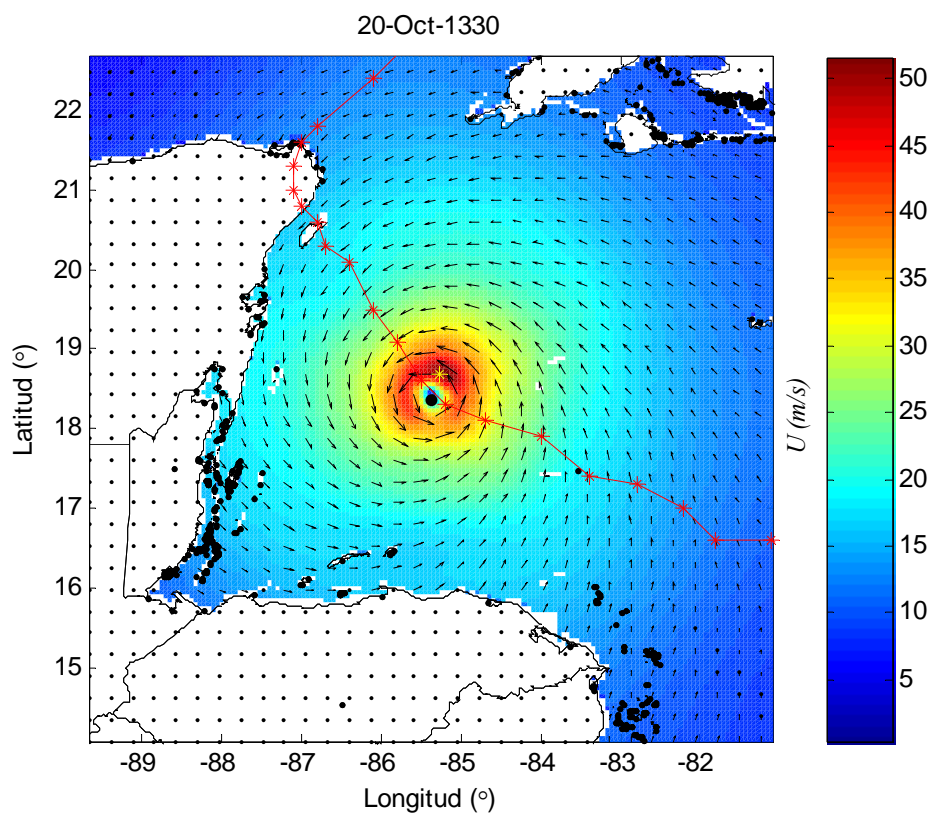


Figura 7. Campos de viento de HRD utilizados en las simulaciones con el modelo SWAN. Cobertura de $8.6^\circ \times 8.6^\circ$ con resolución de 0.05° en latitud y longitud. Escala de colores en m/s. Campo de viento correspondiente al 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hr. Ojo del huracán (*). Dirección de los vientos indicada con flechas negras. Mejor trayectoria del Huracán Wilma y posiciones del ojo del huracán, en rojo. Velocidad máxima del viento (*).

III.3 Modificación al modelo SWAN.

III.3.1 Versión Original (VO).

La versión original (VO), se refiere al uso de las formulaciones predeterminadas en el modelo para cada uno de los procesos físicos. En este estudio se utilizó la ecuación (9) propuesta por Wu (1982) para el cálculo del coeficiente de arrastre y así determinar la velocidad friccional (ecuación 8).

III.3.2 Versión Modificada (VM).

En el presente trabajo, se hace una modificación a la versión original del modelo, incorporando en el código del SWAN la formulación de Moon *et al.* 2007 para el cálculo del C_d . En este caso el coeficiente de arrastre se calcula a partir de:

$$C_d = \kappa^2 \left(\ln \frac{10}{z_0} \right)^{-2}, \quad (16)$$

donde κ es la constante de Von Kàrmàn, mientras que z_0 es la longitud de rugosidad en función de la velocidad del viento (U_{10}) y está representada por:

$$z_0 = \frac{0.0185}{g} (0.001U_{10}^2 + 0.028U_{10})^2 \quad \text{para } U_{10} \leq 12.5 \text{ m/s} \quad (17)$$

y

$$z_0 = (0.085U_{10} - 0.58) \times 10^{-3} \quad \text{para } U_{10} > 12.5 \text{ m/s}. \quad (18)$$

En la Figura 8 se muestra el comportamiento del coeficiente de arrastre en función de la velocidad del viento con ambas formulaciones (VO y VM).

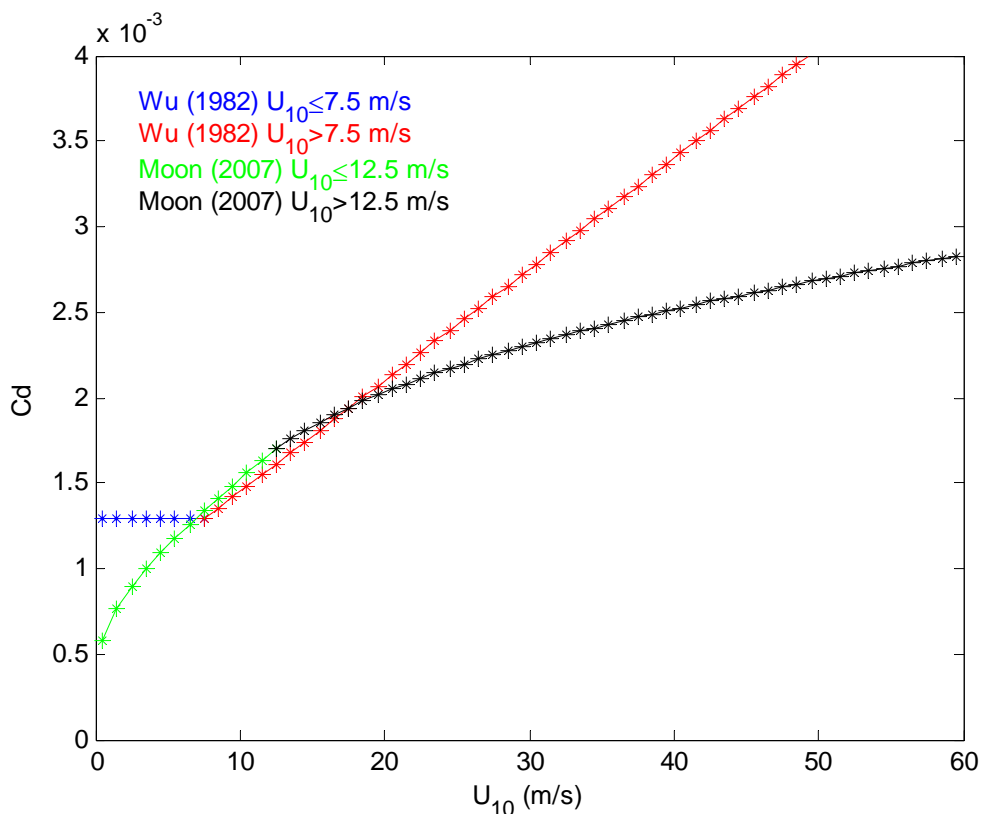


Figura 8. Comportamiento del coeficiente de arrastre (C_d) en función de la velocidad del viento (U_{10}) a partir de las formulaciones de Wu 1982 para $U_{10} \leq 7.5$ m/s en azul y para $U_{10} > 7.5$ m/s en rojo. Moon *et al.* 2007 para $U_{10} \leq 12.5$ m/s en verde y $U_{10} > 12.5$ m/s en negro.

Como se puede observar, con la formulación de Wu (1982) el coeficiente de arrastre crece de manera lineal al incrementar la velocidad del viento, en cambio, con la formulación de Moon *et al.* 2007 se reporta un crecimiento logarítmico del coeficiente de arrastre hasta llegar a un valor límite cercano a los 0.003, aproximadamente.

III.4 Simulaciones numéricas.

Se realizaron cinco simulaciones numéricas con el modelo SWAN, las cuales se describen en la Tabla III. Se corrió el modelo SWAN con vientos de NARR en modo estacionario, versión original y modificada, así como en modo no estacionario en versión modificada. También se corrió con vientos de HRD en modo estacionario versión original y modificada.

Tabla III. Simulaciones numéricas realizadas con el modelo SWAN. Versión original (VO), versión modificada (VM).

Experimento	Vientos	VO	VM	Modo Estacionario	Modo No Estacionario
SWAN-VO	NARR	•		•	
SWAN-VM	NARR		•	•	
SWAN-NOE	NARR		•		•
SWAN-VO	HRD	•		•	
SWAN-VM	HRD		•	•	

Capítulo IV

Resultados

Los resultados que se obtuvieron en este estudio con el modelo numérico SWAN durante el paso del huracán Wilma, del 16 al 25 de octubre de 2005, fueron: campos de altura significativa, series de tiempo de algunos parámetros integrales del oleaje, espectros en función de la frecuencia y espectros direccionales y por último los términos fuentes: S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} , en función de la frecuencia y direccionales.

IV.1 Simulación del campo de oleaje.

En la Figura 9 se presentan los campos de oleaje simulados por el modelo SWAN a partir del campo de viento de la Figura 4 para las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR. En la Figura 10 se muestran los campos de oleaje simulados a partir del campo de viento de la Figura 5 para las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD. La Figura 11 es un acercamiento del campo de viento de NARR (Figura 4), nos permite observar más a detalle los vientos del huracán y poder compararlos con los de HRD (Figura 5).

En cuanto a la distribución e intensidad de las alturas significantes entre los tres experimentos de la Figura 9, los tres muestran las alturas mayores del lado derecho de la dirección de traslación del huracán y las alturas menores del lado izquierdo; en el resto del Mar Caribe, las alturas son menores a los 2 m. Las alturas máximas fueron muy similares entre las simulaciones: SWAN-VO NARR 8.08m, SWAN-VM NARR 7.8m y SWAN-NOE NARR 8.1m. Esta similitud en las alturas de los campos de oleaje y las alturas máximas se debe a que los vientos del NARR no son tan intensos para marcar una

diferencia en el valor del coeficiente de arrastre entre la versión original y la modificada del modelo. La velocidad máxima del campo de viento de la Figura 6 es de 24.06 m/s y comparando el valor del C_d entre ambas formulaciones de la Figura 8 podemos notar que son muy parecidos, para la versión original del modelo (Wu, 1982) es de 0.0024 y para la versión modificada (Moon *et al.* 2007) es de 0.0022.

Con respecto a las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD (Figura 10), se puede observar entre estos dos experimentos que las alturas mayores también se encuentran a la derecha del huracán y las menores a la izquierda (con respecto a su dirección de propagación). La intensidad de las alturas es diferente entre estos dos campos de oleaje, alturas mayores en SWAN-VO HRD con respecto a SWAN-VM HRD. Las alturas máximas para las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD son 14.52 m y 12.34 m, respectivamente. En la vecindad del huracán se observan alturas de ola menor a los 4m en ambos experimentos.

La diferencia en las alturas de los campos de oleaje y las alturas máximas se debe a que los vientos de HRD son más intensos que los de NARR, y sí marcan una diferencia en el valor del C_d entre la versión original y la modificada del modelo. La velocidad máxima del campo de viento de la Figura 7 es de 51.36 m/s y haciendo una comparación en el valor del C_d , entre ambas formulaciones, podemos notar una gran diferencia entre ambos, para la versión original del modelo (Wu, 1982) es de 0.0041 y para la versión modificada (Moon *et al.* 2007) es de 0.0027.

La diferencia entre las velocidades del viento en los campos de NARR con respecto a los de HRD se debe a la alta resolución de HRD que permite captar mejor los gradientes de presión del huracán, dando como resultado una mejor descripción sobre la estructura del huracán. En cambio la baja resolución de NARR no logra reproducir los gradientes de presión en el huracán por lo tanto los campos de viento muestran un huracán menos estructurados y de menor intensidad.

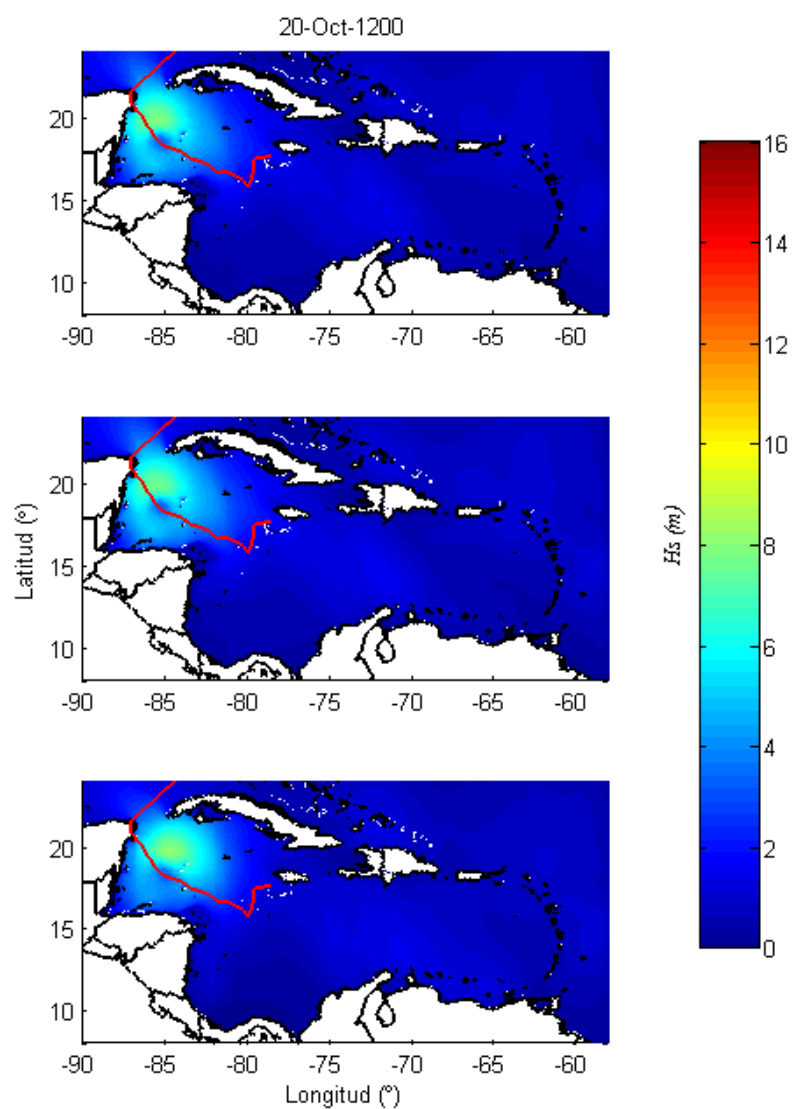


Figura 9. Campos de altura significativa, H_s , correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 12:00 hrs. Escala de colores en metros. Simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR, superior, centro e inferior, respectivamente. Trayectoria del huracán Wilma, línea roja. Posición del ojo del huracán (*).

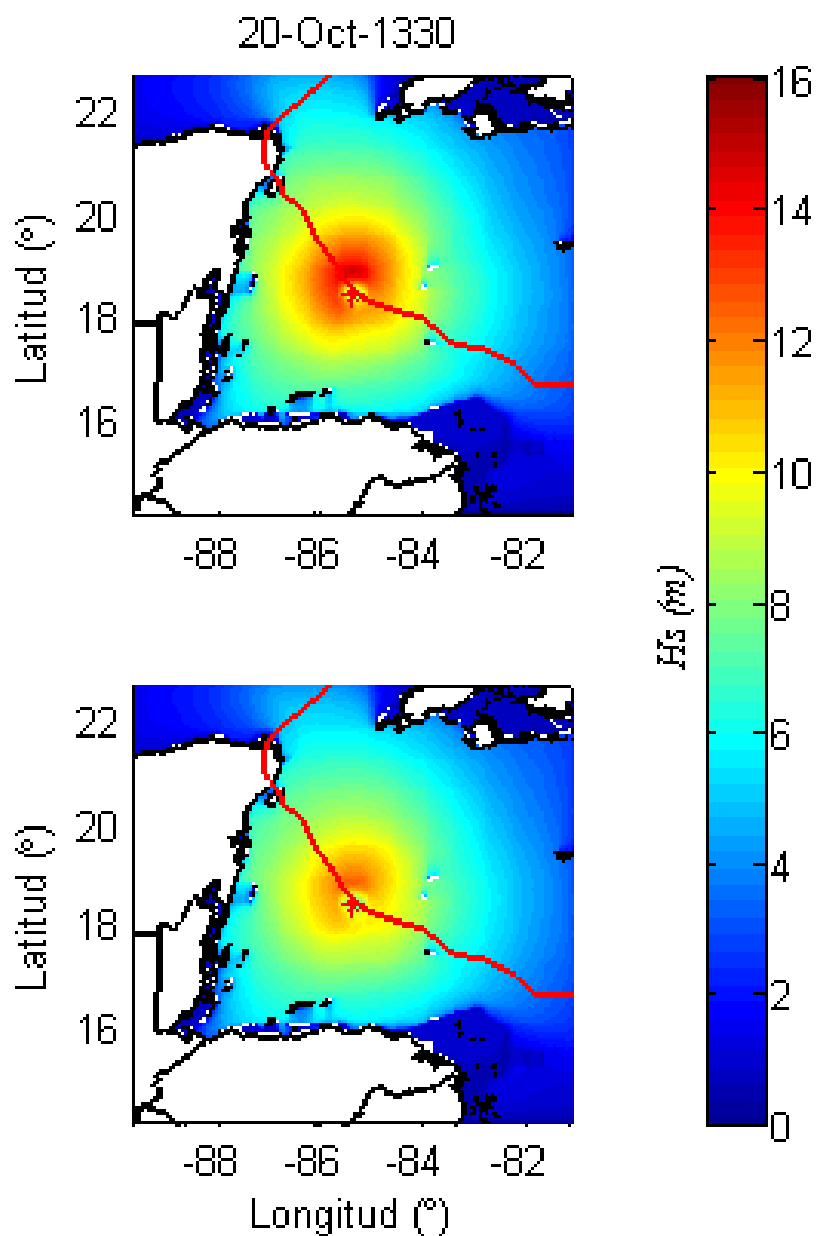


Figura 10. Campos de altura significativa, H_s , correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hrs. Escala de colores en metros. Simulaciones SWAN-VO HRD (superior) y SWAN-VM HRD (inferior). Trayectoria del huracán Wilma, línea roja. (*) Posición del ojo del huracán.

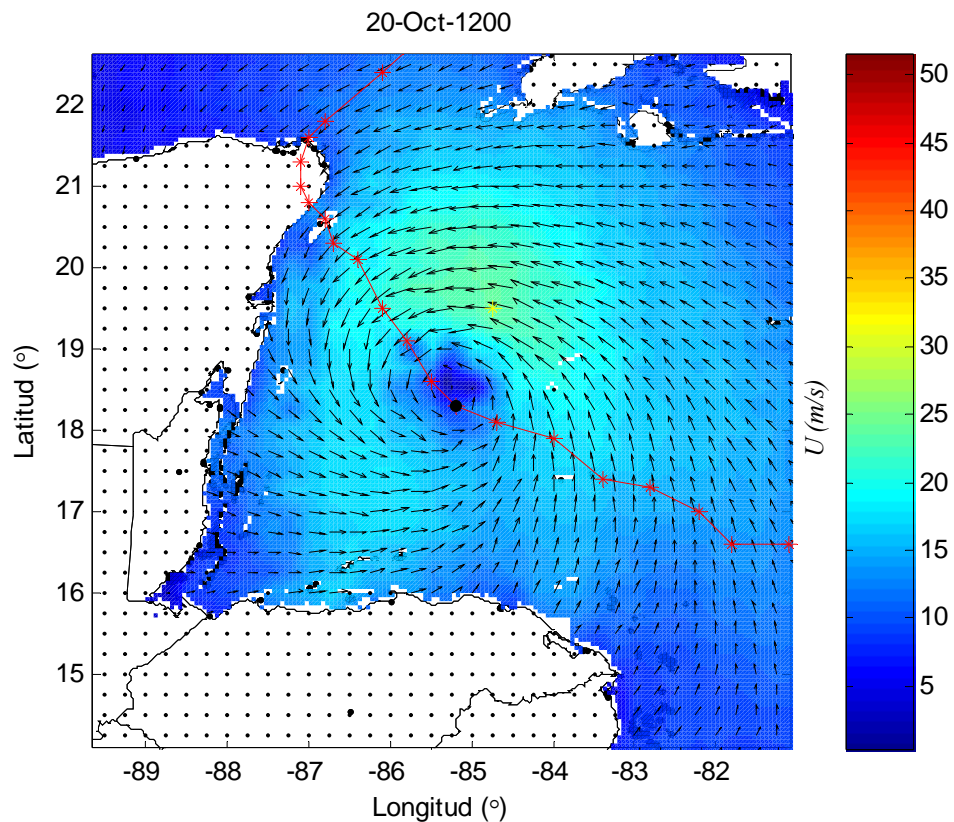


Figura 11. Acercamiento del campo de viento de NARR, correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 12:00 hrs de la Figura 6. Trayectoria del huracán Wilma (rojo) y posición del ojo del huracán cada 6 horas (*). Ubicación del viento máximo (*). Ojo del huracán en este campo de viento (•).

IV.2 Series de tiempo de algunos parámetros integrales.

En los análisis de los resultados se realizaron comparaciones de las series de tiempo simuladas y medidas de altura significativa, periodo y dirección asociados al pico espectral, en los puntos 42056 y PM, las cuales se presentan en las figuras siguientes.

En la Figura 12a se muestran las velocidades del viento en m/s, registradas por la boya 42056 (línea azul), el reanálisis NARR (línea rosa) y HRD (línea roja). De esta serie de tiempo se puede observar como los valores correspondientes al reanálisis NARR en su mayoría coinciden con las observaciones, excepto durante el paso del huracán por la boya, del 21 a finales del 22 de octubre, donde se observa una subestimación de U_{10} . Los valores de U_{10} del reanálisis HRD muestran buena concordancia con las mediciones realizadas por la boya; y al igual que NARR, las velocidades del viento también están subestimadas durante el huracán, aunque en menor grado.

La Figura 12b nos presenta la serie de tiempo de altura significativa (H_s) de las 5 simulaciones. Los valores de H_s simulados por SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR antes y después del huracán muestran buena aproximación con los medidos por la boya y una subestimación durante la tormenta. Esta subestimación en los valores de H_s de estos tres experimentos se debe a la subestimación U_{10} , que se observa durante la tormenta en la serie de tiempo. Esta subestimación de U_{10} puede deberse a que el ojo del huracán en los campos de viento de NARR, donde las velocidades del viento son muy bajas, pasa muy cerca de la ubicación de la boya.

La similitud entre los valores de H_s de SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR se debe a que la mayoría de las velocidades del viento del NARR son menores a 20 m/s, y los valores del C_d , para esta magnitud del viento, tanto en la versión original y modificada del modelo, son muy parecidos.

Las alturas significantes simuladas con SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD muestran una mejor aproximación con las medidas antes y después del huracán. Durante la tormenta SWAN-VO HRD se aproxima más a las medidas por la boya que las simuladas por SWAN-VM HRD, este último experimento subestima los valores de H_s en los días del huracán. Esta subestimación con SWAN-VM HRD se debe a la limitación del coeficiente de arrastre en la formulación del modelo, ya que los vientos de HRD durante el huracán sobrepasan los 25 m/s y existe diferencia entre los valores del C_d , para la versión original un $C_d=0.0024$ y en la versión modificada un $C_d=0.0022$. Sin embargo, es posible que los valores calculados por SWAN-VM sean más acertados que los de SWAN-VO, dada la subestimación de los vientos calculados por HRD.

La diferencia entre las alturas simuladas con los vientos de NARR y HRD se debe a la diferencia que existe entre las magnitudes de las velocidades de cada una.

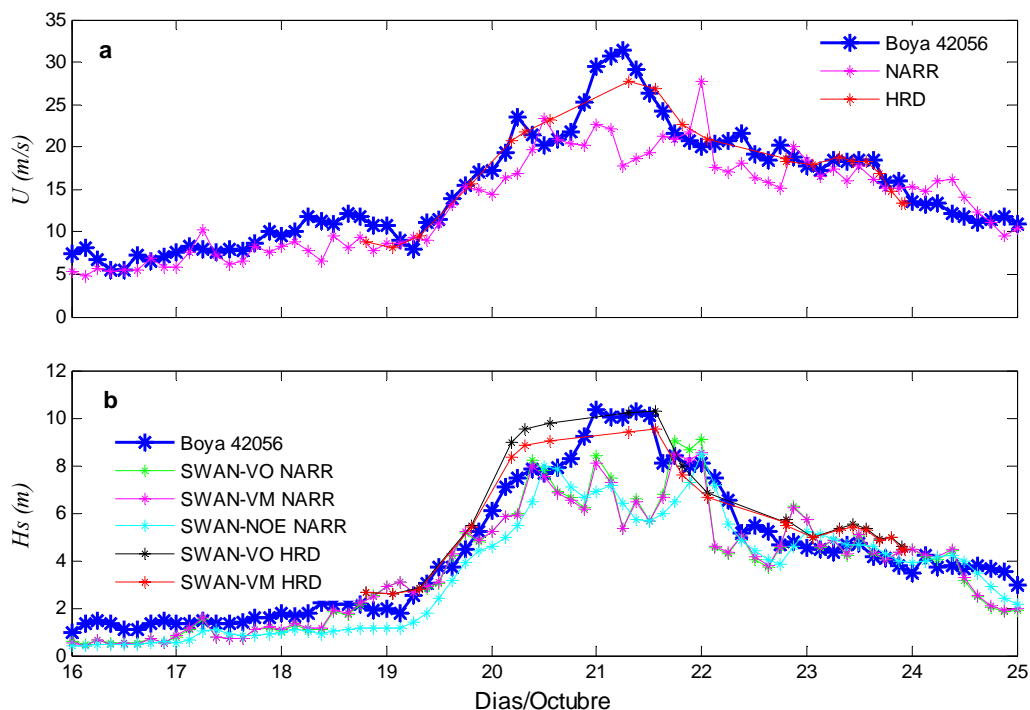


Figura 12. Serie de tiempo de U_{10} (a) en m/s, en el punto 42056. Boya 42056 (línea azul), reanálisis NARR (línea rosa) y reanálisis HRD (línea roja). Serie de tiempo de H_s (b), para el punto 42056. Boya 42056 (azul), SWAN-VO NARR (verde), SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE NARR (cielo), SWAN-VO HRD (negra) y SWAN-VM HRD (roja).

Para enfocar el análisis del desempeño del modelo en toda la serie de tiempo y en particular durante la tormenta se realizaron diagramas de dispersión y cálculo del coeficiente de correlación (Φ) para comparar cuantitativamente los datos medidos por la boya y los simulados por el modelo. Los diagramas de dispersión están agrupados en dos tipos de figuras, una donde se incluyen todos los datos, del 16 al 25 de octubre de 2005 y otra donde sólo se tomaron en cuenta los datos cuando el huracán Wilma pasó por el punto de interés, que fue del 19 al 23 de octubre de 2005.

En la Figura 13 se muestran los diagramas de dispersión de todos los datos, para las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE y su coeficiente de correlación en la parte superior de cada diagrama. Además se incluyeron las líneas de regresión (línea verde) y los intervalos de confianza al 95% (línea roja segmentada). El coeficiente de correlación para las simulaciones SWAN-VO NARR y SWAN-VM NARR fue $\Phi = 0.90$ en ambos, para SWAN-NOE NARR fue $\Phi = 0.93$ y la mayoría de los datos están dentro de los intervalos de confianza. Los coeficientes de correlación nos indican que el uso del modo no estacionario mejora las simulaciones debido a que el modelo cuenta con información de las condiciones del oleaje previo.

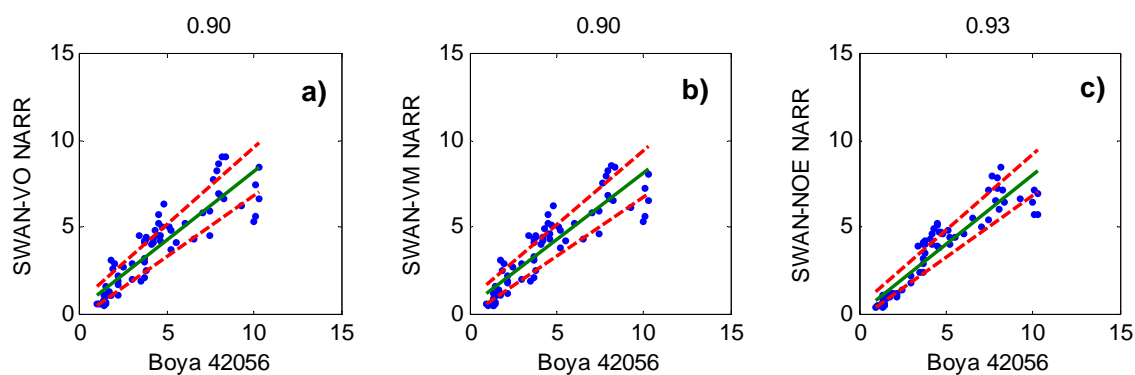


Figura 13. Regresión lineal (línea verde) entre H_s medidas por la Boya 42056 y los simulados por el modelo. Intervalos de confianza al 95% (línea roja segmentada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.

En cuanto al periodo del paso del huracán cerca de la boya (19 al 23 de octubre), en la Figura 14 se muestran los diagramas de dispersión y el coeficiente de correlación de los resultados de SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE, SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD y las observaciones.

En las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR se obtuvo un $\Phi= 0.80$, $\Phi= 0.81$ y $\Phi= 0.86$, respectivamente. En las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD un valor de $\Phi= 0.94$, en ambas. En las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE la mayoría de los datos están dentro del intervalo de confianza y solamente se salen un máximo de 4 datos en cada uno. En cambio, en las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD todos los datos se encuentran dentro del los intervalos de confianza. Los coeficientes de correlación nos indican una buena simulación con el modo no estacionario; pero más aún utilizando los vientos de HRD debido a la mejor resolución espacial con la que cuentan; aun cuando se limite o no el coeficiente de arrastre.

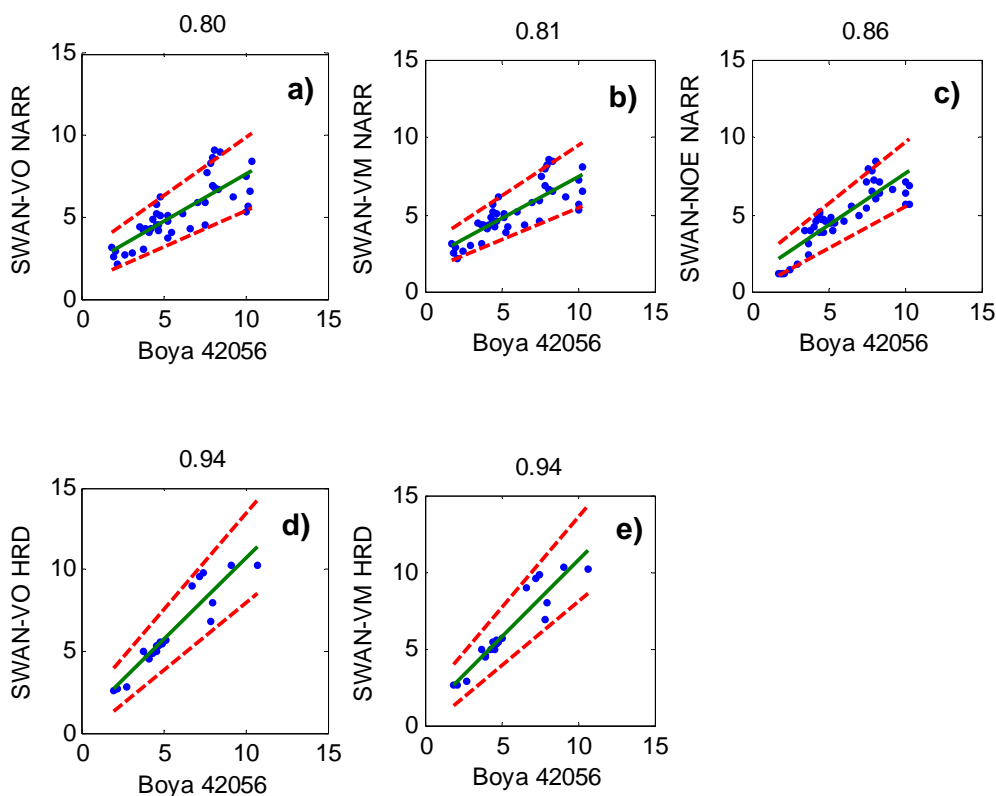


Figura 14. Regresión lineal (línea verde) entre H_s medidas por la Boya 42056 y los simulados por el modelo. Intervalos de confianza al 95% (línea roja punteada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c), SWAN-VO HRD (d), SWAN-VM HRD (e). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 19 al 23 de octubre de 2005.

En la Figura 15 se muestran las series de tiempo del periodo asociado al pico espectral (T_p). Las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR están subestimados con respecto a los medidos por la boya antes y después de la tormenta. Esto podría ser a que el oleaje medido por la boya antes de Wilma pudo haber sido un oleaje largo generado con anterioridad. En cambio el oleaje simulado por el modelo es un oleaje generado localmente. Esto también se verá reflejado en la dirección asociada al pico espectral.

Los T_p mejor simulados, durante el huracán, fueron hechos por el experimento SWAN-NOE NARR.

Los periodos simulados por SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD, aunque son muy parecidos entre sí, presentan una mejor concordancia con los medidos por la boya durante el huracán debido a la mejor resolución con la que cuentan los campos de viento de HRD, aun cuando se limite o no el coeficiente de arrastre.

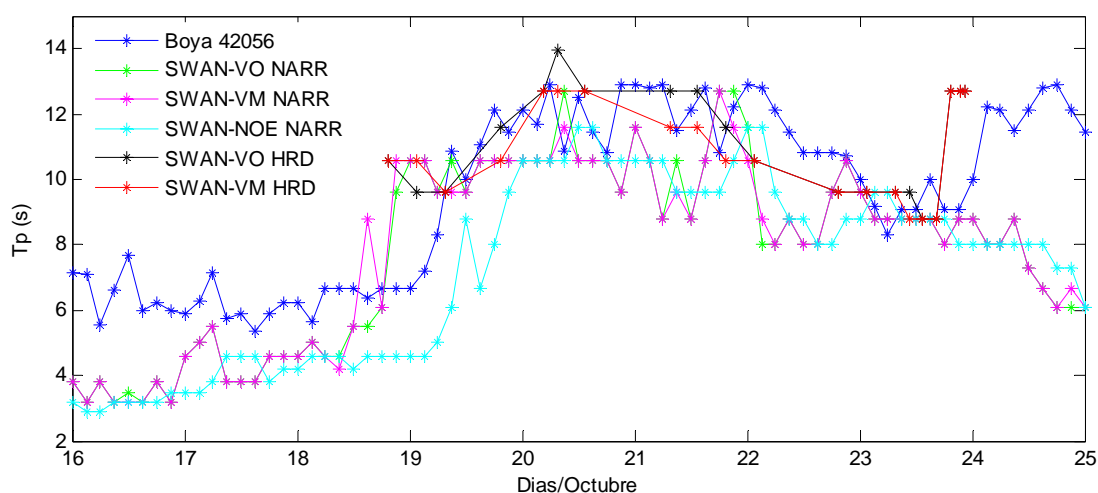


Figura 15. Serie de tiempo de T_p en el punto 42056. Boya 42056 (azul), SWAN-VO NARR (verde), SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE NARR (cielo), SWAN-VO HRD (negra) y SWAN-VM HRD (roja).

La Figura 16 muestra los diagramas de dispersión al comparar los datos de toda la serie de tiempo con las observaciones realizadas por la boya, así como su coeficiente de correlación, regresión lineal e intervalos de confianza (95%) de las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR. En las tres simulaciones se obtuvo un $\Phi=0.71$, $\Phi=0.70$ y $\Phi=0.86$, respectivamente y la mayoría de los datos están dentro del intervalo de confianza.

El uso del modo no estacionario nos muestra una mejor correlación del T_p con los datos medidos durante todo el periodo de simulación ($\Phi=0.86$), en comparación con las versiones en modo estacionario. Esto nos indica que es mejor el uso del modelo en modo no estacionario debido a que el modelo cuenta con información previa del oleaje.

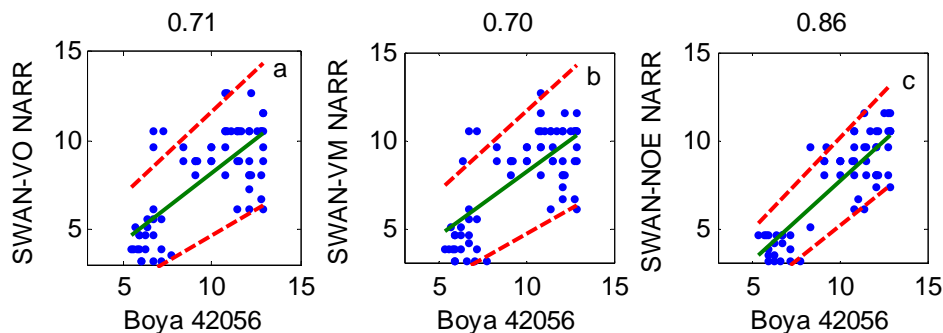


Figura 16. Regresión lineal (línea verde) entre T_p medidos por la Boya 42056 y los simulados por el modelo. Intervalos de confianza al 95% (línea roja segmentada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.

En cuanto al periodo del 19 al 23 de octubre, en la Figura 17 se muestran los diagramas de dispersión y el coeficiente de correlación de los datos correspondientes a este periodo en las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR, SWAN-VO HRD, SWAN-VM HRD. En las simulaciones SWAN-VO NARR y SWAN-VM NARR se obtuvo un coeficiente de correlación muy bajo, $\Phi= 0.34$ y $\Phi= 0.31$, respectivamente. En la simulación SWAN-NOE NARR un $\Phi= 0.80$. El valor de Φ de la simulación SWAN-NOE NARR nos indica una mejor correlación entre los datos medidos y simulados. Esto nos vuelve a indicar que el uso del modo no estacionario mejora las simulaciones del T_p por contar con información previa del oleaje.

El coeficiente de correlación más alto se dio entre los datos medidos y las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD, $\Phi= 0.93$ en ambas. Esto se debe a la mejor

resolución con la que cuentan los campos de viento de HRD aun cuando se limite o no el coeficiente de arrastre.

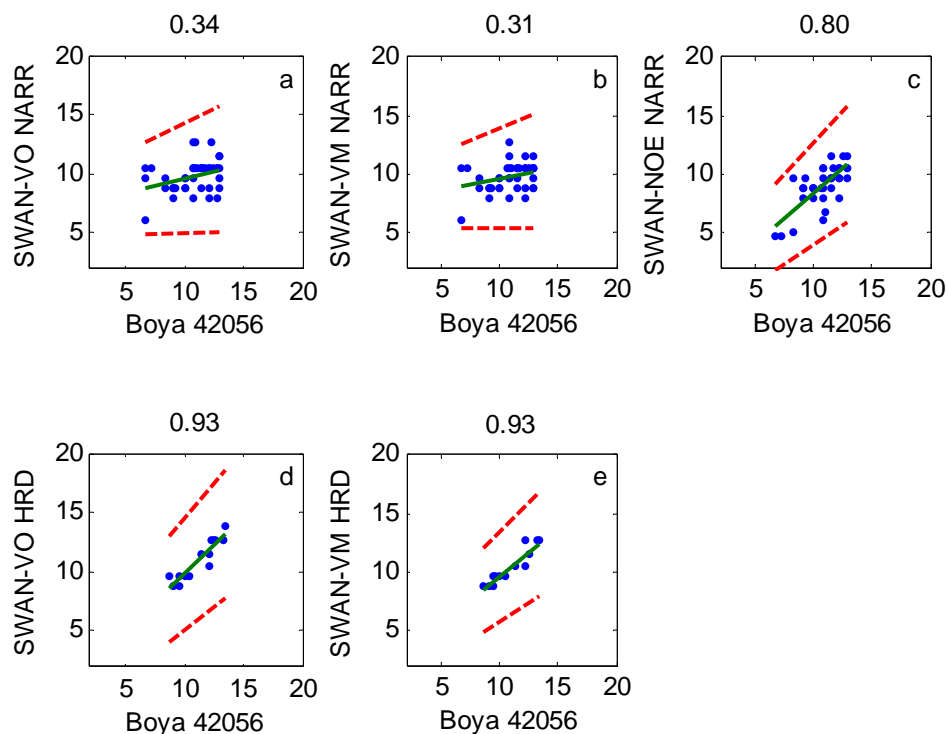


Figura 17. Regresión lineal (línea verde) entre T_p medidos por la Boya 42056 y los simulados por el modelo. Intervalos de confianza al 95% (línea roja punteada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c), SWAN-VO HRD (d), SWAN-VM HRD (e). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 19 al 23 de octubre de 2005.

La serie de tiempo de la dirección asociada al pico espectral ($PkDir$), con respecto al Norte, se muestra en la Figura 18. Al principio de la serie de tiempo se observa como los valores simulados difieren de los medidos, al igual que en los días después del paso del huracán (después del 22 de octubre). Esto debido a lo ya mencionado en el T_p ; un oleaje largo medido por la boya que fue generado anteriormente, mientras que el T_p simulado por SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR corresponde a un oleaje generado localmente por el modelo.

Debido a la mejor resolución con la que cuentan los vientos de HRD se obtuvo una mejor aproximación de las direcciones asociadas al pico espectral simuladas con las medidas, en ambas versiones.

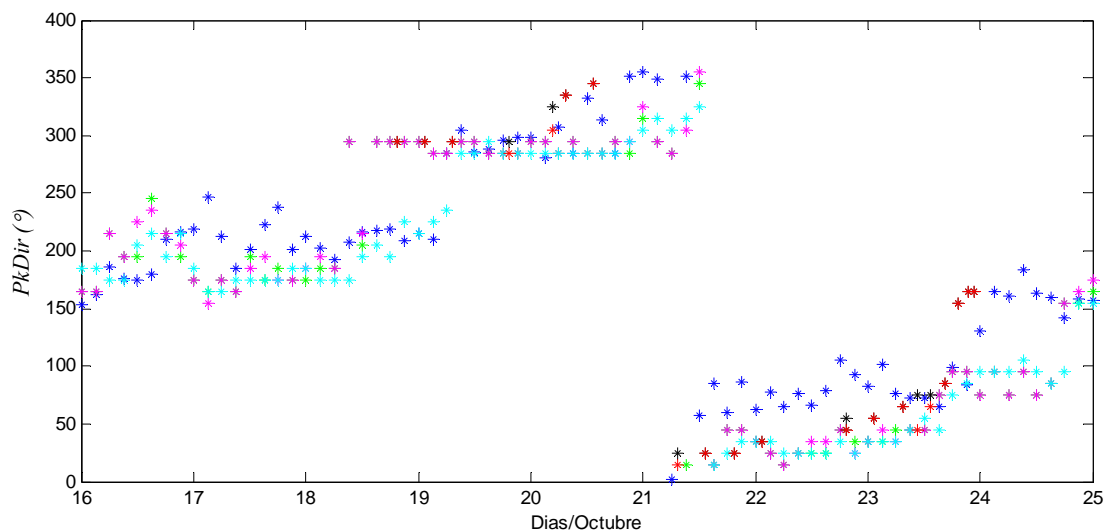


Figura 18. Serie de tiempo de Dirección asociada al pico espectral ($PkDir$) en el punto 42056, con respecto al Norte. Boya 42056 (azul), SWAN-VO NARR (verde), SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE (cielo), SWAN-VO HRD (negra) y SWAN-VM HRD (roja).

En lo que respecta al punto PM, en la Figura 19 se muestra la serie de tiempo de altura significativa medida por el perfilador acústico y la simulada por el modelo en el nodo más cercano al perfilador. La altura significativa simulada por SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR antes y después del huracán presenta una buena aproximación con las medidas en este punto, aunque durante la tormenta se encuentra subestimada.

La similitud entre los valores de H_s de SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR se debe a que la mayoría de las velocidades del viento del NARR son menores

a 15 m/s, el valor del C_d para esta magnitud del viento es de 0.0018, tanto en la versión original como en la versión modificada del modelo.

Con respecto a SWAN-VO HRD, los valores de las alturas en su mayoría están sobreestimados y con SWAN-VM HRD se obtiene una mejor aproximación. Las velocidades del viento en este punto son mayores a los 25 m/s y la máxima que reporta HRD es de 42 m/s. El C_d para 25 m/s es de 0.0024 en la versión original y en la versión modificada es de 0.0022, en cambio para 42 m/s la diferencia entre los coeficientes de arrastre es mayor: versión original $C_d=0.0035$ y versión modificada $C_d=0.0026$.

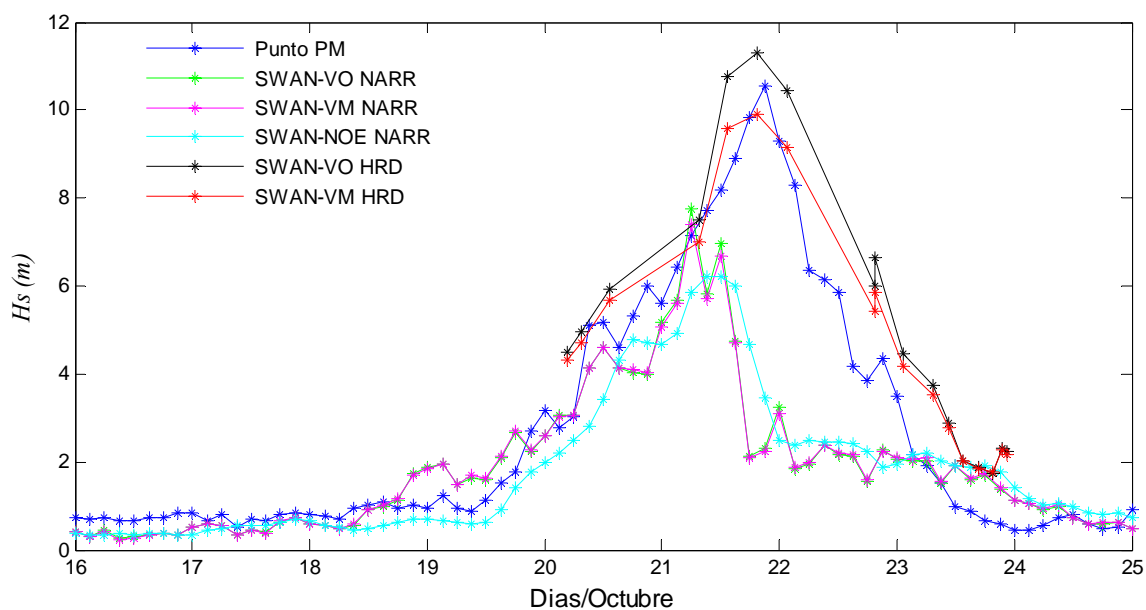


Figura 19. Serie de tiempo de H_s en el punto PM. PM (azul), SWAN-VO NARR (verde), SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE (cielo), SWAN-VO HRD (negra) y SWAN-VM HRD (roja).

En la Figura 20 se muestran los diagramas de dispersión de H_s de toda la serie de tiempo, para las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE y su coeficiente de correlación en la parte superior de cada diagrama.

El coeficiente de correlación para SWAN-VO NARR y SWAN-VM NARR, fue $\Phi=0.74$ en ambas, para SWAN-NOE NARR fue $\Phi=0.84$. Al igual que el punto Boya 42056, esto nos indica que el uso del modelo en modo no estacionario ayuda a mejorar los resultados ya que el modelo cuenta con información del oleaje generado anteriormente.

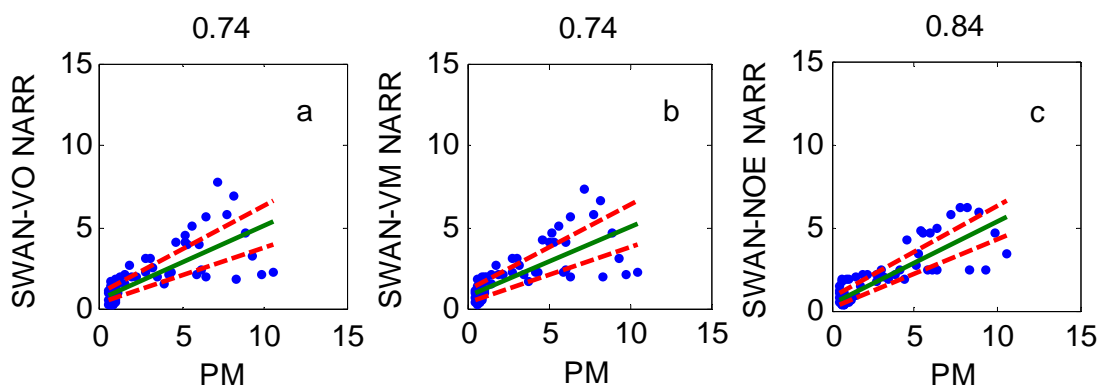


Figura 20. Regresión lineal (línea verde) entre H_s medidos y simulados en el punto PM. Intervalos de confianza al 95% (línea roja segmentada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.

En cuanto al periodo del paso del huracán cerca del punto PM (19 al 23 de octubre), en la Figura 21 se muestran los diagramas de dispersión y el coeficiente de correlación de los datos correspondientes a este periodo en las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR, SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD .

En SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR se obtuvo un $\Phi= 0.50$, $\Phi= 0.49$ y $\Phi= 0.65$, respectivamente. En SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD un valor de $\Phi= 0.98$, en ambos. En las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD todos los

datos se encuentran dentro de los intervalos de confianza y sus coeficientes de correlación son muy altos, 0.98 en ambas. Este valor del coeficiente nos indica que el modelo logra simular la altura significativa satisfactoriamente durante el huracán debido a la mejor resolución con la que cuentan los campos de viento de HRD.

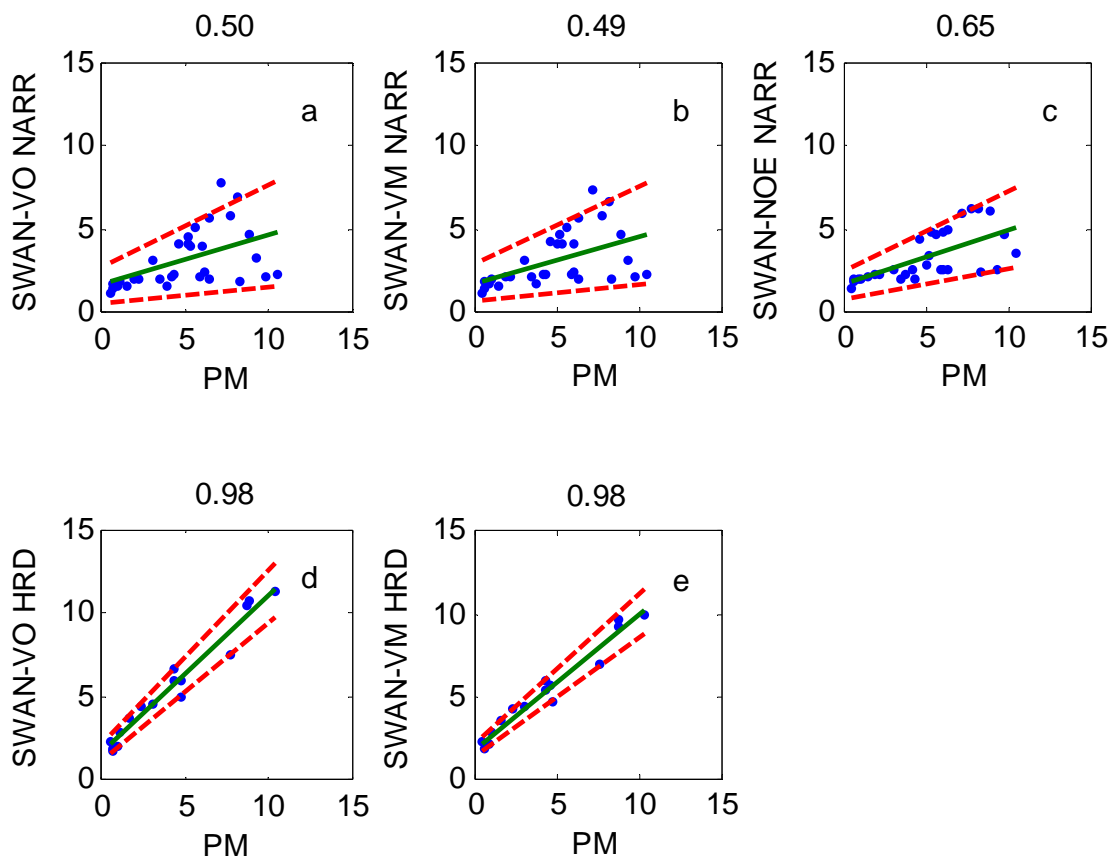


Figura 21. Regresión lineal (línea verde) entre H_s medidos y simulados en el punto PM. Intervalos de confianza al 95% (línea roja segmentada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c), SWAN-VO HRD (d), SWAN-VM HRD (e). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 19 al 23 de octubre de 2005.

La figura 22 nos muestra el T_p medido por el perfilador acústico (línea azul) y el de las 5 simulaciones en el nodo mas cercano al punto PM. Las SWAN-VO NARR (línea verde), SWAN-VM NARR (línea rosa) son muy parecidos entre si en toda la serie de tiempo; con respecto a los medidos, están subestimados antes y después del huracán, aunque durante el periodo de Wilma a su paso por este punto muestran una mejor aproximación. Los

simulados por SWAN-NOE NARR (línea azul cielo) también son subestimados con respecto a los medidos antes y después del huracán. Durante la tormenta presentan una buena aproximación.

Las subestimaciones antes y después de que el huracán se aproximara a este punto podría ser, al igual que en la boya, un oleaje generado remotamente, en cambio el simulado por el modelo es un oleaje generado localmente. Esto también se verá reflejado en la dirección asociada al pico espectral.

Los T_p simulados por SWAN-VO HRD (línea negra) y SWAN-VM HRD (línea roja) presentan una mejor aproximación con las observaciones debido a la mejor resolución con respecto a los vientos de NARR.

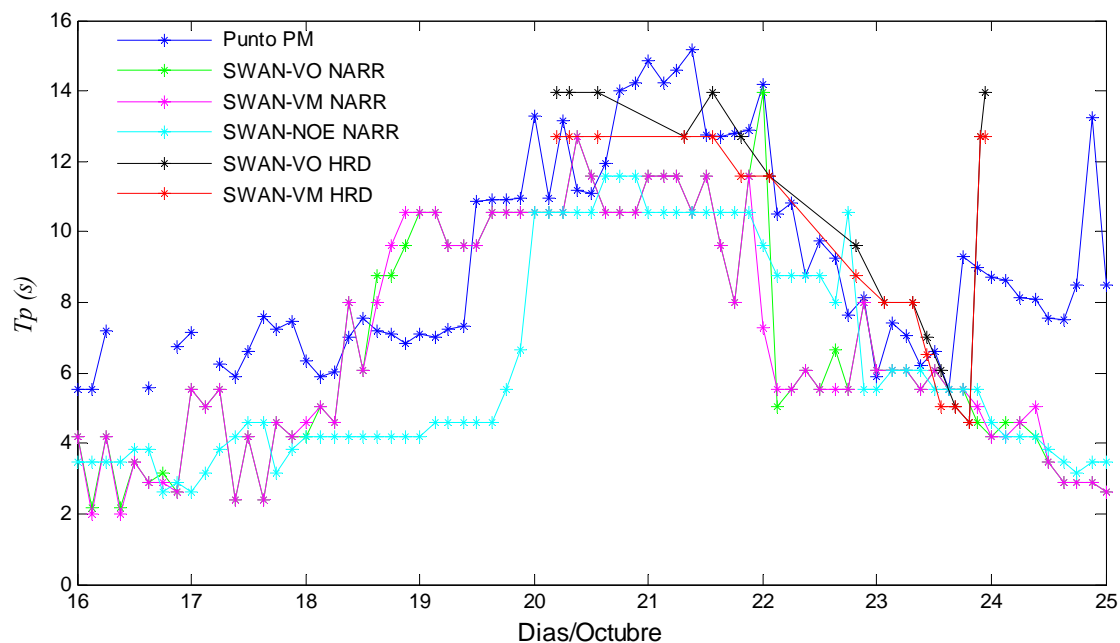


Figura 22. Serie de tiempo del T_p en el punto PM. PM (azul), SWAN-VO NARR (verde), SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE (cielo), SWAN-VO HRD (negra) y SWAN-VM HRD (roja).

La Figura 23 nos muestra los diagramas de dispersión de toda la serie de tiempo así como su coeficiente de correlación, regresión lineal e intervalos de confianza (95%) de las simulaciones SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR. En las tres simulaciones se obtuvo un $\Phi= 0.67$, $\Phi= 0.63$ y $\Phi= 0.80$, respectivamente. La mayoría de los datos están dentro del intervalo de confianza. Esto nos indica que el uso del modelo en modo no estacionario mejora las simulaciones debido a que el modelo cuenta con información previa del oleaje.

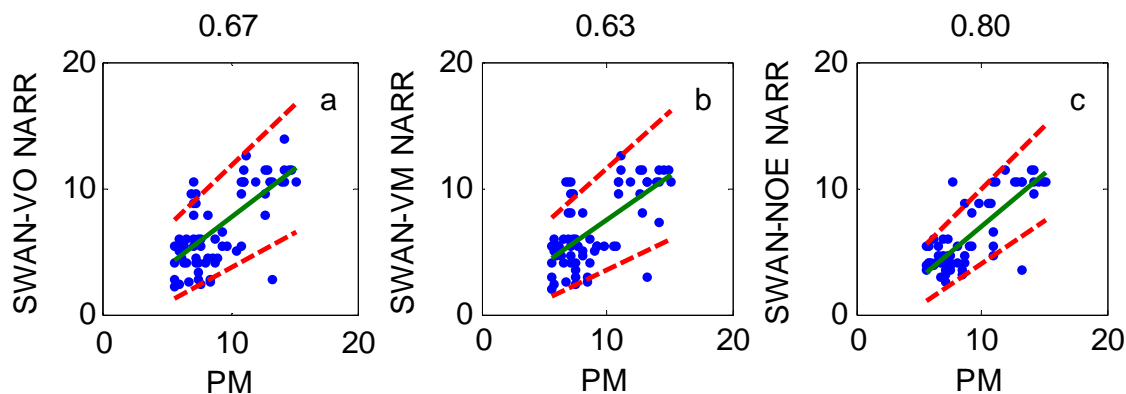


Figura 23. Regresión lineal (línea verde) entre T_p medidos y simulados en el punto PM. Intervalos de confianza al 95% (línea roja segmentada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 16 al 25 de octubre de 2005.

Si tomamos en cuenta sólo el periodo del paso de la tormenta por el punto PM, los resultados mejoran. En la Figura 24 podemos observar coeficientes de correlación más altos que los anteriores; SWAN-VO NARR ($\Phi= 0.80$), SWAN-VM NARR ($\Phi= 0.76$), SWAN-NOE NARR ($\Phi= 0.82$), SWAN-VO HRD ($\Phi= 0.82$), y SWAN-VM HRD ($\Phi= 0.85$). En las 5 simulaciones la mayoría de los datos están dentro del intervalo de confianza.

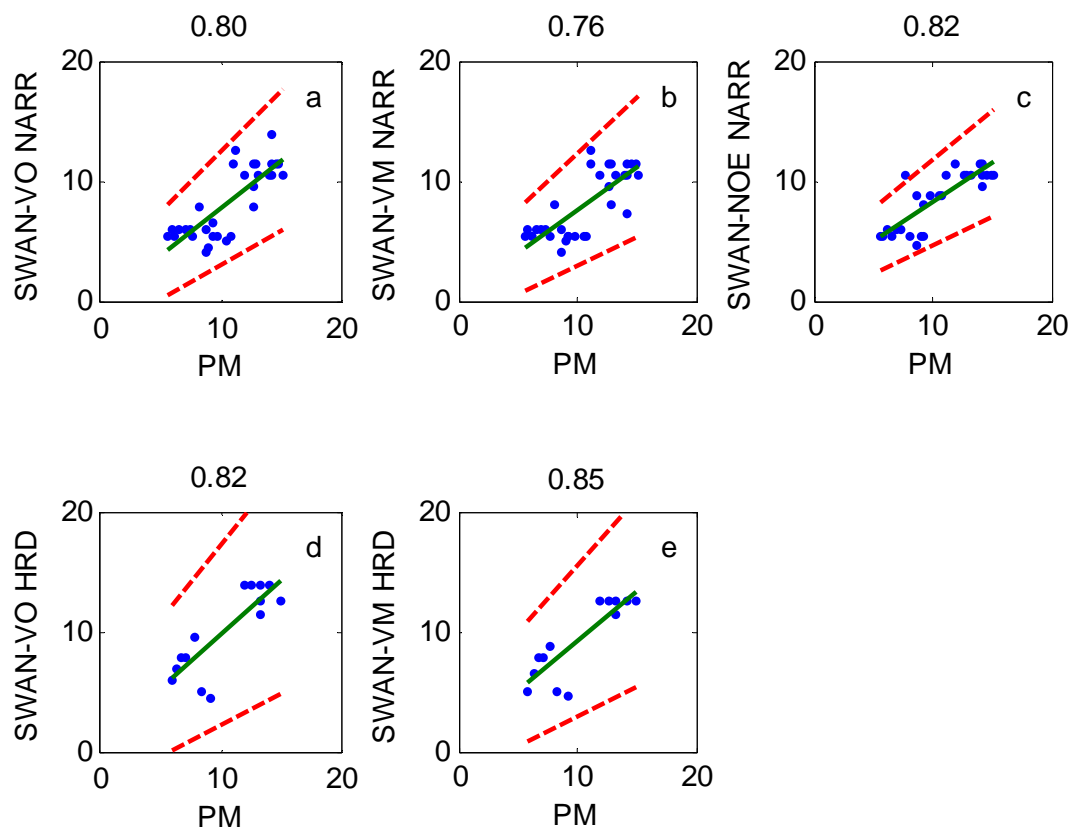


Figura 24. Regresión lineal (línea verde) entre T_p medidos y simulados en el punto PM. Intervalos de confianza al 95% (línea roja segmentada). SWAN-VO NARR (a), SWAN-VM NARR (b), SWAN-NOE NARR (c), SWAN-VO HRD (d), SWAN-VM HRD (e). Coeficiente de correlación parte superior de cada diagrama. Periodo del 19 al 23 de octubre de 2005.

Los coeficientes de correlación, obtenidos de la comparación entre los resultados del modo no estacionario con los medidos por el perfilador acústico, nos indican que se mejoran los resultados con respecto a los obtenidos por el modo estacionario, tanto en toda la serie de tiempo como durante el periodo del huracán.

La simulación SWAN-VM HRD presentó el coeficiente de correlación más alto de las 5 simulaciones, esto nos indica que la buena resolución de los vientos de HRD y la limitación del C_d , mejoran los resultados del modelo en este punto.

La Figura 25 nos muestra la serie de tiempo de la dirección asociada al pico espectral ($PkDir$) en el punto PM, medida por el perfilador acústico y simulada por el modelo. Se puede observar que las direcciones simuladas por SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR antes y después de la tormenta varían con respecto a las medidas. En cambio durante el huracán (19 al 23 de octubre) las cinco simulaciones reproducen mejor la $PkDir$ observada.

Como se mencionó en el periodo asociado al pico espectral, el oleaje medido por el perfilador corresponde a oleaje largo generado con anterioridad y el T_p simulado por SWAN-VO NARR, SWAN-VM NARR, SWAN-NOE NARR corresponde a un oleaje generado localmente por el modelo.

Las direcciones simuladas entre 19 y 23 de octubre por las 5 simulaciones reflejan una mejor aproximación con las medidas.

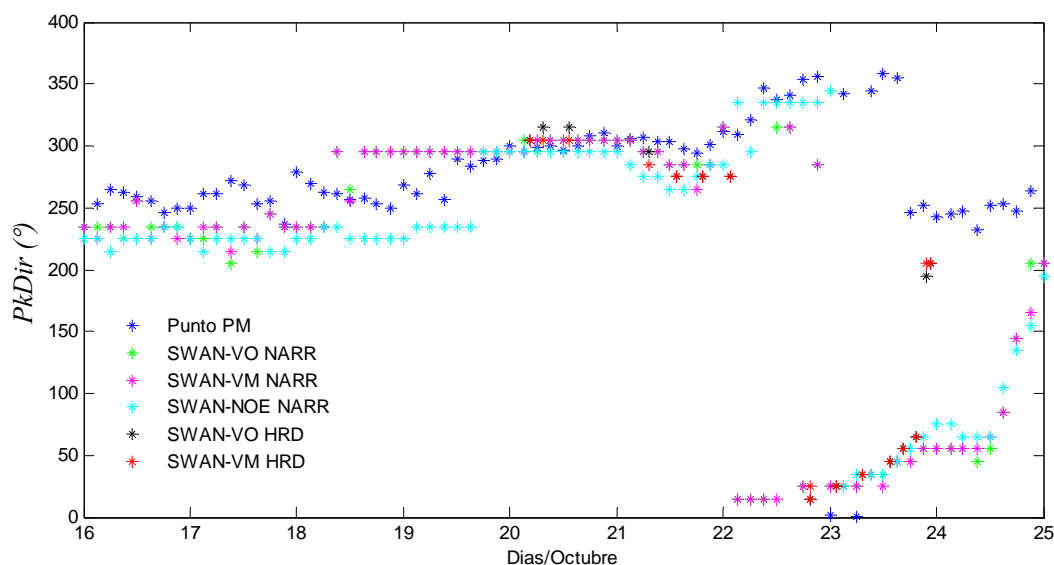


Figura 25. Serie de tiempo de Dirección asociada al pico espectral ($PkDir$) en el punto PM. PM (azul), SWAN-VO NARR (verde), SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE (cielo), SWAN-VO HRD (negra) y SWAN-VM HRD (roja).

En cuanto a las versiones original, modificada y modo no estacionario realizadas por el modelo con los vientos del reanálisis NARR, se puede observar que las dos primeras no muestran diferencias significativas entre sí, es decir, los valores de cada una de las series de tiempo son muy parecidos; en cambio los del modo estacionario difieren de éstas. Por esta razón se decidió tomar en cuenta sólo las simulaciones con la versión modificada (VM) y modo no estacionario (NOE) en el análisis subsiguiente.

IV.3 Espectros en función de la frecuencia y direccionales.

El análisis de la forma espectral del oleaje se hizo mediante comparación de espectros en función de la frecuencia y direccionales simulados y medidos en el punto de la Boya 42056. Todos los espectros direccionales están normalizados individualmente para resaltar el pico espectral.

La boya 42056 del NDBC se encuentra ubicada en la cuenca de Yucatán al noroeste del Mar Caribe en 19.87° de latitud Norte y en 85.06° de longitud Oeste. El huracán Wilma, en el 2005, se acercó a este punto alrededor del día 19 de octubre.

A continuación se muestra el espectro en función de la frecuencia (Figura 26) medido por la boya (azul) y simulados por el modelo para SWAN-VM NARR (rosa) y SWAN-NOE NARR (azul cielo), para el día 17 de octubre de 2005 a las 03:00 hr, antes de que el huracán Wilma se aproximara a este punto. En esta figura se puede observar que el espectro medido por la boya presenta más de dos picos espectrales entre las frecuencias 0.1 y 0.25 Hz. La simulación SWAN-VM NARR logra reproducir uno de los picos espectrales, el correspondiente a la frecuencia 0.2 Hz, mientras que la simulación SWAN-NOE NARR sólo genera energía en altas frecuencia, con el pico espectral ubicado en 0.3 Hz.

Además de que el espectro medido por la boya es más energético que los simulados por el modelo en ambos experimentos, esta subestimación de energía podría deberse a que los vientos reportados por el NARR son menos intensos a los medidos por la boya.

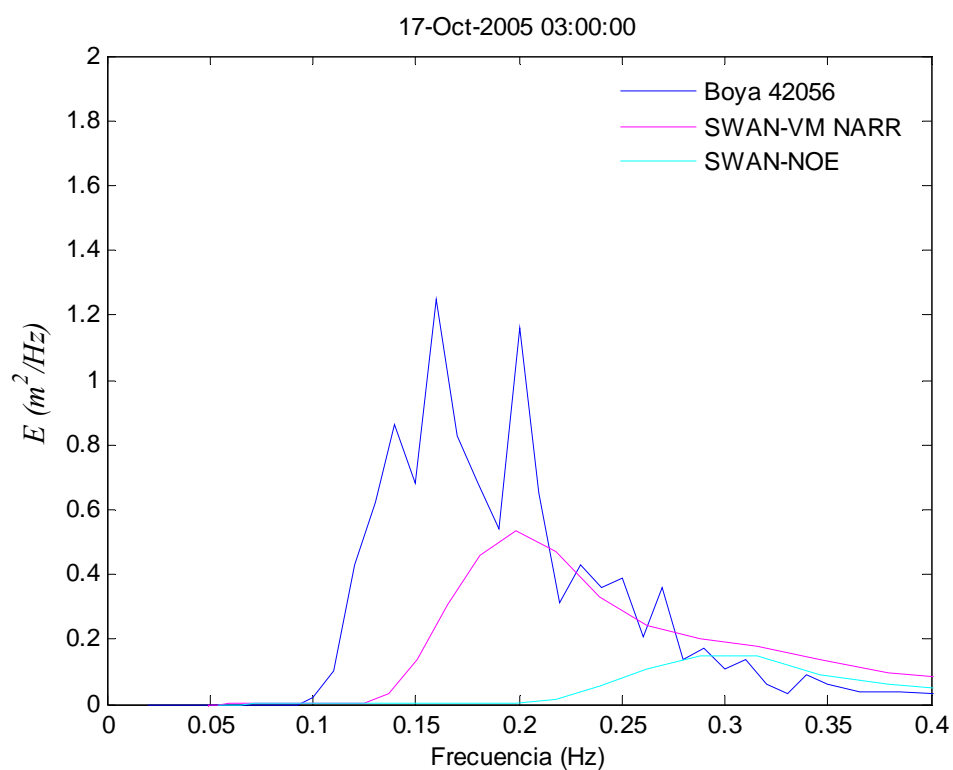


Figura 26. Espectros en función de la frecuencia medido por la boya 42056 (azul) y simulados por SWAN-VM NARR (rosa) y SWAN-NOE NARR (azul cielo). Frecuencia en Hz. Densidad de energía en m^2/Hz . Día 17 de octubre de 2005 a las 03:00 hrs.

Los espectros direccionales medido por la boya y simulados por SWAN correspondientes al 17 de octubre a las 03:00 hr se presentan en la Figura 27. En la esquina superior derecha tenemos el espectro medido por la boya, en la superior izquierda el simulado por SWAN-VM NARR y en la inferior izquierda el correspondiente a SWAN-NOE NARR.

En estos espectros se observa como el medido por la boya presenta tres picos espectrales (trimodal) propagándose en distintas direcciones y ubicados en diferentes frecuencias; oleaje largo a 270° y a 150° y oleaje local a 210° . En cuanto a la distribución de la densidad de energía tanto en frecuencia como direcciones, el espectro medido por la boya es más ancho comparado con los de las simulaciones. SWAN-VM NARR reproduce el segundo pico espectral aunque difiere un poco en la dirección. En cambio SWAN-NOE NARR sólo reproduce el oleaje local generado en altas frecuencias.

En el centro de cada espectro se indica la dirección de propagación del viento (barra negra) y la asociada al pico espectral (barra azul). En los espectros simulados, ambas direcciones coinciden, lo cual nos indica que el oleaje en ese punto es generado por el viento local mientras que en la boya no, esto nos indica que tenemos una combinación de oleaje generado localmente y oleaje largo generado con anterioridad.

La H_s (rojo) y T_p (azul) se muestran en la esquina superior derecha de cada espectro; y se puede observar como los valores simulados por el modelo están subestimados con respecto al medido.

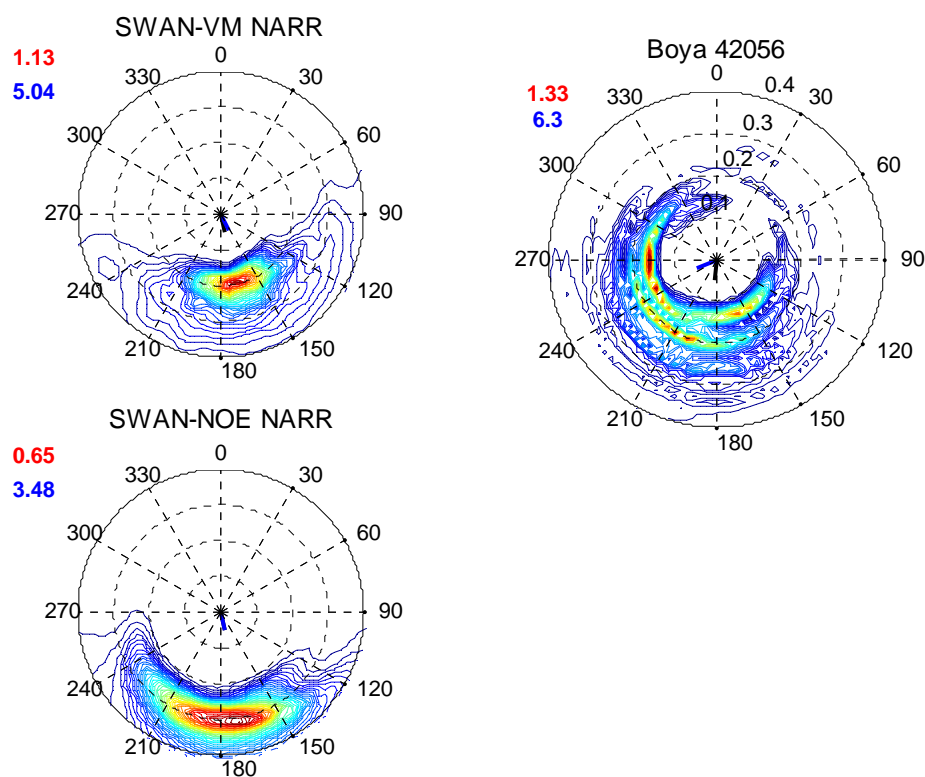


Figura 27. Espectro direccional medido por la boya 42056 (superior derecho) y simulados por SWAN-VM NARR (superior izquierdo) y SWAN-NOE NARR (inferior izquierdo). Densidad de energía en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{grados}$. Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 Hz. H_s y T_p , esquina superior izquierda en cada espectro, rojo y azul, respectivamente. Dirección asociada al pico espectral (barra azul) y dirección del viento (barra negra). Día 17 de octubre de 2005 a las 03:00 hrs.

Un espectro medido por la boya durante el huracán (21 de octubre a las 06:00 hr) se muestra en la Figura 28, así como los simulados por SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE NARR(azul cielo) y el mas cercano de SWAN-VM HRD (negro), correspondiente al 21 de octubre a las 07:30 hrs.

El espectro medido por la boya presenta oleaje largo, con dos picos espectrales muy bien definidos entre las frecuencias 0.05 y 0.1 Hz, y otro de menor energía entre 0.1 y 0.15 Hz. SWAN-VM NARR y SWAN-NOE NARR logran simular el pico espectral situado en 0.1 Hz, aunque son menos energéticos, debido a la menor intensidad de los vientos de la fuente NARR, ya antes mencionado. El espectro de SWAN-VM HRD también presenta un sólo pico espectral simulando el segundo pico del espectro de la boya además de ser casi igual de energético, a causa de mejor resolución de HRD para reproducir los vientos intensos medidos por la boya.

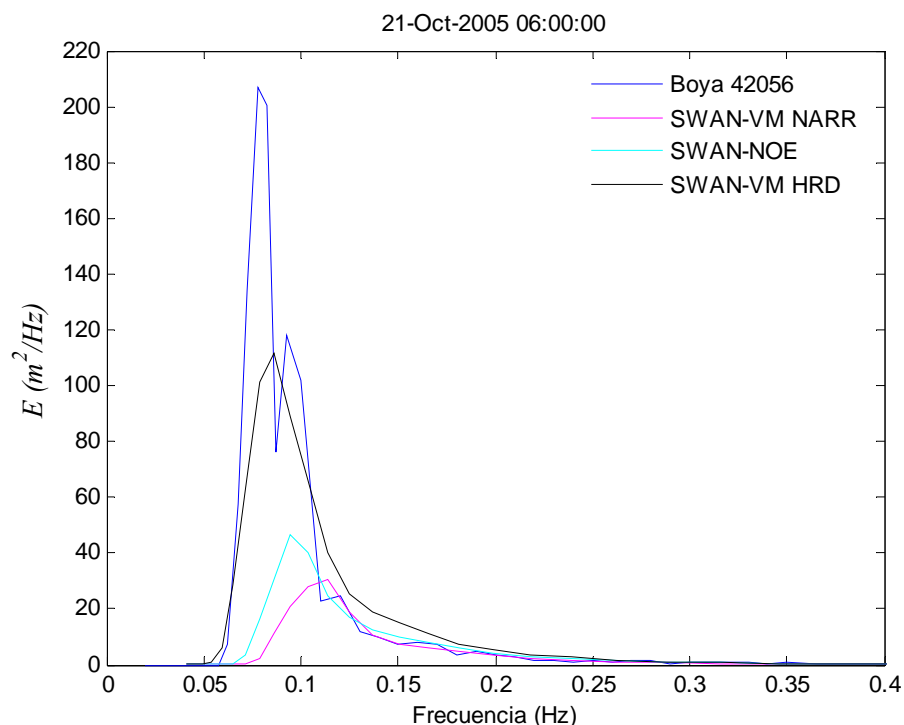


Figura 28. Espectros en función de la frecuencia medido por la boya 42056 (azul) y simulados por SWAN-VM NARR (rosa), SWAN-NOE (azul cielo) y SWAN-VM HRD (negro, hora mas cercana 07:30). Frecuencia en Hz. Densidad de energía en m^2/Hz . Día 21 de octubre de 2005 a las 06:00 hrs.

Los espectros direccionales correspondientes al 21 de octubre a las 06:00 hr se muestran en la Figura 29.

El espectro medido por la boya presenta tres picos espectrales (trimodal) muy cercanos en frecuencia, alrededor de 0.1 Hz, estos picos espectrales corresponden a oleaje largo propagándose en diferente dirección.

Comparando los espectros simulados con el medido, los de SWAN-VM NARR y SWAN-NOE presentan sólo un pico espectral (unimodal), además de ser más anchos en el intervalo de frecuencias pero muy parecidos en el rango de direcciones, hablando de la distribución de la densidad de energía. El oleaje reproducido por el modelo corresponde al oleaje local medido por la boya alrededor de la frecuencia de 0.2 Hz. La baja intensidad de los vientos del NARR es la causa de que el modelo no simule el oleaje de baja frecuencia captado por la boya. En estas dos simulaciones, la *PkDir* y dirección del viento concuerdan, por lo tanto es oleaje local.

El espectro simulado por SWAN-VM HRD aunque presente un sólo pico espectral, se aproxima más al medido por la boya, debido a una mejor simulación del pico espectral en dirección y frecuencia, además la distribución de la energía, tanto en frecuencia como en dirección, es muy parecida a la del espectro de la boya. La mejor simulación del espectro por este experimento se debe a la resolución de los vientos de HRD que logra reproducir la intensidad y dirección del viento medido por la boya.

En cuanto a la H_s y T_p de cada espectro, el que mejor simula estos parámetros es SWAN-VM HRD, en comparación con SWAN-VM NARR y SWAN-NOE donde los valores están subestimados con respecto a los medidos por la boya. Esto es debido a la mejor resolución espacial de los vientos de HRD, con respecto a la de NARR.

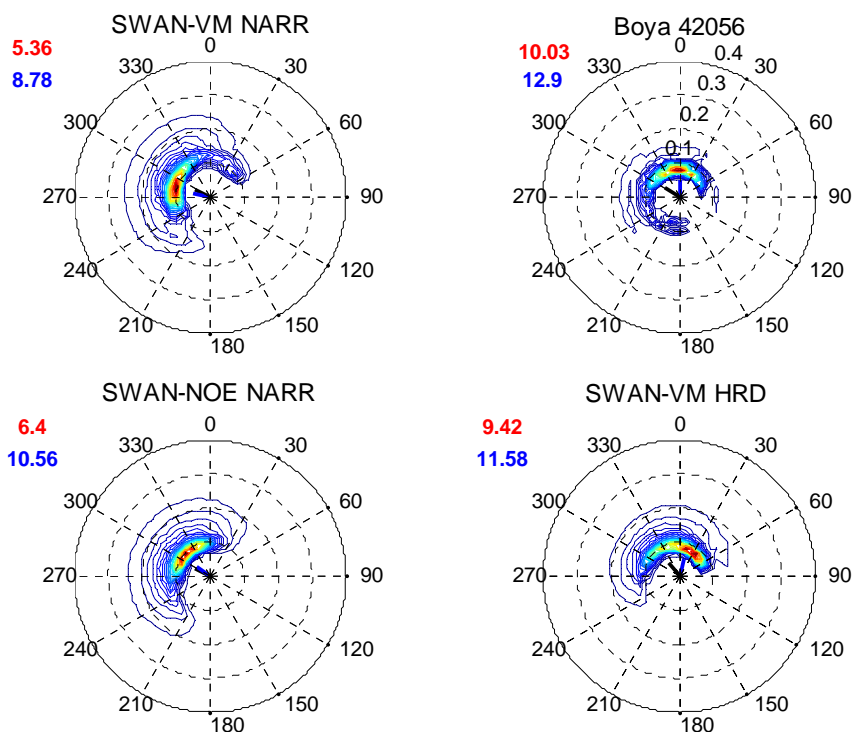


Figura 29. Espectro direccional medido por la boya 42056 (superior derecho) el 21 de octubre a las 06:00 hrs. y simulados por SWAN-VM NARR (superior izquierdo), SWAN-NOE (inferior izquierdo) y SWAN-VM HRD (inferior derecho, hora más cercana 07:30). Densidad de energía en m^2/Hz . Círculos concéntricos corresponden a la frecuencia 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 Hz. H_s y T_p , esquina superior izquierda en cada espectro, rojo y azul, respectivamente.

De manera general, en lo que respecta a los espectros simulados, estos fueron unimodales, es decir, un sólo pico espectral. Esto coincide con Moon *et al.* 2003, quienes simularon el espectro direccional del oleaje generado por el huracán Bonnie (1998), y como resultado obtuvieron espectros unimodales y mencionan que se debe a la velocidad de traslación del huracán. Esto ocasiona que las olas del lado derecho del huracán estén expuestas a un forzamiento prolongado del viento, quedando atrapadas dentro del huracán y se vuelven un oleaje de baja frecuencia dominante que cubre al oleaje generado localmente; por lo tanto este último no es captado o simulado por el modelo.

IV.4 Análisis de los términos fuentes en el balance de densidad de energía.

Por último se obtuvieron los espectros direccionales y términos fuente para 34 puntos alrededor del ojo del huracán sobre las mallas computacionales de $8.6^\circ \times 8.6^\circ$, correspondiente al dominio de HRD. No se consideraron los términos fuente relacionados con el rompimiento inducido por el fondo, fricción con el fondo e interacciones no lineales en aguas someras ya que el análisis se realizó en aguas profundas.

A continuación se mostrarán estos resultados para el campo de viento correspondiente al 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hr (Figura 7). Este campo de viento fue uno de los más intensos durante el huracán, presentando una de las velocidades de viento más altas durante su trayectoria, 51.35 m/s, localizándose al norte del ojo del huracán.

El campo de H_s simulado por el modelo a partir de este campo de viento se muestra en la Figura 30. Los colores nos indican la H_s en metros, las flechas blancas la dirección del oleaje asociada al pico espectral y las flechas negras la dirección del viento. Se puede observar que las alturas mayores se encuentran en el cuadrante superior derecho del huracán con respecto a su trayectoria, presentando un máximo de 12.34m. Las alturas menores se presentan en el cuadrante inferior izquierdo. Esta distribución de las H_s también la observaron Wright *et al.* 2001 y Moon *et al.* 2003 y mencionan que las olas más altas están del lado derecho del huracán, con respecto a su trayectoria, debido a que están influenciadas por la dirección y velocidad de traslación del huracán.

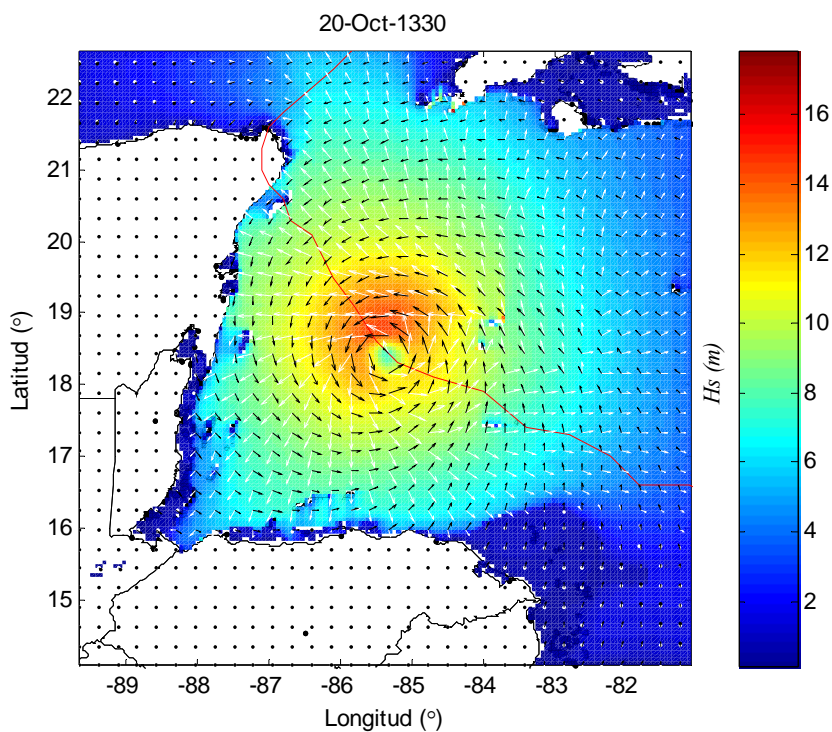


Figura 30. Campo de altura significativa, H_s , correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hrs. Escala de colores en metros. Dirección del oleaje asociada al pico espectral, flechas blancas. Dirección del viento, flechas negras. Trayectoria del huracán Wilma, línea roja.

Un acercamiento al campo de oleaje de la Figura 30 se muestra en la Figura 31, en el cual se muestra la distribución de los puntos (2 al 34) alrededor del huracán. El punto 2 se encuentra ubicado en el ojo del huracán y el resto (3-34) alrededor de él. La línea roja nos indica la trayectoria de Wilma proporcionada por el NHC.

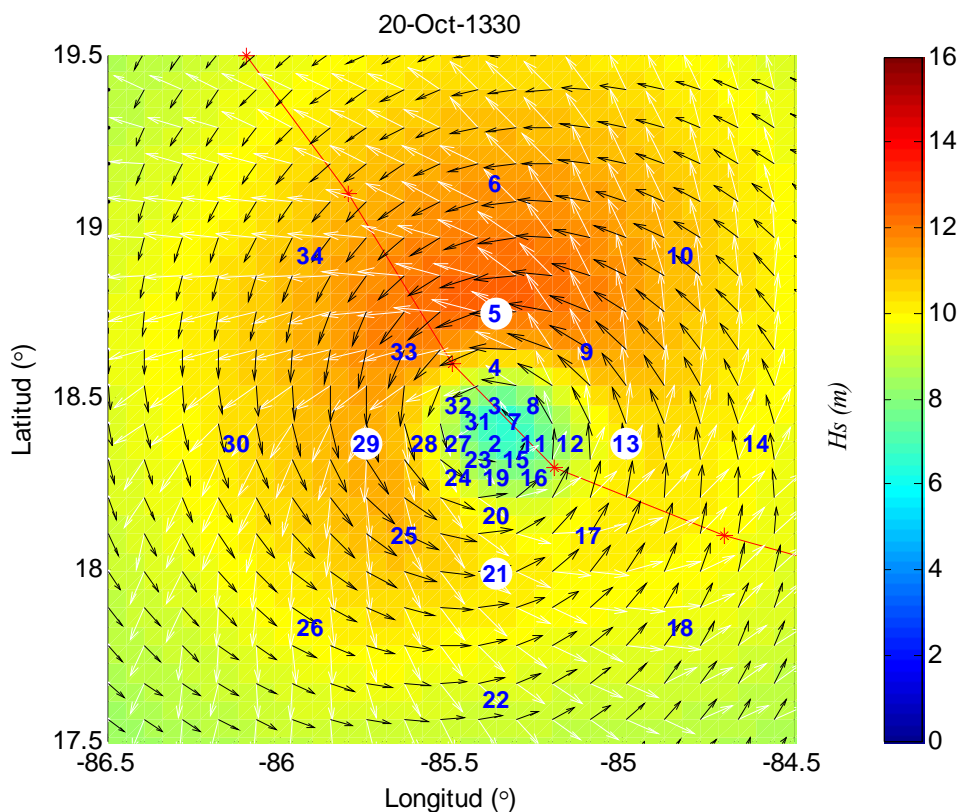


Figura 31. Acercamiento del campo de altura significativa, H_s , correspondiente al día 20 de octubre de 2005 a las 13:30 hrs. Escala de colores en metros. Distribución de los puntos 2 al 34. Dirección del oleaje asociada al pico espectral, flechas blancas. Dirección de propagación del viento, flechas negras. Trayectoria del huracán Wilma, línea roja.

La Figura 31, aparte de mostrar el campo de H_s , también nos muestra las direcciones asociadas al pico espectral (flechas blancas) y la dirección del viento. Se observa como muy cerca del ojo del huracán ambas direcciones están alineadas y conforme nos alejamos del ojo del huracán difieren entre si. En el estudio de Moon *et al.* 2003, encontraron este comportamiento de las direcciones, cerca del ojo del huracán están alineadas y con el mismo sentido de la dirección del viento; y al alejarnos del ojo del huracán el ángulo entre ambas direcciones aumenta.

El espectro direccional y los términos fuentes para el punto 2 (ojo del huracán) se muestran en la Figura 32. En la gráfica de la izquierda se presentan el espectro de densidad de energía con línea rosa y los términos fuente S_{in} , S_{nl4} y $S_{ds,w}$, con línea roja, azul y verde, respectivamente, y S_{tot} (suma de todos los términos, línea negra) calculado a partir de la ecuación (2), todos en función de la frecuencia. Del lado derecho en la parte superior se muestra el espectro direccional, la H_s (rojo) y T_p (azul), dirección asociada al pico espectral y dirección del viento, barra azul y negra, respectivamente. En la parte inferior se muestra el S_{tot} de forma direccional.

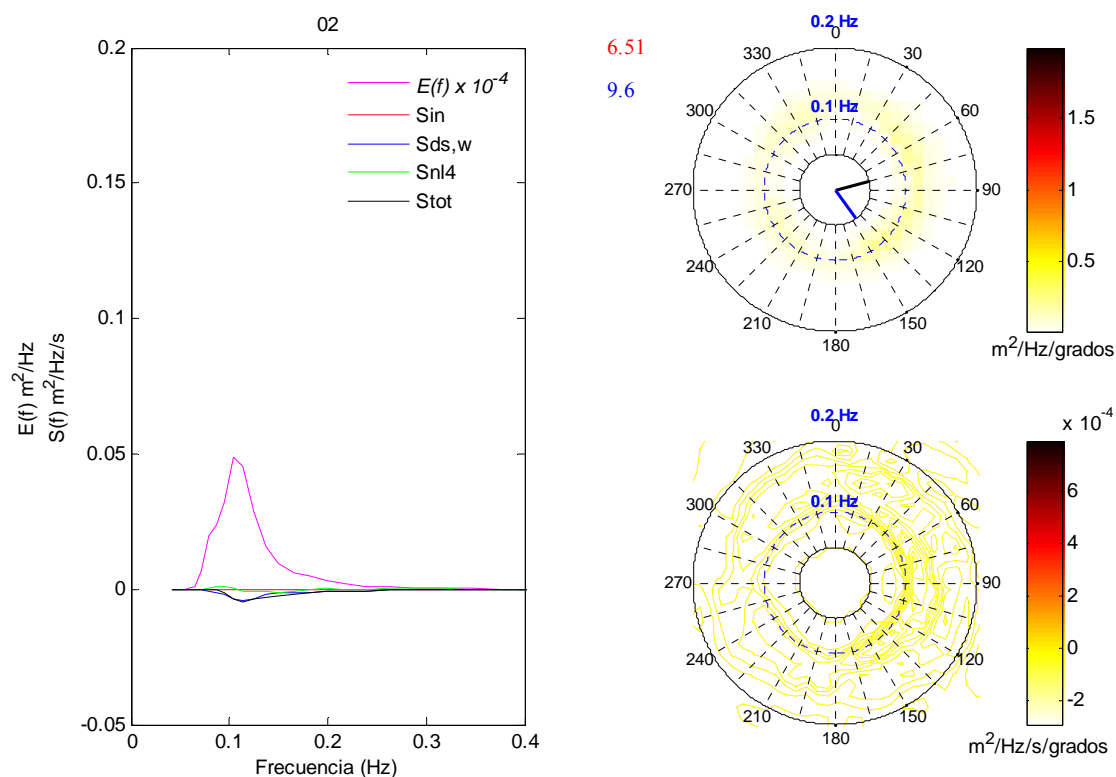


Figura 32. Punto 2. Espectro de Densidad de Energía en m^2/Hz , S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{s}$, en función de la frecuencia, línea rosa, roja, azul, verde y negra, respectivamente (izquierda). Espectro Direccional en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{grados}$, superior derecha. S_{tot} direccional en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{s}/\text{grados}$, inferior derecha. H_s (rojo) y T_p (azul).

En la gráfica del lado izquierdo se puede observar como la influencia del término S_{in} , es nula y se debe a que en el ojo del huracán la velocidad del viento es cero. Los términos fuentes que influyen en el balance de acción son el S_{nl4} distribuyendo la energía en las diferentes frecuencias y $S_{ds,w}$ como una pérdida de energía. El término S_{tot} en función de la frecuencia tomó la forma del término $S_{ds,w}$. En el espectro direccional se puede observar como la densidad de energía es muy baja en todas direcciones. El S_{tot} direccional en este punto es menor a cero, indicándonos que hay pérdida de energía ocasionada por $S_{ds,w}$. La H_s en este punto es de 6.51m y el T_p de 9.6s, indicándonos que en este punto el campo de oleaje está dominado por oleaje largo, no por oleaje generado localmente.

A continuación se presentan los resultados de los puntos 5, 13, 21 y 29 ubicados en el radio donde se presentó la velocidad máxima del viento (U_{max}).

En la Figura 33 se observan los resultados para el punto 5, al norte del ojo del huracán. Los términos S_{in} y $S_{ds,w}$ están en balance y el término S_{nl4} distribuye la energía en las diferentes frecuencias. El término S_{tot} en función de la frecuencia tomó la forma de S_{nl4} indicándonos que el espectro está dominado por interacciones no lineales del oleaje.

La H_s en este punto es de 12.2m y el T_p de 11.5s. En el espectro direccional se puede observar un sólo pico espectral en la frecuencia de 0.08 Hz, con una densidad de energía de $2 \text{ m}^2/\text{Hz}/\text{grados}$ y propagándose hacia el noroeste ($\approx 300^\circ$). Esta dirección de propagación del oleaje difiere de la dirección del viento local ($\approx 255^\circ$). La diferencia entre las direcciones también fue observada por Moon *et al.* 2003 y mencionan que se debe a la curvatura del campo de viento, es decir, que el oleaje dominante en cada uno de los puntos del huracán es generado por el viento soplando hacia la dirección tangencial en el radio de viento máximo.

El S_{tot} direccional en este punto nos indica una generación de energía cerca de la frecuencia de 0.1 Hz en una dirección $\approx 270^\circ$, esta dirección es muy parecida a la del viento local, lo cual nos indica que el oleaje es generado por este viento.

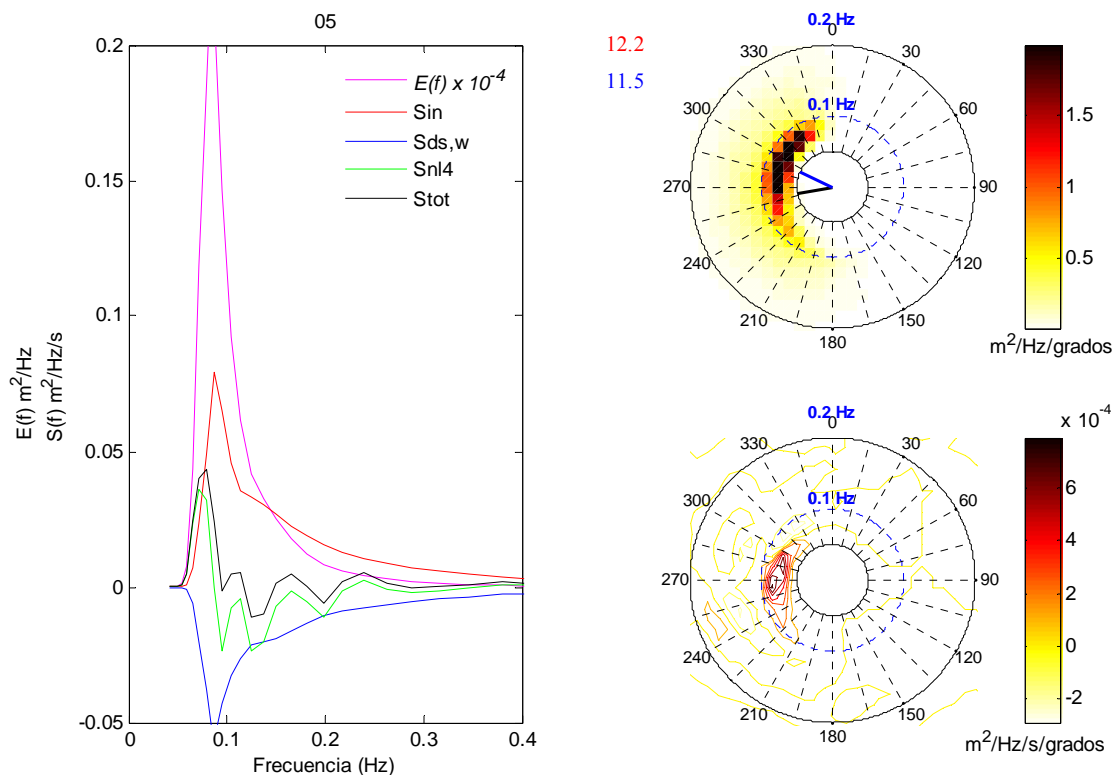


Figura 33. Punto 5. Espectro de Densidad de Energía en m^2/Hz , S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en $m^2/Hz/s$, en función de la frecuencia, línea rosa, roja, azul, verde y negra, respectivamente (izquierda). Espectro Direccional en $m^2/Hz/grados$, superior derecha. S_{tot} direccional en $m^2/Hz/s/grados$, inferior derecha. H_s (rojo) y T_p (azul).

Los resultados del punto 13 se muestran en la Figura 34. Del lado izquierdo tenemos el espectro en función de la frecuencia (línea rosa) con un sólo pico espectral. Los términos S_{in} y $S_{ds,w}$ están en balance y el término S_{nl4} distribuyendo la energía en las diferentes frecuencias. El término S_{tot} en función de la frecuencia tomó la forma de S_{nl4} indicándonos que el espectro está dominado por interacciones no lineales del oleaje.

La H_s en este punto es de 10.3m y el T_p de 10.5s. En el espectro direccional se puede observar un sólo pico espectral en la frecuencia de 0.1 Hz, con una densidad de energía menor a los 1.5 m^2/Hz y propagándose hacia el noreste ($\approx 15^\circ$). Esta dirección de propagación del oleaje también difiere de la dirección del viento local ($\approx 345^\circ$), al igual que en el punto 5.

El S_{tot} direccional en este punto nos indica una generación de energía cerca de la frecuencia de 0.08 Hz en una dirección $\approx 0^\circ$, esta dirección es muy parecida a la del viento local, lo cual nos indica que el oleaje es generado por este viento. Además que la energía generada en 0.08 Hz se movió hacia 0.1 Hz por las interacciones no lineales.

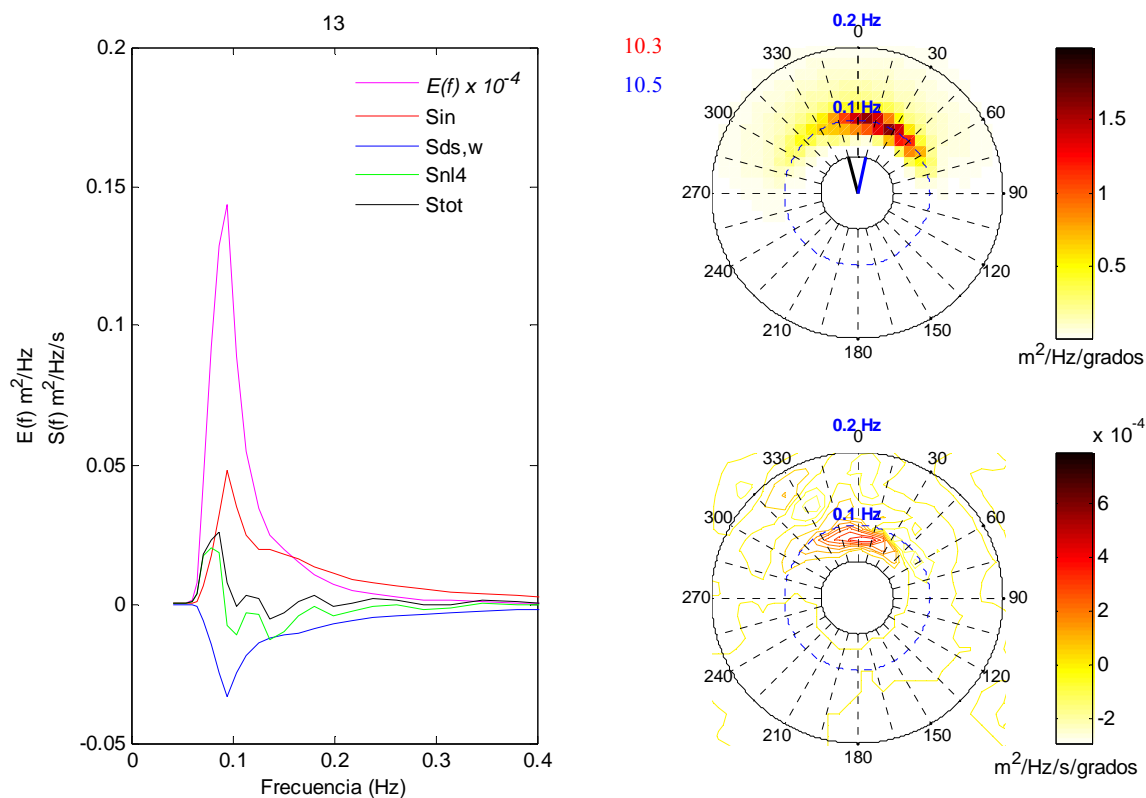


Figura 34. Punto 13. Espectro de Densidad de Energía en m^2/Hz , S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en $m^2/Hz/s$, en función de la frecuencia, línea rosa, roja, azul, verde y negra, respectivamente (izquierda). Espectro Direccional en $m^2/Hz/grados$, superior derecha. S_{tot} direccional en $m^2/Hz/s/grados$, inferior derecha. H_s (rojo) y T_p (azul).

Los resultados del punto 21 se muestran en la Figura 35. El espectro en función de la frecuencia (línea rosa) presenta un sólo pico espectral. Los términos S_{in} y $S_{ds,w}$ están en balance y el término S_{nl4} distribuyendo la energía en las diferentes frecuencias. El término S_{tot} en función de la frecuencia tomó la forma de S_{nl4} indicándonos que el espectro está dominado por interacciones no lineales del oleaje.

La H_s en este punto es de 10m y el T_p de 11.5s. El espectro direccional presentó un sólo pico espectral cercano a la frecuencia de 0.08 Hz, con una densidad de energía menor a los $1.5 \text{ m}^2/\text{Hz}$ y propagándose hacia el sureste ($\approx 127^\circ$). Esta dirección de propagación del oleaje también difiere de la dirección del viento local ($\approx 75^\circ$).

El S_{tot} direccional en este punto nos indica una generación de energía cerca de la frecuencia de 0.08 Hz en una dirección $\approx 90^\circ$, esta dirección es muy parecida a la del viento local, lo cual nos indica que el oleaje es generado por este viento.

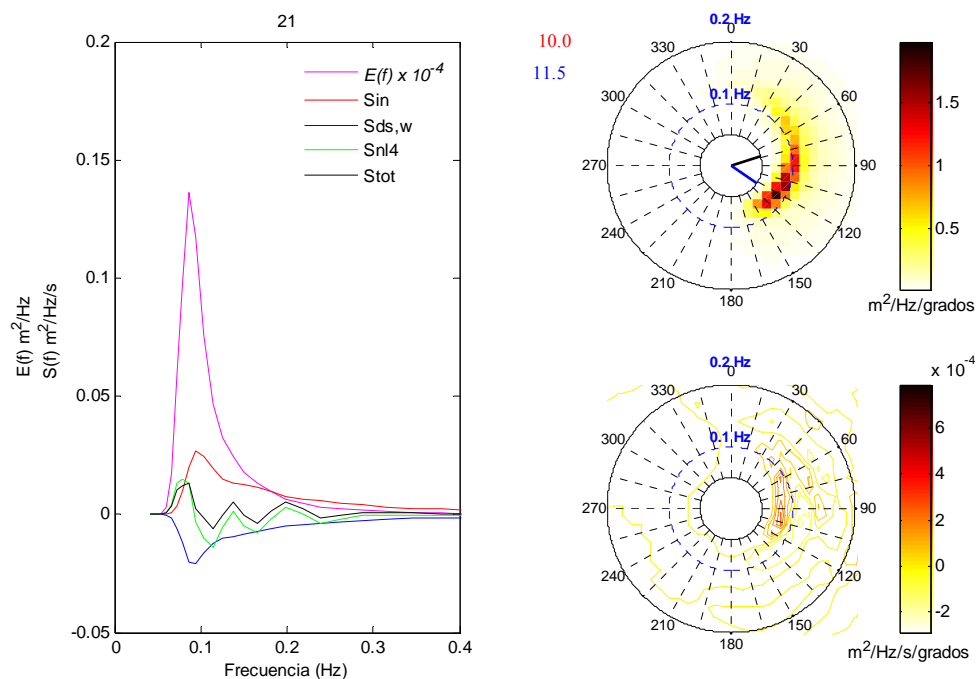


Figura 35. Punto 21. Espectro de Densidad de Energía en m^2/Hz , S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{s}$, en función de la frecuencia, línea rosa, roja, azul, verde y negra, respectivamente (izquierda). Espectro Direccional en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{grados}$, superior derecha. S_{tot} direccional en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{s}/\text{grados}$, inferior derecha. H_s (rojo) y T_p (azul).

Los resultados del punto 29 se muestran en la Figura 36. El espectro en función de la frecuencia (línea rosa) presenta un sólo pico espectral. Los términos S_{in} y $S_{ds,w}$ están en balance y el término S_{nl4} distribuyendo la energía en las diferentes frecuencias. El término S_{tot} en función de la frecuencia tomó la forma de S_{nl4} indicándonos que el espectro está dominado por interacciones no lineales del oleaje.

La H_s en este punto es de 11.1m y el T_p de 11.5s. En el espectro direccional se puede observar un sólo pico espectral cercano a la frecuencia de 0.08 Hz, con una densidad de energía mayor a los 1.5 m²/Hz y propagándose hacia el sur ($\approx 180^\circ$). Esta dirección de propagación del oleaje también difiere de la dirección del viento local ($\approx 150^\circ$).

El S_{tot} direccional en este punto presenta una generación de energía cercana a la frecuencia 0.7 Hz en una dirección $\approx 180^\circ$, esta dirección es muy parecida a la del viento local, lo cual nos indica que el oleaje es generado por este viento.

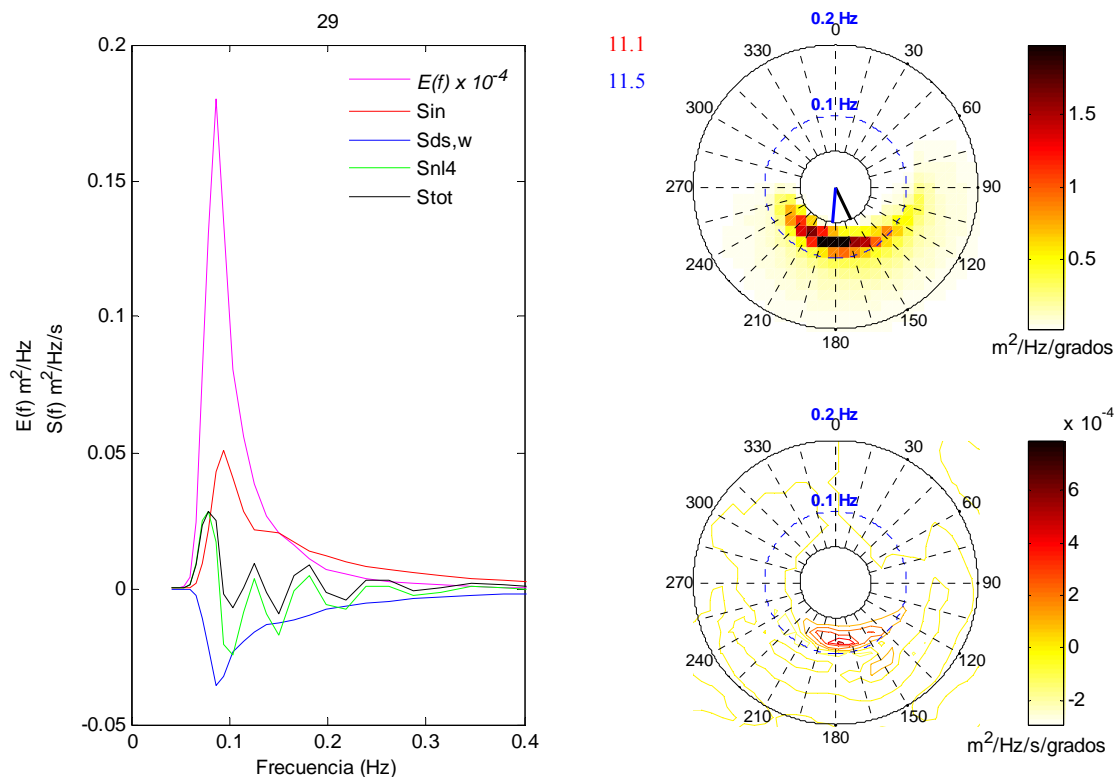


Figura 36. Punto 29. Espectro de Densidad de Energía en m^2/Hz , S_{in} , S_{nl4} , $S_{ds,w}$ y S_{tot} en $m^2/Hz/s$, en función de la frecuencia, línea rosa, roja, azul, verde y negra, respectivamente (izquierda). Espectro Direccional en $m^2/Hz/grados$, superior derecha. S_{tot} direccional en $m^2/Hz/s/grados$, inferior derecha. H_s (rojo) y T_p (azul).

En general, los términos fuente en los 5 puntos concuerda con Young (2006), donde menciona que los términos fuente S_{in} y $S_{ds,w}$ en el balance de acción, son los que determinan la cantidad total de energía del espectro y el término S_{nl4} controla la forma espectral redistribuyendo la energía en el intervalo de frecuencia.

Capítulo V

Conclusión

En este trabajo se realizaron 5 experimentos utilizando el modelo SWAN para la simulación del oleaje generado por el Huracán Wilma en el Mar Caribe, durante el periodo del 16 al 25 de octubre de 2005. Los resultados que se obtuvieron en este estudio fueron: campos de altura significativa y de la dirección asociada al pico espectral, series de tiempo de parámetros integrales del oleaje (H_s , T_p , $PkDir$) y espectros en función de la frecuencia y direccionales en dos puntos dentro del área de estudio. Estos resultados se compararon con mediciones *in situ* de la boya 42056 perteneciente a la NOAA y de un perfilador acústico utilizado en el proyecto “Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management” desarrollado por el Departamento de Oceanografía Física de CICESE y la UNAM. Por último se determinó la influencia de los términos fuente en el balance de acción.

Los resultados de las simulaciones SWAN-VO NARR y SWAN-VM NARR no mostraron diferencias entre los parámetros integrales del oleaje, espectros en función de la frecuencia y espectros direccionales debido a la baja intensidad de los vientos de NARR que dan como resultado valores similares del coeficiente de arrastre tanto en la versión original como en la versión modificada.

El uso del modelo SWAN en modo no estacionario mejora las simulaciones de los parámetros integrales del oleaje generado por los vientos del NARR con respecto a los resultados del modo estacionario, al ser comparados con las mediciones *in situ* en ambos puntos (Boya 42056 y PM).

Las simulaciones SWAN-VO HRD y SWAN-VM HRD mostraron diferencias entre sí, ya que los vientos de HRD presentan intensidades más altas de viento y por lo tanto los valores del coeficiente de arrastre son distintos en ambas versiones, lo cual nos indica que la limitación en el coeficiente de arrastre influye en los resultados.

En el punto Boya 42056, la simulación SWAN-VM HRD subestimó los valores de los parámetros integrales del oleaje; mientras que la simulación SWAN-VO HRD simuló mejor estos valores con respecto a los medidos.

En el punto PM, el uso del C_d limitado en las simulaciones con los campos de viento de HRD, simulan mejor los valores de los parámetros integrales del oleaje; mientras que la versión original los sobrestima con respecto a los medidos por el perfilador acústico. Esto se debe a que el huracán se intensificó al aproximarse a la costa.

Los espectros en función de la frecuencia y direccionales simulados por el modelo SWAN de los 5 experimentos presentaron una forma espectral unimodal, es decir, un sólo pico espectral, en comparación con los reportados por la boya que en algunos casos son espectros unimodales, bimodales y trimodales.

Los términos fuente que tuvieron efecto en el balance de acción fueron: S_{in} y S_{ds} como fuente y sumidero de energía, respectivamente y el S_{nl4} como distribuidor de la energía en las diferentes frecuencias. Los espectros en función de la frecuencia y direccionales alrededor del huracán fueron unimodales.

El modelo SWAN puede ser utilizado para simular los parámetros integrales del oleaje generados por el Huracán Wilma en el Mar Caribe, ya que reproduce bastante bien las alturas significante y aproximadamente los periodos asociados al pico espectral, ambos al compararlos con los medidos por la boya y el perfilador acústico.

El modelo SWAN mostró la capacidad de reproducir la estructura espacial del campo de alturas y direcciones del oleaje observadas en huracanes. Sin embargo, las implementaciones propuestas en este trabajo no lograron simular la complejidad de los espectros en función de la frecuencia y espectros direccionales observados en este y otros estudios, por lo tanto se recomienda seguir con el estudio en la modelación numérica del espectro direccional del oleaje generado por huracanes.

Referencias

- Booij, N., R.C. Ris, y L. H. Holthuijsen. 1999. A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.* 104(C4): 7649-7666.
- Cardone, V. J., R. E. Jensen, D. T. Resio, V. R. Swail y A. T. Cox. 1996. Evaluation of Contemporary Ocean Waves Models in Rare Extreme Events: The “Halloween Storm” of October 1991 and the “Storm of the Century” of March 1993. *J. Atmospheric and Oceanic Technology.* 13. 198-230.
- DIWASP, a directional wave spectra toolbox for MATLAB®: User Manual. Research Report WP-1601-DJ(V1.1), Center for Water Research, University of Western Australia.
- Donelan, M. A., B. K. Haus, N. Reul, W. J. Plant, M. Stiassnie, H. C. Graber, O. B. Brown y E. S. Saltzman. 2004. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Gephys. Research Lett.* 31: L18306.
- Guerrero Moreno, L. 2004. Identificación y seguimiento de remolinos en el Mar Caribe. CICESE. Tesis de Maestría. 86 pp.
- Holthuijsen, L.H. 2008. *Waves in oceanic and coastal water.* Cambridge U. Press. Segunda edición. United Kingdom. 387 pp.
- Jensen, R.E., V.J. Cardone y A.T. Cox, 2006. B. 9th International Wind and Wave Workshop. Septiembre 24-29 de 2006, Victoria, B.C.
- Kinsman, B. 1984. *Wind Waves, their generation and propagation on the ocean surface.* Prentice-Hall. N.J. 676 pp.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, M. Hasselmann, S. Hasselmann, P. A. E. M. Janssen. 1994. *Dynamics and modeling of ocean waves.* Cambridge University. Press. Primera edición. United Kingdom. 532 pp.
- Moon, I. J., I. Ginins, T. Hara. H. L. Tolman, C.W. Wright y E.J. Walsh. 2003. Numerical Simulation of Sea Surface Directional Wave Spectra under Hurricane Wind Forcing. *J. Phys. Oceanogr.* 33:1680-1706.
- Moon, I. J., I. Ginins, T. Hara. 2004a. Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part II: Behavior of drag coefficient under tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.* 61 (19): 2334-2348.

- Moon, I. J., I. Ginins, T. Hara y B. Thomas. 2007. A Physics-Based Parameterization of Air-Sea Momentum Flux at High Wind Speeds and Its Impact on Hurricane Intensity Predictions. *Mon. Wea. Rev.* 135:2869-2878.
- Pasch, R.J., E. S. Blake, H. D. Cobb III. y D. P. Roberts. 2006. Tropical Cyclone Report: Hurricane Wilma. National Hurricane Center. NOAA. 27 pp.
- Powell, M. D., S. H. Houston, L. R. Amat y N. Morisseau-Leroy. 1998. The HRD real-time hurricane wind analysis system. *J. Wind Engineer. Ind. Aerody.*, 77 y 78:53-64.
- Powell, M. D., P. J. Vickery y T. A. Reinhold. 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*. 422: 279-283.
- Ris, R. C., L. H. Holthuijsen y N. Booij. 1999. A third-generation wave model for coasta regions, 2. Verification. *J. Geophys. Res.* 104(C4): 7667-7681.
- Vega Puente, R. 1999. Análisis numérico del ancho del espectro direccional del oleaje en regiones cercanas a la costa. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE. 54pp.
- Walsh, E. J., C. W. Wright, D. Vandemark, W. B. Krabill, A. W. Garcia, S. H. Houston, S. T. Murillo, M. D. Powell, P. G. Black y F.D. Marks Jr. 2002. Hurricane Directional Wave Spectrum Spatial Variation at Landfall. *J. Phys. Oceanogr.* 32:1667-1684.
- Wright, C.W., E. J. Walsh, D. Vandemark, W. B. Krabill, A. W. Garcia, S. H. Houston, M. D. Powell, P. G. Black y F. D. Marks. 2001. Hurricane Directional Wave Spectrum Spatial Variation in the Open Ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 31:2472-2488.
- Wu J. 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *J. Geophys. Res.* 87(C12):9704-9706.
- Xu, F., W. Perrie, B. Toulany y P.C. Smith. 2007. Wind-generated waves in Hurricane Juan. *Ocean Modelling.* 16:188-205.
- Young, I. R. 1999. Wind generated ocean waves. Elsevier Science. Amsterdam. Primera edición. 288 pp.
- Young, I. R. 2006. Directional spectra of hurricane wind waves, *J. Geophys. Res.* 111(C08020): 1-14.