



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERIA CIVIL – HIDRÁULICA

IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA OPERACIONAL DE PREDICCIÓN  
DE OLEAJE PARA LAS COSTAS Y MARES MEXICANOS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MARIA ALEJANDRA LIRA PANTOJA

TUTOR  
CHRISTIAN M. APPENDINI ALBRECHTSEN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. DICIEMBRE 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Torres Freyermuth Alec  
Secretario: Dr. López González José  
Vocal: M. en C. Appendini A. Christian M.  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dra. Enriquez Ortiz Cecilia E.  
2<sup>d o</sup>. Suplente: Dr. Padilla Hernández Roberto

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Sisal, Yucatán, México

**TUTOR DE TESIS:**

M. en C. Christian M. Appendini A.



-----  
**FIRMA**

A Joaquín, Ligia, Geny y Elí quienes me han  
apoyado siempre

*“Progress is often a sort of run between Achilles and the  
turtle, covering at each time step a given fraction of the  
missing path”.*

Luigi Cavaleri

## Abstract

An operational wave prediction system was implemented with high resolution for the Gulf of Mexico and the Mexican Caribbean Sea. This system, the Nearshore Wave Prediction System (NWPS), was developed by the Environmental Modeling Center to cover the local demands of high resolution wave information for the coasts of the United States of America. The system is now currently in its Beta testing phase, functioning at the National Centers for Environmental Prediction, some Weather Forecast Offices in the U.S. and now at the LIPC-UNAM (Engineering and Coastal Processes Laboratory-National Autonomous University of Mexico) thanks to the International Project #4314 entitled “Sistema operacional de predicción de oleaje para las costas y mares mexicanos”, granted to LIPC by the Institute of Engineering from UNAM.

The implementation was done for different regional domains that cover the North Atlantic, Gulf of Mexico and Caribbean Sea, as well as with high resolution local domains that use the boundary conditions generated in the regional domains. The selection criteria for the local domains, covering the desired coastal areas, were based of the scientific interest and operational significance for maritime activities. The areas in which the system was implemented in high resolution are the coasts of Yucatan, Quintana Roo, and Veracruz. The core model within the NWPS, the third generation model Simulating Waves Nearshore (SWAN), was run in hindcast mode for its validation using the Climate Forecast System Reanalysis winds as forcing. The results were compared against buoy measurements from the National Data Buoy Center located in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea for deep waters and with available measurements from Acoustic Doppler Current Profilers located in shallow waters at Sisal, Yucatan.

The hindcast results show good correlation of the model results against the measured data. This is because both the CFSR winds accurately represent the weather conditions during the simulated periods and because of the high resolution bathymetry in the local domains that was created by incorporating various surveys collected by Mexican institutions. On the other hand, the model was run in forecast mode, using the winds of the Global Forecast

System (GFS), which is the main source for wind fields to force the model within the NWPS. The results show that the quality of the forecast is acceptable within the first 48 hours, after this time, the accuracy begins to decrease. The NWPS forecast can be used as an information source for decision making related to coastal activities, as well as a research tool for ocean waves and the coastal processes.

## Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema operacional de predicción de oleaje para el Golfo de México y el Mar Caribe mexicanos. Este sistema es el *Nearshore Wave Prediction System* (NWPS), desarrollado por el *Environmental Modeling Center*<sup>1</sup> para cubrir las demandas locales de información de oleaje en alta resolución en las costas de EE.UU. El sistema se encuentra funcionando de manera experimental en el NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), en algunas oficinas de predicción del tiempo (*Weather Forecast Offices*) y ahora en el LIPC-UNAM (Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros-Universidad Nacional Autónoma de México) bajo el Proyecto Internacional #4314 titulado “Sistema operacional de predicción de oleaje para las costas y mares mexicanos” del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La implementación del NWPS se realizó en varios dominios regionales que cubren parte del Atlántico, el Golfo de México y el Mar Caribe y dominios locales en alta resolución geográfica, que utilizan la información generada en los dominios regionales. El criterio de selección para los dominios locales fue en base al interés científico e importancia operacional para actividades marítimas, así como disponibilidad de datos para validación. Las zonas implementadas con alta resolución fueron las costas de Yucatán, Quintana Roo y Veracruz. Para la validación del NWPS se implementó el sistema a modo de retroanálisis utilizando vientos del *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) como forzamiento para el SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), que es uno de los modelos de oleaje dentro del NWPS.

El sistema se validó con mediciones de boyas del *National Data Buoy Center* localizadas en el Golfo de México y Mar Caribe en aguas profundas y con mediciones de perfiladores acústicos de corrientes (*Acoustic Doppler Current Profilers*, ADCP) instalados en aguas someras en Sisal, Yucatán. Los resultados a modo de retroanálisis muestran una correlación

---

<sup>1</sup>El EMC es parte de la *National Oceanographic and Atmospheric Administration*  
<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/nwps/>

satisfactoria de los datos medidos con los del modelo, tanto en aguas profundas como en aguas someras. Esto se atribuye tanto a que los vientos del CFSR representan adecuadamente las condiciones presentes en las fechas simuladas, como a la batimetría de alta resolución en los dominios locales, la cual incorpora datos de campañas de campo recientes.

El modelo a modo de pronóstico se habilitó con los vientos del *Global Forecast System* (GFS), que son la fuente de campos de viento para forzar el modelo dentro del NWPS. La evaluación del pronóstico muestra que es aceptable por las primeras 48 horas, a partir de las cuales empiezan a decaer. Se considera que el NWPS puede utilizarse como una importante fuente de información para la toma de decisiones relacionadas a las actividades costeras y navegación marítima, así como una herramienta para la investigación del oleaje y de los procesos costeros con los cuales éste interactúa.



## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado con número (CVU/Becario): 488043/278161. Asimismo, agradezco al Proyecto Internacional 4314 “*Sistema operacional de predicción de oleaje para las Costas y Mares Mexicanos*” del Instituto de Ingeniería de la UNAM bajo el cual se llevó a cabo este estudio.

A Ismael Mariño del CINVESTAV Mérida por la batimetría de la zona de Progreso, Yucatán. A Ing. Sokaris De la Luz Aranda de la Administración Portuaria de Veracruz por la batimetría de la zona de Veracruz, Veracruz. Al M. en I. Roberto Uribe Romero de la Comisión Federal de Electricidad por la batimetría de la zona de Tuxpan, Veracruz.

A Christian M. Appendini por tu dirección, consejos, tiempo, apoyo, confianza y sobretodo paciencia gracias a los cuales esta tesis ha sido posible. También por la minuciosa revisión de este escrito que hizo que mejorara substancialmente. Aprecio todo lo que has hecho para apoyarme desde que entré al LIPC con mi tesis de licenciatura, pasando por los estudios de maestría y culminando con la tesis de maestría como mi tutor, muchas gracias por todo.

A Roberto Padilla Hernández por aceptar co-dirigir esta tesis y por introducirme al interesante mundo del modelado de oleaje. Gracias por tu invaluable apoyo en mi estancia en el extranjero, los consejos, disposición para resolver dudas, enseñanzas acerca del SWAN y de los procesos de transformación del oleaje, así como por la amistad y los consejos personales que también llegaste a brindarme.

A los miembros de mi comité de Tesis: Dra. Cecilia Enriquez, M en C. Christian Appendini, Dr. Roberto Padilla, Dr. Alec Torres y Dr. José López por la revisión de esta tesis y por sus comentarios que ayudaron a mejorarla.

Gracias a los miembros del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, de la Unidad Académica de Sisal por todo su apoyo y enseñanzas desde el momento en que me uní al grupo hace ya 5 años. A los investigadores Paulo Salles, Alec Torres, Christian Appendini, Tonatiuh Mendoza, José López, Bernardo Espinoza, Elena Ojeda y Gabriela Medellín por darme la oportunidad de pertenecer al grupo. A los compañeros estudiantes que han pasado

por el instituto a lo largo de este tiempo por la compañía y los buenos momentos: Rogelio, Martín, Wilmer, Yearim, Fernando, Lucía Robles (mi hermana española), Joost, Dani Lanza, Leo, José Carlos, María, Juan Luis, Pablo, Rafa, Mauricio, Pedro y todos con los que he compartido alguna etapa de mi estancia aquí.

En especial a mis compañeros de maestría y también compañeros de casa Chuy y Daniel por la convivencia y apoyo en estos dos años y por todos recuerdos que me llevo de ustedes.

Gracias a Daniel Pastrana por su orientación con problemas de programación. Asimismo a Pablo Ruiz por su apoyo con MatLab para generar los códigos de transformación de campos de viento. Gracias a Rogelio Torres y a Jacobo de la Roza por leer parte de esta tesis y darme su opinión acerca de la redacción.

A special thanks to the Marine Modeling and Analysis Branch of the Environmental Modeling Center, for its warm welcome and inclusion to the group during my stay there and to Hendrik Tolman for the invitation. Especially, thanks to Andre van der Westhuysen for all the guidance on the wave model and the SMS software; his availability and dedication to work are exemplar. Thanks to Jose-Henrique Alves and Deanna Spindler for the advice about the forecast evaluation, Todd Spindler for the thorough instructions of how to use the NCToolbox and, Aruun Chawla and Ilya Rivin for their concern and advice about my professional future. The experience and the knowledge acquired while working with all of you has been invaluable.

To Nick for the amazing music that got me through the most difficult days of work, also for your opinion on some graphics in this work.

Quiero hacer un agradecimiento especial al Dr. Alec Torres Freyermuth, por introducirme al mundo de la ingeniería costera. No puedo expresar con palabras la admiración y respeto que te tengo. Eres un ejemplo a seguir y estaré siempre agradecida por tu paciencia, explicaciones, consejos y confianza puesta en mí desde el momento en que me uní al LIPC.

A Emmanuel para quien no tengo palabras y con quien he compartido los mayores logros de mi vida.

Por último y no menos importante, a mis padres por todo su apoyo sin el cual, no hubiese podido llegar a donde estoy ahora.

# Contenido

I.	Introducción .....	1
1.1	Motivación .....	6
1.2	Objetivos .....	6
II.	Marco Teórico.....	7
2.1	Antecedentes .....	7
2.2	Los modelos espectrales de oleaje .....	9
2.3	Sistema NWPS.....	10
2.4	El modelo SWAN .....	12
III.	ÁREA DE ESTUDIO .....	14
IV.	METODOLOGÍA .....	17
4.1	BASES DE DATOS .....	18
4.1.1	Datos batimétricos.....	18
4.1.2	Datos de vientos .....	19
4.1.3	Datos de oleaje .....	24
4.2	Pre procesamiento de datos.....	28
4.2.1	Generación de mallas batimétricas .....	28
4.2.2	Generación de campos de viento.....	31
4.3	Evaluación del modelo a modo de retroanálisis.....	34
4.3.1	Dominio computacional .....	34
4.3.2	Campos de forzamiento .....	35
4.3.3	Parametrizaciones físicas .....	37
4.4	Evaluación del modelo de oleaje a modo de pronóstico .....	39

4.4.1	Validación del modelo de oleaje .....	41
4.5	Implementación del NWPS en modo operacional .....	42
V.	Resultados y discusiones.....	46
5.1	Evaluación del modelo a modo de retroanálisis.....	46
5.2	Evaluación del modelo a modo de pronóstico .....	60
VI.	Conclusiones .....	76
VII.	Futuras Líneas de Investigación.....	79
VIII.	Bibliografía .....	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Altura de ola significativa para un paso de tiempo del modelo global WWIII ( <a href="http://www.stormsurf.com/">http://www.stormsurf.com/</a> ). .....	2
Figura 2: La suma de diferentes componentes armónicos con amplitudes y fases constantes pero aleatorias crea una superficie irregular ( <a href="http://geology.uprm.edu/Morelock/waves.htm">http://geology.uprm.edu/Morelock/waves.htm</a> ). .....	8
Figura 3: Partición (izquierda) y rastreo del oleaje en sus diferentes componentes (derecha) (Westhuysen, 2013). .....	11
Figura 4: Dominios regionales del sistema de pronóstico. ....	15
Figura 5: Mallas locales en donde se implementó el sistema NWPS en alta resolución. ..	16
Figura 6: Diagrama de flujo para la implementación del NWPS en mares mexicanos. ....	17
Figura 7: Series temporales de intensidad de viento y dirección de Junio-Agosto 2006 de la boya NDBC 42002 (puntos negros) con los vientos tomados del CFSR (tomado de Ruiz, 2013). .....	20
Figura 8: Dominio del CFSR ( <a href="http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2">http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2</a> ). .....	22
Figura 9: Velocidad del viento a una altura de 10 m para el 08/04/2014 a las 0300 UTC obtenido con el Global Forecast System. ....	24
Figura 10: Localización de las boyas del NDBC en el Golfo de México utilizadas para la validación del modelo de oleaje. ....	26
Figura 11: Localización de los 3 ADCPs ubicados en la costa Noroeste del estado de Yucatán .....	27
Figura 12: Malla del Atlántico Norte con una resolución de 20min. ....	29

Figura 13: Malla del Golfo de México con resolución de 1 min. En los paneles superiores se muestra la integración de las diferentes fuentes batimétricas para alcanzar la resolución deseada.....	30
Figura 14: Datos de batimetría de cartas náuticas para la zona de Veracruz (panel izquierdo) y batimetría interpolada a la malla de 10 seg (panel derecho).....	31
Figura 15: Rapidez del viento obtenida del CFRS mostrando un Norte en el Golfo de México durante enero de 2006 con una resolución horizontal de 0.3°.....	32
Figura 16: Rapidez del viento obtenida del GFS para el 08/abril/2014 con una resolución horizontal de 0.5°.....	33
Figura 17: Batimetría utilizada para la malla computacional en donde se ubica la posición de los diferentes ADCPs de donde se obtuvieron mediciones para este estudio. ....	34
Figura 18: Inestabilidades generadas en la Hs (m) al activar los cálculos de refracción para el dominio del Atlántico Norte (panel superior) y Hs (m) obtenida al desactivar los cálculos de refracción (panel inferior). ....	36
Figura 19: Inestabilidades generadas en la Hs (m) al activar los cálculos de refracción para el dominio del Golfo de México (panel superior) y Hs (m) obtenida al desactivar los cálculos de refracción (panel inferior). ....	37
Figura 20 : Representación de los intervalos de 120h tomados para cada ciclo de predicción del GFS. Se tomaron los ciclos de las 00 y 12 horas a partir del día 5. ....	39
Figura 21: Esquema de la creación de las nuevas series de tiempo para obtener los intervalos de predicción a cada 12 horas. ....	40
Figura 22 : Ejemplo de las salidas del modelo (campos básicos) para el Golfo de México en donde se muestra: a) la altura de ola significativa, b) período pico, c) velocidad de viento y d) altura significativa de swell. ....	43

Figura 23: Salida del NWPS en donde se muestra la batimetría de la malla del sur del Golfo de México y Mar Caribe Mexicano. ....	44
Figura 24: Espectro de energía unidimensional en la localidad de la boya 42056. ....	44
Figura 25 : Gráfica Gerling-Hanson en la localidad de la boya 42001, una de las salidas del NWPS. ....	45
Figura 26: Series de tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje y rapidez de viento para la boya 42001 durante un evento de Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011 (No se registraron datos de la DMO en esta boya durante esas fechas). ....	47
Figura 27: Series de tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje y velocidad de viento para la boya 42055 durante un evento de Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011.....	47
Figura 28: Series de tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje y velocidad de viento para la boya 42055 durante un evento de Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011.....	48
Figura 29: Diagramas de dispersión de la Hs, Tp, dirección media de oleaje y rapidez del viento para la boya 42001. ....	49
Figura 30: Diagramas de dispersión de la Hs, Tp, dirección media de oleaje y rapidez del viento para la boya 42055. ....	50
Figura 31: Diagramas de dispersión de la Hs, Tp , dirección media de oleaje y rapidez del viento para la boya 42056. ....	51
Figura 32: Series de tiempo de Hs para las boyas 42003, 42055 y 42056 de la NDBC para el período del 07 al 22 de abril de 2014. ....	53

Figura 33: Series de tiempo de la rapidez del viento para las boyas 42055 y 42056 de la NDBC para el período del 07 al 22 de abril de 2014. ....	53
Figura 34: Series de Tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje para el ADCP situado en la costa de Yucatán durante un evento de <i>Norte</i> ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011.....	56
Figura 35: Series de Tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje de las mediciones del ADCP situado a 10m de profundidad enfrente de Sisal entre el 07 y el 22 de abril de 2014. ....	58
Figura 36 : Series de Tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje para el ADCP situado a 4m de profundidad enfrente de Sisal entre el 07 y el 22 de abril de 2014. ....	58
Figura 37: Series de tiempo de Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para todos los ciclos de predicción correspondientes a la localidad de la boya 42003.....	60
Figura 38: Series de tiempo de Hs de las diferentes ventanas de predicción en la localidad de la boya 42003. ....	61
Figura 39: Series de tiempo de la rapidez del viento para las diferentes ventanas de predicción en la boya 42003. ....	62
Figura 40: Diagramas de Taylor de la Hs para los diferentes intervalos de predicción del modelo de oleaje en las localidades de las boyas del NDBC.....	64
Figura 41: Diagramas de Taylor de la rapidez del viento para los diferentes intervalos de predicción del GFS en las boyas del NDBC. ....	66
Figura 42: Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 0 hasta 36 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Sentinel.....	67



Figura 43: Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 36 hasta 72 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Sentinel.....	68
Figura 44: Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 72 hasta 120 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Sentinel.....	69
Figura 45 : Diagrama de Taylor de la Hs para las diferentes ventanas de predicción en Sentinel. ....	71
Figura 46 : Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 0 hasta 36 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Monitor.....	72
Figura 47 : Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 36 hasta 72 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Monitor.....	73
Figura 48: Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 72 hasta 120 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Monitor.....	73
Figura 49 : Diagrama de Taylor de la Hs para las diferentes ventanas de predicción en Monitor. ....	74

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Información de las boyas del NDBC utilizadas para validación del modelo espectral de oleaje.....	26
Tabla 2: Dominios computacionales para la implementación del SWAN.....	35
Tabla 3 : Parametrizaciones físicas tomadas para correr el modelo sobre las mallas regionales y locales.....	38
Tabla 4: Parámetros estadísticos entre los resultados del modelo y las mediciones en las localidades de las 3 boyas de la NDBC para el Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011. Hs, Tp, dirección media del oleaje (DMO) y rapidez del viento (Viento).....	52
Tabla 5: Parámetros estadísticos de la Hs para las 3 boyas de la NDBC del 07 al 22 de abril de 2014.....	54
Tabla 6: Parámetros estadísticos de la rapidez del viento para las 2 boyas de la NDBC del 07 al 22 de abril de 2014.....	54
Tabla 7: Parámetros estadísticos de las mediciones del ADCP colocado en la costa de Yucatán para el Norte ocurrido el 24/11/2011.....	57
Tabla 8: Parámetros estadísticos de la Hs para los dos ADCPs enfrente de Sisal, Yucatán del 07 al 22 de abril de 2014.....	59
Tabla 9: Parámetros estadísticos de Hs calculados para las diferentes ventanas de predicción en las localidades de las 3 boyas de la NDBC.....	63
Tabla 10: Parámetros estadísticos de la rapidez del viento calculados para las diferentes ventanas de predicción en las localidades de las 3 boyas de la NDBC.....	65
Tabla 11: Parámetros estadísticos de la Hs calculados para las diferentes ventanas de predicción para Sentinel.....	71

Tabla 12 : Parámetros estadísticos de la Hs calculados para las diferentes ventanas de predicción para Monitor..... 74

# I. INTRODUCCIÓN

El oleaje es la forma más evidente de energía en los océanos. Las olas obtienen su energía del viento y al propagarse a través del océano llegan a zonas costeras en donde pueden provocar daños de manera directa por su impacto sobre la infraestructura (plataformas, termoeléctricas, navíos) y de manera indirecta provocar erosión de las playas por la generación de corrientes y transporte de sedimentos. El oleaje no sólo es relevante por sus impactos sobre el litoral sino que también juega un papel esencial en la hidrodinámica, vinculando la mayoría de los procesos físicos y biológicos en las zonas costeras (Padilla-Hernández, 2002). Cualquiera que haya tenido la oportunidad de observar el oleaje caótico y desordenado provocado por vientos de tormenta o un *swell*<sup>2</sup> ordenado y regular que llega a alguna playa, puede apreciar su complejidad. Esto ha llevado al estudio de los procesos de generación, propagación y disipación del oleaje, que permitan una mejor planeación de actividades costeras y marítimas. Estos estudios no son recientes, el oleaje ha sido estudiado desde los comienzos de la civilización por su relevancia en los procesos de los océanos y las zonas costeras. El hecho de que Aristóteles en su tratado “*Acerca del cielo*” (Gredos, 1996) haya escrito “*Igual que son los vientos la causa de las olas, no las olas de los vientos*”, pone en evidencia que al menos desde épocas tan antiguas como los años 384-322 A.C., se hicieron esfuerzos por comprender la generación y transformación del oleaje. Desde entonces se dedujo que el viento y las olas tienen un vínculo fundamental.

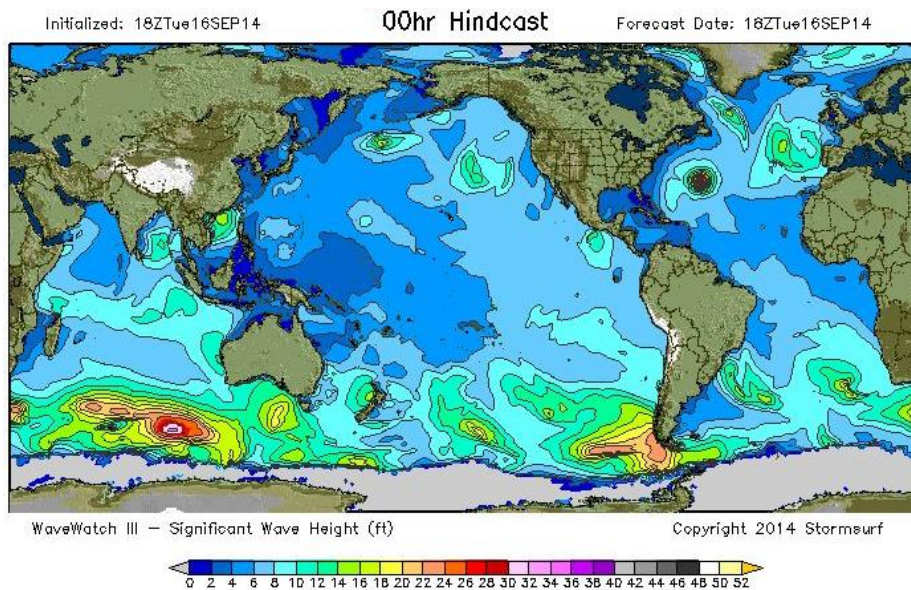
Los estudios de las olas abarcan una gran cantidad de áreas, pero en general se pueden agrupar en i) mecanismos de generación, ii) propiedades estadísticas incluyendo el espectro de oleaje, iii) propiedades no lineales incluyendo las interacciones entre los diferentes componentes del espectro, inestabilidad de olas y rotura, iv) experimentos en océanos y laboratorios, v) proyectos de aire-mar y ondas, vi) interacción entre oleaje y corrientes, y vii) métodos de pronóstico del oleaje (Mitsuyasu, 2002). El presente estudio se concentra

---

<sup>2</sup> Oleaje generado por viento de sistemas meteorológicos distantes y que se ha propagado fuera de su zona de generación.

en la última área, ya que el pronóstico preciso de los principales parámetros del oleaje es uno de los objetivos primordiales en la ciencia e ingeniería costera, por su relevancia en las actividades humanas.

Actualmente, los pronósticos de oleaje se basan en los modelos de oleaje de 3<sup>era</sup> generación en combinación con modelos atmosféricos. El avance en ambos tipos de modelos ha permitido la implementación de sistemas operacionales de oleaje a nivel global como el del NWS/NOAA/ NCEP<sup>3</sup> (Figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que utiliza el modelo de oleaje WAVEWATCHIII® (WWIII, Tolman 1997, 1999a, 2009), el modelo de predicción del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* basado en el modelo WAM (ciclo 4, grupo WAMDI, 1988, Komen et al., 1994), y, a nivel regional el *Mediterranean Wave Forecasting System* también perteneciente al *ECMWF*, entre otros.



**Figura 1: Altura de ola significativa para un paso de tiempo del modelo global WWIII**  
(<http://www.stormsurf.com/>).

<sup>3</sup> National Weather Service/ National Oceanographic and Atmospheric Administration/ National Centers for Environmental Predictions

Si bien existen una gran variedad de pronósticos de oleaje a nivel global y regional, son pocos los que existen a nivel local con la suficiente resolución para resolver los procesos de transformación e interacción del oleaje con rasgos batimétricos, infraestructura y otros procesos costeros, e.g. corrientes. Más aún, la mayoría de esos sistemas de predicción no incluyen procesos que ocurren en aguas someras, como la interacción con corrientes, transporte de sedimento y mareas de tormenta, que pueden provocar graves inundaciones.

En México, el aprovechamiento de las costas y mares es y ha sido imprescindible para el desarrollo del país; la pesca, transporte marítimo, explotación de hidrocarburos y el turismo son de las principales actividades económicas, con una contribución importante al Producto Interno Bruto. A pesar de lo anterior, y aunque todas las actividades mencionadas son afectadas por el estado del mar<sup>4</sup>, no existe en el país un programa de monitoreo sistemático o un sistema de predicción de oleaje de alta resolución, continuo y a largo plazo. Son precisamente los sistemas de pronóstico de oleaje los que permiten una mejor planeación en torno al estado del mar y por tanto pueden tener una repercusión directa en la economía del país y la seguridad de sus habitantes, de ahí la importancia de contar con un sistema de alta resolución para predicción de oleaje en la zona costera de México.

Entre los trabajos realizados para caracterizar el clima de oleaje en México a modo retoanálisis (*hindcast*), se encuentra el trabajo de Ruiz-Martínez et al. (2009), donde se caracteriza el oleaje y el viento para el período 1948-2007. Utilizan un modelo híbrido que consta del modelo de 3<sup>era</sup> generación WAM y el modelo de segunda generación HURAC (Silva et al., 2002). Utilizando los vientos del NCEP/NCAR simularon el oleaje para generar una base de datos con parámetros de viento y oleaje en intervalos de una hora durante los 60 años. El modelo se aplicó en el Pacífico entre las latitudes 12.5°N y 33.5° N y las longitudes 90.5°W y 119.5° W y en el Golfo de México entre las latitudes 15°N a 31°N y 80° W a 98°W. A partir de los resultados de esas simulaciones, generaron gráficas de

---

<sup>4</sup> Se entiende por estado de mar como la condición general de la superficie libre del mar en una cierta localidad a un momento dado y se caracteriza por la estadística de condiciones meteoceánicas, incluyendo la altura de ola, período y espectro de oleaje

probabilidad de ocurrencia conjunta, rosas de viento y oleaje, probabilidad de excedencia, análisis extremal y periodos de retorno. Por otro lado, Appendini et al. (2014) realizaron un retroanálisis del oleaje para describir el clima de oleaje en el Golfo de México y Mar Caribe y así establecer tendencias mensuales durante el período de 1979-2008 (30 años). Utilizaron los vientos del *North American Regional Reanalysis* (NAAR) como forzamiento para el modelo espectral de 3<sup>era</sup> generación MIKE 21 SW (Sorensen et al. 2004). Este modelo está basado en mallas no estructuradas y simula el crecimiento, decaimiento y transformación del oleaje en zonas costeras y aguas profundas. La validación del retroanálisis se hizo utilizando datos de boyas del *National Data Buoy Center* (NDBC), así como información de altimetría de oleaje (GlobWave). Concluyeron que el modelo tiene un desempeño satisfactorio en el Golfo de México, en donde el clima medio es modulado principalmente por Nortes y el clima extremo es modulado por Nortes y huracanes.

El único servicio de predicción de oleaje en México, de acceso público, es el proporcionado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM para el Pacífico, Golfo de México y el Mar Caribe, el cual puede ser consultado en su portal de internet<sup>5</sup>. Lleva por nombre “*Sistema de Pronóstico Numérico de Mareas de Tormenta, Marejadas y Oleaje (SIPROMMAT)*” para los mares mexicanos y zona costera, tanto del Atlántico como del Pacífico. Éste sistema de pronóstico se basa en tres modelos numéricos: i) el modelo atmosférico *Weather, Research and Forecasting* (WRF, Skamarock et al., 2008), ii) el modelo hidrodinámico *Advanced Circulation* (ADCIRC, Luettich and Westerink, 2004), y iii) el modelo de oleaje *Wave Watch III* (Tolman, 2009). El modelo WRF proporciona el campo de viento a 10 m sobre el nivel del mar para forzar los modelos ADCIRC y WWIII. El ADCIRC se utiliza para realizar el pronóstico de marea de tormenta y el WWIII para realizar el pronóstico de oleaje y marejada, los datos de entrada para el modelo WRF se obtienen del *Global Forecast System* (GFS)<sup>6</sup>. Una vez obtenidas las condiciones iniciales y de frontera, se corre el modelo de pronóstico meteorológico WRF; posteriormente se corre

---

<sup>5</sup> <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/>

<sup>6</sup> <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

el modelo WWIII en dos dominios, el primero para todo el Pacífico, utilizando como forzamiento los vientos del GFS y el segundo para los mares mexicanos y zonas adyacentes usando los vientos generados por el WRF. Después de esto, se corre el ADCIRC con los vientos del WRF y con las principales componentes de marea astronómica como condiciones iniciales. No obstante, su baja resolución geográfica (21 km de resolución horizontal promedio), no permite su uso operacional para algunas actividades costeras.

Por todo lo anterior, este trabajo busca cubrir esa necesidad de información de pronóstico de oleaje en alta resolución en las costas del litoral mexicano. Para esto, se implementó el *Nearshore Wave Prediction System* (NWPS), que es un sistema de predicción de oleaje en aguas someras desarrollado por el *National Centers for Environmental Predictions* (NCEP) en EE.UU. Este sistema utiliza el *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) como modelo espectral de oleaje para generar información crítica para la toma de decisiones acerca del estado del mar. Si bien el NWPS solamente se encuentra implementado en EE.UU., el grupo que desarrolló el sistema tiene en cuenta que cada región está sujeta a diferentes características ambientales, por lo cual está interesado en probar el sistema en otras partes del mundo (Westhuysen et al. 2011). Esto llevó al establecimiento de un proyecto internacional (4314) en donde colaboran NOAA/EMC/NCEP<sup>7</sup> y el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros de la Unidad Académica Sisal del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (LIPC-UNAM), para implementar el sistema NWPS en México.

La implementación de este sistema proveerá información importante a usuarios potenciales como las Administraciones Portuarias Integrales (APIs), Petróleos Mexicanos (PEMEX) y los gobiernos Estatales y Federal a través del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), para llevar a cabo sus operaciones cotidianas y durante eventos extremos.

---

<sup>7</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration/Environmental Modeling Center/ National Centers for Environmental Prediction



## 1.1 Motivación

La motivación de este trabajo viene de la necesidad de implementar un sistema de predicción de oleaje que funcione de manera operacional para generar pronósticos e información del oleaje de alta resolución en zonas costeras. Esta información permite hacer más eficiente y segura la planeación y operación de actividades marítimas (e.g. en puertos y plataformas), así como la implementación de planes de contingencia durante eventos extremos.

## 1.2 Objetivos

Objetivo general:

Habilitar un sistema operativo de predicción de oleaje para el Golfo de México y Mar Caribe con alta resolución en zonas costeras específicas.

Objetivos específicos:

1. Implementar el *Nearshore Wave Prediction System* (NWPS) para una zona amplia del Atlántico Norte, incluyendo la zona del Golfo de México y Mar Caribe, así como para algunas zonas costeras de interés con alta resolución (en los estados de Yucatán, Quintana Roo y Veracruz).
2. Validar el *Simulating Waves Nearshore* (SWAN), en aguas profundas de la forma en que esta implementado dentro del NWPS, utilizando como forzamiento los vientos del *Climate Forecast System Reanalysis* y comparando los resultados con las mediciones de las boyas del *National Data Buoy Center*.
3. Validar el desempeño del modelo SWAN en aguas someras utilizando información recolectada por el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de Ingeniería en la Unidad Académica de Sisal, Yucatán.
4. Evaluar la calidad del pronóstico de oleaje para diferentes ventanas de predicción (24, 48, 72 y 96 horas), utilizando como forzamiento los vientos de pronóstico del *Global Forecast System* (GFS).

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

Durante la segunda guerra mundial se hizo clara la necesidad de contar con pronósticos de las condiciones de oleaje para las operaciones marítimas que se llevarían a cabo durante el llamado “Día D”. La predicción del oleaje fue encomendada a los investigadores Harald Ulrik Sverdrup y Walter Munk del Instituto de Oceanografía Scripps, quienes se dieron a la tarea de desarrollar el primer esquema de predicción de oleaje (Sverdrup y Munk, 1947). Su trabajo se basó en el análisis dimensional, en donde se relaciona la velocidad, duración y el largo del área de afectación del viento (*fetch*<sup>8</sup>) con las características del oleaje. A partir de las bases sentadas en ese estudio se introdujo el concepto del espectro de energía por Pierson (1952) y el trabajo de Gelci et al. (1957), quienes dieron a conocer el pronóstico de oleaje basado en la ecuación de transporte de densidad de energía. El trabajo de Gelci et al. (1957) presenta una descripción más completa del estado de mar a partir del espectro de energía  $F(f, \theta)$ , y en su trabajo se describe la distribución de la energía del oleaje en diferentes frecuencias ( $f$ ) y direcciones de propagación ( $\theta$ ), donde la  $H_s$  puede ser calculada de la siguiente manera:

$$H_s = 4 \left[ \int \int F(f, \theta) df d\theta \right]^{0.5}$$

II.1

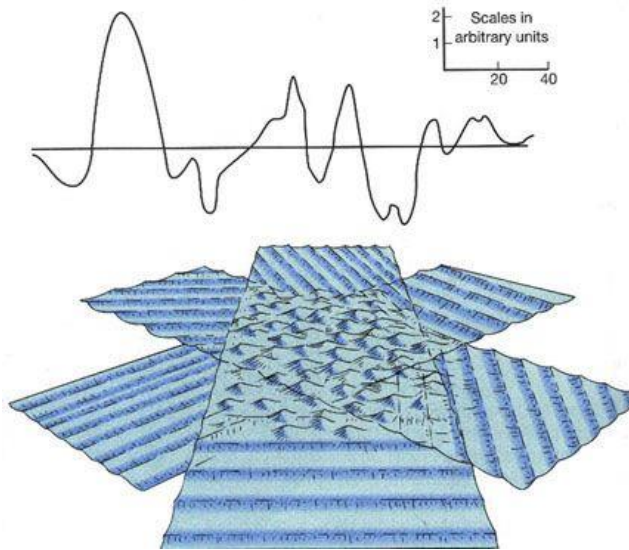
Una representación alternativa fue la de Kitaigorodskii (1962), quien caracteriza el campo de oleaje en posición y tiempo ( $x, t$ ) en términos del espectro direccional como una función de la velocidad del viento. Ésta representación se hizo popular debido a su adopción en la presentación de resultados del *Joint North Sea Wave Project field experiment* (JONSWAP,

---

<sup>8</sup> Se define como *fetch* al largo del área de generación del oleaje sobre la que sopla el viento.

Hasselmann et al., 1973), que proporcionó resultados importantes de la transferencia no lineal de energía en la evolución del espectro del oleaje en *fetches* finitos.

Así, fue durante los años 50s y 60s que se sentaron las bases teóricas necesarias para la descripción numérica de la evolución del oleaje basados en el enfoque espectral. Esta descripción permite concebir la superficie del mar como la superposición de un gran número de sinusoides, cada uno con una dirección, amplitud y período específico (Figura 2). Este enfoque proporcionó tanto una interpretación física de lo que podemos observar en el mar, como una herramienta matemática conveniente para el desarrollo de los modelos numéricos de oleaje de tipo espectral.



**Figura 2: La suma de diferentes componentes armónicos con amplitudes y fases constantes pero aleatorias crea una superficie irregular (<http://geology.uprm.edu/Morelock/waves.htm>).**

## 2.2 Los modelos espectrales de oleaje

La clasificación de los modelos numéricos espectrales del oleaje se basa en la ausencia o inclusión del término de interacciones no lineales (que determina la distribución de energía en un espectro); y, si está incluido dicho término, la clasificación se basa en la forma en que está expresado. Los modelos de oleaje de 1<sup>era</sup> generación son modelos espectrales que sólo toman en cuenta el crecimiento de la energía del oleaje y su disipación. En estos modelos, la disipación del oleaje local es generalmente modelada como un mecanismo de activación-desactivación, limitando la evolución espectral a algunas formas del espectro previamente descritas. Los modelos de 2<sup>nda</sup> generación utilizan parametrizaciones para las interacciones no lineales de oleaje. Finalmente, gracias al Proyecto de Modelación del Oleaje (*The Sea Wave Modeling Project-SWAMP*), se llegó a la conclusión de que los modelos de 2<sup>nda</sup> generación dan resultados pobres con vientos rápidamente cambiantes y sufren de limitaciones en la parametrización del término de transferencia no lineal de energía. Esta conclusión derivó de una revisión y clasificación integral de los modelos de 1<sup>era</sup> y 2<sup>nda</sup> generación basada en gran parte en el tratamiento del término de interacciones no lineales ( $S_{nl}$ ), y llevó a la formación del grupo WAM. Este grupo tuvo el propósito de desarrollar un modelo de oleaje de tipo espectral que represente explícitamente todos los procesos relevantes sin restricciones *a priori* sobre la evolución del espectro. El grupo WAM tuvo éxito en desarrollar un simple procedimiento para estimar  $S_{nl}$  de una manera “económica” desde el punto de vista computacional que es referida como la Aproximación de Interacciones Discretas (*Discrete Interaction Approximation*) de Hasselmann et al. (1985). Así, el modelo WAM fue el primer modelo operacional de 3<sup>era</sup> generación, a partir del cual se desarrollaron otros similares (e.g. MIKE 21 SW, WWIII, SWAN).

Bajo la suposición de la descripción espectral del oleaje y en conjunto con la ecuación de balance de energía, los modelos de 3<sup>era</sup> generación toman en cuenta los procesos no lineales sin restringir el espectro a una forma determinada. Esto, con ayuda del forzamiento obtenido de los modelos atmosféricos deterministas, resulta en predicciones del estado de mar con suficiente exactitud para fines prácticos. Sin embargo, ya que algunos términos fuente de energía siguen dependiendo de conocimiento empírico, es necesario continuar investigando para mejorar las bases físicas de éstos modelos.

## 2.3 Sistema NWPS

En los Estados Unidos de América, el NCEP utiliza un sistema de predicción de oleaje global que utiliza el WAVEWATCH III (WWIII, Tolman et al. 2002) como modelo central, con una resolución de malla de hasta 4 arc-min<sup>9</sup> ( $\approx 7.5\text{km}$ ) en las zonas costeras de EE.UU. A pesar de ser una excelente herramienta de pronóstico, no provee una guía lo suficientemente detallada para uso operacional en zonas costeras (Westhuysen et al. 2011). Por otro lado, la implementación en las distintas regiones de EE.UU. difiere dependiendo de los procesos físicos relevantes y las resoluciones requeridas en cada zona. De esta manera, es deseable que las oficinas de predicción del tiempo tengan control sobre la implementación local del modelo y produzcan pronósticos de oleaje consistentes con el forzamiento (campos de viento). Además de que los campos de viento deben ser producidos por el encargado de las simulaciones del oleaje, el cual cuenta con la suficiente experiencia para decidir cuál de las fuentes de vientos o combinación de ellas, es la adecuada para su dominio geográfico y temporal.

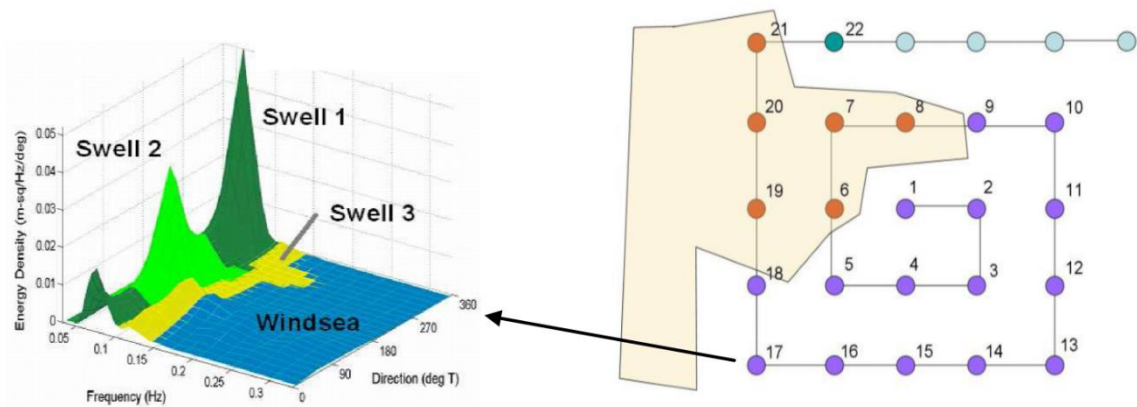
Debido a lo anterior, el NWS propuso un enfoque descentralizado de modelado de oleaje en zonas costeras que los llevó a desarrollar un sistema que satisficiera las necesidades de cada localidad. De esta manera el NCEP creó el NWPS, el cual tiene sus orígenes en el IFP-SWAN (Devaliere et al. 2007) y el SR-SWAN (Settlemaier et al. 2011). Este sistema fue diseñado para funcionar localmente de manera rutinaria y en demanda, utilizando como modelo central el modelo SWAN (Booij et al. 1999), o una versión para zonas costeras del WWIII (Padilla-Hernández, comunicación personal). Considerando que el NWPS corre en dominios locales, el usuario tiene diferentes opciones para especificar las condiciones de frontera, corrientes, vientos y otros campos como pueden ser información del hielo en zonas cercanas a los polos. Para el caso de EE.UU. se toman las condiciones de frontera del WWIII global del NCEP, los campos de corriente del *Real-Time Ocean Forecast System* (RTOFS)

---

<sup>9</sup> Un *arc-min* es una unidad de medida angular equivalente a 1/60 de un grado.

y los niveles del mar son provistos por el *Extratropical Surge and Tide Operational Forecast System* (ESTOFS), complementados por salidas probabilísticas del modelo P-Surge durante eventos de ciclones tropicales<sup>10</sup>. Una vez que se han elegido los campos de entrada (viento, corriente, nivel de mar, etc.) estos son procesados en el formato adecuado (pre-procesamiento) para el modelo de oleaje, y se procede a ejecutar el modelo.

Después de correr el modelo, el sistema procede a hacer la partición y rastreo de oleaje. Es decir, separa las diferentes componentes del campo de oleaje (partición) y sigue su evolución en el espacio y tiempo (rastreo) como se observa en la Figura 3. Entre los resultados del NWPS para todo el dominio computacional están los parámetros integrales del oleaje, espectros, y particiones del oleaje en sus diferentes componentes representados gráficamente.



**Figura 3: Partición (izquierda) y rastreo del oleaje en sus diferentes componentes (derecha) (Westhuysen, 2013).**

<sup>10</sup> Tomado de [http://www.stormsurge.noaa.gov/models\\_obs\\_modeling.html#psurge](http://www.stormsurge.noaa.gov/models_obs_modeling.html#psurge)

## 2.4 El modelo SWAN

El modelo SWAN es un modelo numérico de oleaje de 3<sup>era</sup> generación con código de acceso libre que constituye el modelo de oleaje del sistema NWPS. Se basa en una formulación euleriana donde la propagación del oleaje es formulada en una malla, en la cual cada punto tiene información de todo el espectro de oleaje, calculado a partir de la ecuación de balance de la densidad de acción espectral. Es forzado por vientos y además se le pueden introducir condiciones de frontera. Como en otros modelos de 3<sup>era</sup> generación los procesos de generación por viento, whitecapping (pérdida de energía por descrestamiento), interacciones no lineales entre olas y disipación por interacción con el fondo son representadas explícitamente (Booij et al. 1999). El SWAN describe la evolución del espectro de oleaje en base a la ecuación de balance de acción de oleaje que en su forma general se expresa en base a la siguiente ecuación (Hasselmann et al., 1973):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\delta}{\delta \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\delta}{\delta \theta}(c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

II.2

En donde  $\sigma$  es la frecuencia y  $\theta$  la dirección de propagación; el primer término representa el cambio local en el tiempo de la densidad de acción, el segundo y tercer términos representan la propagación de la acción en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $c_x$  y  $c_y$  respectivamente), el cuarto término representa los cambios en el dominio de las frecuencias relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes, y el quinto término representa los cambios en el dominio direccional. Las expresiones de estas velocidades de propagación son tomadas de la teoría lineal (Whitham, 1974).

El término  $S(\sigma, \theta)$  de la parte derecha de la ecuación II.2, es el término fuente de energía y es representado como la superposición de las diferentes contribuciones de energía por distintos procesos, como lo describe la ecuación II.3.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf} + S_{brk}$$

II.3

En donde  $S$  representa la contribución de varios procesos al total de la energía, donde  $S_{in}$  es el término debido a la transferencia de energía del viento a las olas,  $S_{ds}$  la disipación de energía por descrestamiento,  $S_{bf}$  representa la pérdida de energía debido a la fricción con el fondo,  $S_{brk}$  representa la disipación de energía por rotura de oleaje, y  $S_{nl}$  representa las interacciones no lineales entre olas, tanto interacciones entre cuádrupletas como interacciones triádicas. La formulación toma implícitamente en consideración las interacciones entre las olas y las corrientes.



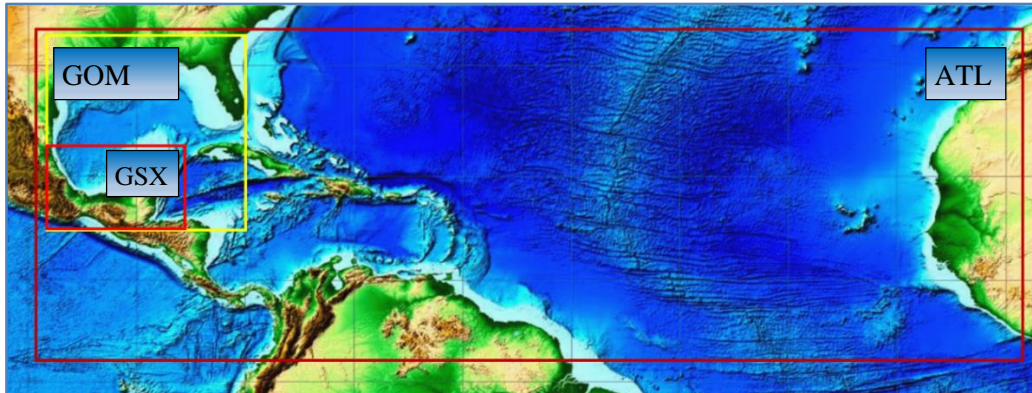
### III. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la zona costera mexicana del Golfo de México y Mar Caribe. La razón de implementar ahí el NWPS deriva de la falta de modelos operacionales en esta zona, además de que existe información de oleaje disponible para validar los modelos en aguas someras.

A fin de considerar el *swell* que llega a las zonas de interés, es necesario simular el oleaje generado tanto en el Atlántico Norte como en el Golfo de México y Mar Caribe. Por lo que se implementó un sistema de mallas anidadas en el cual, la malla regional sobre el dominio más grande (Atlántico Norte) es de relativa baja resolución y provee condiciones de frontera a las mallas anidadas con mayor resolución geográfica y espectral (Golfo de México y Mar Caribe). Con esto, el modelo toma en cuenta el oleaje generado en zonas distantes, además de los rasgos batimétricos de pequeña escala. De esta manera, el dominio regional se dividió en 3 mallas (Figura 4):

- Una malla regional que incluye la zona del Atlántico Norte (malla gruesa), que se extiende de  $99^{\circ}\text{W}$  a  $9^{\circ}\text{E}$  y de  $2^{\circ}\text{N}$  a  $33^{\circ}\text{N}$  con una resolución de  $1/3^{\circ} \approx 35\text{km}$ .
- Una malla que abarca el Golfo de México y Mar Caribe que va de  $98^{\circ}\text{W}$  a  $80^{\circ}\text{W}$  y de  $15^{\circ}\text{N}$  a  $31^{\circ}\text{N}$  con una resolución de  $1/12^{\circ} \approx 8.75\text{km}$ .
- Un tercer dominio que comprende la parte sur del Golfo de México que se extiende de  $98^{\circ}\text{W}$  a  $85.5\text{W}$  y de  $15^{\circ}\text{N}$  a  $23^{\circ}\text{N}$  con una resolución de  $1/60^{\circ} \approx 1.75\text{km}$ .

La Figura 4 muestra los diferentes dominios computacionales.



**Figura 4: Dominios regionales del sistema de pronóstico.**

Si bien el NWPS se implementa a nivel regional cubriendo desde parte del Atlántico, Golfo de México y Mar Caribe (Figura 4), se habilitó el sistema con alta resolución para el Puerto de Veracruz, Tuxpan, Yucatán y Quintana Roo (Figura 5). Estos lugares se seleccionaron por la disponibilidad de datos para evaluar el sistema y por la necesidad de predicciones de oleaje en esas zonas debido a su relevancia, la cual se describe a continuación.

El Puerto de Veracruz es un puerto de gran importancia a nivel nacional en donde un sistema de pronóstico de oleaje pudiera ser utilizado con fines de administración del puerto. Entre otras actividades, se pudiera utilizar para prever tiempos muertos por eventos extremos y planear las operaciones terrestres, así como para planear el transporte marítimo. En la zona de Tuxpan, Veracruz, existe la termoeléctrica de Comisión Federal de Electricidad “*Adolfo López Mateos*”, con lo que un sistema de pronóstico podría generar información local de oleaje que pudiera ser utilizada en los modelos hidrodinámicos de la CFE para predecir posibles problemas por recirculación de agua y sedimentación en las obras de toma. La zona de Yucatán se seleccionó por la relevancia local para el LIPC, donde los resultados pueden ser utilizados para estudios específicos del laboratorio, así como proveer información de oleaje para actividades locales, en particular para la pesca. Finalmente la zona de Quintana Roo se seleccionó por ser una zona expuesta a ciclones tropicales en donde un sistema de pronóstico pudiera ser utilizado para la implementación de planes de contingencia.

En aguas someras, la física del oleaje depende casi totalmente de su interacción con el fondo (y corrientes costeras en caso de estar presentes), por lo que para poder tomar en cuenta la dinámica en las zonas cercanas a la costa y también las variaciones batimétricas de pequeña escala, es necesario aplicar el sistema de predicción sobre mallas finas con alta resolución ( $\leq 0.300m$ ). Sobre estas mallas, el oleaje será forzado por viento local y por las condiciones de frontera obtenidas del dominio más grande y con menor resolución.



**Figura 5: Mallas locales en donde se implementó el sistema NWPS en alta resolución.**

## IV. METODOLOGÍA

Para la implementación del sistema operacional de predicción de oleaje NWPS en el Golfo de México y Mar Caribe con alta resolución, se siguió el esquema de la Figura 6, el cual se describe a continuación.

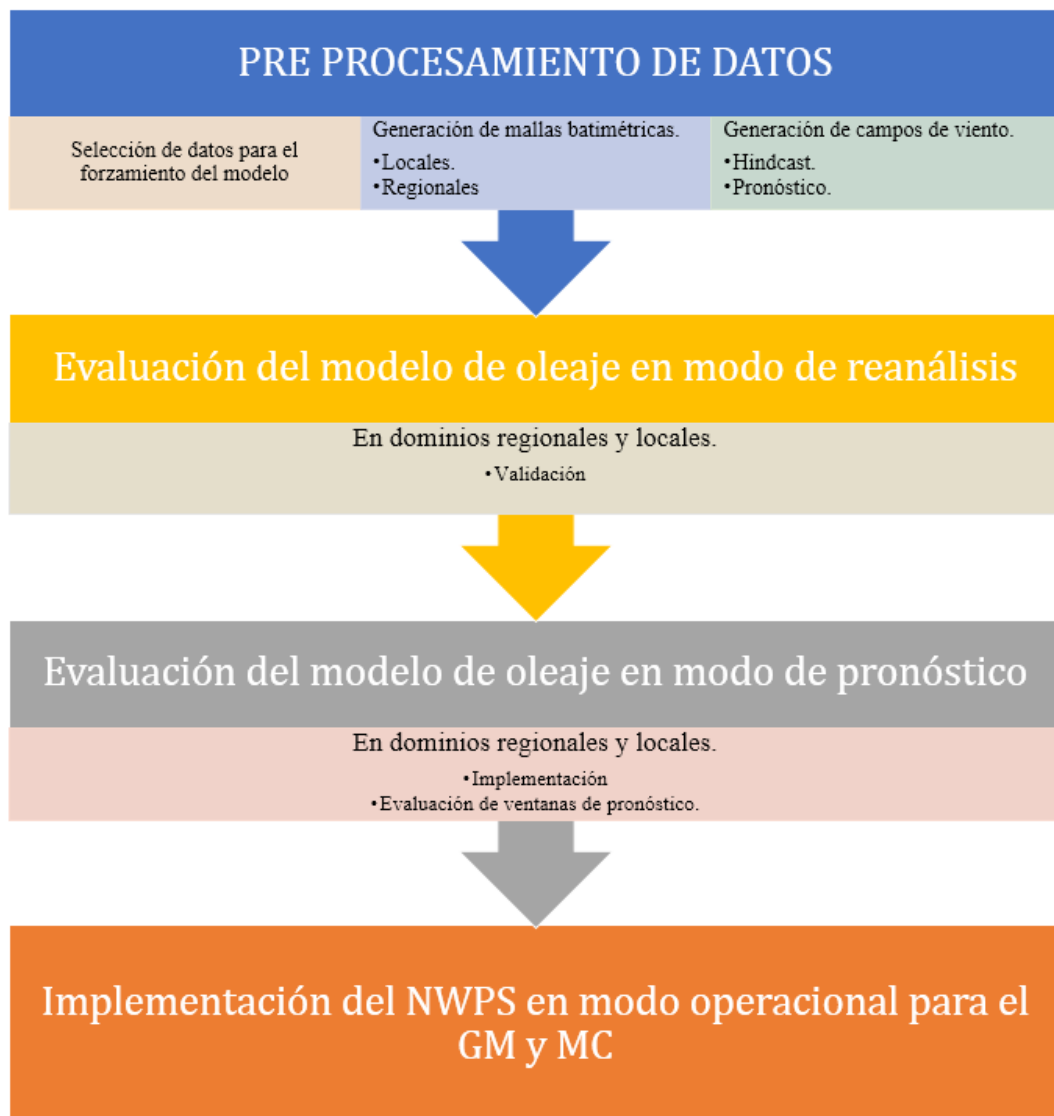


Figura 6: Diagrama de flujo para la implementación del NWPS en mares mexicanos.

## 4.1 BASES DE DATOS

La calidad de los datos de entrada a un modelo numérico es fundamental para el desempeño del mismo. Para asegurar un buen desempeño de los modelos de oleaje se necesita contar con datos confiables de viento y batimetría. A continuación se describen las características de las bases de datos utilizadas en el presente trabajo.

### 4.1.1 Datos batimétricos

Las bases de datos batimétricas incluyen información de las profundidades y formas del terreno sumergido. Esta información es imprescindible, sobre todo en regiones someras en donde la física del oleaje depende casi totalmente de su interacción con el fondo. Existen numerosas bases de datos batimétricas disponibles, dependiendo de la zona estudio y resolución requerida. En este estudio se utilizó la *One Minute Global Relief Model (ETOPO1)* (Amante y Eakins, 2009), esta base de datos es de libre acceso y se encuentra disponible en el portal del *National Geophysical Data Center* de la NOAA<sup>11</sup>. Fue desarrollada como una mejora de la ETOPO2v2 y es un modelo de relieve global de la superficie de la Tierra con resolución de un minuto, que integra la topografía del continente y la batimetría del océano. La ETOPO1 fue generada a partir de numerosas bases de datos globales y regionales que fueron convertidas a datums horizontales y verticales comunes utilizando el paquete de herramientas de transformación de datos *FME (Feature Manipulation Engine)* para convertir las bases de datos a datums horizontales WGS 84 y datums verticales de niveles de mar en *ESRI*<sup>12</sup>, *ArcGIS shape files* y *rasters*.

---

<sup>11</sup> <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

<sup>12</sup> <http://www.esri.com/>

## 4.1.2 Datos de vientos

### 4.1.2.1 Reanálisis atmosféricos

Los reanálisis atmosféricos son bases de datos que determinan el estado de la atmósfera a partir de varios parámetros (campos de viento, temperatura, presión, etc.) y están basados en modelos numéricos atmosféricos con asimilación de datos. Son realizados con el propósito general de generar información en una malla a escala global de los estados atmosféricos para un periodo histórico de tiempo. Con esto, se cuenta con información para cientos de variables atmosféricas que definen el estado del clima en cada paso de tiempo a una resolución temporal y espacial constante. Esta información puede ser utilizada en una gran variedad de estudios, tanto para analizar variables y procesos específicos, como para realizar climatologías o para forzar otros modelos.

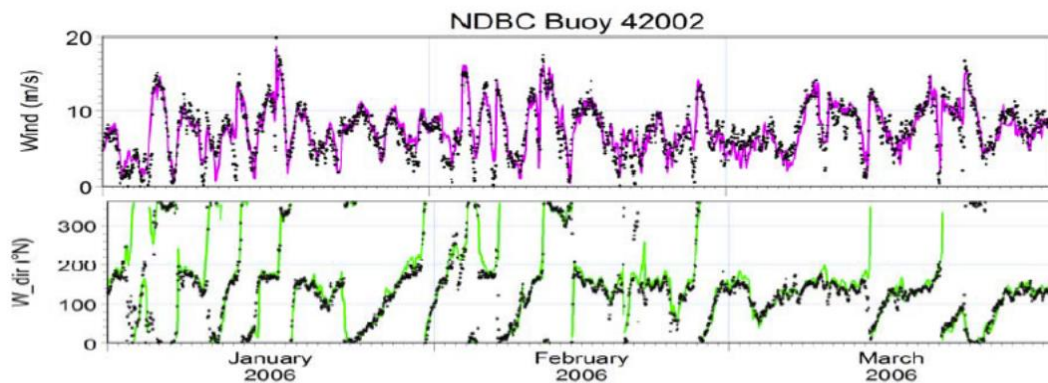
Los reanálisis atmosféricos son una fuente importante de información para realizar estudios de oleaje ya que permiten obtener campos de vientos con resolución espacio-temporal constante para forzar los modelos numéricos de oleaje. Debido a la naturaleza del oleaje como un sistema oscilatorio forzado y amortiguado es posible reproducir adecuadamente un retroanálisis utilizando solamente los campos de viento del reanálisis atmosférico. Existen varios reanálisis atmosféricos disponibles, sin embargo en este trabajo se usó el *Climate Forecast System Reanálisis* (CFSR) debido a su mayor calidad comparado con previos reanálisis del NCEP, gracias a avanzados esquemas de asimilación y acoplamiento de atmósfera-tierra-océano-hielo, y, a que su resolución horizontal se acerca a la de análisis regionales como el NARR<sup>13</sup>.

Chawla et al. (2013) realizaron una validación de 30 años utilizando los vientos del CFSR como forzamiento para el modelo WWIII. En su trabajo demuestran una buena correlación con las mediciones de los vientos de las boyas del NDBC para el hemisferio Norte. También, Ruiz (2013) en su trabajo de tesis evaluó la calidad de los vientos del CFSR en

---

<sup>13</sup><https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>

diferentes condiciones atmosféricas como lo son frentes fríos de alta presión o *Nortes*, condiciones medias y ciclones tropicales, haciendo una comparativa de los vientos tomados a 10 m de altura del reanálisis con datos de las boyas del NDBC. Concluyó que los vientos del CFSR para eventos de *Nortes* y condiciones medias muestran un buen ajuste en comparación con las mediciones de las boyas del NDBC en el Golfo de México, alcanzando a representar las intensidades máximas y la dirección del viento como se observa en la Figura 7. Empero, para eventos de alta vorticidad (i.e. ciclones tropicales) el CFSR subestima los vientos de mayor intensidad.



**Figura 7:** Series temporales de intensidad de viento y dirección de Junio-Agosto 2006 de la boya NDBC 42002 (puntos negros) con los vientos tomados del CFSR (tomado de Ruiz, 2013).

Otra razón importante para la utilización de los vientos del CFSR para la validación del modelo de oleaje, es que utiliza el mismo modelo que el *Global Forecast System* que es de donde se obtendrán los vientos una vez que el NWPS funcione operacionalmente. A continuación se da una descripción del CFSR.

El CFSR ha sido desarrollado por el NCEP y es un reanálisis con cobertura global ( Figura 8 ) que se diseñó originalmente para cubrir el periodo de tiempo de 1979 a marzo del 2011, aunque es actualizado constantemente a fechas más recientes. Este reanálisis es superior a

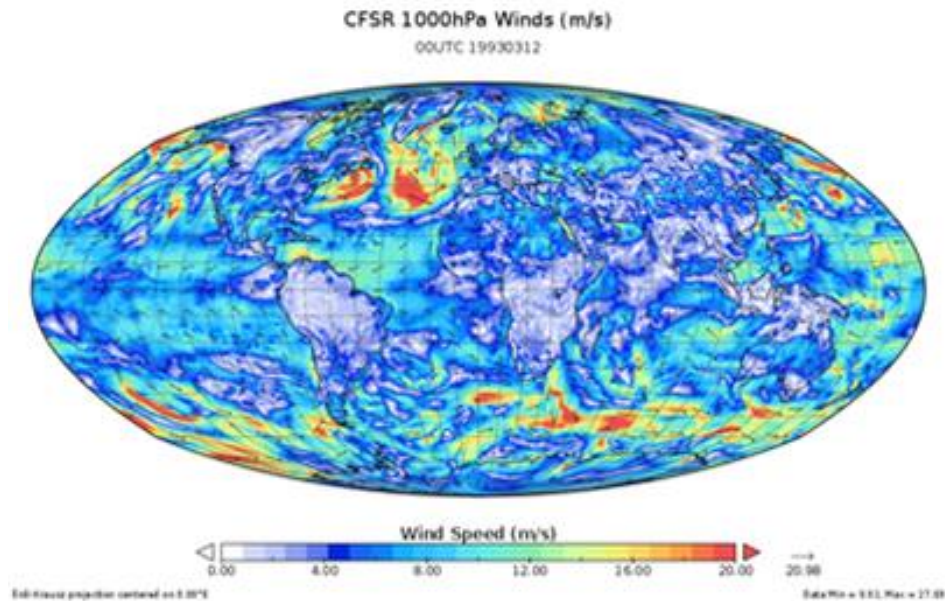
los originales R1/R2 de NCEP<sup>14</sup> en varios ámbitos incluyendo: la resolución (de ~200 a ~38 km), el acoplamiento de modelos atmosféricos con modelos oceánicos y de hielo, así como también la adición de más capas o niveles que definen la atmósfera (64 en lugar de 28) extendiéndose desde la superficie terrestre hasta 0.26 hPa. También mejoraron los métodos de asimilación de datos de satélite ERS 1 y 2 (1991-1997), QUIKSCAT (2001-2009) y WINDSAT (Sept 2008-presente). Hay que mencionar que los datos de velocidad de viento de los altímetros no han sido asimilados (Suranjana Saha, comunicación personal, 2014), por lo cual, proveen una de las mejores mediciones independientes de vientos sobre los océanos a escalas globales (Cox y Cardone, 2011). Uno de los principales objetivos del CFSR fue proveer un mejor estimado de los estados iniciales para la atmósfera, océano, tierra y hielo que sean lo más consistentes posibles con la versión 2 del *Climate Forecast System* (Saha et al., 2010).

Todas las salidas del modelo CFSR están disponibles con una resolución temporal de una hora y una resolución horizontal de 0.3°, 0.5°, 1.0°, y 2.5°.

---

<sup>14</sup> <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/reanalysis-1-reanalysis-2>





**Figura 8: Dominio del CFSR (<http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climate-forecast-system-version2-cfsv2>).**

A partir del 30 de Marzo de 2011, el NCEP hizo operacional una segunda versión del *Climate Forecast System* que se corre cuatro veces al día (0000, 0600, 1200, y 1800 UTC) y utiliza el mismo modelo que fue utilizado para el reanálisis. Los datos son luego archivados como una extensión del CFSR y se tienen datos disponibles hasta la fecha<sup>15</sup>. Al igual que los reanálisis originales de NCEP (R1/R2) que se realizaron en los 90s (Kalnay, et al. 1996), ese reanálisis provee campos de vientos en la superficie marina que son

---

<sup>15</sup> <http://cfs.ncep.noaa.gov/me>

convenientes para la modelación de oleaje utilizando modelos de 3era generación (Cox and Cardone, 2011).

#### 4.1.2.2 Modelo de predicción atmosférica Global Forecast System

El *Global Forecast System* (GFS) es un sistema global de predicción del clima basado en las ecuaciones dinámicas primitivas<sup>16</sup> (Kanamitsu 1989; Kalnay et al. 1990) desarrollado por el NCEP. Este sistema acoplado está compuesto por 4 diferentes modelos (atmosférico, oceánico, de tierra/suelo y mar-hielo) que trabajan en conjunto para proporcionar una buena representación de las condiciones atmosféricas. Los datos son de dominio público y pueden ser accedidos a través de la página del *National Operational Model Archive & Distribution System*<sup>17</sup> y ha estado bajo un constante desarrollo y evaluación desde su lanzamiento operacional (e.g., Moorthi et al. 2001). A través del GFS están disponibles más de cien variables atmosféricas, entre las que se encuentran temperatura, vientos, precipitación, humedad y concentración de ozono. En la Figura 9 se representa una de las salidas del módulo de la velocidad del viento a una altura de 10 m para el 08/04/2014 a las 03:00 hrs.

El modelo es ejecutado 4 veces al día y en cada simulación genera pronósticos con un paso de tiempo de 3 horas, cubriendo hasta 16 días de predicción, aunque la resolución espacial y temporal decrece con el tiempo. Esto es debido a que el modelo se corre en dos partes:

- 1) la primera con alta resolución y va hasta 192 horas (8 días), en esta primera parte se divide la superficie de la tierra horizontalmente en celdas de 28 km y temporalmente genera pronósticos cada 3 horas.

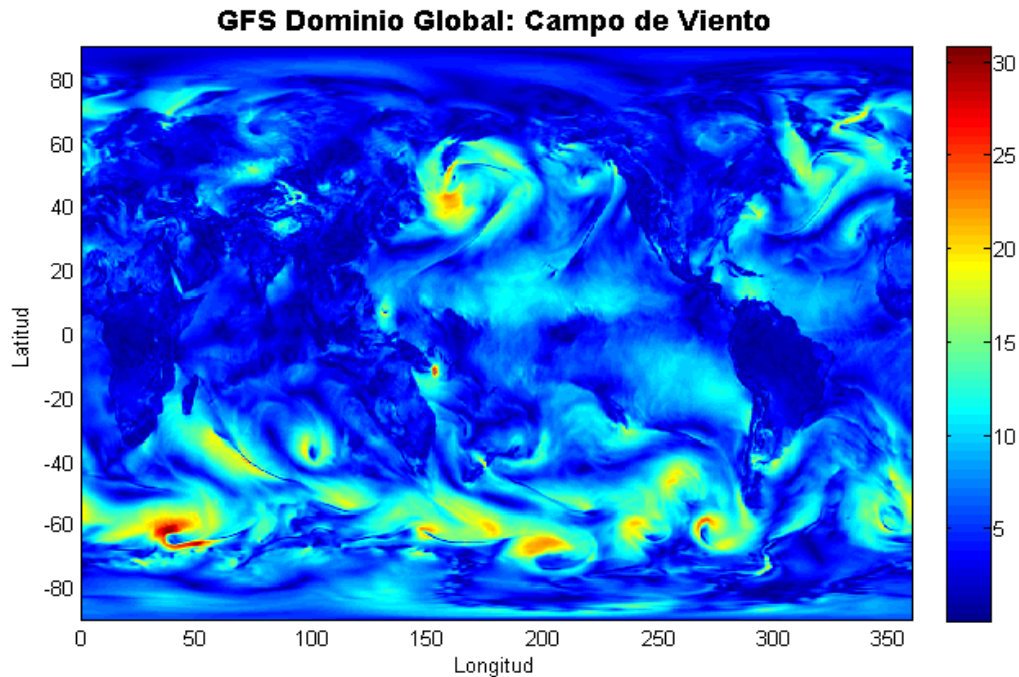
---

<sup>16</sup> Conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales que son usadas en la mayoría de los modelos atmosféricos, consisten en 3 principales categorías: conservación de momento, termodinámica y continuidad

<sup>17</sup> <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>

- 2) la segunda desde 192 a 384 horas (hasta 16 días) a una menor resolución, aquí se divide la superficie en celdas de 70 km y produce pronósticos cada 12 horas.

En ambos casos la atmósfera se divide verticalmente en 64 capas espaciadas desigualmente en la escala sigma<sup>18</sup> para una presión de superficie de 1000 hPa: 15 niveles están debajo de los 800 hPa Y 24 niveles están encima de los 100 hPa con el nivel superior a 0.3 hPa.



**Figura 9: Velocidad del viento a una altura de 10 m para el 08/04/2014 a las 0300 UTC obtenido con el Global Forecast System.**

#### 4.1.3 Datos de oleaje

Para evaluar adecuadamente el desempeño de un modelo de oleaje se necesitan mediciones para calibrar y evaluar los resultados del modelo. Entre las fuentes de mediciones de oleaje disponibles se encuentran los datos visuales, mediciones con instrumentación oceanográfica y satélites, y los datos generados por modelos numéricos. Los datos visuales conforman

---

<sup>18</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Sigma\\_coordinate\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Sigma_coordinate_system)

información que ha sido recopilada a nivel global por varias décadas a través de la tripulación a bordo de los Navíos de Observación Voluntarios (*Voluntary observing ships*). Estas mediciones deben tomarse con cautela ya que no todos los observadores están calificados y sus observaciones pueden estar sujetas a evaluaciones de las condiciones en un momento dado, además que los barcos no suelen navegar por regiones donde se presentan tormentas.

Para evitar los problemas de las observaciones visuales, se prefieren las hechas por instrumentos, ya que son objetivas y tienden tener pequeños errores (Holthuijsen, 2007). Entre estos instrumentos se encuentran las boyas que generalmente miden la aceleración vertical de las partículas de agua y la integran 2 veces para obtener la elevación de la superficie como función del tiempo. La información que se genera es continua y confiable, pero la principal desventaja es que su localización espacial es discontinua y la mayoría están instaladas en el Hemisferio Norte. Los datos de altimetría satelital son otra fuente de datos medidos que han estado disponibles desde 1985. Mientras que estos datos si tienen una cobertura global, son discontinuos en el tiempo con brechas entre barridas sucesivas.

Otra opción para obtener historial del oleaje es el uso de modelos numéricos para generar bases de datos de retroanálisis. Estos datos tienen la ventaja de resolver el problema de la cobertura tiempo-espacial. La obtención de estos datos es a partir de modelos numéricos de oleaje forzados con vientos de reanálisis atmosféricos para obtener series de tiempo homogéneas para varias décadas. Sin embargo, estos datos necesitan de mediciones para su calibración y validación, como se mencionó al principio de esta sección.

A continuación se da una descripción de las bases de datos de oleaje utilizadas en este estudio para la validación y evaluación de los resultados.

#### *4.1.3.1 National Data Buoy Center (NDBC)*

El NDBC de la NOAA mantiene una red de boyas que recolectan información meteorológica y oceánica. Estas boyas miden presión barométrica, dirección e intensidad de viento, temperatura del mar, parámetros de oleaje y la energía espectral. La información de vientos es tomada por anemómetros a 5 m ó 10 m sobre la superficie del mar midiendo

la rapidez del viento y dirección en períodos de 8min cada hora (Gilhousen, 1987). La información de oleaje es derivada de la información que toman los acelerómetros en períodos de 20min. Toda la información es reportada de forma horaria. Para este trabajo, se utilizó la información correspondiente a las boyas 42001, 42003, 42055 y 42056 localizadas en el Golfo de México y Mar Caribe (Figura 10). Las características de las boyas mencionadas pueden consultarse en la Tabla 1. Los datos de oleaje se utilizaron para validar los resultados del modelo de oleaje en aguas profundas.

**Tabla 1: Información de las boyas del NDBC utilizadas para validación del modelo espectral de oleaje.**

	No. de estación			
	42001	42003	42055	42056
<b>Ubicación</b>	25.888, -89.658	26.044, -85.612	22.203, -94	19.802, -84.857
<b>Profundidad (m)</b>	3365	3273.6	3566	4684
<b>Altura del anemómetro (m SNM)</b>	5	5	5	5
<b>Fechas Disponibles</b>	1975-2014	1976-2014	2005-2014	2005-2014



**Figura 10: Localización de las boyas del NDBC en el Golfo de México utilizadas para la validación del modelo de oleaje.**

#### 4.1.3.2 Mediciones del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC)

Como parte de los proyectos del LIPC, se comenzó con mediciones de oleaje desde junio del 2010. La información ha sido recopilada utilizando perfiladores acústicos Doppler (ADCP) frente de las costas del estado de Yucatán. Dicha información se compone de perfiles de velocidad y datos de presión cada 20 min a partir de los cuales se obtuvieron los parámetros del oleaje como altura significativa ( $H_s$ ), período pico ( $T_p$ ) y dirección media (DMO). Entre la información de oleaje del LIPC, está la recopilada durante una campaña en la zona de Sisal del 30 de Marzo al 12 de Abril de 2014. En este período, se colocaron dos ADCPs, a 10 m y 4 m de profundidad para medir perfiles de velocidad y presión cada 30 minutos obteniendo también los parámetros de  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección media del oleaje. Toda esta información que ha sido recopilada por el LIPC se utilizó en este trabajo para la validación/calibración del modelo de oleaje en aguas someras. La posición de las mediciones se muestra en la Figura 11.



Figura 11: Localización de los 3 ADCPs ubicados en la costa Noroeste del estado de Yucatán

## 4.2 Pre procesamiento de datos

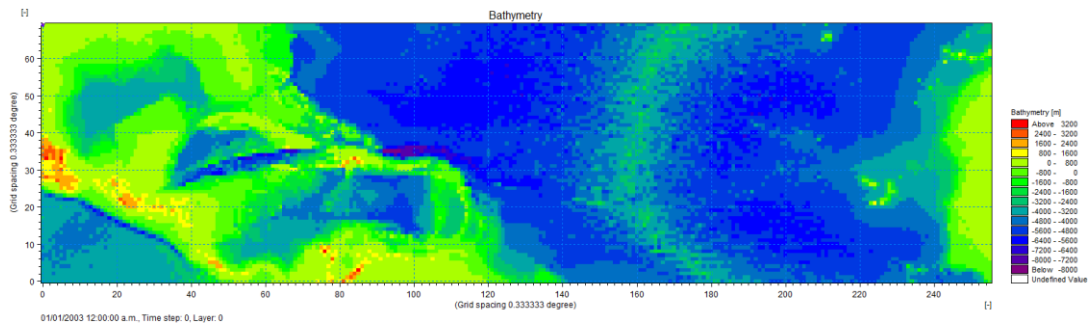
El uso de modelos numéricos requiere que la información sea introducida de una manera específica para que pueda ser leída por el modelo elegido. De esta manera, el pre procesamiento de datos se refiere a la manipulación de la información de su formato nativo para pasarla al formato que leerá el modelo. Las bases de datos que se utilizaron cuentan con los requisitos de alta resolución y disponibilidad (batimetría y vientos), para simular el oleaje en alta resolución geográfica en tiempo real, y de esa manera tener listas las predicciones para su publicación hasta con 120 horas de anticipación. A continuación se describe el procesamiento de datos batimétricos y de viento para introducirlos al modelo de oleaje.

### 4.2.1 Generación de mallas batimétricas

Las mallas batimétricas se hicieron utilizando la herramienta *Bathymetry Editor* el cual es un módulo del paquete del MIKE Zero del Danish Hydraulic Institute. Este programa facilita la importación de los datos crudos en varios formatos y permite crear datos manualmente con las herramientas disponibles. La creación de la malla batimétrica básicamente se dividió en dos fases: la generación de la malla y la interpolación.

Para la generación de la malla se definió la proyección cartográfica, el origen, su orientación y su extensión, definida por un número de puntos y espacios equidistantes en la dirección x - y. En el proceso de crear la malla tiene que ser definido el valor limitante de la batimetría para que reconozca una celda como tierra. El resultado es una malla rectangular con elementos de igual tamaño. Para la interpolación de los valores de batimetría a los puntos de la malla, el programa encuentra las celdas que tienen el centro en tierra para identificar todos los puntos secos (esto se conoce como generación de tierra), a estos puntos en tierra se les asigna una elevación  $z$ . Luego, establece una profundidad a todos los puntos de la malla ya sea por interpolación bilineal, triangular, interpolación ponderada por la distancia inversa o interpolación ponderada por la distancia inversa al cuadrado, para este caso se utilizó la interpolación bilineal (Manual MIKE Zero, 2012).

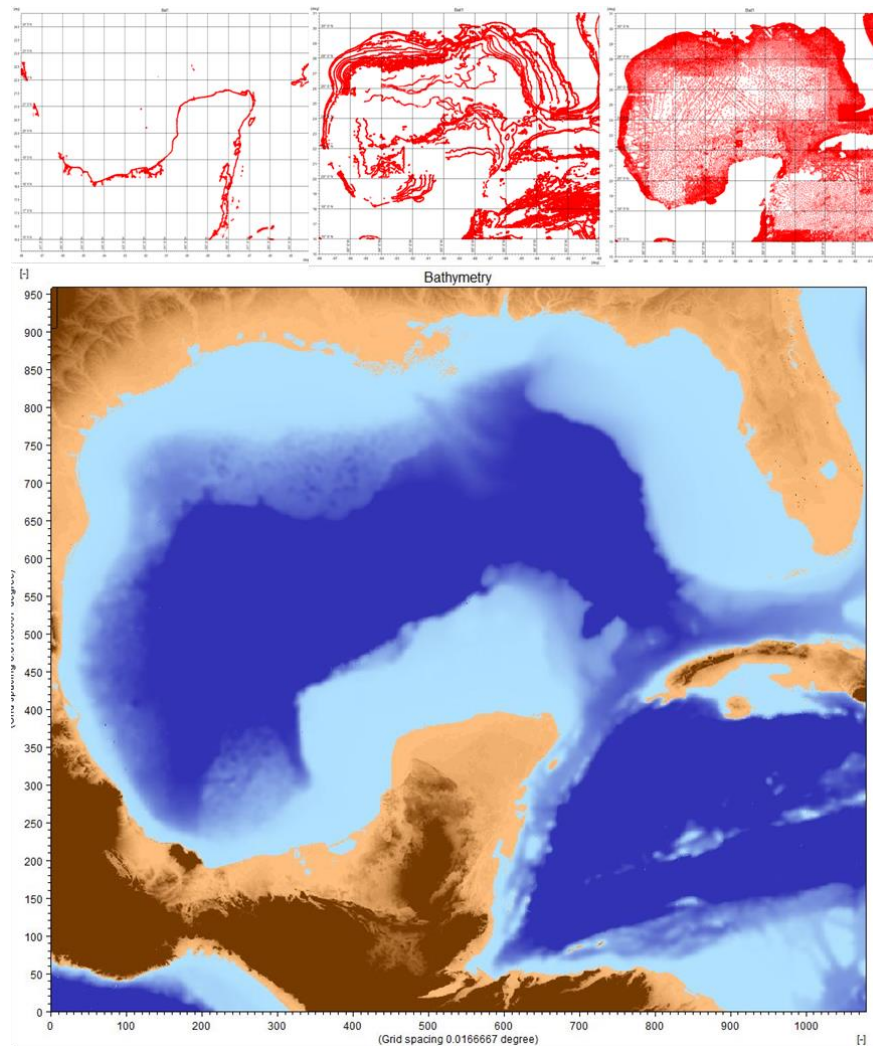
En la Figura 12 se presenta la malla batimétrica utilizada en el Atlántico Norte, para la cual se utilizaron los datos de la ETOPO1. Tiene su origen en (99° W, 2 N) con una extensión en longitud de 90°, en latitud de 31° con una resolución de 20min.



**Figura 12: Malla del Atlántico Norte con una resolución de 20min.**

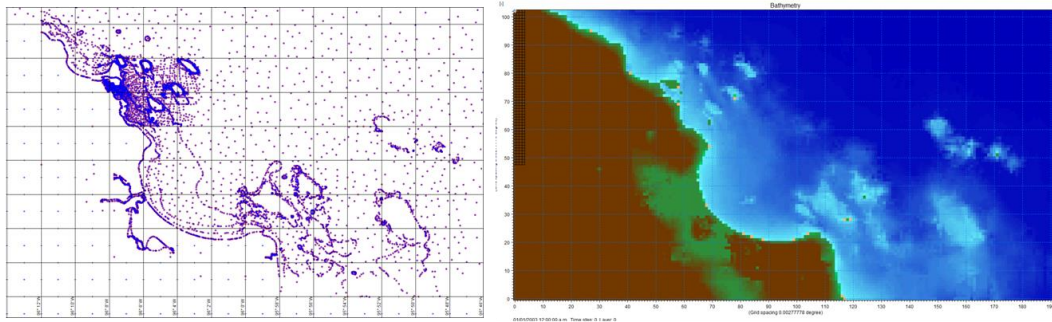
Para mejorar la resolución de las mallas intermedias, que cubren el Golfo de México y Mar Caribe, se utilizó la información de cartas náuticas. La Figura 13 muestra la batimetría del Golfo de México con origen (98°W, 15°N). Se puede apreciar en esta figura la sucesión de pasos en las que se fueron integrando los diferentes niveles de las cartas náuticas, uno con mayor resolución que el anterior hasta llegar a la deseada. La resolución de la malla del Golfo de México es de 1 min.





**Figura 13: Malla del Golfo de México con resolución de 1 min. En los paneles superiores se muestra la integración de las diferentes fuentes batimétricas para alcanzar la resolución deseada.**

Además de las cartas náuticas y la ETOPO1, se utilizaron levantamientos batimétricos para las mallas locales (Figura 14). Se utilizó la información de la CFE para Tuxpan, Veracruz, y la de la API de Veracruz para la zona del Puerto de Veracruz. Para Yucatán se utilizó la información del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros y del CINVESTAV para la zona de Progreso. Todas las mallas locales tienen una resolución de 10 segundos.



**Figura 14:** Datos de batimetría de cartas náuticas para la zona de Veracruz (panel izquierdo) y batimetría interpolada a la malla de 10 seg (panel derecho).

## 4.2.2 Generación de campos de viento

### 4.2.2.1 Vientos para el modelo en modo de retroanálisis

Los vientos del CFSR fueron obtenidos del *Computational and Information Systems Laboratory (CISL) Research Data Archive* administrado por el *National Center for Atmospheric Research* en su portal de internet<sup>19</sup>. En este portal, es posible extraer la información de todas las variables atmosféricas disponibles del reanálisis en un período de tiempo deseado. En este portal se puede escoger el formato de salida ya sea en WMO GRIB2<sup>20</sup> (*World Meteorological Organization GRIdded Binary or General Regularly-distributed information in Binary form*) que es como originalmente se encuentran los datos del CFSR, o convertidos a NetCDF (*Network Common Data Form*).

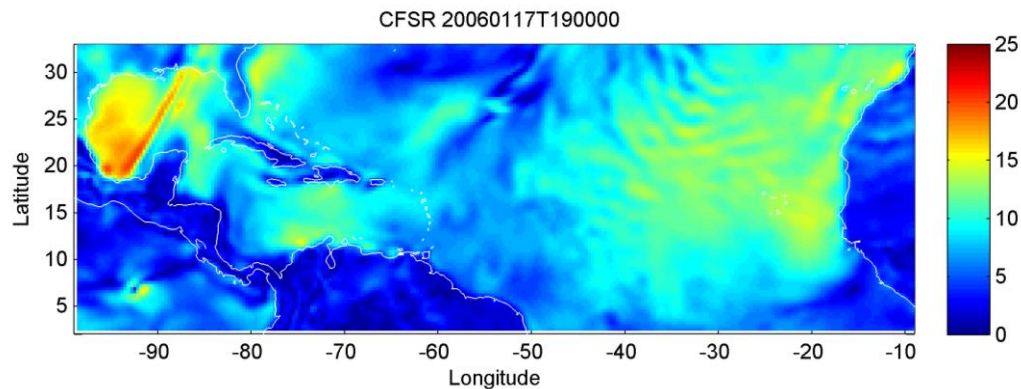
---

<sup>19</sup> Environmental Modeling Center/National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2010: NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. [Available online at <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>.]

<sup>20</sup> El formato GRIB, es un formato conciso de datos utilizado comúnmente en la rama de la meteorología para archivar información atmosférica de *retroanálisis* y pronósticos que de otra manera sería imposible conservar por su tamaño. El sistema fue diseñado por la WMO para ser auto-descriptivo, compacto y portable a través de diferentes arquitecturas informáticas

Para este estudio se extrajeron las componentes zonal y meridional ( $u$  y  $v$ ) del viento en formato NetCDF para las fechas deseadas a una altura de 10m sobre el nivel de la superficie, únicamente sobre el área de la malla más gruesa (Atlántico Norte). Los datos en NetCDF se trataron con la herramienta MatLab® utilizando la *nctools toolbox*, fueron interpolados a una malla regular de  $0.3^\circ$  y pasados a formato ascii para su lectura por el SWAN. Cabe mencionar que ésta herramienta permite el acceso de lectura a bases de datos de los modelos atmosféricos más comunes usando la librería *NetCDF-Java*, lo que habilita la lectura de formatos NetCDF, GRIB, GRIB2, OPeNDAP, HDF5.

En la Figura 15 se muestra la rapidez del viento para el 17/01/2006 obtenido del CFSR, donde se aprecia el paso de un frente frío de alta presión (Norte) en el Golfo de México. Esta es la información que se utilizó para forzar el modelo en modo de *retroanálisis*.



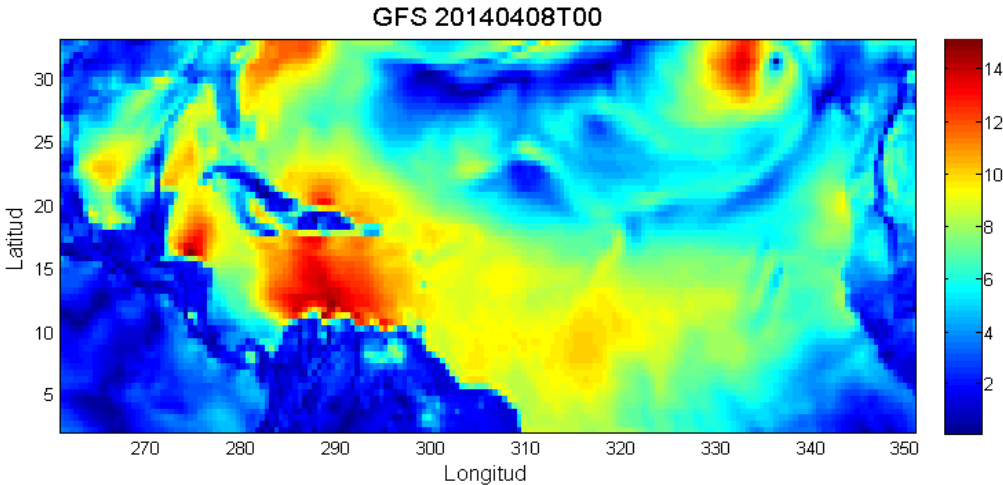
**Figura 15: Rapidez del viento obtenida del CFSR mostrando un Norte en el Golfo de México durante enero de 2006 con una resolución horizontal de  $0.3^\circ$ .**

#### 4.2.2.2 Vientos para el modelo en modo de pronóstico

Los vientos del *Global Forecast system* se extrajeron del portal de internet del NCEP<sup>21</sup>, en donde se encuentran los productos del GFS para todos los ciclos de predicción de los últimos 40 días. Estos datos se encuentran en formato GRIB2. Se utilizó la herramienta del

<sup>21</sup> <ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>

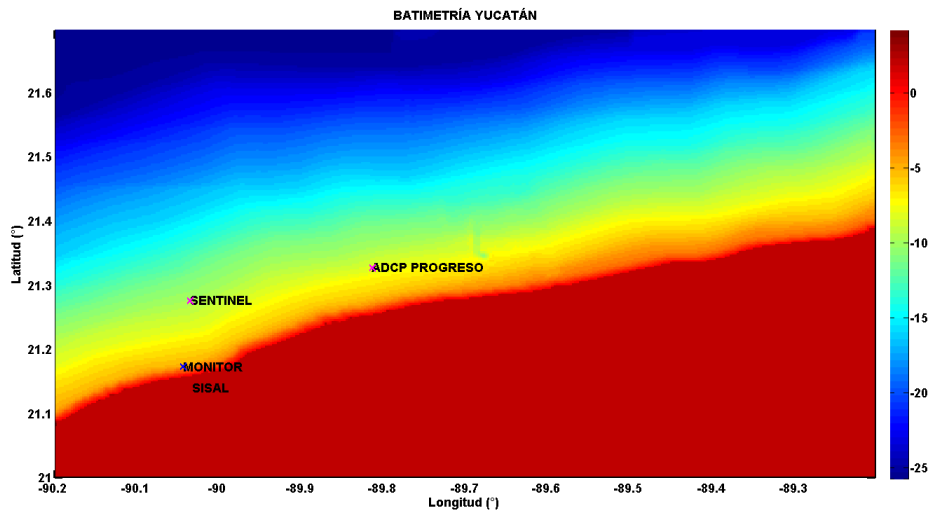
*nctool toolbox* para leer los datos que se encontraron en una malla global de  $0.5^\circ$  de resolución. Únicamente se extrajo la información dentro de la malla del Atlántico Norte con el fin de reducir el tamaño de los archivos a utilizar: La información se convirtió a formato ASCII para que los datos sean leídos por el SWAN. En la Figura 16 se observa una gráfica de la rapidez del viento a del GFS durante el 08/abril/2014.



**Figura 16: Rapidez del viento obtenida del GFS para el 08/abril/2014 con una resolución horizontal de  $0.5^\circ$ .**

### 4.3 Evaluación del modelo a modo de retroanálisis

El modelo SWAN se implementó a modo de retroanálisis para simular el oleaje sobre las mallas locales y regionales. La evaluación a nivel regional se realizó para calibrar el modelo para aguas profundas y evaluar el desempeño del modelo de oleaje con vientos del CFSR. Para su evaluación se compararon los resultados con mediciones de las boyas 42001, 42055 y 42056 del NDBC. Los resultados se analizaron cualitativamente mediante el análisis de series de tiempo y diagramas de dispersión, y cuantitativamente empleando los parámetros estadísticos escalares definidos en la sección 5.4.



**Figura 17: Batimetría utilizada para la malla computacional en donde se ubica la posición de los diferentes ADCPs de donde se obtuvieron mediciones para este estudio.**

A continuación se describe la configuración del modelo espectral de oleaje para su implementación en modo de retroanálisis.

#### 4.3.1 Dominio computacional

Se crearon mallas computacionales estructuradas en coordenadas esféricas para los 3 dominios regionales y los 4 dominios locales en los cuales se habilitó el modelo SWAN. Las especificaciones de dichas mallas computacionales se pueden ver en la Tabla 2.

**Tabla 2: Dominios computacionales para la implementación del SWAN.**

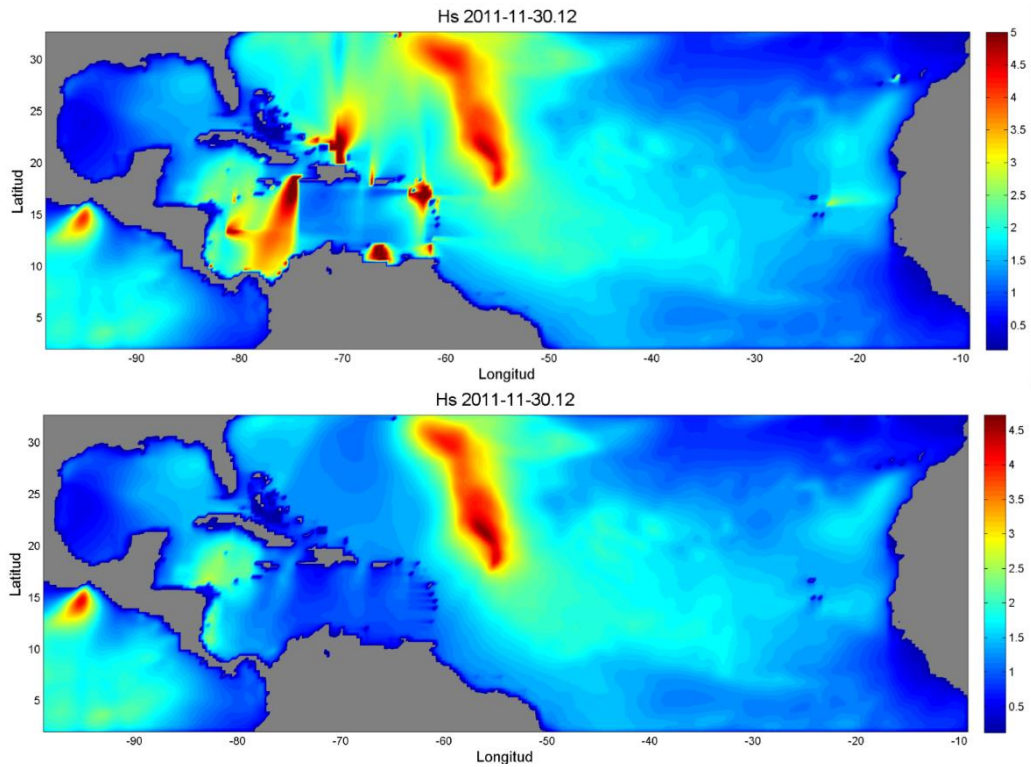
	<b>DOMINIO</b>	<b>RESOLUCIÓN</b>	<b>EXTENSIÓN</b>
<b>REGIONALES</b>	ATL	1/3°	Latitudes: 2° / 33° Longitudes: -99° / -9°
	GOM	1/12°	Latitudes: 15° / 31° Longitudes: -98° / -80°
	GSX	1/60°	Latitudes: 15° / 23° Longitudes: -98° / -85.5°
<b>LOCALES</b>	QROO	1/360°	Latitudes: 20.18°/21.37° Longitudes: -87.5° / -86.5°
	VERACRUZ	1/360°	Latitudes: 19°/19.2833° Longitudes: -96.2833° / -95.75°
	TUXPAN	1/360°	Latitudes: 20.8°/21.3° Longitudes: -97.4° / -96.4°
	YUCATÁN	1/360°	Latitudes: 21°/21.7° Longitudes: -92.1° / -91.1°

#### 4.3.2 Campos de forzamiento

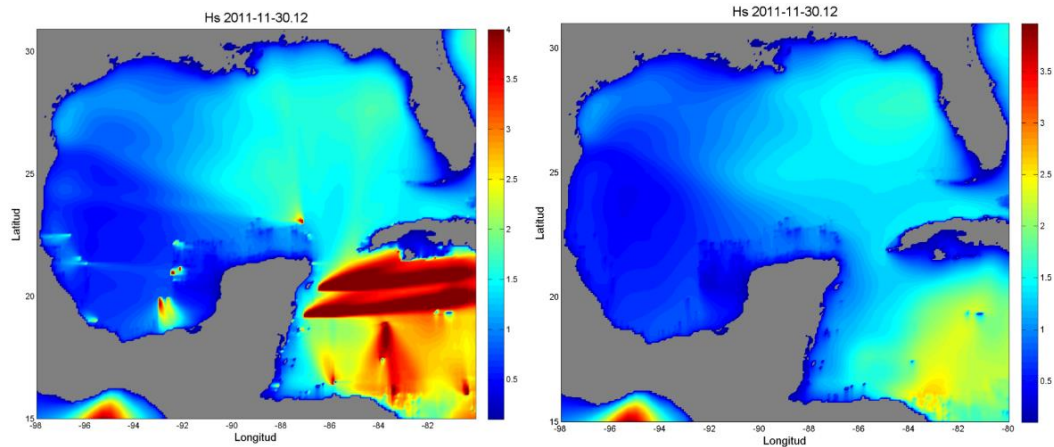
Los campos de entrada al SWAN (batimetría, campos de viento, corrientes, nivel del mar y fricción de fondo) tienen que estar en las llamadas mallas de entrada. Es recomendable que estas mallas cubran completamente el dominio computacional ya que en caso contrario, el SWAN asume valores de profundidad y de fricción idénticos a los puntos más cercanos con información; y para corrientes y vientos asigna un valor de 0 m/s para los puntos fuera de las mallas de entrada.

Las mallas de entrada deben tener una resolución espacial en la que los detalles en la batimetría, corrientes, fricción con el fondo y viento puedan resolverse adecuadamente, sobre todo en casos en donde la batimetría tiene pendientes que varían muy abruptamente. Una batimetría inexacta puede resultar en errores en el cálculo de la refracción y estos propagarse a áreas en donde la refracción no es significativa, llevando inestabilidades en los cálculos. En estos casos es mejor desactivar los cálculos de refracción (si ésta es irrelevante para el problema en cuestión), que fue lo que se hizo en el caso de las mallas regionales, en donde lo importante es el oleaje generado en aguas profundas. Para las mallas locales si se activó la refracción, ya que si es un proceso importante para aguas someras. En la Figura

18 y la Figura 19 se aprecian las diferencias en los resultados al desactivar los cálculos de refracción para los dominios regionales.



**Figura 18: Inestabilidades generadas en la Hs (m) al activar los cálculos de refracción para el dominio del Atlántico Norte (panel superior) y Hs (m) obtenida al desactivar los cálculos de refracción (panel inferior).**



**Figura 19: Inestabilidades generadas en la Hs (m) al activar los cálculos de refracción para el dominio del Golfo de México (panel superior) y Hs (m) obtenida al desactivar los cálculos de refracción (panel inferior).**

El SWAN obtiene información de las mallas de entrada hacia la malla computacional utilizando interpolación tri-linear (tanto en el espacio como en el tiempo). Las salidas son obtenidas en SWAN por interpolación bi-linear (en espacio solamente) desde la malla computacional al punto solicitado (si así se requiere). Las ubicaciones de salida pueden ser: i) en una cuadrícula geográfica (para cada celda/elemento de la malla), ii) a lo largo de las líneas especificadas por el usuario (por ejemplo, una línea de contorno profundidad dada) o iii) en ubicaciones de salida individuales (un punto determinado). Así, los errores de interpolación pueden ser reducidos haciendo que las mallas de entrada sean lo más parecidos a las mallas computacionales.

Hay que tener en cuenta que se debe de escoger el paso de tiempo lo suficientemente pequeño para que se resuelvan correctamente las variaciones en el tiempo de las corrientes, nivel del mar, viento y fricción de fondo.

#### 4.3.3 Parametrizaciones físicas

La discretización temporal del modelo fue de 60 min para la malla del Atlántico Norte, 30 min para las mallas del Golfo de México y Golfo Sur, y de 15 min para las mallas locales.



En espacio direccional, el rango de dirección que toma SWAN son los 360° a menos que el usuario especifique un rango limitado, para reducir costos computacionales en zonas donde el oleaje incida solo de un rango específico (e.g. zonas costeras). En este caso, se tomaron los 360° y se dividieron en 24 direcciones, esto es, se definió una resolución direccional de 15°. El rango de frecuencias se tomó de 0.05 a 1.5 Hz con el fin de para resolver olas con períodos de 0.6 a 20seg. El intervalo de frecuencias va en un aumento constante de 10% con respecto al anterior.

El SWAN contiene un número de procesos físicos que agregan o quitan energía al campo de oleaje. Los procesos incluidos son: contribución del viento, whitecapping, fricción por fondo, rotura inducida por el fondo, disipación debido a la vegetación, interacciones no lineales ola-ola (triadas y cuádrupletas) y set-up inducido por el oleaje. También puede correr en diferentes modalidades indicando el nivel de parametrización, esto es, puede correr en modo de primera, segunda o tercera generación. Para este caso se utilizó la física que se indica en la Tabla 3.

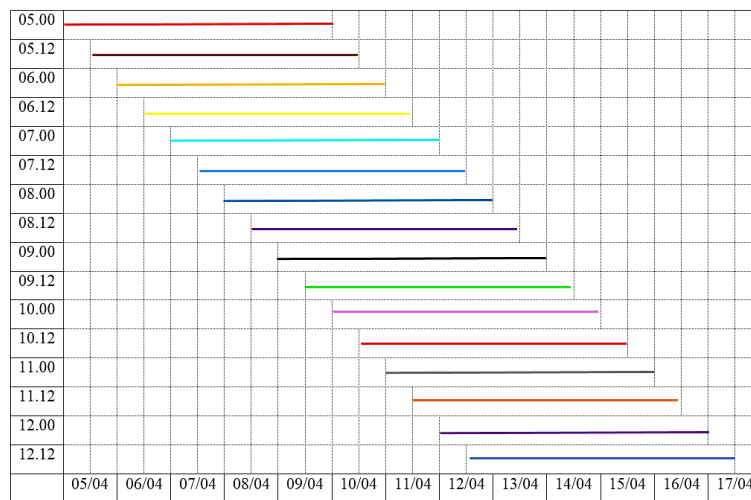
**Tabla 3 : Parametrizaciones físicas tomadas para correr el modelo sobre las mallas regionales y locales**

GEN3 KOMEN	Le indica al SWAN que debe de correr en modo de 3 <sup>era</sup> generación, activando los procesos de contribución del viento, whitecapping, cuádrupletas con un crecimiento lineal (Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981), Komen et al. (1984)).
FRIC JON	Activa la fricción de fondo de acuerdo a la expresión semi-empírica derivada de los resultados de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973, JONSWAP). El coeficiente de fricción de fondo se tomó constante con un valor de $C_{fjon} = 0.0380$ .
TRIAD	Activa las interacciones triádicas entre olas utilizando el método <i>Lumped Triad Approximation</i> (Eldeberky (1996)).
PROP BSBT	Este comando se utiliza para corridas estacionarias y no estacionarias, es el esquema de primer orden, hacia atrás en tiempo y en espacio ( <i>Backward Space Backward Time</i> ) que integra numéricamente la ecuación de balance usando el método de diferencias finitas.

NUM ACCUR (corridas estacionarias)	Con este comando se influenció el criterio para terminar el proceso iterativo en los cálculos si: a) $Hs = 0.04(Hs + 1)$ o $\overline{Hs} = 0.04(\overline{Hs} + 1)$ y b) Las condiciones anteriores se cumplen en más del 96% de todos los puntos mojados.
NUM DIR	Esta opción se usa para influenciar el esquema numérico para refracción que fue desactivada para los dominios regionales, no así para los locales.

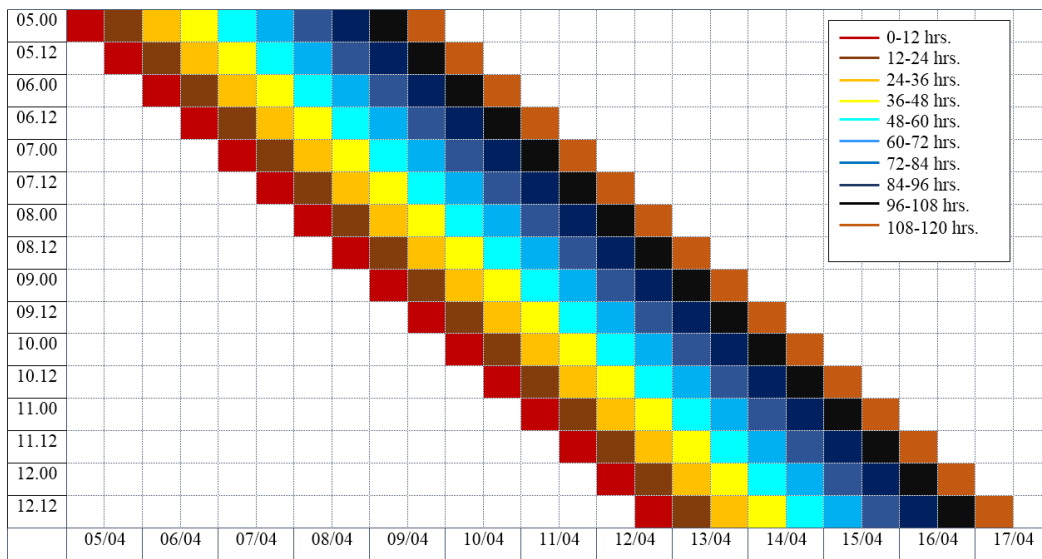
#### 4.4 Evaluación del modelo de oleaje a modo de pronóstico

Para la evaluación de las ventanas de pronóstico del modelo, se tomaron los vientos para las fechas del 05 al 12 de abril de 2014 de los ciclos de las 00 y 12 horas de las predicciones generadas cada día por el GFS. Para cada simulación se realizaron predicciones hasta 120 horas. Esto se realizó para las fechas establecidas para los dominios regionales y locales, y se obtuvieron 16 series de tiempo de oleaje de predicción por cada localidad, cada una comenzando 12 horas después de la anterior con una longitud de 120 horas (5 días) como se muestra en la Figura 20.



**Figura 20 : Representación de los intervalos de 120h tomados para cada ciclo de predicción del GFS. Se tomaron los ciclos de las 00 y 12 horas a partir del día 5.**

Para poder evaluar las ventanas de predicción a distintas horas, se generaron nuevas series de tiempo conformadas por intervalos de 12 horas de cada uno de los 16 ciclos. Con esto se obtuvieron 10 vectores (series de tiempo) con una extensión de 192 horas como se muestra en la Figura 21. Estas nuevas series de tiempo son las que se compararon con las mediciones para evaluar la exactitud del pronóstico de oleaje para cada ventana de predicción.



**Figura 21: Esquema de la creación de las nuevas series de tiempo para obtener los intervalos de predicción a cada 12 horas.**

#### 4.4.1 Validación del modelo de oleaje

Para validar los resultados obtenidos, se hizo un análisis cualitativo comparando las series de tiempo de las boyas del NDBC (Figura 10), así como diagramas de dispersión, contra las salidas del modelo. Asimismo se llevó a cabo el análisis cuantitativo empleando los parámetros estadísticos escalares: Sesgo o *Bias*, índice de sesgo, diferencia de error cuadrático medio, índice de dispersión, y coeficiente de correlación, los cuales se describen a continuación.

*Media:* De los datos medidos ( $m$ ) y los modelados por el SWAN ( $s$ ):

$$\bar{m} = \frac{1}{N} \sum_i m_i$$

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_i s_i$$

*Sesgo (Bias):* El sesgo proporciona información sobre la tendencia que tiene un modelo al pronosticar una variable (subestimar o sobrestimar), cuantificando el error sistemático del modelo:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_i (s_i - m_i)$$

En donde  $s_i$  son los valores que arroja el modelo,  $m_i$  son los valores medidos y  $N$  el tamaño de la muestra.

*Índice de sesgo (Bias Index):* sesgo entre la media de los valores medidos:

$$BI = \frac{\frac{1}{N} \sum_i (s_i - m_i)}{\bar{m}_i}$$

*Diferencia de Error Cuadrático Medio* (Root Mean Square Difference): Indica el grado de correspondencia promedio entre partes individuales de valores pronosticados y observados para el cálculo de precisión.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_i (s_i - m_i)^2}{N}}$$

Desviación estándar de la diferencia:

$$\sigma_d = \left[ \frac{\sum_i (s_i - m_i - b)^2}{N - 1} \right] \quad b = Bias$$

*Índice de correlación* (Scatter Index): Está dado por la desviación estándar entre la media de la muestra.

$$SI = \frac{\sigma_d}{\bar{m}}$$

*Coefficiente de correlación lineal de Pearson* (CC): Mide el grado de intensidad de la relación entre las variables en donde 1 es una correlación perfecta.

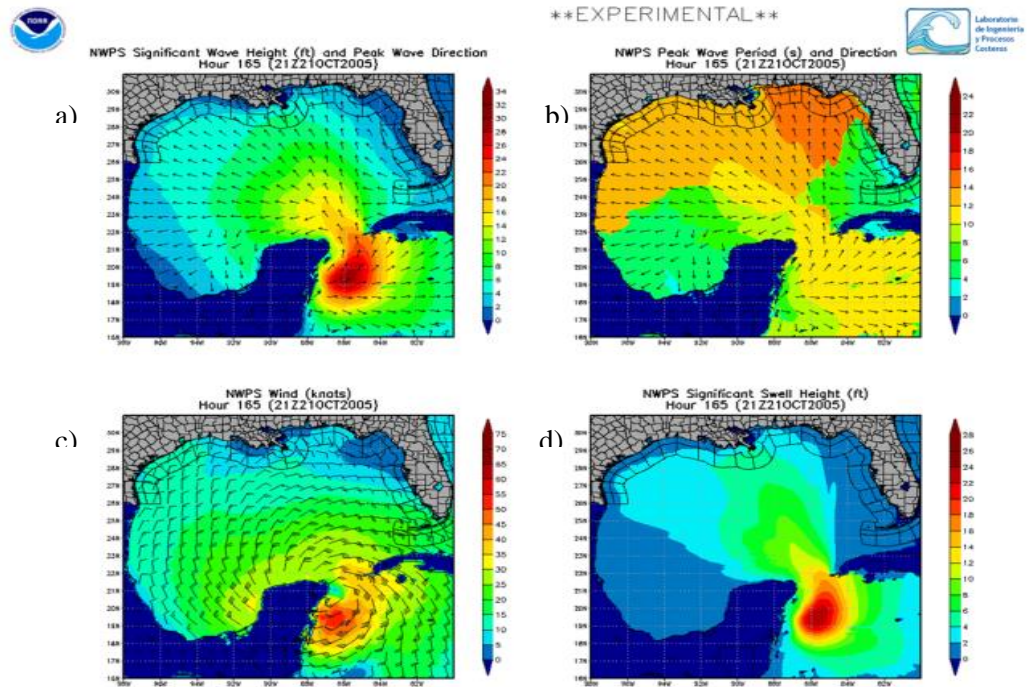
$$CC = \frac{\sum_i [(s_i - \bar{s})(m_i - \bar{m})]/N}{[\sum_i (m_i - \bar{m})^2/N]^{0.5} [\sum_i (s_i - \bar{s})^2/N]^{0.5}}$$

## 4.5 Implementación del NWPS en modo operacional

Una vez validados los resultados del modelo a modo de pronóstico, se habilitó el NWPS en modo operacional. Las salidas del NWPS consisten en tres tipos de resultados: i) campos básicos, (ii) espectros de energía, y (iii) rastreo del campo de olas. Todos los productos finales son archivos de datos y gráficos.

Los campos básicos consisten en altura significativa del oleaje, altura del *swell*, periodo pico, longitud promedio, dirección promedio, dirección del pico espectral, profundidad total,

componentes del viento, y, si están presentes: corrientes y nivel del mar. En la Figura 22 se aprecian estos campos sobre el dominio computacional del Golfo de México. Adicionalmente se tiene información de la profundidad sobre el dominio como lo muestra la Figura 23.



**Figura 22 : Ejemplo de las salidas del modelo (campos básicos) para el Golfo de México en donde se muestra: a) la altura de ola significativa, b) período pico, c) velocidad de viento y d) altura significativa de swell.**

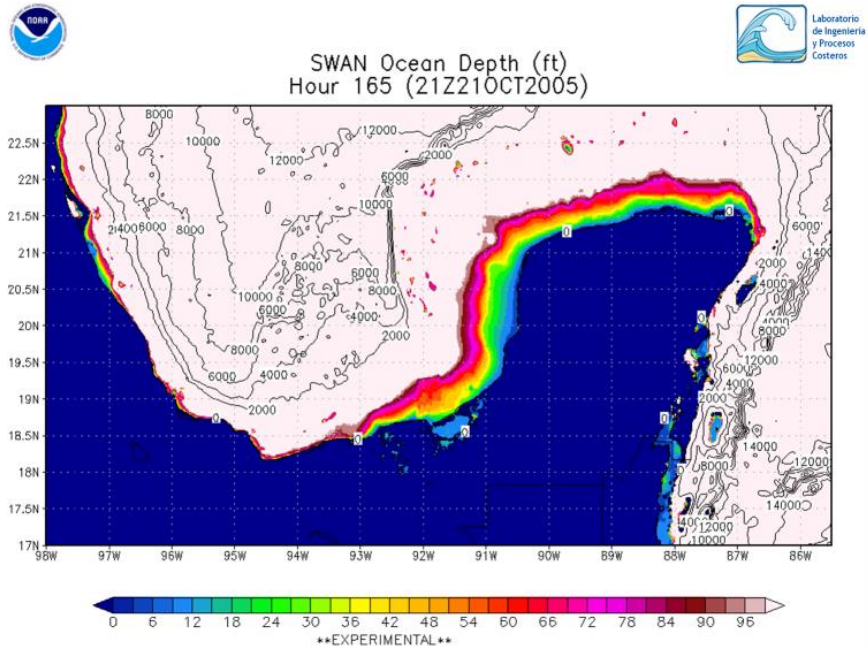


Figura 23: Salida del NWPS en donde se muestra la batimetría de la malla del sur del Golfo de México y Mar Caribe Mexicano.

(ii) Los espectros de energía son unidimensionales, esto es, son espectros en frecuencia (Figura 24).

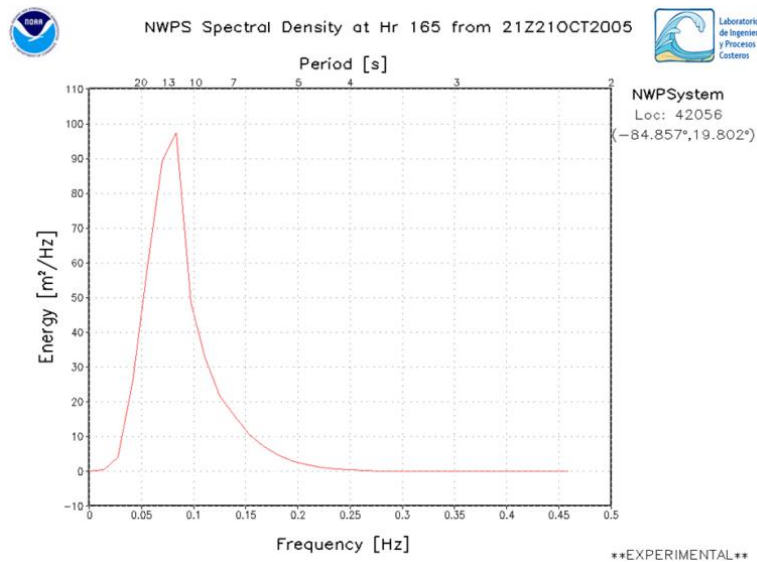
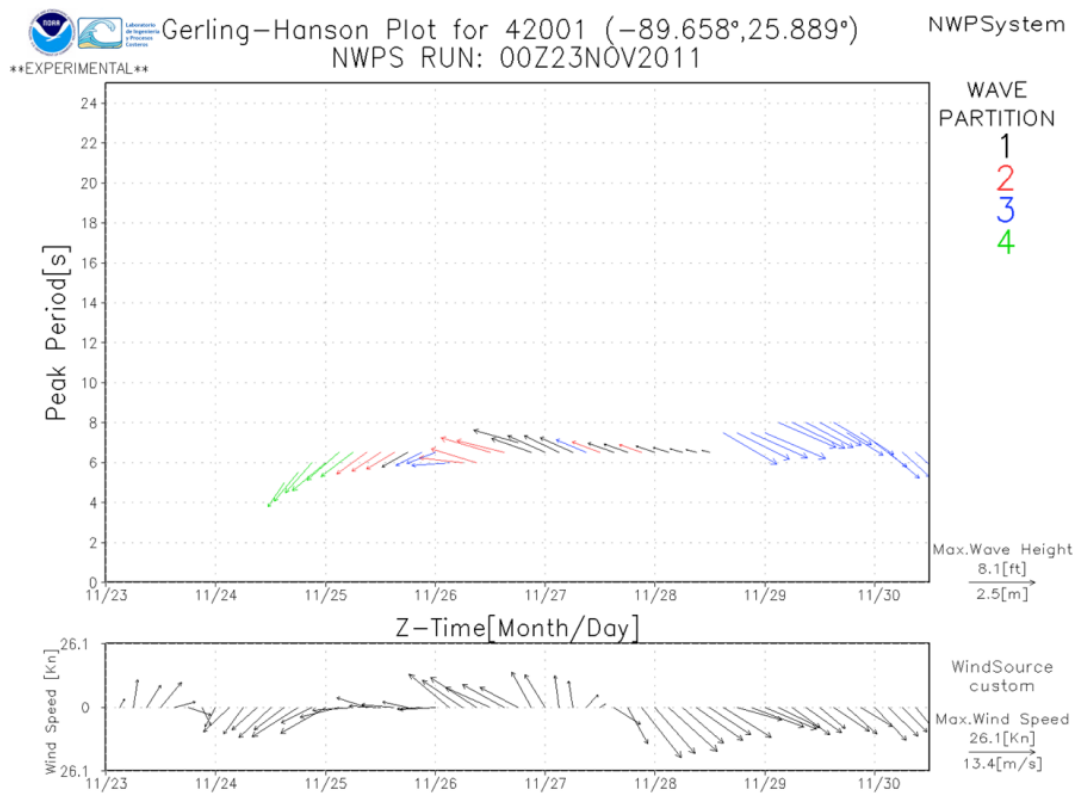


Figura 24: Espectro de energía unidimensional en la localidad de la boya 42056.

(iii) El rastreo del campo de olas se divide en: campos de componentes del oleaje por separado, es decir, se presentan las componentes del campo de olas en el espacio geográfico; y además se obtienen gráficas llamadas “Gráficas de Gerling-Hanson” (Figura 25), que son una descripción de la evolución de las diferentes componentes del oleaje en periodo, altura y dirección para una localidad en particular.



**Figura 25 : Gráfica Gerling-Hanson en la localidad de la boya 42001, una de las salidas del NWPS.**



## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 Evaluación del modelo a modo de retroanálisis

La validación del modelo de oleaje se hizo a partir de los resultados del modelo forzado con los vientos del CFSR, es decir, con el modelo en modo de retroanálisis. A continuación se presentan los resultados obtenidos para un evento de *Norte* ocurrido en el período del 24 de noviembre al 1 de diciembre del 2011 para el cual se tienen mediciones tomadas por un ADCP en aguas someras (~8 m) situado frente a la costa de Progreso. Así como los resultados para el período del 7 al 22 de abril de 2014 en donde se cuenta con las mediciones hechas por dos ADCPs: *Sentinel* a 10 m de profundidad y *Monitor* a 4 m situados frente a la costa de Sisal. La posición de los ADCPs se mostró en la sección de metodología (Figura 17).

Los resultados en la posición de la boya 42001 durante el evento de Norte de 2011 se muestran en la Figura 26. Se puede observar un ajuste aceptable entre las series de tiempo simuladas y medidas de Hs y Tp, así como entre la rapidez del viento medida y del CFSR. Los coeficientes de correlación obtenidos son de 0.94 para la Hs, 0.87 para el Tp y 0.85 para la rapidez del viento. De igual forma, en la Figura 27 y la Figura 28 se presentan las series de tiempo para las boyas 42055 y 42056.

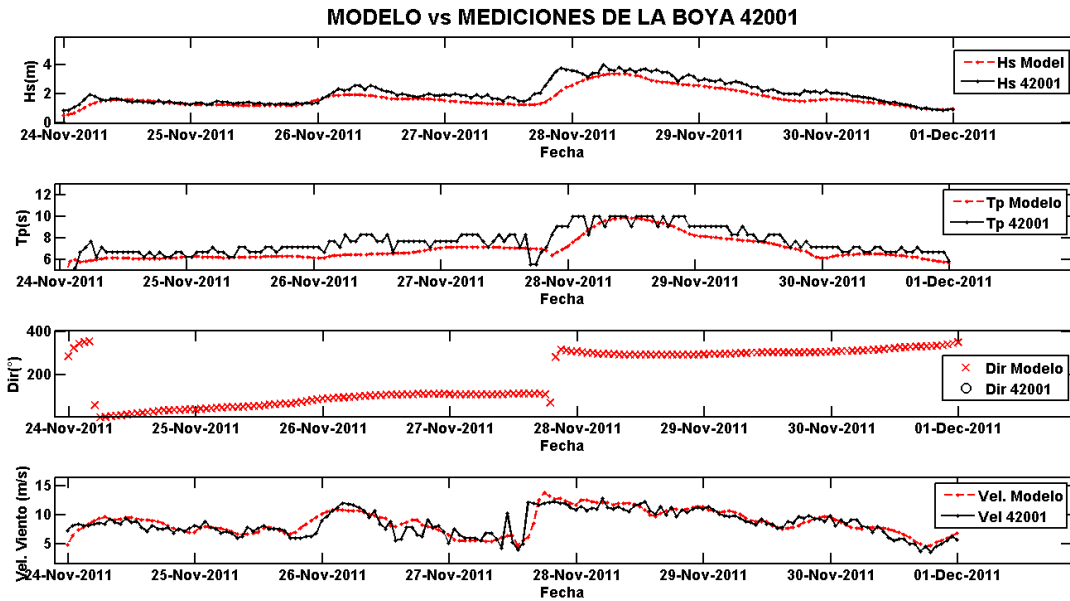


Figura 26: Series de tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje y rapidez de viento para la boya 42001 durante un evento de Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011 (No se registraron datos de la DMO en esta boya durante esas fechas).

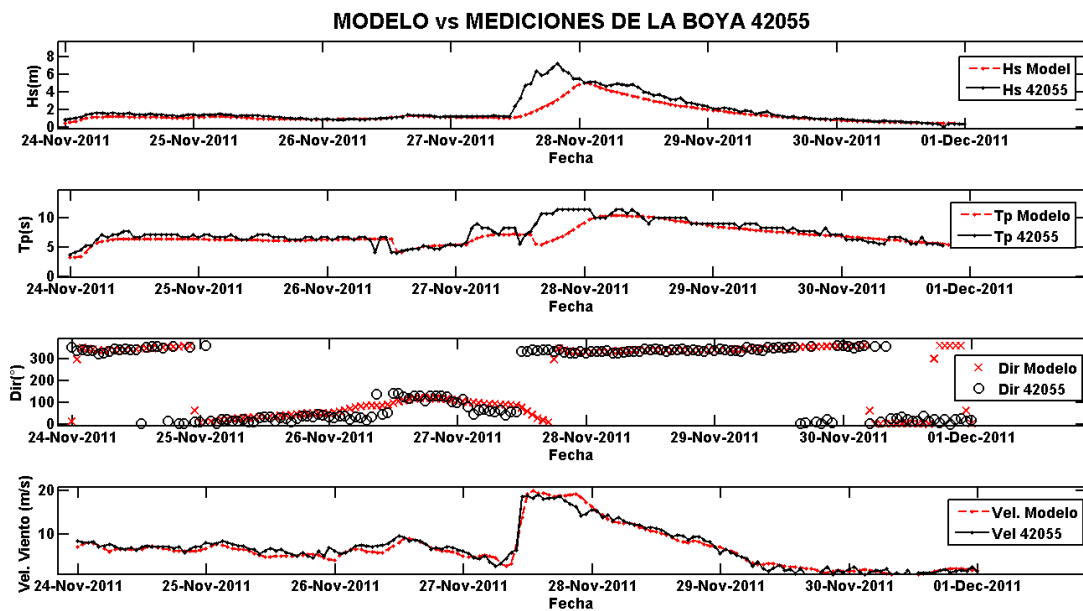
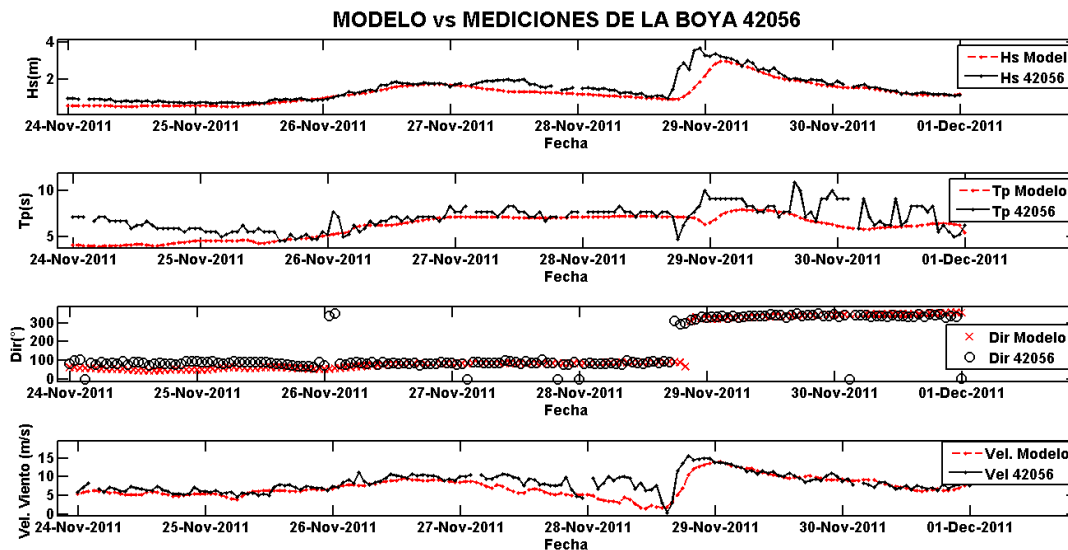


Figura 27: Series de tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje y velocidad de viento para la boya 42055 durante un evento de Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011.



**Figura 28:** Series de tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje y velocidad de viento para la boya 42055 durante un evento de Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011.

En las 3 localidades el modelo tiende a subestimar los picos de Hs, pero en la boya 42055 la diferencia es mayor, siendo de 2.21m. Sin embargo, la rapidez del viento muestra un buen ajuste en los 3 casos con una diferencia máxima de 1.9 m/s en la boya 42056. Los parámetros estadísticos de la Tabla 4 muestran que el mejor ajuste de Hs se presenta en la boya 42056, con un menor sesgo y menor error cuadrático medio. A pesar de que el viento muestra un buen ajuste en las localidades de las boyas, la subestimación de las máximas Hs puede ser debida a una subestimación del viento en otras áreas del dominio computacional; ya que la Hs es una suma del oleaje generado por el viento en ese punto (oleaje local) más el oleaje distante que fue generado por viento en otras áreas del dominio (swell).

En la Figura 29 se muestran los diagramas de dispersión para la boya 42001, en donde se observa una correlación positiva de los datos medidos con los modelados, pero con una subestimación general para la Hs y el Tp. Para la rapidez del viento se presenta un mejor ajuste, lo que sugiere que los vientos del CFSR y las mediciones de las boyas tienen una

buena correlación, alcanzando un coeficiente de correlación de 0.85 como lo muestra la Tabla 4.

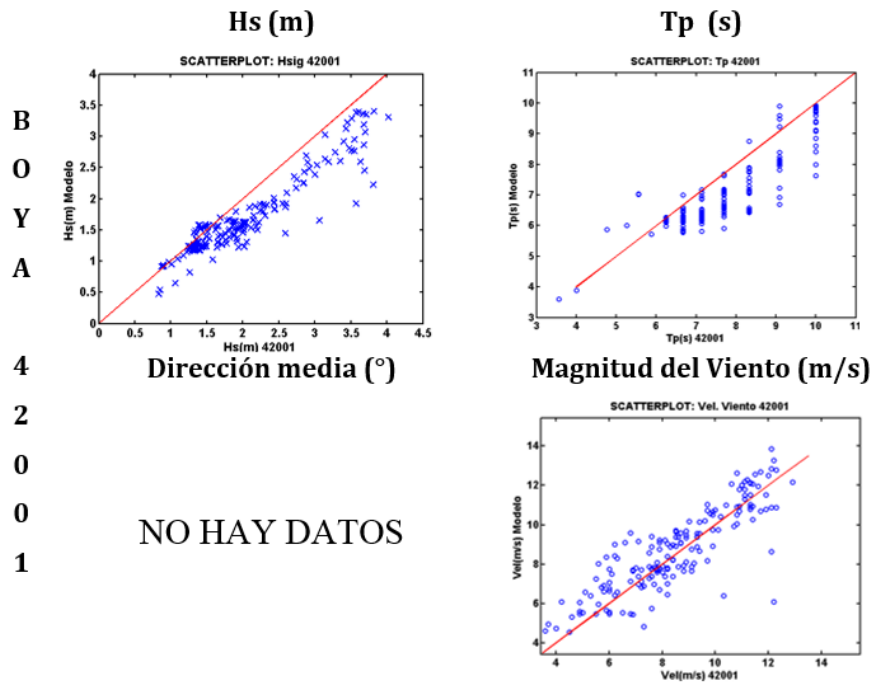
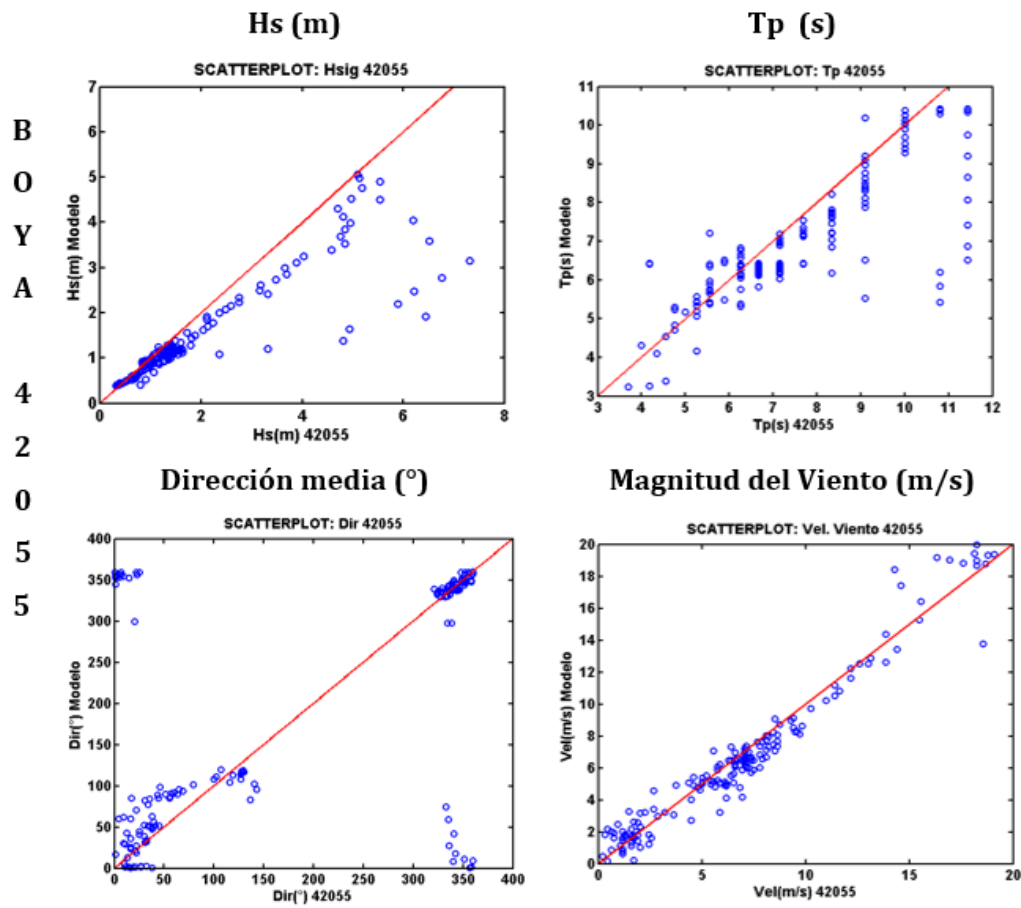


Figura 29: Diagramas de dispersión de la Hs, Tp, dirección media de oleaje y rapidez del viento para la boya 42001.

La Figura 30 muestra los diagramas de dispersión para la boya 42055, en donde existe una subestimación de Hs y Tp; para la rapidez del viento se puede observar un mejor ajuste con un Coeficiente de Correlación de Pearson (CC) de 0.97 como lo indica también la Tabla 4.



**Figura 30: Diagramas de dispersión de la Hs, Tp, dirección media de oleaje y rapidez del viento para la boya 42055.**

Los diagramas de dispersión para la boya 42056 en la Figura 31, muestran una subestimación general del modelo de oleaje para la Hs, Tp y rapidez del viento, alcanzando tan sólo un CC de 0.76.

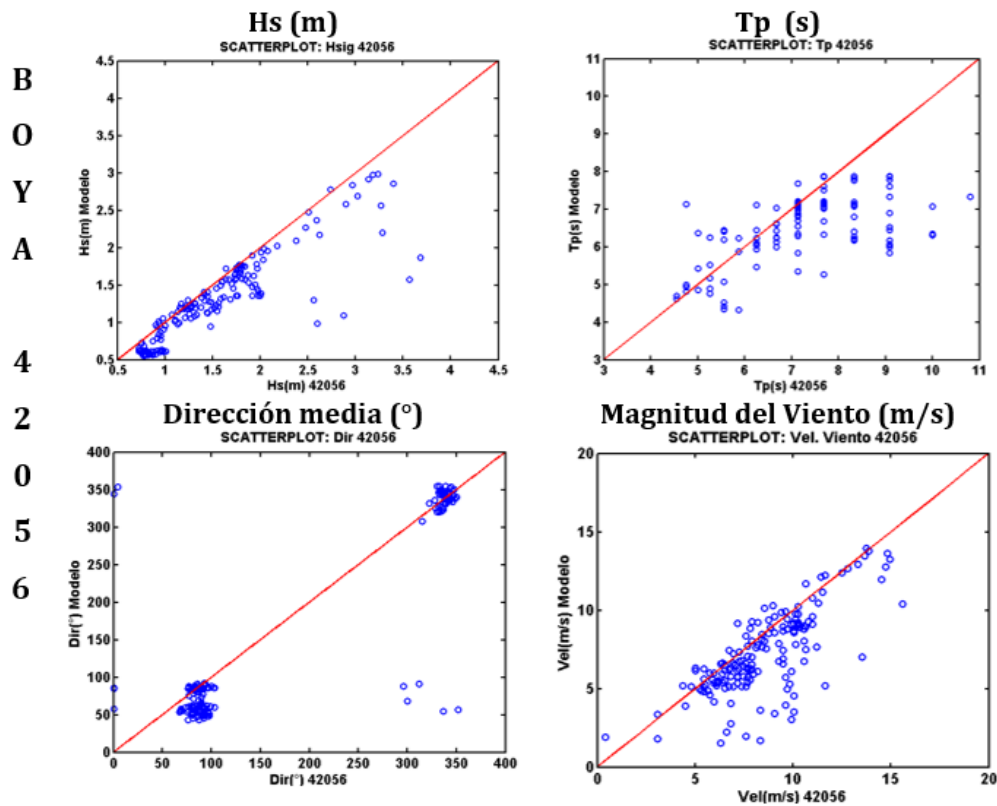


Figura 31: Diagramas de dispersión de la Hs, Tp , dirección media de oleaje y rapidez del viento para la boya 42056.

Comparando los diagramas de dispersión para las distintas boyas, y en base a los parámetros estadísticos de la Tabla 4, existe un mejor ajuste para Hs en la localidad de la boya 42056 ya que el sesgo y el error cuadrático son los menores en comparación con la 42001 y 42055; también se representa mejor la dirección media del oleaje, alcanzando un CC de 0.91. La boya 42001 presenta un mejor ajuste para el Tp y la rapidez del viento es representada mejor para la localidad de la boya 42055. Se presenta en general una alta correlación con la rapidez de vientos entre el reanálisis y las mediciones ya que el CFSR cuenta con asimilación de datos y probablemente las mediciones son incluidas en esta asimilación.

**Tabla 4: Parámetros estadísticos entre los resultados del modelo y las mediciones en las localidades de las 3 boyas de la NDBC para el Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011. Hs, Tp, dirección media del oleaje (DMO) y rapidez del viento (Viento).**

		No. Datos	Media m	Medias	Bias	BI	RMS	SI	CC
42001	Hs	169	2.04	1.70	-0.34	-0.17	0.45	0.22	0.94
	Tp	169	7.61	6.95	-0.65	-0.09	0.90	0.12	0.87
	DMO	0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	Viento	169	8.50	8.71	0.21	0.02	1.18	0.14	0.85
42052	Hs	168	1.89	1.46	-0.43	-0.23	0.92	0.49	0.88
	Tp	168	7.43	6.87	-0.56	-0.07	1.23	0.17	0.81
	DMO	168	187.36	202.78	15.42	0.08	130.00	0.69	0.63
	Viento	169	6.84	6.64	-0.21	-0.03	1.07	0.16	0.97
42056	Hs	164	1.53	1.30	-0.24	-0.15	0.39	0.26	0.89
	Tp	164	7.03	6.11	-0.92	-0.13	1.43	0.20	0.61
	DMO	164	169.79	154.19	-15.60	-0.09	55.00	0.32	0.91
	Viento	165	8.44	7.20	-1.24	-0.15	2.16	0.26	0.76

En base a los parámetros estadísticos observados y al análisis cualitativo tanto de las series de tiempo como de los diagramas de dispersión, se puede inferir que el modelo de oleaje hizo un buen trabajo representando las condiciones en las localidades de las boyas para las fechas simuladas.

La validación en aguas profundas se realizó utilizando las boyas 42003, 42055 y 42056, para el evento del 07 al 22 de abril de 2014. Para esto se presenta una comparativa de las series de tiempo de Hs (Figura 32) y rapidez del viento (Figura 33). El modelo sobrestima las Hs para la boya 42003 en el pico de la tormenta mientras que para las boyas 42055 y 42056 el oleaje es ligeramente subestimado. El mejor ajuste se obtiene para la boya 42056, como lo indican los parámetros estadísticos de la Tabla 5. De esta manera, el modelo presenta un desempeño aceptable simulando la Hs con coeficientes de correlación arriba de 0.85 para todos los casos y un índice de sesgo máximo de 0.23.

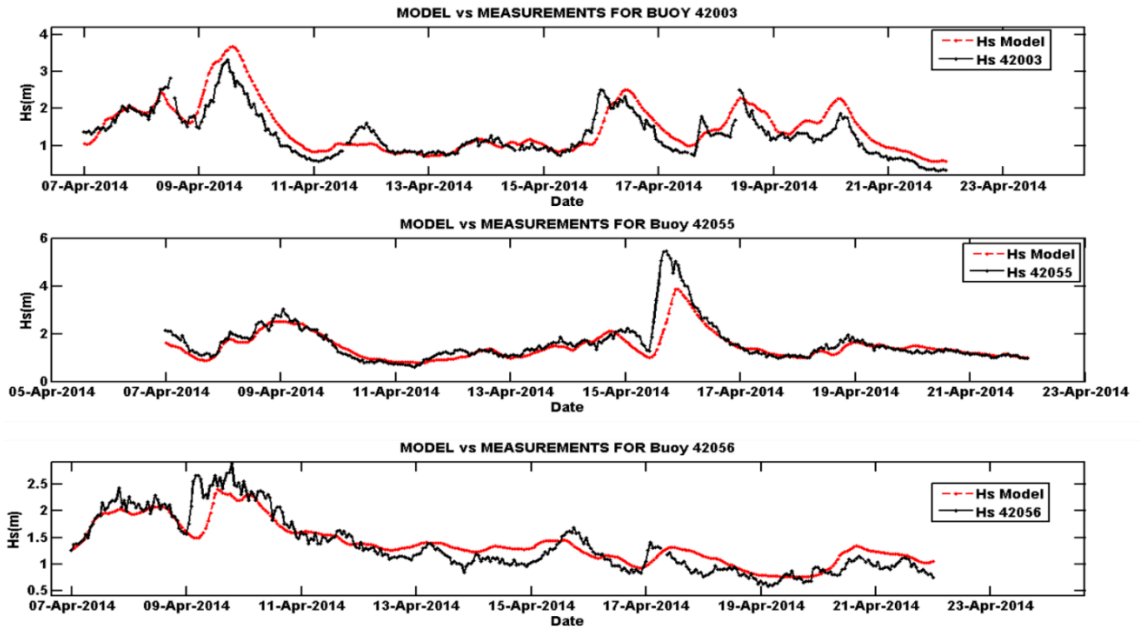


Figura 32: Series de tiempo de Hs para las boyas 42003, 42055 y 42056 de la NDBC para el período del 07 al 22 de abril de 2014.

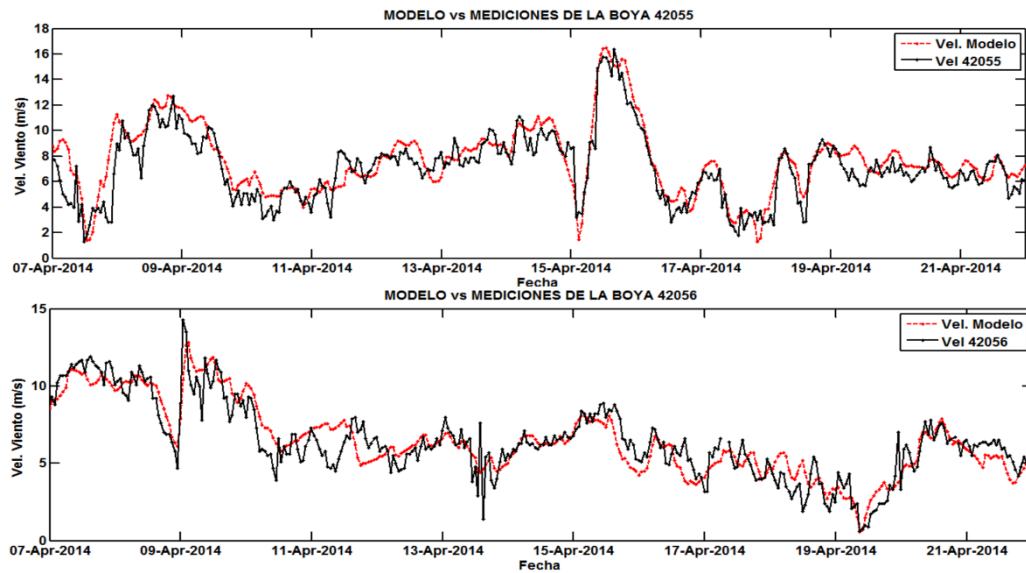


Figura 33: Series de tiempo de la rapidez del viento para las boyas 42055 y 42056 de la NDBC para el período del 07 al 22 de abril de 2014.



**Tabla 5: Parámetros estadísticos de la Hs para las 3 boyas de la NDBC del 07 al 22 de abril de 2014.**

<b>Hs</b>	<b>No. Datos</b>	<b>Media m</b>	<b>Media s</b>	<b>Bias</b>	<b>BI</b>	<b>RMS</b>	<b>SI</b>	<b>CC</b>
<b>42003</b>	356.00	1.31	1.47	0.16	0.12	0.34	0.26	0.89
<b>42055</b>	361.00	1.60	1.47	-0.13	-0.08	0.45	0.28	0.86
<b>42056</b>	358.00	1.35	1.39	0.04	0.03	0.23	0.17	0.92

En cuanto a la rapidez del viento, se puede apreciar que nuevamente los vientos del CFSR tienen una correlación alta con las mediciones de las boyas 42055 y 42056 (Tabla 6). No existen registros de viento para la boya 42003.

**Tabla 6: Parámetros estadísticos de la rapidez del viento para las 2 boyas de la NDBC del 07 al 22 de abril de 2014.**

<b>Rapidez Del Viento</b>	<b>No. Datos</b>	<b>Media m</b>	<b>Media s</b>	<b>Bias</b>	<b>BI</b>	<b>RMS</b>	<b>SI</b>	<b>CC</b>
<b>42055</b>	361.00	7.07	7.68	0.60	0.09	1.36	0.19	0.90
<b>42056</b>	358.00	6.45	6.49	0.04	0.01	1.10	0.17	0.89

Los vientos del reanálisis muestran un buen ajuste en relación con las mediciones como lo indica la literatura (e.g. Suranjana et al. 2010, Liléo and Petrik, 2009, Ruiz 2013), alcanzando a representar las velocidades máximas del viento con una subestimación máxima de 4 m/s que concuerda con lo encontrado por Appendini et al. 2013. Asimismo, y de acuerdo a los estudios mencionados, se observa que el menor ajuste se localiza en la boya 42056 situada en el Mar Caribe.

La validación de los resultados del modelo numérico contra mediciones tomadas en aguas someras, permite evaluar si se tomaron correctamente los parámetros de fricción de fondo y rotura del oleaje en el modelo son los adecuados. Por tanto, se presentan a continuación las series de tiempo en donde se comparan las mediciones del ADCP en Progreso con las salidas del modelo en la malla local, para los dos periodos de evaluación.

La Figura 34 muestra los resultados para el Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre de 2011, donde se observa un buen ajuste entre los datos medidos y los simulados. En la

Tabla 7 se muestra la evaluación del modelo en base a los parámetros estadísticos. Los resultados son satisfactorios con un CC de 0.93 y un sesgo de -0.14 para la Hs.

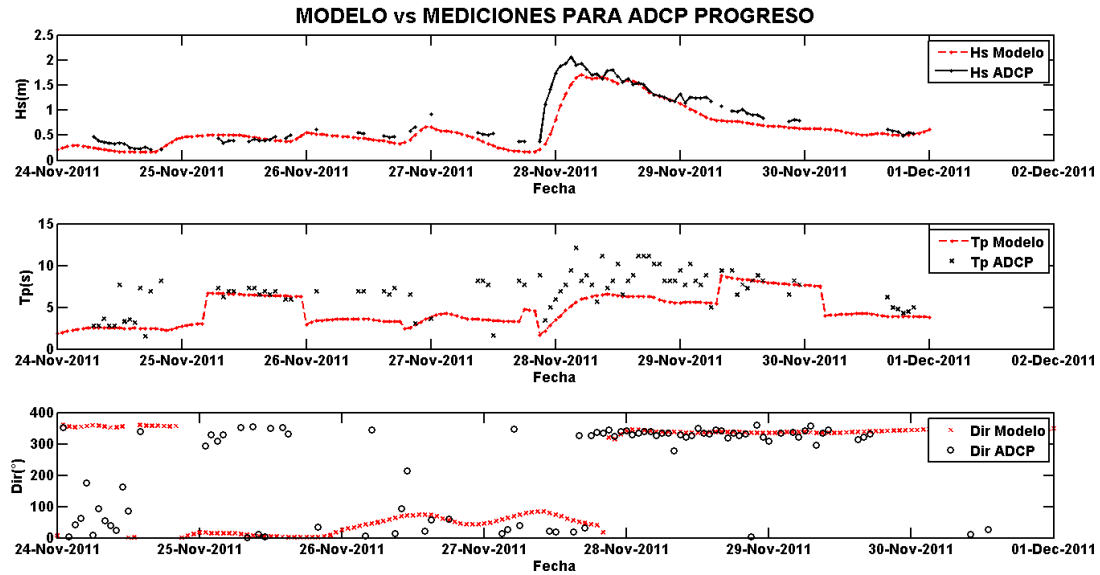


Figura 34: Series de Tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje para el ADCP situado en la costa de Yucatán durante un evento de Norte ocurrido entre el 24 de noviembre y el 1 de diciembre del 2011.

**Tabla 7: Parámetros estadísticos de las mediciones del ADCP colocado en la costa de Yucatán para el Norte ocurrido el 24/11/2011.**

	No. Datos	Media m	Media s	Bias	BI	RMS	SI	CC
<b>Hs</b>	85	0.93	0.79	-0.14	-0.15	0.24	0.26	0.93
<b>Tp</b>	85	7.22	5.67	-1.55	-0.21	2.79	0.39	0.46
<b>Dirección media</b>	85	241.40	236.70	-4.70	-0.02	154.57	0.64	0.41

Las series de tiempo de Hs para el período del 07 al 22 de abril de 2014 se encuentran en la Figura 35 y Figura 36, en las que se observa una ligera sobrestimación en el primer pico de la tormenta para ambos sensores. El segundo pico de Hs es subestimado en el sensor localizado a 10 m (Sentinel) y es mejor representado para el sensor que se encuentra a 4 m de profundidad (Monitor). El sesgo obtenido para el Sentinel es de 0.053 y para el Monitor de -0.02, con coeficientes de correlación mayores a 0.81. Hay que denotar que los mínimos de Hs en Sentinel están bien simulados pero no así en Monitor, en donde se observa un desfase en el pico que se alcanza el día 15 a las cero horas. Considerando que el Monitor se encuentra a solo 4 m de profundidad, las variaciones en el nivel del mar y las corrientes en la zona posiblemente tienen un efecto en la modulación del oleaje a esta profundidad. En las simulaciones no se consideraron ni las corrientes ni las variaciones en el nivel del mar, lo que posiblemente es la causa del desfase del pico en el Monitor, así como una menor correlación con los datos medidos. La Tabla 8 muestra la evaluación del modelo en base a los parámetros estadísticos, dando resultados satisfactorios con un coeficiente de correlación arriba de 0.8 para la Hs.

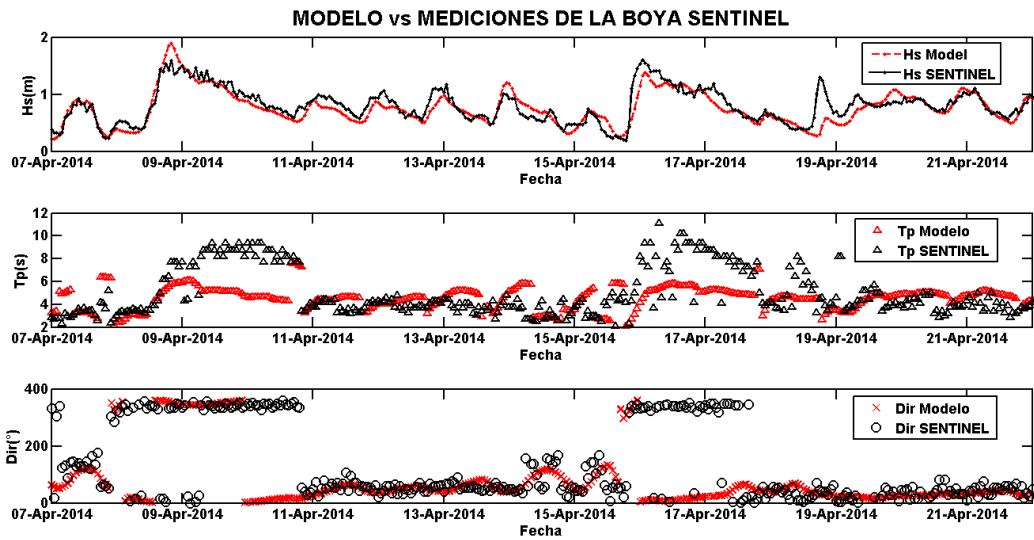


Figura 35: Series de Tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje de las mediciones del ADCP situado a 10m de profundidad enfrente de Sisal entre el 07 y el 22 de abril de 2014.

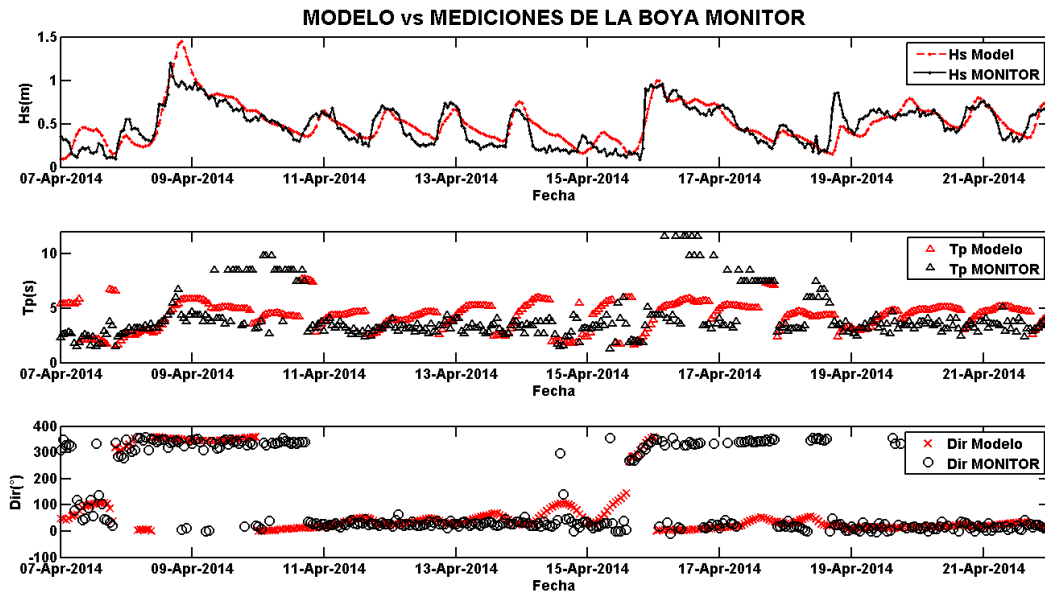


Figura 36 : Series de Tiempo de Hs, Tp, dirección media de oleaje para el ADCP situado a 4m de profundidad enfrente de Sisal entre el 07 y el 22 de abril de 2014.

**Tabla 8: Parámetros estadísticos de la Hs para los dos ADCPs enfrente de Sisal, Yucatán del 07 al 22 de abril de 2014.**

<b>Hs</b>	<b>Bias</b>	<b>BI</b>	<b>RMS</b>	<b>SI</b>	<b>CC</b>
<b>SENTINEL</b>	0.05	0.07	0.17	0.23	0.85
<b>MONITOR</b>	-0.02	-0.04	0.14	0.28	0.81

Los ADCPs Sentinel y Monitor se encuentran en aguas someras en donde la física del oleaje es principalmente dominada por sus interacciones con el fondo, por lo que es importante que la calidad de la batimetría sea la adecuada para obtener buenos resultados. Cabe mencionar que en Sisal, las condiciones meteorológicas locales (i.e., brisas marinas) también son importantes, los eventos de brisas producen un ciclo diurno con una velocidad máxima de 14 m/s, la cual es capaz de generar oleaje local en la zona. Este oleaje es de período corto y de pequeña amplitud, con una dirección incidente del NE, por lo que la resolución de los vientos que se utilizan para el forzamiento del modelo en este tipo de playas juega un papel relevante y debe asegurarse para poder representar adecuadamente las condiciones medias.

Cuando se trata de eventos de meso escala (i.e. Nortes), el oleaje es generado a nivel regional y está en función del fetch y la velocidad del viento. Este oleaje es propagado a aguas someras, en donde la modulación del oleaje está más controlado por los efectos de la profundidad.

En base a los parámetros estadísticos para ambos periodos de tiempo simulados (Tabla 7 y Tabla 8), se puede concluir que el modelo de oleaje realiza un buen trabajo en reproducir el estado de mar en aguas someras al ser forzado con vientos del CFSR. Esto nos indica que existe una buena batimetría y una buena elección de los parámetros físicos relevantes para aguas someras.

## 5.2 Evaluación del modelo a modo de pronóstico

Una vez validado el modelo en modo retroanálisis para aguas profundas y aguas someras, se procedió a la implementación y validación del modelo a modo de pronóstico. Para esto, se obtuvieron los vientos de 2 de los 4 ciclos de pronóstico del GFS del 06 al 12 de abril de 2014 como se especificó en la sección 4.2.2.2. Con estos vientos se forzó el modelo sobre los dominios regionales y locales para obtener 16 series de predicción de oleaje por cada localidad. A continuación se presenta la validación del modelo.

En primer lugar se presenta la validación para aguas profundas utilizando las boyas de la NDBC. En la Figura 37, se encuentra las gráficas con las series de tiempo de la rapidez del viento y Hs para la boya 42003. La línea negra denota las mediciones de la boya y las líneas de colores corresponden a los ciclos de predicción, teniendo cada uno una extensión de 120 horas.

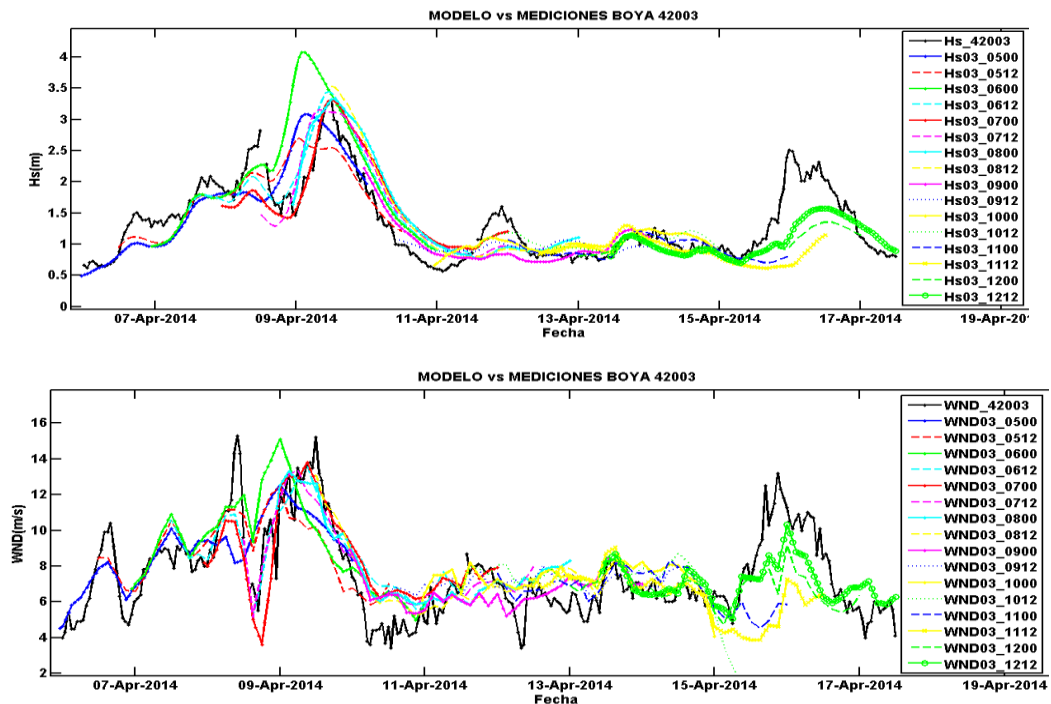


Figura 37: Series de tiempo de Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para todos los ciclos de predicción correspondientes a la localidad de la boya 42003.

La series de tiempo de la Figura 37 son difíciles de interpretar, por lo cual, para poder evaluar mejor las ventanas de predicción, se sacaron nuevas series de tiempo conformadas por intervalos de 12 horas de cada uno de los 16 ciclos de predicción. Esto se muestra en la Figura 38 para la Hs y la Figura 39 para la rapidez del viento, en donde se graficaron los vectores de las diferentes ventanas de predicción y las mediciones. Adicionalmente, para las nuevas series de tiempo correspondientes a las ventanas de predicción, se calcularon los parámetros estadísticos descritos en la sección 4.4.1<sup>22</sup>.

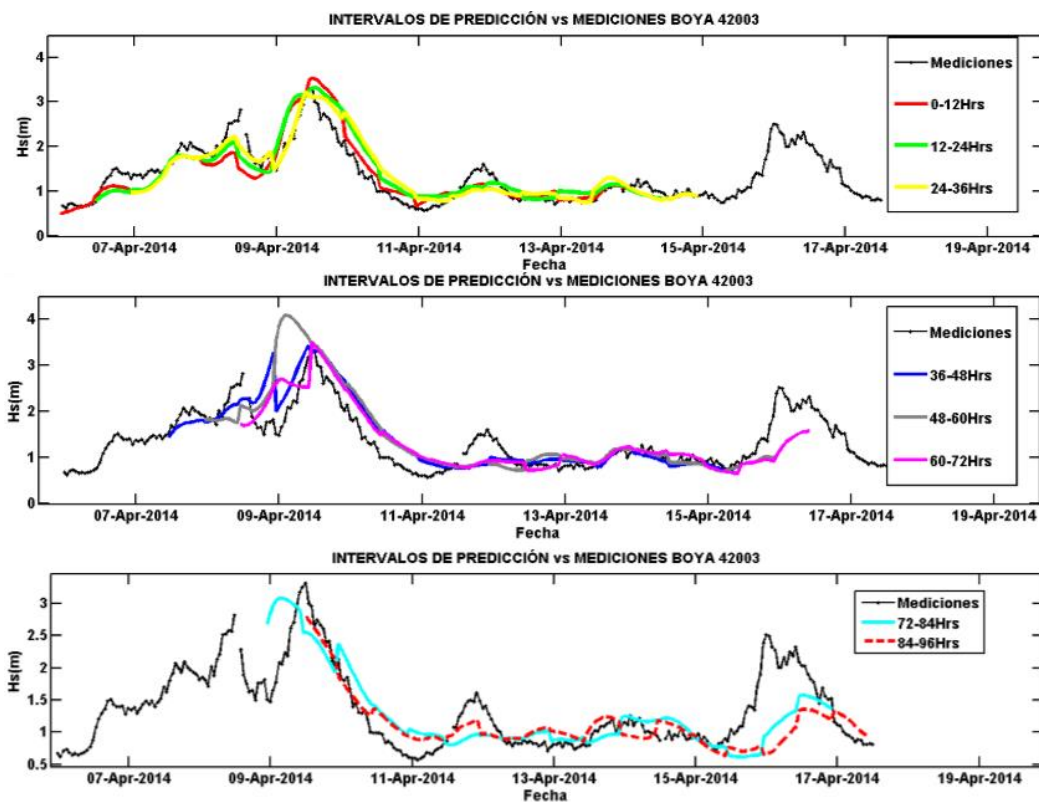
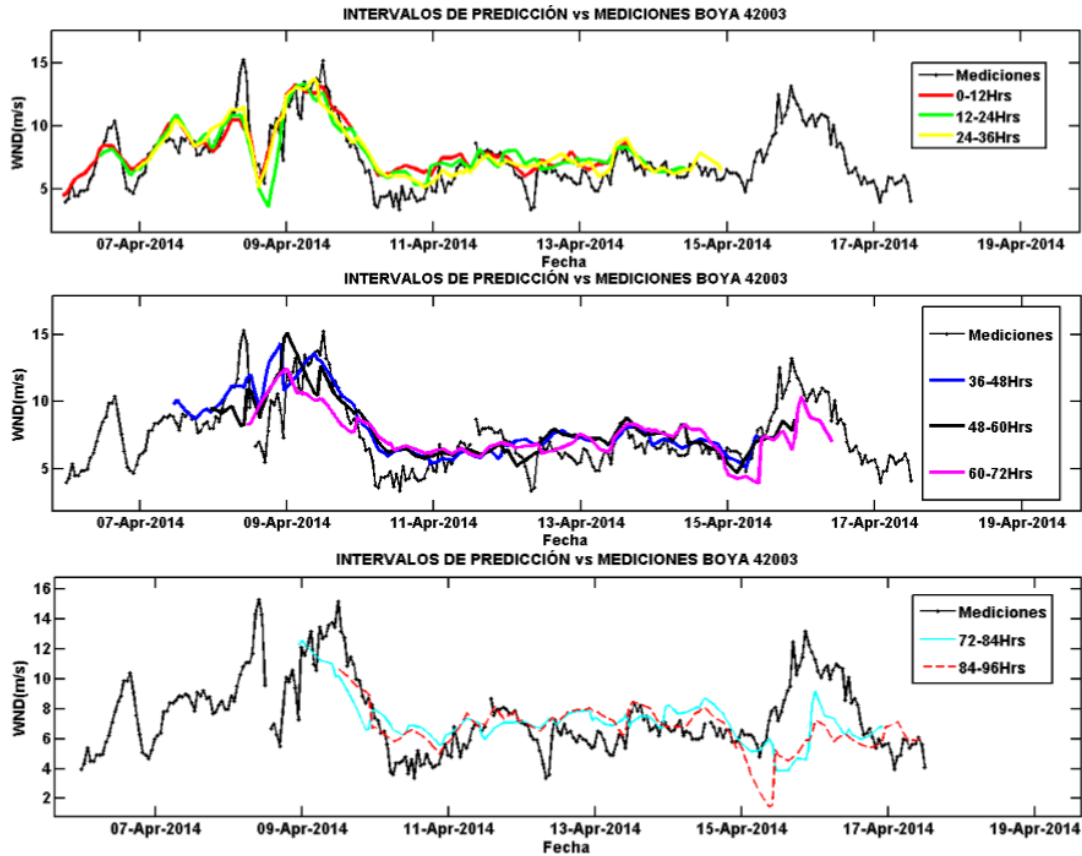


Figura 38: Series de tiempo de Hs de las diferentes ventanas de predicción en la localidad de la boya 42003.

<sup>22</sup> Las series de tiempo para todas las boyas y para todos los períodos de predicción se encuentran en los apéndices A y B.





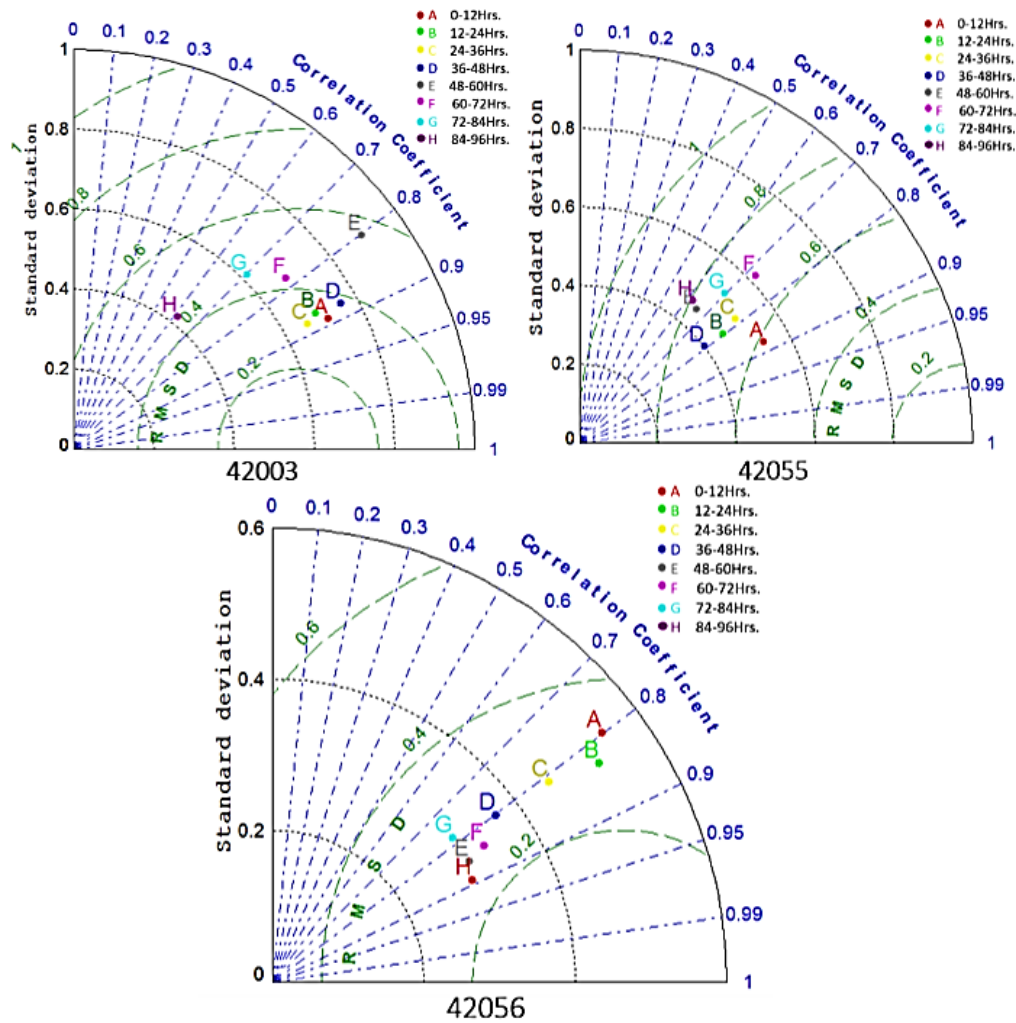
**Figura 39:** Series de tiempo de la rapidez del viento para las diferentes ventanas de predicción en la boya 42003.

En la Tabla 9 se encuentran los parámetros estadísticos de la  $H_s$ , calculados para los diferentes intervalos de pronóstico, en donde  $m$  (mediciones) son los datos registrados por las boyas y  $s$  (simulaciones) son los resultados del modelo. Para una mejor representación visual de dichos parámetros estadísticos, se presentan diagramas de Taylor para cada una de las boyas (Figura 40). En estos diagramas las líneas radiales azules representan los coeficientes de correlación, los contornos circulares negros representan las desviaciones estándar y los contornos circulares verdes representan el error cuadrático medio, mientras que cada punto de diferente color representa los diferentes intervalos de predicción. Para las boyas 42003 y 42055 la mejor representación se da con el vector de las primeras doce horas de predicción con un mayor coeficiente de correlación y un menor error cuadrático medio, a partir de ahí, la calidad de las mediciones decrece en general. A diferencia de lo

que esperaríamos, esto no sucede para la boya 42056, en donde no parece haber ninguna relación entre la calidad del pronóstico y la ventana de predicción.

**Tabla 9: Parámetros estadísticos de Hs calculados para las diferentes ventanas de predicción en las localidades de las 3 boyas de la NDBC.**

	Hs	No. Datos	Media m (m)	Media s (m)	Bias (m)	BI	RMS (m)	SI (m)	CC
42056	0_12	190	1.38	1.37	-0.02	-0.01	0.33	0.24	0.89
	12_24	190	1.41	1.45	0.04	0.03	0.34	0.24	0.87
	24_36	189	1.39	1.42	0.04	0.03	0.32	0.23	0.88
	36_48	189	1.35	1.45	0.10	0.08	0.38	0.28	0.88
	48_60	189	1.32	1.47	0.15	0.11	0.56	0.43	0.80
	60_72	189	1.32	1.34	0.01	0.01	0.44	0.33	0.78
	72_84	190	1.32	1.27	-0.04	-0.03	0.48	0.37	0.70
	84_96	190	1.23	1.12	-0.10	-0.08	0.46	0.37	0.62
42057	0_12	192	1.46	1.29	-0.17	-0.12	0.32	0.22	0.88
	12_24	192	1.48	1.37	-0.11	-0.08	0.34	0.23	0.80
	24_36	192	1.50	1.42	-0.07	-0.05	0.35	0.24	0.78
	36_48	192	1.50	1.36	-0.14	-0.09	0.36	0.24	0.79
	48_60	192	1.71	1.39	-0.33	-0.19	0.80	0.47	0.66
	60_72	192	1.80	1.53	-0.26	-0.15	0.76	0.42	0.73
	72_84	192	1.77	1.47	-0.30	-0.17	0.80	0.45	0.70
	84_96	192	1.69	1.36	-0.33	-0.20	0.86	0.51	0.62
42058	0_12	192	1.68	1.33	-0.34	-0.21	0.48	0.29	0.80
	12_24	192	1.68	1.39	-0.28	-0.17	0.41	0.24	0.83
	24_36	192	1.66	1.42	-0.24	-0.15	0.39	0.24	0.81
	36_48	192	1.64	1.49	-0.15	-0.09	0.35	0.21	0.80
	48_60	192	1.60	1.59	-0.01	-0.01	0.30	0.19	0.85
	60_72	192	1.54	1.59	0.05	0.03	0.29	0.19	0.84
	72_84	192	1.48	1.51	0.03	0.02	0.34	0.23	0.78
	84_96	190	1.41	1.48	0.06	0.04	0.25	0.18	0.89



**Figura 40: Diagramas de Taylor de la Hs para los diferentes intervalos de predicción del modelo de oleaje en las localidades de las boyas del NDBC.**

En la Tabla 10 se encuentran los parámetros estadísticos para la rapidez del viento en las 3 boyas del NDBC y sus correspondientes diagramas de Taylor en la Figura 41. En la boya 42003 se observa que el intervalo de 24-36 horas de los vientos del GFS alcanzan una mejor correlación con las mediciones que los intervalos de 0-12 y de 12-24. En la boya 42055, los vientos de los intervalos de 48-84 horas son los que parecen ajustarse mejor a las

mediciones, al igual que con el oleaje, mientras que el intervalo con mejor ajuste para la rapidez del viento es el de 84-96 horas.

**Tabla 10: Parámetros estadísticos de la rapidez del viento calculados para las diferentes ventanas de predicción en las localidades de las 3 boyas de la NDBC.**

	Viento	No. Datos	Media m (m/s)	Media s (m/s)	Bias (m/s)	BI	RMS (m/s)	SI	CC
4 2 0 0 3	0_12	190	7.52	8.14	0.62	0.08	1.42	0.19	0.88
	12_24	190	7.58	8.00	0.41	0.05	1.56	0.21	0.80
	24_36	189	7.52	8.02	0.50	0.07	1.28	0.17	0.89
	36_48	189	7.42	8.10	0.68	0.09	1.65	0.22	0.81
	48_60	189	7.54	7.88	0.33	0.04	1.89	0.25	0.71
	60_72	189	7.50	7.53	0.03	0.00	2.01	0.27	0.60
	72_84	190	7.41	7.22	-0.19	-0.03	2.30	0.31	0.44
	84_96	190	6.96	6.69	-0.27	-0.04	2.32	0.33	0.24
4 2 0 5 5	0_12	192	7.06	7.70	0.64	0.09	1.83	0.26	0.73
	12_24	192	7.27	7.74	0.47	0.06	1.75	0.24	0.72
	24_36	192	7.29	7.58	0.28	0.04	1.68	0.23	0.75
	36_48	192	7.45	7.37	-0.09	-0.01	1.43	0.19	0.82
	48_60	192	8.13	8.03	-0.11	-0.01	1.39	0.17	0.86
	60_72	192	8.06	8.06	0.00	0.00	1.40	0.17	0.87
	72_84	192	7.63	7.37	-0.25	-0.03	1.66	0.22	0.81
	84_96	192	7.38	7.29	-0.09	-0.01	1.86	0.25	0.75
4 2 0 5 6	0_12	192	7.83	8.08	0.25	0.03	1.50	0.19	0.78
	12_24	192	7.70	7.94	0.23	0.03	1.64	0.21	0.74
	24_36	192	7.53	7.54	0.01	0.00	1.80	0.24	0.68
	36_48	192	7.37	7.59	0.22	0.03	1.61	0.22	0.72
	48_60	192	7.12	7.69	0.57	0.08	1.35	0.19	0.79
	60_72	192	6.85	7.28	0.43	0.06	1.41	0.21	0.70
	72_84	192	6.69	6.80	0.11	0.02	1.64	0.25	0.52
	84_96	190	6.36	6.92	0.55	0.09	1.36	0.21	0.65

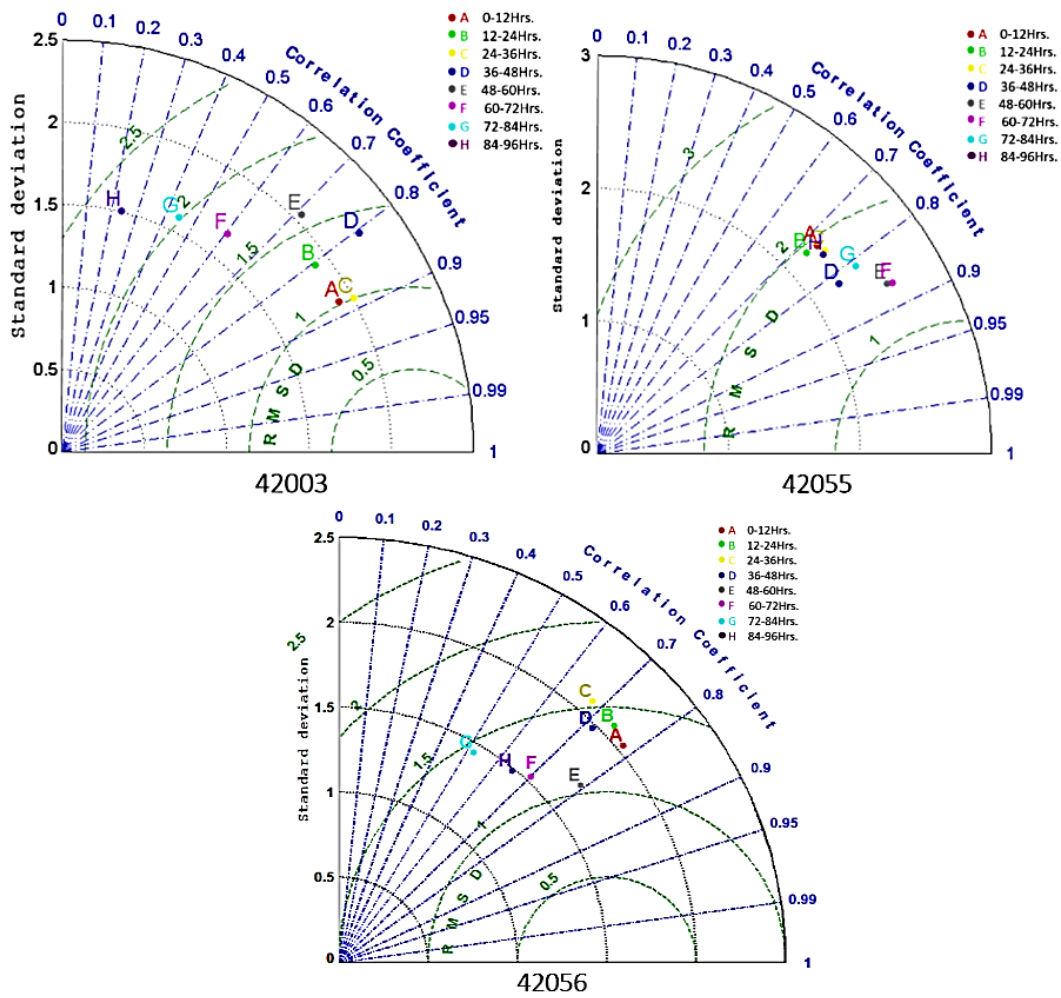
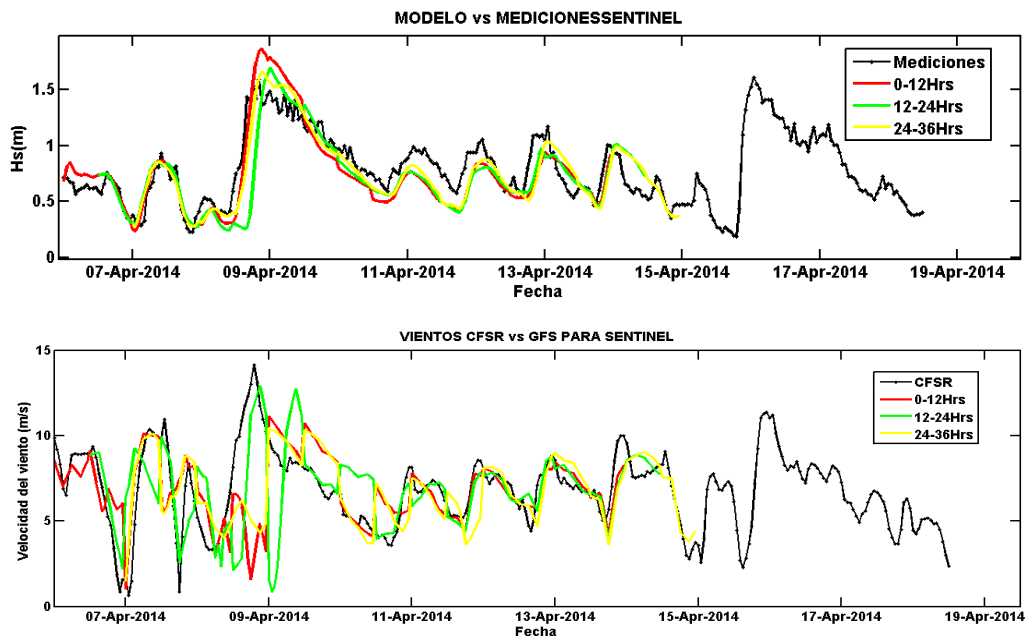


Figura 41: Diagramas de Taylor de la rapidez del viento para los diferentes intervalos de predicción del GFS en las boyas del NDBC.

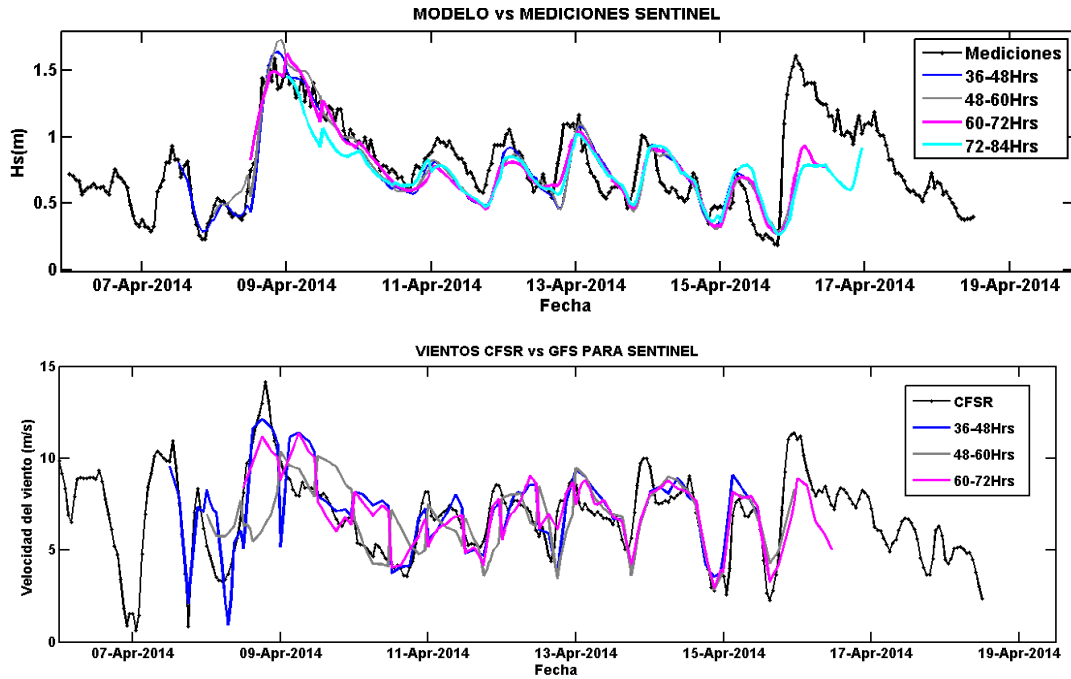
Si analizamos de manera similar las salidas en las localidades en donde se encuentran los sensores en aguas someras y las comparamos con las mediciones, obtenemos las series de tiempo de la Figura 42 a la Figura 44 para el ADCP Sentinel (10m de profundidad). En estas gráficas se aprecia claramente un desfase del pico en la serie de tiempo correspondiente al intervalo de 12 a 24 horas con respecto tanto a las mediciones como a los intervalos de 0 a 12 y de 24 a 36 horas. Ya que no se cuenta con mediciones del viento en la ubicación de los sensores, los vientos del GFS se compararon con los vientos del CFSR (Figura 42).

Las Hs simuladas se ajustan muy bien a las mediciones para el paso del *Norte* ocurrido entre el 8 y 11 de abril de 2014, en donde la predicción sobreestima la Hs máximas por hasta 0.2 m durante las primeras 12 horas (Figura 42). En períodos de calma, en donde el oleaje es dominado por las brisas locales, las alturas de predicción subestiman los máximos de Hs hasta por 0.18 m. Con respecto a los vientos, es claro que los del GFS al paso del *Norte* no están bien representados en esta localidad, en especial para el intervalo de 12 a 24 horas, no así para las brisas en donde estos intervalos de predicción se ajustan mejor a los vientos de reanálisis. La buena representación de la Hs en el pico al paso del *Norte* teniendo vientos inadecuados se debe a que para estos eventos, en profundidades reducidas, es más importante el oleaje que entra por las fronteras de la malla local que el oleaje generado localmente por las brisas locales. Este no es el caso de los periodos de condiciones medias, donde dominan las brisas marinas.



**Figura 42: Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 0 hasta 36 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Sentinel.**

En la Figura 43 y Figura 44 se aprecia que conforme aumentan las horas de predicción, se va perdiendo precisión en los resultados del modelo debido a la baja calidad de los vientos de pronóstico.



**Figura 43:** Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 36 hasta 72 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Sentinel.

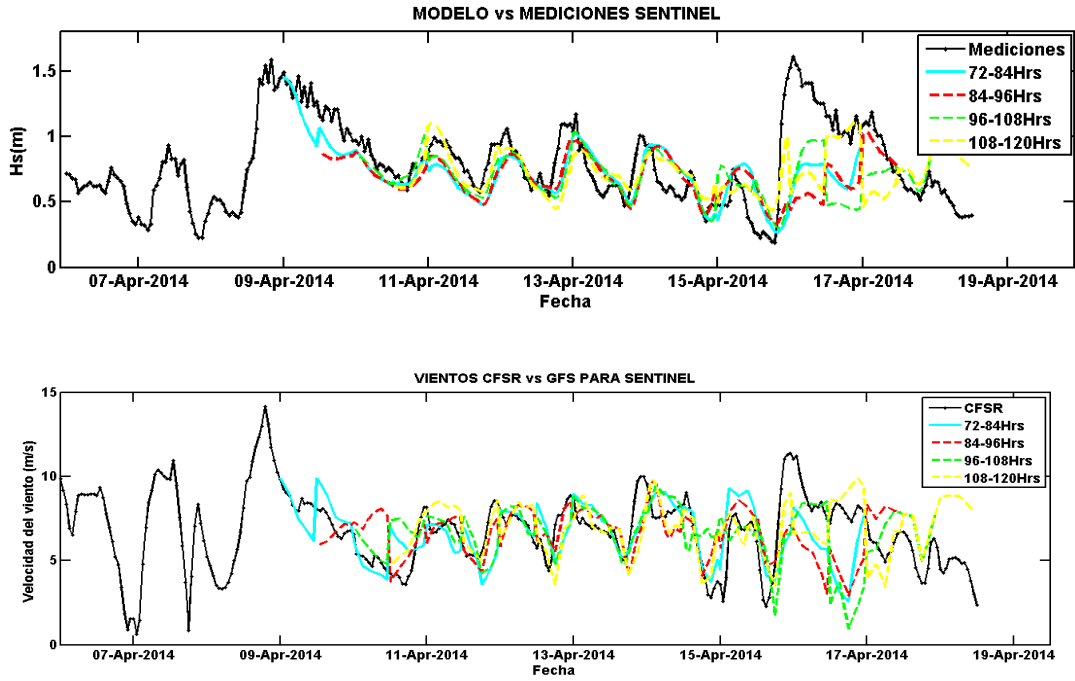


Figura 44: Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 72 hasta 120 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Sentinel.

La



Tabla 11 y la Figura 45 muestran que el mejor ajuste se da en las ventanas de 0-12 horas y de 36-48 con un CC de 0.88. En el diagrama se observa cómo se va perdiendo precisión para ventanas de predicción más largas.

Tabla 11: Parámetros estadísticos de la Hs calculados para las diferentes ventanas de predicción para Sentinel.

Sentinel Hs	No. Datos	Media m	Medias	Bias	BI	RMS	SI	CC
0_12	192	0.80	0.75	-0.05	-0.07	0.18	0.22	0.88
12_24	192	0.80	0.73	-0.07	-0.09	0.22	0.28	0.76
24_36	192	0.80	0.76	-0.04	-0.05	0.17	0.21	0.86
36_48	192	0.80	0.76	-0.03	-0.04	0.16	0.19	0.87
48_60	192	0.80	0.77	-0.03	-0.04	0.20	0.25	0.81
60_72	192	0.86	0.79	-0.07	-0.08	0.24	0.28	0.73
72_84	192	0.85	0.73	-0.12	-0.14	0.28	0.33	0.57
84_96	192	0.82	0.69	-0.13	-0.16	0.31	0.38	0.29
96_108	192	0.79	0.69	-0.10	-0.13	0.29	0.37	0.32
108_120	192	0.77	0.72	-0.04	-0.06	0.29	0.37	0.32

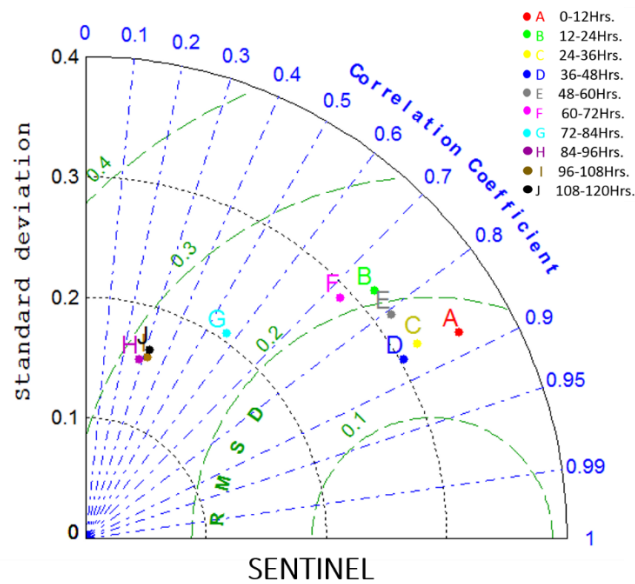
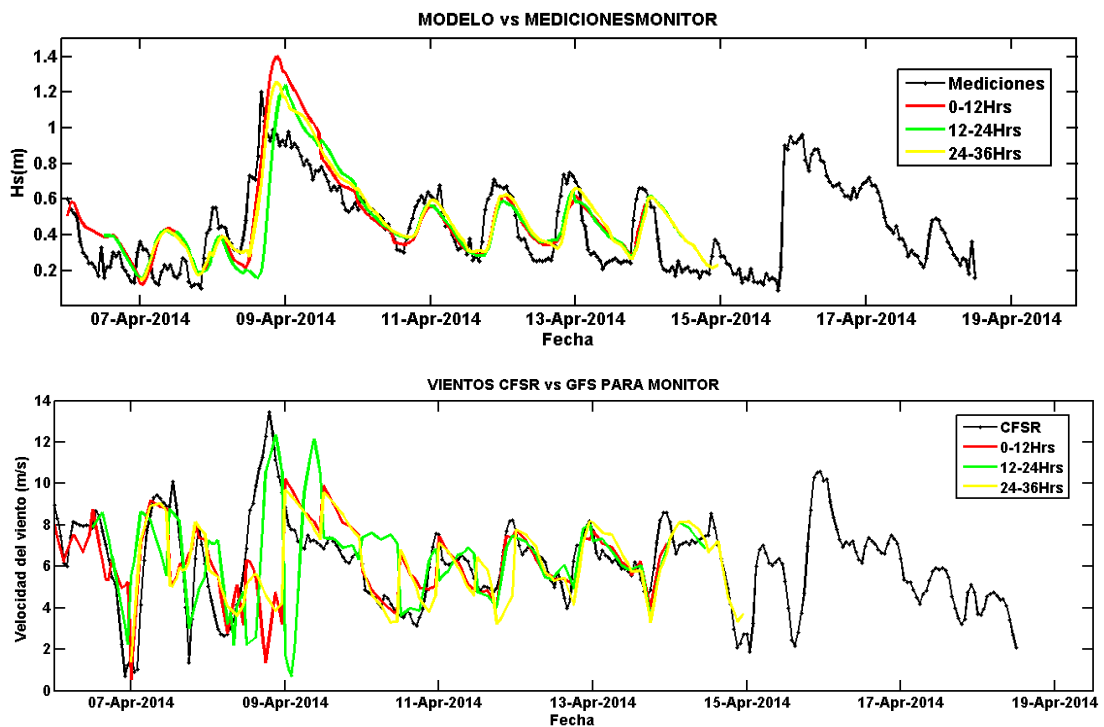


Figura 45 : Diagrama de Taylor de la Hs para las diferentes ventanas de predicción en Sentinel.

Para el Monitor, se presentan las Figuras 46 a 51 para la evaluación de las ventanas de predicción, así como la Tabla 12. Al igual que para el Sentinel, se aprecia una sobreestimación de las Hs máximas al paso del *Norte* y una ligera subestimación de las Hs máximas generadas por las brisas durante condiciones medias. Como se mencionó anteriormente, es probable que esto se deba a que las corrientes y los cambios del nivel del mar influyen sobre el oleaje. Al contrario que con el Sentinel, los mínimos no son tan bien representados.



**Figura 46 : Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 0 hasta 36 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Monitor.**

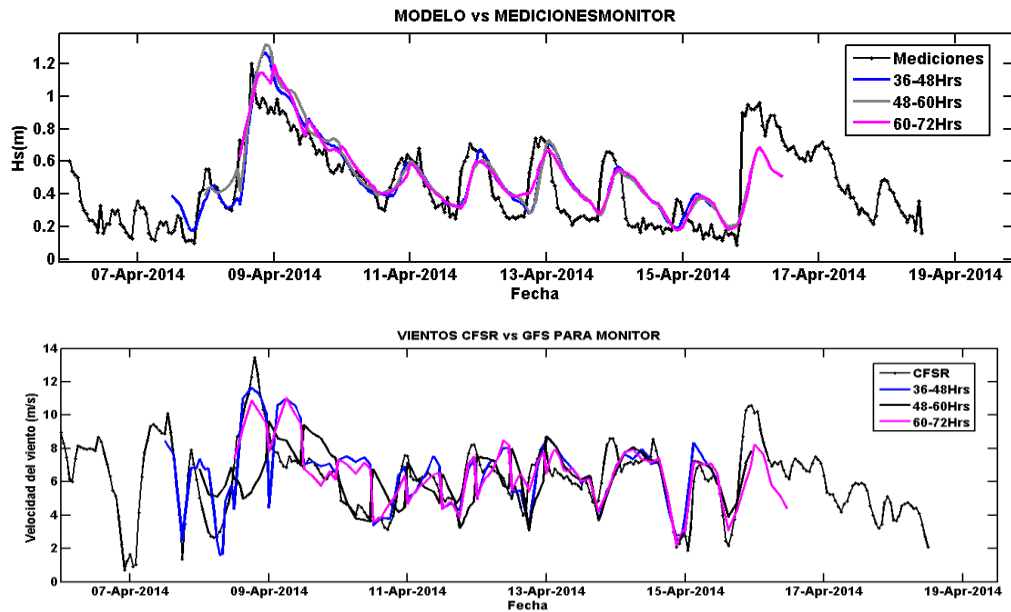


Figura 47 : Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 36 hasta 72 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Monitor.

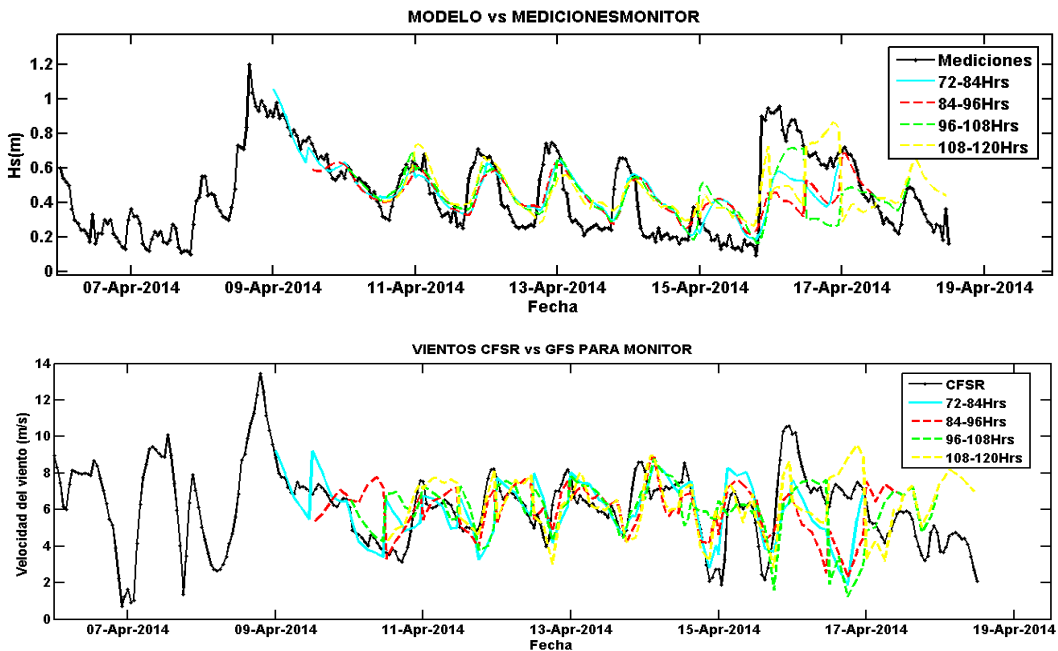
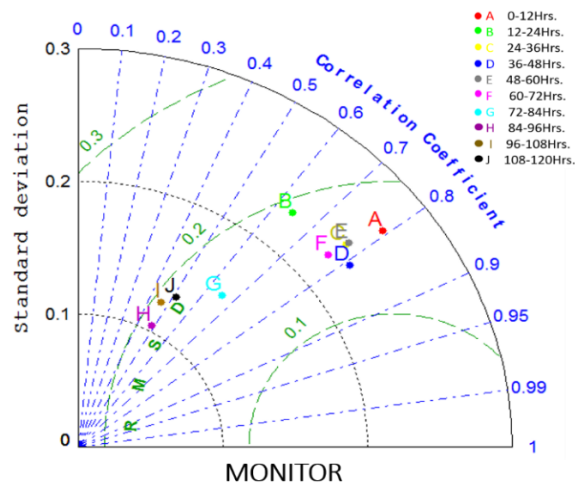


Figura 48: Series de tiempo de la Hs (panel superior) y rapidez del viento (panel inferior) para las ventanas de predicción de 72 hasta 120 horas obtenidas al forzar el modelo con los vientos del GFS para Monitor.

De acuerdo a la Tabla 12 y al Diagrama de Taylor de la Figura 49, el mejor ajuste sigue siendo para las ventanas de 0-12 horas y de 36-48, aunque con un menor grado de precisión que para Sentinel.

**Tabla 12 : Parámetros estadísticos de la Hs calculados para las diferentes ventanas de predicción para Monitor.**

Monitor Hs	No. Datos	Media m	Medias	Bias	BI	RMS	SI	CC
0_12	192	0.46	0.50	0.04	0.08	0.17	0.36	0.79
12_24	192	0.46	0.48	0.02	0.04	0.20	0.43	0.64
24_36	192	0.46	0.50	0.04	0.09	0.16	0.36	0.77
36_48	192	0.46	0.51	0.05	0.10	0.15	0.33	0.81
48_60	192	0.47	0.52	0.05	0.10	0.17	0.36	0.77
60_72	192	0.50	0.52	0.03	0.05	0.17	0.34	0.77
72_84	192	0.48	0.47	-0.01	-0.02	0.18	0.37	0.66
84_96	192	0.46	0.45	-0.02	-0.03	0.19	0.42	0.48
96_108	192	0.44	0.44	0.00	-0.01	0.19	0.43	0.47
108_120	192	0.43	0.46	0.03	0.08	0.19	0.44	0.52



**Figura 49 : Diagrama de Taylor de la Hs para las diferentes ventanas de predicción en Monitor.**

Se esperaría que el intervalo de 0-12 horas presente el mejor ajuste de los resultados, seguido por el de 0-24, 24-36 y así sucesivamente; sin embargo, tanto para Sentinel como para Monitor, se observa que contrario a lo esperado, el ajuste del intervalo de 12-24 horas decae considerablemente en comparación al intervalo de 0-12 horas y al de 24-36 horas. Si se observa el panel superior de las Figura 42 para Sentinel y Figura 46 para Monitor, se aprecia que la razón por la cual los parámetros estadísticos correspondientes al intervalo de 12-24 horas denotan un menor ajuste, es debido al desfase que se encuentra con respecto al pico de la primera tormenta el 9 de Abril (de 4 horas para el valor máximo de Hs). Esto se puede atribuir a los vientos del GFS, que presentan un comportamiento diferente en este intervalo como se observa en el panel inferior de dichas figuras, por lo cual afecta directamente la generación del oleaje. Cuando se trata de clima medio, no se presenta un desfase tan marcado con respecto a las alturas máximas de oleaje. Se deben hacer simulaciones para un mayor período de tiempo para poder determinar si esto es una tendencia del GFS para este intervalo determinado.

A pesar de lo anterior, el SWAN alimentado con vientos del GFS muestra resultados aceptables hasta las 60 horas a partir de las cuales la calidad del pronóstico va en decaimiento.

## VI. CONCLUSIONES

En este estudio se presentó la metodología utilizada para la implementación del *Nearshore Wave Prediction System* para las costas de México con alta resolución. El modelo central del NWPS, el SWAN, fue implementado en modo de retroanálisis para eventos de *Nortes* y condiciones medias, utilizando los vientos del CFSR como forzamiento. Posteriormente, los resultados se compararon con mediciones de boyas del NDBC localizadas en el Golfo de México y Mar Caribe con el fin de validar el desempeño del modelo de oleaje. Una vez hecho esto, se forzó el modelo con vientos de pronóstico provenientes del GFS para así poder evaluar el pronóstico de oleaje para las diferentes ventanas de predicción.

El modelo SWAN fue diseñado para la generación, propagación, transformación y disipación de oleaje en regiones costeras. Sin embargo, puede ser empleado en zonas de aguas abiertas siempre y cuando se tengan en cuenta las inestabilidades que se pueden generar por cambios abruptos de batimetría. Estas inestabilidades se pueden evitar al desactivar los cálculos de refracción si se considera que éstos son irrelevantes para el caso a estudiar. En el caso de este estudio, es importante simular el oleaje tanto en aguas profundas como aguas someras, con lo cual, los cálculos de refracción fueron desactivados para los dominios regionales, pero no para los dominios locales, en donde la física del oleaje depende principalmente de su interacción con el fondo.

Con respecto al uso de los vientos del CFSR, se encontró que estos vientos de reanálisis muestran una buena correlación con las mediciones. Tanto los eventos de *Nortes* como las condiciones medias son bien representados, con lo el uso de los vientos del CFSR es adecuado para calibrar y validar los modelos de oleaje sujetos a circulación atmosférica a escala sinóptica. Al realizar las simulaciones de oleaje a modo de retroanálisis se obtuvieron buenos resultados tanto en aguas profundas y someras. La evaluación estadística de los resultados arrojó valores bajos de sesgo ( $\sim 0.22$ ) y error cuadrático medio ( $\sim 0.4$ ), así como altos coeficientes de correlación ( $\sim 0.9$ ). Con esto, se concluye que el SWAN es capaz de simular correctamente el oleaje generado tanto por eventos extremos como los (*Nortes*), como bajo condiciones medias. Los buenos resultados obtenidos en aguas someras a modo

de retroanálisis se deben en gran parte a la calidad de la batimetría en los dominios de mayor resolución (dominios locales), pero también a la buena calidad de los vientos (CFSR) que se utilizaron para forzar los dominios regionales de los cuales se extrajeron las condiciones de frontera para los dominios locales.

Las simulaciones de pronóstico de oleaje se realizaron con el forzamiento de los vientos de pronóstico del GFS. En base a las boyas de la NDBC en el Golfo de México, los vientos del GFS presentan en general un decaimiento (o pérdida) en la calidad del ajuste conforme aumenta el período de predicción (a excepción de la de 12 a 24 horas), por lo cual se sugiere simular un período mucho mayor de tiempo para comprobar si es una tendencia consistente en el modelo. Con respecto a los resultados del pronóstico de oleaje, se obtuvo que la calidad de las predicciones es aceptable ( $CC \sim 0.8$  y sesgos  $\sim 0.04$ ) hasta un período de 48 horas a partir de las cuales decae el pronóstico.

Para aguas someras se encontró que a 10m de profundidad el mejor ajuste se da en las ventanas de predicción de 0 a 12 horas y de 36 a 48, perdiéndose la precisión para períodos de mayor tiempo. Esto resulta cierto también para el sensor a 4m de profundidad, aunque se observa que la precisión encontrada es menor que para el sensor a 10m. En ambos casos, sorprende la baja precisión para la ventana de 12 a 24 horas que es causada por los vientos del GFS. A pesar de lo anterior y para fines operacionales, el modelo muestra resultados aceptables ( $CC \sim 0.8$  y sesgos  $\sim 0.06$ ) hasta las 60 horas para  $H_s$ , utilizando como forzamiento los vientos del GFS. Para las simulaciones de este trabajo, no se incluyeron corrientes ni niveles de mar, lo que puede afectar los resultados en aguas someras, en especial para el sensor ubicado a 4m de profundidad. A dichas profundidades los efectos de la marea pueden tener repercusiones en los parámetros estadísticos resultantes de las comparaciones del modelo con las mediciones.

La implementación de un sistema operacional de predicción de oleaje con alta resolución geográfica tiene la ventaja de proporcionar información confiable debido a que se toman en cuenta cambios de pequeña escala en la batimetría, que en el caso del oleaje en zonas costeras es determinante para la calidad de la predicción y simulación. Los resultados del *Nearshore Wave Prediction System* proveen información importante de pronóstico de



oleaje, espectros de energía y rastreos de la ola. Estos productos hacen posible una buena planeación ante eventos extremos, en relación a transportación marítima, pesca, recreación y otras actividades marítimas. A diferencia de otros pronósticos de oleaje, este sistema toma en cuenta los cambios de pequeña escala en la batimetría, con lo cual las predicciones son más precisas en la zona costera.

## VII. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo nos sugieren continuar con este estudio a fin de resolver las interrogantes presentadas. Así futuras líneas de investigación, entre las cuales se recomiendan las siguientes:

- Se deberán hacer simulaciones para períodos más largos, utilizando los vientos de los 4 ciclos de predicción que el GFS tiene disponibles por día. Esto permitirá identificar con mayor exactitud si existen tendencias en las diferentes ventanas de predicción.
- Se recomienda hacer un estudio utilizando vientos provenientes de diferentes modelos de predicción atmosféricos como el *North American Mesoscale Forecast System* para comparar la calidad de los vientos con los del GFS.
- Se recomienda implementar el NWPS incorporando las corrientes/niveles del mar de RTOFS y ESTOFS. Se espera que al incorporar estas variables, las simulaciones de oleaje mejoren en aguas someras.
- Actualmente las condiciones de frontera en el sistema se transfieren manualmente entre los distintos dominios. Si bien esta parte está en proceso de automatización, se considera que la implementación de mallas no estructurada puede hacer más eficiente el sistema. Se sugiere implementar estas mallas para el dominio del Golfo de México, variando la resolución de baja a alta conforme se acerca a la costa.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Amante, C. and B. W. Eakins, 2009: ETOPO1 1 Arc-Minute Global 386 Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, 19 pp.
- Appendini, C. M., A. Torres-Freyermuth, F. Oropeza, P. Salles, J. López, and E. T. Mendoza, 2013: Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment. *Applied Ocean Research*, 39, 20–30, doi:10.1016/j.apor.2012.09.004.
- Appendini, C.M., A. Torres-Freyermuth, P. Salles, J. López-González and E.T. Mendoza, 2014: Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast. *Journal of Climate*. Vol. 27(4), pp 1619-1632. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00206.1.
- Aristóteles (1996), *Acerca del cielo*; Meteorológicos, Gredos, Madrid, 430 pp
- Booij N., Ris, R.C. and Holthuijsen L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104 (C4), 7649-7666.
- Chao, Y., and H. Tolman, 2001: Specification of hurricane wind fields for ocean wave prediction. ... . *Fourth Int. Symp., on Waves: Ocean Wave ...*, 1, 671–679.
- Chawla, A., D. M. Spindler, and H. L. Tolman, 2013: Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Model.*, 70, 189–206.
- Cox, A.T., Cardone, V.J., Swail, V.R., 2011. On the use of the climate forecast system reanalysis wind forcing in ocean response modeling. In: 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & 3rd Coastal Hazards Symposium, pp. 20, Paper G3.

- Devaliere, E., J. Hanson, and R. Luettich, 2007: Evaluation of wave model performance in a North Carolina Test Bed. *Proceedings 10th International Wave Hindcasting and Forecasting Workshop*, North Shore, HI.
- Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1996: Spectral modelling of wave breaking: Application to Boussinesq equations, *J. Geophys. Res.*, 101, No. C1, 1253-1264.
- Gelci R., Cazalé H. and J. Vassal, 1957. Prévission de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bulletin d'information du Comité Central d'océanographie et d'études des cotes*, 9, 416-435.
- Gilhousen, D., 1987: A field evaluation of NDBC moored buoy winds. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, 94–104.
- Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.I., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meerbrug A., Müller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W. and Walden H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z.*, A8 (12), 95 p.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J.H. Allender and T.P. Barnett, 1985: Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: parametrizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1378-1391.
- Holthuijsen, L., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. New York.
- Hubert, W. E., 1957: A preliminary report on numerical sea condition forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 85, 200–204.
- Isozaki, I. and T. Uji (1973): Numerical prediction of ocean wind waves. *Paper Meteorol. Geophys.*, 24, 207–231.

- Isozaki, I. and Y. Suzuki (1999): *Analysis and Forecasting of Ocean Waves*. Tokai University Press, 274 pp.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77, 437–471.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, and W. E. Baker, 1990: Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 71, 1410-1428.
- Kanamitsu, M., 1989: Description of the NMC global data assimilation and forecast system. *Wea. Forecasting*, 4, 335-243.
- Kitaigorodskii, S.A., 1962. Applications of the theory of similarity to the analysis of wind generated wave motions as a stochastic process. *Bull Acad. Sci. USSR Geophys. Sr. No. 1*, 37 pp.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Doneland, K. Hasselmann, S. Hasselmann & P. A. E. M. Janssen (1994) *Dynamics and modelling of ocean waves*. UK: Cambridge University Press.
- Luettich, R. and J. Westerink. *Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.xx.2004*
- Mesinger, F. and Coauthors, 2006: North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 343–360, doi: 10.1175 /BAMS-87-3-343.
- Mitsuyasu, H., 2002. A historical note on the study of ocean surface waves. *Journal of Oceanography* 58, 109–120.

- Moorthi, S., H.-L. Pan, P. Caplan, 2001: Changes to the 2001 NCEP operational MRF/AVN global analysis/forecast system. NWS Technical Procedures Bulletin, 484, pp14. [Available at <http://www.nws.noaa.gov/om/tpb/484.htm>].
- Padilla-Hernández, Roberto, 2002. Numerical modelling of wind wave energy dissipation at the bottom including ambient currents. Katholieke Universiteit Leuven.
- Pierson W.J., 1952. A unified mathematical theory for the analysis, propagation and refraction of storm generated ocean waves, Parts I and II. N.Y.U., Coll. Of Eng. Res. Div., Depto. of Meteorol. and Oceanogr., Prepared for the beach erosion Board Dept. of the army, and Office of Naval Res., D{Bibliography}epto. of the Navy, 461 pp.
- Pore, N. A., and W. S. Richardson, 1968: Wind-wave, swell and APRIL 2002 NCEP NOTES 333 combined wave forecast. NWS Tech. Procedures Bull. 17, 8 pp.
- Ruiz-Martinez, G., R. Silva-Casarin, D. M. Perez-Romero, G. Posada-Vanegas & E. G. Bautista-Godinez (2009) Modelo híbrido para la caracterizacion del oleaje. Ingeniería Hidráulica en México, XXIV, 5-22.
- Ruiz, Pablo, 2013. Campos de viento para hindcast de oleaje, reanálisis, paramétricos y fusión. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Wollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., VanDelst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. Bull. Am. Meteorol. Soc. 91, 1015–1057.

- Settelmaier, J. B., A. Gibbs, P. Santos, T. Freeman, D. Gaer, 2011: Simulating Waves Nearshore (SWAN) Modeling Efforts at the National Weather service (NWS) Southern Region (SR) Coastal Weather Forecast Offices (WFOs). *Proc. 91<sup>st</sup> AMS Annual Meeting*, Seattle, WA.
- Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G. y Diaz, G. (2002). Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast. *Proc. 28<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, World Scientific, Singapore.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers (2008) A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR Tech. Note NCAR/TN-468+STR, 88 pp.
- Sørensen, O. R., H. Kofoed-Hansen, M. Rugbjerg, and L. S. Sørensen, 2004: A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. *Proc. 29th Intl. Conf. on Coastal Engineering*, Lisbon, Portugal, ASCE, 894–906.
- Sverdrup H.U. and Munk W.H., 1947. Wind sea and swell: Theory of relations for forecasting. H.O. Pub. 601, US Navy Hydrographic Office, Washington, DC, 44 pp.
- The SWAMP Group (24 authors) (1985): *Ocean Wave Modeling*. Plenum Press, New York, 256 pp. The WAMDI Group (13 authors) (1988): The WAM model. A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775–1810
- The WAMDI Group (13 authors) (1988): The WAM model. A third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775–1810.
- Tolman, H.J., 1992. Effects of numerics on the physics in a third generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, 22 (10), 1095-1111.
- Tolman, H.L., Chalikov, D., 1996. Source terms in a third generation wind wave model. *J. Phys. Oceanogr.* 26, 2497–2518.

- Tolman 1999a: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB Tech. Note 166, 110 pp. [Available online at <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch>.]
- Tolman, H.L., 1997: User manual and system documentation of WAVE-WATCH III version 1.15. Tech. Note 151, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 97 pp.
- Tolman, H.L., B. Balasubramanian, L.D. Burroughs, D.V. Chalikov, Y.Y. Chao, H.S. Chen and V.M. Gerald, 2002: Development and implementation of wind generated ocean surface wave models at NCEP. *Weather and Forecasting*, 17, 311-333.
- Tolman, H.L., 2002a. Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modell.* 4, 269–289.
- Tolman, H.L., 2002b. Validation of WAVEWATCH III Version 1.15 for a Global Domain. Technical Note 213, NCEP/NOAA/NWS, National Center for Environmental Prediction, Washington DC.
- Tolman, H.L., 2007a. The 2007 release of WAVEWATCH III. In: 10th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & Coastal Hazards Symposium. Paper Q4.
- Tolman, H.L., 2007b. Development of a Multi-grid Version of WAVEWATCH III. Tech. Note 256, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 88 pp. + Appendices.
- Tolman, H.L., 2008. A mosaic approach to wind wave modeling. *Ocean Modell.* 25, 35–47.
- Tolman, H.L., 2009. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 3.14. Tech. Note 276, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 220 pp.
- Tolman, H.L., Banner, M.L., Kaihatu, J.M., submitted for publication. The NOPP operational wave model improvement project. *Ocean Modell.*

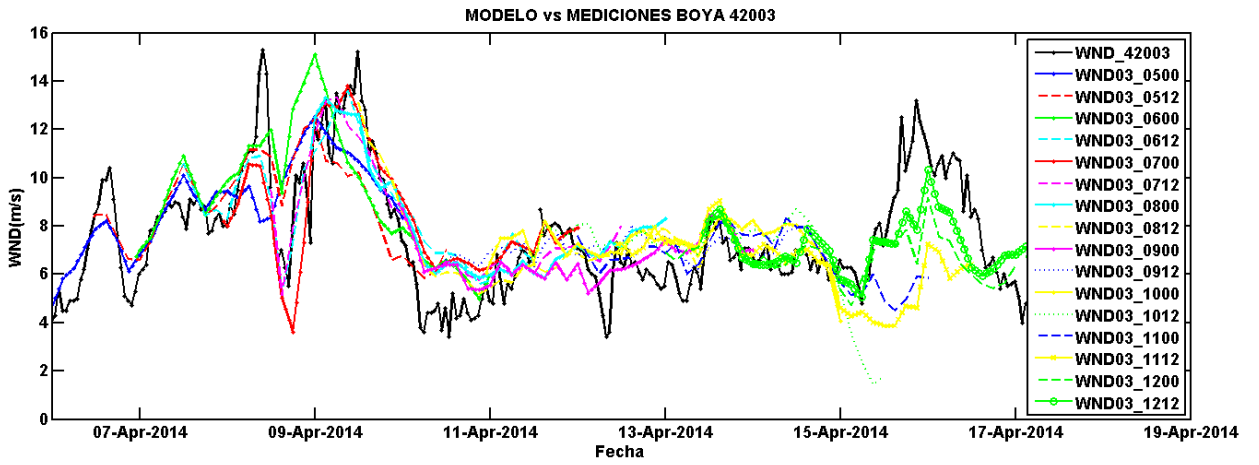
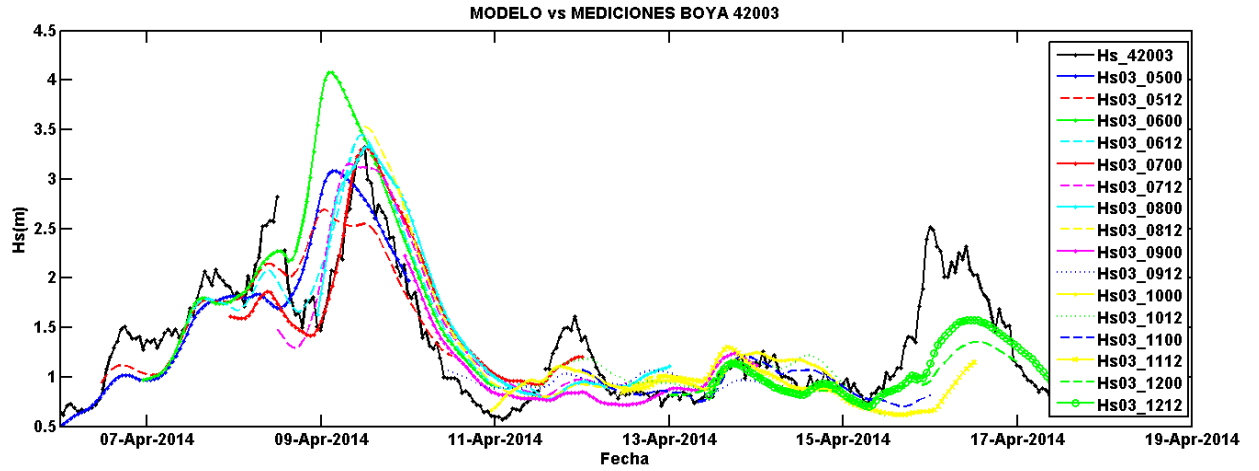


- Uji, T. (1984): A coupled discrete wave model MRI-II. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 40, 303–313.
- Whitham, G.B., 1974: *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York, 636 p.
- Westhuysen, V. d., R. Padilla., A.J., T. Nicolini, S. Tjaden, J. B. Settelmaier, A. Gibbs, P. Santos, J. Maloney, T. Freeman, D. Gaer, M. Willis, N. Kurkowski & J. F. Kuhn (2011) Development of the Nearshore Wave Prediction System (NWPS). In 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & 3rd Coastal Hazard Symposium.
- Zhao, M., I. M. Held, S.-J. Lin, and G. A. Vecchi, (2009) Simulations of global hurricane climatology, interannual variability, and response to global warming using a 50-km resolution GCM. *J. Climate*, 22, 6653–6678.

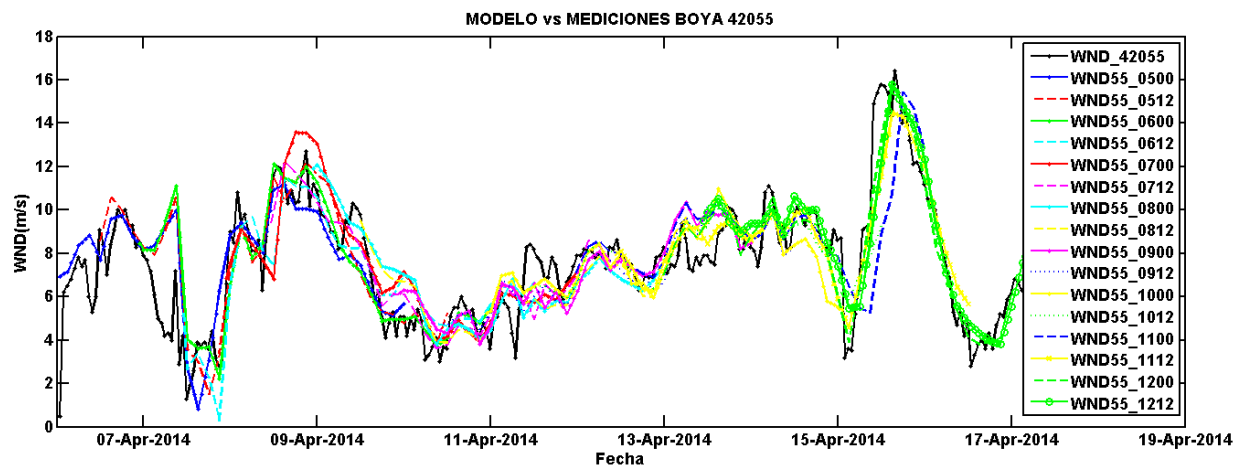
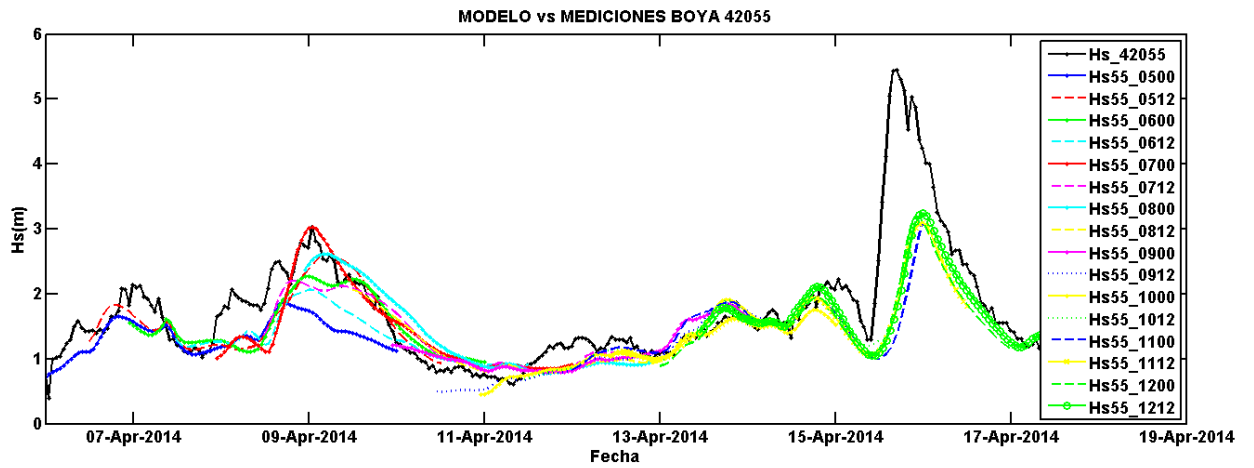
## **Apéndice A**

Series de tiempo de Hs y rapidez del viento de las boyas de la NDBC y los ADCPs en aguas someras para los diferentes ciclos de predicción del GFS

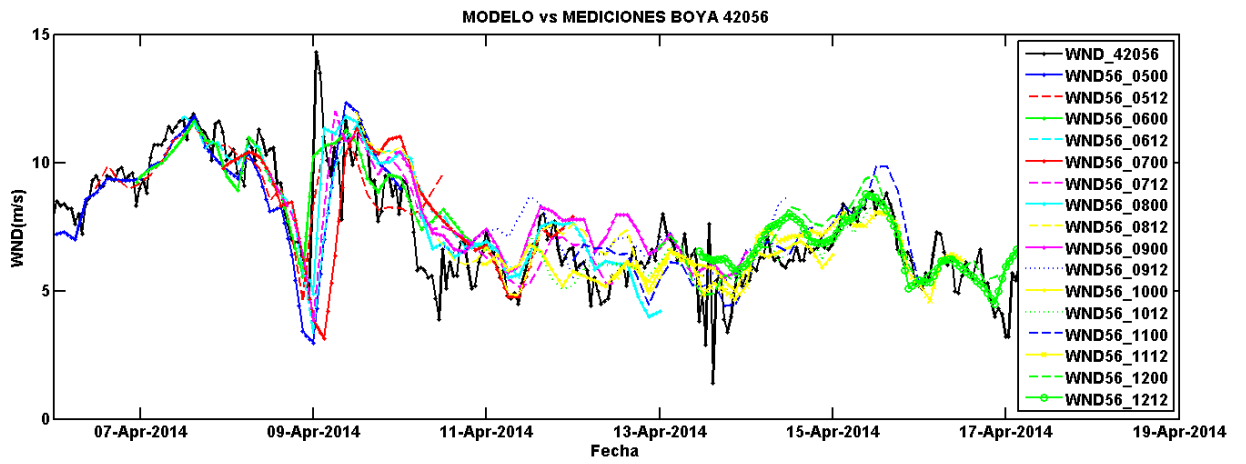
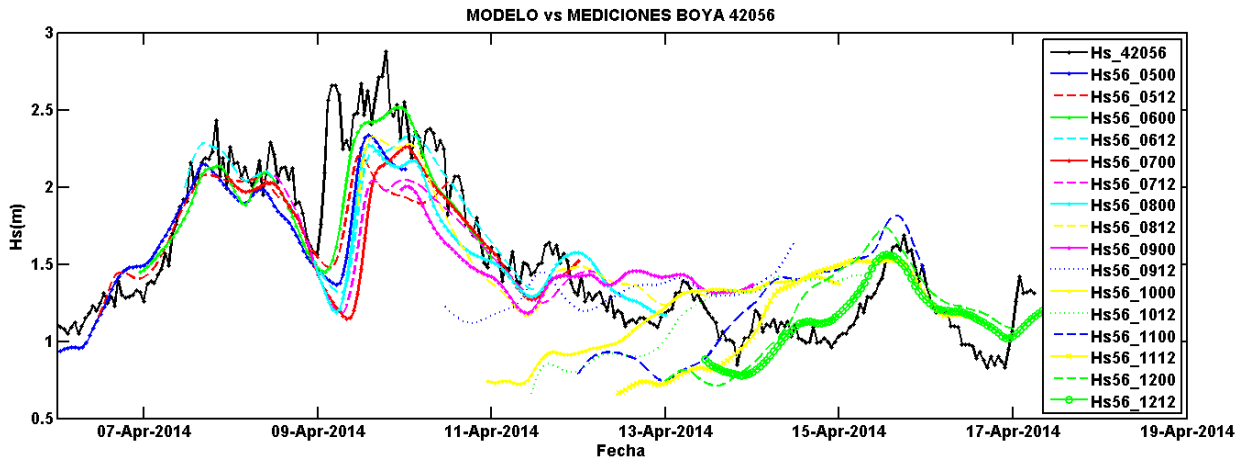
Para la boya 42003:



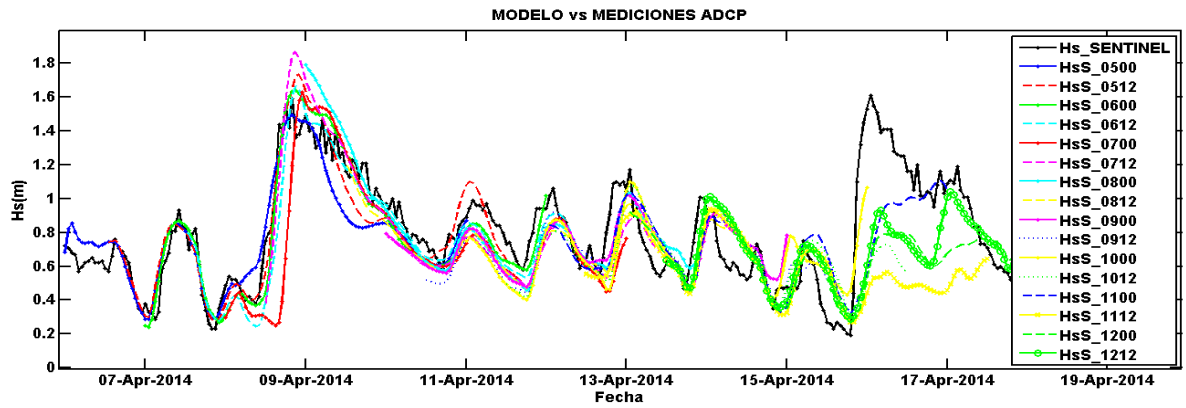
Boya 42055:



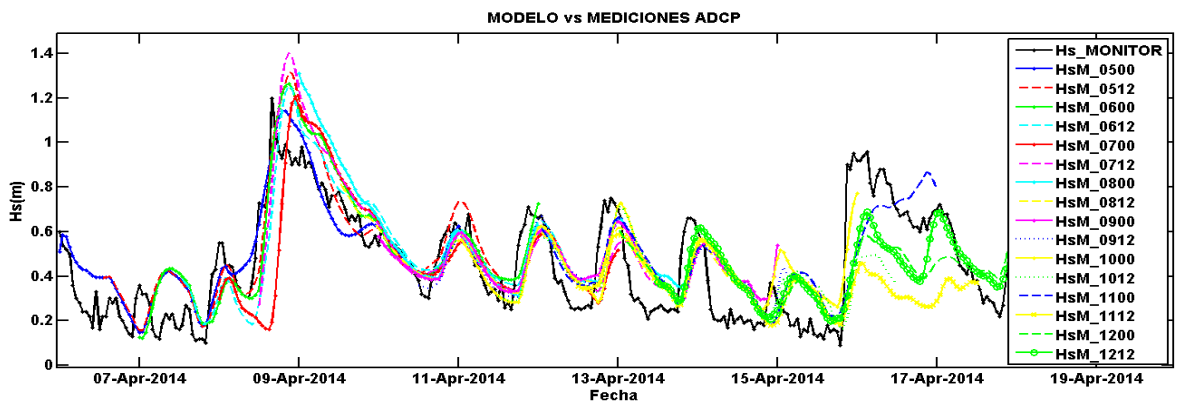
Boya 42056:



Para el ADCP situado a 10m de profundidad:



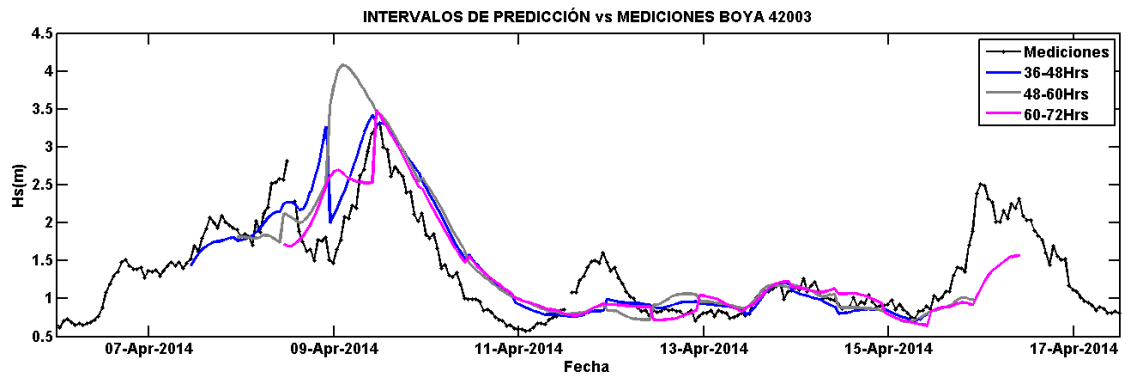
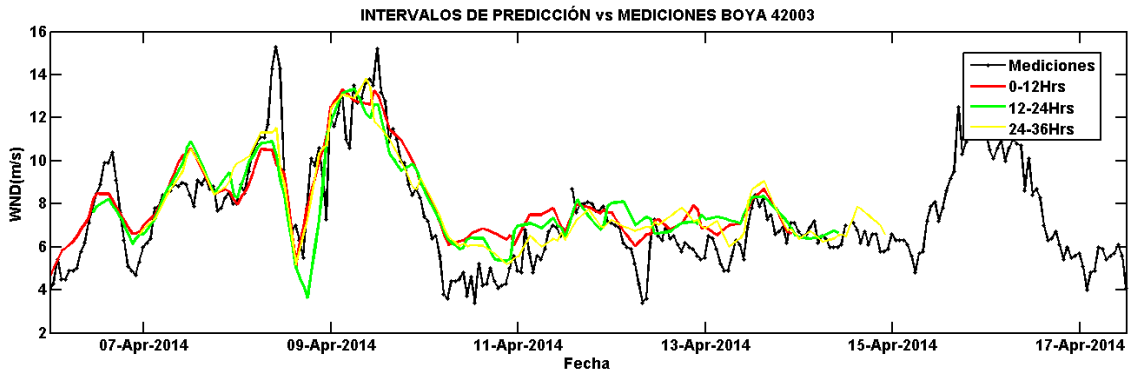
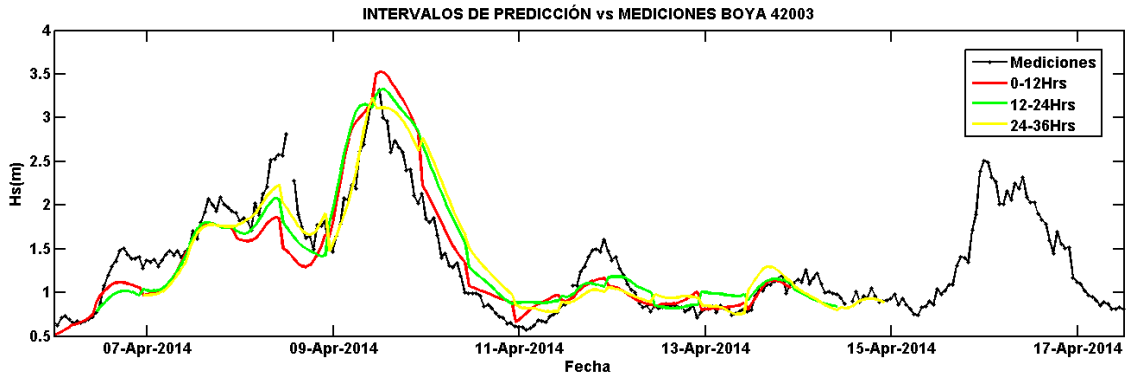
Para el ADCP situado a 4m de profundidad:



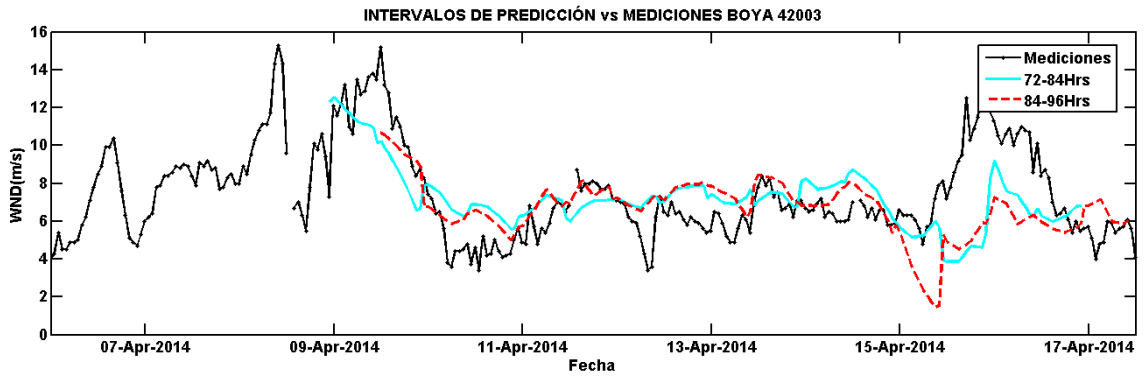
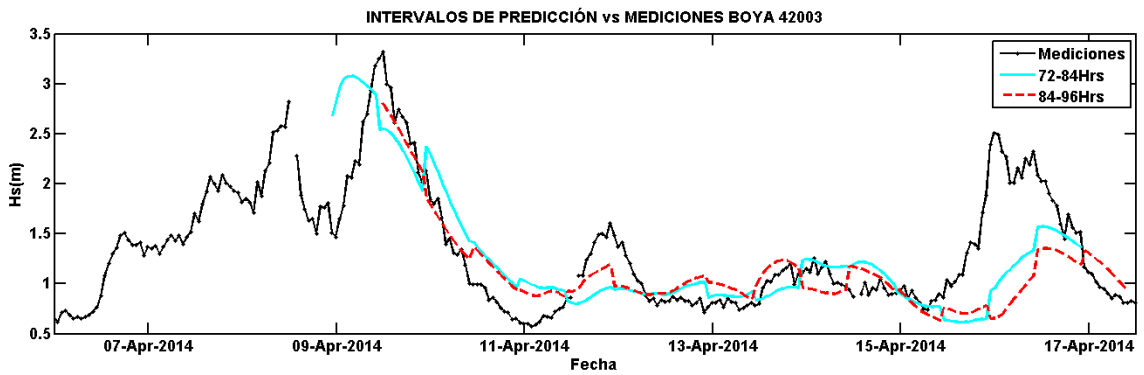
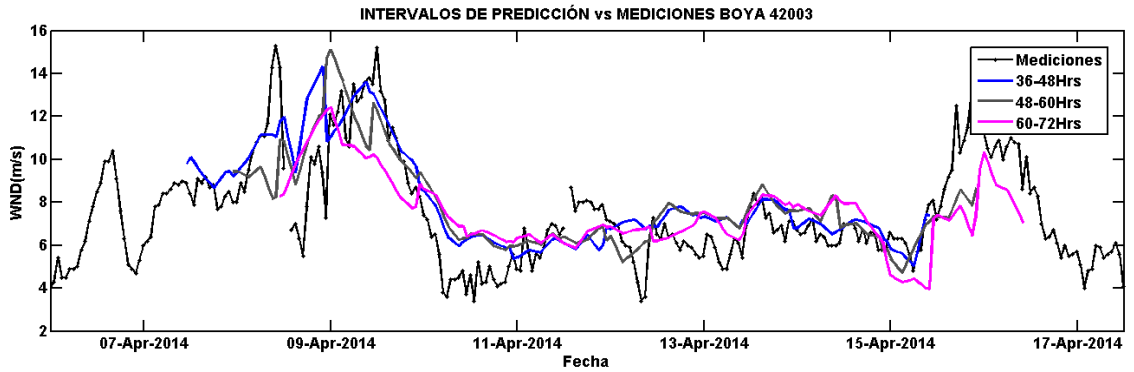
## **Apéndice B**

Series de tiempo de Hs y rapidez de viento de las boyas de la NDBC y los ADCPs localizados en aguas someras para los intervalos de 12 horas de predicción

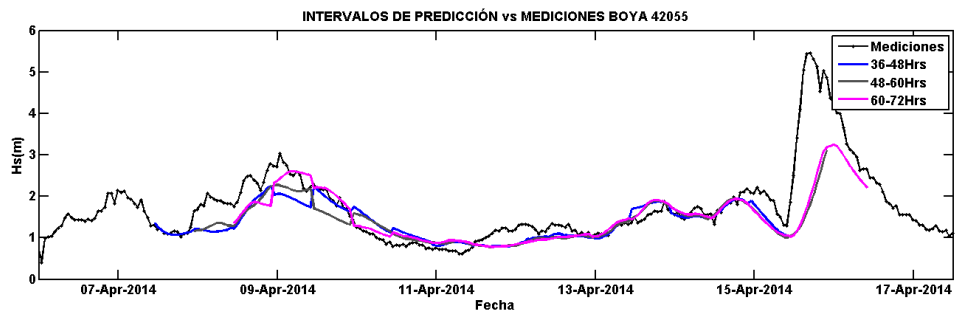
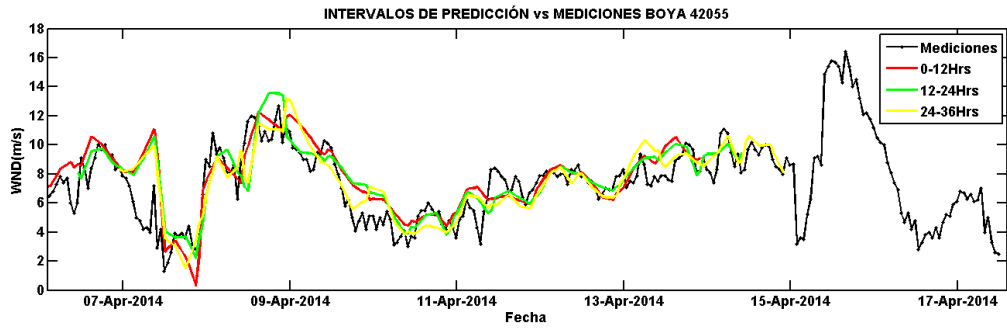
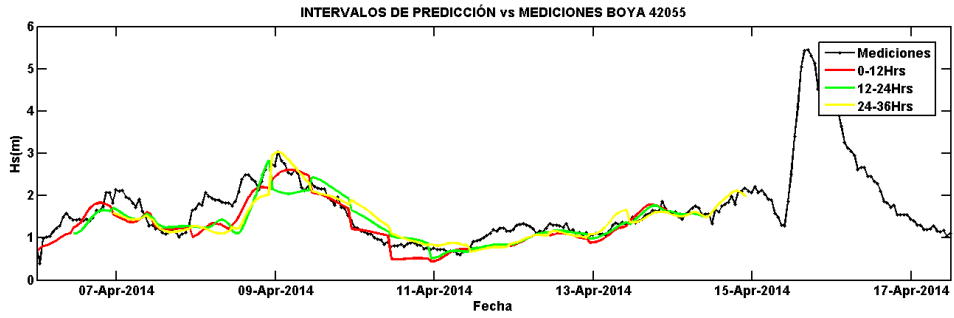
Boya 42003:

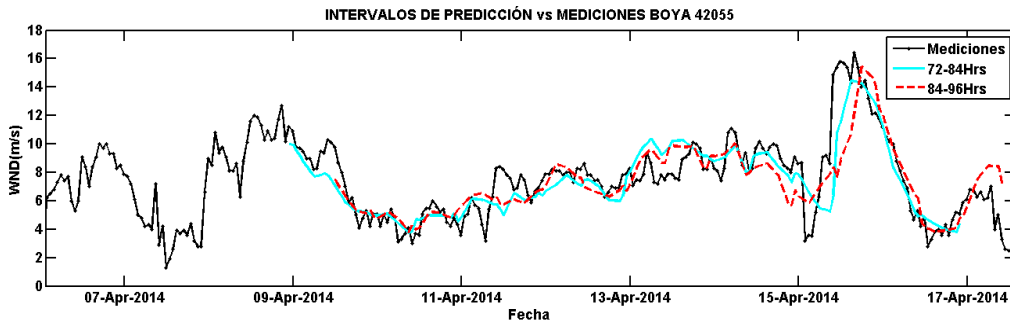
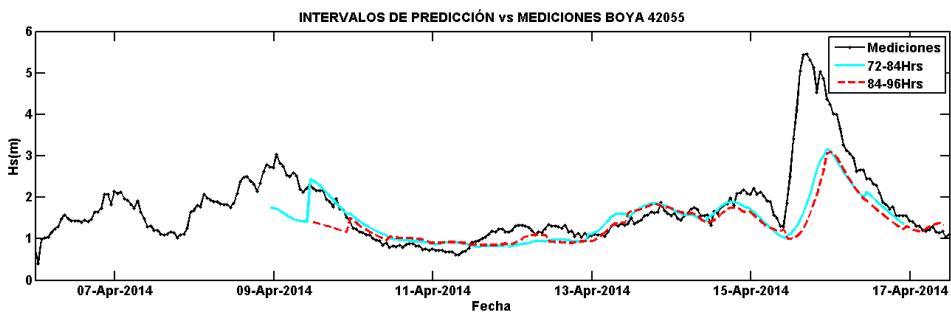
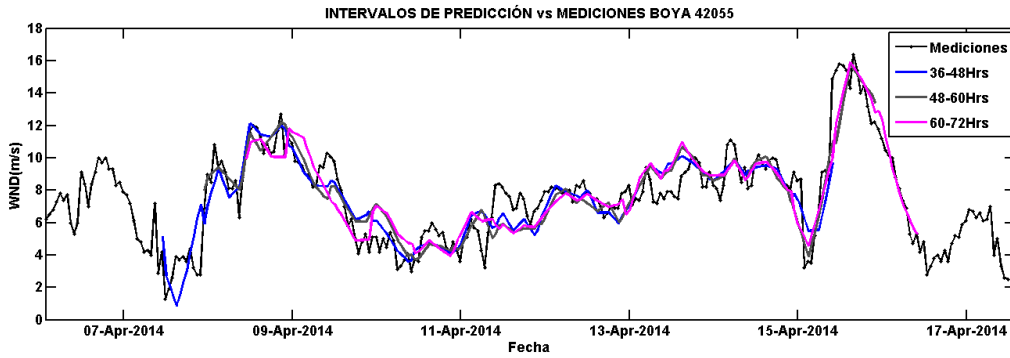




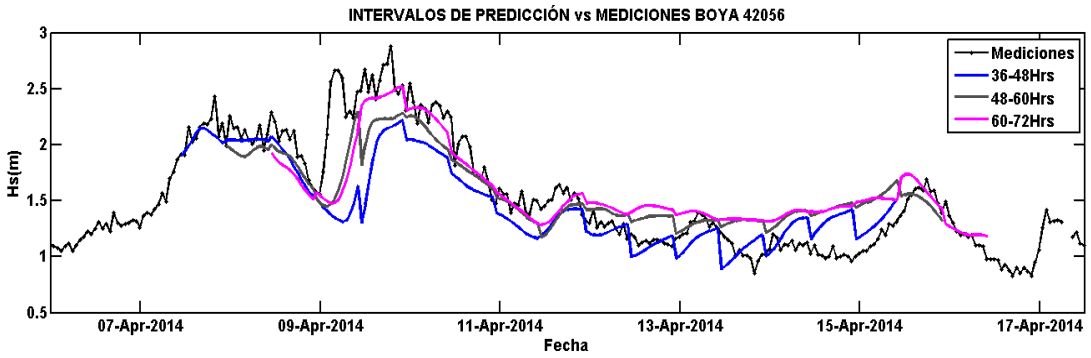
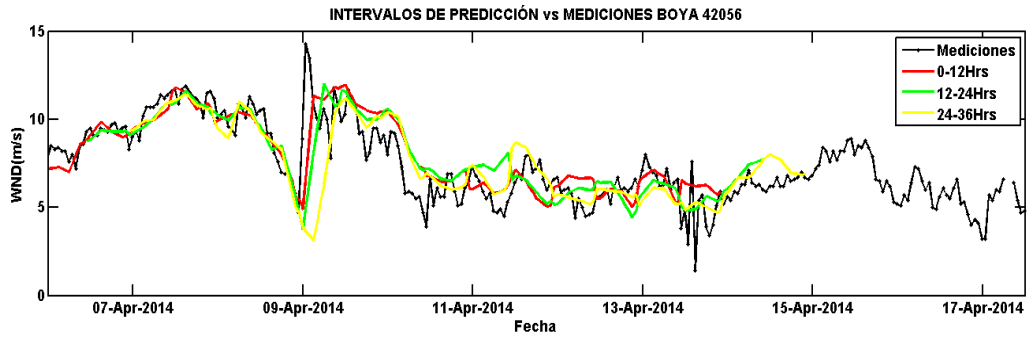
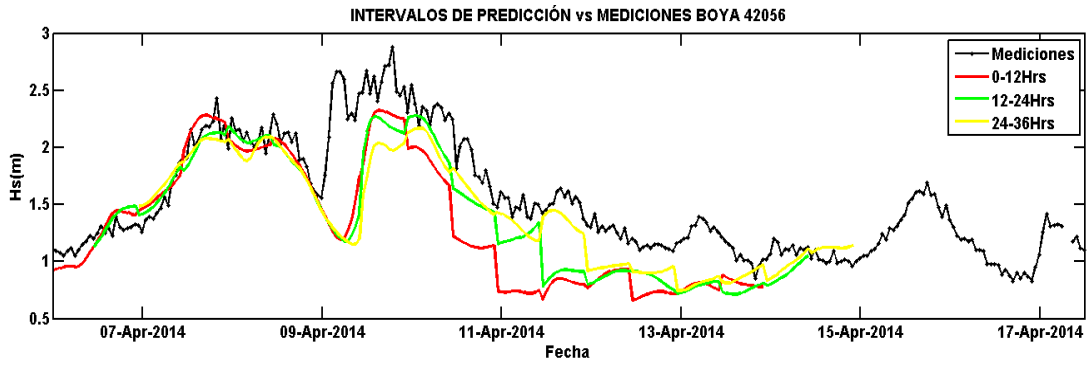


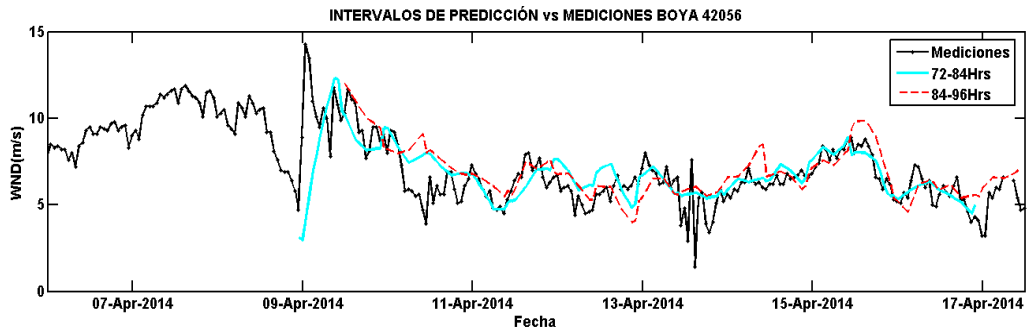
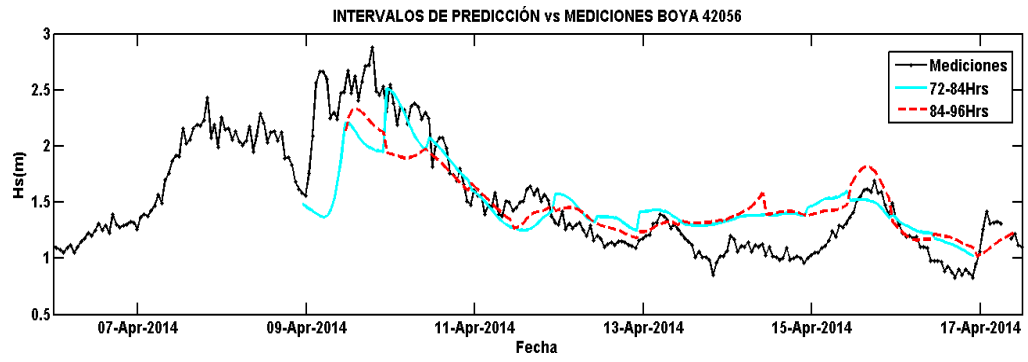
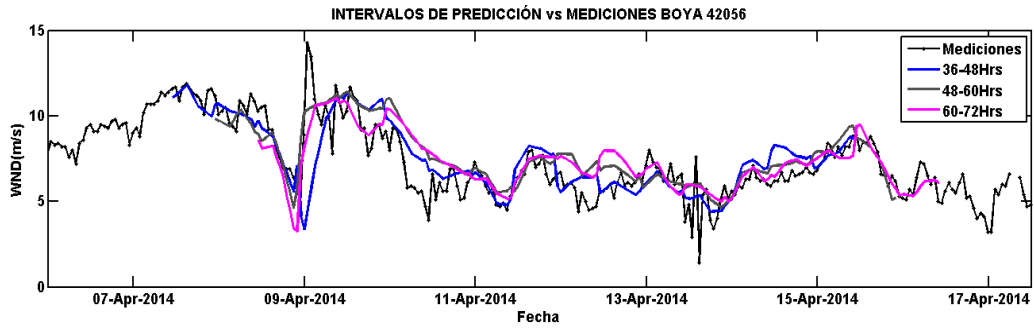
Boya 42055:



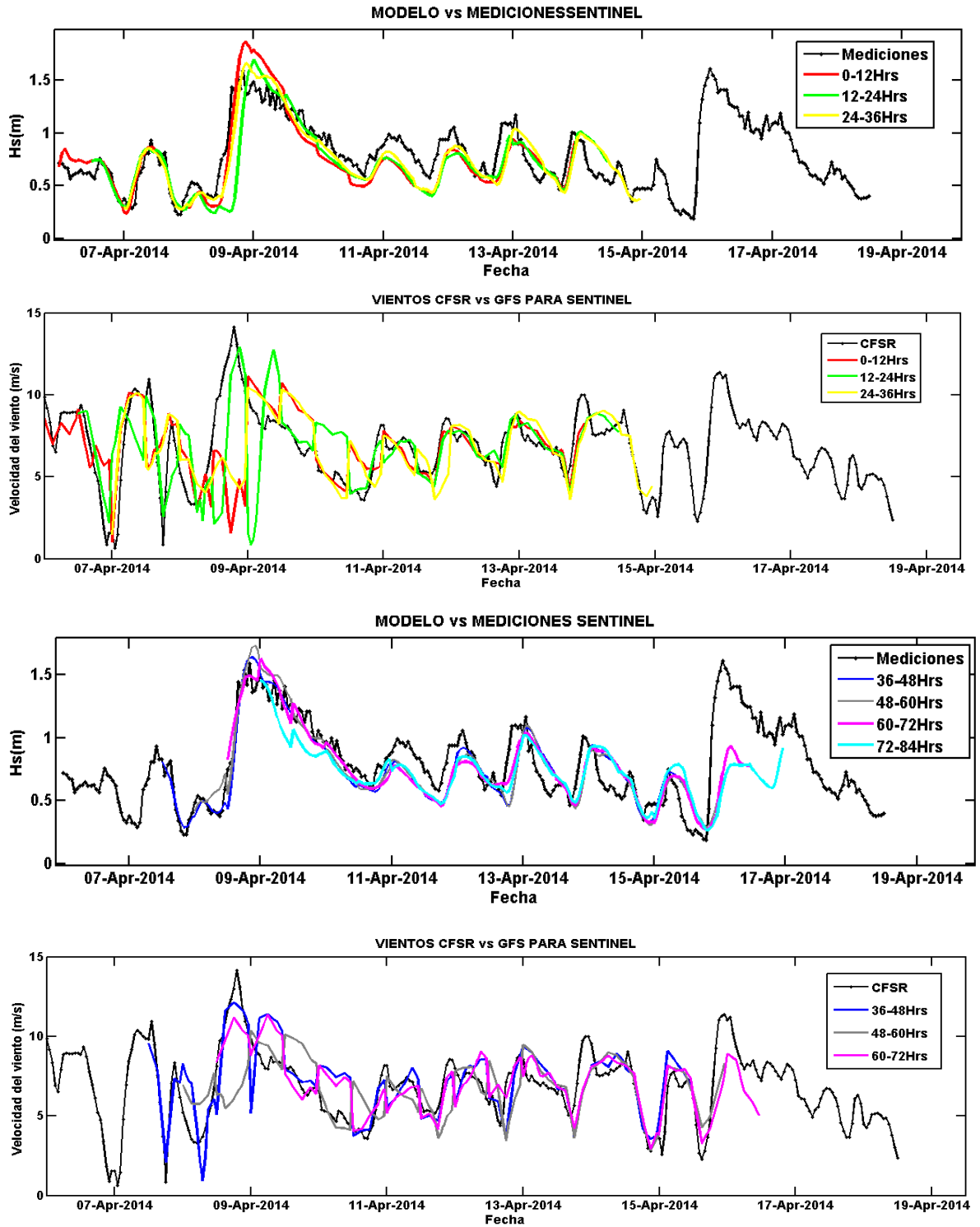


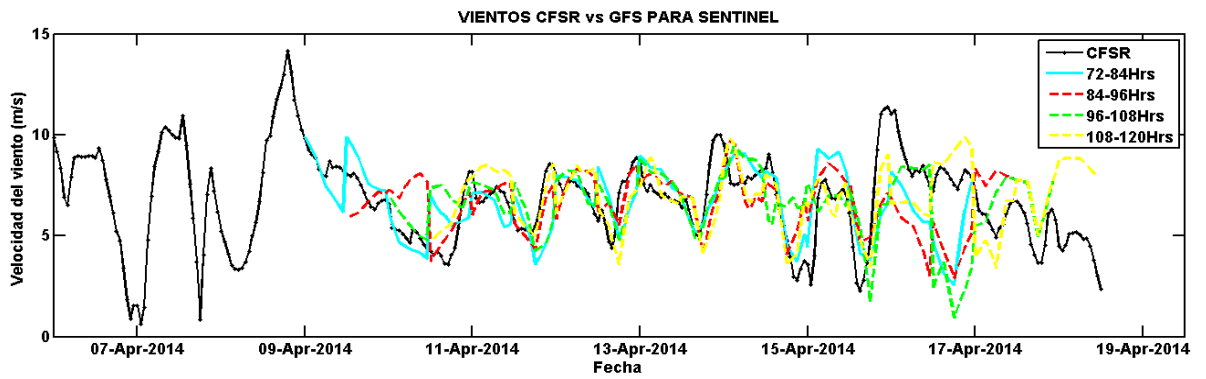
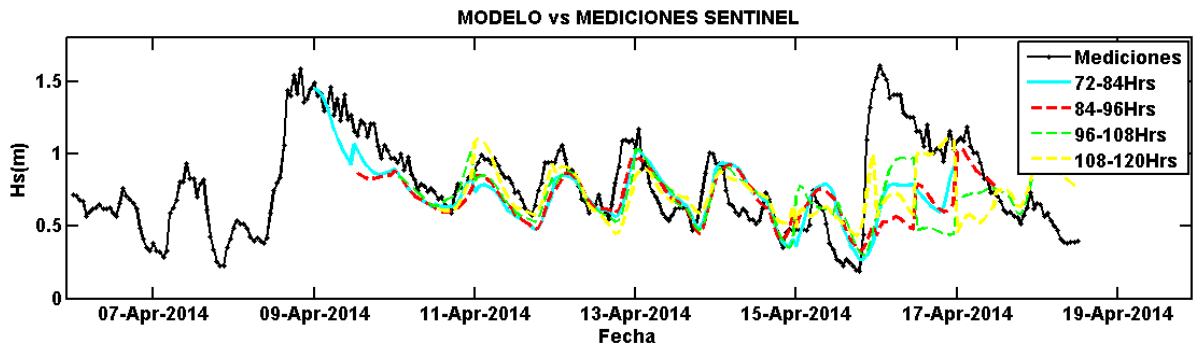
Boya 42056:





Para el ADCP situado a 10m de profundidad:





Para el ADCP situado a 4m de profundidad:

