Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2013, Vol.14, No.1, pp.14-24, ISSN 1729-3790

Pronóstico numérico del oleaje en mares interamericanos y costas de Cuba, mediante los modelos numéricos MM5, WW3 y SWAN

Alexis Pérez-Bello* e Ida Mitrani-Arenal

Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Cuba, E-mail alexis.perez@insmet.cu, ida.mitrani@insmet.cu

Recibido: julio 12 , 2012	Aceptado: 13 noviembre, 2012

Resumen

Se describe la obtención de pronósticos de elementos de ola en mares interamericanos y costas cubanas, combinando un modelo atmosférico con dos de oleaje, con énfasis en los ciclones tropicales. Los datos iniciales provienen del modelo global GFS. Con estos, se alimentan las corridas de MM5V3, cuyas salidas de viento, funcionan como entrada en los modelos WW3 y SWAN para así pronosticar los elementos de olas y su evolución espacio-temporal desde las áreas de generación hasta la costa. Se analizan los huracanes Wilma (2005) y Paloma (2008). Se evaluó la trayectoria y el módulo del viento pronosticado por MM5V3, como posibles fuentes de errores en el cálculo del oleaje, mediante reportes del NHC, estaciones meteorológicas cubanas, y boyas de la NOAA, localizadas en el área de trabajo. Se automatizó el enlace MM5V3+WW3+SWAN. Los resultados obtenidos, son valiosos para prevenir y tomar decisiones ante la presencia de un ciclón tropical.

Palabras clave: ciclón tropical, ola, MM5V3, Wavewatch III, Swan.

Numerical wave forecast for interamerican seas and Cuban shores through MM5, WW3 and SWAN models

Abstract

The development of wave elements forecasts for interamerican seas and Cuban shores through a combination of an atmospheric and two wave models is described. Emphasis is made on Tropical Cyclones. Initial data are taken from global model GFS and fed to MM5V3, whose wind outputs are then used as input data for WW3 and SWAN to obtain wave elements time and space evolution forecasts from generation areas to the shores. Hurricanes Wilma (2005) and Paloma (2008) were analyzed. Hurricane trajectories and MM5's forecasted wind modules were evaluated as possible sources of error in wave calculation, checking against NHC reports, Cuban Meteorological stations and buoys from NOAA located in the work area. The link MM5V3+WW3+SWAN was automatized. Results obtained are valuable for prevention and decision taking in the presence of tropical cyclones.

Keywords: Tropical cyclone, hurricane, wave, MM5V3, WaveWatch III, SWAN.

*Alexis Pérez-Bello*Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Cuba, E-mail alexis.perez@insmet.cu*

1. Introducción

El conocimiento de las características del oleaje resulta de fundamental importancia en la determinación de los procesos hidrodinámicos y morfológicos que ocurren en la zona costera. Este constituye un elemento clave alrededor del cual giran diferentes aplicaciones operacionales que se pueden dar dentro del ambiente marítimo como pueden ser el diseño, la planificación, explotación y mantenimiento de alguna obra marítima en específico. Sin embargo, la principal necesidad de su estudio radica en la protección de las vidas humanas de los asentamientos costeros, el trazo de rutas de navegación así como la seguridad de las embarcaciones en el mar.

Para realizar un estudio del oleaje tanto a corto como a largo plazo se requiere de una información detallada del fenómeno, cuando no se encuentra la información ni visual, ni instrumental o bien se encuentra incompleta, entonces se reproduce el oleaje mediante el uso de modelos numéricos .

El objetivo general consiste en pronosticar el oleaje en mares interamericanos y costas de Cuba a corto y mediano plazo, con énfasis en el paso de los ciclones tropicales, mediante la integración de los modelos numéricos MM5+WW3+SWAN. Y conjuntamente con esto elaborar un sistema automatizado, desde la captación de datos hasta las salidas gráficas, para ofertar los pronósticos de oleaje hasta 72 horas, de forma operativa.

2. Materiales y métodos

2.1 Modelo Atmosférico proveedor de los datos (MM5V3)

Como modelo proveedor de los datos para las corridas de los modelos de oleaje se utilizó el MM5V3. Este es un modelo mesoescalar de quinta generación desarrollado por especialistas de la Universidad Estatal de Pennsylvania y del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas en la década de los 70 y se encuentra operativo en el INSMET (Instituto de Meteorología).

2.2 Modelos de oleaje usados

1- **Wavewatch III™** : es un modelo de tercera generación que ha sido desarrollado en NOAA-NCEP, y está basado en WAVEWATCH-I y WAVEWACHT-II desarrollados en la universidad tecnológica Delft, y en la NASA Goddard Space Flight Center, respectivamente. Ha sido creado para la generación del oleaje en aguas profundas.

2- **SWAN:** es un modelo numérico que pretende obtener estimaciones realistas sobre los parámetros del oleaje en las zonas costeras, lagos y estuarios para unas condiciones dadas de viento, corrientes y batimetría. *Fue desarrollado por la Universidad de Delft (Países Bajos).*

2.3 Zonas de Estudio

El MM5V3 genera pronósticos simultáneos para tres dominios anidados, que se diferencian por su extensión y resolución. El Dominio 2 los mares interamericanos y el 3, las aguas aledañas a Cuba. En el presente trabajo, se utilizaron los Dominios 2 y 3, mostrados en la **Fig. 1**. Se incluyeron además tres pequeñas áreas de escala local: la costa norte de la ciudad de La Habana **Fig. 2**, la región norte de Matanzas **Fig. 3** incluyendo Varadero y el área que comprende al Golfo de Batabanó **Fig. 4**.

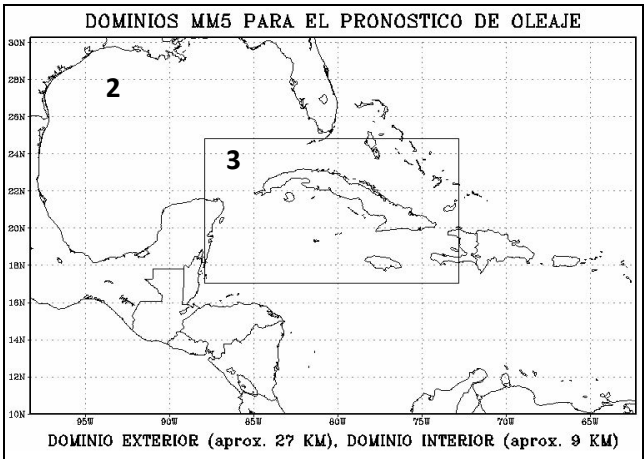


Fig. 1 Dominios 2 y 3 del MM5V3

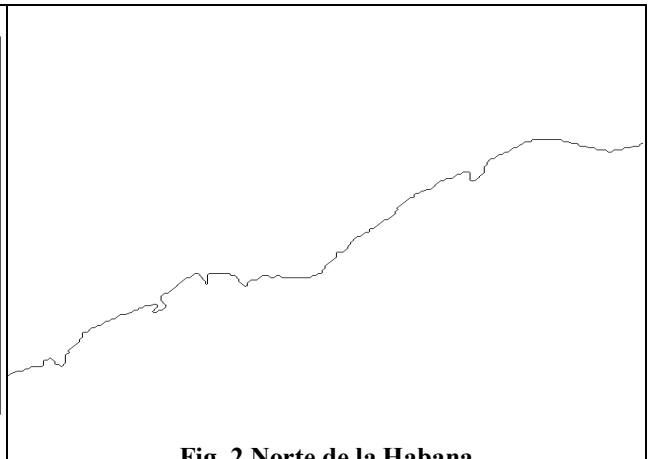


Fig. 2 Norte de la Habana

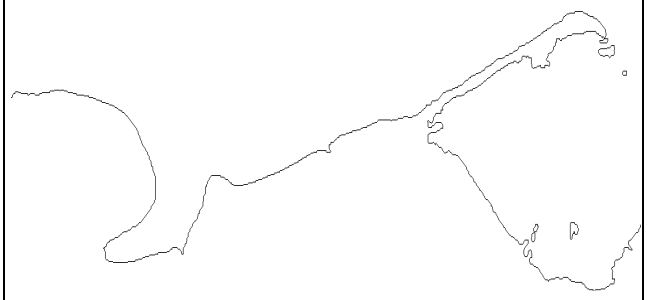


Fig. 3 Norte de Matanzas



Fig. 4 Golfo de Batabanó

2.4 Casos de estudio

Los casos de estudio se resumen a los siguientes huracanes:

1) **Wilma** (corrida del 23 a las 00z hasta el 26 a las 00z de octubre del 2005)

2) **Paloma** (corrida del 7 a las 00z hasta el 10 a las 00z de noviembre del 2008)

2.5 Datos reales de referencia

La estimación de errores de los pronósticos de oleaje se realizó comparando las salidas de los modelos con los datos de las boyas disponibles en el sitio web de la National Data Buoy Center **Fig. 5**. Los errores en las trayectorias se compararon con los del NHC (National Hurricane Center) y los del viento con estaciones cubanas en tierra **Fig. 6** y con las mismas boyas usadas para el oleaje.

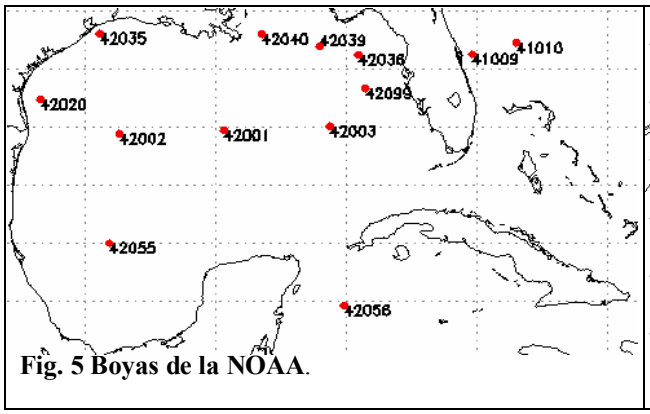


Fig. 5 Boyas de la NOAA.

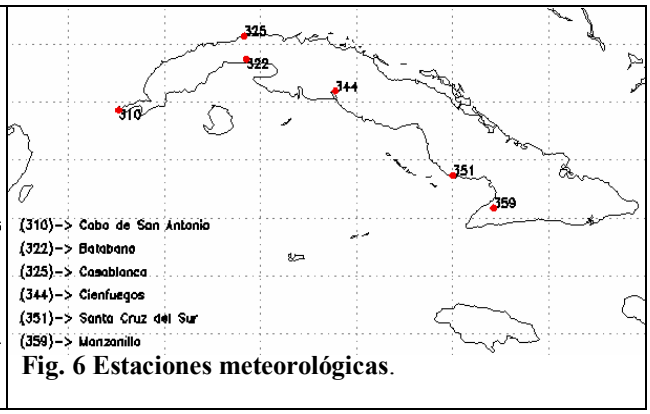


Fig. 6 Estaciones meteorológicas.

2.5 Esquemas de trabajo

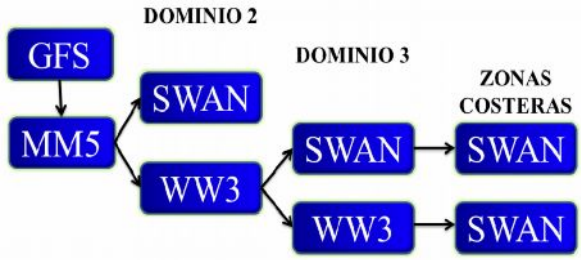


Fig. 7 Esquema utilizado para realizar los experimentos.

Los esquemas de trabajo (**Fig. 7)** consistieron en realizar numerosas pruebas con las combinaciones MM5+WW3, MM5+SWAN, MM5+WW3+WW3+SWAN, MM5+WW3+SWAN+SWAN.

2.6 Cálculo del Wave Setup

El SWAN no calcula el wave setup en coordenadas esféricas, solo en cartesianas y en nuestra investigación se utilizó la primera de estas. Además el SWAN muestra inconsistencia con el cálculo de este parámetro en corridas realizadas en paralelo lo cual fue otra limitante por lo que se usó la siguiente ecuación (Shore Protection Manual, 1984).

$$\delta_b = \frac{g^{0.5}\, h_0^2\, \tau}{64\, \pi\, (H_r)^{2.5}} \qquad (1)$$

$\mathbf{h_0}$ _ Altura de la ola en aguas profundas.

δ_b - Sobreelevación por wave setup.

τ - Período de la ola.

$\mathbf{H_r}$ - Profundidad del punto de rompiente.

Se trabajó sobre sistema LINUX y se usó además el lenguaje de programación FORTRAN 90 para elaborar el proceso automatizado y para el cálculo de los errores y el Grads (Grid Analysis and Display System) se utilizó para facilitar la visualización de datos.

3. Resultados y discusión

3.1 Pronóstico de trayectorias. Errores

La efectividad de los modelos de oleaje depende de la calidad de los datos procedentes del modelo atmosférico MM5V3, por lo que se valoró los errores que pudo introducir dicho modelo en el pronóstico de trayectoria y en el campo de vientos en comparación con las "best track" (Mejores trayectorias) disponibles en el sitio web del National Hurricane Center (NHC) y el pronóstico oficial de dicho sitio, para las fechas de los casos de estudio. **Fig. 8** muestra las trayectorias reales y pronosticadas.

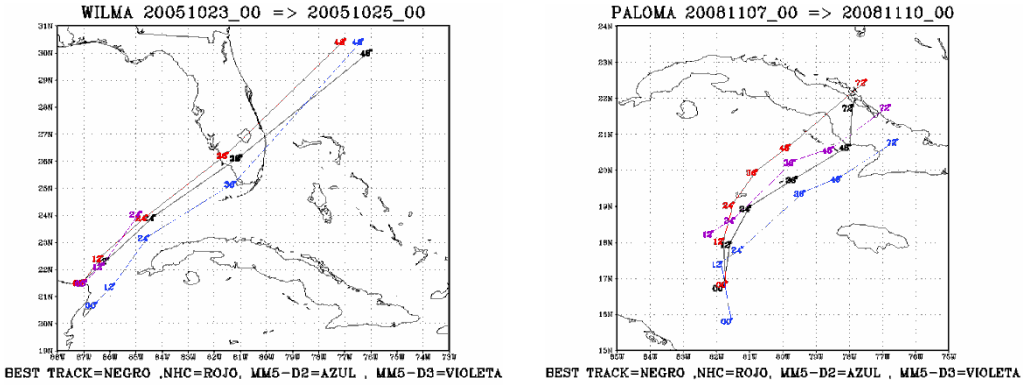


Fig. 8. 1-Wilma, 2-Paloma

A continuación, se representan los errores en kilómetros en la predicción de trayectorias de los ciclones tropicales con MM5V3, en comparación con los errores promedio de todos los modelos usados para cada huracán por el NHC y de su pronóstico oficial. Entre paréntesis, la cantidad de corridas promediadas y en rojo los errores inferiores a los promedios del NHC.

Tabla I Errores en las trayectorias del pronóstico para el huracán Wilma

WILMA				
/	12 HORAS	24 HORAS	36 HORAS	48 HORAS
MM5V3-D2	107.70(1)	86.63	108.81(1)	54.06(1)
MM5V3-D3	29.02(1)	56.68(1)	//	//
NHC(PROM)	60.85(585)	108.22(552)	152.07(522)	197.13(501)
NHC pronóstico	23.38	30.48	51.12	105.81

Tabla II Errores en las trayectorias del pronóstico para el huracán Paloma

PALOMA					
/	12 HORAS	24 HORAS	36 HORAS	48 HORAS	72 HORAS
MM5V3-D2	66.10(1)	129.26(1)	49.14(1)	100.47(1)	174.42(1)
MM5V3-D3	65.18	61.28(1)	53.88(1)	53.61(1)	115.61(1)
NHC(PROM)	64.01(239)	117.74(219)	167.81(186)	219.13(150)	318.90(78)
NHC pronóstico	23.89	53.75	127.43	187.21	88.04

Del análisis individual de cada caso, se aprecia que los mejores plazos de pronóstico, comienzan a partir de las 24 horas (**Tablas I y II)** y que de forma general, el comportamiento del MM5 es satisfactorio para el pronóstico de trayectoria de huracanes en ambos Dominios.

3.2 Pronóstico de la velocidad del viento. Errores

Los modelos de predicción de oleaje son forzados por campos de vientos que comúnmente provienen a su vez de modelos atmosféricos. Es por esto que al evaluar los modelos de oleaje es necesario que se tomen en cuenta los errores que podrían provenir de los campos de viento pronosticados.

Se comparó las salidas de viento del MM5 con las estaciones meteorológicas cercanas a las zonas costeras para ambos dominios en los que se aprecia la disminución de los errores al aumentar en resolución de un dominio con respecto a otro donde (E_A_M) -Error absoluto medio, (E_C_M)-error cuadrático medio y (D_R)-dispersión relativa.

Tabla III. Errores del valor modular del viento para las estaciones cubanas.

ERRORES DEL CAMPO DE VIENTOS (m/s)						
Intervalos (hr)	**Dominio2**			**Dominio3**		
	E_A_M	**E_C_M**	**D_R**	**E_A_M**	**E_C_M**	**D_R**
00-24	4.47	5.09	8.25	3.61	4.33	5.19
24-48	6.35	7.39	1.22	5.39	6.38	1.13
48-72	5.97	7.17	1.08	3.86	4.47	0.93

Esta evaluación inicial sólo se ha realizado en estaciones sobre tierra próximas a la zona costera, donde se produce mayor variabilidad del viento debido a la influencia del relieve y del uso de suelo. Pero los modelos de oleaje no utilizan el viento sobre tierra, por lo que la validación de los campos de viento a partir de estaciones costeras, en este caso, es puramente orientativa.

Tabla IV. Errores del valor modular del viento con respecto a los registros de las boyas.

Intervalos (hr)	**Errores del viento en las boyas(m/s)**		
	E_A_M	**E_C_M**	**D_R**
00-24	2.38	2.78	1.53
24-48	2.24	2.62	1.12
48-72	1.75	2.04	1.20

Al analizar el error del valor modular del viento se aprecia en la **Tabla IV** una disminución en los errores con respecto a la **Tabla III**, esto demuestra que en estudios de oleaje es necesario la validación del viento en mar abierto, de quedarse solo con la validación en tierra, se hubiese atribuido un por ciento mayor de error al campo de viento que se toma como entrada.

3.3 Análisis de los elementos de olas

Huracán Paloma

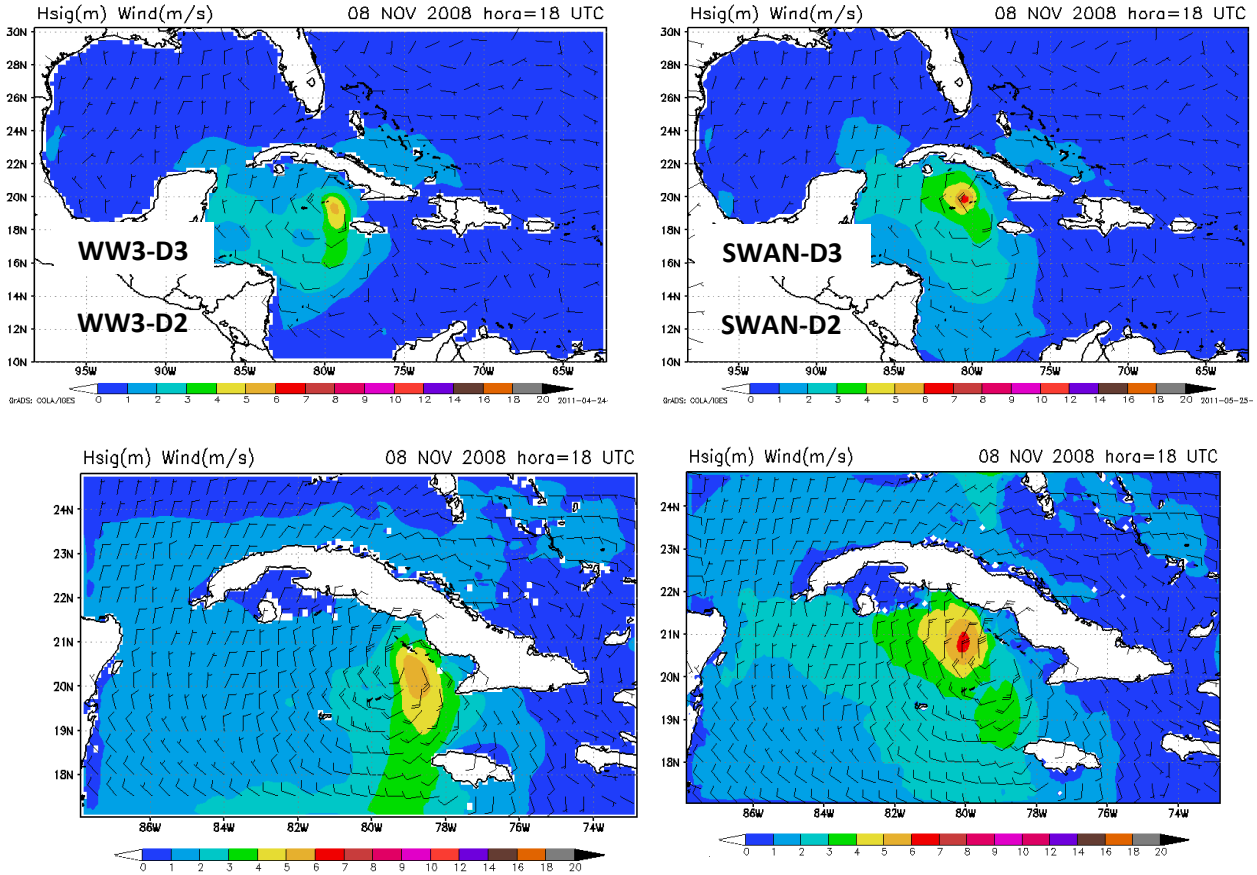


Fig. 9. Comparación entre los pronósticos por WW3 y SWAN para el Huracán Paloma en ambos dominios del MM5.

La gráfica que muestra la **Fig. 10** se evidencia como el SWAN se comporta mejor en la mayor parte de los plazos. A pesar de que en el área de generación tiende a sobreestimar la altura de la ola con respecto al WW3 **Fig. 9**, lejano a esta, tiende a pronosticar mejor que el WW3, ya que las boyas se encuentran en el golfo de México, muy lejos de la trayectoria descrita por el huracán Paloma.

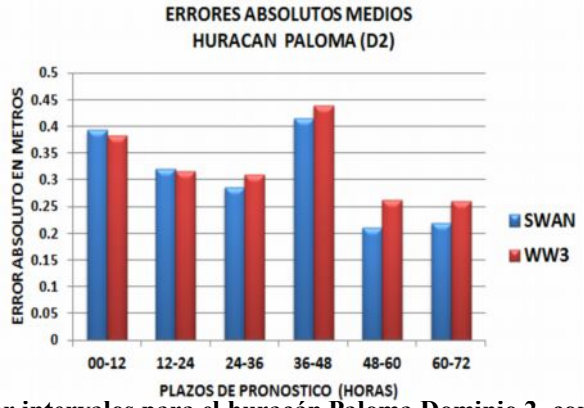


Fig. 10. Errores absolutos por intervalos para el huracán Paloma Dominio 2, comparación WW3 y SWAN con los registros de las boyas.

Huracán Wilma.

El SWAN sobreestimó los valores de altura de la ola con respecto al WW3 **Fig. 11** y con respecto a las boyas ya que este huracán tiene la particularidad de haber pasado por las cercanías de estas. El SWAN presentó errores menores que el WW3 para los plazos por encima de 48 horas lo que reafirma las potencialidades del SWAN para el pronóstico de oleajes débiles lejos del área de generación **Fig. 12**.

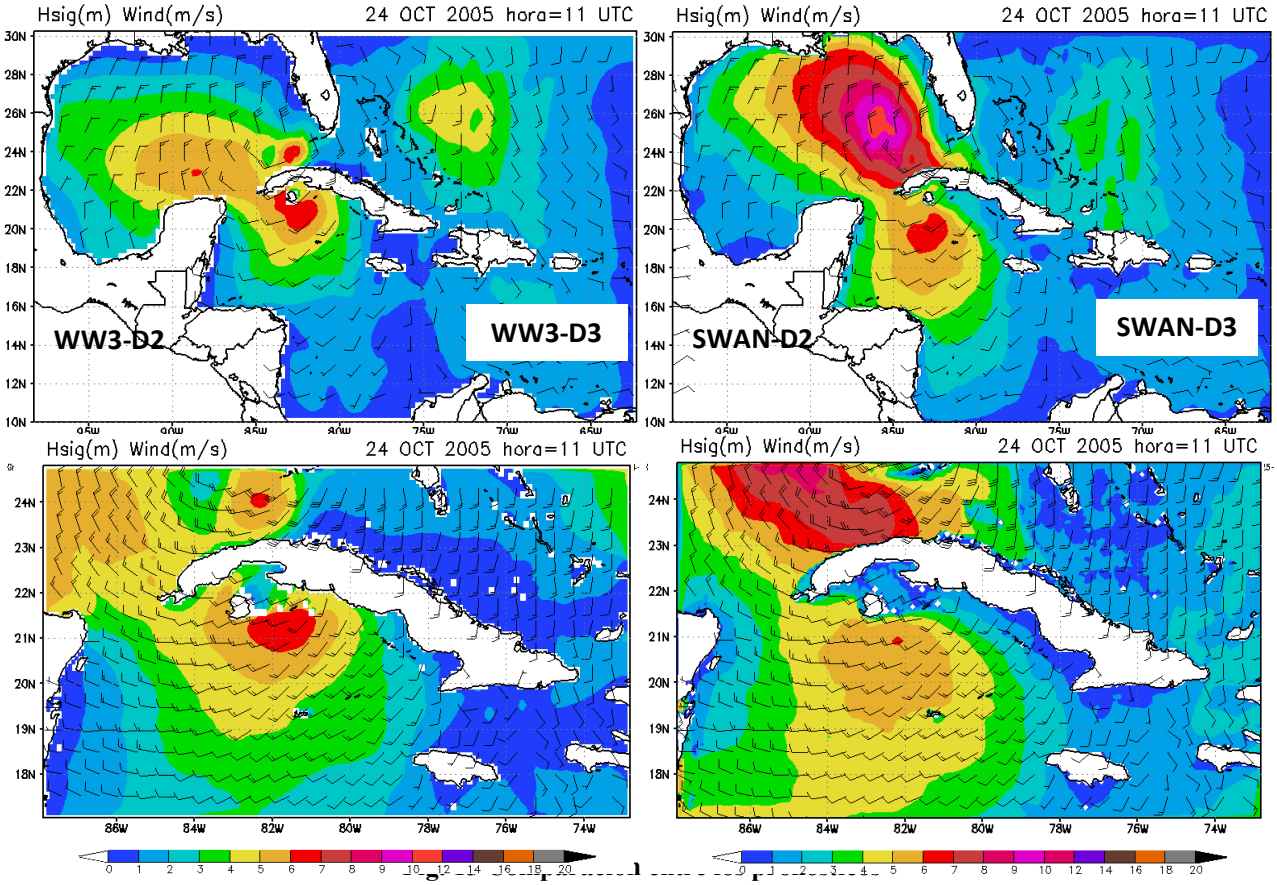


Fig. 11. Comparación entre los pronósticos de WW3 y SWAN para el Huracán Wilma

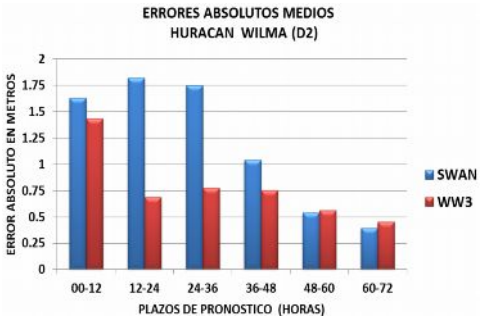


Fig. 12. Errores absolutos por plazos para el huracán Wilma Dominio 2, WW3 y SWAN.

3.4 Zonas costeras

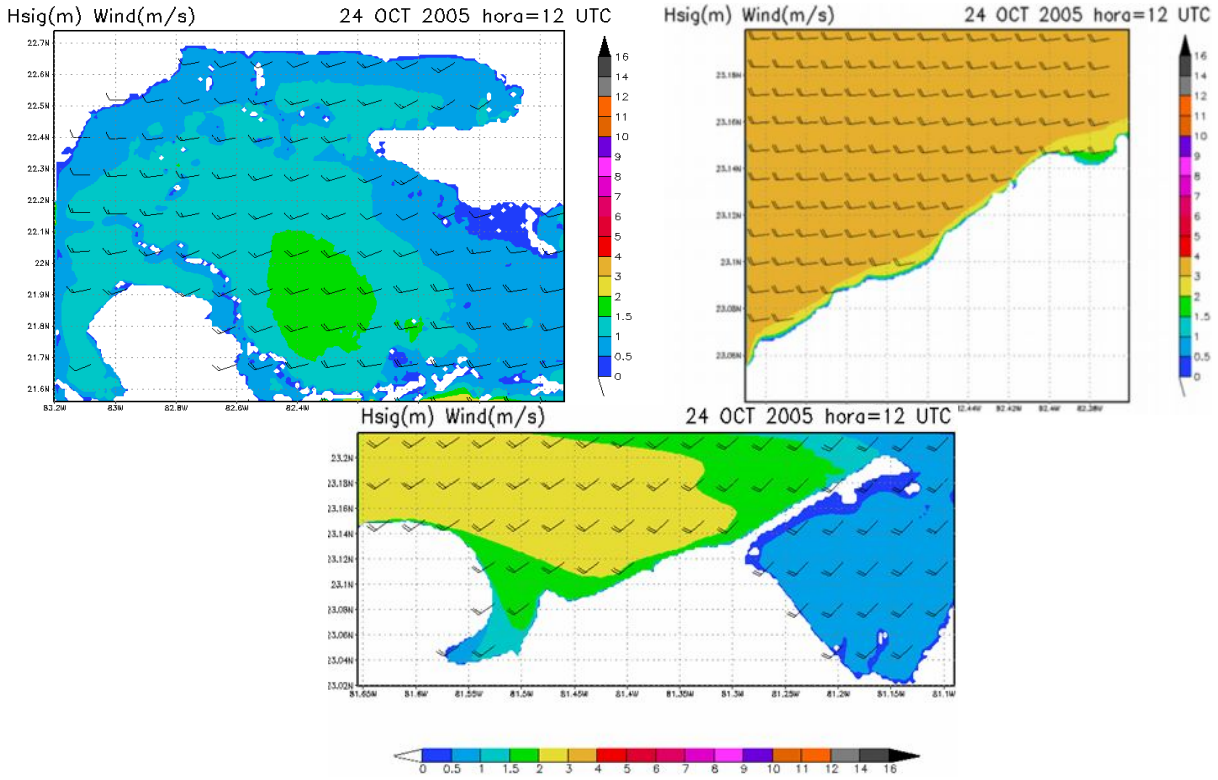


Fig. 13 Zonas costeras para el huracán Wilma.

Del análisis de cada una de las zonas costeras, **Fig. 13** al no poseer de registros ni instrumentales ni visuales para cada uno de los casos de estudio, se puede especular que los resultados obtenidos en la modelación de la propagación del oleaje hacia la costa, alcanzan los valores posibles esperados para dichos casos, al partir de resultados bastante confiables en aguas profundas, la propagación a la costa cumple con la física del fenómeno para cada área, al tener en cuenta características locales determinantes en el oleaje como puede ser la batimetría.

3.5 Wave Setup

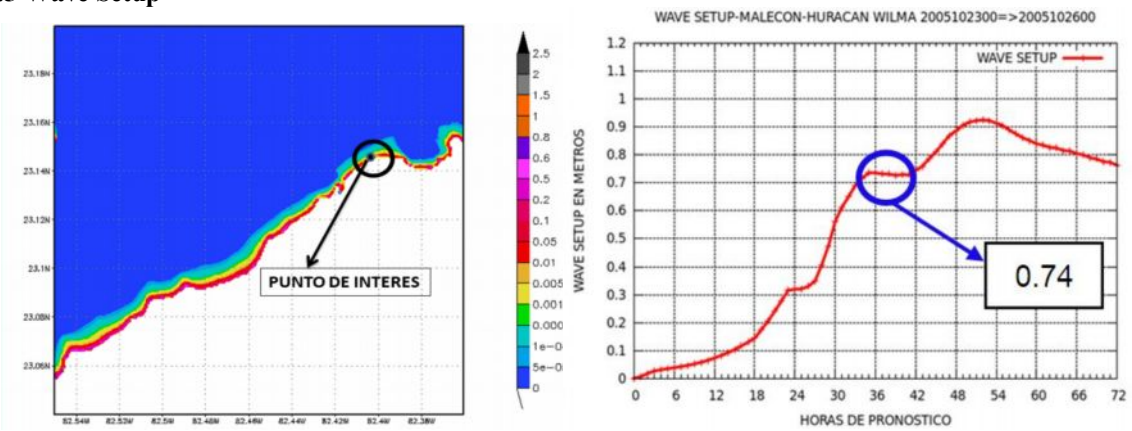


Fig. 14. 1- Punto de interés seleccionado en el Malecón para representar la evolución del wave setup 2- Evolución del wave setup en este punto para los distintos plazos de pronóstico.

Dentro del circulo **Fig. 14-2** el valor del wave setup calculado para las horas de la mañana del día 24 de octubre en un punto del malecón habanero **Fig. 14-1**. Este se aproxima a lo estimado en el INSMET (Casals 2005) para ese horario en el que se obtuvo 0.77 metros aproximadamente.

3.6 Esquema de Automatización

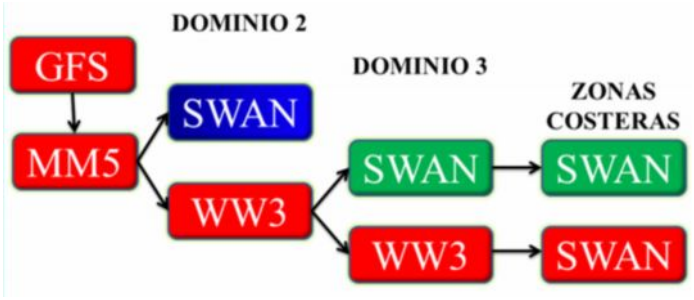


Fig. 15. Esquemas de automatización. La rama azul se desechó; la rama roja está operativa y la verde se encuentra de forma experimental.

Del esquema presentado en la **Fig. 7** y el análisis de las particularidades de cada uno de los modelos para las distintas áreas de estudio se elaboraron dos procesos automatizados:

1-WW3 (27 Km) + WW3 (9 Km) + SWAN (Puntos de interés) para (Temporada ciclónica).

2-WW3 (27 Km) + SWAN (9 Km) + SWAN (Puntos de interés) para (Condiciones habituales).

Se descartó totalmente la opción del SWAN para el Dominio de 27 Km.

Actualmente se está corriendo de forma automática la variante 1 ya que los errores fueron inferiores que los alcanzados por las otras variantes de la **Fig. 15**. Un aspecto a tener en cuenta es que en este trabajo solo se trabajó con huracanes, por lo que la inclusión de frentes fríos daría más elementos para decidir por una u otra combinación.

Conclusiones

- La combinación de un modelo a mesoescala (MM5V3) con dos de oleaje (WW3+SWAN), es una buena opción para pronosticar oleaje desde las áreas de generación en aguas profundas hasta la costa, especialmente al paso de ciclones tropicales.

- La localización del área de generación del oleaje al paso de un ciclón tropical es satisfactoria. El MM5V3 funciona con eficiencia a partir de las 24 horas de plazo y hasta las 72, por lo que el error que puede introducir no es considerable, en comparación con los datos reales dados por NHC y con las salidas de otros modelos.

- Los valores del módulo del viento, pronosticados por MM5V3 en puntos cercanos a las costas, al compararse con registros de estaciones costeras, pueden presentar errores de cierta importancia por la influencia del relieve, pero no resultan de interés para los modelos de oleaje, puesto que no es este el viento que genera las olas.

- Las salidas de MM5 sobre el mar presentan errores pequeños, por lo que no constituyen una gran fuente de errores para el pronóstico del oleaje.

- El WW3 muestra un mejor comportamiento para oleaje fuerte, cerca del área de generación del huracán, mientras que SWAN se comporta mejor para oleajes débiles, en zonas alejadas del área de generación. Por tales razones, se proponen los dos procesos automatizados creados para el pronóstico de oleaje:

1-WW3 (27 Km) + WW3 (9 Km) + SWAN (Puntos de interés) (Temporada ciclónica).

2-WW3 (27 Km) + SWAN (9 Km) + SWAN (Puntos de interés) (Condiciones habituales).

Recomendaciones

- Se recomienda realizar nuevos experimentos con una mayor cantidad de casos, que den más aportes a lo aquí sugerido. Además es necesario estudiar las condiciones habituales y las tormentas invernales.

- Por otra parte, las salidas propuestas también pueden dar soluciones ingenieriles, por lo que se recomienda sean utilizadas en acciones de manejo costero en la República de Cuba.

Referencias

Booij, N., Ris, R.C. y Holthuijsen, L.H., (1999): A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J.Geoph.Research, 104, C4, pp.7649-7666.

Casals R. (2005): Resumen de las Inundaciones Costeras ocurridas en Cuba Durante la temporada ciclónica 2005.

Mitrani I, Borrajero I, Alonso Y, Bezanilla A, Martínez D, (2009): Asimilación de modelos a mesoescala, combinados para la predicción de la circulación atmosférica y el oleaje, en territorio cubano y mares adyacentes"

SPM (1984): Shore Protection Manual Department of the army USA my Cops of Engineers, Washington, DC20314, Vol. 1

Tolman, H. L., (2002): User Manual and system documentation of WAVEWATCHIII. Version 2.22. Tech. Note 222, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 133 P.