

Aplicación del modelo atmosférico MM5 para la simulación de vientos asociados a huracanes

Ing. Grethel Salgueiro Melis, e-mail: gsalgueiro@cih.cujae.edu.cu
Dr. Ing. Luis F. Córdova López, e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu
Ing. Roberto Lamazares González, e-mail: rlamazares@cih.cujae.edu.cu
Ing. Yanelys Téllez Hendrickson, e-mail: ytellez@civilmail.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas.
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

RESUMEN

En la presente investigación se ha utilizado el modelo atmosférico MM5 en su versión 3 como plataforma para la obtención de los vientos producidos por fenómenos meteorológicos, más específicamente, por huracanes. Para el establecimiento de este modelo se realizaron simulaciones con diferentes variantes de implementación y se seleccionaron, como casos de estudio, cuatro de los más fuertes huracanes que han pasado cerca o sobre la isla de Cuba. A partir de un análisis estadístico para cada una de las variantes y comparaciones realizadas con dos boyas de la NOAA ubicadas en el golfo de México, se decidió la mejor opción para establecer el modelo MM5v3, teniendo en cuenta la obtención de resultados fiables en el menor tiempo de cómputo posible.

Palabras clave: huracanes, modelación matemática, modelo atmosférico, simulaciones, vientos.

Application of atmospheric model MM5 for the simulation of winds associated to hurricanes

ABSTRACT

In the present investigation the atmospheric model MM5 in its version 3 has been used as platform to obtain the winds produced by meteorological phenomena, more specifically, by hurricanes. In order to establish this model, several simulations with different implementation variants were carried out. Also, four of the strongest hurricanes that have ever come close or across the Cuban island were selected as study cases. Based on a statistical analysis for each one of the variants and comparisons made against two NOAA buoys located in the gulf of Mexico, the best option to establish the model MM5v3 was decided, taking into account the need to obtain reliable results in the least possible computational time.

Keywords: atmospheric model, hurricanes, mathematical models, simulations, winds.

INTRODUCCIÓN

El archipiélago cubano con frecuencia es afectado por inundaciones costeras generadas por ciclones tropicales en la temporada ciclónica del Atlántico, y por sistemas frontales en la temporada invernal del hemisferio norte, principalmente en los meses de enero a marzo. La mitad occidental del país es la más expuesta a estos eventos que pueden crear condiciones desfavorables como son las penetraciones del mar, inundaciones súbitas y gran altura del nivel de las aguas, causando severos daños a las edificaciones costeras y a la población aledaña. Para mitigar los daños que ocasionan estas inundaciones, es de gran importancia la calidad y anticipación de los pronósticos del tiempo y del estado dinámico de la superficie marina, por lo tanto es una necesidad para el país el ir desarrollando conocimientos, procedimientos y metodologías que permitan predecir con bajos niveles de error los niveles de inundación costera y su comportamiento en tiempo y espacio.

El trabajo que se presenta forma parte de las investigaciones realizadas por el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (Cujae), que tienen como objetivo fundamental el desarrollo de un sistema de ingeniería costera y marítima para la simulación de los efectos de eventos meteorológicos severos en zonas costeras. En el mismo están involucrados un conjunto de modelos matemáticos libres y/o de código abierto estrechamente vinculados entre sí de amplio uso por la comunidad internacional y de probada eficacia a nivel mundial. En esta investigación se hace referencia al establecimiento del MM5, uno de los modelos que conforman el sistema.

DESARROLLO

El modelo meteorológico a meso escala de quinta generación MM5 versión 3 (v3) fue desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania (PSU) y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR), este último el encargado del soporte operativo. Fue seleccionado por el Servicio Meteorológico Nacional (National Meteorological System), por su alta definición en la detección de sistemas atmosféricos de meso escala y cuenta con todas las características necesarias para su adaptación a las condiciones específicas de una zona en particular (Montávez 2001).

Algunas de las características del modelo MM5 que lo hacen destacarse entre los otros modelos que existen en la comunidad científica son su capacidad de anidamiento múltiple, la asimilación variacional de datos convencionales y de satélite durante la predicción, así como la incorporación de modernos y realistas esquemas de parametrización. El esquema general del modelo consiste en una serie de módulos con diferentes funciones. En la figura 1 se puede apreciar el funcionamiento e interacción de dichos módulos.

DOMINIOS BATIMÉTRICOS A ESTUDIAR

Tomando en cuenta las condiciones físico-geográficas de Cuba y su posición en la zona central en los mares interamericanos se decidió trabajar con dominios batimétricos que enmarcaran la zona de estudio en cuestión. Con el objetivo de determinar el esquema del modelo a implementar, para la obtención de los vientos en la región occidental de Cuba se realizaron tres variantes de estudio: cuatro dominios, tres dominios y un dominio respectivamente, figura 2. Se utilizó para ellos la proyección cónica de Lambert, dado que el modelo presenta una parte significativa de su territorio en latitudes medias.

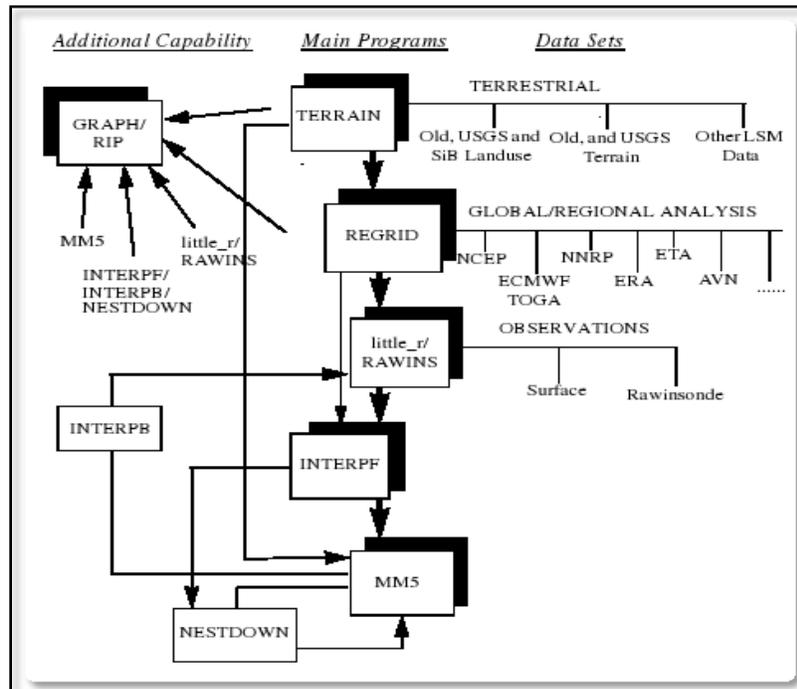


Figura 1. Esquema de trabajo del modelo MM5v3 (Montávez 2001)

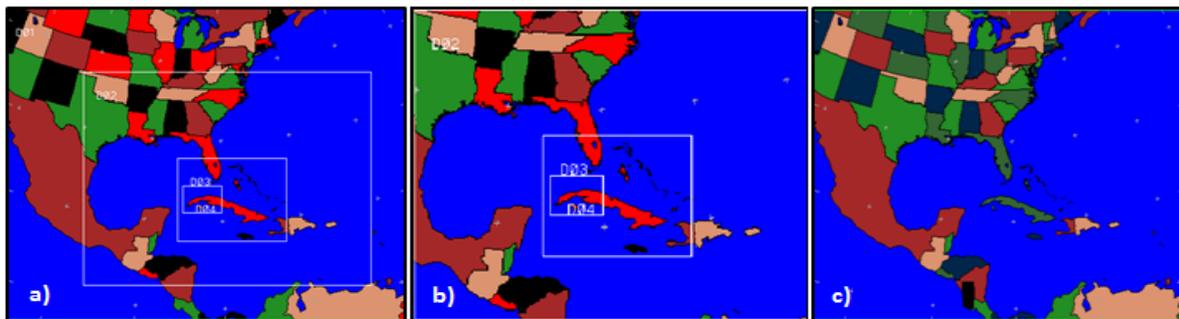


Figura 2. Dominios batimétricos a estudiar: a) variante de cuatro dominios, b) variante de tres dominios y c) variante de un dominio

Características de la variante de cuatro dominios

Para esta primera variante las coordenadas centrales se situaron en 27°N con 82°W. La distancia entre nodos es de 81, 27, 9 y 3 km respectivamente, con una resolución de 1° para los dos primeros dominios y 30 min para los dos últimos.

Las coordenadas para la construcción de cada uno de los dominios, así como la cantidad de cuadrículas y el desplazamiento con respecto al dominio exterior se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas para la variante de cuatro dominios

Dominios	X inicial	Y inicial	X final	Y final	Cuadrículas		Desplazamientos	
					X	Y	X	Y
1	-107,515	6,953	-56,485	47,048	70	55	-	-
2	-98,038	11,327	-61,345	38,543	151	112	14	7
3	-86,131	16,916	-72,199	27,446	172	130	50	24
4	-85,402	20,48	-80,515	23,909	181	127	10	45

Características de la variante de tres dominios

Para esta segunda variante de trabajo la distancia entre nodos es de 27, 9 y 3 km, con una resolución de 1° para el primer dominio y 30 min para los dos últimos. El centro está ubicado en las coordenadas 25° N y 80° W. Las coordenadas para la construcción de cada uno de los dominios, así como la cantidad de cuadrículas y el desplazamiento con respecto al dominio exterior se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas para la variante de tres dominios

Dominios	X inicial	Y inicial	X final	Y final	Cuadrículas		Desplazamientos	
					X	Y	X	Y
1	-98,225	11,392	-61,775	38,608	150	112	-	-
2	-86,075	16,981	-72,143	27,511	172	130	51	24
3	-85,427	20,464	-80,621	23,893	178	127	9	44

Características de la variante de un dominio

Para esta última variante la distancia entre nodos es de 27 km y con el centro ubicado en las coordenadas 25° N y 80° W. En esta variante se trabajaron con tres resoluciones diferentes 1°, 30 min y 10 min con el objetivo de precisar los resultados. Ver tabla 3.

Tabla 3. Coordenadas para la variante de un dominio

Dominios	X inicial	Y inicial	X final	Y final	Cuadrículas		Desplazamientos	
					X	Y	X	Y
1	-107,515	6,953	-56,485	47,048	70	55	-	-

CASOS DE ESTUDIO

Para llevar a cabo esta investigación se estudiaron cuatro huracanes que por su trayectoria e intensidad provocaron fuertes daños en la región occidental de Cuba, teniendo en cuenta estudios anteriores realizados por Córdova (2010). Los huracanes son Iván en el 2004, Wilma en el 2005, Rita en el 2005 y Gustav en el 2008. En la figura 3 se muestran las trayectorias seguidas por estos huracanes.



Figura 3. Trayectoria de los huracanes Wilma(Bedincuba 2006), Iván (Canapred 2010), Gustav (Cubadebate 2009) y Rita (Wikipedia 2008)

El tiempo de simulación utilizado para cada uno de estos huracanes, teniendo en cuenta lo recomendado para el modelo (Mitrani Arenal y González Pedroso 2005), fue de 72 horas y se seleccionaron de acuerdo con su paso por el territorio cubano. En la tabla 4 pueden ser apreciados.

Tabla 4. Período de simulación de cada huracán

Huracán	Fecha de inicio	Hora de inicio	Fecha final	Hora final
Wilma	22/10/2005	12:00	25/10/2005	12:00
Gustav	30/08/2008	00:00	02/09/2008	00:00
Iván	12/09/2004	06:00	15/09/2004	06:00
Rita	19/09/2005	00:00	22/09/2005	00:00

SELECCIÓN DE LAS BOYAS DE MEDICIÓN

Las boyas de medición fueron seleccionadas lo más cerca posible de la trayectoria de los huracanes y sus datos fueron obtenidos del National Data Buoy Center (NDBC 2011). La tabla 5 muestra el nombre y la ubicación de cada una de las boyas que se utilizaron para el cálculo del error a partir de los valores simulados por el modelo MM5v3 y así determinar la calidad de la simulación.

Tabla 5. Localización y ubicación de las boyas de la NOAA

Boya	Localización	Longitud	Latitud	Profundidad (m)
42001	Centro del Golfo de México	89,67	25,86	3246
42003	Este del Golfo de México	85,91	25,01	3164

ESQUEMAS DE TRABAJO DEL MODELO MM5

Para las simulaciones con el modelo MM5 se tomaron como datos de entrada los resultados del modelo global GFS para el huracán Wilma disponibles en internet. El modelo se trabajó en un primer momento solamente para este huracán y a partir de los resultados obtenidos, se prosiguió a la simulación del resto de los huracanes. En este estudio se analizaron dos esquemas de trabajo con diferentes formas de anidado, OneWay (una dirección) y TwoWay (dos direcciones), para un total de 7 variantes (figura 4), teniendo en cuenta los dominios batimétricos comentados anteriormente. Tanto para el huracán Wilma como para el resto de los huracanes, los resultados se obtuvieron cada 6 horas en un período de 3 días.



Figura 4. Variantes de estudio

Después de realizar un estudio de las funciones de cada uno de los módulos del sistema MM5, se decidió plantear dos esquemas de trabajo con el objetivo de comparar los resultados hasta encontrar la opción que mejor se adapte a la obtención de campos de vientos para la región occidental de Cuba. En las figuras 5 y 6 se pueden visualizar los módulos que se emplearon en cada esquema, así como las dependencias y el orden en que se ejecutan cada uno de ellos.

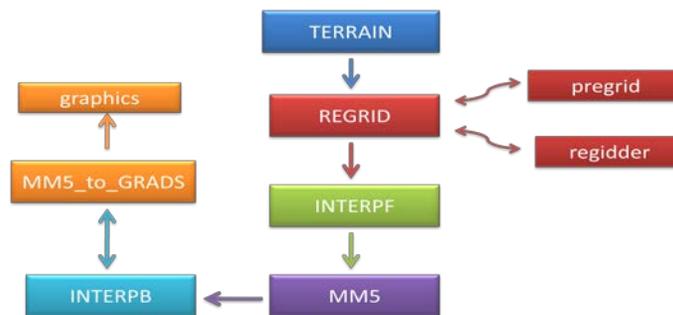


Figura 5. Esquema de trabajo 1

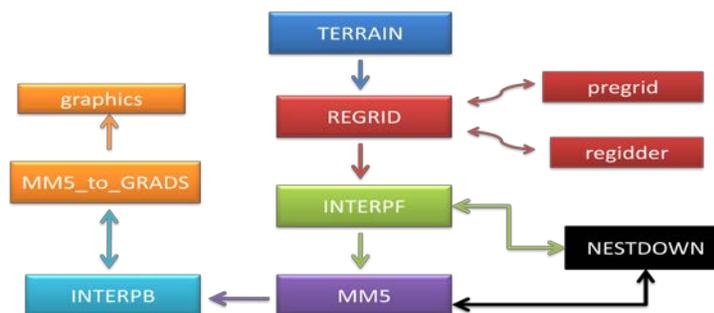


Figura 6. Esquema de trabajo 2

En los dos esquemas anteriores se utilizaron las siguientes configuraciones de acuerdo con la bibliografía consultada (Mitrani Arenal y González Pedroso 2005):

- Para el relieve y uso del suelo se utilizaron 24 categorías y dos estaciones (cálida y fría), con resolución de 55 – 18 km.
- Parametrización de Grell para nubes Cu.
- Parametrización simple de lluvia no convectiva, con fase de hielo.
- Parametrización de Blackadar para la interacción con la superficie y difusión turbulenta por K-theory en los demás niveles.
- Parametrización y predicción de la temperatura superficial del suelo en superficie por balance térmico, con inclusión de difusión térmica multinivel.
- Parametrización del enfriamiento radiactivo, solo con inclusión del curso diurno de la temperatura del aire.

SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS PARA EL HURACÁN WILMA

La simulación utilizando MM5 tiene como objetivo principal obtener los datos de velocidad del viento en las posiciones de las boyas 42001 y 42003 de la NOAA, mencionadas anteriormente, para realizar un estudio comparativo y posteriormente uno estadístico que permita determinar el menor error cometido entre los datos medidos y los simulados y así poder seleccionar la mejor variante. Los tipos de errores que se tendrán en cuenta durante el estudio comparativo son el Bias y el coeficiente de determinación (R^2).

Bias: es una desviación donde se tiende a sobrestimar el modelo cuando el valor ofrecido por la simulación es mayor que el medido por la boya y a subestimar cuando ocurre lo contrario. Por lo tanto cuando esta desviación sea lo más cercana a cero, mejor es la simulación. Está determinado por la ecuación (1).

$$\text{Bias} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (V_{si} - V_{oi}) \quad (1)$$

Donde: M número total de valores, V_{si} son los valores simulados y V_{oi} los valores medidos por la boya.

R^2 (coeficiente de determinación): este se determinó por el programa Statistica versión 7.0, define el nivel de correlación entre los valores medidos por las boyas y los valores simulados por el modelo matemático, si este valor es más cercano a 1, será mucho menor la desviación entre los valores medidos y los simulados, por lo que la simulación es de mejor calidad.

Resultados de la variante de cuatro dominios

En las tablas que se indican, se relacionan los resultados obtenidos por el modelo para el esquema 1 en OneWay y TwoWay y para el esquema 2 en OneWay, así como las mediciones tomadas en cada boya. Para cuatro dominios ver tabla 6.

Tabla 6. Variante de cuatro dominios

Boya	Esquema 1				Esquema 2	
	OneWay		TwoWay		OneWay	
	MM5-4D (2do Dominio)	R ²	MM5-4D (2doDominio)	R ²	MM5-4D (2doDominio)	R ²
42001	0,26	0,59	0,21	0,62	-0,17	0,47
42003	-0,66	0,69	-0,60	0,70	-0,52	0,61

En la figura 7 se muestran los gráficos con el comportamiento de las mediciones tomadas en la boya 42001 y 42003 contra los resultados obtenidos en la modelación utilizando cuatro dominios.

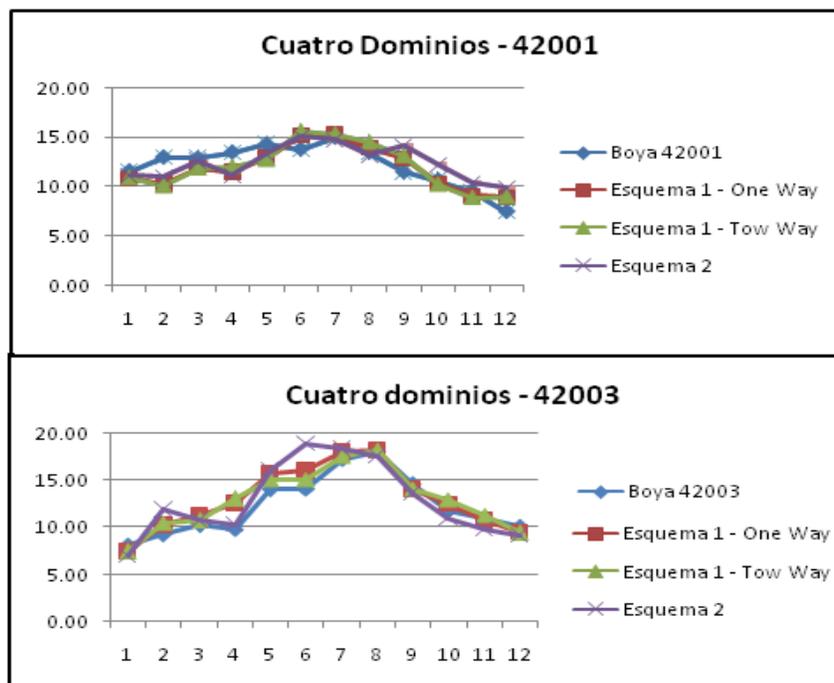


Figura 7. Mediciones de las boyas y resultados de la simulación para cuatro dominios

De manera general y analizando el comportamiento de las dos boyas los mejores resultados se obtuvieron en el siguiente orden: Esquema 1 en Two-Way, Esquema 2 y Esquema 1 en One-Way.

Resultados de la variante de tres dominios

Para la variante de tres dominios se realizó un análisis similar, tabla 7, utilizando las mismas boyas obteniéndose los resultados mostrados.

Tabla 7. Variante de tres dominios

Boya	Esquema 1				Esquema 2	
	OneWay		TwoWay		OneWay	
	MM5-3D (1er Dominio)		MM5-3D (1er Dominio)		MM5-3D (1er Dominio)	
	Bias	R ²	Bias	R ²	Bias	R ²
42001	0,66	0,53	0,58	0,62	0,88	0,42
42003	-0,65	0,78	-0,61	0,72	-0,67	0,86

En la figura 8 se muestran los gráficos con el comportamiento de las mediciones tomadas en las boyas contra los resultados obtenidos en la modelación utilizando tres dominios.

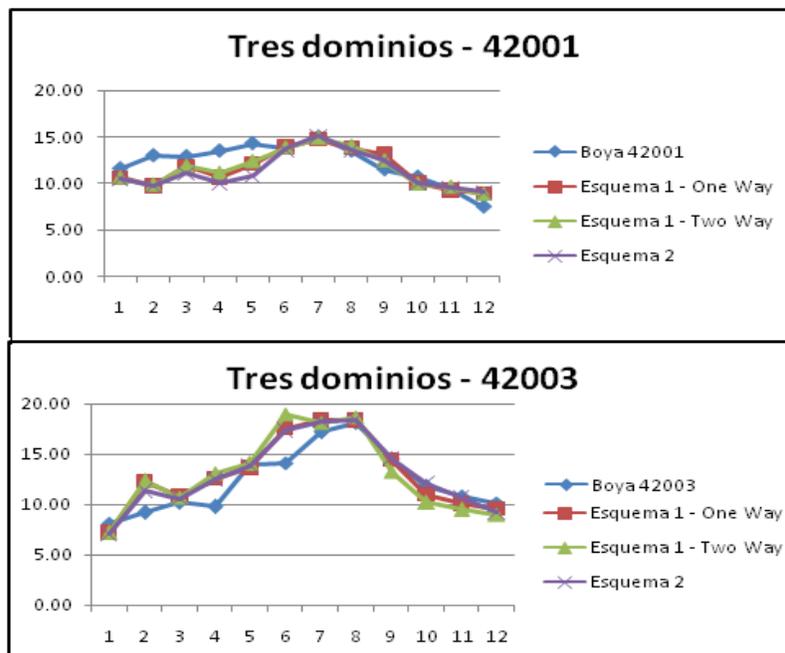


Figura 8. Mediciones de las boyas y resultados de la simulación para tres dominios

Para esta variante el análisis del comportamiento de las dos boyas demostró que, al igual que en la variante anterior, los mejores resultados se obtuvieron en el orden de Esquema 1 en Two-Way, Esquema 2 y Esquema 1 en One-Way.

Resultados de la variante de un dominio

Para la última variante se realizó un análisis similar, tabla 8, pero como sólo se simuló un dominio no se tuvieron en cuenta las condiciones de anidado y sí tres resoluciones diferentes, con el objetivo de precisar los resultados.

Tabla 8. Variante de un dominio

Boya	Esquema 1				Esquema 2	
	OneWay		TwoWay		OneWay	
	MM5-1D (1 grado)	MM5-1D (30 min)	MM5-1D (30 min)	MM5-1D (30 min)	MM5-1D (10 min)	MM5-1D (10 min)
	Bias	R ²	Bias	R ²	Bias	R ²
42001	0,88	0,42	0,81	0,38	0,78	0,43
42003	-0,77	0,86	-0,73	0,82	-0,69	0,79

En la figura 9 se muestran los gráficos del comportamiento de las mediciones tomadas en la boyas contra los resultados obtenidos en la modelación para las diferentes resoluciones.

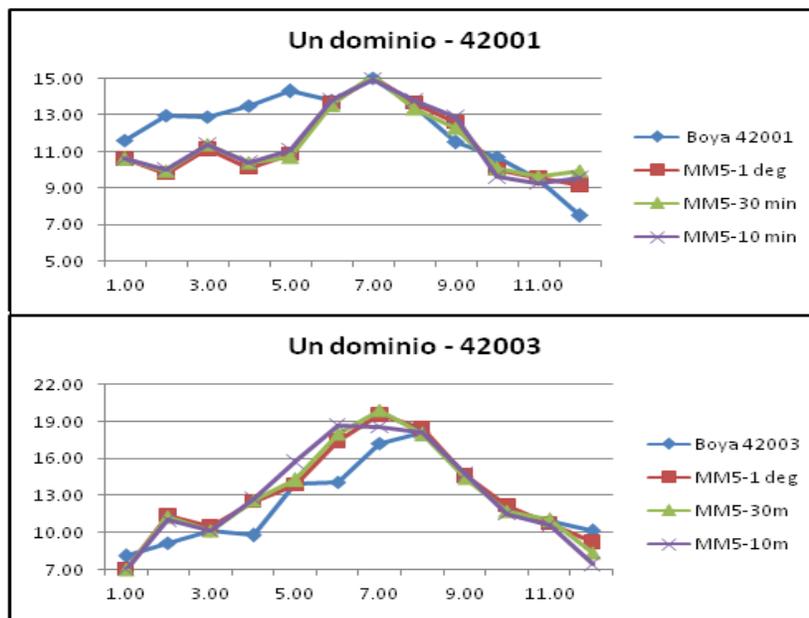


Figura 9. Mediciones de las boyas y resultados de la simulación para un dominio

Como se puede observar en esta variante, a medida que se disminuye la resolución se obtienen mejores resultados, a pesar de esto, se decidió tomar la variante con resolución de 30 min debido a que los resultados obtenidos en este modelo serán utilizados en el sistema de ingeniería costera que se desarrolla en el CIH, como datos de entrada para el modelo de generación de oleaje WW3 que utiliza como mínima resolución 30 min, por tanto no vale la pena entregarle a WW3 datos con una resolución tal que el modelo tenga que interpolar los mismos y por ende introducir errores y demorar la simulación.

Análisis de los tiempos de cómputo para las corridas del huracán Wilma

Para la selección de la variante apropiada del modelo MM5v3 se tuvieron en cuenta, además de los parámetros Bias y R², el tiempo que demoró cada corrida en cada una de las variantes analizadas. Los tiempos de cómputo dependen en gran medida de la capacidad de la computadora con que se esté trabajando. El equipo que se utilizó para esta investigación es un Pentium IV con velocidad de 3,0 Gh, memoria RAM de 1014 Mb, y disco duro de 100 Gb,

aunque para Linux y MM5 hacen falta aproximadamente 10 Gb libres. En la tabla 9 se muestra la relación de los tiempos de cómputo en cada uno de las variantes analizadas.

Tabla 9. Tiempos de modelación para cada variante

Dominios	Esquema 1						Esquema 2		
	ONE WAY			TWO WAY			ONE WAY		
	Tiempo	Bias	R ²	Tiempo	Bias	R ²	Tiempo	Bias	R ²
MM5-4D	27 h y 58 min	0,26	0,59	45 h y 03 min	0,21	0,62	50 h y 06 min	-0,17	0,47
MM5-3D	15 h y 54 min	0,66	0,53	20 h y 15 min	0,58	0,62	35 h y 28 min	0,88	0,42
MM5-1D	1 h y 13 min	0,81	0,38						

Luego de realizado el análisis anterior para cada una de las variantes, se determinó que los mejores resultados se obtienen para el Esquema 1 con TwoWay, no obstante esta variante se desechó por los excesivos tiempos que demora completar una simulación de 72 h. Teniendo en cuenta los objetivos que se pretenden alcanzar con la implementación del modelo MM5v3 y los equipos de cómputo con los que se cuenta actualmente en el CIH, la variante seleccionada fue la de un dominio con resolución de 30 min. Para corroborar esta selección se prosiguió a realizar la comprobación que se explica a continuación.

Comprobación de la variante seleccionada

Luego de seleccionada la variante a utilizar se decidió hacer una comparación con dos boyas virtuales ubicadas al norte y al sur de la región occidental de Cuba respectivamente. La boya virtual 1 con las coordenadas (23,5 N; 82,5 W) y la número 2 en (21 N; 82,5 W).

Tabla 10. Comparación de variante para la boya virtual 1

Fecha	Two-Way	One-Way		Two-Way	One-Way	
	MM5-4D (4to Dominio)	MM5-1D (30 min)	Diferencia	MM5-3D (3er Dominio)	MM5-1D (30 min)	Diferencia
	Simulado	Simulado		Simulado	Simulado	
22/10/2005 18	6,78	6,75	0,03	6,67	6,75	-0,09
23/10/2005 00	9,07	9,18	-0,11	9,00	9,18	-0,18
23/10/2005 06	10,55	10,65	-0,10	10,62	10,65	-0,03
23/10/2005 12	11,26	11,76	-0,50	10,82	11,76	-0,94
23/10/2005 18	12,79	13,76	-0,97	14,30	14,76	-0,46
24/10/2005 00	18,21	18,95	-0,74	19,33	21,95	-2,62
24/10/2005 06	23,20	23,58	-0,38	25,90	27,58	-1,68
24/10/2005 12	19,89	20,94	-1,06	22,36	23,94	-1,58
24/10/2005 18	13,01	13,41	-0,39	14,90	13,41	1,50
25/10/2005 00	9,14	12,07	-2,94	11,77	12,07	-0,30
25/10/2005 06	8,01	9,95	-1,94	12,06	9,95	2,11
25/10/2005 12	6,62	7,07	-1,26	8,45	7,87	0,57
Bias			-0,80			-0,31
R²			0,97			0,96

Para esta comparación se utilizaron como mediciones los resultados obtenidos a partir del dominio de la región occidental en las mejores variantes de cuatro dominios y tres dominios respectivamente y como simulados los resultados obtenidos a partir de interpolar los datos de la variante de un dominio con resolución de 30 min. El análisis se muestra en las tablas 10 y 11 y las figuras 10 y 11.

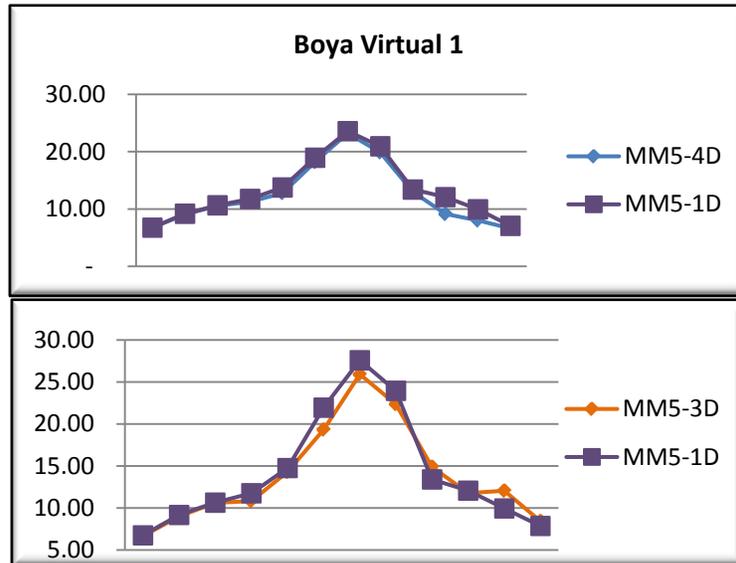


Figura 10. Mediciones de la boya virtual 1 y resultados de la simulación

Tabla 11. Comparación de variante para la boya virtual 2

	TWO-WAY	ONE-WAY		TWO-WAY	ONE-WAY	
	MM5-4D (4to Dominio)	MM5-1D (30 min)		MM5-3D (3er Dominio)	MM5-1D (30 min)	
Fecha	Simulado	Simulado	Diferencia	Simulado	Simulado	Diferencia
22/10/2005 18	11,69	11,56	0,13	11,57	11,56	0,01
23/10/2005 00	11,71	11,76	-0,05	11,81	11,76	0,05
23/10/2005 06	12,73	11,85	0,88	12,49	11,85	0,64
23/10/2005 12	13,62	14,07	-0,45	14,60	14,07	0,53
23/10/2005 18	14,92	17,17	-2,24	14,33	17,17	-2,83
24/10/2005 00	15,22	17,37	-2,15	17,36	17,37	-0,01
24/10/2005 06	15,72	16,46	-0,75	18,62	17,46	1,16
24/10/2005 12	14,18	15,08	-0,90	15,84	16,08	-0,24
24/10/2005 18	10,82	11,12	-0,30	12,72	11,12	1,60
25/10/2005 00	8,71	9,64	-0,93	10,42	10,64	-0,22
25/10/2005 06	8,32	7,72	0,59	7,25	7,72	-0,47
25/10/2005 12	5,12	6,73	-1,61	9,19	7,73	1,46
Bias			-0,65			0,14
R ²			0,88			0,89

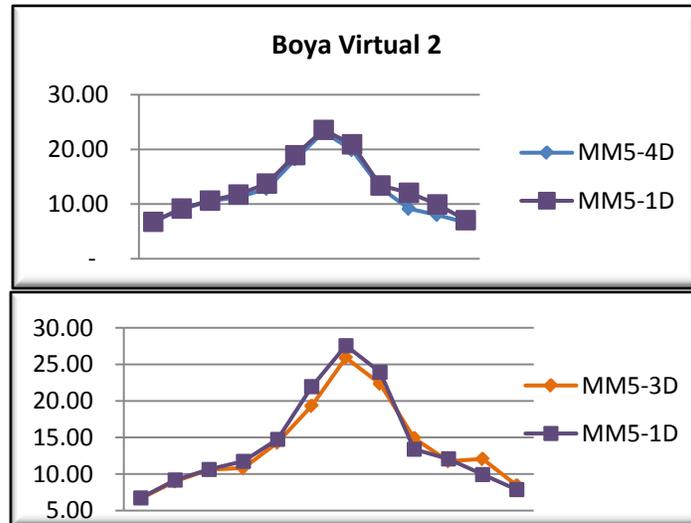


Figura 11. Mediciones de la boya virtual 2 y resultados de la simulación

Teniendo en cuenta que lo que se está analizando son velocidades de vientos, los errores que se obtuvieron no son significativos y permiten disminuir aproximadamente en un 91% los tiempos de cómputo.

En los gráficos de las figuras 10 y 11 se puede apreciar el comportamiento similar que presentan estas simulaciones.

Resultados del modelo para el resto de los huracanes de estudio

A partir del análisis anterior y los resultados obtenidos, se determinó que la variante más adecuada para la modelación en el MM5 es la de un dominio con resolución de 30 min. Con esta variante se realizó la simulación del resto de los huracanes en estudio. La tabla 12 muestra los errores calculados para cada huracán a partir de las mediciones de las boyas de la NOAA.

Tabla 12. Resultados de los errores los huracanes en estudio

Huracán	Bias		R ²	
	42001	42003	42001	42003
Gustav	-0,47	-0,40	0,07	0,88
Iván	-3,41	-2,81	0,13	0,01
Rita	-3,90	0,71	0,50	0,14

Es importante señalar que los resultados del modelo para las primeras horas de simulación no son buenos, pues en su gran mayoría, los modelos matemáticos necesitan un período inicial de tiempo para lo que se denomina “calentamiento del modelo”.

CONCLUSIONES

- Existe una adecuada correlación entre los valores observados o medidos en las boyas de la NOAA y los simulados a partir del análisis estadístico para los cuatro huracanes.
- A partir de las simulaciones realizadas, se seleccionó como mejor variante de trabajo del modelo MM5v3 para las condiciones de trabajo del CIH, la de un dominio con resolución de 30 min, con la cual se obtienen buenos resultados y se reducen los tiempos de cómputo en un 91%.

RECOMENDACIONES

- Continuar profundizando en cada una de las salidas que brinda el modelo.
- Realizar la simulación de otras trayectorias de huracanes que han ocasionado inundaciones en la zona occidental del país para analizar otras variantes y ejecutar comparaciones entre ellas.

REFERENCIAS

- Bedincuba** (2006). “Huracán Wilma, La Habana convertida en la Venecia del Caribe”. Cuba en fotos, extraído de: http://www.bedincuba.com/cuba_foto_huracán_Wilma_habana.htm, en junio de 2012.
- Canapred** (2010). “Huracán Iván del mar Caribe”. Boletín de alerta por ciclón tropical, extraído de: <http://geografica.cenapred.unam.mx/SIAT/2004/Sep/12/IVAN12SEP.htm> en junio de 2012.
- Córdova L.** (2010). “Trayectoria más desfavorable de un huracán con intensa penetración del mar en el Malecón de la Habana mediante el modelo matemático SWAN”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). vol. 31, no. 1, pp. 70-81.
- Cubadebate** (2009). “Hoy se cumple un año del paso del huracán Gustav por Cuba”. Cubadebate, Noticias, Medio Ambiente, extraído de: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2009/08/30/hoy-se-cumple-un-ano-del-paso-del-huracan-gustav-por-cuba-fotos-y-video/>, en junio de 2012.
- Mitrani Arenal I. y González Pedroso C.** (2005). “Predicción de las trayectorias de los huracanes Isidore y Lili con el uso de MM5v3, a su paso por territorio cubano y aguas circundantes”, Revista Brasileña de Meteorología, Vol. 20, No. 2, pp. 227-242, Brasil.
- Montávez J.** (2001). “El modelo meteorológico MM5”. Informe Técnico, Universidad de Murcia, España.
- NDBC** (2011). “National Data Buoy Center”. NOAA, extraído de: <http://www.ndbc.noaa.gov.html> en junio de 2012.
- Wikipedia** (2008). “Huracán Rita”. Wikipedia, la enciclopedia libre, extraído de: http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Rita, en junio de 2012.