

Aplicación del sistema computacional SICOM en la costa norte de Cuba

Ing. Patricia González Valdés

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba

e-mail: patriciagonzalez@tesla.cujae.edu.cu

Dr. Ing. Luis F. Córdova López

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba

e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

Por su posición geográfica Cuba se ve sometida a eventos meteorológicos extremos, por ello es necesario el estudio de la marea de tormenta y el oleaje. Se aplica el SICOM (Sistema de Ingeniería Costera y Marítima), que consiste en el acoplado de un conjunto de modelos numéricos para el estudio de la hidrodinámica y morfodinámica en zonas costeras sobre mallas de cómputo. En este trabajo se fuerzan los modelos con las variables meteorológicas asociadas con los huracanes Kate (1985) y Rita (2005). Se establecieron diferentes escenarios para conocer el comportamiento de las variables hidrodinámicas y niveles del mar. Se validan los resultados comparándolos con las predicciones del programa WXTide y las mediciones aportadas por las boyas de la NOAA, se realizan análisis estadísticos obteniendo resultados satisfactorios.

Palabras clave: huracanes, modelos, oleaje, validación.

Application of computational system SICOM on the north coast of Cuba

ABSTRACT

Due to its geographical position Cuba is subjected to extreme weather events, therefore the study of storm surge and waves is necessary. The SICOM (Coastal and Maritime Engineering System) is applied, which consists of the coupling of a set of numerical models for the study of hydrodynamics and morphodynamics in coastal areas on computational meshes. In this work, the models are forced with the meteorological variables associated with hurricanes Kate (1985) and Rita (2005). Different scenarios were established to know the behavior of hydrodynamic variables and sea levels. The results are validated by comparing them with the predictions of the WXTide program and the measurements provided by NOAA buoys. Statistical analyzes are performed obtaining satisfactory results.

Keywords: hurricanes, models, waves, validation.

INTRODUCCIÓN

Por su posición geográfica Cuba se encuentra sometida a los efectos de los fenómenos atmosféricos tales como ciclones tropicales, frentes fríos y bajas extratropicales, todos ellos, en la generalidad de los casos, tienen asociados penetraciones del mar e inundaciones en la zona costera, las que presentan mayor o menor afectación dependiendo de la combinación de los factores físico-geográficos y los meteorológicos (González 2017).

El uso de los modelos numéricos ha evolucionado satisfactoriamente en las dos últimas décadas, siendo estos capaces de procesar información de numerosas variables meteorológicas y ofrecer pronósticos de gran precisión (González 2017).

El grupo de Ingeniería de Costas del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) ha desarrollado numerosos estudios aplicando trenes de modelos numéricos, con el fin de analizar el comportamiento del mar en situaciones meteorológicas peligrosas, creando el SICOM, que consiste en el acoplado de un conjunto de modelos numéricos para el estudio de la hidrodinámica y morfodinámica asociada a eventos extremos, en este caso a huracanes.

En este trabajo se utiliza el acoplamiento de forma homogénea entre dos de los modelos que componen el SICOM, el modelo hidrodinámico ADCIRC (Advance Circulation Model) y el modelo de oleaje SWAN (Simulation Waves Nearshore), mediante el acoplamiento sobre una misma malla de cómputo no estructurada donde el modelo ADCIRC entrega los niveles del mar y las corrientes a SWAN, y este entrega a ADCIRC las tensiones de radiación, las cuales influyen en los niveles del mar resultantes. De esta forma se representa mejor la complejidad del fenómeno que ocurre en la realidad.

Con el uso del acoplamiento de estos dos modelos se obtiene el comportamiento de la altura de ola significativa, el fenómeno de sobre-elevación por rotura de la ola y la surgencia asociada a la ocurrencia de huracanes en la costa norte de Cuba.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio seleccionada está conformada por los mares interamericanos y sus islas, el golfo de México, el mar Caribe y la zona norte del océano Atlántico.

La literatura especializada ha recomendado el uso de este dominio para la modelación de eventos extremos debido a que la escala permite que se genere correctamente la marea, y reproducir de forma correcta el fenómeno de resonancia de la misma.

Se decide implementar una malla ajustada a las condiciones de Cuba mediante un dominio capaz de responder a las interrogantes que supone la llegada de un evento extremo a sus costas, con el cual se puedan predecir parámetros como el nivel del mar y las posibles zonas de inundación.

En la costa norte de Matanzas se extiende la maravillosa playa de Varadero y la bahía de Cárdenas; Villa Clara está bordeada de cayos que conforman el archipiélago de Sabana-Camagüey; Sancti Spíritus se caracteriza por su plataforma insular ancha bordeado de cayos;

Ciego de Ávila presenta una plataforma insular ancha bordeada de cayos donde se encuentra el archipiélago Sabana-Camagüey y por último en la provincia de Camagüey, su plataforma insular es ancha donde se encuentra gran cantidad de cayos, destacándose por su extensión y belleza los cayos Sabinal y Romano, este último el mayor del país con 777 kilómetros cuadrados. Muchos de estos cayos son fundamentales para el desarrollo del turismo en Cuba por sus hermosas playas (González 2017).

Descripción de los huracanes de estudio

Los huracanes objeto de estudio se seleccionaron de acuerdo con su trayectoria, que pasaran cerca de la zona de estudio, y que la categoría de los mismos haya sido lo suficientemente elevada para como para causar penetración del mar. El tiempo de simulación escogido aparece en la tabla 1.

El huracán Kate se originó como tormenta tropical el 16 de noviembre de 1985, situado al norte de Puerto Rico. En los días 17 y 18 su rumbo se mantuvo fluctuando entre el oeste y el oeste-noroeste, a la vez que ganaba en intensidad, acercándose a la costa norte de Cuba.

Penetró en territorio nacional por las inmediaciones de Morón, Ciego de Ávila, alrededor de la 1:00 AM del martes 19 de noviembre, con categoría de huracán SS-2 y en el horario de la tarde de ese mismo día salió al mar por un punto adyacente a Santa Cruz del Norte, La Habana.

Su trayectoria cruzó sobre la mitad del norte de la Isla, afectando ocho provincias: Camagüey, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus, Villa Clara, Matanzas, La Habana, Ciudad de la Habana y Pinar del Río (Ramos 2009). Los nombres de las provincias son los que existían en la época.

El huracán Rita fue el décimo séptimo huracán de la temporada del 2005. Rita se formó como una depresión tropical el 18 de septiembre del 2005, el día 20 el centro del huracán Rita comenzó a pasar por la capital cubana con una dirección del viento más al oeste y las rachas llegaban a 85 kilómetros por hora en La Habana. Este huracán, para no haber penetrado, causó inundaciones costeras a medida que se iba alejando del litoral norte de Cuba (Ramos 2009).

Tabla 1. Definición de los periodos de simulación

Huracanes	Fecha inicial	Fecha final	Cantidad de horas
Kate	18/11/1985	21/11/1985	96
Rita	19/09/2005	21/09/2005	72

Boyas de la NOAA

La selección de estas boyas se realiza con el objetivo de demostrar la precisión del modelo, estableciendo una comparación entre las mediciones captadas por cada una de ellas, y los resultados obtenidos de las modelación.

La selección de las boyas se realiza estudiando previamente la trayectoria tomada por los huracanes de forma individual, garantizando que contenga su paso por Cuba y que esté cerca de las boyas de la NOAA. En la tabla 2 se definen las boyas a utilizar y las coordenadas de las mismas, así como la utilización para cada huracán.

Tabla 2. Boyas de la NOAA

No. de boyas de la NOAA	Ubicación			Huracanes
	Longitud	Latitud	Profundidad (m)	
42001	-89,658	25,888	3365	Kate y Rita
42003	-85,648	26,007	3291,8	Kate
41004	-79,099	32,501	38,4	Rita
41010	-78,464	28,903	1873	Rita
42039	-86,006	28,739	274,3	Rita

Boyas virtuales

Con el objetivo de conocer el comportamiento del mar en la zona de estudio, se han colocado diferentes boyas virtuales. El proceso de análisis de colocación de estas boyas se basó en los reportes de inundación en las diferentes zonas de la costa norte desde Matanzas hasta Camagüey, así como como los lugares de interés como son las zonas turísticas y bahías de importancia. En la tabla 3 se muestran las coordenadas de estas.

Tabla 3. Coordenadas de las boyas virtuales

No. de boya	Lugar	Ubicación		
		Longitud	Latitud	Profundidad (m)
1	Matanzas 1	-81,5300	23,0670	178,2194
2	Matanzas 2	-81,5696	23,0457	2,3811
3	Varadero 1	-81,1994	23,1799	0,5470
4	Varadero 2	-81,1273	23,1991	1,3572
5	Varadero 3	-81,2200	23,1662	1,7268
6	Cárdenas 1	-81,2000	23,0670	3,9387
7	Cárdenas 2	-81,2023	23,0671	3,9387
8	Cárdenas 3	-81,2390	23,0916	0,2521
9	Isabela de Sagua 1	-80,0000	22,9300	2,9958
10	Isabela de Sagua 2	-80,0266	22,9407	1,0022
11	Caibarién 1	-79,4600	22,5231	0,9337
12	Caibarién 2	-79,4663	22,5345	2,3397
13	Cayo Santa María	-79,0663	22,6662	1,7249
14	Cayo Coco	-78,6186	22,5598	1,2705
15	Bahía de Nuevitas entrada	-77,1167	21,6300	371,5500
16	Bahía de Nuevitas 1	-77,2500	21,5830	4,5304
17	Bahía de Nuevitas 2	-77,2350	21,5598	2,3384

Línea de costa

La línea de costa se encuentra en coordenadas planas UTM y referenciada en WGS-84, espaciada a 100 metros en la costa norte comprendida desde Matanzas (-81,61°W; 23,15°N) hasta Camagüey (-76,95°W; 21,46°N) incluyendo los cayos. El resto de la isla está distribuida desde 100 hasta 3 000 metros. Las islas del Arco de las Antillas y las Bahamas tienen un espaciamiento de 7 000 metros, en el Golfo de México de 10 000 hasta 15 000 metros y en el Océano Atlántico 20 000 metros.

Batimetría

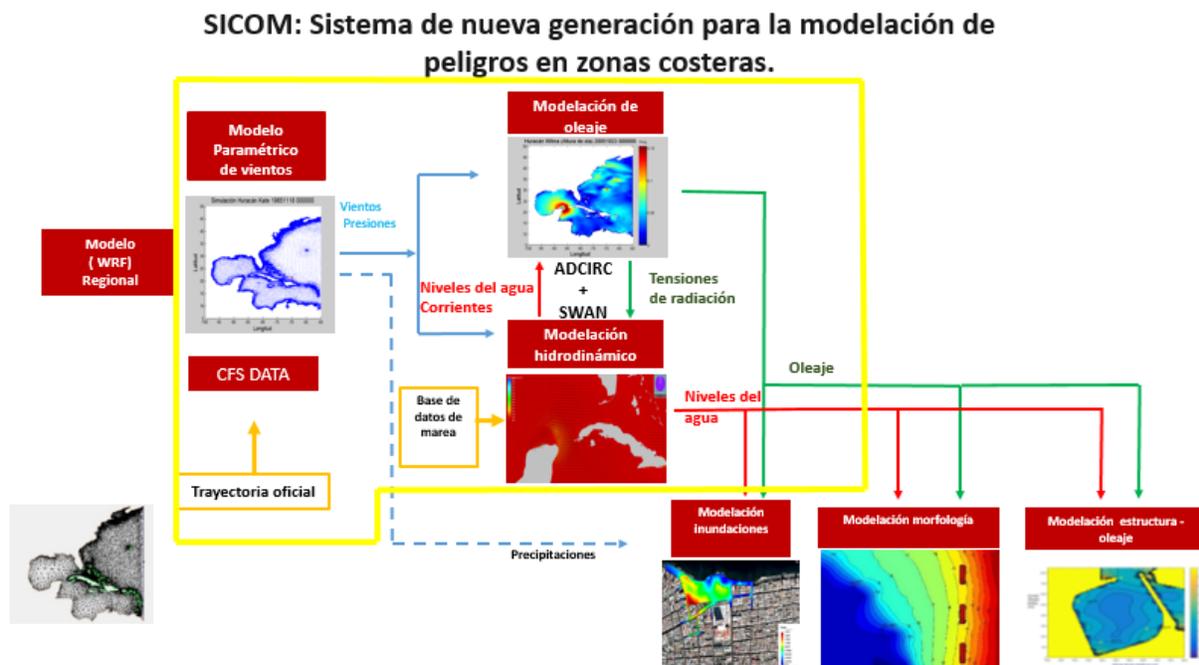
La confección de la batimetría para este estudio, fue una recopilación de información brindada por diferentes fuentes nacionales e internacionales, en coordenadas geográficas y referenciadas en WGS-84.

SISTEMA DE NUEVA GENERACIÓN PARA LA MODELACIÓN DE AMENAZAS EN ZONAS COSTERAS (SICOM)

Con el fin de simular de una manera más precisa las variables asociadas con los efectos negativos que provocan los eventos meteorológicos extremos en las zonas costeras del país, un grupo de especialistas del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), ha desarrollado un sistema de nueva generación que consiste en el acoplamiento de diferentes modelos numéricos, denominándolo SICOM (Córdova et al. 2014), compuesto por varios modelos matemáticos para estudiar y simular los fenómenos asociados con la hidrodinámica, los procesos morfológicos en playas de arena y la interacción entre el oleaje y las estructuras en zonas costeras (figura 1).

Entre los modelos que componen el sistema están: modelos hidrodinámicos basados en la hidrostática, en este caso ADCIRC (Westerink et al. 1994) e Iber (Bladí et al. 2012), modelo de oleaje SWAN (Holthuijsen et al. 2004) y modelos morfodinámicos Xbeach (Roalvink et al. 2015), modelo de oleaje y flujo no hidrostático SWASH (SWASH 2018).

En el estudio realizado en la costa norte del país se empleó el acoplamiento de los modelos ADCIRC – SWAN, donde ADCIRC le entrega a SWAN las corrientes (fort.64) y los niveles del mar (fort.63) y SWAN le entrega a ADCIRC las tensiones de radiación (fort.23), para obtener como resultado la sobre-elevación por rotura de la ola (figura 1).



**Figura 1. Esquema representativo del SICOM.
Cuadro amarillo (acoplamiento ADCIRC-SWAN)**

El ADCIRC (Modelo de circulación avanzado para océanos, costas y estuarios) es un modelo matemático desarrollado para solucionar las ecuaciones de la hidrodinámica terrestre. Sus ecuaciones han sido formuladas usando las aproximaciones de presión hidrostática tradicional de Boussinesq, las cuales fueron discretizadas en el espacio usando el método de elementos finitos (FE) y en el tiempo usando el método de diferencias finitas (FD); ver más detalles en (Westerink et al. 1994).

Puede ejecutarse como modelo de profundidad en dos (2DDI) o tres (3D) dimensiones. En uno u otro caso, la elevación es obtenida de la solución de la ecuación de continuidad en forma Generalizada o Ecuación de Onda-Continuidad (GWCE), por sus siglas en inglés.

La velocidad es obtenida de la solución del modelo 2DDI o las ecuaciones de momento 3D. Todos los términos no lineales han sido incluidos en estas ecuaciones.

Por su parte, el modelo SWAN (Simulación de olas en aguas poco profundas), es un modelo de oleaje de tercera generación para obtener estimaciones realistas de parámetros de la ola en las áreas costeras, lagos y estuarios a partir de condiciones dadas de viento, fondo y corriente.

El modelo se basa en la ecuación del equilibrio de la acción de las olas con fuentes y sumideros. SWAN utiliza mallas no estructuradas las cuales facilitan el proceso para la discretización espacial y temporalmente un modelo de altas presiones, como es el caso de los ciclones y huracanes (Holthuijsen et al. 2004).

DEFINICIÓN DEL DOMINIO DE LA MALLA DE CÓMPUTO

El objetivo de la creación de los diferentes dominios es disminuir el área de trabajo de la malla de cómputo y al mismo tiempo obtener un trabajo de calidad.

Para ello se definen tres fronteras (D30, D35 y D40) y además se emplea la frontera D60 para comparar cuál de ellas es la que más se le asemeja (figura 2).

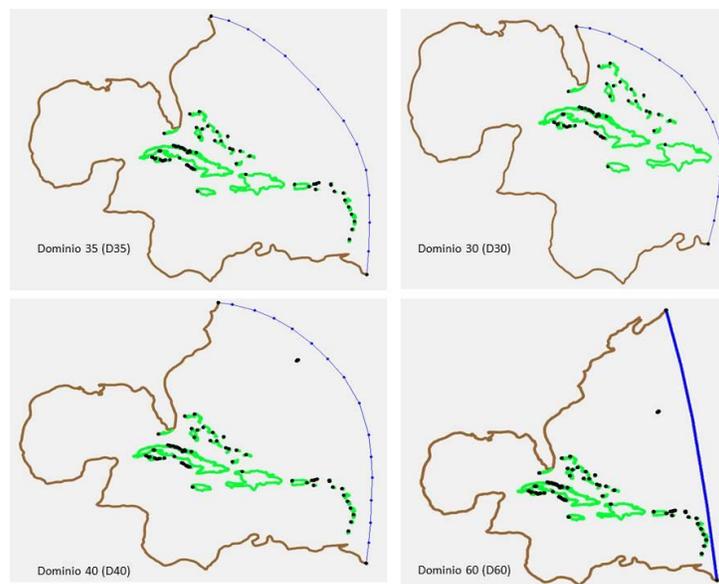


Figura 2. Dominios de la malla de cómputo

Según Hagen et al. (2001), el dominio más confiable es el de la frontera D60 (figura 2), debido a que se caracteriza mejor el fenómeno de resonancia, y los valores de las componentes de marea en esa frontera son muy confiables ya que están en aguas oceánicas profundas.

Para llevar a cabo la selección del dominio se realizan tres corridas con ADCIRC forzado con marea, utilizando la base de datos de LeProvost et al. (1998) (2N2, K1, K2, L2, M2, MU2, N2, NU2, O1, P1, Q1, S2, T2) con un tiempo de simulación de 15 días para los huracanes Rita y Kate.

Se realiza el análisis estadístico a través del coeficiente de determinación R^2 donde se comparan los resultados simulados por ADCIRC en los dominios D40, D35 y D30 con los del dominio D60. A partir de los resultados obtenidos se escoge el dominio D40 por ser el de mejor coeficiente de determinación con respecto al dominio más confiable D60.

Luego de haber escogido el dominio D40 se pasa a validar los resultados simulados por el ADCIRC con los obtenidos con el predictor de marea WXTide. Los coeficientes de correlación R^2 obtenidos fueron buenos.

DEFINICIÓN DE LA MALLA DE CÓMPUTO

Una vez definido el dominio a emplear, se realizó un estudio para obtener mayor resolución en la zona de estudio y menor número de nodos, con el fin de acortar los tiempos de simulación de los programas.

La malla escogida finalmente costa con 130 295 nodos (figura 3), fue con la que mejor resolución se logró y con un coeficiente de transición de 0,6.

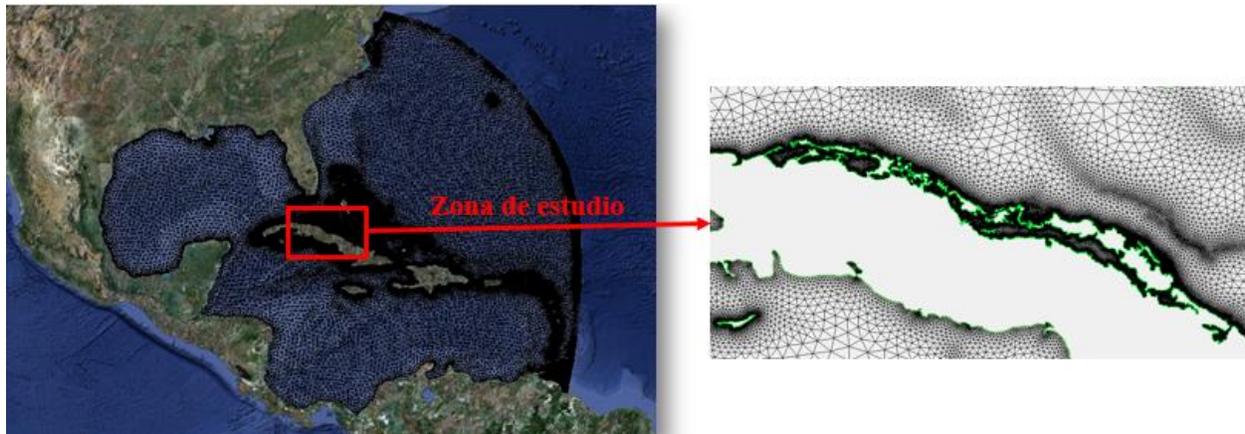


Figura 3. Malla de cómputo en la zona de estudio

Validación de los modelos: comparación de la base de datos CFS y las boyas de la NOAA

El grupo de trabajo fundador de la base de datos Climate Forecasting System (CFS) tiene como objetivo el reanálisis de ciclones tropicales, con el propósito de representar el estado del arte global atmosférico por años.

Estas bases de datos constan con reanálisis desde 1948 hasta la fecha. Se hacen actualizaciones diarias y mensuales de los estados atmosféricos, generado por un modelo de asimilación constante de datos (Saha 2010).

Los datos de vientos y de presiones son obtenidos de la base de datos CFS con el programa WGrib2 el cual se emplea para extraer vientos y presiones cada una hora.

Como estos programas son obtenidos de una base de datos se hace necesaria la validación de los mismos y por ello se comparan con los datos de vientos reales medidos por las boyas de la NOAA en el momento del paso del huracán.

Los métodos estadísticos empleados para la validación son: coeficiente de determinación, error medio cuadrático y error medio absoluto.

Se puede observar en las figuras 4 y 5 que el comportamiento de la variable del viento obtenido por la base de datos CFS es semejante a las medidas por las boyas de la NOAA, por lo que se acepta la utilización de la base de datos CFS.

En la tabla 4 aparece la comparación de las variables estadísticas realizadas en este estudio para la validación.

Tabla 4. Variables estadísticas utilizadas para la comparación de los datos de la boya de la NOAA y los vientos CFS

Huracán Kate (1985)			
Boyas de la NOAA	Coeficiente de determinación	Error Medio Cuadrático (m/s)	Error Medio Absoluto (m/s)
42001	0,7435	1,4558	1,1095
42003	0,4797	5,9691	3,1277
Huracán Rita (2005)			
Boyas de la NOAA	Coeficiente de determinación	Error Medio Cuadrático (m/s)	Error Medio Absoluto (m/s)
41004	0,5467	1,1100	0,8776
41010	0,7760	0,9559	0,7831
42001	0,3449	7,1355	3,3513
42039	0,9179	1,3063	1,0459

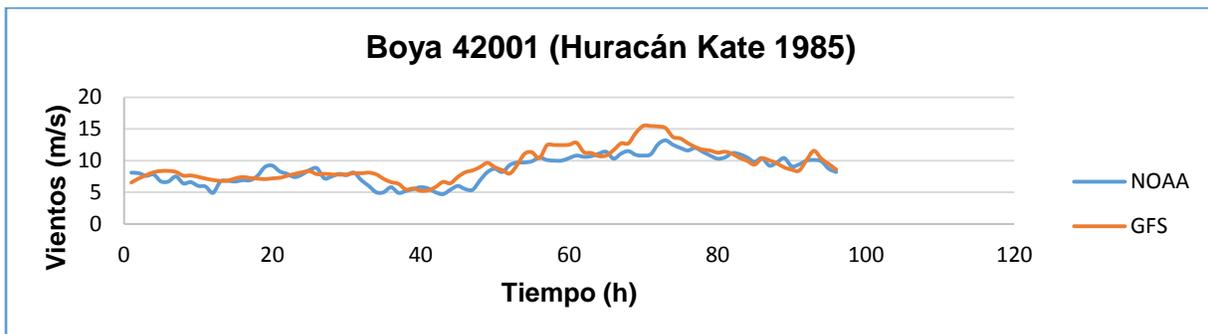


Figura 4. Comparación de los datos de la boya de la NOAA y los vientos CFS

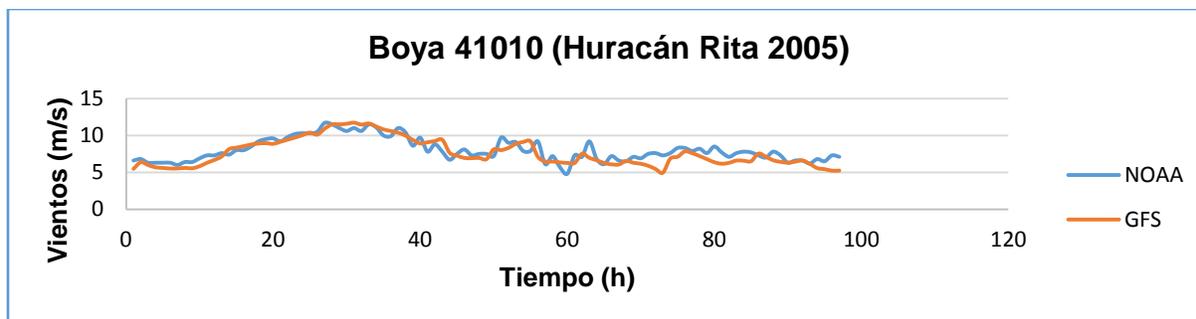


Figura 5. Comparación de los datos de la boya de la NOAA y los vientos CFS

DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS

El desarrollo de los escenarios está encaminado al análisis de las variables hidrodinámicas y de oleaje. El análisis de las variables hidrodinámicas de los distintos escenarios permite comprobar la capacidad de los modelos de reproducir fenómenos hidrodinámicos. En la tabla 5 se exponen los escenarios.

Tabla 5. Escenarios de estudio

Escenarios	Modelo	Forzadores	Análisis
1	ADCIRC	Marea.	Nivel del mar asociado a la marea
2	ADCIRC	Marea, vientos y presiones.	Surgencia
3	SWAN	Vientos, nivel del mar y corrientes.	Tensión de radiación del oleaje, altura significativa de la ola.
4	ADCIRC	Marea, vientos, presiones y tensión de radiación.	Sobre-elevación por rotura de la ola.

Escenario 1

Para este escenario el modelo empleado fue el ADCIRC con los forzadores de marea expuestos anteriormente. Los resultados obtenidos en este escenario fueron los niveles del mar asociados con la marea.

Escenario 2

Para este escenario el modelo empleado fue el ADCIRC con los forzadores de marea empleados en el escenario 1 y las componentes de vientos y presiones del modelo CFS asociados con las fechas de los huracanes Kate y Rita. Los resultados obtenidos en este escenario fueron las surgencias ocurridas en las boyas virtuales debidos al paso de los huracanes.

Escenario 3

Para este escenario el modelo empleado fue el SWAN, se utilizaron los mismos forzadores de vientos y presiones de la base de datos CFS y se introdujeron los niveles del mar y las corrientes obtenidas en el escenario anterior a través del modelo ADCIRC. En este escenario se realizó la validación de la ejecución del modelo SWAN a través de la comparación de los resultados de la simulación realizada en las boyas de la NOAA.

Los resultados obtenidos en este escenario por boya virtual son: la altura significativa de la ola (H_s), el período pico del espectro de olas (T_p) y la dirección del oleaje. También se obtuvieron las tensiones de radiación generadas por el oleaje en cada nodo. Las tensiones de

radiación serán procesadas posteriormente para servir de información de entrada en el escenario 4. Es necesario destacar que en este escenario se hace el primer acople de los modelos, donde ADCIRC le entrega los valores del nivel del mar y las corrientes al modelo SWAN.

Escenario 4

Para este escenario el modelo empleado fue el ADCIRC, se utilizaron los mismos forzadores las componentes de marea empleadas en el escenario 1, las componentes de vientos y presiones obtenidos del modelo CFS asociados a las fechas de los ciclones tropicales Kate y Rita, y las tensiones de radiación obtenidas en el escenario 3, las cuales permitirán obtener las variaciones del nivel del mar debido a la ocurrencia del fenómeno de sobre-elevación del mar por rotura de la ola.

Los resultados obtenidos en este escenario son los niveles de mar, en esta ocasión teniendo en cuenta los efectos de todos los fenómenos estudiados en los escenarios anteriores, de forma tal que se refleja de mejor manera la realidad. Es de destacar que con el desarrollo de este escenario se cierra un ciclo (figura 2), donde el modelo ADCIRC entrega al modelo SWAN los niveles del mar y las corrientes asociadas con la variación de dichos niveles (escenario 3), y el modelo SWAN entrega a ADCIRC las tensiones de radiación, las cuales tienen influencia en los niveles del mar resultantes (escenario 4).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Escenario 1

En este escenario se obtiene, de la simulación con el ADCIRC, la carrera de marea mostrada en la tabla 6. La máxima carrera de marea obtenida fue de 0,889 m, durante el huracán Rita en Isabela de Sagua y la mínima fue de 0,426 m, durante el huracán Kate en Matanzas.

Tabla 6. Carrera de marea

Boyas virtuales	Carrera de marea (m)	
	Huracán Kate	Huracán Rita
Matanzas 1	0,426	0,685
Cárdenas 1	0,487	0,792
Isabela de Sagua 1	0,641	0,889
Bahía de Nuevitas 1	0,536	0,573
Bahía de Nuevitas entrada	0,813	0,882

Escenario 2

Los resultados obtenidos en este escenario son las alturas de nivel del mar producto de las mareas, los vientos y las presiones. La sustracción de este escenario de los valores del escenario 1 dan como resultado la surgencia ocurrida en las boyas virtuales.

La surgencia máxima es de 0,7721 m en la boya de Cayo Coco (figura 6), obtenida durante la hora 14 del día 18 de noviembre de 1985, cuando ya el fenómeno meteorológico Kate tenía categoría SS-2 de huracán. Durante el huracán Rita la surgencia máxima fue de 0,25 m (figura 7) cuando el mismo presentaba SS-1, en la boya de Matanzas.

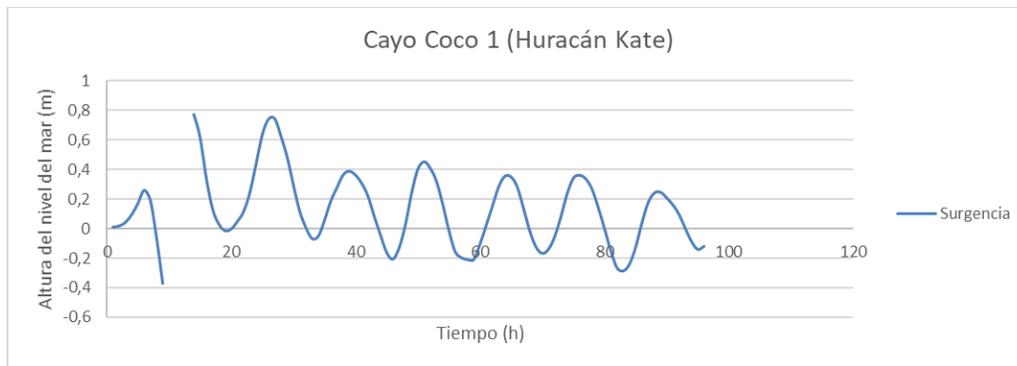


Figura 6. Surgencia durante el huracán Kate en Cayo Coco

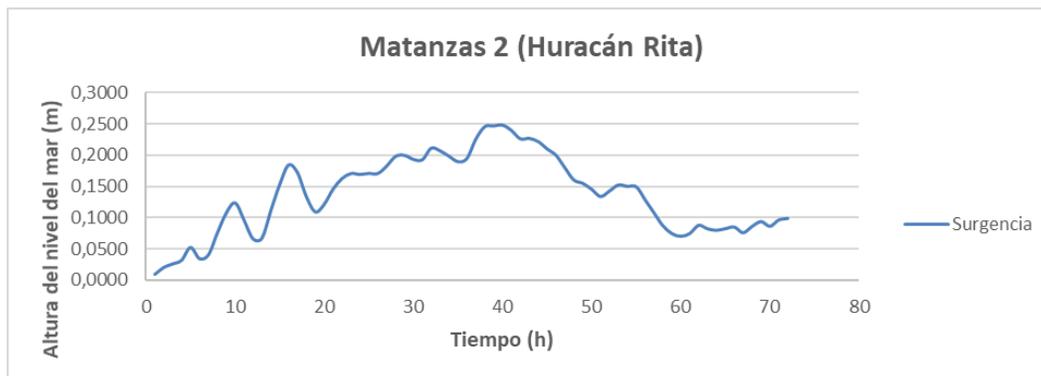


Figura 7. Surgencia durante el huracán Kate en Matanzas

Escenario 3

Para la validación del modelo SWAN en aguas profundas se realiza la comparación con las boyas de la NOAA, los parámetros comparados son la altura de ola significativa H_s y el período pico. En la figura 8 se muestra la altura de ola significativa en la boya 41010 para el huracán Rita.

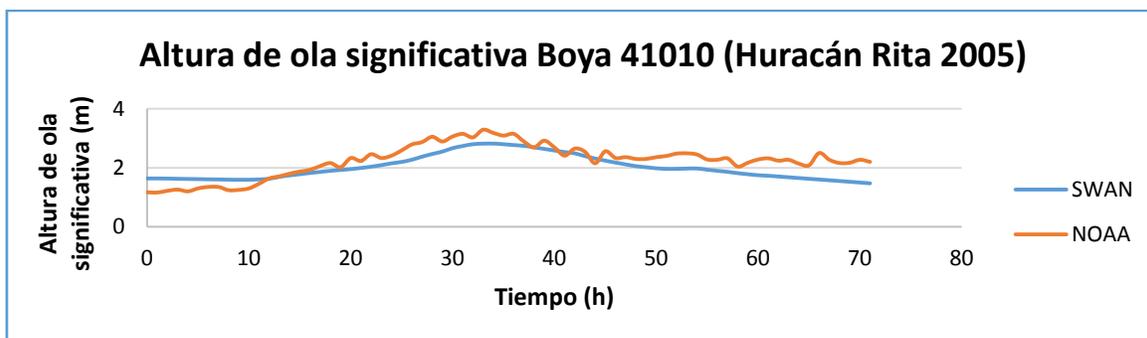


Figura 8. Comparación de la altura de ola significativa del modelo SWAN con las boyas de la NOAA

Como se puede apreciar en la figura 8 el comportamiento de la altura de ola significativa obtenido de la simulación con SWAN es semejante a las mediciones realizadas por la boya de la NOAA 41010. Las comparaciones de las variables estadísticas realizadas en este estudio para la validación fueron satisfactorias.

Los resultados obtenidos en este escenario en cada una de las boyas virtuales son las alturas de olas significativas. La mayor altura de ola significativa, obtenida en puntos con profundidades superiores a los 150 m fue en la boya virtual de Matanzas 1, con un valor de 1,9051 m durante el paso del huracán Rita.

La mayor altura de ola significativa obtenida en zonas bajas (1-3 metros de profundidad) y cercanas a la costa, durante el paso del huracán Kate, fue en Caibarién 2 (1,046 m), Cayo Santa María (1,3708 m, figura 9) e Isabela de Sagua (1,1716 m). Durante el paso del huracán Rita, el valor más alto obtenido en zonas bajas fue en Cayo Santa María con un valor de 1,2499 m.

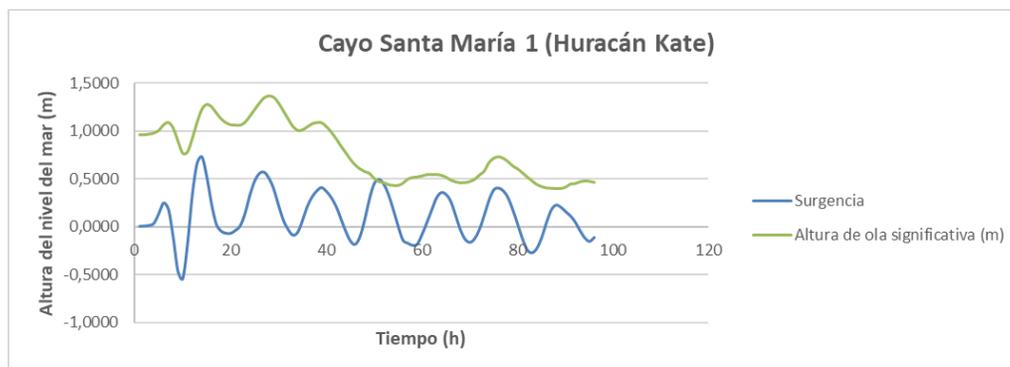


Figura 9. Altura de ola significativa en Cayo Santa María

Escenario 4

En este escenario se cierra el ciclo del acoplamiento ADCIRC-SWAN, los niveles del mar obtenidos en este escenario son ocasionados por la marea, los vientos, las presiones y las tensiones de radiación.

Como se aprecia en la figura 10, el comportamiento de los escenarios es similar, los niveles del mar del escenario 2 son mayores que los del escenario 4, lo que se debe a que la zona donde está la boya es una bahía y la misma es profunda, por lo que no ocurre la rompiente de las olas, y no hay sobre-elevación por este fenómeno, al mismo tiempo en aguas pocas profundas antes de entrar en la zona de la bahía se generan las corrientes debido a la rotura de las olas provocando una interferencia en los patrones de niveles del mar, que se traduce en una reducción de dichos niveles dentro de la bahía.

Esto no ocurre en las zonas donde los fondos son bajos y la profundidad no varía, como es el caso de los cayos, en la figura 11 se muestra la comparación de los escenarios de boyas situadas en zonas con las características explicadas anteriormente.

Como resultado de este escenario también se tiene la sobre-elevación por rotura de la ola, lo que se obtiene de la sustracción de este escenario con el escenario 2.

En este escenario se puede hacer una comparación con los parámetros determinados en los escenarios anteriores, en la figura 12 se muestra el comportamiento de la surgencia, la sobre-elevación por rotura de la ola y la altura de ola significativa y en ella se puede apreciar que, cuando ocurre la mayor surgencia, también se produce la mayor ola, no pasando lo mismo con la sobre-elevación por rotura de la ola, que en este caso el valor es mínimo.

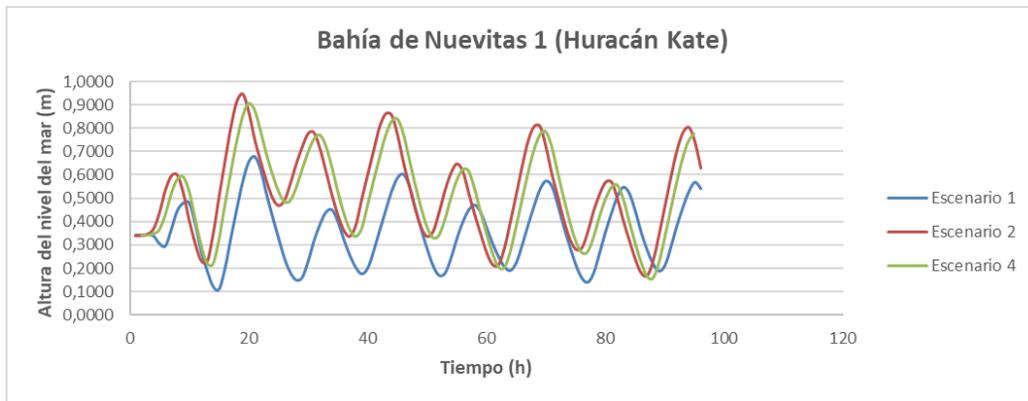


Figura 10. Comportamiento del nivel del mar en los escenarios 1, 2 y 4 en la Bahía de Nuevitas 1, durante el huracán Kate 1985

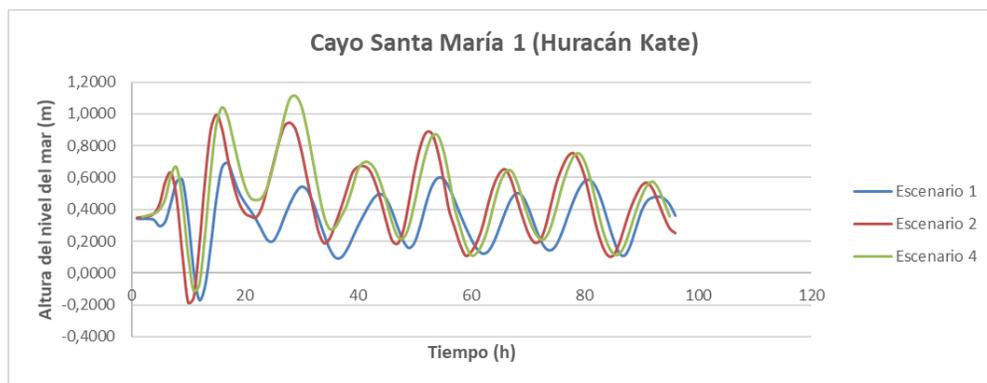


Figura 11. Comportamiento del nivel del mar en los escenarios 1, 2 y 4 en Cayo Santa María, durante el huracán Kate 1985

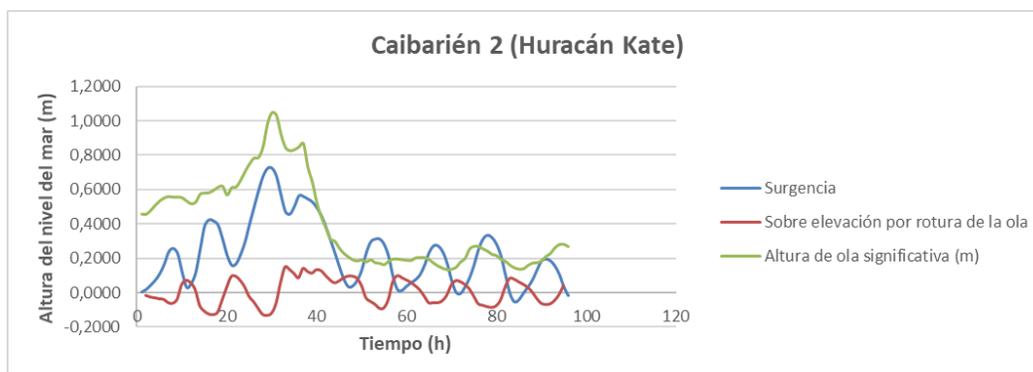


Figura 12. Comparación de la surgencia, la altura de ola significativa y la sobre-elevación del nivel del mar por rotura de la ola, en Caibarién 2, durante el huracán Kate

Con el desarrollo de este escenario se obtiene la elevación máxima del nivel del mar asociada con todos los fenómenos, denominada marea de tormenta, momento en el cual se genera el máximo peligro de inundación. A continuación se muestra la tabla 7, en la cual se presentan los valores asociados con cada fenómeno estudiado y el valor de la marea de tormenta en la zona de cayo Coco para los huracanes estudiados.

En la tabla 7 se muestran los valores máximos de cada huracán asociados con la marea de tormenta, los cuales también están asociados con la cercanía de los huracanes a este cayo. En el caso del huracán Kate, en el horario en que se produjo la máxima marea de tormenta el huracán presentaba categoría SS-2 y se encontraba muy próximo al cayo, no siendo así en el huracán Rita, que sí se encontraba cerca de la zona, pero en el momento en que se produjo el valor máximo este fenómeno meteorológico aún era una tormenta tropical.

Tabla 7. Resumen de los escenarios en la boya de cayo Coco

Boya virtual de cayo Coco		
Huracanes	Kate (1985)	Rita (2005)
Escenario 1 (marea astronómica en metro)	0,390	0,964
Escenario 2 (marea astronómica + surgencia en metro)	1,015	1,050
Surgencia (escenario 1 – escenario 2 en metro)	0,625	0,086
Sobre-elevación por rotura de la ola (escenario 4 – escenario 2 en metro)	0,230	0,079
Escenario 4 (marea de tormenta en metro)	1,315	1,129

CONCLUSIONES

- Se estableció como dominio de trabajo la región geográfica que comprende los mares interamericanos, Golfo de México y la zona Norte del océano Atlántico limitado por una frontera en forma de arco, que comienza en la coordenada (74° W; 40° N), ubicada cerca de la costa estadounidense de New York y termina en (60° W; 8,5° N) ubicada en la costa venezolana cercana a la frontera con Guyana.
- Se construyó una malla no estructurada con 130 295 nodos, adecuada a las condiciones de la zona de estudio, para el proceso de modelación de las variables hidrodinámicas.
- Se definieron 4 escenarios con las características de interés para el estudio, en los que se definieron los forzadores de la modelación y el programa a emplear en cada uno, con el fin de realizar el acoplamiento de los modelos ADCIRC-SWAN.
- Con el desarrollo del escenario 1 se analizó el comportamiento de la marea, comparándose con el predictor de marea WXTide, con el que se demostró que el comportamiento es similar, pero hay que hacer correcciones horarias. La carrera de marea máxima fue de 0,89 m en Isabela de Sagua durante el huracán Rita y la mínima fue de 0,47 en Matanzas durante el huracán Kate.
- Con el desarrollo del escenario 2 se analizó el comportamiento de la surgencia en las diferentes boyas virtuales, obteniendo un valor máximo de 0,77 m en la zona de Cayo Coco durante el paso del huracán Kate. También se realizó la validación de los vientos CFS con los datos extraídos de las boyas de la NOAA. El coeficiente de determinación máximo fue de 0,92 en la boya de la NOAA 42039 y el mínimo fue de 0,34 en la boya de la NOAA 42001, ambos coeficientes obtenidos con el huracán Rita (2005).
- Con el desarrollo del escenario 3 se validó el modelo SWAN en aguas profundas con los datos obtenidos de la boya de la NOAA.
- Con el desarrollo del escenario 4 se cierra el ciclo del acoplamiento de los modelos ADCIRC-SWAN. Aquí se hace la comparación de todos los escenarios, se evidencia que en

la bahía de Nuevitas no ocurre el fenómeno de rompiente de la ola y no hay sobre-elevación por este fenómeno. Esto no ocurre en las zonas con fondos bajos como son Cayo Santa María, Cayo Coco, Isabela de Sagua, entre otros, en que sí ocurre el fenómeno. También en el escenario 4 se evidencia que el fenómeno de rompiente de la ola ocurre desfasado con respecto a los fenómenos de surgencia y altura de ola significativa, lo cual es correcto.

REFERENCIAS

- Bladí E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cedón E., Dolz J. y Colla A.** (2012). “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol.30, no.1, pp 1-10, ISSN 0213-1315, Elsevier España, España. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004> en [septiembre del 2018](#).
- Córdova L., Salgueiro G., Lamazares R. y Díaz A.** (2014). “Sistema de ingeniería de costas: evaluación del proceso de erosión en la playa Varadero”, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XXXV, No. 1, Enero-Abril 2014, p.17-31, ISSN 1815-591X, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- González P.** (2017). “Simulación de los campos de oleaje y la surgencia en los huracanes Kate (1985) y Rita (2005) en la zona norte de Cuba”, Tesis de Diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Hagen S. C., Westerink J. J., Kolar R. L. and Horstmann O.** (2001). “Two-dimensional, unstructured mesh generation for tidal models”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 35, no. 6, pp. 669-686, ISSN 0271-2091, John Wiley & Sons, Ltd., U.S.A. Extraído de: https://www3.nd.edu/~coast/reports_papers/2001-IJNMF-HWKH.pdf en [septiembre 2018](#).
- Holthuijsen L. H., Booji N., Haagsma J. G., Kieftenburg A. T. M. M., Ris R. C., van der Westhuysen A. J. and Zijlema M.** (2004). “SWAN Cycle III version 40.41 user’s manual”, Delft University of Technology Press, Delft, The Netherlands.
- LeProvost C., Lyard F., Molines J. M., Genco M. L., and Rabilloud F.** (1998). “A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. C3, pages 5513-5529, ISSN 2169-9291, American Geophysical Union, USA.
- Ramos L. E.** (2009). “Huracanes desastres naturales en Cuba”, Editorial Académica, ISBN 978-959-270-161-8, La Habana.
- Roalvink D., Dongeren A., McCall R., Hoonhout B., Rooijen A., Geer P., Vet L. Nederhoff K. and Quataert E.** (2015). “XBeach technical reference: Kingday Realcase”, Deltares, UNESCO-IHE and Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Saha S.** (2010). “Climate forecast system”, National Center Environmental Prediction, NOAA, USA. Extraído de: www.cfs.ncep.noaa.gov/climate-forecast-system en [abril de 2017](#).
- SWASH** (2018). “SWASH user manual version 5.01”, The SWASH team, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. Extraído de: www.tudelft.nl/swash en [septiembre de 2018](#).
- Westerink J. J., Blain C. A., Luetlich R. A. Jr. and Scheffner N. W.** (1994). “ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries”. Report 2. user's manual for ADCIRC-2DDI, Technical Rep. No. DRP-92-6. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.