

Simulación de la surgencia en la bahía de Cienfuegos, Cuba

Dr C. Alain Muñoz Caravaca,
Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, CEAC
email: alain@gestion.ceac.cu

Lic. María Carla Marín Machín
Instituto de Meteorología de Cuba, INSMET
email: mcarlam1991@gmail.com

MSc. Lester Caravaca Colina
Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, CEAC
email: lester@gestion.ceac.cu

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es comprender el efecto generador de surgencia que tienen los huracanes sobre la bahía de Cienfuegos a partir de la modelación numérica. Se utiliza el modelo ADCIRC, que es forzado por 13 componentes de marea en la frontera externa y un campo de viento generado por un modelo paramétrico. Fueron simulados tres casos de estudio: el huracán Lili 1996, el Michelle 2001 y el Dennis 2005. La sobreelevación del nivel del mar por surgencia y marea varía entre 0,80 y 1,80 m y se corresponde con las escasas observaciones que se tienen en el sitio. La trayectoria e intensidad de los huracanes son factores determinantes de la surgencia en la bahía de Cienfuegos, ambos son proporcionales al valor de la sobreelevación.

Palabras clave: ADCIRC, bahía de Cienfuegos, ciclones tropicales, surgencia.

Storm surge modeling in Cienfuegos bay in Cuba

ABSTRACT

The purpose of the present work is to understand the effect of hurricanes in generating a storm surge over Cienfuegos bay using numerical modeling. The numerical code ADCIRC is used which is forced by 13 tidal components at the open boundary and a wind field generated by a parametric model. Three case studies were simulated: hurricane Lili 1996, hurricane Michelle 2001 and hurricane Dennis 2005. The simulated surge and sea level rise fields vary between 0,80 and 1,80 m and are in agreement with the few observations that have been made at the site. The trajectory and intensity of the hurricanes are determining factors in the characteristics of the surge in Cienfuegosbay. Both factors are proportional to the value of the water elevation in the bay.

Keywords: ADCIRC, Cienfuegos bay, tropical storm, surge.

INTRODUCCIÓN

La surgencia constituye, de entre todos los peligros relacionados con un ciclón tropical, la que mayor amenaza presenta para la vida de la población y los ecosistemas costeros.

Este incremento del nivel de las aguas es generado por la convergencia de los fuertes vientos y el efecto de barómetro invertido, ocasionado por el gradiente de la presión atmosférica. Los canales formados por la batimetría local y las reflexiones de las costas también contribuyen a una amplificación sustancial de la amplitud de la surgencia.

Cuba, al ser una isla, es sumamente vulnerable a eventos que impliquen una sobreelevación del nivel del mar, siendo uno de los más peligrosos los ciclones tropicales. Estudios precedentes han permitido zonificar a nivel nacional el grado de peligrosidad que implica la afectación de estos organismos y su efecto generador de surgencia.

Estas investigaciones emplearon el modelo MONSAC3, para el cálculo de la surgencia provocada por los huracanes en las costas cubanas. Sin embargo el modelo MONSAC3 utiliza una resolución espacial de 5 km, con la cual no puede simularse apropiadamente la surgencia que ocurre en la detallada geomorfología costera de la isla con presencia de pequeñas bahías, deltas de ríos entre otros ejemplos (Mitrani et al. 2000).

En tal situación clasifican las bahías de Santiago de Cuba, La Habana y Cienfuegos, conectadas al mar por estrechos canales de entrada, que no superan los 500 m de ancho. Comprender el efecto generador de surgencia de los huracanes, a su paso sobre la bahía de Cienfuegos y a partir de la modelación numérica, es el objetivo establecido en esta investigación.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Cienfuegos se encuentra ubicada en los 22°09' Latitud Norte y 80°27' Longitud Oeste en la costa sur de Cuba. La bahía posee un área de 88,46 km², su forma es ovalada y está orientada de noroeste (NW) a sureste (SE), figura 1.

Posee 19 km de longitud máxima y 7,5 km en su parte más ancha, con una profundidad promedio de 9,5 m.

De forma natural está dividida en dos lóbulos delimitados por el bajo “Las Cuevas” que tiene una profundidad promedio de 1,5 m y ejerce gran influencia en la circulación de las masas de agua dentro de la bahía.

La bahía se conecta al mar Caribe por un estrecho y sinuoso canal de acceso con una longitud de 3600 m y profundidades entre 30 y 50 m, que limita el intercambio de las aguas con el mar y la propagación del oleaje dentro de la bahía en condiciones climatológicas normales y extremas (Muñoz et al. 2012).



Figura 1. Mapa de ubicación de la Bahía de Cienfuegos y puntos de observación

MODELO NUMÉRICO

Para el cálculo de la surgencia se utilizó el modelo hidrodinámico ADCIRC–2DDI, el cual resuelve las ecuaciones verticalmente integradas para la elevación de la superficie del mar.

Estas ecuaciones están basadas en la ecuación de presión hidrostática y las aproximaciones de Boussinesq (Luettich and Westerink 2003). Fueron desarrollados tres casos de estudio: el huracán Lili (octubre 1996), el huracán Michelle (octubre 2001) y el huracán Dennis (julio 2005), a partir de los cuales se obtienen los campos de vientos asociados con estos que constituyen forzantes del modelo para el cálculo de la sobreelevación por surgencia en la bahía de Cienfuegos.

DOMINIO COMPUTACIONAL

Para la construcción del dominio computacional se digitalizó la carta náutica del puerto de Cienfuegos, escala 1:50000. El rango de profundidad de la batimetría es de 1 a 48 m en el interior de la bahía y hasta 1000 m en el exterior de la misma.

El dominio computacional resultante es una malla de cómputo no estructurada que considera todos los accidentes geográficos de la bahía de Cienfuegos y el litoral adyacente, incluye las islas interiores, el canal y una frontera oceánica de tipo circular, figura 2. La rejilla posee un paso que oscila entre 50 – 5000 m, contando con 7913 elementos y 4647 nodos y el paso temporal utilizado fue de 4 s.

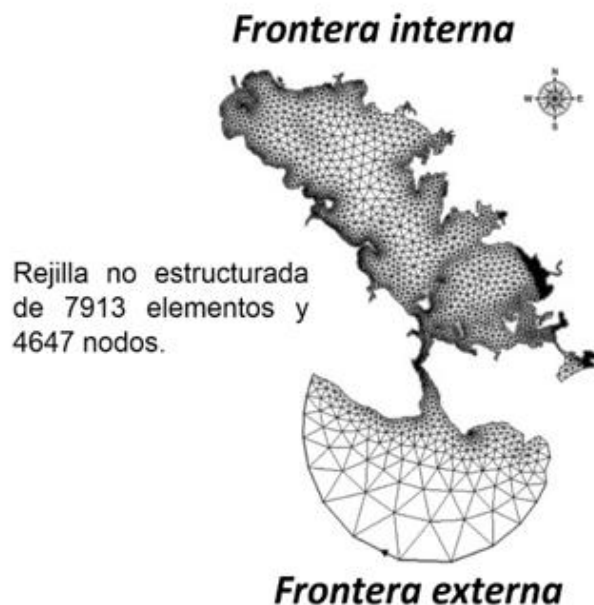


Figura 2. Dominio computacional utilizado

FORZANTES Y CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Marea: El modelo fue forzado con una señal de marea en la frontera oceánica externa. La marea en la bahía de Cienfuegos tiene un carácter semidiurno e irregular, con amplitud media de 0,27 m (Muñoz et al. 2012).

La señal de marea se construyó con los 13 componentes (2N2, K1, K2, L2, M2, MU2, N2, NU2, O1, P1, Q1, S2, T2), que conforman la base de datos LeProvost (Mukai et al. 2002). La simulación de la marea se realizó para el período de un año, tomando como referencia el año 2014, comparándose con datos medidos en la estación mareográfica de Cayo Loco, en el interior de la bahía, en el mismo período.

Para ello se utilizaron los estadígrafos Coeficiente de Correlación (R), Error Cuadrático Medio Estándar (RMSE), la Desviación de la Señal (BIAS) y el Índice de Acuerdo (IOA), (Willmott and Matsuura 2006).

Una vez calibrado el modelo de manera independiente, se determinó la marea correspondiente al paso de cada huracán. La elevación total de la superficie del mar se calculó por la suma de los valores de la marea astronómica y la surgencia simulada para cada tormenta.

Campo de vientos de tormentas: Para las estimaciones de la velocidad del viento y presión en los ciclones tropicales se utiliza el modelo de Holland y sus posteriores refinamientos (Martino et al. 2001) y Holland (2007) aporta las expresiones del campo de viento y presión a partir del radio de los vientos máximos R_{mw} y la presión en el ojo P_c según la ecuación (1).

$$P(r) = P_c + e^{-\left(\frac{R_{mw}}{r}\right)^B} (P_n - P_c) \quad (1)$$

donde: r es la distancia radial medida desde el ojo del huracán,
 $P(r)$ es la presión a la distancia r ,
 $P(n)$ es la presión atmosférica tomada como referencia y
 B es un parámetro que debe ser estimado empíricamente.

Los modelos paramétricos de viento asumen un patrón circular del flujo del viento y no detallan adecuadamente las direcciones reales del viento superficial, las cuales debido a la fricción en superficie se orientan hacia el centro de la tormenta (Martino et al. 2001); (Sobey et al. 1977). Es por eso que se utilizó la formulación descrita en la ecuación (2).

$$\left. \begin{aligned} \beta(r) &= 10^\circ \frac{r}{R_{mw}} && \text{para } 0 < r < R_{mw} \\ \beta(r) &= 10^\circ + 75^\circ \left(\frac{r}{R_{mw}} - 1 \right) && \text{para } R_{mw} < r < 1,2R_{mw} \\ \beta(r) &= 25^\circ && \text{para } r > R_{mw} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

donde: β es la dirección de los vientos, r es la distancia.

Mediante la comparación de estas fórmulas con datos in situ se ha llegado a la conclusión de que estos modelos paramétricos dan una representación adecuada del campo de viento y presión (Martino et al. 2001). Empleando los criterios de Córdova y Lamazares (2012), fueron ajustados los parámetros a las condiciones de cada huracán, interpolando los valores de los campos de viento y presión para todos los nodos de la rejilla.

Estos modelos no tienen en cuenta el viento que actúa fuera del huracán, por lo cual se necesita la realización de posteriores refinamientos como son la inclusión de los factores que contribuyen a la asimetría del organismo. En esta investigación se utiliza un único radio de vientos igual a 900 m.

HURACANES SIMULADOS

Las simulaciones se centran en tres casos de estudio específicos: el huracán Lili (octubre 1996), el huracán Michelle (octubre 2001) y el huracán Dennis (julio 2005). El huracán Lili se forma el 14 de octubre de 1996 e impacta Cuba 4 días después, por la región central, en la provincia de Matanzas.

Durante su paso azota con mayor intensidad la provincia de Cienfuegos, provocando cuantiosas pérdidas para la economía y el medio ambiente. En la tarde del 4 de noviembre del 2001 el huracán Michelle impacta Cuba, entrando por un punto al sur de la Ciénaga de Zapata, con vientos máximos de 210 km/h. Fue un huracán extenso con un ojo de 40 km de diámetro, por lo que en toda su trayectoria la zona de calma y vientos máximos sostenidos se extendía aproximadamente a 20 km a ambos lados de la misma.

En Cienfuegos, este huracán impuso vientos del suroeste (SW) con rachas superiores a 100 km/h, los cuales afectaron toda el área del malecón cienfueguero, el cual fue destruido en casi su

totalidad. También se reportaron inundaciones en las zonas de Reina, San Lázaro, Punta Cotica y Punta Gorda, mientras que en la bahía de Cienfuegos el nivel medio del mar aumentó en 1,5 m.

Por su parte el huracán Dennis, tocó tierra cubana en la tarde del 9 de julio del 2005, por el oeste de la bahía de Cienfuegos, con vientos máximos sostenidos de 220 km/h, extendiéndose los vientos huracanados en promedio hasta unos 40 kilómetros a la derecha de la trayectoria afectando Cumanayagua, Cienfuegos, Abreus, Aguada de Pasajeros, el sur de Rodas y de Palmira.

En el resto de la provincia, se mantuvieron con fuerza de tormenta tropical. El ojo era circular y tenía 18 kilómetros de diámetro, según estimaciones del radar de Pico de San Juan. A diferencia de Lili 1996 y Michelle 2001, Dennis llega a la región central de Cuba recorriendo la costa suroriental con una velocidad de traslación de 21 km/h y con dirección noroeste (NW) cruza las provincias de Cienfuegos, Matanzas y La Habana.

Los datos de velocidad del viento y presión a lo largo de la trayectoria de cada huracán fueron extraídos de la Lista de Trayectorias de Tormentas Tropicales del Atlántico Norte (1851 - 2006), mientras que la simulación de la surgencia con el ADCIRC se realiza durante el período de tránsito del huracán por la provincia de Cienfuegos (Rosengaus et al. 2014).

Se establecieron puntos de observación en el interior de la bahía. La selección de estos puntos se basa en el conocimiento del nivel de afectación de un huracán en zonas costeras de significativa importancia para la economía, la sociedad y el medio ambiente, figura 1.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA CADA CASO DE ESTUDIO

La comparación de la señal de marea simulada y medida alcanza un coeficiente de correlación $R = 0,792$; Error Cuadrático Medio Estándar $RMSE = 6,861$; $BIAS = -2,546$ y un Índice de Acuerdo $IOA = 0,858$, ver figura 3. Puede observarse que existe un ligero retardo de la señal que entra en la bahía y la que se registra en Cayo Loco, así como una disminución de la amplitud, que toma valor medio de 0,250 m. Estos resultados son comparables con reportes previos obtenidos por Muñoz et al. (2012).

Huracán Lili

La altura máxima del agua en los puntos de observación seleccionados es de 0,80 m en Punta Cotica, seguida de Junco Sur y Base Submarinos con valores de 0,70 y 0,78 m respectivamente, figura 4.

Obsérvese que, cuando el huracán se acerca a la bahía, la altura del mar se incrementa hasta alcanzar el máximo y luego decae en la medida que se aleja. Durante la aproximación, los vientos soplan en dirección noroeste y provocan surgencia únicamente en el lóbulo norte de la bahía, líneas que en la figura se corresponden con los puntos de observación: Canal de entrada, Punta Cotica y Reina. Cuando el huracán sobrepasa la bahía, los vientos soplan en sentido inverso y la altura máxima del agua se observa en el lóbulo sur, puntos de observación que corresponden a Junco Sur y la antigua Base de Submarinos.

En este segundo momento del paso del huracán la altura de la columna de agua disminuye en el lóbulo norte, alcanzando un mínimo de 0,380 m en Punta Cotica. En la medida que se aleja el huracán la altura de las aguas tiende al nivel medio. Este fenómeno si bien tiene escasa importancia para la protección civil, puede tener un valor significativo para la ecología de este ecosistema, pues algunas áreas poco profundas de la bahía pueden quedar expuestas modificando su normal funcionamiento.

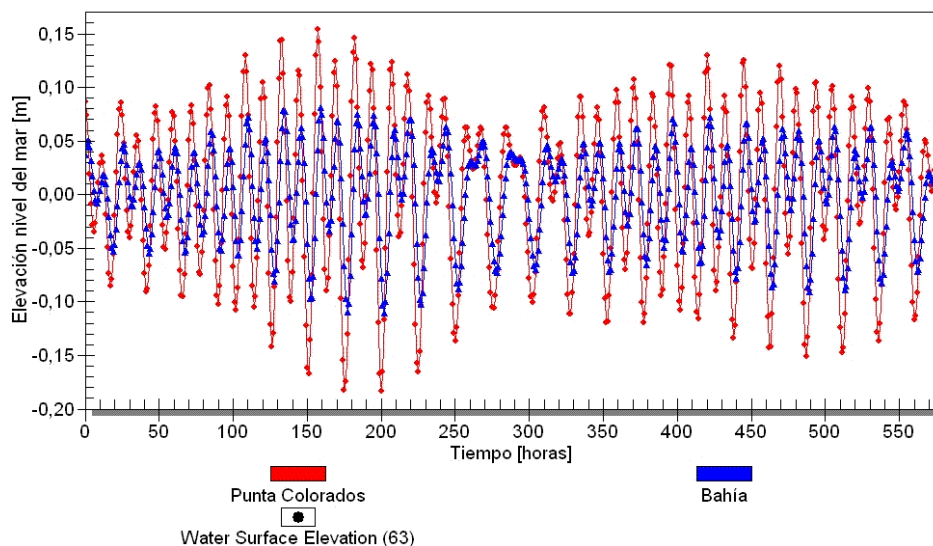


Figura 3. Comportamiento de la señal que entra en la bahía y aquella que se registra en Cayo Loco

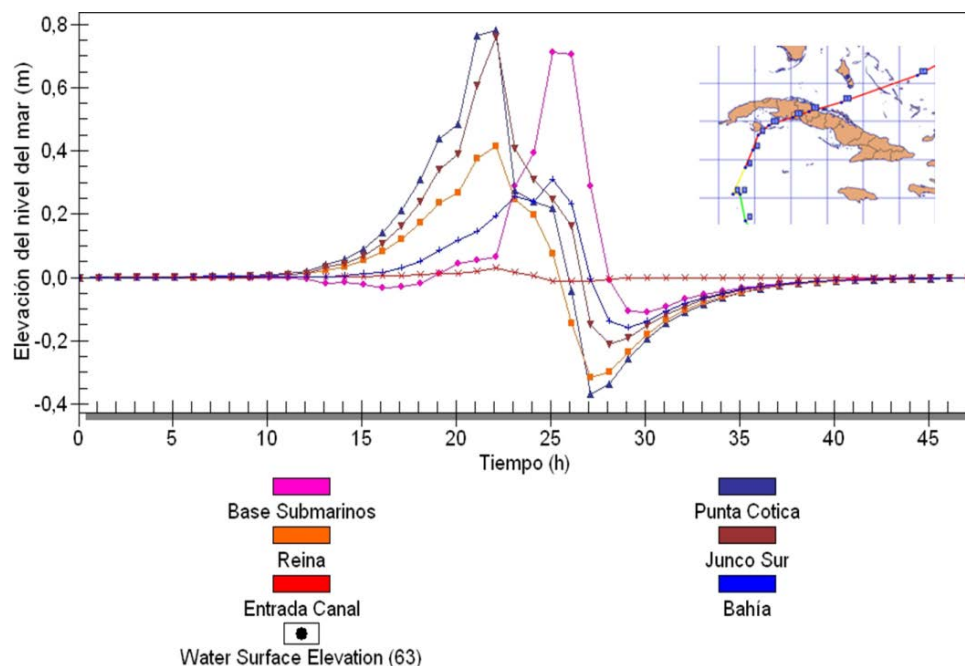


Figura 4. Variación de la altura máxima del agua en los puntos de observación al paso del huracán Lili, 18 Oct. 1996

Huracán Michelle

Los valores máximos de la altura del agua se encuentran en la zona noroccidental, siendo el mayor en Punta Cotica con 1,80 m, seguido de Junco Sur, Reina, Base Submarinos y el interior de la bahía, con valores de 1,53; 1,50; 1,35 y 0,80 m respectivamente, figura 5.

Estos resultados son comparables con las observaciones registradas por el servicio meteorológico nacional. También se observa un comportamiento similar al huracán Lili, en el incremento y posterior decrecimiento de la altura de la columna de agua.

Sin embargo, al ser este huracán de mayor categoría puede observarse que en el lóbulo sur se alcanza un mínimo de 0,50 m al mismo tiempo que en el norte se alcanza 1,53 m. Además se observa un segundo pico que se corresponde con el giro de los vientos en sentido contrario, pero que a diferencia de Lili, afecta por igual a toda la bahía.

Huracán Dennis

Dada su trayectoria, Dennis provoca una disminución del nivel de las aguas y luego un incremento. Sus vientos empujaron las aguas desde el noroeste alcanzando, de acuerdo con el modelo, niveles mínimos cercanos a 1,0 m, figura 6.

Como en los casos anteriores, al sobrepasar la bahía, los vientos giran y empujan las aguas en sentido contrario, alcanzándose los máximos valores de la altura del agua en Punta Cotica y Junco Sur con valores de 1,5 y 1,2 m respectivamente, seguidos de Reina y Base Submarinos con valores inferiores a 1,0 m.

Los resultados alcanzados muestran que la amplitud de la surgencia tiene una marcada relación con la categoría y la trayectoria del huracán a su paso por la bahía de Cienfuegos. Mientras mayor categoría posea el huracán mayor será la surgencia, la que estará modulada por la trayectoria del fenómeno, tabla 1.

En la medida en que el huracán se acerca su trayectoria a la bahía, mayor será la incidencia del centro de baja presión y la fuerza de los vientos. La posición del ojo del huracán, respecto a la bahía, indicará en qué lóbulo de la bahía se observa primero la surgencia.

Si la trayectoria del huracán es del Oeste al Este, como es el caso de los huracanes Lili 1996 y Michelle 2001, se observará un aumento del nivel del mar primero en el lóbulo norte de la bahía y una vez que supera la latitud de la bahía se observará en el lóbulo sur. Si la trayectoria es al Este de la bahía, ocurrirá primero en el sur y luego en el norte.

Varios autores señalan a la velocidad de desplazamiento del huracán y el nivel inicial de la marea, como factores determinantes de la surgencia (Resio and Westerink 2008); (Shenet al. 2009).

Dado las pequeñas dimensiones de la bahía de Cienfuegos en relación con el tamaño de los huracanes estudiados y la velocidad de traslación de estos, se considera que estos factores influyen en menor medida en la sobre elevación del nivel del agua. Se hace notar que las características geométricas de la bahía de Cienfuegos, alargada y estrecha, con un área

relativamente pequeña en relación con el tamaño de los huracanes estudiados en esta investigación, implica que el efecto de este fenómeno sobre la misma se manifieste al mismo tiempo sobre todo su espacio geográfico.

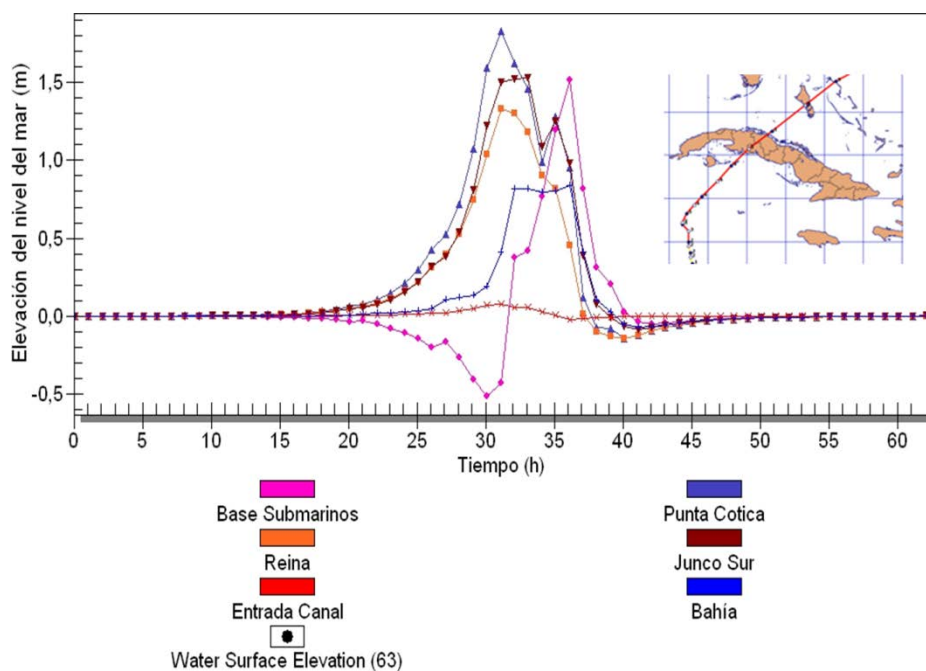


Figura 5. Variación de la altura máxima del agua en los puntos de observación al paso del huracán Michelle, 4 nov. 2001

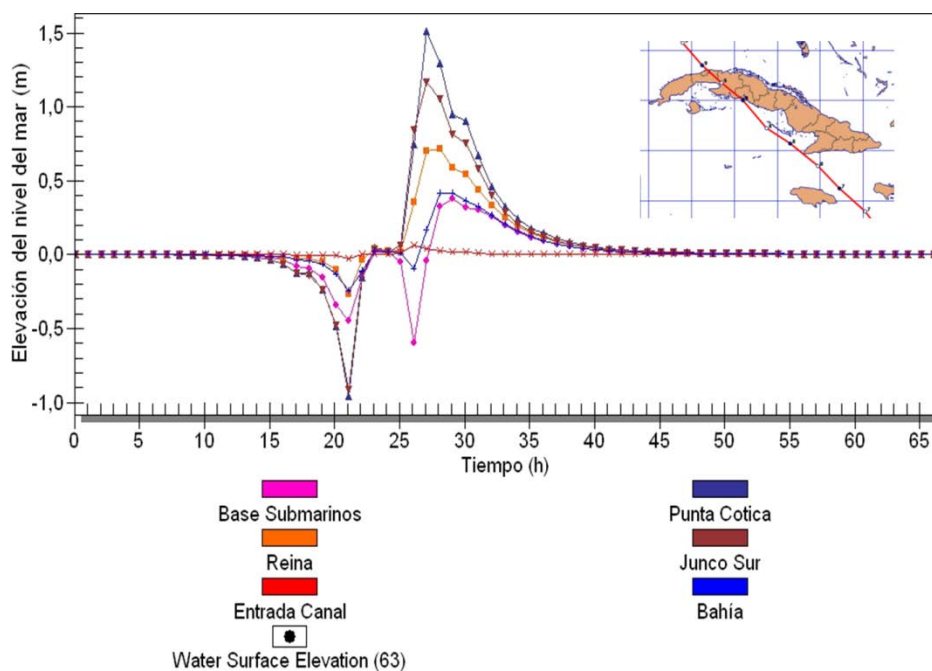


Figura 6. Variación de la altura máxima del agua en los puntos de observación al paso del huracán Dennis, julio 2005

Cuando la velocidad de desplazamiento del huracán es grande, se limita el tiempo en que los vientos actúan sobre la superficie del mar y en consecuencia la magnitud de la sobre-elevación. Sin embargo, que el paso del huracán sea lento no implica directamente una magnitud mayor de la surgencia. La sobre-elevación en la bahía tiene límites determinados por las dimensiones geométricas de la misma, incluida su profundidad.

Tabla 1. Resumen de los resultados alcanzados en la simulación de la surgencia en la bahía de Cienfuegos

Huracán	Categoría Saphir Simpson	Surgencia máxima (m)	Rango (m)	Elevación total (m)
Lili, 1996	II	0,80	0,70 – 0,80	1,10
Michelle, 2001	III	1,80	0,80 – 1,80	2,16
Dennis, 2005	IV	1,50	1,00 – 1,50	1,87

CONCLUSIONES

- La aplicación del modelo ADCIRC para áreas costeras de complejas características geométricas resulta muy útil. Los campos de elevación del nivel del mar por surgencia y marea simulados en este estudio varían entre 0,80 y 1,80 m y se corresponden con las escasas observaciones que se tienen en el sitio. La trayectoria e intensidad de los huracanes son factores determinantes en las características de la surgencia en la bahía de Cienfuegos. Ambos factores son proporcionales al valor de la sobre-elevación de las aguas en la bahía.
- Posteriores investigaciones deben realizarse para refinar los resultados aquí obtenidos, atendiendo de manera especial el acoplamiento de los modelos para oleaje y surgencia, así como la inclusión de los aportes fluviales a la lista de forzantes del modelo.

REFERENCIAS

- Córdova L. y Lamazares R.** (2012). “Simulación de los campos de viento y oleaje asociados a huracanes”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. vol. 33, no.2, pp.50-65. ISSN 1815-591X. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Holland G.** (2007). “Revised hurricane pressure-wind model”. Monthly Weather Review, vol. 136, pp. 3432-3445, ISSN 0027-0644. American Meteorological Society, USA.
- Luetlich R. and Westerink J.** (2003). “Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model. Version 44.XX”, University of North Carolina, NC, USA, extraído de: http://www.adcirm.org/adcir_theory_2004_12_08.pdf en enero 2014.

- Martino C. D., Cheung K. F., Phadke A. C. and Houston S. H.** (2001). "Simulation of hurricane waves with parametric wind fields", in Proceedings of the MTS/IEEE Conference and Exhibition for Ocean Engineering, Science and Technology (OCEANS'01) vol.2, pp. 1323–1330, Honolulu, Hawaii, USA.
- Mitrani I., Pérez R., García O., Salas I., Juantorena J., Ballester M., Beauballet P., Pérez A. y Rodríguez C.** (2000). "Las zonas más expuestas a las inundaciones costeras en el territorio cubano y su sensibilidad al posterior incremento del nivel medio del mar por cambio climático". Revista Cubana de Meteorología, vol.7, no.1, p.45, ISSN 0864-151X. Instituto de Meteorología de Cuba. Habana, Cuba.
- Mukai Y. A., Westerink J. J., Luettich A. R. J. and Mark D.** (2002). "East coast 2001. A tidal constituent database for Western North Atlantic, Gulf of Mexico, and Caribbean Sea". Coastal and Hydraulics Laboratory Technical Report. ERDC/CHL TR-02-24, U.S. Army Corps of Engineers Research Development Center, Vicksburg, MS, USA.
- Muñoz A., García A., Herrera R., Douilblet P., Díaz O., Fichez R. and Alcántara J.** (2012). "The flushing time of Cienfuegos bay, Cuba". Natural Resource Modeling, vol.25, pp.434-455, ISSN: 1939-7445. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.
- Resio D. and Westerink J.** (2008). "Modeling the physics of storm surge". Physics Today, vol. 61, no. 9, pp. 33-38. ISSN 0031-9228. MD, USA.
- Rosengaus M., Jiménez M. y Vázquez M.T.** (2014). "Atlas climatológico de ciclones tropicales en México". Centro Nacional de Prevención de Desastres. ISBN: 970-628-633-0, DF, México.
- Shen J., Wang H., Sisson M. and Gong W.** (2009). "A numerical model study of barotropic subtidal water exchange between estuary and subestuaries (tributaries) in the Chesapeake Bay during northeastern events". Ocean Modeling, vol.26, pp.170–189, ISSN:1463-5003. Elsevier Ed. Amsterdam, The Netherlands.
- Sobey R. J., Harper B. A. and Stark K. P.** (1977). "Numerical simulation of tropical cyclone storm surge", Department of Civil and Systems Engineering, Research Bulletin No. CS14, James Cook University, May, pp. 300. Townsville, Qld, Australia.
- Willmott C. and Matsuura K.** (2006). "On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators". International Journal of Geographical Information Science, vol. 20, pp. 89-102. ISSN: 1365-8816, Taylor & Francis Ed., London, UK.