

Calibración y validación de un modelo matemático para la simulación de los cambios morfológicos durante eventos extremos en una playa del Caribe

• Kenia Hernández-Valdés* •
Inversiones Gamma S.A., Cuba

*Autor de correspondencia

• Luis F. Córdova-López •
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Cuba

Resumen

Hernández-Valdés, K., & Córdova-López, L. F. (mayo-junio, 2016). Calibración y validación de un modelo matemático para la simulación de los cambios morfológicos durante eventos extremos en una playa del Caribe. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(3), 135-153.

Recientemente ha sido desarrollado el modelo numérico *Xbeach*, capaz de simular cambios morfológicos y procesos que ocurren cercanos a la costa, como rotura del oleaje, incluyendo erosión de la duna, rebase y apertura de brechas, desarrollado para playas abiertas, playas con dunas y playas barrera en condiciones de alta energía. El modelo resuelve las ecuaciones de propagación del oleaje, flujo, transporte del sedimento y cambios del fondo, por la variación (espectral) del oleaje y condiciones límites de flujo en 2DH. En este trabajo se presenta la calibración y validación del modelo *Xbeach* para el caso de la playa de Varadero, Cuba, simulando los cambios morfológicos ocurridos durante el paso del huracán *Michelle* en octubre-noviembre de 2001.

Palabras clave: morfodinámica de playas, calibración, modelación matemática, erosión.

Abstract

Hernández-Valdés, K., & Córdova-López, L. F. (May-June, 2016). *Calibration and Validation of a Mathematical Model for the Simulation of the Morphological Changes during Extreme Events in a Caribbean Beach*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(3), 135-153.

Recently the numerical model *Xbeach* has been developed, able to simulate the morphological changes and the nearshore processes such as wave breaking, including dune erosion, overwashing and breaching, developed for open beaches, beaches with dunes and beaches barrier under conditions of high energy. The model solves coupled 2DH equations for wave propagation, flow, sediment transport and bottom changes, for varying (spectral) wave and flow boundary conditions. In this work it is presented the calibration and validation of *Xbeach* model for the case of the Varadero beach, Cuba, simulating the morphological changes happened during the hurricane *Michelle* in October - November of the 2001.

Keywords: Morphodynamic of beaches, calibration, mathematical modelation, erosion.

Recibido: 06/11/2014
Aceptado: 11/11/2015

Introducción

Los ambientes sedimentarios costeros están sujetos a una gran variabilidad en su morfología y características sedimentarias, pues responden de manera sensible a las fuerzas actuantes. Una de las formas más evidentes de los cambios que sufren las costas es la variación de su perfil bajo la acción de las olas. El mecanismo básico de

este proceso de cambio es el levantamiento de los granos de arena del fondo por la velocidad de corte del flujo oscilatorio que acompaña al paso de la ola y la turbulencia generada por la rotura del oleaje. Una vez que los granos de arena están en suspensión, son susceptibles de ser transportados por las corrientes litorales tanto en sentido longitudinal como transversal a la costa. En condiciones de tormenta, grandes volúmenes

de arena pueden ser retirados de la playa y en consecuencia, aumenta la vulnerabilidad a sufrir daños.

Lo antes mencionado se complica aún más si se enmarca bajo el contexto del actual cambio climático global, en el cual numerosos factores asociados con el calentamiento atmosférico y al ascenso del nivel medio del mar han dado lugar a un aumento de la incidencia e intensidad de las tormentas que afectan el área geográfica, así como a la generalización de los problemas erosivos (Cabrera *et al.*, 2011). Esto conduce a la necesidad de evaluar con antelación y pronosticar de manera correcta cuál será la respuesta morfológica de las playas ante eventos extremos.

La aplicación y calibración del modelo matemático *Xbeach* ha hecho posible evaluar el comportamiento morfodinámico de playas con las características de la zona del mar Caribe ante eventos meteorológicos extremos. El desarrollo del sector Oasis, ubicado en la playa de Varadero, principal polo turístico de Cuba, lo convierte en un excelente caso de estudio para llevar a cabo esta investigación.

Caracterización de la playa

La playa de Varadero está situada en la región occidental de Cuba, a una distancia de 130 km al este de La Habana, y se extiende con una longitud aproximada de 22 km a lo largo de la

costa norte de la península de Hicacos, provincia de Matanzas. Con una proyección general de 70 grados de azimuth y un ancho máximo de 500 m, esta península constituye una barrera natural que separa los bajos fondos de la Bahía de Cárdenas de las aguas del estrecho de La Florida (figura 1).

El litoral de la península se describe como una superficie baja y débilmente colinosa, con alturas que no sobrepasan los 20 m. La costa norte es principalmente acumulativa, con extensas playas arenosas separadas por macizos de rocas calizas, donde la acción erosiva del mar ha tallado nichos y el micro relieve de Diente de Perro se destaca como manifestación de las formaciones costeras contemporáneas del Holoceno.

En el caso de la playa, predominan los sedimentos arenosos, con una granulometría que varía desde fina hasta muy gruesa, presentando la muestra tipo a lo largo de la península un valor de diámetro medio de 0.26 mm. Estos sedimentos son esencialmente de origen biogénico carbonatado y están constituidos en más de 99% por restos de organismos marinos, como algas calcáreas, moluscos, foraminíferos y bioclastos, mientras que los restos correspondientes a otros grupos, donde se encuentran además los restos inorgánicos, sólo representan 0.87% del total de la muestra, como se refleja en la figura 2.

Descripción del huracán *Michelle* (del 29 de octubre al 6 de noviembre de 2001)

En la figura 3 se presenta un segmento de la trayectoria de *Michelle* a su paso sobre el archipiélago cubano, dado por el Instituto de Meteorología de Cuba. Su entrada en la isla ocurrió aproximadamente a las seis de la tarde del día 4 de noviembre de 2001, por el sudeste de la provincia de Matanzas, al atravesar la Bahía de Cochinos, entre Playa Larga y Playa Girón, con vientos máximos de 210 km/h. Salió al mar alrededor de la una de la mañana del día 5, con vientos máximos sostenidos de 150 km/h por Cayo Isidoro, municipio Encrucijada, Villa Clara, al este de la península de Hicacos. La



Figura 1. Ubicación geográfica de la playa de Varadero.

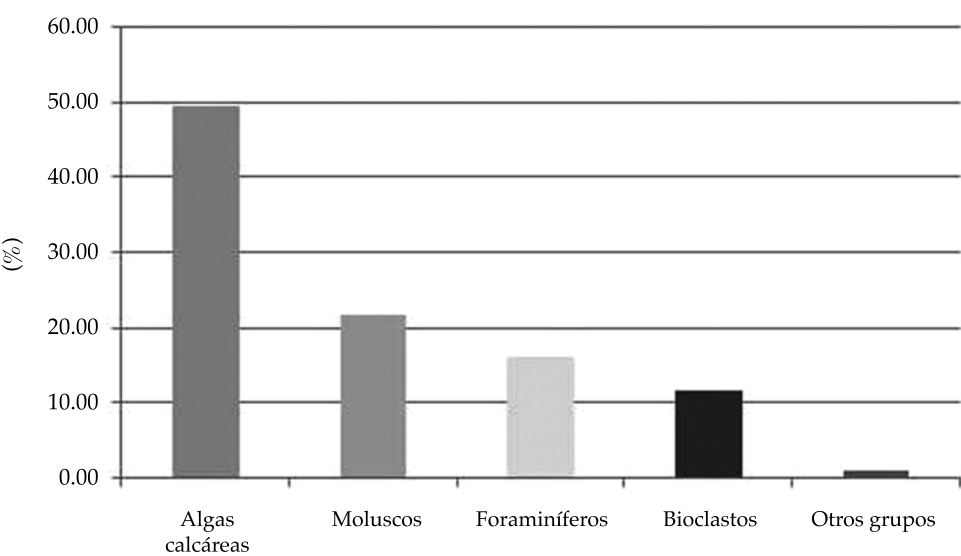


Figura 2. Composición de la arena de la playa de Varadero.

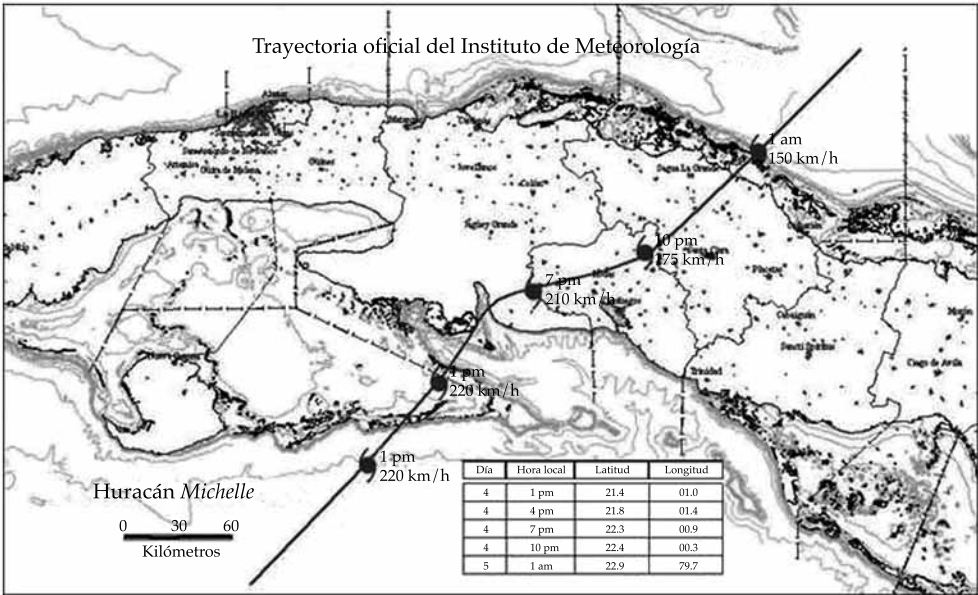


Figura 3. Trayectoria del Huracán Michelle sobre el archipiélago cubano. Instituto de Meteorología.

velocidad promedio del cruce por el territorio cubano fue de 25 km/h.

Michelle fue un huracán extenso, con un ojo de unos 40 kilómetros de diámetro, por lo que

en toda su trayectoria, la zona de calma y vientos máximos sostenidos se extendió a unos 20 km. Ocasionó inundaciones costeras en varias zonas del país.

Determinación de las variables que caracterizan al huracán *Michelle*

Para la determinación del oleaje como condición de frontera se toman los resultados obtenidos de la aplicación del Sistema de Ingeniería Costera y Marítima descrito por Córdova (2014). Este sistema integra varios modelos matemáticos que tributan al modelo *Xbeach*, y presenta como

datos iniciales la salida de los campos de vientos del modelo paramétrico Holland (1980), enviándolos luego a los modelos *Wave Wacth III* (WW3) y *SWAN*, para la generación y propagación de oleaje, según el dominio que esté trabajando.

Las condiciones de oleaje más desfavorables (altura de ola significativa, periodo pico y dirección de la ola) obtenidas se reflejan en las figuras 4, 5 y 6.

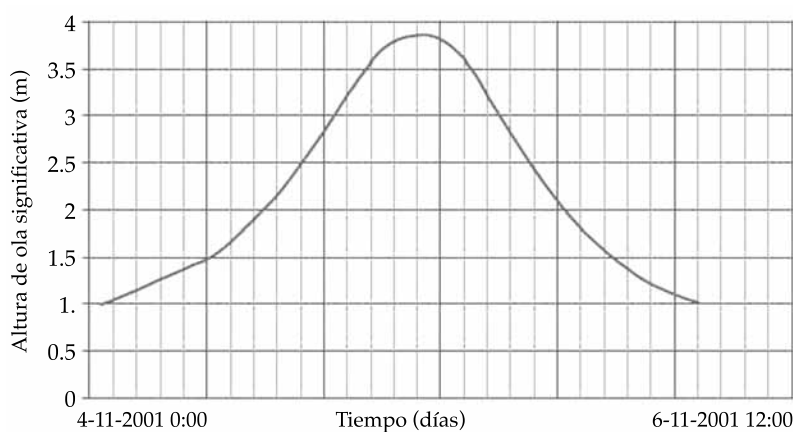


Figura 4. Altura de ola significativa para el huracán *Michelle*.

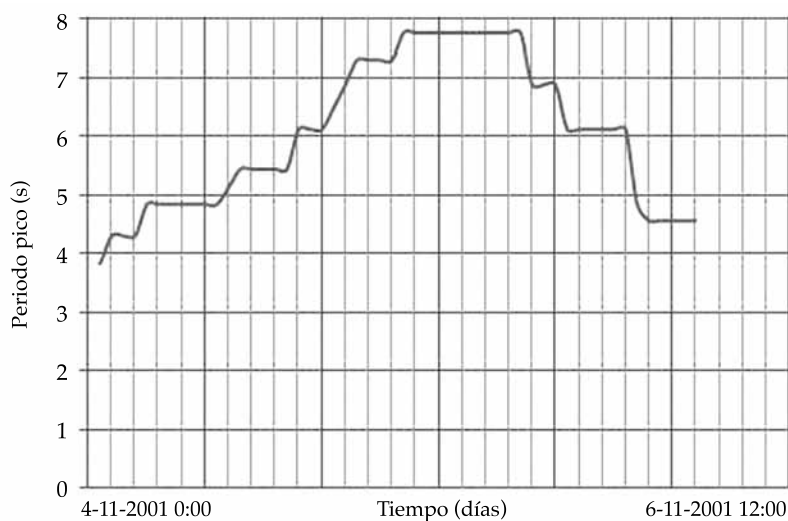
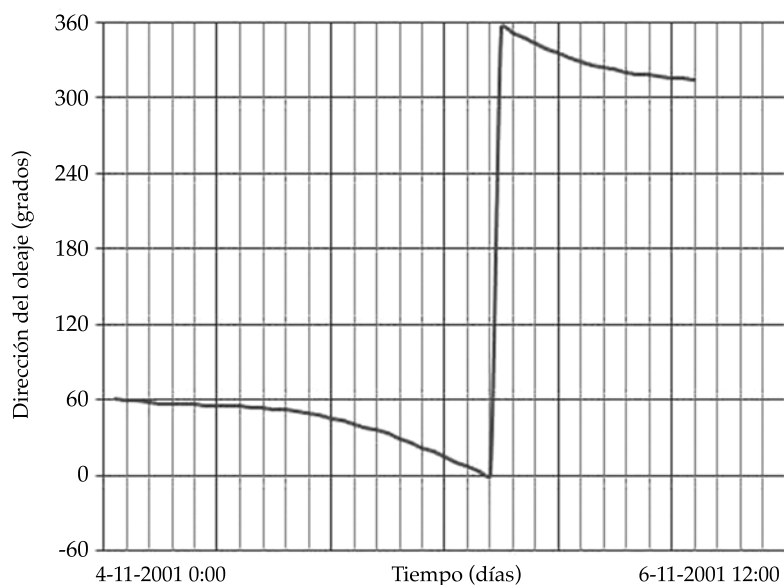
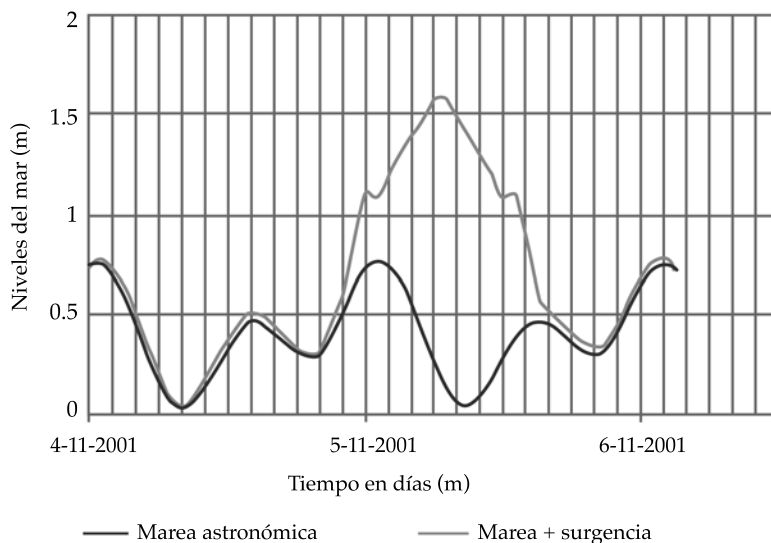


Figura 5. Periodo pico de la ola para el huracán *Michelle*.


Figura 6. Dirección del oleaje para el huracán *Michelle*.

Figura 7. Nivel del mar para el huracán *Michelle*.

De acuerdo con Córdova (2014), *Michelle* provocó una sobreelevación del nivel del mar de 1.56 metros en el momento de máxima altura de ola significativa, lo que se presenta en la figura 7.

Condiciones de la playa antes y después del paso del huracán *Michelle*

Izquierdo (2004) caracteriza la zona de estudio antes del paso del huracán *Michelle*, donde des-

taca para el sector la existencia de una pendiente submarina ligeramente suave. La presencia de dos niveles de barras bien desarrolladas se refleja en el perfil Kawama, con reservas de arena importantes para la protección de la playa en el caso de ocurrir tormentas severas. El afloramiento de la roca próximo a la orilla en el caso del perfil duna E no permite la formación de barras longitudinales (figura 8).

El huracán *Michelle* fue uno de los más intensos eventos ocurridos en los últimos 50 años,

que influyó de manera significativa en la playa de Varadero y provocó severas afectaciones de carácter puntual; entre ellas destacan el fortalecimiento en el sector, caracterizado por el perfil duna E de la pequeña barra próxima a la orilla, y la formación de una segunda barra a 250 m de la inflexión, donde antes sólo existían rocas (figura 9); el desplazamiento de la segunda barra longitudinal del perfil Kawama a una mayor distancia de la costa y a una profundidad de 3 m, así como pérdidas por fugas de arena fuera

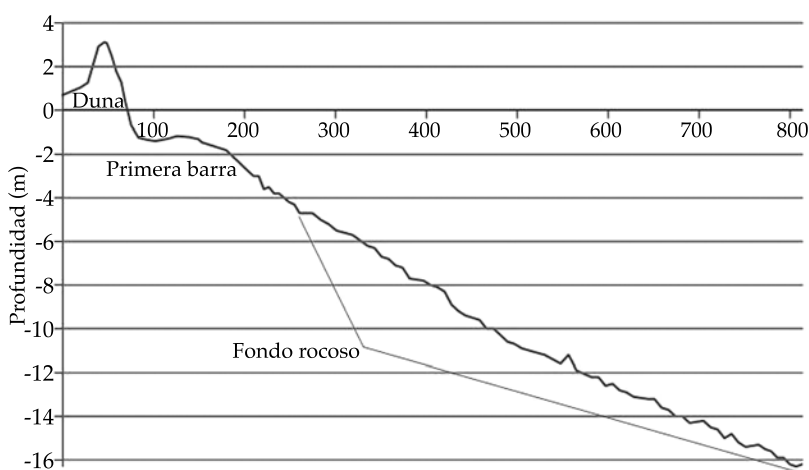


Figura 8. Perfil duna E antes del paso del huracán *Michelle*.

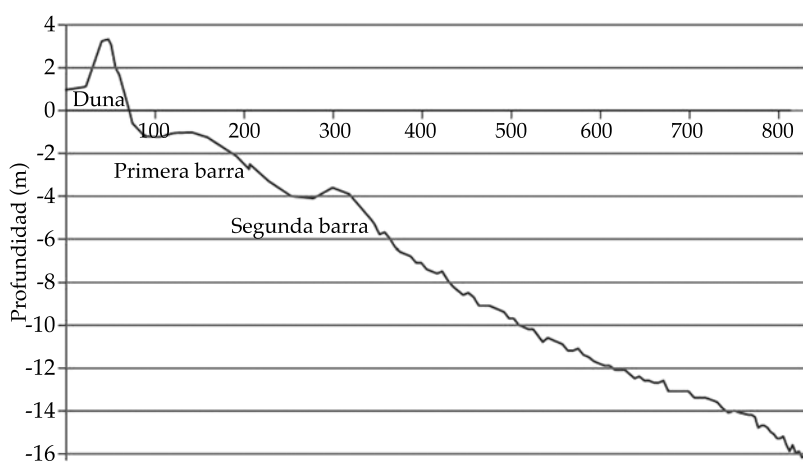


Figura 9. Perfil duna E después del paso del huracán *Michelle*.

del sistema de playa, irrecuperables para el perfil, al desplazar volúmenes de sedimentos hacia profundidades mayores que la profundidad de cierre del perfil activo.

Análisis cuantitativo de los daños provocados por *Michelle* en el perfil

Basados en los estudios realizados por Izquierdo (2004), Díaz (2011) y Salazar (2012), se selecciona la zona oeste de la playa de Varadero con el perfil duna E para la calibración del modelo, y los perfiles PN1 y PN2 del sector Oasis para su validación.

Con el objetivo de cuantificar los cambios morfológicos ocurridos durante el fuerte oleaje que provocó el huracán *Michelle*, se definen como indicadores de los diferentes procesos que tuvieron lugar las variables volumen de erosión (m^3/m), y avance o retroceso de la línea de costa (m). Los resultados obtenidos del proceso de cálculo se observan en el cuadro 1.

El proceso de calibración del modelo *Xbeach* se basará principalmente en los siguientes aspectos: caracterización cualitativa de los daños provocados por *Michelle* en el área estudiada, volumen de erosión, y avance o retroceso de la línea de costa calculado.

Modelo *Xbeach*

Modelo matemático en dos dimensiones que simula la propagación del oleaje, ondas largas, flujo medio, y transporte de sedimento y cambios morfológicos en la zona de playa, dunas y barreras al interior de la costa durante la ocurrencia de eventos extremos.

Xbeach resuelve las ecuaciones de balance de acción de la ola, de energía del *roller*, de masa y *momentum* en aguas poco profundas, fórmulas de transporte de sedimento, así como las de actualización del fondo (Roelvink *et al.*, 2010).

1. La función que soluciona el balance de acción de la ola

El modelo resuelve la ecuación de balance de acción de olas de corto periodo, dependiente del tiempo a la escala temporal de grupos de olas. Se tiene en cuenta la densidad de la acción de olas cortas, quedando la distribución de frecuencia reducida a una frecuencia pico representativa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_{waves}}{\sigma} \quad (1)$$

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (2)$$

Siendo A la densidad de acción del oleaje; θ , el ángulo de incidencia con respecto al eje x ; S_w , la densidad de energía del oleaje en cada sector direccional; σ , la frecuencia intrínseca de la ola obtenida de la relación lineal de dispersión; D_{waves} , la disipación de la energía debido a la rotura del oleaje; (c_x, c_y) , las velocidades de propagación de la acción del oleaje en los componentes x e y , y (c_θ) es la velocidad de propagación de la energía de la ola en el espacio, teniendo en cuenta la refracción por efecto del fondo y las corrientes.

La disipación total de la energía del oleaje, direccionalmente integrada, debido a la rotura del oleaje, es modelada con base en Roelvink (1993). Las formulaciones referentes al modelo de rotura pueden definirse mediante la palabra clave *break*. Para los casos de simulaciones con grupos de olas no estacionarios, se emplea *break 1* o *break 3*, siendo las ecuaciones que utiliza el modelo las de Roelvink (1993). Para las simulaciones con grupos de olas estacionarios, la opción de *break 2* se encuentra disponible,

Cuadro 1. Resultados del estudio cuantitativo realizado en el perfil duna E.

Perfil	Vol. erosión (m^3/m)	Mov. línea costa (m)
Duna E	-18.45	-2.60 retroceso

utilizando las ecuaciones de Baldock, Holmes, Bunker y Van Weert (1998).

2. La función que incluye un balance de energía en la zona de rompientes

El modelo incluye un balance de la energía del oleaje en rompientes, con la finalidad de redistribuir la energía de las olas rompiendo. Se tiene en cuenta la distribución direccional de la densidad de acción del oleaje, quedando limitada la distribución de frecuencia a una frecuencia pico representativa:

$$\frac{\partial S_{roller}}{\partial t} + \frac{\partial c_x S_{roller}}{\partial x} + \frac{\partial c_y S_{roller}}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta S_{roller}}{\partial \theta} = -D_{roller} + D_{waves} \quad (3)$$

Siendo $S_{roller}(x, y, t, \theta)$ la energía del oleaje en rompientes en cada sector direccional; θ , el ángulo de incidencia con respecto eje x ; D_{waves} , la disipación de la energía debido a la rotura del oleaje; D_{roller} , la disipación de la energía *roller* debido a la rotura del oleaje; (c_x, c_y) , las velocidades de propagación de la energía *roller* en la dirección x e y ; (c_θ) , la velocidad de propagación de la energía de la ola en el espacio. La disipación de energía de *roller* es calculada por Reniers (1999), quien combina conceptos con Deigaard (1993) y Svendsen (1984).

3. Ecuaciones de flujo en agua someras

Las ecuaciones responsables de las variaciones de la superficie del agua y el flujo, incluyendo oleaje infragravitatorio y corrientes inducidas por oleaje no estacionario, se presentan a continuación. *Xbeach* utiliza las formulaciones dadas por Andrews y McIntyre (1978):

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) \\ & = + \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} \\ & \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Las condiciones de contorno para los cálculos de flujo deben expresarse en función de u^L , v^L (lagrangianas) y no u^E , v^E (eulerianas), siendo τ_x , τ_y las tensiones de fondo; η , el nivel del agua; f , el coeficiente de Coriolis; F_x , F_y , las tensiones inducidas por el oleaje; y v_h , la viscosidad horizontal asociada con mezcla lateral.

4. Ecuación de transporte de sedimentos

El transporte de sedimento se determina mediante la resolución de una ecuación de advección-difusión, siguiendo el esquema de Galapatti y Vreugdenhil (1985), partiendo del campo de velocidades eulerianas (u^E , v^E). *Xbeach* soporta dos formulaciones para la concentración de equilibrio: la metodología de Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997) y la más reciente de Van Rijn (2007).

Ecuación de advección-difusión Galapatti y Vreugdenhil (1985):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC u^E}{\partial x} + \frac{\partial hC v^E}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \\ & T_s = \max \left(0.05 \frac{h}{W_s}, 0.2 \right) s \end{aligned} \quad (5)$$

Donde C es la concentración de sedimento promediada con el fondo; C_{eq} , la concentración de equilibrio; u^E y v^E , el campo de velocidades eulerianas; h , la profundidad local; D_h , el coeficiente de difusión del sedimento; T_s , la escala temporal de adaptación de la concentración de sedimento; y w_s , la velocidad de caída del sedimento.

El cálculo de C_{eq} mediante la formulación de transporte de sedimentos Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997):

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left(\left(|u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d} \right)^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m) \quad (6)$$

Siendo A_{sb} y A_{ss} los coeficientes de transporte por suspensión y por fondo, respectivamente; h , la profundidad local (m); C_d , el coeficiente adimensional de arrastre en olas de corto periodo; u_{rms} , la velocidad orbital de la ola cerca del fondo; u_{cr} , la velocidad de transporte crítica debido a corrientes y oleaje; m , la pendiente del fondo, y α_b es el factor de calibración.

El cálculo de C_{eq} mediante la formulación para transporte de sedimento dada por Van Rijn (2007) incluye la turbulencia producida por el oleaje en rotura:

$$C_{eq} = \frac{A_{sb}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2} + 0.64 u_{rms,2}^2 - u_{cr} \right)^{1.5} + \frac{A_{ss}}{h} \left(\sqrt{(u^E)^2} + 0.64 u_{rms,2}^2 - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m) \quad (7)$$

Siendo A_{sb} y A_{ss} los coeficientes de transporte por suspensión y por fondo, respectivamente; h , la profundidad local (m); $u_{rms,2}$, la velocidad

orbital próxima al fondo (m/s), incluyendo el efecto de la turbulencia inducida por oleaje en rotura (Reniers, Roelvink, & Thornton, 2004); u_{cr} , la velocidad de transporte crítica debido a corrientes y oleaje; m , la pendiente del fondo, y α_b es el factor de calibración. Se puede clasificar este modelo como de decaída de la turbulencia de forma exponencial, donde se consideran olas en rotura tipo *spilling*, asumiendo que la escala de tiempo de la turbulencia es sustancialmente menor que la de propagación de la onda.

Calibración del modelo

Todas las simulaciones realizadas en la etapa de calibración fueron usando la versión 19 de *Xbeach*, la más estable hasta el momento. La calibración del modelo se dividió en dos fases:

Fase I. Ajuste o calibración de parámetros propios del modelo, la cual tiene como objetivo definir la combinación de parámetros que simulen mejor los daños provocados por *Michelle*.

Fase II. Estudios de sensibilidad aplicando diferentes alternativas referentes a la condición de frontera del mar, dirigida a evaluar el efecto de la aplicación de varios niveles de mar en las variables morfológicas estudiadas.

Los parámetros utilizados para la calibración y valores se presentan en el cuadro 2.

Donde el parámetro *break* indica la disipación de la energía del oleaje debido a la rotura, empleando el valor 1 al utilizar las formulaciones

Cuadro 2. Parámetros utilizados para la calibración del modelo.

Parámetro	Valores por default	Valores estudiados
<i>Break</i>	3	1 Roelvink (1993) 2 Baldock <i>et al.</i> (1998) 3 Roelvink (1993)
Gamma	0.55	0.4 0.5 0.6 0.7
Gammáx	2	2 3 5
Wetslp	0.3	0.1 0.2 0.3

dadas por Roelvink (1993), el valor 2 para las formulaciones de Baldock *et al.* (1998) y el valor 3 para las formulaciones dadas por Roelvink (1993). Por su parte, gamma representa el índice de rotura implícito en estas formulaciones, con el cual la zona de rompiente aumentará o disminuirá su longitud, según sea mayor o menor su valor. Gammáx es un limitador con el que se reduce la altura de ola en aguas muy poco profundas y se evita un comportamiento poco realista de lo que ocurre en esa zona. El parámetro wetslp representa la pendiente crítica sumergida, que tiene en cuenta la evolución del fondo por la avalancha de material arenoso erosionado de la duna.

La fase I de calibración del modelo se desarrolló en dos partes: la primera fijando la opción “break = 1” del modelo de disipación de energía de las olas, y combinando los demás parámetros hasta encontrar la combinación o combinaciones que más se aproximen a las características fundamentales de la dinámica costera en la zona de estudio. Para la segunda parte, aquellas combinaciones resultantes de la primera parte serán simuladas aplicando las otras dos opciones del modelo de disipación de la energía de las olas que brinda el modelo (“break 2” y “break 3”).

En la figura 10 se muestra la forma en que se desarrolló la primera parte de la calibración, donde se representa el tipo de modelo de disipación de energía de la ola (break 1) utilizado, así como los índices de rompiente (gamma 0.4,

0.5, 0.6, 0.7), con los cuales la zona de rompiente aumentará o disminuirá su longitud, según sea el caso. A su vez, cada valor de gamma será combinado con los limitadores (gammáx 2, 3, 5), lo que permitirá que las olas después de romper continúen su trayectoria con un comportamiento lógico en la zona de poca profundidad, que es precisamente el lugar donde mayor movimiento de sedimentos ocurre. También se observa la manera en que se combinaron los parámetros con la pendiente crítica sumergida (wetslp 0.1, 0.2, 0.3).

En la segunda parte de calibración se utilizaron como modelo de disipación de la energía de las olas las opciones *break 2* y *break 3* que brinda el modelo, en combinación con los parámetros seleccionados en la primera parte de calibración.

Resultados del proceso de calibración de la fase I. Análisis del índice de rompiente (gamma)

Las simulaciones hechas utilizando como índice de rompientes (gamma) el valor de 0.4 muestran que con este parámetro se mueven los menores volúmenes de sedimento a lo largo de todo el perfil debido a una zona de rompientes de menor longitud, como se observa en el cuadro 3. Los resultados obtenidos en estas simulaciones son los que más se aproximan a los valores de erosión y avance de la línea de costa, calculados para el sector de playa a partir de los perfiles

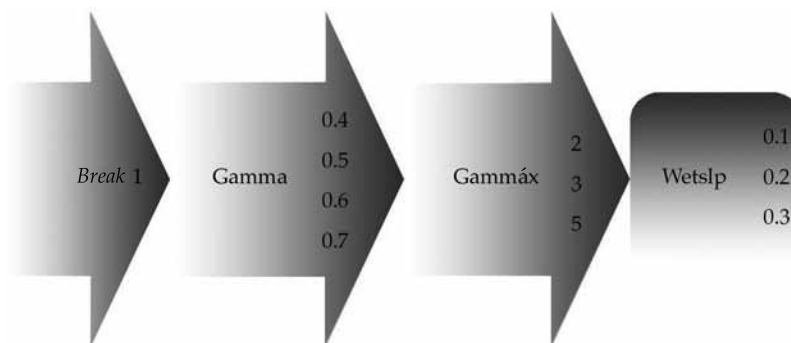


Figura 10. Esquema de calibración de la primera parte.

medidos, al ser comparados con los resultados de las mediciones que aparecen en el cuadro 1.

Todo lo contrario sucede cuando se utilizan los valores de 0.6 y 0.7, donde se aprecia un mayor movimiento de sedimento en todo el perfil, pues la zona de rompientes presenta una mayor longitud, sobredimensionándose los volúmenes de erosión y llegando en algunos casos a desaparecer completamente la duna (cuadro 4).

Análisis del parámetro relación H_{rms}/h_h (gammax)

En el cuadro 5 se muestran las combinaciones de gammax que presentaron menor volumen de erosión por metro lineal y movimiento de la línea de costa, valor que interesa por ser el que más se aproxima a los resultados obtenidos

de las mediciones del perfil que aparecen en el cuadro 1. Como se observa, para una misma combinación de los restantes parámetros, el intervalo de valores de gammax propuesto no presenta diferencias significativas en cuanto a las variables morfológicas estudiadas, por lo que se recomienda como máxima proporción H_{rms}/h_h el valor de 2, siendo H_{rms} la altura de ola y h_h la profundidad del agua.

Análisis del parámetro pendiente crítica sumergida (wetslp)

En todas las modelaciones realizadas utilizando los valores de gamma estudiados, los mayores valores de erosión y avance de la línea de costa se obtuvieron con una pendiente sumergida igual a 0.1 (cuadro 6).

Cuadro 3. Resultados de la simulación utilizando índice de rompientes de 0.4.

Break	Gamma	Gammáx	Wetslp	Vacreción	Verosión	Mov. línea costa (m)
1	0.4	2	0.3	5.92	-20.80	-7.41
		3	0.3	6.17	-20.99	-7.33
		5	0.3	5.92	-20.80	-7.41

Cuadro 4. Resultados de la simulación utilizando índice de rompientes de 0.6 y 0.7.

Break	Gamma	Gammáx	Wetslp	Vacreción	Verosión	Mov. línea costa (m)
1	0.6	2	0.3	28.11	-65.42	-22.26
		3	0.3	28.20	-65.73	-22.43
		5	0.3	27.78	-66.16	-22.34
1	0.7	2	0.3	33.74	-69.73	-18.10
		3	0.3	33.45	-69.86	-17.90
		5	0.3	33.67	-69.68	-18.25

Cuadro 5. Resultados de la simulación utilizando diferentes combinaciones de gammax.

Break	Gamma	Gammáx	Wetslp	Vacreción	Verosión	Mov. línea costa (m)
1	0.4	2	0.3	5.92	-20.80	-7.41
		3	0.3	6.17	-20.99	-7.33
		5	0.3	5.92	-20.80	-7.41
1	0.5	2	0.3	8.60	-30.83	-9.68
		3	0.3	8.66	-31.07	-9.73
		5	0.3	8.85	-31.03	-9.63

Cuadro 6. Resultados de la simulación utilizando los índice de rompientes estudiados.

Break	Gamma	Gammáx	Wetslp	Vacreción	Verosión	Mov. línea costa (m)
1		2	0.1	9.77	-34.04	-14.71
	0.4	3	0.1	9.60	-33.28	-14.31
		5	0.1	9.92	-33.90	-14.43
1		2	0.1	25.24	-61.75	-23.91
	0.5	3	0.1	24.45	-61.62	-23.84
		5	0.1	24.46	-61.90	-23.71
1		2	0.1	32.67	-64.72	-22.95
	0.6	3	0.1	34.24	-58.70	-22.01
		5	0.1	34.17	-64.59	-22.79
1		2	0.1	37.11	-65.76	-21.24
	0.7	3	0.1	36.17	-65.98	-21.42
		5	0.1	36.51	-66.28	-21.99

Las modelaciones que más se aproximan a los valores de erosión y avance de la línea de costa, calculados a partir de las mediciones de los perfiles para el sector de playa y que se reflejan en el cuadro 1, se obtienen para una pendiente crítica sumergida de 0.3, como se muestra en el cuadro 3. Utilizando este valor, el comportamiento cualitativo fue muy similar a lo ocurrido en el área de estudio con el paso del huracán *Michelle* y descrito por Izquierdo (2004).

Análisis del parámetro modelo de disipación de energía de las olas (*break*)

En esta parte de calibración se utilizarán como modelo de disipación de la energía de las olas las opciones *break 2* y *break 3* que brinda el modelo *Xbeach*, en combinación con los parámetros seleccionados antes.

La figura 11 muestra el perfil duna E en la situación más crítica para cada combinación de modelo de disipación de energía, en la que todos los perfiles modelados presentan similar comportamiento en cuanto a su evolución morfológica. Las zonas donde ocurren los cambios morfológicos más significativos son la duna y playa seca, al igual que la zona entre la playa sumergida y primera barra submarina.

En el cuadro 7 se registran los volúmenes determinados por zonas y el fenómeno pre-

dominante del sistema (FPS) para cada combinación del modelo de disipación de energía utilizado. Como resultado de este análisis se observa que la primera opción del modelo de disipación de la energía de las olas *break 1* simula de manera más acertada los cambios morfológicos ocurridos en la zona de la playa de Varadero, caracterizada por el perfil duna E, al encontrarse los valores de erosión en el entorno de los cuantificados a partir de las mediciones realizadas por el Instituto de Oceanología luego del paso del huracán *Michelle*. Esta opción utiliza la ecuación de Roelvink (1993) para disipar la energía de las olas.

Conclusiones generales de la fase I de calibración

Se selecciona *break 1* como opción del modelo de disipación de energía de las olas debido a la similitud de los resultados de la simulación con los valores de erosión y avance de la línea de costa calculados; se elige como índice de rompiente gamma el valor de 0.4, pues con las otras opciones ocurre un excesivo proceso de erosión que no se corresponde con lo ocurrido en la zona de estudio; se establece el valor de gammáx 2 como limitador del modelo, y se propone como pendiente crítica sumergida wetslp el valor de 0.3 para ser aplicados en el resto de la investigación.

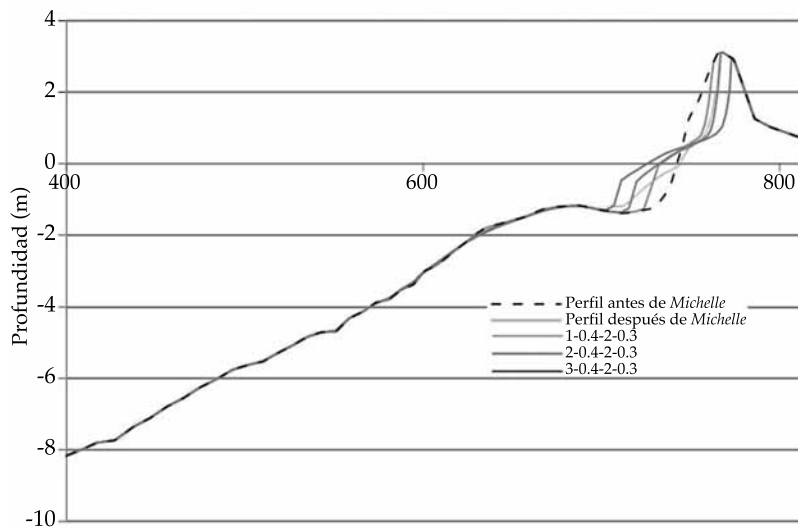


Figura 11. Simulación del perfil con las tres opciones del modelo de disipación de energía.

Cuadro 7. Volúmenes por zona para cada opción del modelo.

Modelación	Zona 1 Duna y playa seca Volumen (m ³ /m) FPS	Zona 2 Playa sumergida y primera barra Volumen (m ³ /m) FPS
Break 1 Gamma 0.4 Gammáx 2 WetSlp 0.3	-19.77 erosión	2.30 acreción
Break 2 Gamma 0.4 Gammáx 2 WetSlp 0.3	-9.72 erosión	0.33 acreción
Break 3 Gamma 0.4 Gammáx 2 WetSlp 0.3	-30.40 erosión	2.35 erosión

Fase II de calibración del modelo. Estudios de sensibilidad aplicando diferentes condiciones de frontera del nivel del mar

El objetivo de esta fase consistió en evaluar el efecto de la aplicación de varios niveles de mar en las variables morfológicas estudiadas. Las variantes aplicadas fueron una señal que sólo tiene en cuenta la marea astronómica; una señal que sólo considera la marea meteorológica, y una señal que combina la marea astronómica en el mar y la meteorológica en tierra.

Resultados del proceso de calibración de la fase II. Aplicación de la señal de marea astronómica

Con la aplicación de esta señal se asume que la surgencia o sobreelevación del nivel del mar generado por el huracán *Michelle* no tiene un efecto significativo en el proceso de cambios morfológicos ocurridos en el perfil. El archivo de marea astronómica aplicado se representa en la figura 12.

Aplicación de la señal de marea meteorológica

La adición de la surgencia a la marea astronómica generalmente se denomina marea meteorológica. La nueva condición del nivel del mar se representa en la figura 7.

Aplicación de la señal de marea astronómica en el mar y meteorológica en tierra

En este último estudio se combinan en un mismo archivo de marea una señal de marea astronómica aplicada en el mar y una señal de marea meteorológica aplicada en tierra. El objetivo de esta prueba es generar un flujo de sedimento hacia fuera de la costa (*offshore*), puesto que la energía en tierra es mayor que la energía aplicada en el mar.

Comparación entre las condiciones de frontera de nivel del mar aplicadas

En la figura 13 se muestra una comparación para las condiciones entre el volumen calculado en las zonas donde ocurren los mayores cambios morfológicos.

Como se observa, la simulación que utiliza como condición de nivel del mar la señal meteo-

rológica es la que mayor cambio provoca en la configuración del perfil, aunque es preciso destacar que la diferencia con respecto a las otras dos variantes no es muy significativa, y que la aplicación de la señal de marea astronómica en mar y meteorológica en tierra es la que mejor describe el comportamiento del perfil luego del paso del huracán *Michelle*.

Conclusiones generales de la fase II de calibración

La serie de estudio de sensibilidad realizada en esta segunda fase de calibración demuestra que la aplicación de una señal de marea astronómica en mar y meteorológica en tierra como condición de nivel del mar es la que mejor se ajusta a la caracterización de la zona de estudio y a los cálculos de las variables morfológicas desarrollados a partir de las mediciones del Instituto de Oceanología.

Aplicación del modelo a la playa del sector Oasis, Varadero

Una vez calibrado el modelo, se aplican los parámetros estudiados al sector Oasis, con el objetivo de validar el proceso de calibración. Este sector de playa presenta una morfología similar a la descrita para el sector caracterizado

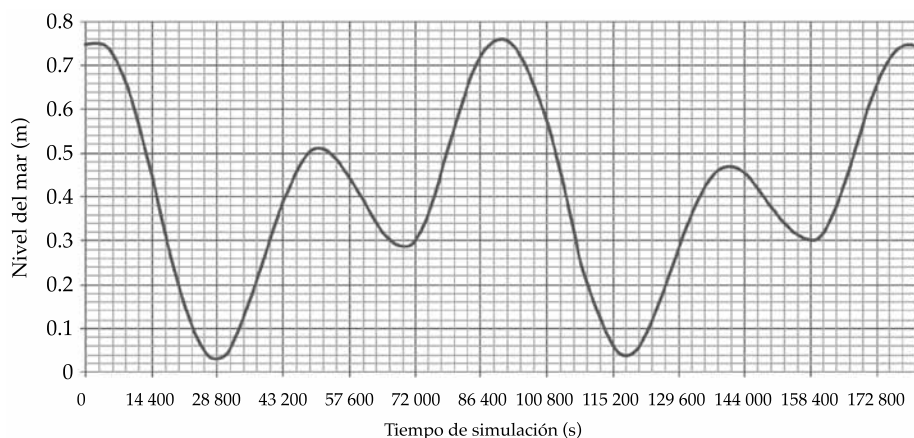


Figura 12. Representación de la marea astronómica aplicada.

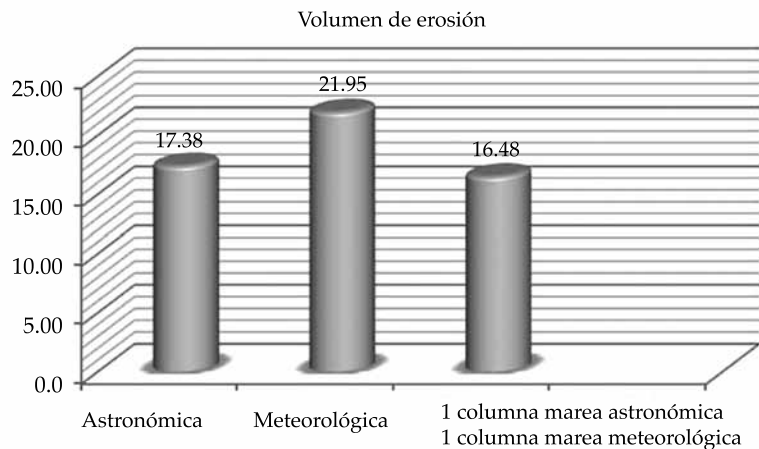


Figura 13. Volumen calculado en la duna y playa seca.

por el perfil duna E, con una orientación de la línea costera de 90° y la presencia de fondo rocoso en la pendiente sumergida. Para ello se simula el comportamiento de los perfiles PN1 y PN2, los cuales caracterizan el frente de playa del hotel Oasis y de los que se tienen mediciones de campo realizadas por el Instituto de Oceanología antes y después del paso del huracán *Michelle*, en conjunto con la batimetría del sector de estudio.

La cuantificación de los cambios morfológicos ocurridos durante este evento, utilizando las mediciones de campo, se muestran en el cuadro 8.

En el cuadro 9 se observan los cambios ocurridos en el perfil una vez realizada la simulación; en las figuras 14 y 15 se muestra el comportamiento del perfil simulado en el modelo, aplicando una señal de marea astronómica en el mar y meteorológica en tierra, conjuntamente con los perfiles medidos antes y después del paso del huracán *Michelle*.

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos en la modelación describen con una gran aproximación los cambios producidos en el perfil luego del paso del huracán *Michelle*. Las variaciones que se observan pueden deberse al momento en que se tomaron las mediciones.

Cuadro 8. Caracterización cuantitativa del comportamiento de los perfiles por mediciones de campo.

Perfil	Vol. erosión (m³/m)	Mov. línea costa (m)
PN-1	-28.91	11.77 avance
PN-2	-20.25	-5.61 retroceso

Cuadro 9. Comportamiento de los perfiles simulados utilizando una señal de marea astronómica en el mar y meteorológica en tierra.

Perfil	Vol. erosión (m³/m)	Mov. línea costa (m)
PN-1	-37.90	11.12 avance
PN-2	-30.14	-3.15 retroceso

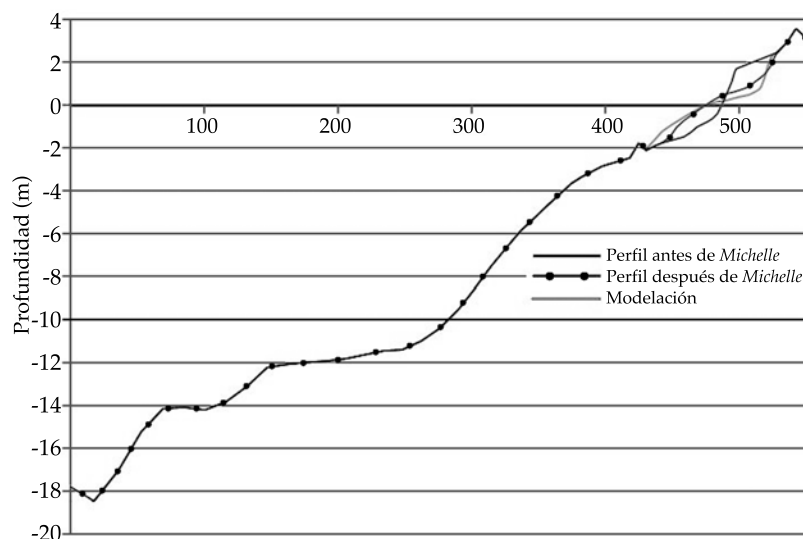


Figura 14. Simulación del perfil PN-1 utilizando una señal de marea astronómica en mar y meteorológica en tierra.

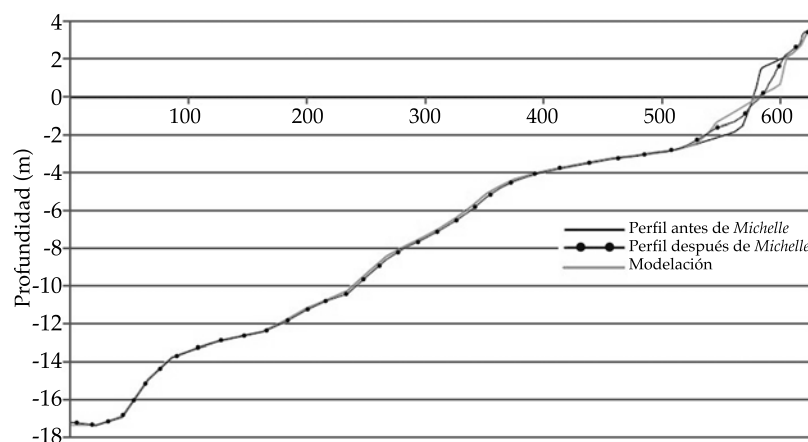


Figura 15. Simulación del perfil PN-2 utilizando una señal de marea astronómica en mar y meteorológica en tierra.

Sensibilidad del modelo. Índices Skill y BSS

La cuantificación de la habilidad del modelo es necesaria para determinar si puede usarse o no como una herramienta predictiva significativamente útil. Una medida de su habilidad en la predicción, dada por McCall *et al.* (2010), es comparar los cambios en los niveles del fondo simulados con las variaciones del nivel de fondo

observadas en todas las estaciones donde se tienen mediciones pre y post tormenta, calculando el índice Skill. En este caso, la variable de sensibilidad analizada es la varianza topográfica longitudinal y su influencia en los resultados de la simulación:

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (dzb_{\text{medido},i} - dzb_{\text{xbeach},i})^2}{\sum_{i=1}^n (dzb_{\text{medido},i})^2}$$

En la formulación, n representa el número de puntos medidos pre y post tormenta; $dz b_{\text{medido},i'}$ los cambios en el fondo medidos en el punto $i(m)$; y $dz b_{\text{xbeach},i}$ indica los cambios en el fondo modelados en el punto $i(m)$. Si Skill es igual a 1, la simulación es perfecta; si el valor es 0, la simulación no es buena, reflejando las variaciones en los niveles del fondo; si es menor que 1, la simulación es pésima.

En el cuadro 10 se muestran los valores obtenidos para los perfiles PN-1 y PN-2, donde puede concluirse que la simulación fue excelente.

Otro indicador de la calidad de los resultados del modelo utilizado en el proyecto MICORE (Van Dongeren, & De Vries, 2011) es el índice BSS (Brier Skill Score), cuya expresión según van Rijn *et al.* (2003) es la siguiente:

$$BSS = 1 - \frac{\left(|Zb_{\text{xbeach}} - Zb_{\text{medido}}| - \Delta Zb_{\text{medido}} \right)^2}{\left(Zb_0 - Zb_{\text{medido}} \right)^2}$$

Siendo Zb_{medido} los cambios en el fondo medidos en el punto $i(m)$; Zb_{xbeach} las variaciones en el fondo modelados en el punto $i(m)$; $\Delta Zb_{\text{medido}}$ el error en la medición del nivel del fondo (m), y Zb_0 es el nivel de fondo inicial (m). Este índice compara la diferencia media cuadrática entre predicción y observación, con la diferencia media cuadrática entre la predicción de la línea base inicial y la observada. Si los valores se encuentran entre 1 y 0.8, la simulación es exce-

lente; si están entre 0.8 y 0.6 es buena; entre 0.6 y 0.3 es razonable; entre 0.3 y 0 es pobre; si es < 0 , la simulación es mala. Un valor de $BSS \approx 0.5$ en una disciplina con tantas incertidumbres como la morfodinámica marítima se considera aceptable (García *et al.*, 2011).

Tomando como línea base inicial los perfiles existentes antes del paso del huracán *Michelle*, medidos en el mes de octubre de 2001, se calcula el índice BSS, cuyos resultados se muestran en el cuadro 11. Como puede observarse, los valores obtenidos muestran una simulación excelente para el caso del perfil PN-1 y buena para el perfil PN-2.

Sensibilidad del modelo en la zonificación del perfil

Con el objetivo de conocer la calidad de la modelación simulando la evolución morfológica del perfil, se calcula el BSS en cada una de las zonas donde ocurren los cambios morfológicos más significativos:

1. Duna y playa seca.
2. Playa sumergida y barras.

En este sentido, en el cuadro 12 se muestran los resultados obtenidos y en la figura 16, la representación del índice BSS por zonas para cada perfil.

Cuadro 10. Valores del índice Skill para los perfiles PN-1 y PN-2 simulados utilizando una señal de marea astronómica en mar y meteorológica en tierra.

Perfil	Skill
PN-1	0.998
PN-2	0.997

Cuadro 11. Valores del índice BSS para los perfiles PN-1 y PN-2 simulados utilizando una señal de marea astronómica en mar y meteorológica en tierra.

Perfil	Skill
PN-1	0.821
PN-2	0.556

Cuadro 12. Valores del índice BSS por zonas para los perfiles simulados.

Perfil	Zona 1 Duna y playa seca	Zona 2 Playa sumergida y barras
PN-1	0.82	0.78
PN-2	0.5	0.74

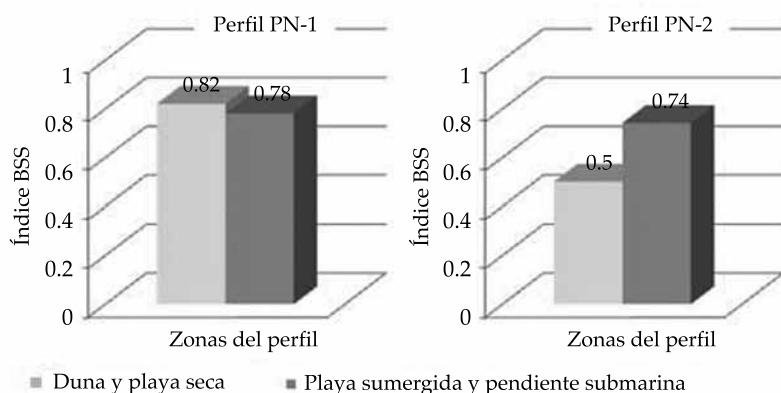


Figura 16. Índice BSS por zonas para los perfiles PN-1 y PN-2.

Conclusiones y recomendaciones

Se caracteriza la península de Hicacos y se selecciona el perfil duna E en la zona oeste de la playa de Varadero, así como los perfiles PN-1 y PN-2 del sector Oasis, para la calibración en ID del modelo.

Como resultado del proceso de calibración se define la siguiente relación de valores:

- Modelo de disipación de la energía de la ola. Opción 1 que brinda el modelo.
- Índice de rotura, valor de 0.4.
- Relación entre la altura de ola significativa y profundidad del agua, valor de 2.
- Pendiente crítica sumergida, valor de 0.3.

La cuantificación de la habilidad del modelo como herramienta predictiva determinada por el índice Skill arroja como resultado que la simulación de los perfiles PN-1 y PN-2 en el sector Oasis fue excelente. Los valores

obtenidos del índice BSS muestran que la simulación del perfil PN-1 fue excelente (0.82) y buena para el perfil PN-2, con un valor de 0.6. Las condiciones de fronteras de oleaje estudiadas fueron adecuadas para calcular los cambios morfológicos ocurridos en los perfiles de estudio.

Referencias

- Andrews, D. G., & McIntyre, M. E. (1978). An Exact Theory of Nonlinear Waves on a Lagrangian-Mean Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 89(4), 609-646.
- Baldock, T., Holmes, P., Bunker, S., & Van Weert, P. (1998). Cross-Shore Hydrodynamics within an Unsaturated Surf Zone. *Coastal Engineering*, 34(3-4), 173-196.
- Cabrera, A. H. et al. (2011). *Manejo costero integrado y política pública en Iberoamérica: propuestas para la acción*. Cádiz, España: Servicio de Publicaciones del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Córdova, L. L. (2014). Evaluación del proceso de erosión en la playa de Varadero, Cuba. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 175-183.

- Deigaard, R. (1993). A Note on the Three-Dimensional Shear Stress Distribution in a Surf Zone. *Coastal Engineering*, 20, 157-171, doi: 10.1016/0378-3839(93)90059-h
- Díaz, G. A. G. (2011). *Evaluación del proceso de erosión de la playa Varadero, Matanzas, Cuba. Efectos de diferentes trayectorias de huracanes*. Trabajo de Diploma. La Habana: Instituto Politécnico José Antonio Echeverría.
- Galapatti, R., & Vreugdenhil, C. B. (1985). A Depth-Integrated Model for Suspended Sediment Transport. *Journal of Hydraulic Research*, 23(4): 359-377.
- García, M. et al. (2011) *Modelling Barrier Beaches under Storms with Xbeach: The Case of the Trabucador Bar*. Deltanet International Conference.
- Holland, G. J. (1980). An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, 108, 1212-1218.
- Izquierdo, M. A. (2004). *Estudio de la dinámica litoral en la playa de Varadero, Cuba*. Tesina de Master. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- McCall, R. T., Van Thiel de Vries, J. S. M., Plant, N. G., Van Dongeren, A. R., Roelvink, J. A., Thompson, D. M., & Reniers, A. J. H. M. (2010). Two-Dimensional Time Dependent Hurricane Overwash and Erosion Modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*, 57(7), 668-683.
- Reniers, A. J. (1999). *Longshore Current Dynamics*. Delft, Netherlands: Delft University of Technology.
- Reniers, A. J., Roelvink, J. A., & Thornton, E. (2004). Morphodynamic Modelling of an Embayed Beach under Wave Group Forcing. *Journal of Geophysical Research*, 109(C1), doi: 10.1029/2002JC001586.
- Roelvink, J. A. (1993). Dissipation in Random Wave Groups Incident on a Beach. *Coastal Engineering*, 19, 127-150.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). *Xbeach Model Description and Manual*. Report 1200116/1002266. Delft, Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Salazar, J. N. (2012). *Calibración y aplicación del modelo Xbeach a la playa de Varadero*. Trabajo de Diploma. La Habana: Instituto Politécnico José Antonio Echeverría.
- Svendsen, I. A. (1984). Wave Heights and Set-Up in a Surf Zone. *Coastal Engineering*, 8, 303-329.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands*. London: Telford Publications.
- Van Dongeren, A., & De Vries, J. V. T. (2011). *Validation of Dune Impact Models using European Field Data-Deliverable 4.1. and 4.2. (Combined): Validation of Xbeach and off-the-Shelf Models*. Technical Report. Deltares.
- Van Rijn, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pand, S., & Sierra, J. P. (2003). The Predictability of Cross Shore Bed Evolution of Sandy Beaches at the Time Scale of Storms and Seasons Using Process-Based Profile Models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295-327.
- Van Rijn, L. C. (2007). Unified View of Sediment Transport by Current and Waves, Part I, II, III and IV. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 649-689 (part I & part II); 761-793 (part III & part IV).

Dirección institucional de los autores

M.C. Kenia Hernández Valdés

Inversiones Gamma S.A.
Calle 14 núm. 308 entre 3a y 5a ave.
Miramar, La Habana, CUBA
Teléfono: +53 (7) 2043 800
kenia@div.gamma.com.cu

Dr. Luis F. Córdova López

Centro de Investigaciones Hidráulicas
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Calle 114 núm. 11901 entre 119 y 127
Marianao, La Habana, CUBA
Teléfono: +53 (7) 9 2663 466
cordova@tesla.cujae.edu.cu