

## Evaluación de una propuesta de playa artificial para el sector Oasis, playa Varadero. Cuba

Dr. Ing. Luis F. Córdova López e-mail: [cordova@tesla.cujae.edu.cu](mailto:cordova@tesla.cujae.edu.cu)  
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba

Ing. Christian Orta Priede e-mail: [christianorta011@gmail.com](mailto:christianorta011@gmail.com)  
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba

Ing. Patricia González Valdés e-mail: [patri020910@gmail.com](mailto:patri020910@gmail.com)  
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba

### RESUMEN

La playa de Varadero es un polo turístico cubano conocido mundialmente por sus hermosas playas, en el sector Oasis para la mejora del sector de playa se ha diseñado un suministro de arena inicial, y para proteger el mismo se ha propuesto un sistema de protección compuesto por segmentos de rompeolas sumergidos. En el presente trabajo se presenta la evaluación de la propuesta para condiciones de clima marítimo extremo, aplicando un tren de modelos numéricos acoplados sobre mallas de alta resolución heterogéneas, ADCIRC + SWAN + XBeach. Se realiza un análisis de las variables hidrodinámica, del comportamiento morfológico del vertimiento de arena. Se demuestra que la solución propuesta no es efectiva para mantener la playa en condiciones de explotación turística.

**Palabras claves:** adcirc, modelos numéricos, swan, playas de arena, rompeolas sumergidos, xbeach

## Evaluation of an artificial beach proposal for the Oasis sector, Varadero Beach. Cuba

### ABSTRACT

The Varadero beach is a tourism place one of the most famous in Cuba. For the Oasis sector has been design and artificial beach compose for several submerged breakwater parallel to the coast, and an initial sand supply project. It this paper is presented the evaluation of the project applying a train of numerical model coupling ADCIRC + SWAN + Xbeach. It was analyzed the hydrodynamics and wave variables. The morphological behavior of the initial nourishment was evaluated. The results of the study show the proposal is not effective, the losses of sand and the reshape of the beach for climate condition studied do not meet the tourism demands.

**Key words:** adcirc, numerical models, swan, sand beach, submerged breakwaters, xbeach

## INTRODUCCIÓN

La playa del sector Oasis de Varadero presenta carencia de arena, afloramientos rocosos en prácticamente toda la pendiente submarina y el retroceso de la línea de costa. Es por ello que se ha propuesto un proyecto de recuperación, relleno y preservación de este sector para mejorar sus condiciones fundamentalmente para beneficio del sector turístico.

La modelación numérica se ha convertido en una poderosa herramienta en todos los campos de la ingeniería, en particular en la ingeniería costera y marítima existe un amplio desarrollo a partir de los estudios en modelación física y datos de campo que han permitido la calibración y validación de las herramientas numéricas. En este trabajo se utiliza el acoplamiento de forma dinámica y homogénea entre dos modelos numéricos de probado uso por centros de investigación, universidades e instituciones de prestigio a nivel mundial en el campo de la ingeniería costera. El modelo hidrodinámico denominado ADCIRC (Advance Circulation Model), y el modelo de oleaje SWAN (Simulation Waves Nearshore), y de forma heterogénea con el modelo morfodinámico XBeach, los dos primeros modelos son empleados 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 de mejor forma la complejidad del fenómeno que ocurre en la realidad, y el modelo XBeach trabaja sobre una malla de cómputo estructurada. Suh S-W et al. (2017), Córdova et al. (2019), Hernández (2020).

Con el acoplamiento de estos tres modelos se obtiene el comportamiento de las variables del oleaje, altura de ola significativa, dirección y período pico del espectro, así como el fenómeno de sobre elevación por rotura de la ola, la surgencia asociada a la ocurrencia de huracanes que será información de entrada para el tercer modelo XBeach, cual simulará los cambios morfológicos ocurridos en el fondo marino y en la línea de costa, permitiendo una evaluación más precisa de cualquier proceso en la zona costera, y en este caso en particular para la evaluación del proyecto de playa artificial en el denominado sector Oasis de la playa de Varadero, en la provincia de Matanzas, Cuba, ante eventos extremos como huracanes y frentes fríos que azotan la región noroccidental de la isla.

## DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La playa del Hotel Oasis, con unos 700 m de longitud, se localiza en el extremo Oeste de la Península de Hicacos, municipio Varadero, provincia de Matanzas, formando parte de la costa noroeste del archipiélago cubano, a aproximadamente 130 km al Este de La Habana.

La playa del Sector Oasis se distingue por ocupar el sector más occidental de la Península de Hicacos donde limita el litoral arenoso con la terraza baja rocosa que se extiende hacia la Bahía de Matanzas. Se encuentra separada del resto de la playa de Varadero por la presencia de los espigones del Canal de Paso Malo, los cuales constituyen una barrera física que impiden el transporte litoral de los sedimentos hacia el sector de playa. Limitada presencia de sedimentos arenosos en el perfil de playa, concentrada fundamentalmente en su parte emergida, con pendientes pronunciadas y un reducido ancho de playa.

### **Alcance del proyecto “Playa artificial del sector Oasis, Varadero”.**

El proyecto define tres grupos de actuaciones para la recuperación de la playa artificial del Sector Oasis, Varadero. En la primera parte de la investigación se plantea la demolición de las estructuras de hormigón construidas en la parte emergida y sumergida de la playa, las cuales además de interrumpir el transporte longitudinal de los sedimentos y la continuidad de la playa, representan un deplorable estado constructivo que afecta a la estética del entorno de la playa.

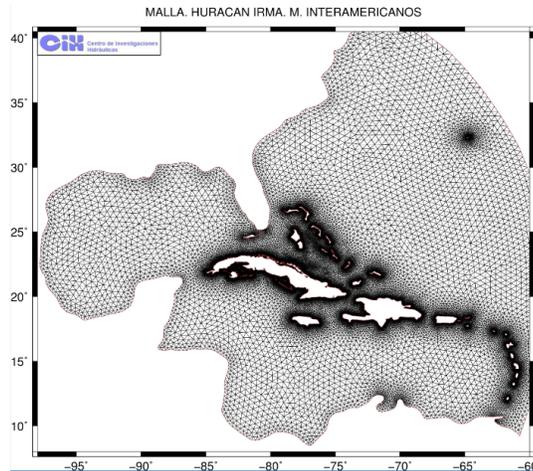
La segunda parte consiste en el vertimiento de 120 000 m<sup>3</sup> de arena para la conformación de 40 a 50 m playa seca, a extraerse con una draga de succión en marcha de la cuenca “Mono I”, tradicionalmente utilizada en los trabajos de recuperación de la playa de Varadero, ubicada al sur de cayo Mono y al Este de cayo Piedra del Norte, a unas 13 MN de la playa del Sector Oasis. La tercera etapa finaliza con la construcción de un espigón de apoyo longitudinal en el extremo Oeste de la playa que impida el transporte de la arena hacia las terrazas costeras deriva abajo, fuera del sector de playa, así como un sistema de cuatro rompeolas sumergidos construidos paralelos a la línea de costa, cumpliendo la función de disminuir la energía de la ola que ingresa al litoral y de servir de apoyo transversal a la arena vertida, Gamma S.A (2010).

### **BREVE DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE NUEVA GENERACIÓN PARA LA MODELACIÓN DE AMENAZAS EN ZONAS COSTERAS (SICOM)**

El 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 a la hidrodinámica, procesos morfológicos en playas de arena e interacción entre el oleaje y las estructuras en zonas costeras. Entre los modelos que componen el sistema están: modelos hidrodinámicos basado en la hidrostática, en este caso ADCIRC, Hagenet al. (1994), modelo de oleaje SWAN, Holthuijsen et al. (2004) y modelos morfodinámicos XBeach, Roalvink et al. (2015), modelo de oleaje y flujo no hidrostático SWASH, Zijlema et al. (2011). Las simulaciones se llevaron a cabo en el sistema de computación de alto rendimiento (*HPC*) perteneciente a la Universidad Central de Las Villas (UCLV).

### **DEFINICIÓN DEL DOMINIO DE CÓMPUTO**

Para el desarrollo de la modelación mediante el acoplado de ADCIRC+SWAN se define el dominio y la malla de cómputo. El objetivo de la creación del dominio es obtener una malla con alta resolución para evitar problemas de inestabilidad y los efectos de resonancia con las fronteras oceánica, al mismo tiempo obtener un resultado con buena precisión. En la figura 1 se muestra una de las mallas de cómputo utilizada.



**Figura 1. Dominio de cómputo seleccionados.**

### Definición de los huracanes a estudiar y período de simulación.

Se escogieron los huracanes Michelle 2001; Wilma 2005 e Irma 2017, ya que los mismos generaron daños importantes en la playa de Varadero desde el punto de vista morfodinámico, con fuerte erosión. Destacar que a pesar de que los tres huracanes tuvieron trayectorias diferentes respecto a la zona de estudio, sus fuertes vientos provocaron oleaje extremo, y sobre elevación del nivel del mar. La definición del tiempo de simulación se hace garantizando que el intervalo seleccionado contenga principalmente su paso por Cuba y cercano a la zona de estudio. En la tabla 1 se presentan los períodos de simulación para cada huracán.

**Tabla 1. Definición del período de simulación.**

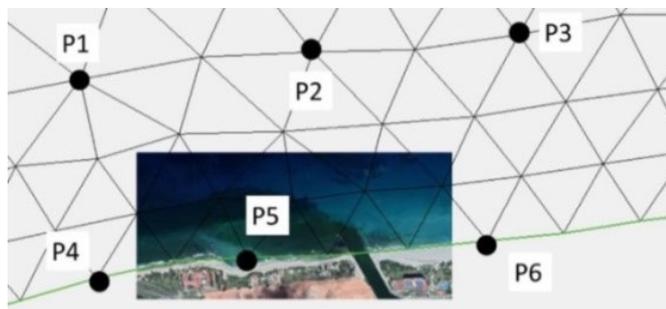
Períodos de simulación			
Huracán	Fecha de inicio	Fecha final	Cantidad de horas
Michelle	2/11/2001/00	6/11/2001/00	96
Wilma	19/10/2005/00	26/10/2005/00	168
Irma	06/09/2017/00	12/09/2017/00	120

### Ubicación de las boyas virtuales.

Para la selección de la ubicación de las boyas virtuales, se tuvo en cuenta el dominio que se va a utilizar para el modelo XBeach. A partir de esta información, se seleccionaron cinco boyas, cuyas coordenadas coinciden con las mallas de cómputo utilizadas para la modelación de las variables hidrodinámicas, Figura 2, y las coordenadas se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2. Localización de las boyas virtuales para el huracán Irma.**

Boyas #	Ubicación		Profundidad m	Lugar
	Longitud	Latitud		
1	-81,3230	23,1395	29,05	P1. Extremo superior Oeste.
2	-81,3136	23,1406	23,45	P2. Centro superior.
3	-81,3053	23,1413	19,11	P3. Extremo superior Este.
4	-81,3223	23,1315	0,27	P4. Extremo inferior Oeste.
5	-81,3130	23,1324	0,36	P5. Centro inferior.
6	-81,3066	23,1330	1,09	P6. Extremo inferior Este.



**Figura 2. Boyas virtuales.**

Los modelos ADCIRC+SWAN son forzados con los campos de viento y presiones obtenidos de las mejores trayectorias de los huracanes seleccionados, obtenidas de la base de datos ATCF de la NOAA, también se fuerzan con la marea astronómica tomadas de la base de datos LeProvost, et al. (1998), se aplican las componentes de marea K1, O1, Q1, M2, S2, N2, N2 y K2.

### DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS

La definición de los escenarios está encaminada al análisis de las variables hidrodinámicas y los cambios morfológicos. En la tabla 3 se definen los escenarios de estudio a analizar.

**Tabla 3. Definición de los escenarios de estudio.**

Escenarios	Modelo	Forzadores	Análisis
1	ADCIRC+SWAN	Vientos y presiones, marea.	Niveles del mar, período pico, altura significativa de la ola, dirección del oleaje generados por los huracanes estudiados para alimentación del modelo XBeach.
2	XBeach	Niveles del mar, período pico, altura significativa de la ola, dirección del oleaje.	Comportamiento de la morfología costera para condiciones de frentes fríos.
3	XBeach	Niveles del mar, período pico, altura significativa de la ola, dirección del oleaje.	Comportamiento de la morfología costera para condiciones de huracanes.

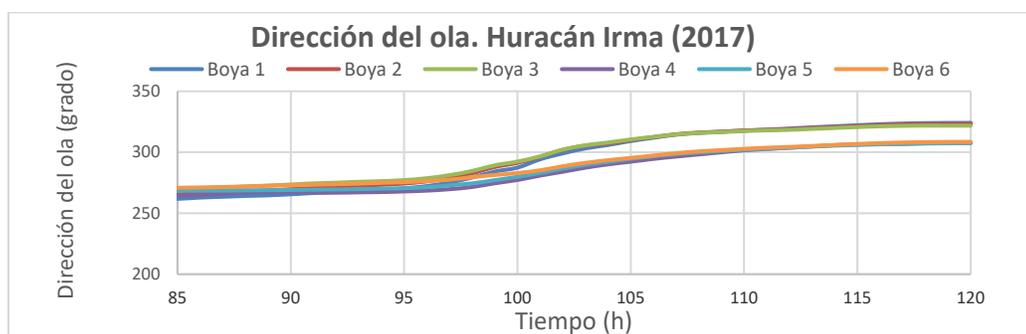
### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### Escenario 1

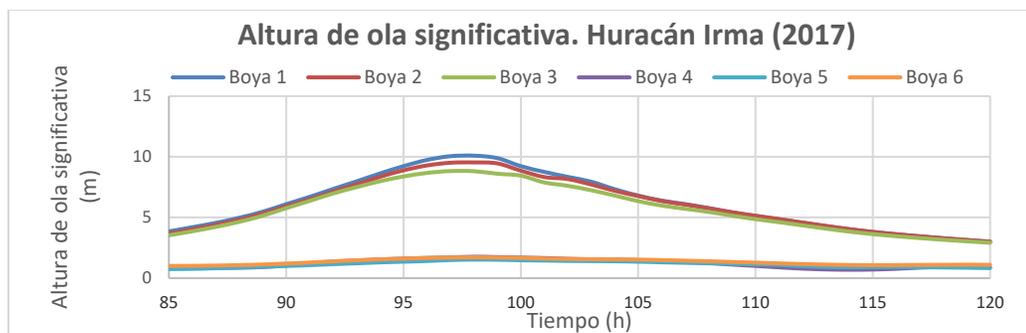
Este escenario está dirigido a definir las condiciones de frontera hidrodinámicas y de oleaje para el modelo XBeach en el caso de realizar el análisis cuando el sector de playa es impactado por el efecto de huracanes. Un elemento importante es definir el período de simulación con el modelo XBeach de acuerdo con la dirección de las olas generadas por el huracán, y su relación con la orientación de la línea de costa del sector de la playa Oasis. Es evidente que las direcciones Noroeste, Norte y Noreste serán las que generen el transporte de sedimento, las olas provienen de los sectores Noroeste y Noreste producirán principalmente transporte longitudinal, que se reflejará en una vascular de la playa entre los espigones de apoyo, y podrían generar fuga de sedimento en ambas direcciones. El oleaje con dirección principal desde el Norte generará fundamentalmente

transporte transversal. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores el oleaje se limita a aquellos que tengan ángulos superiores a 270 grados, y menores a 90 grados.

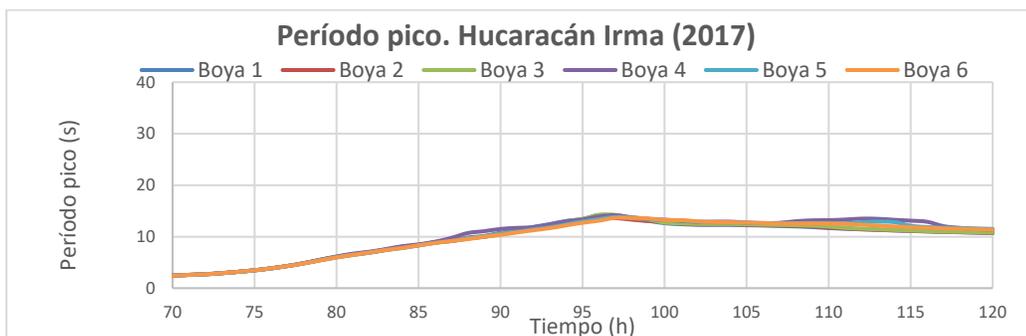
Se presenta el resultado para el huracán Irma, se simularon 120 horas, de las mismas se seleccionaron 35 horas para la modelación con XBeach, correspondientes al período final, como se muestra en las figuras 3, 4, 5 y 6. La dirección del oleaje durante esas horas provenía del Noroeste como se constata en la figura 3. Es importante destacar que en las últimas horas de simulación es donde producen la mayor altura de ola significativa figura 4, con valores máximos de 10,5 m de altura en las boyas virtuales situadas a profundidades entre 20 y 30 m de profundidad y valores de aproximadamente 2,00 m en la línea de costa. El nivel del mar presenta un valor máximo de 1,3 m en las boyas más próximas a la costa ver figura 6. El mismo análisis se realizó para los otros dos restantes, en la tabla 4 se presenta el resumen de las variables representativas para los tres huracanes.



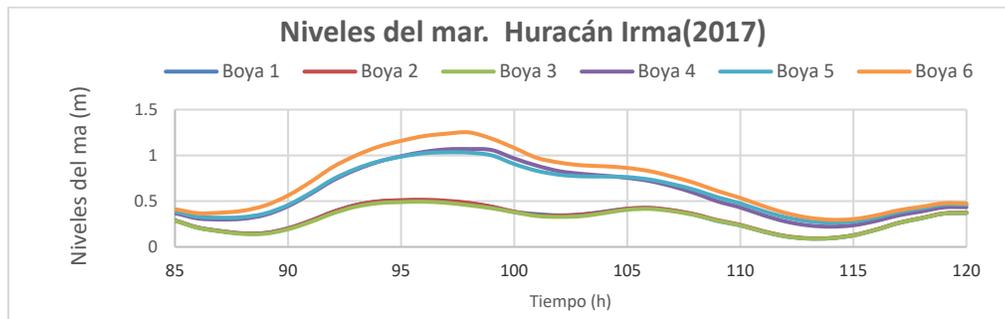
**Figura 3. Dirección de la ola durante el paso del huracán Irma (2017).**



**Figura 4. Altura de ola significativa para el huracán Irma (2017).**



**Figura 5. Período pico del espectro de oleaje para el huracán Irma 2017.**



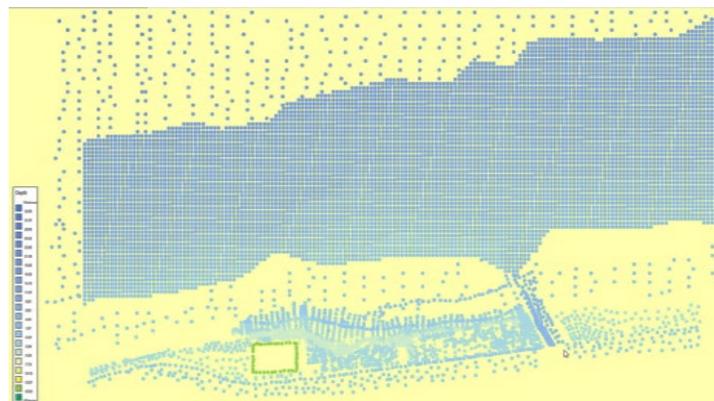
**Figura 6. Sobreelevación del nivel del mar para el huracán Irma 2017.**

**Tabla 4. Tabla resumen de los parámetros obtenidos en la simulación.**

Huracán	Tiempo de simulación ADCIRC+SWAN	Selección de horas para el XBeach	Dirección de la ola DIR (grado)	Altura de ola significativa Hs (m)	Período Pico (s)	Nivel de mar (m)
Irma 2017	120 horas	95-120	270-325	2-10,5	10 - 15	0,4-1,3
Michalle 2001	96 horas	75-90	260-280	1-6	10 - 12	0,1-0,5
Wilma 2005	168 horas	125-168	270-360	1-5,5	15 - 20	0,2-0,6

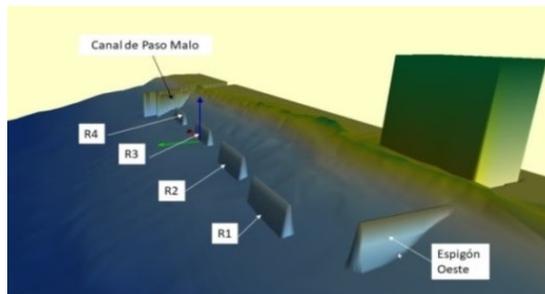
### ESTABLECIMIENTO DEL MODELO XBEACH.

El dominio de trabajo para la simulación del modelo XBeach contiene todo el sector de playa del Oasis, en Varadero, el canal de Paso Malo y un sector al Este del mismo de la playa, el mismo abarca una extensión en dirección al mar de 900 m hasta una profundidad de 20 m y 1600 m a lo largo de la línea de costa. La malla de cómputo se realizó empleando el programa Delft 3D, utilizando la herramienta RGFGRID. La malla tiene mayor resolución en los lugares de interés, los cuales se definieron como: el espigón de apoyo, los cuatro rompeolas y los espigones del canal Paso Malo, el objetivo es tener más precisión en los resultados. Para la generación de la batimetría del Sector Oasis, se procesaron todos los datos batimétricos entregados por el cliente, la proyección es UTM Cuba norte NAD 27, figura 7.



**Figura 7. Batimetría del sector Oasis**

A partir de los datos batimétricos, la información de las características de los rompeolas, la pendiente submarina y el tipo de vegetación que existe en la zona de las dunas se establece el modelo, es importante señalar que al introducir toda esta información se reproduce la interacción entre las variables hidrodinámicas, las estructuras y la vegetación, simulando lo que sucede en la realidad. En la figura 8 se puede observar la colocación de los rompeolas, los espigones de apoyo.



**Figura 8. Colocación de los rompeolas y espigón de apoyo.**

## **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LOS ESCENARIOS ESTUDIADOS.**

Para el procesamiento de los resultados se establecieron 28 perfiles desde el espigón Oeste hasta la entrada de canal de Paso Malo con el objetivo de analizar con mayor precisión los resultados de la simulación desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo.

### **Escenario 2. Frente frío**

Las variables físicas empleadas para condiciones de frente frío fueron: altura de ola significativa de 3 m, y una surgencia de 0,67 m, dirección proveniente desde el NW-NNW-N, de acuerdo con la información suministrada por el cliente, se define un período total de 10 días que representa el paso de todos los frentes fríos de manera acumulada en una temporada de invierno promedio. Para analizar los cambios morfológicos en la zona de estudio se tiene en cuenta el resultado del proceso de erosión - acumulación al finalizar la simulación mediante un balance cuantitativo de la cantidad de arena que se acumula y la que se erosiona por cada perfil.

Teniendo en cuenta el cálculo inicial del volumen de vertimiento de acuerdo con los datos del vertimiento (sus perfiles), y la batimetría suministrada por GAMMA S.A el volumen inicial del vertimiento es de 90 000 m<sup>3</sup>, lo que difiere en 30 000 m<sup>3</sup> según el proyecto, donde se plantea un suministro de arena inicial de 120 000 m<sup>3</sup>, destacar que los cálculos de volumen realizado en este trabajo fueron llevados a cabo de manera precisa tomando los 28 perfiles definidos anteriormente, la batimetría suministrada y el área total de la zona donde se coloca el vertimiento de arena.

Los resultados para este escenario en lo referente al balance muestra un valor negativo de - 1077 m<sup>3</sup>, (tabla 5), lo cual significa que se produjo una pérdida de arena en el sistema de ese volumen de arena durante el período de simulación, fundamentalmente debido al transporte longitudinal que sobrepasa el extremo del espigón de paso Malo (espigón Este), así como fuertes corrientes en dirección Este, y hacia mar afuera que producen una fuerte erosión del vertimiento en el lado que protege el espigón Oeste.

En la figura 10 se puede observar un retroceso de la línea de costa en el sector Oeste hasta la mitad de la playa recuperada, con un valor máximo 47 m, y un valor medio de 19,2 m. La figura

9 muestra el comportamiento del proceso de erosión – acumulación, mostrando una pérdida sustancial de playa seca en la zona Oeste. Se puede concluir que el esquema de obras propuesto no es efectivo ante la ocurrencia del período de frentes fríos ya que no mitiga el proceso de transporte de sedimento longitudinal, ni tampoco evita las fuertes corrientes hacia el mar que generan la formación de tómbolos y salientes, así como el movimiento de arena en dirección al mar por la zona no protegida por los rompeolas, mostrado por las flechas de color rojo en la figura 10. Los efectos antes mencionados están generados por la cercanía de los rompeolas sumergido a la línea de costa, que produce sobreelevación del mar en la zona protegida, lo cual generando patrones de circulación de una sola celda, produciendo procesos no deseados que se manifiestan en retroceso de la línea de costa, y erosión de arena de la zona de playa seca, disminuyendo la efectividad del suministro, que tiene como objetivo principal dotar a la playa de un área de baño para los turistas, esto ha sido demostrado en estudios realizados por investigadores para las condiciones de las playas cubanos Valdés y Córdova (2015) y Hernández (2020).

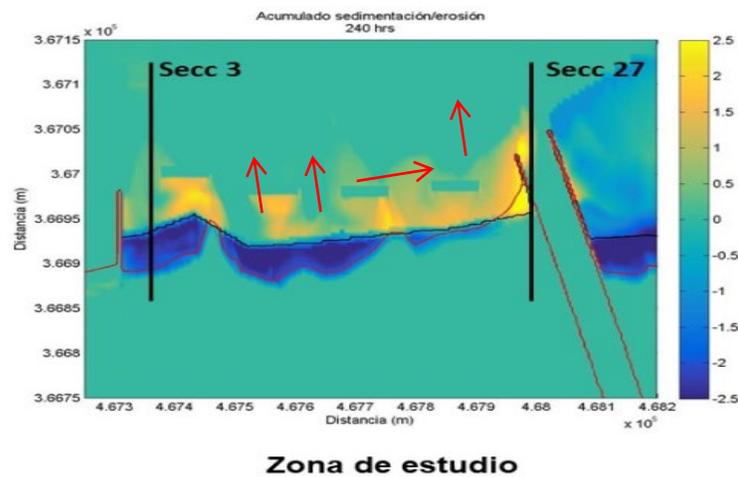


Figura 9. Erosión-sedimentación en la zona estudio durante un periodo de frente frío.

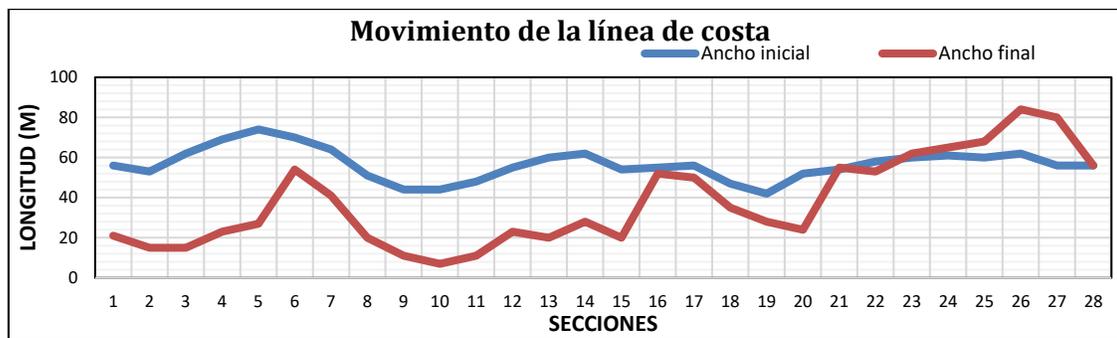


Figura 10. Movimiento de la línea de costa antes y después del paso de un frente frío.

### Escenario 3. Huracanes

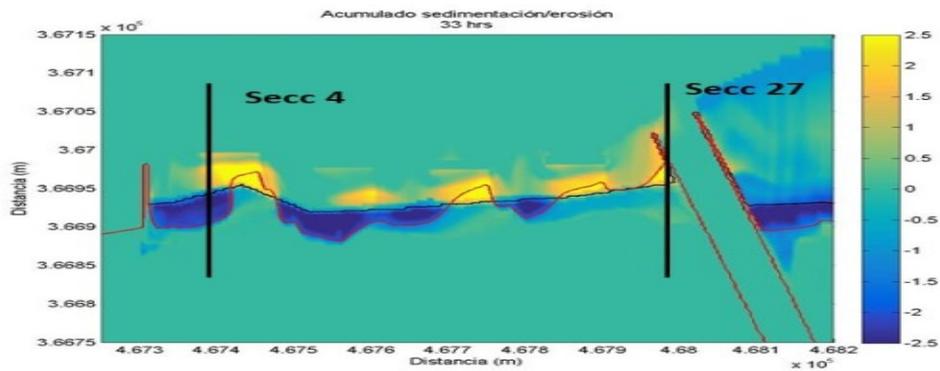
El balance entre la erosión y acumulación en el área de estudio, así como los cambios en la línea costa se expresan en valores medios y máximos, mostrándose los mismos para los tres huracanes en la tabla 5. Se observa que para los tres el movimiento de arena desde el punto de vista cuantitativo en términos de erosión y acumulación está en el mismo orden de magnitud, para el huracán Michelle está en el orden de los 16 000 m<sup>3</sup>, y para los huracanes Irma y Wilma en el orden de los 28 000 m<sup>3</sup>, estos resultados están relacionados con las mayores alturas de olas asociadas a estos dos huracanes debido a que producen mayor sobreelevación del mar y tiene mayor tiempo de influencia sobre la zona de estudio.

Los resultados del balance muestran que no son grandes las pérdidas de arena del sistema o dominio, destacar que la restructuración o movimiento de la arena colocada por la ejecución del vertimiento es considerable, generándose movimientos hacia el mar, y erosión de la playa seca rehabilitada por el vertimiento, fundamentalmente en la zona Oeste y centro de la playa, trayendo consigo la disminución de su atractivo como área de baño, se generan valores máximos de retroceso de la línea de costa con valores hasta 46,0 m, y promedio de 12,0 m. Se desarrolla una batimetría muy irregular al formarse en la zona protegida por los rompeolas tómbolos con un promedio de +1,0 m sobre el nivel medio del mar, y en las zonas no protegidas huecos con valores promedio de -2,0 m, ver figuras 11, 12 y 13. Se considera que el esquema propuesto de acuerdo con las simulaciones realizadas no cumple con este requerimiento estético y funcional.

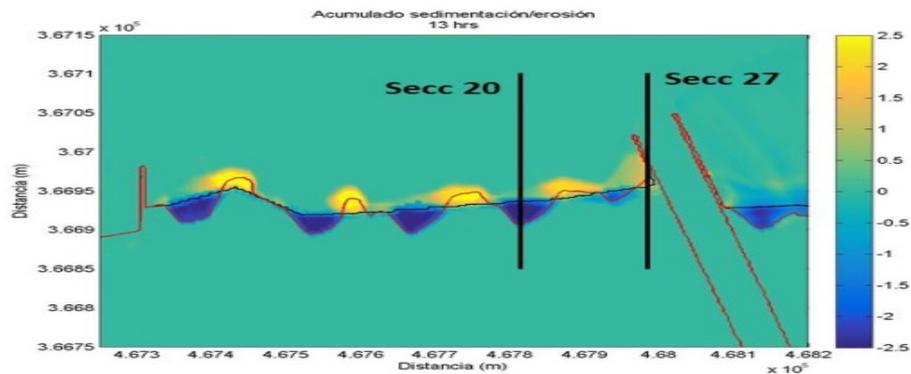
En las figuras 14, 15 y 16 se muestra el comportamiento de la línea de costa para los 28 perfiles definidos para el estudio, se observa el deterioro que sufre el vertimiento inicial, reformándose en forma de salientes y/o tómbolos, observándose desde el perfil 1 hasta el 20 el predominio del proceso de retroceso de la línea de costa.

**Tabla 5. Resumen de los resultados para cada huracán.**

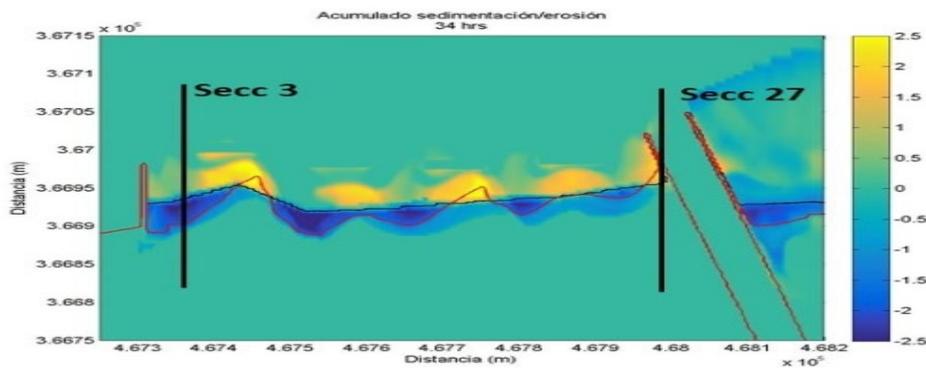
Variable analizada	Irma (2017)	Wilma (2005)	Michelle (2001)
TOTAL erosión (m3)	28506	26708	15572
TOTAL acumulación (m3)	29875	26373	16397
Balance (m3)	1369	-335	824
Vertimiento (m3)	90000	90000	90000
Long. media de playa inicial (m)	56,6	56,6	56,6
Long. media de playa final (m)	44,6	42,9	48,5
Retroceso medio (m)	12,0	13,8	8,1
Máximo retroceso puntual (m)	46,0	32,0	43,0



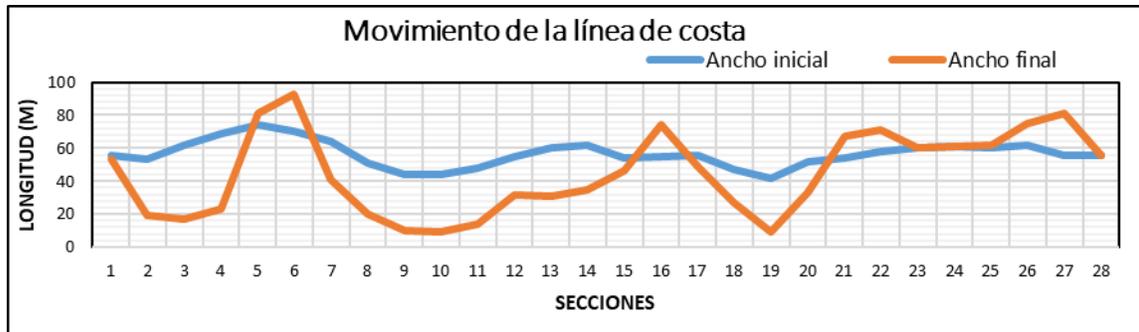
**Zona de estudio**  
**Figura 11. Zona de estudio luego del paso del huracán Irma.**



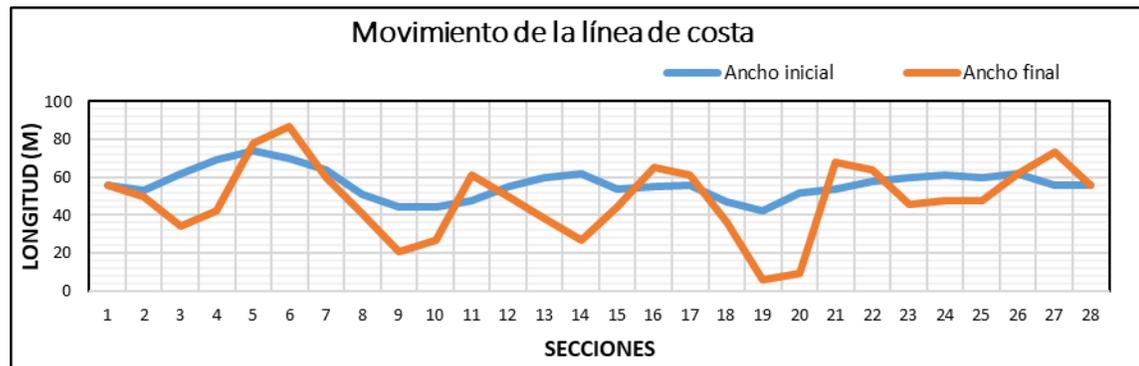
**Zona de estudio**  
**Figura 12. Acumulación de sedimentos durante el paso del huracán Michelle.**



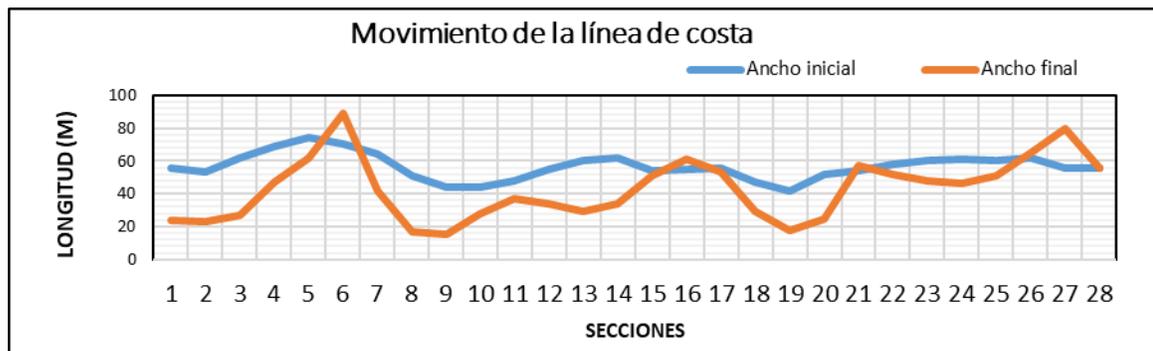
**Zona de estudio**  
**Figura 13. Acumulación de sedimentos y erosión de la línea de costa durante el huracán Wilma.**



**Figuras 14. Movimiento de la línea de costa antes y después del paso del huracán Irma.**



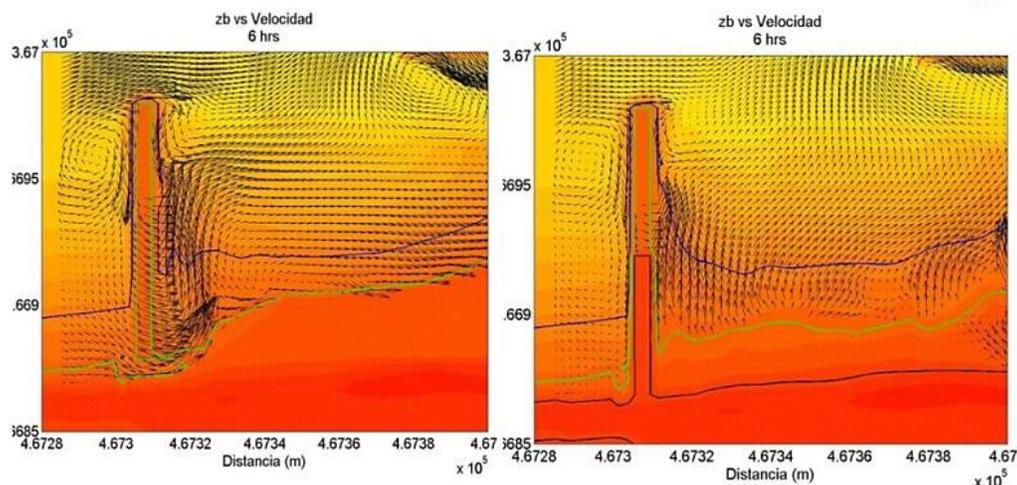
**Figuras 15. Movimiento de la línea de costa antes y después del paso del huracán Michelle**



**Figura 16. Movimiento de la línea de costa antes y después del paso del huracán Wilma.**

Se recomienda subir una parte del espigón de apoyo que se encuentra al Oeste de la zona de estudio ya que como resultado de la modelación se observa que el mismo es rebasado en la zona cercana a la costa, permitiendo el transporte de sedimento, (figura 17 izquierda), ocurriendo pérdidas de arena en la sección Oeste de la misma, lo que traería consigo la socavación del inicio de la obra y posibles daños estructurales.

Se propone aumentar la altura de la corona hasta 2 m en la sección del muro próximo a la costa. Como se observa en la (figura 17 derecha), con esta propuesta se elimina la erosión debido al rebase del oleaje.



**Figura 17. Propuesta de solución para el espigón de apoyo Oeste.**

## CONCLUSIONES

La condición más desfavorable, dígame que genera mayor movimiento de sedimento es la condición de frente frío, en el caso que se acumulen los efectos de los mismos en una temporada, produciendo un retiro de la línea de costa de promedio de 19 m, y máximo de 47 m en la zona más al Oeste del sector. Lo que implica pérdida de zona de playa seca, demostrando la no efectividad del esquema propuesto de protección.

Referente a los huracanes estudiados, los tres generan similar proceso erosivo en la zona protegida por los rompeolas, en el caso de los huracanes Irma y Wilma, estos generan un retroceso medio de la línea de costa de 12 m y 14 m, y máximo de 46 m y 32 m, respectivamente. En el caso del Irma, el efecto de la surgencia es un factor determinante, combinado con las alturas de olas significativas. Para el caso del Wilma, las alturas de olas significativas y la dirección de las mismas es el elemento determinante. La protección propuesta para el sector de playa, dígame los rompeolas no es efectiva, sin embargo, de acuerdo con la simulación los efectos de estas obras generan tómbolos sumergidos debido a su cercanía al vertimiento propuesto, así como el retroceso de la línea de costa en los sectores donde queda las aberturas debido al transporte transversal durante condiciones extremas.

Se recomienda tener en cuenta los estudios realizados por el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) donde se propone la conformación de playa artificial con la ayuda de rompeolas sumergidos y pie de playa para el sector Oasis de la playa Varadero se recomienda Córdova y Torres (2016a) y Córdova y Torres (2016b).

Referente al espigón de apoyo en el lado Oeste, se recomienda elevar su sector más cercano a la costa a la cota +2,00 m para evitar el sobrepaso del oleaje, y con ello la socavación de la estructura, como quedó demostrada durante la simulación para el huracán Irma.

Se recomienda realizar estudio de estabilidad estructural mediante modelación física a las obras de defensa para avalar el diseño planteado en el proyecto, o para la variante definitiva y evitar fallo de la obra.

## REFERENCIAS

**Córdova L., Salgueiro G., Lamazares R., Díaz G.** (2014) “Sistema de ingeniería de costas: evaluación del proceso de erosión en la playa Varadero”. vol. xxxv, No. 1, Ene-Abr 2014, p. 17-31, ISSN 1815591X, CIH, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana.

**Córdova L. y Torres R.** (2016a). “Tasa potencial de transporte de sedimentos del sector Oasis en playa Varadero”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 37, no. 1, pp. 82-94, ISSN 1815591X, CIH, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana.

**Córdova L. y Torres R.** (2016b). “Medidas de rehabilitación para el sector Oasis en playa Varadero”. vol. 37, No. 1, Ene-Abr 2016, p. 95-106, ISSN 1815591X, CIH, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana.

**Córdova L., González P., de Horta P., Orta C., Morejón B.** (2019). “Evaluación del proyecto playa artificial del sector Oasis, Varadero”, para condiciones de clima extremo”. Reporte Técnico. Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba

**Hernández K.** (2020). “Determinación de parámetros de diseño funcional en rompeolas sumergidos para la recuperación de las playas cubanas”. Tesis de doctorado, Universidad Tecnológica de La Habana, “José Antonio Echevarría”, Cujae, La Habana. Cuba.

**Valdés K. y Córdova L.** (2015). “Simulación matemática de la interacción oleaje-estructuras de protección costera”. vol. xxxvi, No. 3, Sep-Dic 2015, p. 74-87, ISSN 1815591X, CIH, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana.

**Suh, S.-W.; Kim M.-J., and Kim, H.-J.** (2017). “Prediction of sand beach variations by coupling of hydrodynamic and morphological models during extreme storms”. In: Lee, J.L.; Griffiths, T.; Lotan, A.; Suh, K.-S., and Lee, J. (eds.), the 2nd International Water Safety Symposium. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 79, pp. 284-288. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

**Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P.,** (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coastal Engineering, 58(10): 992-1012.

**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.

**Hagen S., Westerink J. J., Kolar R. L. and Horstmann O.** (2001). “Two-dimensional, unstructured mesh generation for tidal models”, *Internacional Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 35, no. 6, pp. 669-686, ISSN 0271-2091, John Wiley & Sons, Ltd., U.S.A.

**Gamma S.A** (2010). Proyecto Ejecutivo. “Playa del sector Oasis, Varadero”. Empresa Gamma S.A, La Habana, Cuba.

**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.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### **Contribución de los autores**

*Luis Fermín Córdova López* <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó la interpretación de los datos. Modelación numérica adcirc, swan y xbeach. Ejecutó el diseño de la investigación, análisis de los resultados y redacción del informe final.

*Christian Orta Priede* <https://orcid.org/0000-0002-3027-8033>

Realizó las modelaciones numéricas con Xbeach, la interpretación de los datos y análisis de resultados

*Patricia González Valdés* <https://orcid.org/0000-0002-9873-4015>

Realizó la interpretación de los datos, modelación con los modelos adcirc + swan y análisis de resultados